

微細波状リブレット構造をもつ金型の切削加工

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○寺林俊雄 ◎閻 紀旺

要 旨

流れの中の物体表面における摩擦抵抗を低減する方法としてリブレット構造が知られている。流れ方向に変化をもつリブレット構造による効果向上が期待されているが、そのような複雑な微細構造の大面积への加工は実現困難とされてきた。そこで、フィルム上に微細な波状リブレット構造を転写するための精密ロール金型を、スローツールサーボ (STS) 旋削を用いて加工した。また、金型表面の形状精度およびフィルムへの転写精度について評価を行い、この手法の有効性を検証した。

1. 結論

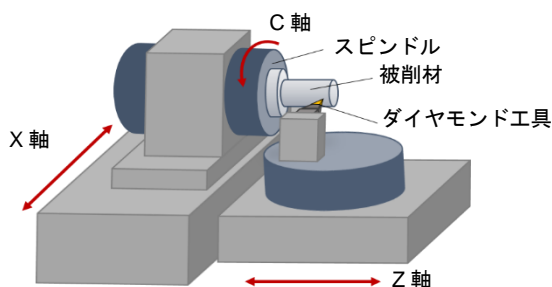
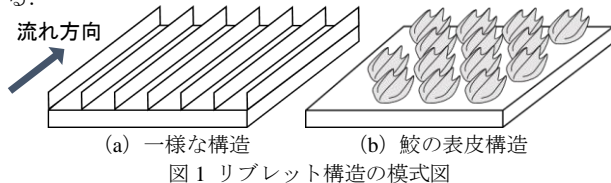
近年、エネルギー消費の大きな割合を占めている輸送機器の燃費向上が期待されている。壁面に沿う乱流中では流体抵抗の一種である摩擦抵抗が著しく増加し、輸送機器の燃費を悪化させる原因となっている。乱流場における摩擦抵抗を低減する方法のひとつとして、リブレット構造が知られている。リブレット構造とは、流れ方向に沿って細かい溝を数多く形成した表面構造である⁽¹⁾。一方で、流れ方向に形状変化を持つ鯨の表皮構造(図1(b))を物体表面に適用した場合に、流れ方向に一樣なリブレット構造と比較して高い抵抗低減効果が確認されている⁽²⁾。しかしながら従来の加工方法ではこのような複雑で微細な構造を大面积に加工するのは困難とされている。

そこで本研究では、流れ方向に形状変化をもつ構造の一例として正弦波形状をもつリブレット構造を提案し、その製造技術を開発する。具体的には、大面积のフィルム上にリブレット構造を転写するための精密ロール金型の加工を行うために、スローツールサーボ(Slow Tool Servo: STS)旋削加工法を新たに採用する。本研究では加工機を制御するためのプログラムを作成し、切削実験を行ったロール金型の形状精度を評価した。また、実際にフィルム上に微細構造を転写させ、リブレット構造の転写性についても評価を行った。

2. 実験方法

2.1 STS 旋削によるロール金型加工

微細構造をもつロール金型の加工にはアメテック (株) 製超精密自由曲面加工機 Nanoform X を用いた。図2に示すように STS を用いた旋削では工作物の回転軸である C 軸の角度に同期して X 軸と Z 軸が制御されるため、従来の旋削では精密に加工することができなかった回転非対称な形状の加工を行うことができる。



被削材には直径 50 mm、長さ 15 mm のアルミニウム合金丸棒を用い、その側面に対し前加工として鏡面加工を行った。切削工具にはすくい角 0°、逃げ角 5.5°、ノーズ半径 0.1 mm の単結晶ダイヤモンド R バイトを用いた。

2.2 加工形状

鯨の表皮に見られるような流れに水平方向と垂直方向に変化をもつ複雑な構造を、周期的な正弦波形状変化としてモデル化した。さらに、流れに対して水平方向に変化をもつ蛇行モデルと、垂直方向に変化をもつ高低差モデルのふたつの波状リブレット構造を、図3に示すような工具軌跡を用いて加工した。波状形状の持つパラメータ (図4) の設定値を表1に示す。

2.3 フィルム転写

フィルム作製にあたり PET フィルム上に紫外線硬化樹脂を厚さ約 200 μm となるように塗布し、作製した波状構造をもつロール金型の側面を押し当てながら紫外線を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形成した。

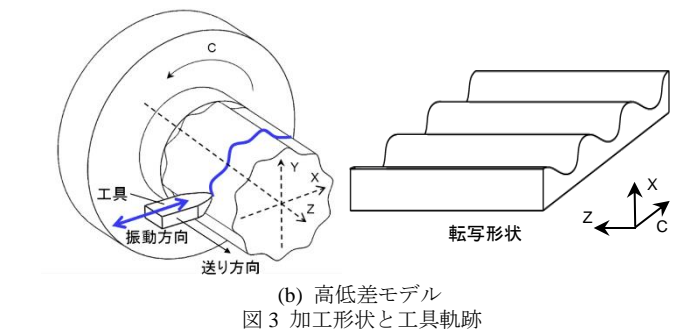
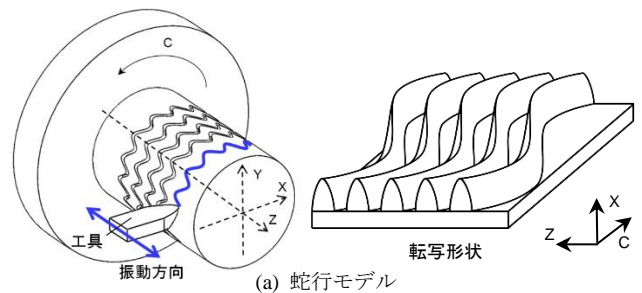
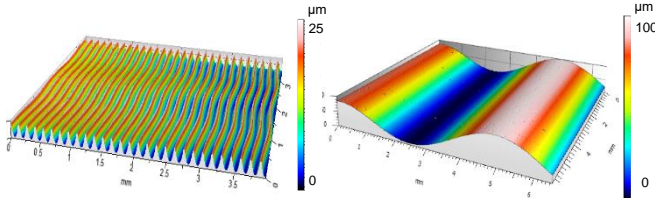


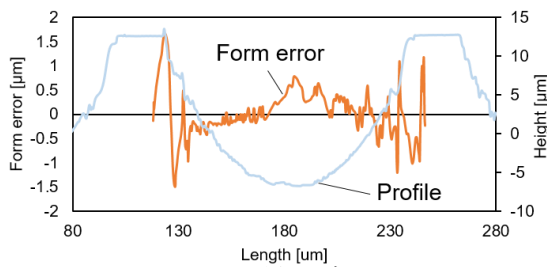
表 1 波状形状の設定値

	蛇行モデル	高低差モデル
溝深さ d [μm]	20	100
振幅 h [μm]	20	50
波長 l [mm]	3.14	5.23
ピッチ p [mm]	0.22	5.23
波数 n	50	30

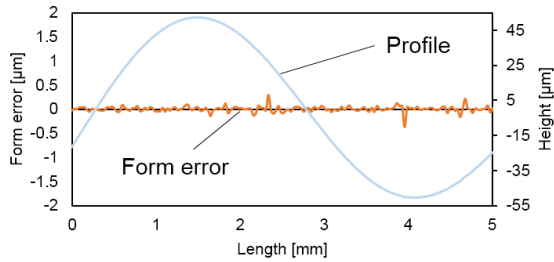


(a) 蛇行モデル (b) 高低差モデル

図 5 ロール金型の 3 次元計測結果



(a) 蛇行モデル



(b) 高低差モデル

図 6 ロール金型の形状誤差曲線および断面形状

2.4 加工表面観察

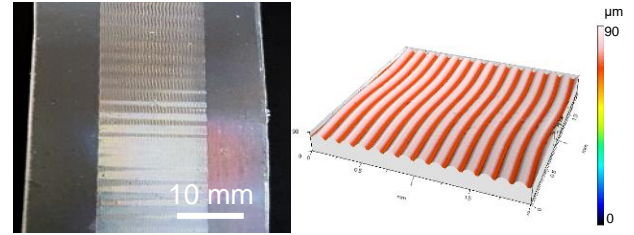
作成した精密ロール金型とリプレットフィルムの表面形状評価には非接触 3 次元測定装置 NH-3SP (三鷹光器 (株) 製) を用いた。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて表面観察を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 加工形状精度

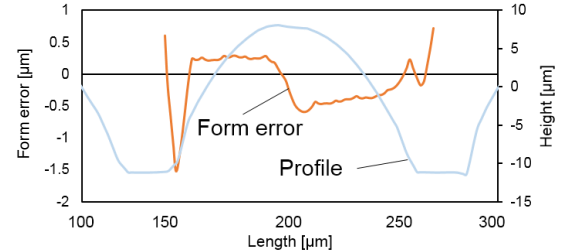
ロール金型表面に加工した微細構造の 3 次元計測により得られた結果を図 5 に示す。図 5 中の溝構造のひとつを抽出した断面プロファイルと設計形状からの誤差曲線を図 6 に示す。図 6(a) に示した蛇行モデルの誤差曲線より、誤差の P-V 値は $3.2 \mu\text{m}$ であった。また、エッジ部において約 $1.5 \mu\text{m}$ の誤差の増大が見られた。これは総形切削の際に外側に押し流された材料によるバリの発生がその原因であると考えられる。溝の中央部における誤差は、工具先端の摩耗形状が転写されたことに起因する切削痕である。溝内部の表面粗さを測定した結果 86 nmRa であった。

図 6(b) に示した高低差モデルの誤差曲線より求めた誤差の P-V 値は $0.66 \mu\text{m}$ であった。また、波状面の表面粗さを計測した結果 37 nmRa であった。高低差モデルにおける波状面加工は包絡切削であるため、表面性状における工具刃先の影響は比較的小さく抑えられたことがわかる。



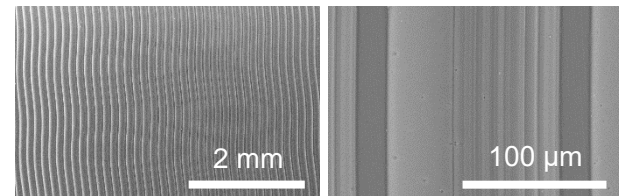
(a) フィルム外観

(b) 3 次元計測結果



(c) フィルムの形状誤差曲線および断面形状

図 7 蛇行モデル構造をもつリプレットフィルム



(a) 低倍観察画像

(b) 高倍観察画像

図 8 フィルム表面の SEM 観察画像

3.2 フィルム転写精度

図 7(a) に蛇行モデルの構造を持つロール金型を用いて作製したリプレットフィルムの外観、図 7(b) にフィルム表面の三次元計測結果、図 7(c) に金型設計形状からの誤差曲線および断面プロファイルを示す。図 7(c) より、誤差の P-V 値は $2.3 \mu\text{m}$ であった。突起のエッジ部には約 $1.5 \mu\text{m}$ の誤差が存在し、これは転写時のエアポケットの発生や金型に存在するバリの影響と考えられる。また、突起部における表面粗さを測定したところ 57 nmRa であった。この構造を SEM により低倍観察した結果が図 8(a) である。図 8(a) よりアーチ状の突起が一定周期で同位相の波状構造を形成しており、それらが等間隔で並んでいる様子が見とれる。図 8(b) に示す高倍観察画像における突起の右側に見られる微細形状は金型作製の際の工具摩耗形状に起因し、誤差曲線において 500 nm 程度の誤差として表れる。なお、このフィルムをリプレットとして用いた場合、この程度の誤差は流体抵抗に大きな影響を与えないと考えられる。

4. 結論

STS 旋削を用いた微細波状構造をもつロール金型切削加工を試みた。その結果、従来の切削では製作困難であった複雑な波状リプレット構造の加工に成功し、フィルム転写によって有効性を検証した。

参考文献

- (1) Hayder A. Abdulbari *et al.* Bio-Inspired Passive Drag Reduction Techniques: A Review, *ChemBioEng Reviews*, Vol. 2, No. 3, pp. 185-203, 2015.
- (2) Y.Luo *et al.* Experimental investigations on manufacturing different-shaped bio-inspired drag-reducing morphologies and hydrodynamic testing, *Experimental Techniques*, Vol. 40, No. 3, pp.1129-1136, 2016.