

## 研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
豊田工業大学 大学院工学研究科	教授	佐々木 実

## 研究テーマ

小水力発電むけサメ肌リブレット微細構造付き抵抗低減パイプの加工技術

## 研究報告

## 1. 研究の背景と目的

エネルギー資源の多くを海外に依存する我が国において、純国産エネルギーの存在は重要で、そのうちの約33%は水力発電が占める。水力の有効利用は環境面からも重要である。小水力発電は、落差や水量が比較的少ない資源を利用することになるが、水が流れる際のエネルギー損失を最小にすることは、発電効率を高めることになる。水と接するパイプや部品類の、流体抵抗を極力低減するべきである。ところで、高速遊泳するサメは、その皮膚にリブレット微細構造を持つことで、5~10%の流体抵抗を低減している。このリブレットを工業的に利用しようとする試みは従来からあったが、微細構造を曲面上に広域で製作することが難しかった。

例えば、航空機の翼に微細なリブレットを製作するために、機械加工やビーム加工の加工点を小さくすると、わずかな加工体積の1点を走査して広い表面を用意せざるをえず、加工時間が膨大となる。対してフォトリソグラフィは、多点で同時に加工が進むため、微細でも生産性が高く維持される。集積回路の生産を工業的に可能にしてきた技術である。但し、平面基板にのみ有効であるという制約があった。すなわち、従来のフォトリソグラフィ法は、曲面への微細パターン転写ができなかったのに対して、代表者はシートとしてレジスト膜を用意し、パターンの潜像を転写した後に、立体サンプルに貼り付ける画期的方法を見出した。平面フォトリソグラフィの標準装置群を最良の条件で利用できる。この有効性をパイプ内面のリブレット形成に応用することが研究目的である。

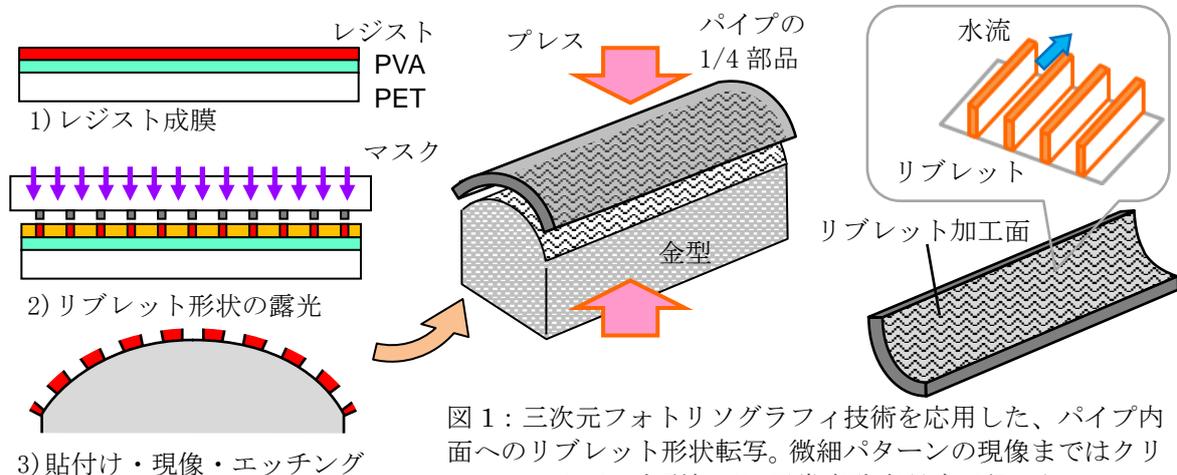


図1：三次元フォトリソグラフィ技術を応用した、パイプ内面へのリブレット形状転写。微細パターンの現像まではクリーンルームで、金型加工は通常実験室環境で行った。

## 2. 研究成果および考察

サメ肌リブレットの形状とサイズは、航空機の燃料消費低減むけに報告されている波状リブレット形状を参考に[1]、この平面パターンに合わせた。塩ビパイプ内面に形状転写するため、パイプを90°ずつ、中心軸に沿って4分割した。これに合う蒲鋒形の曲面に微細パターンを用意し、サメ肌リブレット構造付き金型とする。塩ビパイプは入手しやすい規格の中で、最も細いVP13とした。

図2は新手法によって転写したレジストパターンである。幅15 $\mu\text{m}$ の溝がサインカーブ状の波線を描く。ピッチ1132 $\mu\text{m}$ 、両振幅68 $\mu\text{m}$ である。波線の間隔は155 $\mu\text{m}$ である。レジスト膜厚は約5 $\mu\text{m}$ である。広域で良質なパターンが得られた。写真の左右が暗いのは、曲面で光学顕微鏡の反射光量が減るためである。このパターンに従い、金型を約85 $\mu\text{m}$ まで深く掘ることがポイントとなった。通常の等方性化学エッチングでは一点から進むエッチングが球面状に広がる（一般には横に、より広がる）ため、細

くて深い溝が成立しない。垂直ぎみに進む鋼の異方性エッチングが必要となる。これを異方性の窒化処理で狙ったが、金型転写まで進まなかったことは将来展望で後述する。

合わせて、パターンを8倍に拡大した構造を製作した。流体のレイノルズ数の議論から、流速が1/8倍で効果がある構造となる。溝幅が120  $\mu\text{m}$ となり、厚さ80  $\mu\text{m}$ のステンレス薄板からフォトリソグラフィにより作られるメタルマスクが用意できる。プレス加工の検証として、メタルマスクを直接金型に貼り付けて、深さ80  $\mu\text{m}$ の金型として利用した。図2(b)は、製作したメタルマスクである。溝穴は、サイン波の2周期に一回の頻度で区切り、メタルマスクは互いに繋がっている。図2(c)は、接着剤を薄く塗って、蒲鋒形の土台に貼り付けた様子である。

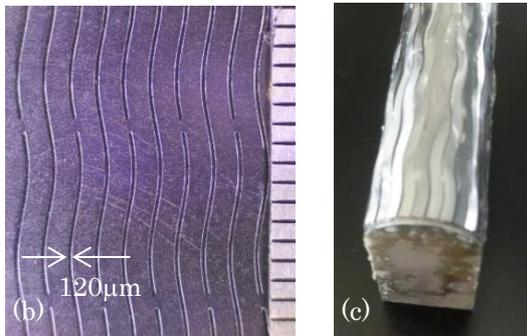
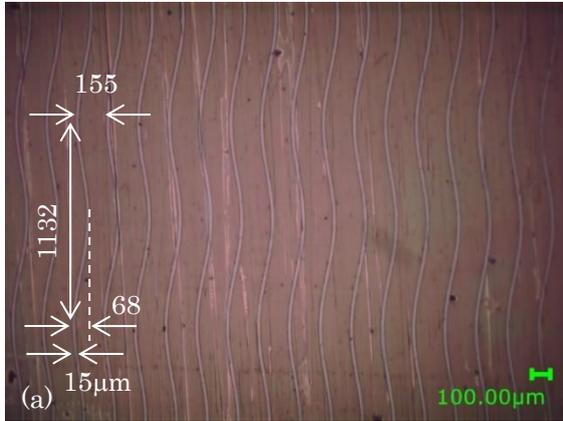


図 2 : サイン波状のリブレットパターン。

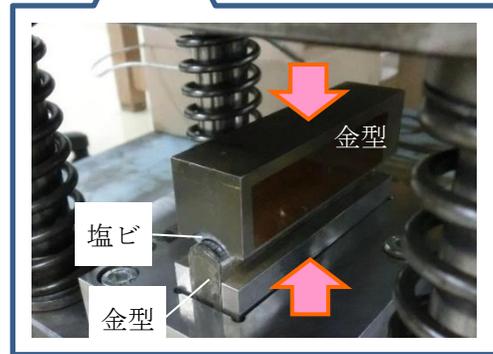


図 3 : プレス転写の様子。

図3はプレスの様子である。縦切りした4分割塩ビパイプ（長さ80mm）を凹凸2つの金型で挟み、油圧プレスで圧縮した。プレス時は、塩ビのガラス転移温度（72-105 $^{\circ}\text{C}$ ）以下に加熱し、平均圧力は圧縮強さ（562-914 $\text{kg}/\text{cm}^2$ ）以下とした。サンプルAは、約40 $^{\circ}\text{C}$ で平均573 $\text{kg}/\text{cm}^2$ の荷重をかけた。恐らくは材料移動によって、10分後に圧力は89%に減った。サンプルBは、金型近傍に固定した熱電対で6 $^{\circ}\text{C}$ に保持し、平均430 $\text{kg}/\text{cm}^2$ の荷重をかけた。10分で89%に、最終20分で84%に目減りした。

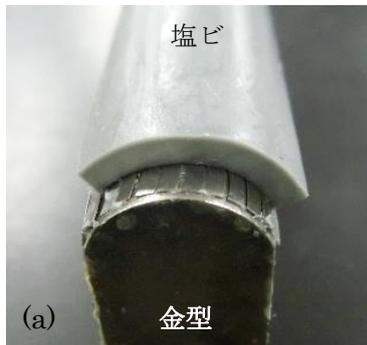
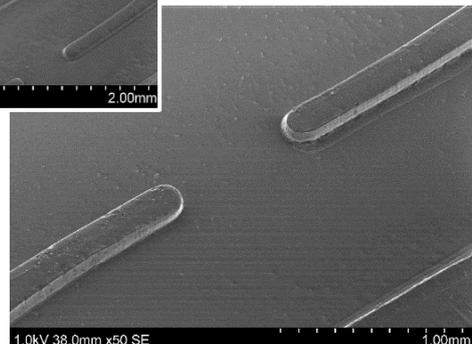


図 4 : プレス後の塩ビ材。



(a) サンプル A



(b) サンプル B

図 5 : 塩ビパイプ内面に転写されたリブレット形状。

図4(a)はプレス後の塩ビ材である。塩ビは密着し、ある程度力を加えないと剥がれなかった。図4(b)はサンプルBの様子である。波形状が明瞭に得られた。一部領域は、金型型に材料が埋め込まれた。図5は転写されたサイン波リブレットパターンのSEM写真である。溝が反転して、ステップ状の突起となった。壁が急峻に（垂直に近く）立っている。突起幅が、元のデザインよりも広がった領域も見られるが、メタルマスクの貼付けが完全でなく広がったためである。

図6は白色干渉計で定量測定したリブレット形状である。急峻な壁際は、反射光が得られず、データ無しの黒表示となる。リブレット高さは、サンプルAで65-70 $\mu\text{m}$ 、サンプルBで85 $\mu\text{m}$ 程度であった。但し、基材が円筒状のパイプ内面にあることからベースラインを直線に設定できないため、目安ではある。サンプルBは、メタルマスクの厚み80 $\mu\text{m}$ とほぼ同じ高さで、底まで塩ビ材が到達したと判断する。リブレット凸構造の上面では光の反射が少ない箇所が目立つが、これは凹凸高さが増えているため、計測装置の高さ方向走査幅が、装置の最大値を越えたからである。底面の表面粗さは、プレス前の塩ビ面で0.73 $\mu\text{mRa}$ 、メタルマスク表面が0.11 $\mu\text{mRa}$ 、サンプルAが0.49 $\mu\text{mRa}$ 、サンプルBが0.31 $\mu\text{mRa}$ であった。強く当たるプレス条件で、より平滑になっている。

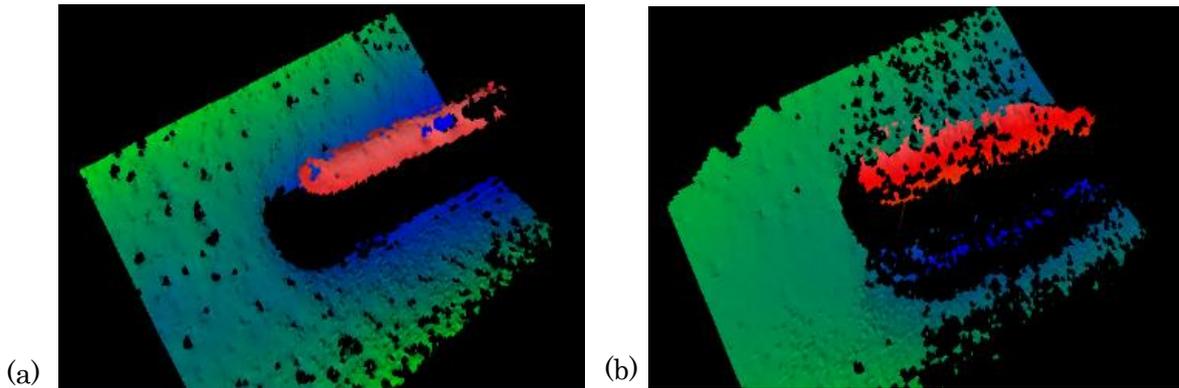


図6：塩ビパイプ内面に転写されたリブレット凹凸形状。サンプル(a) A と(b) B。

### 3. 将来展望

精密機械加工で曲面・立体形状をもつ金型を作り、その表面にフォトリソグラフィ微細加工を施す方法は、両加工の長所同士を融合する。本研究では、金型への深い構造実現がポイントであることが明確になった。ハイブリッドな技術となる。

本研究では金型曲面に微細パターンを一括転写する点は問題無くできた。但し、流体抵抗を減らすリブレット応用では、面外方向に深い構造が必要となり、本質的にはエッチングにも新しい技術を必要とする。リブレット高さはJAXAが検討している亜音速旅客機の高速気流むけで85 $\mu\text{m}$ である。渦との接触領域を下げることで流体抵抗を下げる原理であり、細く立ったフィン構造が必要である。金属の単純な等方性ウェットエッチングでは実現できない。金型加工の最新文献から、鋼材の異方性プラズマ窒化プロセスを組み合わせれば、細く立った構造の実現可能性は十分ある[2]。本研究期間では、道具類の用意や適切な条件出しには至らなかった。すなわち、マスク材にTiO<sub>2</sub>を含む白ペンキを利用したが、ポーラスなマスク材となってしまう、窒化濃度変化は僅かで、パターン状にプラズマ窒化を行うマスク材としては十分機能しなかった。より緻密な酸化膜ハードマスクを用いれば良い。このような技術の構築は、今後も進めていく。

[1] 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」（国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構）特願 2016-041018。

[2] 相澤龍彦「金型における窒化処理層の諸特性」ぶらすとす, 2 巻 19 号(2019) pp. 411-415.

### 4. 研究発表

本研究成果は、国内学会（候補：令和3年電気学会全国大会）にて発表を予定する。