

## 〔事例5〕

# 新機能を付与する 表面テクスチャのレーザー加工技術

信州大学

山口 昌樹\*

親液・撥液・滑着性、防汚性、無反射、光透過性、加飾（発色）、低摩擦・流動抵抗、低騒音などといった新たな物理的機能を発現する nm および  $\mu\text{m}$  領域の表面微細構造は機能的テクスチャと呼ばれ、製品付加価値向上の秘策として期待されている<sup>1)</sup>。しかし、切削やフォトリソグラフィなど従来の加工技術では現実的な時間内での加工が難しく、高速加工プロセスの開発が喫緊の課題である。

樹脂成形に用いられる金型表面などへの機能的テクスチャの適用を考えると、nm および  $\mu\text{m}$  領域の微細周期構造をどうやって大面積に施すかという課題に行き着く。レーザー加工における最近の取組みにより、微細周期構造の加工方法や樹脂の成形方法には、いくつかの選択肢が提案され始めた。

本稿では、微細周期構造の加工方法として超短パルスレーザーを用いた加工法を中心にいくつかの実例を示し、微細周期構造を形成した樹脂の動的な滑着性の改善効果などについて解説する。

## 機能的テクスチャ

生物は進化の過程で地球環境に適応するためにさまざまな機能を獲得してきた。生物は材料設計や構造設計のヒントにつながる「宝の山」であり、このようなアプローチ方法をバイオミメティクス（生物模倣）という。図1に生物がもつ撥水性表面の実例を示す。

ハス（= lotus、ロータス）の葉の上に水玉が生じてころころと転がる現象は、バイオミメティクスが注目される契機となったものである。この撥液・滑着性は表面の凹凸構造に起因しており、ロータス効果と呼ばれるようになった<sup>2)</sup>。

ロータス効果は、空気が地球上で最も疎水性物質であることに基づいており、凹凸構造で物質表面に空気の部屋を設けることで、平均的に見ると元の物質より疎水性が高まることを利用している。植物では、撥水性、滑着性、親水性、保水性といった濡れ性にかかわる機能が多くの種で観察され、これらの機能は光合成効率や水分補給へ寄与すると考えられる。

誌面の制約から、以下では撥液・滑着性の付与に焦点を絞り、そのレーザー加工技術について実例を交えて紹介する。

## リエントラント構造による 撥液・滑着性の付与

高い撥液・滑着性を実現する微細周期構造として、リエントラント構造 (re-entrant texture) が提案されている<sup>3)</sup>。圧力や振動など、何らかの刺激が加わることで凹凸構の空気室に液滴が入ってしまうと、撥液性は失われる。つまり、撥液性を維持するには空気室に液滴が侵入しにくくなる何らかの工夫が必要である。リエントラント構造は、空気室の側壁を逆テーパとすることで液滴と固体の接触点で上向きの力を生じさせ、液滴へ吊り上げ力を与えることでその侵入に耐えるようにした構造である。原理的に、逆テーパ角が大きいほど撥液性が高くなる。

\*Masaki Yamaguchi：大学院 総合医理工学研究科 生命医工学専攻 教授  
〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1  
E-mail：masakiy@shinshu-u.ac.jp

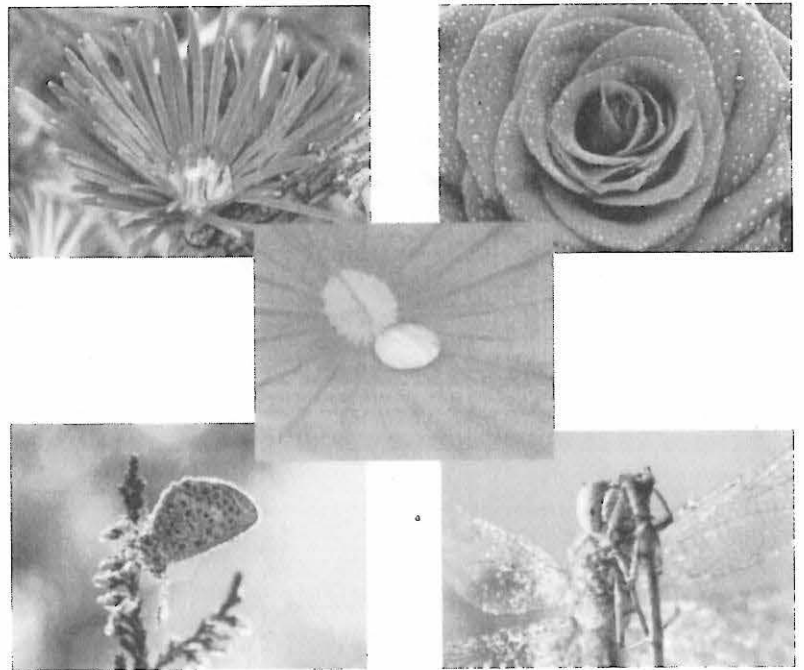


図1 撥水性を発現するさまざまな生物表面の機能的テクスチャ

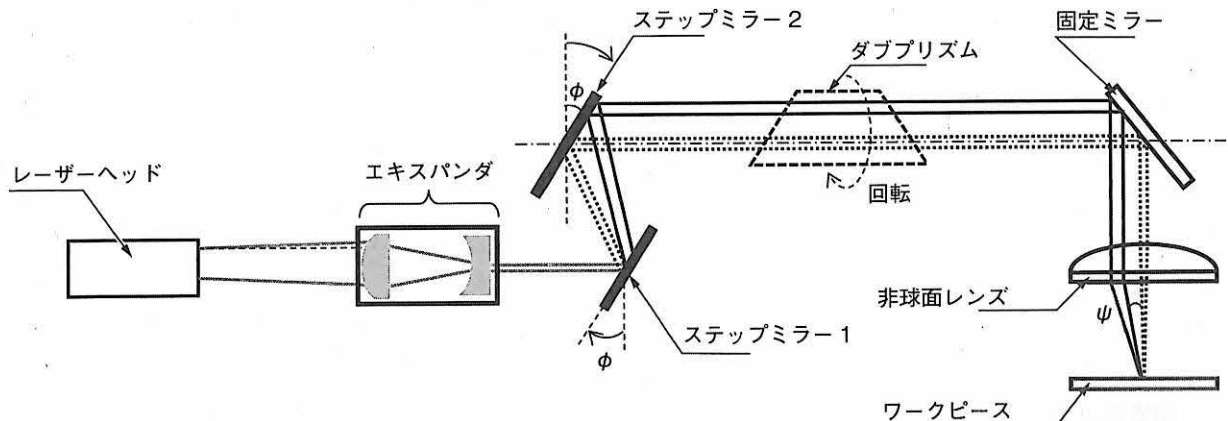


図2 短パルスレーザーで逆テーパ加工を実現する光学ユニット (2本線はビーム径を意味する)

しかし、レーザーに限らず、穴あけ加工において通常は深くなるほど直径が小さくなっていく順テーパ角になる。そこで筆者は、フェムト秒レーザーなどの短パルスレーザー用に、数十°の逆テーパ加工を実現する光学ユニットを開発している(図2)<sup>4)</sup>。

この光学ユニットは、レーザービームの光路を平行移動できる一対のステップミラーと非球面焦点レンズから構成される非常にシンプルな構造である。非球面焦点レンズの中心からのレーザービームの距離を、ステップミラー角度( $\phi$ )を変えることによって変更する。その量に比例して、ワークピースに対する加工角度(照射角度 $\psi$ )を任意に設定できる。レーザービームを一方向にスキャンすると、逆テーパを有する1軸溝が形成される。ステップミラーと固定ミラーの間に

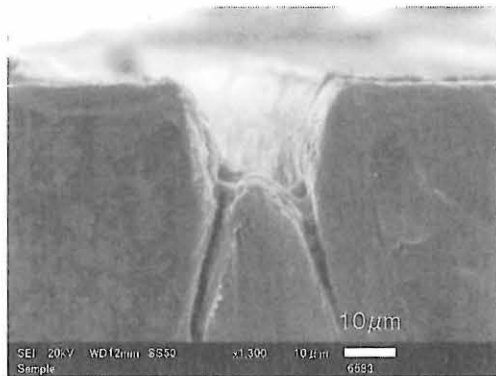
プリズムを追加して回転させると、逆テーパ穴加工を行うこともできる。

図3に示すように、フェムト秒レーザー(PHAROS-6W、波長515 nm、Light Conversion社)を用いたアルミ加工において、20°の逆テーパ溝加工を施したリエントラント構造を作製し[同図(a)、(b)]、見かけの接触角が150°の超撥水性を達成している[同図(c)]。

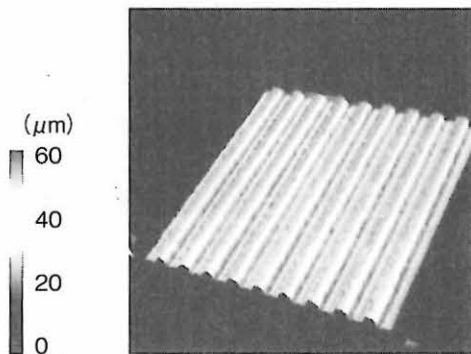
## レーザー干渉加工法による高速・大面積化

### 1. レーザー干渉を用いた機能的テクスチャの形成

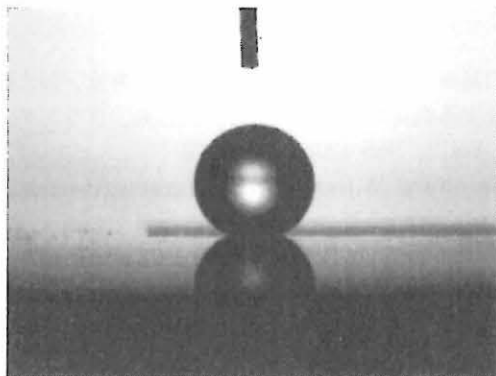
レーザーの干渉現象を利用した機能的テクスチャの形成方法には、複数の種類がある(図4)。Birnbbaumは、レーザー加工痕の底面に波長サイズの周期構造が



(a) リエントラント構造試験片の側面観察



(b) リエントラント構造試験片の3次元観察

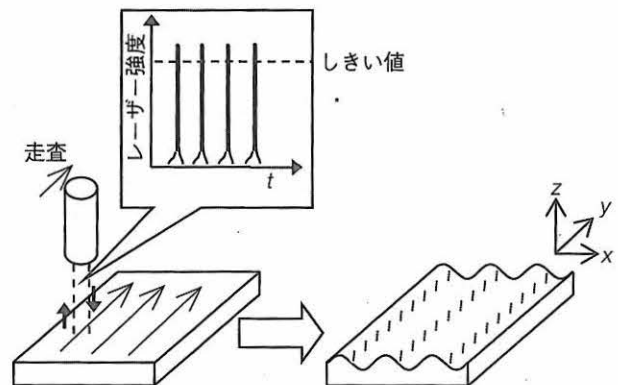


(c) リエントラント構造の見かけの接触角 (150°)

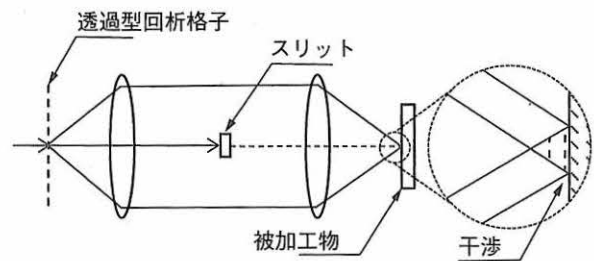
図3 逆テーパ加工で形成したリエントラント構造

レーザースポット径内で「複数同時」かつ「瞬時」にできることを偶然発見した<sup>6)</sup>。つまり、微細構造を1本ずつ走査して加工する必要がない。この周期構造は、入射光と表面にできるプラズマ波もしくは散乱波との干渉によりできる定在波が、材料表面が選択的に蒸発や浸食によって分解する現象(アブレーションの一種)と考えられ、表面波干渉法 (laser-induced periodic surface structure: LIPSS) と呼ばれている [同図(a)]。

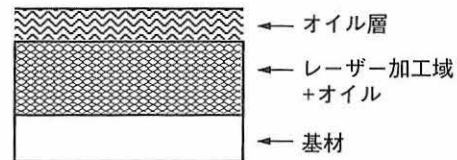
周期構造のピッチ  $\tau$  は、レーザーの入射角  $\theta$  に依存して  $\tau = \lambda / (1 \pm \sin \theta)$  の関係で変化する<sup>6)</sup>。ただし、形成されるテクスチャが回折格子のような直線状の凹凸構造に限定される、きれいな直線状にはならない、



(a) 表面波干渉法 (LIPSS)



(b) 多光束干渉法 (DLIP)



(c) オムニフォビシティ滑落表面 (SLIPS)

図4 干渉を利用した機能的テクスチャの作製方法とオムニフォビシティ滑落表面

また利用できるレーザーの波長の制約によりピッチが数百 nm 以上に限定されるなどの制約がある。

これに対して、複数本のレーザービームを直接干渉させる多光束干渉法 (direct laser interface patterning; DLIP) がある [同図(b)]<sup>7)</sup>。この方法だと、ピッチの揃った直線状の回折格子を形成できるだけでなく、レーザービームの本数や入射角によって、実にさまざまな干渉縞を形成することができる。機能的テクスチャ形成の観点から考えると、溝深さを大きくできることに最大のメリットがある<sup>8)</sup>。

## 2. SLIPSによる撥油・防汚

レーザー干渉加工法のバイオミメティクスへの応用として、オムニフォビシティ滑落表面 (潤滑液含侵多孔質表面、slippery lubricant infused porous surface ;

SLIPS) という加工法がある [図 4(c)]<sup>9)</sup>。ウツボカズラと総称される食虫植物の一種は、その入り口に潤滑液を含んだ微細構造を有しており、誘引されて入り口にとまった虫が中に滑り落ちる仕組みである。先述したリエントラント構造と並んで、究極の撥液構造として注目されている。

オムニフォビシティ滑落表面は、以下の工程で作製される。

- ① 多孔質化：フェムト秒レーザーの出力ビームを、回折光学素子などで分岐した後、多光束干渉させ、固体表面に所定のパターンの微細周期構造を付与。
- ② 低表面エネルギー処理：加工表面に 1H, 1H, 2H, 2H-パーフルオロデシルトリエトキシシランなどの低表面エネルギー処理剤を含浸させ親水化。
- ③ 潤滑油の含浸：潤滑油を滴下した後、試料から余分な潤滑油を除去。

図 5 に潤滑油としてシリコンオイルを用い、ポリエチレンテレフタレート (PET) に形成したオムニフォビシティ滑落表面 [同図(a)] と、そこに滴下された蒸留水が滑落する様子 [同図(b)] を示す。オレイン酸などの油に対しても、同じような滑落性が認められた。被加工物材質には、樹脂だけでなくアルミニウムやステンレスなどの金属を用いることができる。

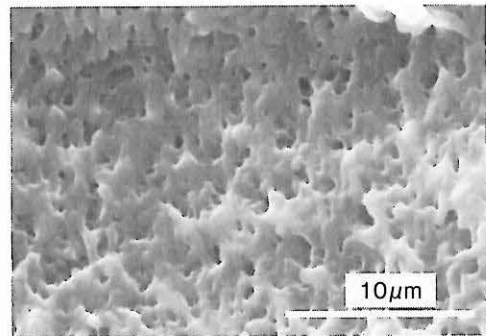
☆

表面処理技術はコストやスピードの観点から化学的な処理が主流であったが、短パルスレーザーを導入することで物理的な処理を産業実装できる条件が見えてきた。この革新的なレーザー加工技術が、カーボンニュートラルや SDGs (持続可能な開発目標) を支える低環境負荷で持続可能なモノづくり技術として実現されていくことを期待したい。

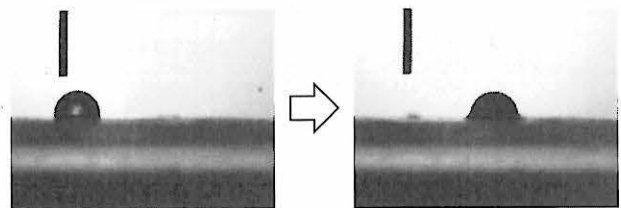
誌面の制約から親水・水はけ性に焦点を当てたが、加飾などほかの物理機能の付与については、筆者へ直接問合せいただければと思う。

【謝 辞】

本研究の一部は、令和 2~4 年度経済産業局・戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポーターインダストリー事業) 「3 次元・高速・直接加工のための超短パルスレーザー加工装置の開発」によって行われた。



(a) 微細構造



(b) 水滴の滑落の様子 (2 秒間、傾斜角度 10°)

図 5 PET 表面に形成された微細構造と SLIPS における蒸留水の滑落の様子

参 考 文 献

- 1) 山口昌樹：超短パルスレーザーによる撥水/親水性を付与する機能的テクスチャの加工技術、プラスチック、Vol.72、No.5 (2021)、pp.56-61
- 2) C.Neinhuis, W.Barthlott: Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces, *Annals of Botany*, 79 (6), 1997, pp.667-677
- 3) C.W.Extrand: Model for Contact Angles and Hysteresis on Rough and Ultraphobic Surfaces, *Langmuir*, 18 (21), 2002, pp.7991-7999
- 4) 山口昌樹：フェムト秒レーザーによる逆テーパー形状のダイレクトマイクロ孔加工、日本機械学会 2021 年度年次大会、J111-06、2021、2p.
- 5) M.Birnbaum: Semiconductor surface damage produced by ruby lasers, *J. Appl. Phys.*, 36 (11), 1965, pp.3688-3689
- 6) E.E.B.Campbell, D.Ashkenasi and A.Rosenfeld: Ultra-short-pulse laser irradiation and ablation of dielectrics, *Materials Science Forum*, 301, 1999, pp.123-144
- 7) A.A.Maznev, T.F.Crimmins and K.A.Nelson: How to make femtosecond pulses overlap, *Optics Letters*, 23 (17), 1998, pp.1378-1380
- 8) J.Bonse: Quo Vadis LIPSS?—Recent and Future Trends on Laser-Induced Periodic Surface Structures, *Nanomaterials*, 10 (10), 2020, p.1950
- 9) T.S.Wong, S.H.Kang, S.K.Y.Tang, E.J.Smythe, B.D.Hatton, A.Grinstead and J.Aizenberg: Bioinspired Self-repairing Slippery Surfaces with Pressure-stable Omniphobicity, *Nature*, 477 (7365), 2011, pp.443-447