

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04132

研究課題名(和文) 精密機械加工と三次元フォトリソグラフィの融合による空気抵抗低減サメ肌模倣造形技術

研究課題名(英文) Fusing precision machining and three-dimensional photolithography and application to realize the shark skin inspired riblet surface for reducing air resistance

研究代表者

佐々木 実 (Sasaki, Minoru)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70282100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：立体曲面の翼に、微細なサメ肌模倣造形を工業的に実現するためには、金型曲面に微細構造を用意することが最大のポイントとなる。

翼の反転形状を持つ金型を精密機械加工で用意し、三次元フォトリソグラフィにより、微細波線パターンのアレイ(幅 $3.8\mu\text{m}$ 、ピッチ $42.5\mu\text{m}$ )を転写した。微細構造をフォトレジストから硬質材料に換えるために、3種の方法を試し、めっき堆積が良いことが分かった。光沢ニッケルめっきにより、アスペクト比2.1の溝が得られた。室温プレスにて、ジュラルミン製の翼試験片にリブレット構造が高さ $1\mu\text{m}$ で転写された。立体金型に硬質材料にて高アスペクト比の微細構造を得る、新しい技術基盤を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生産性良く、微細形状を多点同時加工できるフォトリソグラフィは、平面にのみ有効であった。これを立体サンプルにも有効にする。大形状の立体加工が得意な精密機械加工と融合した。本研究では、空気抵抗低減サメ肌模倣造形に取り組んだ。金型曲面に、硬質材料をめっき堆積する方法が良いことが分かり、高アスペクト比微細構造を立体金型の曲面に実現した。これまでエッチング加工で試作してきた金型のアスペクト比0.1-0.2から大きく前進し、2.1を実現した。また、微細構造付き立体金型は、プレス加工に耐えることまで確認した。レジスト膜厚を増やすことで、より高アスペクト比構造を目指すことができ、有望である。

研究成果の概要(英文)：In order to realize the shark skin inspired fine riblet on the curved wing surface as the industrial manner, the most important point becomes how to prepare the fine structure on the curved die surface.

A die with an inverted wing shape is prepared by the precision machining, and an array of fine wavy line patterns (width  $3.8\mu\text{m}$ , pitch  $42.5\mu\text{m}$ ) is transferred using the three-dimensional photolithography. For change the photoresist micro-structure to the hard material, three methods are tried. And, the electroplating on the die is found to be good. Glossy nickel plating realizes the groove having the aspect ratio of 2.1 in our experiment. Pressing at a room temperature, the riblet is transferred to a duralumin wing test piece resulting  $1\mu\text{m}$ -high micro-structure.

We have found a new technique to realize the hard-material micro-structure with the high aspect ratio on the curved surface of the three-dimensional die.

研究分野：三次元フォトリソグラフィ加工

キーワード：三次元フォトリソグラフィ サメ肌リブレット 微細加工 金型曲面 硬質めっき堆積 高アスペクト比

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

空気抵抗を低減するサメ肌を模倣したリブレット微細構造を、垂直軸風車を想定したブレード表面にフォトリソグラフィを組み合わせ加工する技術に取り組んだ。このサメ肌リブレットが、適切な加工技術が無いため発展が遅れている。従来の機械加工やビーム加工では、加工寸法を小さくすると、加工体積は寸法の3乗で小さくなるため、走査して面を作る方法では、膨大な加工時間がかかってしまう。一方、フォトリソグラフィは多点同時加工のために、広域処理であっても生産性が高い。集積回路の生産を可能にしてきた優れた生産技術であるが、平面基板にのみ有効であった。以上を表1にまとめる。研究代表者は、新しい方法を見出し、幅 $2\mu\text{m}$ の微細格子を金型曲面に転写するなど、技術を高めてきた。従来法よりも約100倍細かく、対象物やデザインの自由度が高い。本研究では、レジストの微細パターン転写に加えて、硬質材料である金型の加工までを含めて、基礎技術を確立する。

リブレット微細構造は、海中を高速遊泳するサメの皮膚にあり、皮膚の上を流れる水の乱流を抑え、流体抵抗を5~10%低減する。この機能を工業的に取り入れる試みは従来からあったが、微細構造を流線形の曲面上に広域で製作することが難しかった。航空産業では、飛行機の翼にリブレットを製作することが模索されている。

表1：精密機械加工とフォトリソグラフィ加工の比較と、長所同士を融合する本提案

	超精密機械加工	フォトリソグラフィ	本研究
長所	立体を高い形状精度で製作できる	形状が微細になっても加工時間は同じ	立体形状は精密機械加工で、曲面微細構造を三次元フォトリソグラフィで加工し、長所同士を融合する
短所	微細構造を実用的な広い面積で作ることは苦手	平板以外の、立体形状には適用できない	

### 2. 研究の目的

精密機械加工でサイズの大きな立体形状を作り、その曲面にフォトリソグラフィ微細加工を施すことで、生産性の高い機能性表面の実現方法を見出す。両加工の長所同士を融合する技術を構築することが目的である。

リブレット微細構造を試作対象とした。このリブレット凹凸構造は、風車ブレードだけでなく、航空機翼の空気抵抗低減、水力発電機における水流の抵抗低減など、多分野に発展する。適切な凹凸寸法が数10から数 $100\mu\text{m}$ と微細になると、このような構造を翼曲面に工業的に製作するには、精密機械加工では加工時間がかかりすぎるために現実的でなくなる。このため、フォトリソグラフィ技術を三次元サンプルに拡張して取り入れる。

### 3. 研究の方法

垂直軸風車ブレードを想定し、この曲面に空気の摩擦抵抗低減リブレットを創る。翼形状を持つブレード用金型を精密機械加工で製作する。この金型曲面にリブレット微細構造を硬質材料にて用意する。金型が得られれば、あとはプレス加工でリブレットを転写できる。翼形状に合わせた金型曲面に、フォトリソグラフィ加工によってリブレット元形状を用意する。基材は難加工性金型材を利用した。

微細パターン状のレジスト膜はポリマー材料である。これを金型にも利用できる硬質材料に如何に変えるかがポイントとなった。研究開始時には、この方法は定まって無かった。ここでは詳細を述べる紙面が無いが、他にも(1)ドライエッチングで金型材を刻む方法の一つではマスク材にMEMS貫通加工したSi基板を利用する方法、(2)パターン状に金型材をプラズマ窒化して酸に対する薬品耐性を下げた上で、ウェットエッチングを行う方法、(3)金型利用実績のある硬質クロムめっきを堆積する方法を試した。

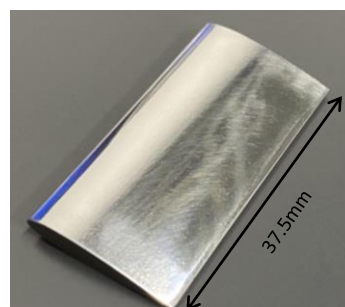
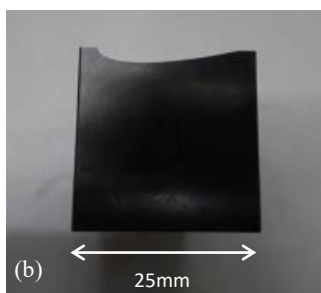
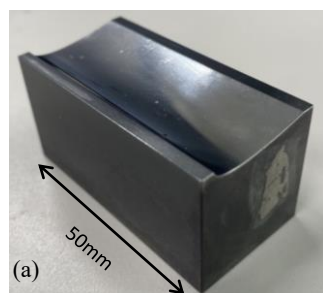


図1 曲面付き金型の(a)全体、(b)側面図。

図2 翼形状のジュラルミン試験片。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 設計（機械加工）

翼形状は対称な NACA0020 を選んだ。形状が反転した凹面を持つ金型を設計した。材料は標準の、焼き入れ済み SKD11 とした。これを精密切削加工することで凹面翼形状を得た。曲面に工具跡が残り難く経路制御された。図 1 に金型を示す。凹み量は 2mm ある。翼の上流側（左側）は、急峻に凹みが増える形状となる。図 2 は翼形状を模したジュラルミン試験片である。ワイヤ放電加工によって製作し、研磨した。図 1 の金型と図 2 の試験片は、凹凸が対応する。対称翼のため、同じ金型 2 つで挟む。

##### 4.2 設計（フォトリソグラフィ加工）

転写するリブレット形状は宇宙航空研究開発機構が旅客機向けに提案している形状（凹凸高さ  $85\mu\text{m}$ 、幅  $15\mu\text{m}$  の sin 波形状を持つ尾根がピッチ  $170\mu\text{m}$  で並んだアレイ）を参考とした。利用可能なプレス機の性能を踏まえ、形状のアスペクト比を維持しつつ、大きさを 4 分の 1 とした。すなわち目標形状は、凹凸高さ  $21.3\mu\text{m}$ 、幅  $3.8\mu\text{m}$  の波線アレイ溝で、ピッチ  $42.5\mu\text{m}$  で配列する。金型には微細でアスペクト比約 5.6 の深溝形状が必要となる。表 2 に目標形状の値を示す。 $10\mu\text{m}$  を超える厚さは、平面フォトリソグラフィのレジストとしては、比較的厚いものであるが、事例はある。

表 2 リブレット形成のための波状微細溝の形状。

	溝幅 $\mu\text{m}$	高さ $\mu\text{m}$	アスペクト比
目標形状	3.8	21.3	5.6
試作 レジスト形状	7.00	11.3	1.61
試作 めっき形状	6.01	12.8	2.13

##### 4.3 金型曲面の微細加工

図 3 に、金型曲面にリブレット形状の反転溝を製作するプロセスを示す。シート上に用意したフォトリソレジスト膜にパターン転写した。挿入写真はフォトマスクである。パターン転写時はシートを平面として扱うことができ、潜像付きレジストを金型曲面に貼り付けてから現像することで、パターンを得た。

図 4 は金型曲面の一番下部を光学顕微鏡で観察した像である。曲面上にあるため、この写真の上下部は焦点面から外れてぼけている。波線パターン状のレジスト膜厚は約  $11\mu\text{m}$  が得られた。レジスト膜は金型曲面全体に貼り付き、急峻な部分にもパターンが得られた。

図 5(a) は光沢ニッケルめっき堆積後の金型である。色が光沢のある銀色に変わり、金型全体にめっきが施され、中心部で微細パターンが得られた。急峻な凹み側が見え易い角度で観察しており、この部分にも、めっきの堆積が確認できる。ニッケルめっき面は、レジスト上面よりも約  $1.5\mu\text{m}$  高い位置まで堆積していた。図 5(b) は、レジストをアセトン除去した金型面を観察したものである。明瞭な波線溝が得られた。なお、図 5(a) の目視レベルでは波線アレイは細かすぎて認識できない。図 5(c) は金型広域を光切断法で計測した中倍率の三次元形状である。曲面上に波線形状の溝が多数並んでいることが確認できる。

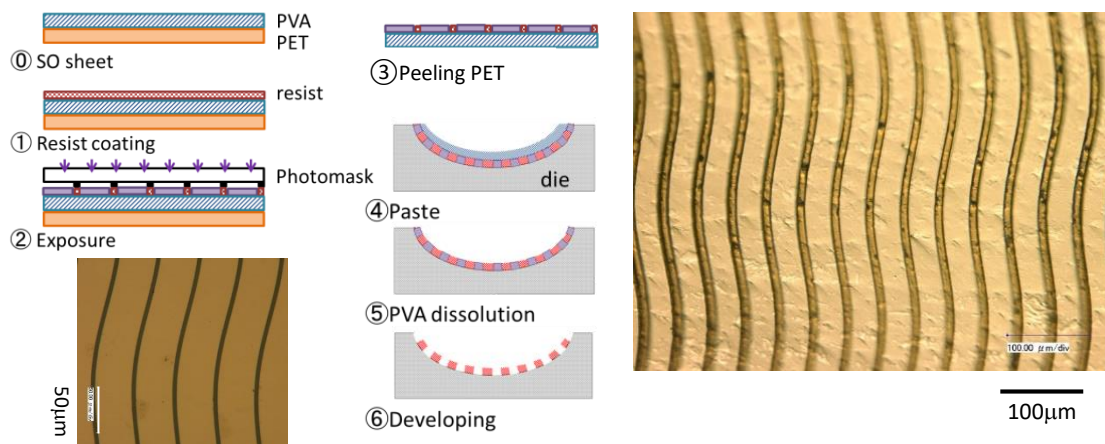


図 3 微細構造付き金型の製作プロセス。

図 4 金型底部のレジスト波線パターン。

表 2 には、金型の溝幅と膜厚の実測値を示した。レジスト幅とめっき後の溝幅を測定した任意箇所 20 点の平均値である。レジスト膜厚  $20\mu\text{m}$  程度のパターン転写は薄膜レジストとは違うプロセスノウハウが必要で、代表者にとって経験が少なかつたため、プロセス設計として  $11.3\mu\text{m}$

に留めた。加えて、厚膜でパターン転写を安定させるため、パターン幅を  $7\mu\text{m}$  と太く変更した。得られたパターンを用いて、めっき堆積すると、得られるめっき膜はレジスト膜を押しつぶすように広がりながら堆積するため、溝幅は  $6\mu\text{m}$  に細くなった。図 6 は凹面に形成された、波状微細溝アレイである。断面図から幅  $6.01\mu\text{m}$  に対して深さ  $12.8\mu\text{m}$ 、アスペクト比 2.13 の溝であることが分かった。目標値 5.6 の半分以下ではあるが、レジスト膜厚をさらに厚くすることで目標の形状を実現できると考えられる。

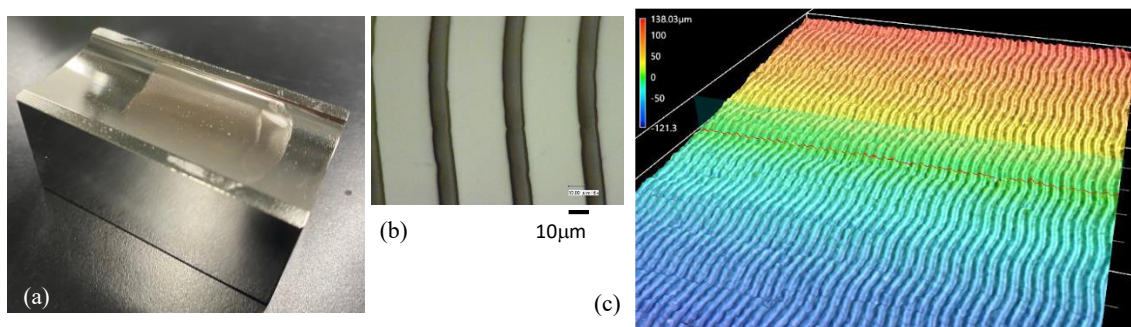


図 5 微細パターン状にめっき堆積した金型。(a)金型全体写真、レジストをアセトン除去した(b)金型面の高倍率写真、(c)中倍率の三次元形状。

#### 4.4 プレス加工

光沢ニッケルめっきのビッカース硬さは平均 578HV で、文献値とほぼ合致する。SKD11 の 709HV には及ばないものの、ジュラルミンの約 110HV と比較すると十分硬い。試作した微細構造付き金型を用いて、翼形状を模した図 3 の試験片にプレス転写を行った。図 7 は室温で荷重 555MPa にてプレスした試験片である。リブレット構造が転写された。凸部高さは約  $1\mu\text{m}$  であった。アルミ材のむしれや、金型への凝着は無かった。また、プレス前後でめっき膜厚は変わらず、光沢ニッケルめっきに変化は観られなかった。なお別サンプルにて、プレス時の材料の食い込みが大きくなる場合には、微細構造表面にプラズマ成膜した薄い潤滑剤が、むしれや凝着を防止するのに効果的であることも分かった。

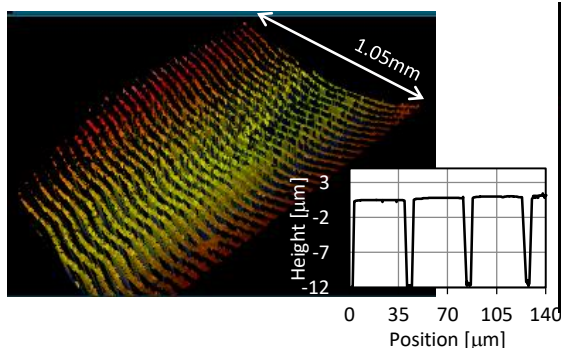


図 6 曲面上の波状微細溝パターン。

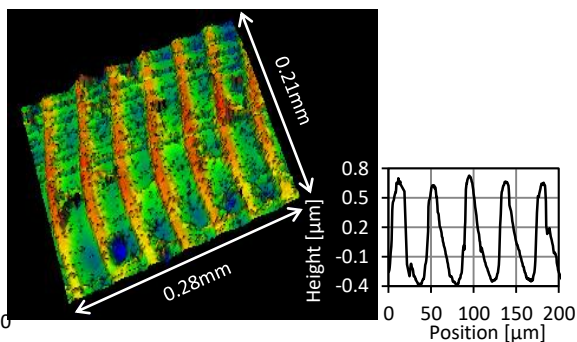


図 7 冷間プレスで転写された微細パターン。

#### 4.5 まとめ

翼形状を反転させた曲面を持つ SKD11 金型曲面に、フォトリソグラフィと光沢ニッケルめっき処理によってサメ肌リブレット微細パターンを一括転写し、アスペクト比 2.13 の溝構造を形成できた。微細パターン転写と、めっき堆積、いずれも多点同時加工であり、生産性を高くできる。現状では、アスペクト比は目標の半分以下ではあるが、本研究によって、金型に適した硬質材料で、微細構造を実現する見通しが立った。また研究室としては、潜像付きのレジスト膜を貼る方法を、約  $10\mu\text{m}$  の比較的厚いレジスト膜に初めて応用した(厚膜レジストの技術を取り入れていけば、より厚膜化可能)。得られた金型をプレス加工に利用し、翼形状の試験片にリブレット微細パターンを転写できた。プレス転写で得られたアスペクト比は 0.1 に留まるが、利用設備の制限も受けている。研究のポイントとした、金型曲面にデザイン自由度が高いリソグラフィパターンを組み合わせた技術融合を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Gang Han, Minoru Sasaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Microtextured Die Using Silicon Stencil Mask for Micro-machining of Stainless Steel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA1012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac1c3b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 韓剛, 佐々木実	4. 巻 142
2. 論文標題 シリコンハードマスクを用いたステンレス鋼のドライエッチング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌E（センサ・マイクロマシン部門誌）	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 韓剛, 佐々木実
2. 発表標題 シリコンハードマスクを用いたステンレス鋼のドライエッチング
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gang Han, Masaya Watanabe, Seiya Fujita, Minoru Sasaki
2. 発表標題 Deposition of PFCs Films on Die with Microstructures Using CF4 Gas
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 15th International Conference on Plasma-Nano Technology and Science, 07P-33 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池ヶ谷巧, 佐々木実
2. 発表標題 翼用リブレット形成のためのプレス金型曲面の微細加工 三次元フォトリソグラフィによる曲面加工
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会 511
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐々木実	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 pp.58-66.
3. 書名 「三次元フォトリソグラフィ」機能材料, Vol. 41, No. 12, フォトレジスト最前線	

〔産業財産権〕

〔その他〕

World of micro-machines and micro-texturing <a href="https://www.toyota-ti.ac.jp/mems/information.htm">https://www.toyota-ti.ac.jp/mems/information.htm</a> マイクロメカトロニクス研究室 <a href="https://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/public/labo.php?s=1&amp;id=2510">https://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/public/labo.php?s=1&amp;id=2510</a> 公益財団法人 科学技術交流財団 R2年度採択共同研究推進事業「三次元フォトリソグラフィ加工技術の開発」の成果ホームページが近日公開予定。 日本塑性加工学会 金型分科会 幹事として活動。
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	厨川 常元  (Kuriyagawa Tsunemoto)  (90170092)	東北大学・工学研究科・教授   (11301)	精密機械加工技術との融合

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	Nguyen Hai Minh  (Nguyen HaiMinh)  (90815862)	豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・ポスドクトラル研究員   (33924)	微細加工、評価
研究分担者	HAN Gang  (Han Gang)  (50880184)	豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・ポスドクトラル研究員   (33924)	微細加工、評価

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関