

2 成分の波状微細構造をもつロール金型の超精密切削加工

寺林 俊雄^{*1}, 閻 紀旺^{*2}

Ultra-precision cutting of roll molds having two-directional wavy microstructures

Toshitaka TERABAYASHI^{*1} and Jiwang YAN^{*2}^{*1, *2}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan

Received: 7 March 2019; Revised: 30 April 2019; Accepted: 30 May 2019

Abstract

The demand for functional films with surface microstructures is increasing in industry. Functional films with multi-directional wavy components can be applied to fluid drag reduction in turbulent flow applications. In order to implement the high-efficiency manufacturing of functional films, it is necessary to machine wavy microgrooves onto the surfaces of roll molds first. The molds can then be used to imprint patterned films. However, the machining of complicated microgrooves with multi-directional wavy components has never been reported so far. In this study, the authors propose a two-directional wavy microgrooving process by introducing simultaneous reciprocating motions of a diamond cutting tool driven by a slow tool servo. First, microgrooving experiments were conducted by oscillating the tool in two single directions, namely tangential and normal directions of the surface, and the material removal mechanism in each experiment was investigated. In tangential direction tool oscillation, burrs formed on the edge of the groove, which were suppressed by appropriately setting the oscillation amplitude and the tool clearance angle. In normal direction oscillation, shear angle changed significantly with the groove depth, which in turn influenced the groove surface roughness. By synthesizing the results of single-direction oscillation cutting, wavy grooving was performed by reciprocating the tool in both directions simultaneously. As a result, two-directional wavy grooves were successfully machined with form accuracy of 1.2 μm P-V and surface roughness of 12.2 nm Ra. Then, the microgrooved roll molds were used in ultraviolet resin imprinting tests to fabricate films with wavy microstructures. The wavy microstructures were precisely transferred to the resin films with a transcription error of less than 0.7 μm P-V. The results of this study provide a new approach to rapid manufacturing of functional films with wavy microstructures.

Keywords : Ultraprecision cutting, Micro wavy groove, Roll mold, Diamond turning, Structured surface

1. 緒 言

樹脂フィルムは、ディスプレイのバックライトユニットに代表される光学デバイスとして産業界で幅広く用いられている (諸貫, 2010). そのほかに、リブレットフィルムと呼ばれる、表面にマイクロメートルスケールの微細な突起列構造をもつ大面積のフィルムを、航空機などの表面構造として用いることで流体摩擦抵抗を低減させる研究が進められている (Gregory and Bharat, 2013). 従来検討されてきたリブレットは単純な直線構造のものがほとんどであった (笠木, 鈴木, 2004, Hayder et al., 2015) が、サメの表皮に存在する鱗の構造は図 1 (Luo et al., 2015a) のようにより複雑な形状をしており、直線に単純化された構造よりも高い流体摩擦抵抗低減効果をもつ (Zhang et al., 2011, Luo et al., 2015b). 直線のリブレットはサメの表皮構造を極めて単純化することで効果を表しているが、サメの表皮のように流れ方向に蛇行や高低差をもった複雑な構造を波状構造としてモデル化することによってさらなる効果の向上が期待されている (Grüneberger et al., 2012, McClure, 2002). さらに、直交する 2 成分の波状変化をもつ構造は直線や 1 成分の波状構造をもつリブレットと比較してより高い抵抗低減効果をもつ

No.19-00105 [DOI:10.1299/transjsme.19-00105], J-STAGE Advance Publication date : 7 June, 2019

^{*1} 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)^{*2} 正員, 慶應義塾大学 理工学部 機械工学科

E-mail of corresponding author: yan@mech.keio.ac.jp

報告されている (岡林他, 2016, 2017). サメの表皮のもつ効果の原因を要素ごとに理解することができれば目的に合わせた表面構造を実現することにつながると考えられる. サメの表皮に存在する突起列のサイズは, 部位による違いや個体差があり一定ではないが, 先行研究における測定結果の一例を図2に示す (Luo et al., 2015c). この場合高さ約 8 μm , 幅約 50 μm であり, その幅に対する高さの比は 0.16 となる. 波状リブレットの実現には, このような比率をもつ数十 μm オーダーの微細な構造が要求される. そこで, パラメータを多様に設定可能で, 蛇行と高低差を併せもつ複雑な波状構造をフィルム上に簡便に成形する方法の確立が求められている.

表面に微細構造をもつ機能性樹脂フィルムの生産には, 主にロール金型を用いた転写加工が採用される. 図3に示すように一定の距離を保持された軸線が平行な2つのロールの回転により, 円筒状のロール金型表面の微細構造が大面積のフィルム上に連続的に転写される (Yung et al., 2012). 構造が転写される過程でロール金型表面の品質と形状精度がフィルムに直接反映されるため, 表面に継ぎ目のない微細構造をもつロール金型の高精度加工が重要である. ロール金型への微細構造加工では一般的に, 他の方法と比較して形状精度や表面粗さの良さといった点で優位な単結晶ダイヤモンド工具を用いた超精密切削加工が必要とされる (Kong et al., 2012). 超精密切削によって波状構造を加工する方法として, スロートールサーボ (Slow Tool Servo: STS) 旋削が挙げられる. しかしながら, これまでに報告されたロール金型表面に対する微細波状溝の切削加工に関する研究は1成分のみの波状変化をもつ構造にとどまる (Lu et al., 2012a, Kong et al., 2016, Kurniawan et al., 2017). 複数成分の波状変化を同時にもつ構造の加工例は報告されていない. そのため, ロール金型表面への複数成分をもつ波状構造の加工現象に関する研究は全く見られない.

そこで本研究では, ロール金型表面に対し直交する2成分の波状変化を同時にもつ微細溝の超精密切削加工を試みた. 従来の STS 旋削加工では工具をロール表面に対して1軸方向に振動させながら溝入れ加工を行うことで, 1成分の波状変化をもつ溝加工が実現されてきた. 2成分の波状変化をもつ溝加工を実現するためには, 直交する2軸方向の振動が同時に付与される必要がある. そこで, 図4に示すようにロール表面に対する工具運動を2軸方向に同時制御することが可能な STS による, 直交する2成分の波状変化をもつ微細溝加工を提案する.

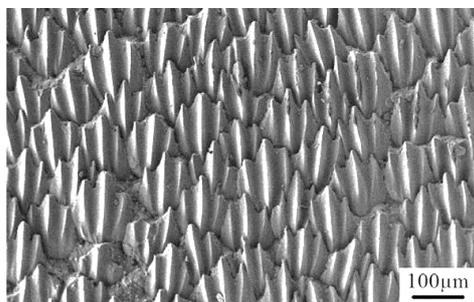


Fig.1 SEM image of sharkskin structure, showing complex structures with meandering and height difference along the flow direction. (Luo et al., 2015a)

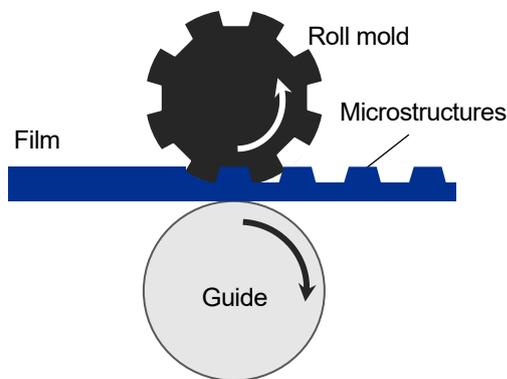


Fig.3 Roll imprinting process using a roll mold to directly replicate surface structures onto a polymer substrate in a continuous way.

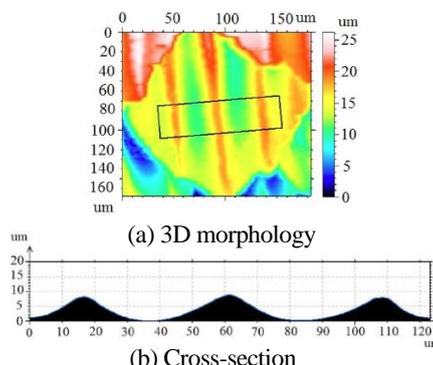


Fig.2 Measurement results of a sharkskin scale. (Luo et al., 2015c)

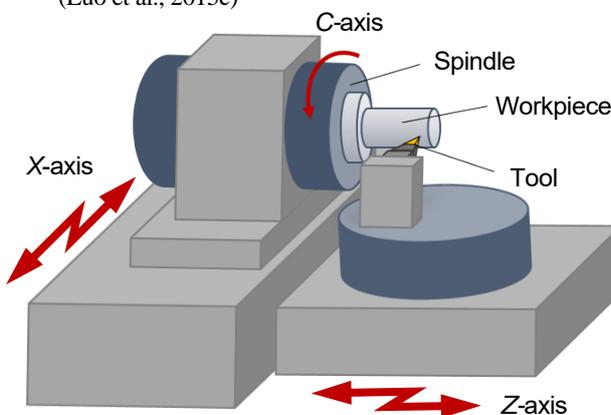


Fig.4 STS turning process using simultaneous two-axis tool motion.

本研究では、まず溝の長手方向に対して垂直な接線方向 (Z 方向) と円柱表面に対する法線方向 (X 方向) それぞれ 1 成分のみの波状変化を有する 2 種類の溝加工実験を実施し、材料除去機構の特徴と適切な加工パラメータを検討した。次に、ロール金型に対して上記 2 成分の波状変化を同時にもつ複合波状溝の加工を行った。最後に、本方法により製作したロール金型を用いてフィルムへの転写実験を行い、微細波状構造の転写性を調査した。

2. 微細波状構造のモデリングと工具軌跡生成

2・1 微細波状構造の定義

微細波状構造の突起列は横手方向の断面形状と長手方向の波状形状によって定義される。断面形状は高さ、幅、輪郭形状によって決定され、目的に応じた選択をすることが重要である。長手方向の波状形状については、波状変化によって 3 種類に分類される。

図 5(a)のようにフィルム表面に対して突起が接線方向に波状変化をもち蛇行している構造を、接線波状構造と定義する。この構造は、突起が高低差を持たず断面形状が長手方向に沿ってつねに一定である。接線波状成分は接線方向振幅 a_H と接線方向波長 l_H をもち、それぞれの関係を投影図上に表したものを図 5(b)に示す。

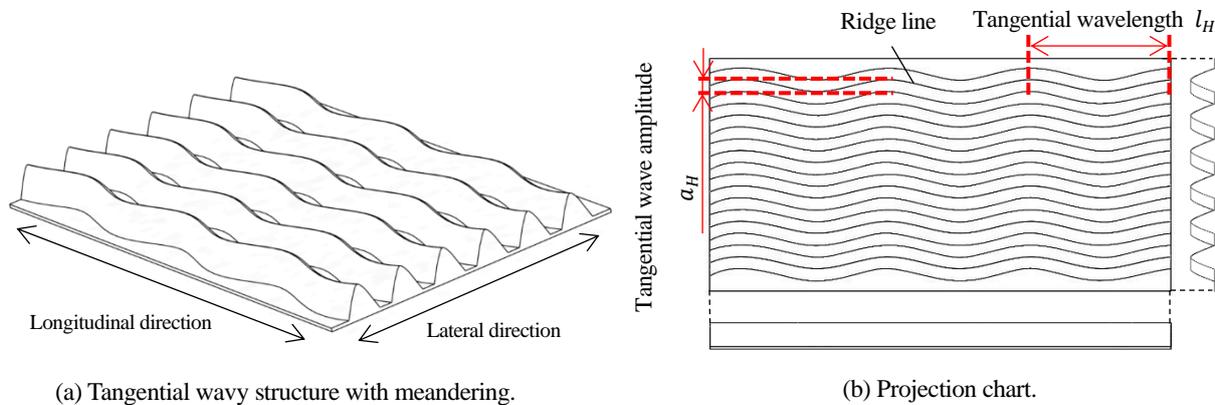


Fig.5 Film surface with tangential wavy structures.

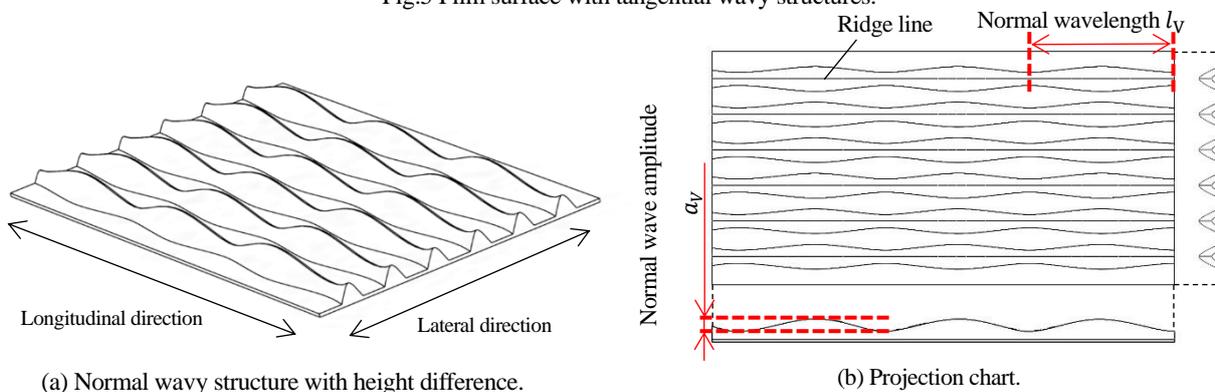


Fig.6 Film surface with normal wavy structures.

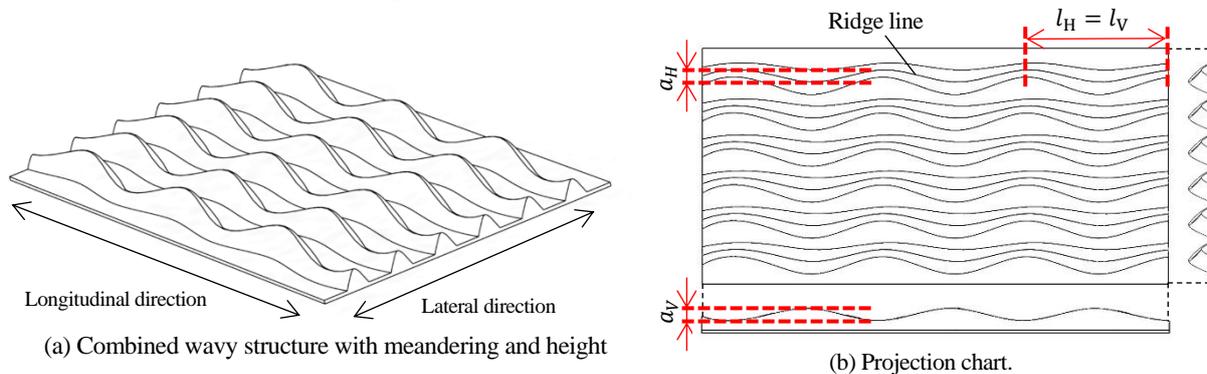


Fig.7 Film surface with combined wavy structures.

次に、図 6(a)のようにフィルム表面に対して突起が法線方向に波状変化をもち周期的な高低差をもつ構造を、法線波状構造と定義する。この構造は、突起が高低差をもち断面形状が長手方向に沿って周期的に変化する。また、工具形状により突起断面形状が高さに応じて幅の変化をもつ場合、高低差に応じて突起幅も周期的な変動をもつ。法線波状成分は法線方向振幅 a_V と法線方向波長 l_V をもち、それぞれの関係を投影図上に表したものを図 6(b)に示す。

図 7(a)のように、フィルム表面に対して突起が接線方向と法線方向に同時に波状変化を有し、周期的な高低差をもちながら蛇行する構造を、複合波状構造と定義する。複合波状構造は、接線方向と法線方向の2つの直交した波状成分を同時に併せ持つ構造である。複合波状構造は接線方向振幅 a_H と接線方向波長 l_H 、法線方向振幅 a_V 、法線方向波長 l_V をもち、それぞれの関係を投影図上に表したものを図 7(b)に示す。図中では $l_H = l_V$ であるが、複合波状構造では接線波状成分と法線波状成分のもつそれぞれの振幅と波長の大きさを選択することによって多様な突起構造を表現することができる。

2・2 ロール金型への微細波状溝加工の原理

ロール金型表面に対する波状溝加工では独立した溝を順次加工していく。切削工具はX方向に目標の深さまで徐々に送られ、溝深さが設計値に達し1つの溝が完成した後、切削工具は安全な位置に後退する。その後設定されたピッチの分だけZ軸方向に移動することで隣り合う次の溝の切削開始位置に到達する。同様の工程が繰り返されることで、一定のピッチをもつ溝列が加工される。

STS 旋削による波状溝加工では、工作物の回転軸であるC軸の角度にX軸とZ軸の運動を同期制御することで、工具を相対的に振動させながら溝加工を行う。図 8 に3軸同時制御を用いたSTS 旋削による波状溝加工の模式図を示す。工具先端が被削材表面に接触し切削が開始されると、被削材が1回転する間に溝深さは切込み量の分だけ増加する。図 9 の断面図に示すように、R バイトを用いる場合工具と同じ半径をもつ円弧溝が形成される。N-1 周目の溝表面（青破線）とN周目の溝表面（赤線）の差が、被削材の1回転における切削面積となり切りくずとして排出される。

2・3 工具軌跡生成

加工形状として、図 10(a),(b),(c)に示すような接線波状溝、法線波状溝、複合波状溝の3種類を設定した。各モデルは設計パラメータとして接線方向振幅 h_z 、法線方向振幅 h_x 、溝深さ d 、ピッチ p 、波長 l をもち、溝断面形状は使用する工具形状によって決定される。工具がX軸およびZ軸方向に振動しながら被削材が回転することによって波状溝が加工される。図中には被削材表面に対する相対的な切削方向を示している。接線波状溝は接線方向振幅 h_z をもち一定の深さを保つため溝幅が一定である。法線波状溝と複合波状溝は、法線方向振幅 h_x をもつため深さの周期的な変化に対応して工具形状の影響で溝幅も周期的に変化する。

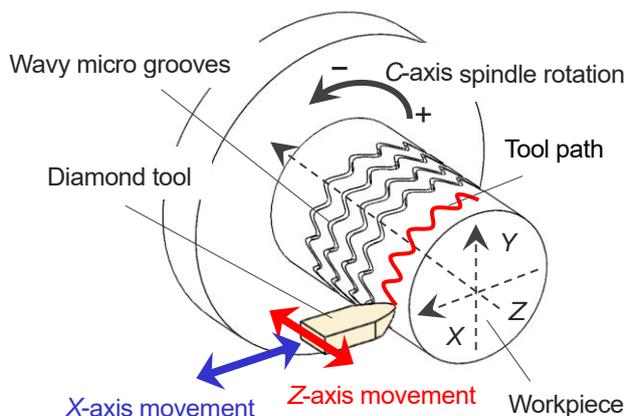


Fig.8 Wavy grooving process by synchronously controlling three axes (C, X, and Z) of the machine tool.

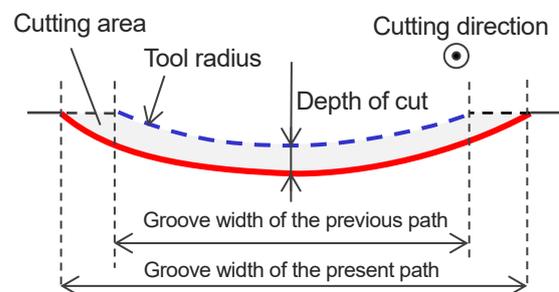


Fig.9 Cross-sectional view of R-shaped groove. The area between the previous tool path and the present tool path is the cutting area in one revolution of the workpiece.

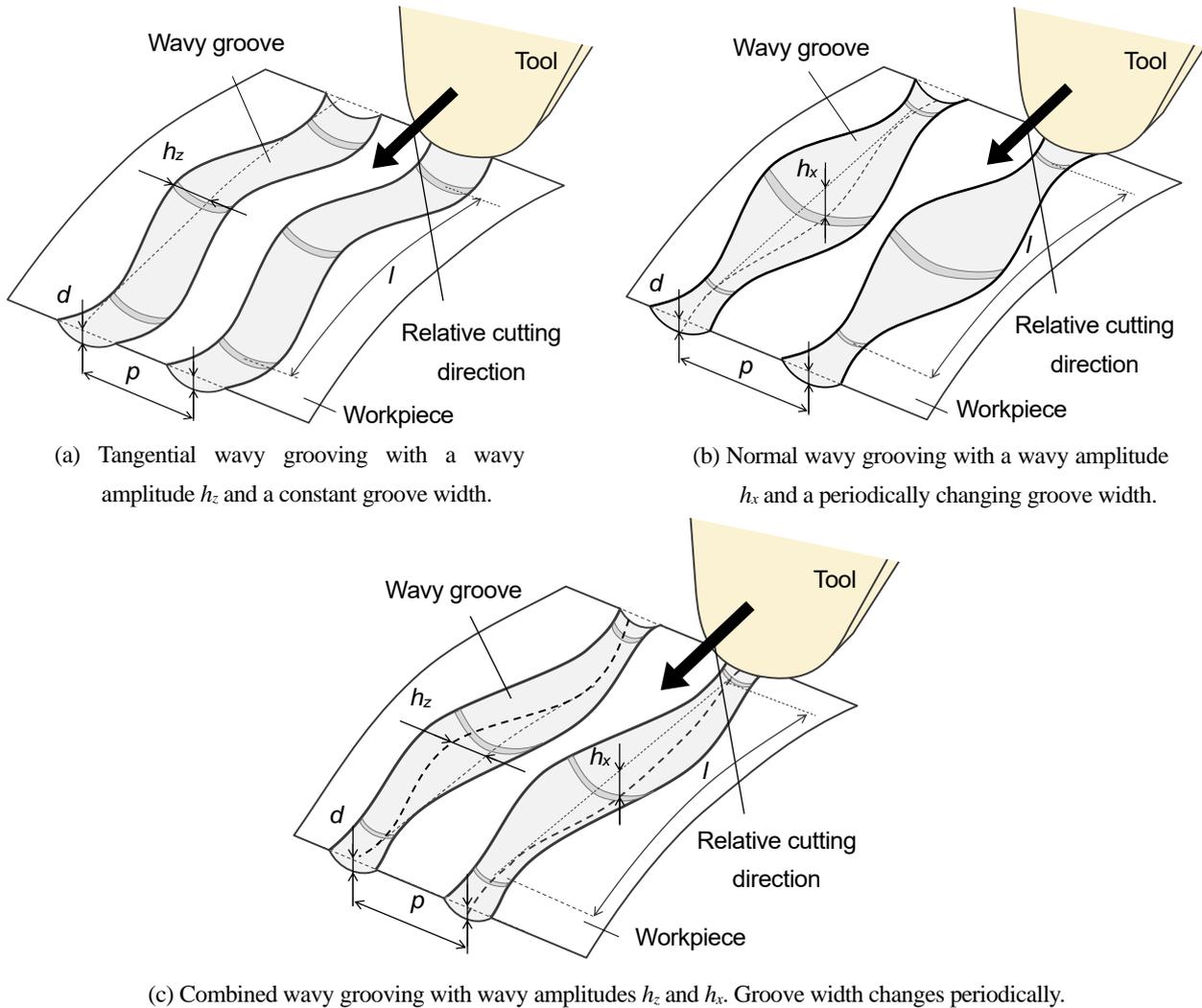


Fig.10 Design parameters of three types of wavy grooves.

波状溝加工に用いる工具軌跡を生成するため、時間 t [s]における C 軸角度 $C(t)$ と X 軸位置 $X(t)$, Z 軸位置 $Z(t)$ を加工プログラム上で指定する. 工具軌跡は X 軸の工具送り成分 $X_f(t)$ と, X 軸と Z 軸の波状変化成分 $X_w(t)$, $Z_w(t)$ を足し合わせることで決定される.

一本の溝を加工するための工具の動きは, X 軸方向に進めて切り込みを増していくフェーズ 1 と, 送りを停止するフェーズ 2, 溝表面から離していくフェーズ 3 の 3 つに分けられる. フェーズ 1 と 3 では同じ軌道上を同じ速度で移動する. ひとつの溝を加工する間に荒加工と仕上げ加工を設けるため, 途中で速度の切り替えを行うことになり, 工作機械に加速度を生じ, 追従誤差の原因となり得る.

目的形状の波状変化成分を正弦波としたとき, 被削材回転角度 $\theta(t)$ における X 軸と Z 軸の波状変化 $X_w(t)$, $Z_w(t)$ は, 円周上の波長の数を n とすると式 (1) のように表される.

$$\begin{aligned} X_w(t) &= h_x \cos n\theta(t) \\ Z_w(t) &= h_z \cos n\theta(t) \end{aligned} \tag{1}$$

式 (1) において, 接線波状溝加工の場合には法線波状振幅 $h_x=0$ であるため, X 軸方向に工具振動は付与されない. 一方で法線波状溝加工の場合には接線波状成分が存在しないため $h_z=0$ であり, Z 軸位置は固定されたまま個別の溝が加工される. 複合波状溝加工の場合には接線方向振幅 h_z と法線方向振幅 h_x がいずれも値をもつため, 工具は X 軸と Z 軸の両方向に同時に振動しながら加工が行われることとなる.

工具送り方向は切り込み方向と一致し、 X 軸の移動量で表される。送り量を $f[\mu\text{m}/\text{rev}]$ とした場合、工具送り成分は式 (2) で表される。

$$X_f(t) = \frac{f\theta(t)}{2\pi} \tag{2}$$

以上のことを踏まえ、溝 1 本を加工するために必要となる工具軌跡は、設定溝深さを $d_s[\mu\text{m}]$ 、スピンドル回転数を $N[\text{rpm}]$ として式 (3) のように表される。フェーズ 1 は、工具送り成分 $X_f(t)$ と X 軸の振動成分 $X_w(t)$ の足し合わせで表される。溝深さが設定値に到達したのち、フェーズ 2 として被削材が 1 回転する間工具送りをゼロにし、振動成分 $X_w(t)$ のみをもつ期間を設ける。溝表面から工具を逃がすフェーズ 3 は X 軸の振動成分 $X_w(t)$ に工具送り成分 $X_f(t)$ を減算する形で表され、 Z 軸の工具運動は Z 軸振動成分 $X_w(t)$ のみをもつ。 C 軸は 0.1° 刻みで一回転あたりの円周を 3600 点に分割し工具位置が制御される。溝列加工の際には、1 本の溝加工が終了するごとに Z 軸位置をピッチ分移動させることを繰り返すことで加工を行う。この場合、溝ごとに波状変化の位相差を設定することも可能である。

$$X(t) = \begin{cases} X_w(t) + X_f(t) = h_x \cos n\theta(t) + \frac{f\theta(t)}{2\pi} & \left(t < \frac{d_s}{fN} \right) & \text{Phase 1} \\ X_w(t) = h_x \cos n\theta(t) & \left(\frac{d_s}{fN} \leq t \leq \frac{d_s + f}{fN} \right) & \text{Phase 2} \\ X_w(t) - X_f(t) = h_x \cos n\theta(t) - \frac{f\theta(t)}{2\pi} & \left(t > \frac{d_s}{fN} \right) & \text{Phase 3} \end{cases} \tag{3}$$

$$Z(t) = Z_w(t) = h_z \cos n\theta(t)$$

$$C(t) = \theta(t)$$

3. 実験方法および装置

3・1 波状溝加工実験

ロール金型表面への波状微細溝加工には 4 軸 (XZBC) 同時制御自由曲面加工機 Nanoform X (AMETEK Precitech Inc. 製) を使用した。本加工機はリニアモーター駆動の油静圧摺動面を採用し、 0.016 nm のフィードバック分解能をもつ。実験では X 軸、 Z 軸、 C 軸の 3 軸同時制御を行い、 B 軸は使用しなかった。図 11 に加工実験の様子を示す。工具には、図 12 に示すノーズ半径が 0.1 mm の単結晶ダイヤモンド R バイトを用い X 軸に平行に設置した。実験条件を表 1 に示す。

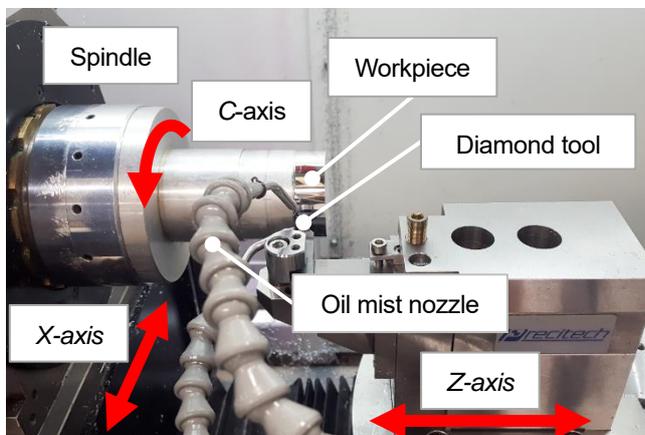


Fig.11 Experimental set up. The cutting tool was set at a position orthogonal to the workpiece surface.

Table 1 Machining condition.

Cutting parameters	Values
Depth of cut [μm]	0~1
Spindle rotation rate [rpm]	5
Cutting speed [m/min]	0.79
Cutting tool	
Tool material	Single-crystal diamond
Nose radius [mm]	0.1
Rake angle [$^\circ$]	0
Clearance angle [$^\circ$]	5.5
Cutting atmosphere	Dry / Oil mist

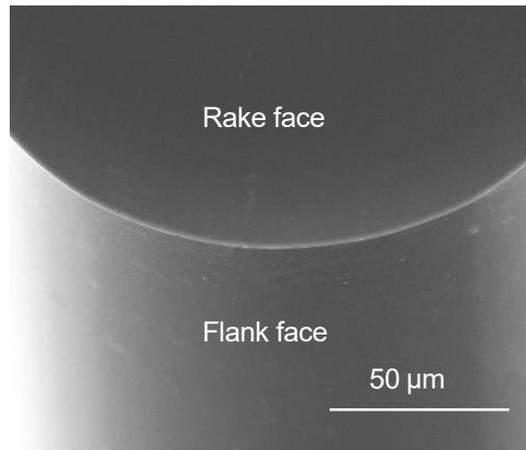


Fig.12 SEM image of tool edge.

直径 50 mm, 長さ 15 mm のアルミニウム合金 A5056 丸棒を被削材として使用した。前加工として、丸棒円筒面に鏡面加工を行った。被削材 1 回転あたりの切込み量の大きさは溝エッジ部におけるバリの発生に影響を及ぼす (Wu et al., 2017, Liu et al., 2018) ため、本実験では切込み量を $1 \mu\text{m}/\text{rev}$ に設定した。切削幅が大きい場合、切込み量をこのように小さく設定することにより工具にかかる負荷を抑制し、誤差の軽減を図ることができる (Yan et al., 2009)。

STS 旋削による加工では一般的にスピンドル回転数が高いほど加工機のステージ運動に指令値との誤差が生じる。このような指令位置とステージ位置との誤差は追従誤差 (Following error) と呼ばれる。使用した加工機は加工プログラム作動時において、指令座標およびガラススケールから読み取った工具位置座標をリアルタイムで記録することが可能である。ここから工具の追従誤差が算出される。座標の読み取りは、任意のサンプリング周波数を設定することで一定の時間間隔で行われる。本実験ではサンプリング周波数 2000 Hz, すなわち 0.0005 秒間隔で座標を記録した。測定は加工時と同じ条件で行ったが、工作物を取り付けない空運転で行った。この場合、切削抵抗の影響による追従誤差は生じない。ただし、実際の加工における切削抵抗は、加工機運動部の駆動力に比べて十分に小さいと考えられることから、加工時の追従誤差と空運転時の追従誤差はほぼ一致するとみなした。スピンドル回転数を 5 rpm とした場合、加工中の工具追従誤差は 500 nm 以下であった。溝加工では切削速度がバリや欠けの発生に影響を及ぼす (竹内, 2008)。本実験では加工精度の確保を目的として低速の加工を行った。

加工面および切削中に排出された切りくずの観察には走査型電子顕微鏡 Inspect S50 (FEI Company 製) を用いた。加工された微細構造の三次元形状はレーザ顕微鏡 LEXT OLS4100 (Olympus Corporation 製) を用いて測定した。走査型白色干渉計 Talysurf CCI1000 (AMETEK Taylor Hobson Ltd. 製) を用いて、加工面の微小領域の形状および表面粗さの測定を行った。

すべての種類の溝加工において切り込み量 ($1 \mu\text{m}/\text{rev}$) によって単調増加する溝深さに応じて切削面積は徐々に大きくなっていく。被削材が最初の 1 周を回り終え溝深さ $d = 1 \mu\text{m}$ に達するまでは溝断面形状と切削面積が一致する。2 周目以降の溝深さ $d > 1 \mu\text{m}$ での切削面積は、その深さにおける溝断面形状から被削材 1 回転前における溝断面形状を減算した値となる。X 軸振動による波状成分をもつ法線波状溝と複合波状溝については、溝深さの増加による切削面積の増大に加えて X 軸振動に起因する切削面積の変動も存在する。図 13 に工具ノーズ半径 r と切削面積 A の模式図を示す。接線波状溝では、溝深さは時間によって単調に増加する。法線波状成分をもつ場合では、工具送りによる単調増加に工具振動成分が足し合わされる。ここで、式 (4) で表される中心角 $\theta_c(t)$ によって本実験における切削面積の変化は図 14 のように示される。図中の切削面積を表すグラフから溝深さ $d = 1 \mu\text{m}$ を境に傾きが変化の様子がわかる。

$$\theta_c(t) = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{d(t)}{r} \right) \quad (4)$$

3・2 フィルム転写実験

表面に波状溝加工が施されたロール金型の作成後、加工されたロール金型を用いて転写実験を行い、樹脂フィルム上に波状構造を成形した。転写実験の模式図を図 15 に示す。PET フィルム基板の上にアクリル系紫外線硬化樹脂 (PADICO Co., Ltd. 製) を約 200 μm の厚さ塗布し、製作した微細波状構造をもつロール金型の円筒面を接触させて波長 395-410 nm の紫外線を 12 cm の距離から照射面積 79 cm^2 で 10 分間照射することでフィルム上に樹脂を硬化させ微細構造を成形した。

4. 実験結果および考察

4・1 接線波状溝切削実験

接線波状溝について、複合溝加工に適した波状振幅の検討を行うため、Z 軸振幅 $h_z = 40, 80, 120 \mu\text{m}$ とした単溝加工実験をそれぞれ行った。接線波状溝加工実験のパラメータは、表 2 に示すように設定した。加工された溝表面の SEM 観察画像を図 16 に示す。溝のエッジ部分に最大で高さ 10.3 μm 、幅 33.1 μm 程度のバリの発生が見られた。振幅によるバリの高さの測定値を表 3 に示す。振幅が大きいほど大きなバリが発生したことがわかる。

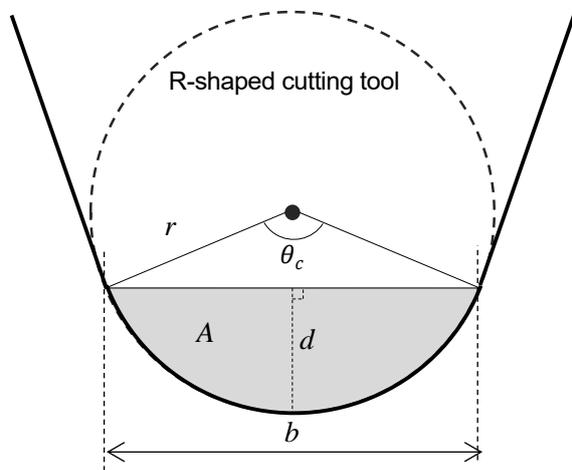
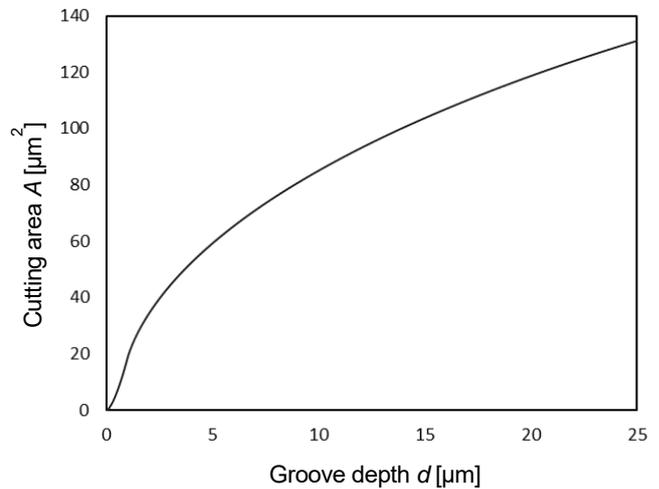


Fig.13 Schematic of tool nose radius r and cutting area A for a R-shaped cutting tool.



(a) Tangential wavy groove.

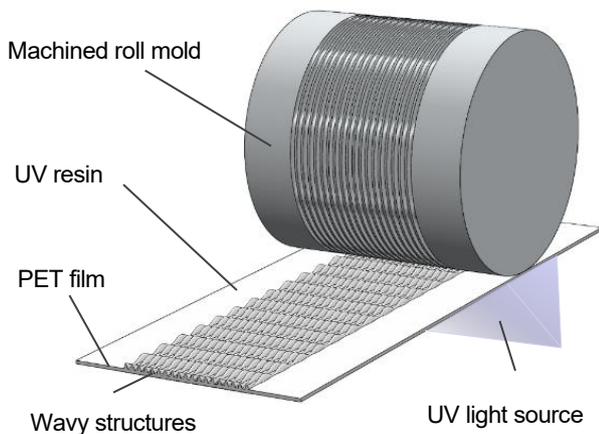
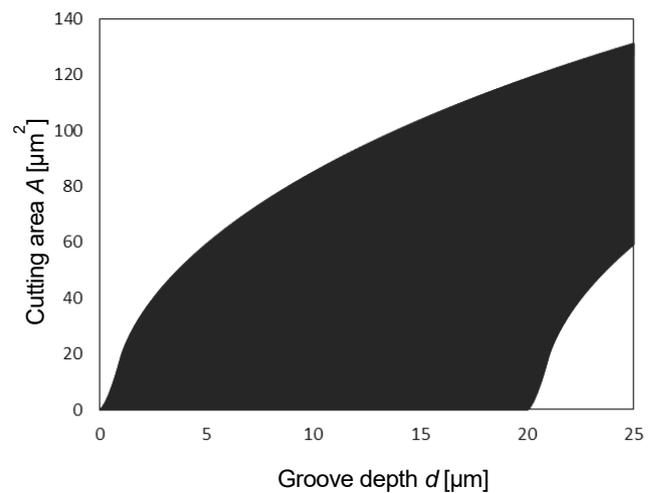


Fig.15 Film imprinting experiment.



(b) Normal/Combined wavy grooves.

Fig.14 Change of cutting area A with groove depth d .

Z 軸振幅 $h_z=80, 120 \mu\text{m}$ でバリが発生した。バリが顕著であった Z 軸振幅 $h_z=120 \mu\text{m}$ のときのバリの拡大 SEM 画像を図 17 に、三次元測定結果を図 18 に示す。材料が切りくずとして排出されずに押し流されることで溝エッジ部にバリとして堆積した様子が観察された。この原因として、工具逃げ面が溝表面に接触した可能性が考えられる。

蛇行する溝に対して工具は相対的に傾きをもつ。図 19(a)のように蛇行角度が工具逃げ角より小さい位置では逃げ面の影響を受けず溝全面が切れ刃で加工される。一方、図 19(b)のように溝の蛇行角度が大きい位置では相対的な工具の傾きが大きくなるため、工具逃げ面が溝表面に接触する。逃げ面に接触した材料は切りくずとして除去されず、押し流される。その結果、溝エッジ部にバリとして残留したと考えられる。

波状振幅 $h_z=40 \mu\text{m}$ では図 20(a)のように溝の蛇行角度が $-4^\circ \sim 4^\circ$ の間の値を連続的に変化するため、工具逃げ角の 5.5° を相対的な傾きの絶対値が上回ることはなかった。逃げ面の影響を受けず溝全面が切れ刃で加工されたことでバリの発生のない溝の加工を行うことができた。波状振幅 $h_z=80 \mu\text{m}$ では図 20(b)のように溝の蛇行角度が $-8^\circ \sim 8^\circ$ の間の値を連続的に変化するため、工具逃げ角の 5.5° を相対的な傾きの絶対値が上回った領域では逃げ面との接触が生じ最大で高さ $1.2 \mu\text{m}$ 、幅 $8.3 \mu\text{m}$ のバリが発生した。波状振幅 $h_z=120 \mu\text{m}$ では図 20(c)のように溝の蛇行角度が $-12^\circ \sim 12^\circ$ の間の値を連続的に変化するため、逃げ面との接触が生じた領域が最も広く、最大で高さ $10.3 \mu\text{m}$ 、幅 $33.1 \mu\text{m}$ のバリが発生した。

Table 2 Experiment parameters for tangential wavy grooving.

Groove depth d [μm]	25	25	25
X axis amplitude h_x [μm]	0	0	0
Z axis amplitude h_z [μm]	40	80	120
Wavelength l [mm]	1.57	1.57	1.57
Number of waves n	100	100	100
Groove width [μm]	132	132	132

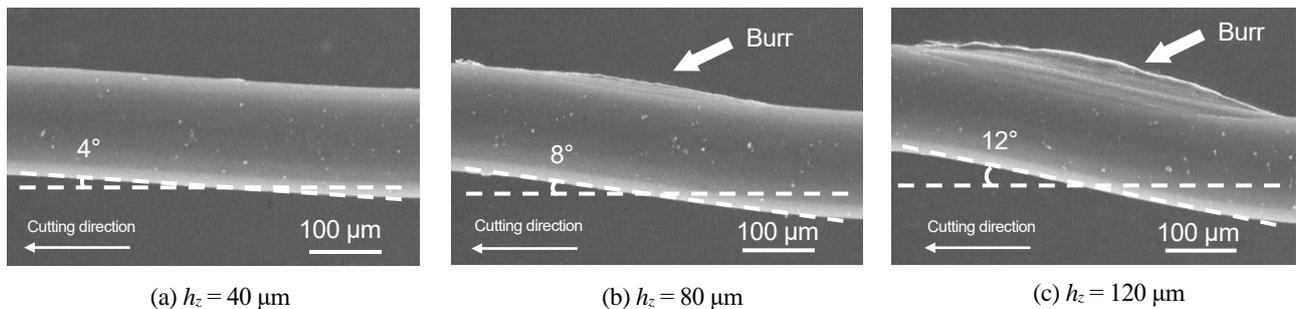


Fig.16 SEM images of three types of tangential wavy grooves with different tool oscillation amplitudes. The meandering angle of the groove is determined by the wavy amplitude. Burrs occurred significantly at $h_z=80, 120 \mu\text{m}$.

Table 3 Size of burr for each tangential wavy amplitude h_z .

Amplitude h_z [μm]	40	80	120
Burr height [μm]	—	1.2	10.3
Burr width [μm]	—	8.3	33.1

加工した溝の断面プロファイルと長手方向の輪郭を白色干渉計により測定し、設計値と比較した形状誤差の最大値と最小値の差を示す P-V (Peak to valley) 値は $0.8 \mu\text{m}$ と算出された。この結果から、本条件下では波状振幅 $h_z = 40 \mu\text{m}$ が適当な加工条件であり、以下の加工では接線波状振幅にはこの条件を用いた。また、本実験結果から、蛇行角度よりも大きな逃げ角の工具を用いることが必要であることが示された。

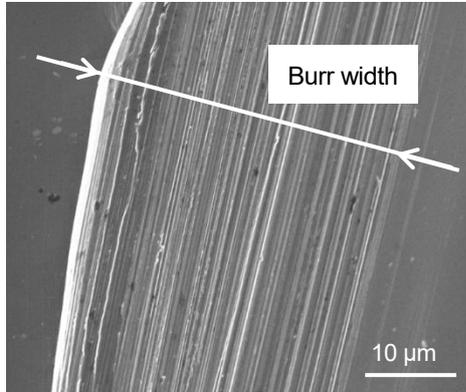


Fig.17 SEM image of burr at tangential wave amplitude $h_z = 120 \mu\text{m}$.

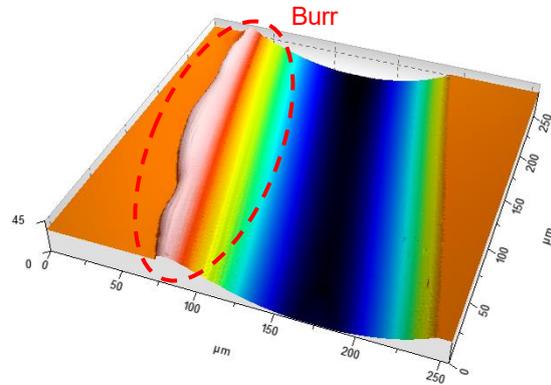
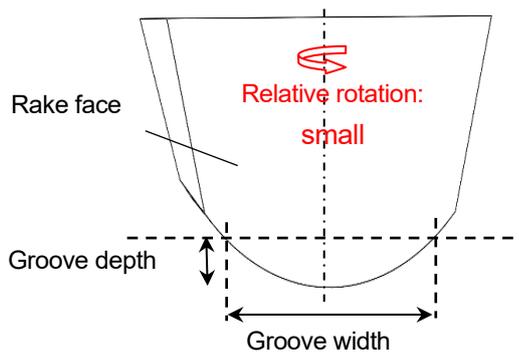
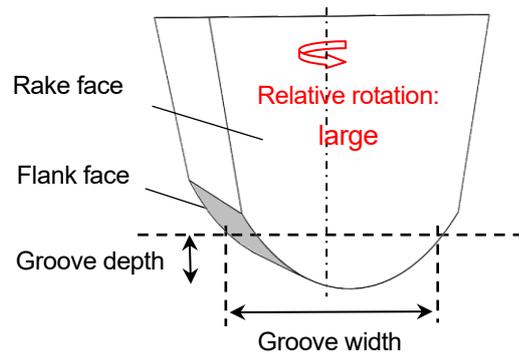


Fig.18 Three-dimensional topography of burrs at tangential wave amplitude $h_z = 120 \mu\text{m}$.

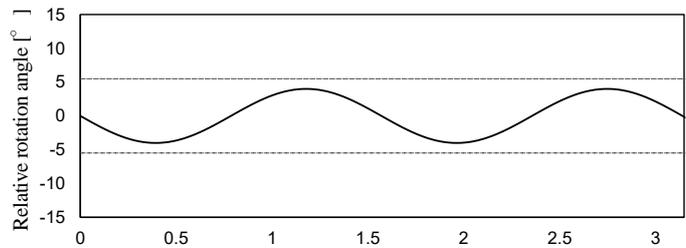


(a) Relative rotation angle < Tool clearance angle
Tool flank face does not contact with groove surface.

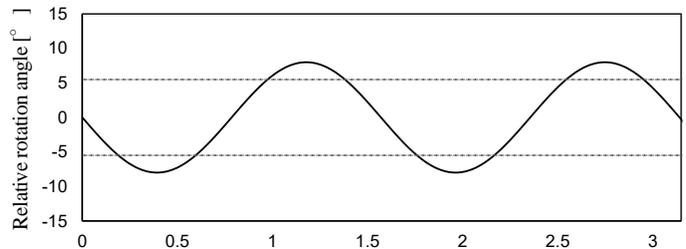


(b) Relative rotation angle > Tool clearance angle
Tool flank face contacts with groove surface.

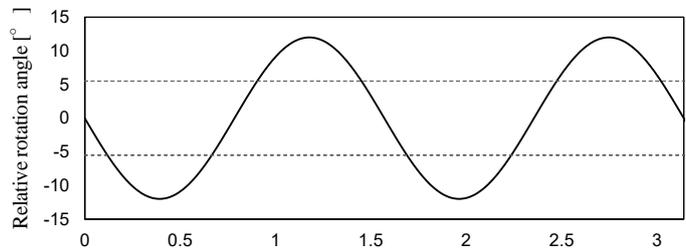
Fig.19 Relative rotation of the tool. Corresponding to the meandering angle of the groove, the tool has a relative rotation angle.



(a) Tangential wave amplitude $h_z = 40 \mu\text{m}$.



(b) Tangential wave amplitude $h_z = 80 \mu\text{m}$.



(c) Tangential wave amplitude $h_z = 120 \mu\text{m}$.

Fig.20 Relation between relative rotation angle and tool clearance angle ($= \pm 5^\circ$).

4・2 法線波状溝切削実験

法線波状溝加工実験のパラメータを表4に示す。法線波状振幅 $h_x = 20 \mu\text{m}$ の法線波状溝加工を行ったロール表面のSEM観察画像を図21に示す。同図より溝エッジにバリのない輪郭をもつ法線波状溝が加工された。形状誤差のP-V値は $0.2 \mu\text{m}$ であった。法線波状溝では、工具形状により溝深さの変化に対応して溝幅が連続的に変化しており、溝が深い点では溝幅が広く、浅いところでは溝幅が狭くなっている。ロール表面上に加工された法線波状溝について、切削方向に沿った溝表面の断面プロファイルと設定値からの形状誤差を図22に示す。溝表面に対して工具が相対的に上るように移動する領域において形状誤差が増大していることが確認された。

法線波状溝加工の際には、溝表面に対する工具姿勢が連続的に変化する。そのため、工具逃げ角が溝表面の傾斜よりも小さな値のとき工具逃げ面が溝表面に接触する可能性があり (Lu et al., 2014), 工具逃げ角が溝表面の傾斜よりも大きな値をとるように工具を選択することが重要である (Lu et al., 2012b)。また、工具姿勢の変化はすくい角と逃げ角の変化を意味し、すくい角の変化は切削特性に大きな影響を与えるせん断角の変化をもたらすと考えられる。そこで、特徴的な工具姿勢をとる場合のせん断角をそれぞれ求めることで、切削中の工具姿勢の変化が切削特性へ及ぼす影響を検討する。せん断角は、法線溝加工を二次元切削と仮定した場合、切削中に排出される切りくず厚さの測定と切り込み量によって計算することができる (竹内, 2008)。採集した切りくずの例を図23(a)に示す。切りくずは溝形状と同様の輪郭を持っていることから、図23(b)に示すI-IVの4つの位置各点における切りくず厚さからせん断角を算出した。図24に切りくず厚さ測定の一例を示す。その結果、図25に示すように、すくい角 0° の点IIとIVでのせん断角は約 18° で同様の値をとることがわかる。すくい角 4° の点IIIでは、せん断角が 23° で他の点と比べて大きな値をとった。すくい角が -4° の点Iでは、せん断角が 12° と他と比べて小さな値である。工具が溝表面に対して上る点Iにおいてせん断角が減少し、被削材の塑性流動が加工面内部までの広範囲に及んだ結果、工具が上る領域での形状誤差の増大につながったと考えられる。このことから、許容できない大きさの形状誤差が生じる場合、工具すくい角を大きくとることで形状誤差を抑えることができると考えられる。

Table 4 Experiment parameters for normal wavy grooving.

Groove depth d [μm]	5-25
X axis amplitude h_x [μm]	20
Z axis amplitude h_z [μm]	0
Wavelength l [mm]	1.57
Number of waves n	100
Groove width [μm]	62-132

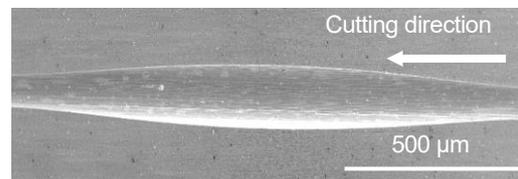


Fig.21 SEM image of the normal wavy groove.

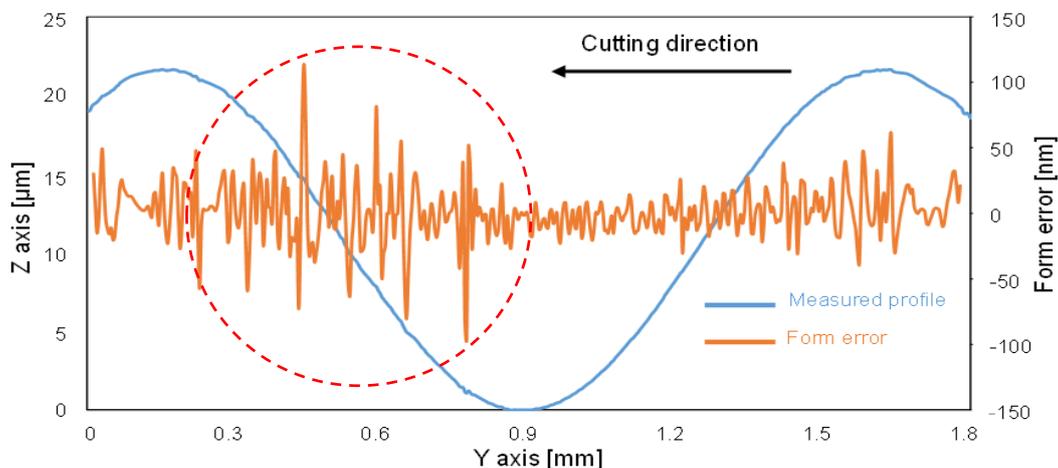
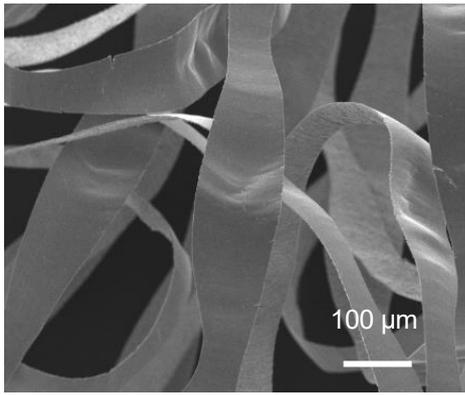


Fig.22 Cross sectional profile along the cutting direction. The form error increased in the area where the tool climbs upward.



(a) SEM image of cutting chips.

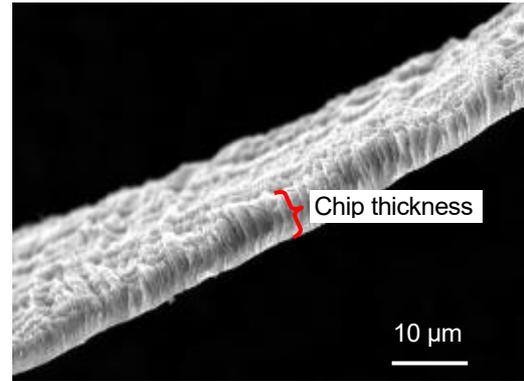
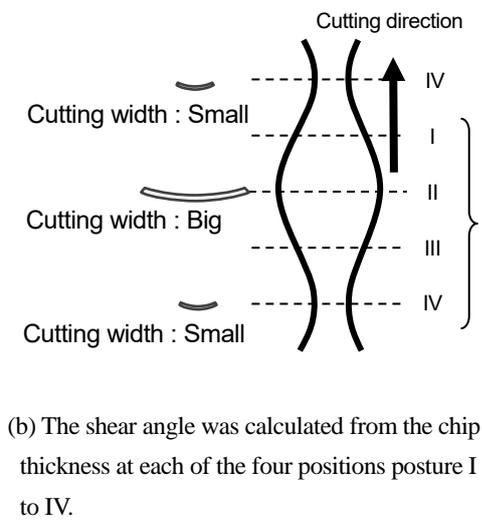


Fig.24 An example of chip thickness measurement.



(b) The shear angle was calculated from the chip thickness at each of the four positions posture I to IV.

Fig.23 Procedure for measuring chip thickness.

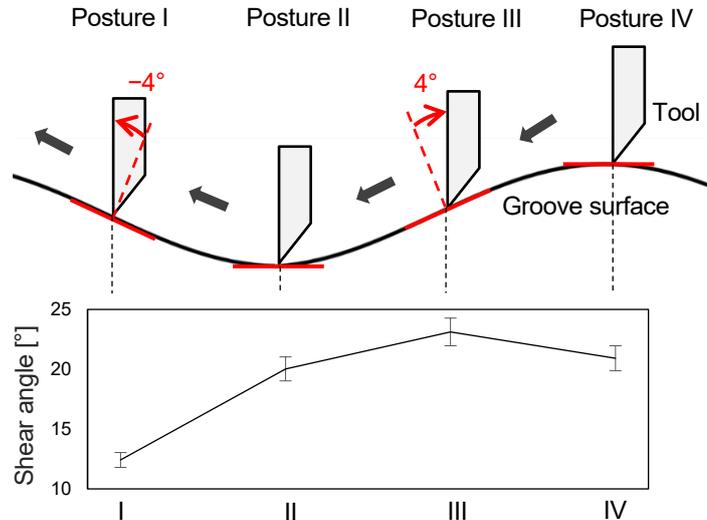


Fig.25 The tool posture at posture I to IV and the shear angle at each point. The shear angle decreases at posture I where the tool climbs upwards.

4・3 複合波状溝切削実験

接線波状振幅 $h_z = 40 \mu\text{m}$ 、法線波状振幅 $h_x = 20 \mu\text{m}$ の複合波状溝加工を行ったロール表面の SEM 観察画像を図 26 に示す。同図より溝エッジにバリのない輪郭をもつ複合溝が加工されたことがわかる。複合波状溝では、工具が図中上下に蛇行すると同時に、溝深さの変化に対応して溝幅が連続的に変化している。形状誤差 $1.2 \mu\text{m}$ P-V となった。

複合波状溝の形状誤差が接線波状溝と法線波状溝それぞれの場合と比較して高い値となった理由として、直交する 2 つの直線軸の往復運動の一方がもう一方の動きに影響を与えたことが考えられる。そこで、各形状の切削中における工作機械の追従誤差による影響を検討する。図 27 は、各軸の追従誤差を時間経過とともに示したものである。図 27(a) に示す接線波状溝加工の場合、往復運動を行う直線軸は Z 軸のみであるが、X 軸の誤差がある位相差をもって表れている。図 27(b) の法線波状溝加工の場合には、往復運動を行う直線軸は X 軸のみであるが Z 軸にも誤差が生じていることがわかる。図 27(c) の複合波状溝加工では、設定した振幅の大きさの違いから Z 軸振動に起因する X 軸誤差がより大きくなった結果、接線方向の動きに対して法線方向の動きに見かけ上遅れが生じた。このことから、複合波状溝加工では 2 つの波状変化の位相のずれが形状誤差として加工面に現れると考えられる。本加工方法では多様な波状振幅を設定することができるが、波状振幅に起因する大きな追従誤差が予測される場合は、加工プログラム上で位相差の補正を行うことで形状誤差を抑制することが必要であると考えられる。

4・4 複合波状構造をもつロール金型の製作

複数の溝を持つロール金型の加工においては、表5に示す設計値を採用し、50列の溝加工実験を行った。接線波状振幅 $h_z = 40 \mu\text{m}$ の1成分の変化をもつ接線波状溝50列のロール金型、法線波状振幅 $h_x = 20 \mu\text{m}$ の1成分の変化をもつ法線波状溝50列のロール金型、それら2成分の変化を同時にもつ複合波状溝50列のロール金型をそれぞれ加工した。図28に複合波状溝が加工されたロール金型の外観を示す。前加工として鏡面仕上げされた平坦部が両端に残り、中央部に波状溝50列が加工されている。

接線波状溝が加工されたロール金型のSEM観察画像を図29(a)に、接線波状溝切削時に排出される切りくずのSEM画像を図29(b)に示す。位相が揃い、エッジ部にバリが無く滑らかに蛇行した溝が観察され、溝の輪郭形状と同じ一定の幅をもつ流れ型切りくずが生成された。流れ型切りくずは安定したせん断すべりが連続的に発生する場合に生成される(奥山他, 2013)。図29(c)に示す溝表面の拡大図より、溝内部は傷のない良好な表面をもつことがわかる。ロール表面上に加工された接線波状溝について、波状構造の1波長を測定した三次元形状測定結果を図29(d)に示す。図中の構造はロール金型表面の曲面成分を平面に補正して表示されている。

法線波状溝が加工されたロール金型のSEM観察画像を図30(a)に、法線波状溝切削時に排出される切りくずのSEM画像を図30(b)に示す。エッジ部にバリが無く滑らかな溝が観察され、使用した工具形状により、高さの変化に応じて幅が変化する流れ型切りくずが生成された。図30(c)に示す溝表面の拡大図より、溝内部は傷のない良

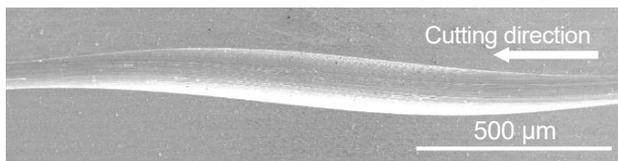
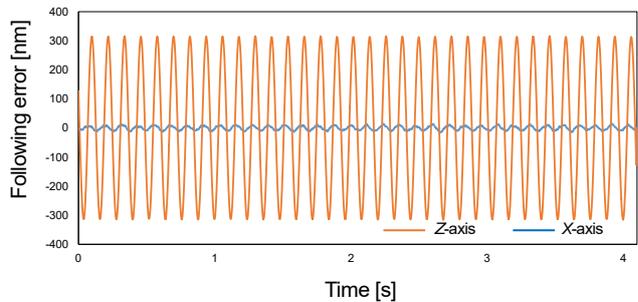


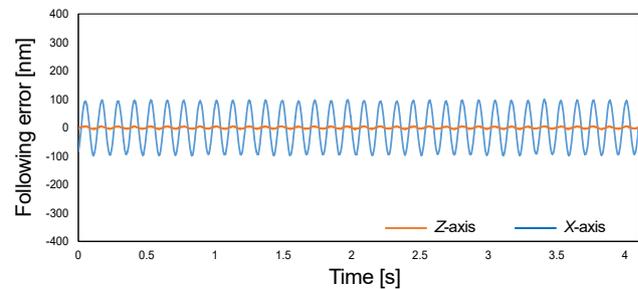
Fig.26 SEM image of the combined wavy groove.

Table 5 Parameters of wavy structures for roll molds.

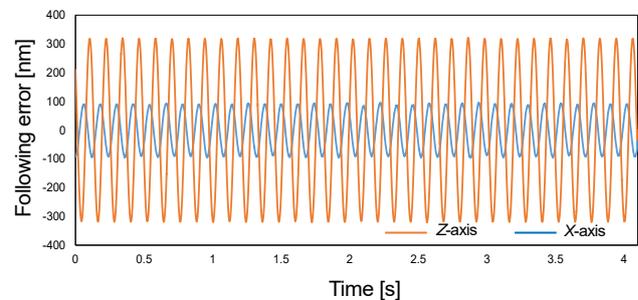
Wavy shape	Tangential	Normal	Combined
Groove depth $d [\mu\text{m}]$	25	5-25	5-25
X axis amplitude $h_x [\mu\text{m}]$	0	20	20
Z axis amplitude $h_z [\mu\text{m}]$	40	0	40
Wavelength $l [\text{mm}]$	1.57	1.57	1.57
Groove pitch $p [\text{mm}]$	0.22	0.22	0.22
Number of waves n	100	100	100
Groove width $[\mu\text{m}]$	132	62-132	62-132



(a) Tangential wavy grooving.



(b) Normal wavy grooving.



(c) Combined wavy grooving.

Fig.27 Following error. (a)(b) Following error occurs on the axis that supposed to be stopped. (c) Phase shift occurs due to following error.

好な表面をもつことがわかる。波状構造の1波長を測定した三次元形状測定結果を図30(d)に示す。溝底面の滑らかな高低差がみてとれる。

2成分の波状変化を併せもつ複合波状溝が加工されたロール金型のSEM観察画像を図31(a)に、複合波状溝切削時に排出される切りくずのSEM画像を図31(b)に示す。エッジ部にバリが無く滑らかに蛇行する溝が観察され、加工された溝と同じ輪郭をもつ安定した流れ型切りくずが生成された。図31(c)に示す溝表面の拡大図より、傷のない良好な仕上げ面が観察され、溝表面の表面粗さは12.2 nm Raであった。波状構造の三次元形状測定結果を図31(d)に示す。蛇行に沿って溝底面が高低差をもち、滑らかに変化する様子がみてとれる。

4・5 フィルム転写実験

加工したロール金型を用いてフィルム転写実験を行った。図32(a)に転写実験によって製作したフィルムの外観写真を示す。ロール金型表面上で溝加工がされた部分にあたる領域でフィルム上に波状突起列構造が成形された。フィルムの表面構造のSEM観察画像と三次元計測結果を図32(b), (c)に示す。ロール金型に加工された波状溝を反転したアーチ状の波状突起列がフィルム上に形成されており、フィルムの波状微細構造は滑らかで気泡やゆがみのない表面を持っていることがわかる。設計値との形状誤差のP-V値は0.7 μmであり、微細波状構造の高い転写精度が確認された。

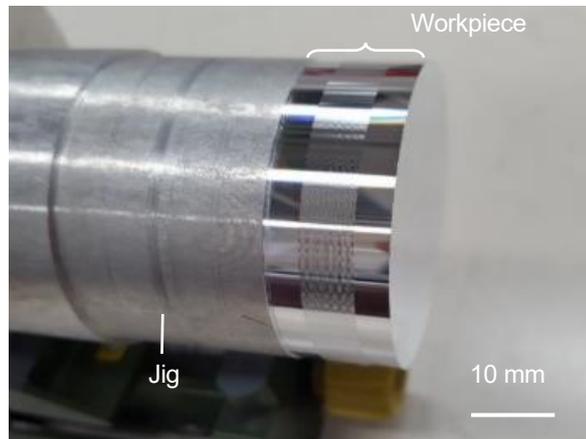


Fig.28 Al5056 Roll mold on the jig.

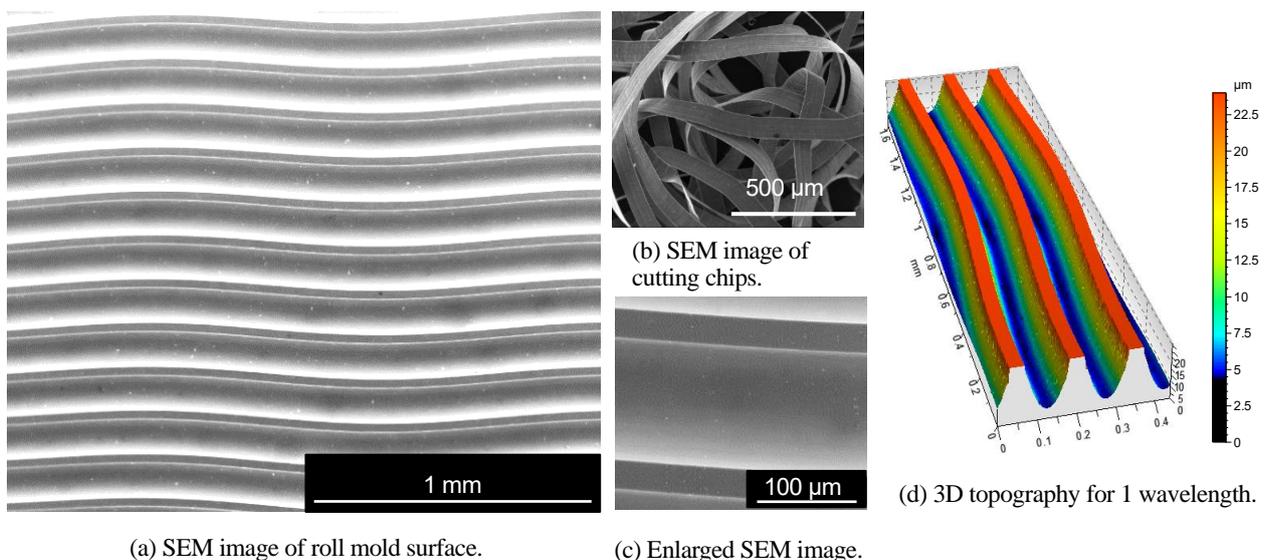


Fig.29 Machined roll mold surface with tangential wavy grooves.

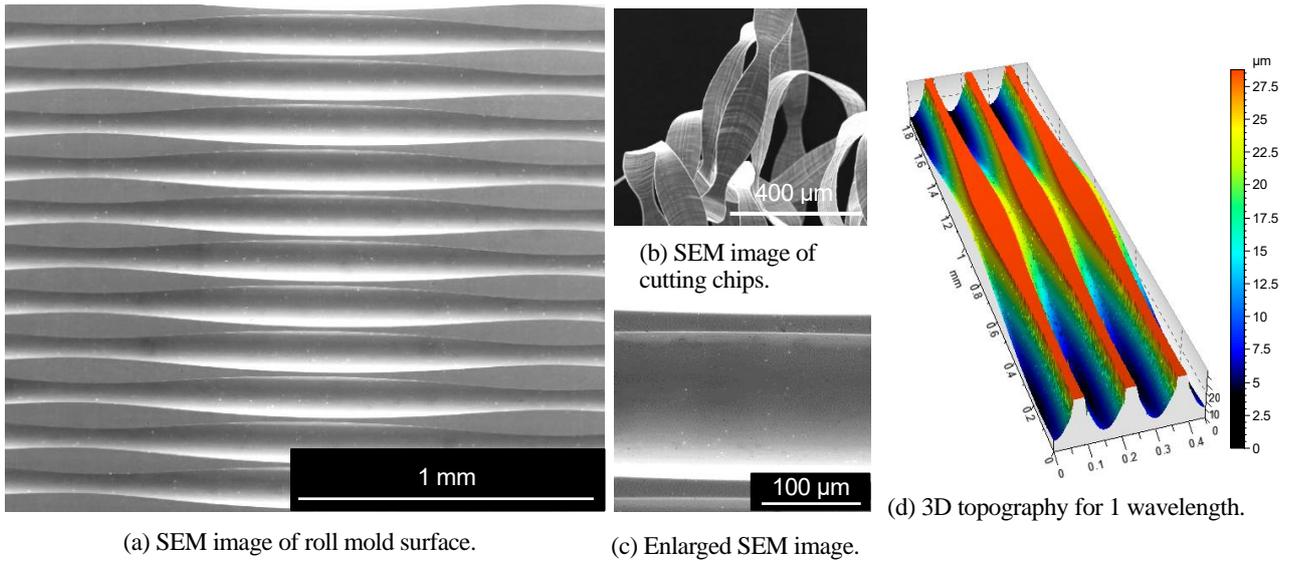


Fig.30 Machined roll mold surface with normal wavy grooves.

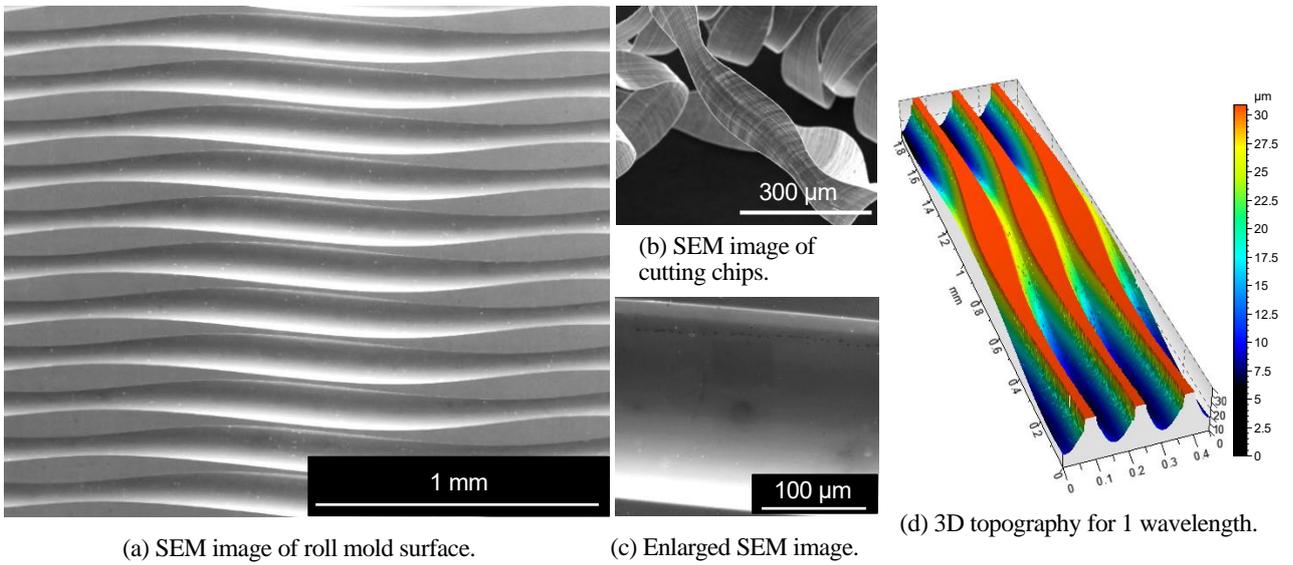


Fig.31 Machined roll mold surface with combined wavy grooves.

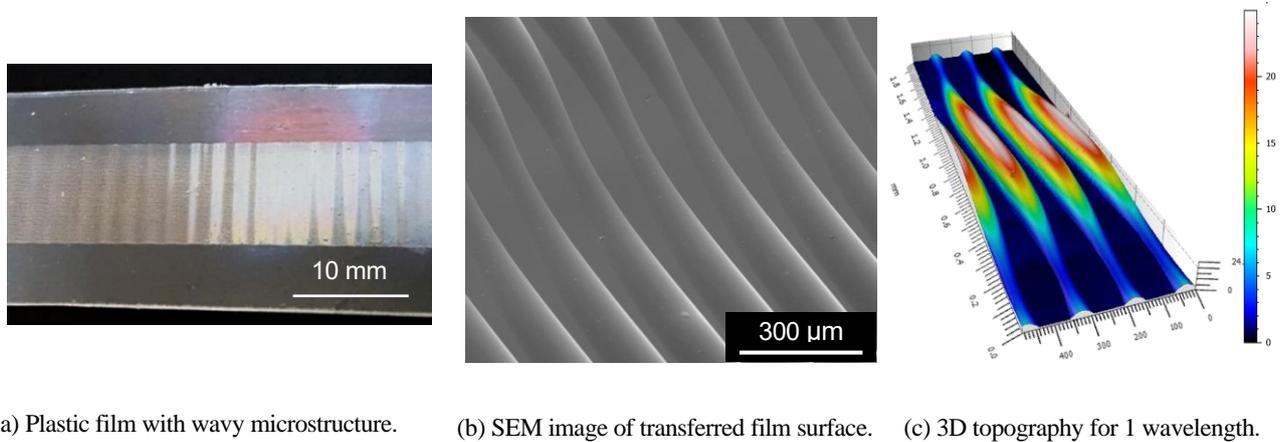


Fig.32 Combined wavy grooves on the surface of the roll mold were transferred onto the film as arches.

5. 結 言

波状変化を接線方向と法線方向に併せもつ複合波状溝をロール表面に加工するため、2つの運動軸を同時に往復運動させながら行う STS 旋削による溝加工を提案した。接線方向と法線方向の個別1成分の波状溝と2成分の複合波状溝の3種の溝加工を実現し、それぞれの加工における特徴を検討した。表面に波状溝加工が施されたロールを金型として用いた転写実験を行い、フィルム上に成形された構造の形状精度の評価を行った。以下の結論が得られる。

(1) 接線波状溝加工において、接線波状溝の蛇行の角度が工具逃げ角より大きい場合には工具逃げ面の接触によって溝エッジ部に顕著なバリが発生する。工具逃げ角を大きくすることで、バリを抑制することが可能である。

(2) 法線波状溝加工では、材料表面に対する工具姿勢の変化に応じてせん断角が変動することで、工具が上る領域でせん断角が減少し切削方向に沿った形状誤差が悪化する。溝表面の許容できる形状誤差に応じて工具すくい角を大きくとることで形状誤差の悪化を抑えることができる。

(3) 複合波状溝加工では、直交する2つの直線軸の往復運動が相互に影響を与えることで追従誤差が生じる。波状振幅に起因する大きな追従誤差が予測される場合は、加工プログラム上で位相差の補正を行うことで形状誤差を抑制することが必要である。

(4) 1.2 μm P-V の形状誤差と 12.2 nm Ra の表面粗さをもつ複合波状溝をアルミニウム合金 Al5056 製ロール表面上に加工することに成功した。

(5) 表面に波状溝が加工されたロールを金型として用いた転写実験により、微細波状突起列をもつフィルムを作成することに成功した。設計値との形状誤差は 0.7 μm PV であり、波状溝構造のもつ高い転写性が確認された。

今後、本方法により製作された微細波状構造フィルムのもつ流体抵抗低減効果の実験的な検証を行い、表面形状と流体抵抗低減効果の対応関係を確立させることによって微細構造の最適化を行っていく。また、加工プログラム補正を行うことで三角波などより急峻な変化を伴う波形の加工についても試みる予定である。

文 献

- Gregory, D.B. and Bharat, B., Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces, *Advanced Functional Materials*, Vol.23 (2013), pp.4507–4528.
- Grüneberger, R., Kramer, F., Wassen, E., Hage, W., Meyer, R. and Thiele, F., Influence of wave-like riblets on turbulent, Nature-Inspired Fluid Mechanics, Vol.119 (2012), pp.311–329.
- Hayder, A.A., Hassan, D.M. and Zulkefli, B.Y.H., Bio-inspired passive drag reduction techniques: a review, *ChemBioEng Reviews*, Vol.2, No. 3 (2015), pp.185–203.
- 笠木伸英, 鈴木雄二, 乱流の知的制御, *システム/制御/情報*, Vol.48, No.4 (2004), pp.131–137.
- Kong, L.B., Cheung, C.F. and Lee, W.B., A theoretical and experimental investigation of orthogonal slow tool servo machining of wavy microstructured patterns on precision rollers, *Precision Engineering*, Vol.43 (2016), pp.315–327.
- Kong, L.B., Cheung, C.F., Lee, W.B., To, S. and Chen, X.D., A framework of an ultra-precision roller machining equipment for the fabrication of patterned microstructured optics, *Proceedings of SPIE*, Vol.8418 (2012), pp.1–6.
- Kurniawan, R., Kiswanto, G. and Ko, T.J., Surface roughness of two-frequency elliptical vibration texturing (TFEVT) method for micro-dimple pattern process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.116 (2017), pp.77–95.
- Liu, Y., Zhao, W., Zhou, T., Liu, X. and Wang, X., Surface defect elimination in microgrooving of electroless nickel phosphide plating layer by brittleness enhancement, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.94 (2018), pp.1327–1333.
- Lu, H., Choi, S., Lee, S. and Lee, D., Microstructure of fast tool servo machining on copper alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.22 (2012b), pp.820–824.
- Lu, H., Lee, D., Kim, J. and Kim, S., Modeling and machining evaluation of microstructure fabrication by fast tool servo-based diamond machining, *Precision Engineering*, Vol.38 (2014), pp.212–216.
- Lu, H., Lee, D.W., Lee, S.M. and Park, J.W., Diamond machining of sinusoidal grid surface using fast tool servo system for fabrication of hydrophobic surface, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.22 (2012a), pp.787–792.

- Luo, Y., Liu, Y., Anderson, J., Li, X. and Li, Y., Improvement of water-repellent and hydrodynamic drag reduction properties on bio-inspired surface and exploring sharkskin effect mechanism, *Applied Physics A*, Vol.120 (2015c), pp.369–377.
- Luo, Y., Wang, X., Liu, G., Wang, J. and Song, W., Anisotropic wetting and fluidic phenomena on biological texture and hydrodynamic experiments testing on different low viscous resistance surface, *Advanced Functional Materials*, Vol.18, No.5 (2015a), pp.869–876.
- Luo, Y., Yuan, L., Li, J. and Wang, J., Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications, *Micron*, Vol.79 (2015b), pp.59–73.
- McClure, P., Streamwise variable height riblets for reducing skin friction drag surfaces, United States Patent, US 6,345,791 B1 (2002).
- 諸貫信行, 微細構造から考える表面機能, 工業調査会 (2010), p.49.
- 岡林希依, 越岡康弘, 西沢啓, 栗田充, 飯島秀俊, リブレット構造及び物体, 特開 2017-155882 (2017).
- 岡林希依, 栗田充, 飯島秀俊, 航空機にリブレットを適用した際の簡便な抵抗低減率推算手法, 航空宇宙技術, Vol. 15 (2016), pp.127–132.
- 奥山繁樹, 宇根篤暢, 由井明紀, 鈴木浩文, 機械加工学の基礎, コロナ社(2013), p.41.
- 竹内芳美, 超精密マイクロ切削加工, 日刊工業新聞社(2008), p.122.
- Wu, D., Zhang, P., Wang, H., Qiao, Z. and Wang, B., Effect of cutting parameters on surface quality during diamond turning of micro-prism array, *Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B*, Vol.23, No.3 (2017), pp.555–561.
- Yan, J., Oowada, T., Zhou, T. and Kuriyagawa, T., Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209 (2009), pp.4802–4808.
- Yung, C.L., Hong, W.C. and Fei, B.H., Fabrication of seamless roller mold for continuous roller imprinting of microlens array films, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.21 (2012), pp.316–323.
- Zhang, D.Y., Li, Y.Y., Han, X., Li, X. and Chen, H.W., High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin, *Chinese Science Bulletin*, Vol.56, No.9 (2011), pp.938–944.

References

- Gregory, D.B. and Bharat, B., Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces, *Advanced Functional Materials*, Vol.23 (2013), pp.4507–4528.
- Grüneberger, R., Kramer, F., Wassen, E., Hage, W., Meyer, R. and Thiele, F., Influence of wave-like riblets on turbulent, *Nature-Inspired Fluid Mechanics*, Vol.119 (2012), pp.311–329.
- Hayder, A.A., Hassan, D.M. and Zulkefli, B.Y.H., Bio-inspired passive drag reduction techniques: a review, *ChemBioEng Reviews*, Vol.2, No. 3 (2015), pp.185–203.
- Kasagi, N. and Suzuki, Y., Smart control of turbulence, *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.48, No.4 (2004), pp.131–137 (in Japanese).
- Kong, L.B., Cheung, C.F. and Lee, W.B., A theoretical and experimental investigation of orthogonal slow tool servo machining of wavy microstructured patterns on precision rollers, *Precision Engineering*, Vol.43 (2016), pp.315–327.
- Kong, L.B., Cheung, C.F., Lee, W.B., To, S. and Chen, X.D., A framework of an ultra-precision roller machining equipment for the fabrication of patterned microstructured optics, *Proceedings of SPIE*, Vol.8418 (2012), pp.1–6.
- Kurniawan, R., Kiswanto, G. and Ko, T.J., Surface roughness of two-frequency elliptical vibration texturing (TFEVT) method for micro-dimple pattern process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.116 (2017), pp.77–95.
- Liu, Y., Zhao, W., Zhou, T., Liu, X. and Wang, X., Surface defect elimination in microgrooving of electroless nickel phosphide plating layer by brittleness enhancement, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.94 (2018), pp.1327–1333.
- Lu, H., Choi, S., Lee, S. and Lee, D., Microstructure of fast tool servo machining on copper alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.22 (2012b), pp.820–824.
- Lu, H., Lee, D., Kim, J. and Kim, S., Modeling and machining evaluation of microstructure fabrication by fast tool servo-based diamond machining, *Precision Engineering*, Vol.38 (2014), pp.212–216.
- Lu, H., Lee, D.W., Lee, S.M. and Park, J.W., Diamond machining of sinusoidal grid surface using fast tool servo system for fabrication of hydrophobic surface, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.22 (2012a), pp.787–792.
- Luo, Y., Liu, Y., Anderson, J., Li, X. and Li, Y., Improvement of water-repellent and hydrodynamic drag reduction properties

- on bio-inspired surface and exploring sharkskin effect mechanism, *Applied Physics A*, Vol.120 (2015c), pp.369–377.
- Luo, Y., Wang, X., Liu, G., Wang, J. and Song, W., Anisotropic wetting and fluidic phenomena on biological texture and hydrodynamic experiments testing on different low viscous resistance surface, *Advanced Functional Materials*, Vol.18, No.5 (2015a), pp.869–876.
- Luo, Y., Yuan, L., Li, J. and Wang, J., Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications, *Micron*, Vol.79 (2015b), pp.59–73.
- McClure, P., Streamwise variable height riblets for reducing skin friction drag surfaces, United States Patent, US 6,345,791 B1 (2002).
- Moronuki, N., Surface function brought by surface micro structures, Kogyo Chosakai Publishing (2010), p.49 (in Japanese).
- Okabayashi, K., Koshioka, Y., Nishizawa, K., Kurita, M. and Iijima, H., Riblet structure and object, Japanese patent disclosure 2017-155882 (2017).
- Okabayashi, K., Kurita, M. and Iijima, H., Simple estimation of drag-reducing performance of riblet applied to the aircraft, *Koku-Uchu-Gijyutsu*, Vol. 15 (2016), pp.127–132 (in Japanese).
- Okuyama, S., Une, A., Yui, M. and Suzuki, H., Fundamentals of machining technology, Corona publishing co., Ltd. (2013), p.41 (in Japanese).
- Takeuchi, Y., Ultraprecision micro mechanical machining, *The Nikkan Kogyo Shimbun*, Ltd. (2008), p.122 (in Japanese).
- Wu, D., Zhang, P., Wang, H., Qiao, Z. and Wang, B., Effect of cutting parameters on surface quality during diamond turning of micro-prism array, *Journal of Engineering Manufacture*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, Vol.23, No.3 (2017), pp.555–561.
- Yan, J., Oowada, T., Zhou, T. and Kuriyagawa, T., Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209 (2009), pp.4802–4808.
- Yung, C.L., Hong, W.C. and Fei, B.H., Fabrication of seamless roller mold for continuous roller imprinting of microlens array films, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.21 (2012), pp.316–323.
- Zhang, D.Y., Li, Y.Y., Han, X., Li, X. and Chen, H.W., High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin, *Chinese Science Bulletin*, Vol.56, No.9 (2011), pp.938–944.