

バイオミメティクス構造の産業応用の新展開 —超微細加工技術で新しい付加価値を—

山口 昌樹 信州大学 繊維学部 機械・ロボット学科 教授



《PROFILE》

略歴：

1987年 3月	信州大学大学院修士課程修了
1987年 4月	ブラザー工業(株)入社
1994年 3月	信州大学大学院博士後期課程修了(博士(工学))
1995年 8月	東京農工大学工学部助手
1999年 12月	富山大学工学部助教授
2008年 3月	岩手大学工学部教授
2015年 4月	信州大学繊維学部教授、現在に至る

生体工学、バイオミメティクス、ストレス科学の研究に従事。
01年日経BP技術賞受賞。08年ライフサポート学会製品賞受賞。原著論文116編、国際会議発表92編、著書28編、成立特許国内25件・海外5件等。

1 はじめに

バイオミメティクスは、生物が進化の過程で獲得してきた優れた機能や形状を模倣して人工物へ適用し、技術革新を図ることを目的としている。「水はけ性の向上」、「摩擦、凝着力低減」、「流体抵抗の低減」、「光の低反射」、「熱放散の向上」、「接着力の発現」、「生体親和性の向上」など、様々な物理機能の向上をもたらす新技術として期待されている。

バイオミメティクスの歴史は古く、1950年代後半に神経生理学者のオットー・シュミット (Otto Schmitt) 博士によって提唱された。バイオミメティクスの概念で作られた材料が商品化された最初の例は、日本ではマジックテープとして知られている面状ファスナー (スイスの Velcro Industries B. V.) だとされており、その後米国航空宇宙局 (NASA) も宇宙服用に開発している¹⁾。1970年代には、酵素や生体膜などを分子レベルで模倣しようとする化学分野での研究が盛んになった。バイオミメティクス研究によって、「微細でしかも周期的な立体構造 (微細周期構造)」が新しい機能をもたらすことが数多く見出され、様々な動植物や昆虫の表面に備わる優れた機能の解明が徐々に進んだ。2000年代に入り、半導体製造技術やマイクロマシニング技術の発展に伴ってマイクロメートル、ナノメートル領域の超微細加工技術が確立されたことも契機となり、材料・表面科学分野で再び脚光を浴び始めた。ここでは、機能の向上をもたらす微細周期構造をバイオミメティクス構造と呼び、その可能性について解説したい。

2 バイオミメティクス構造とは

図1(a)には、バイオミメティクス研究の代名詞となったロータス (ハス) 効果の様子を示した。表面の微小な突起群により、表面と接触する液体との間に撥水性が生じることは、ハスの葉に現れる水玉等で古くから認識されていたが、電子顕微鏡の発明によりその詳細が観察できるようになるまで、理論的研究はあまり進まなかった。1990年代から、バイオミメティクス構造で撥水性や親水性などといった濡れ性を「物理的に」改善できることが認識され始めた。バイオミメティクス構造の種類によって現れる物理的な機能も異なり、ハスの葉のように撥水性と水はけ性を示すこともあれば、バラの花弁 (ペタル) のように撥水性と付着性を示すこともある (ペタル効果)。このように、物理的な構造で、同じ物質から異なる効果を引き出すことができるのも、バイオミメティクス構造の魅力であろう。

人工的なバイオミメティクス構造を設計する上で重要となるのは、水平方向のアスペクト比である歯幅 / 溝幅比 (f_1/f_2 比)、深さ方向のアスペクト比である深さ / ピッチ比 (d/τ 比)、および正弦波状、三角状、球状、T字状などといった断面形状、ピラー形状、ホール形状、ワッフル形状、ピラミッド形状、三角錐形状、ハニカム形状、およびそれらの千鳥配列などといった立体形状である (図1(b), (c))。

では、バイオミメティクス構造でなぜ新しい物理現象が現れるのであろうか。付着・凝集力は、主に分子間力 (ファンデルワールス力) によるもので、その力が粒子

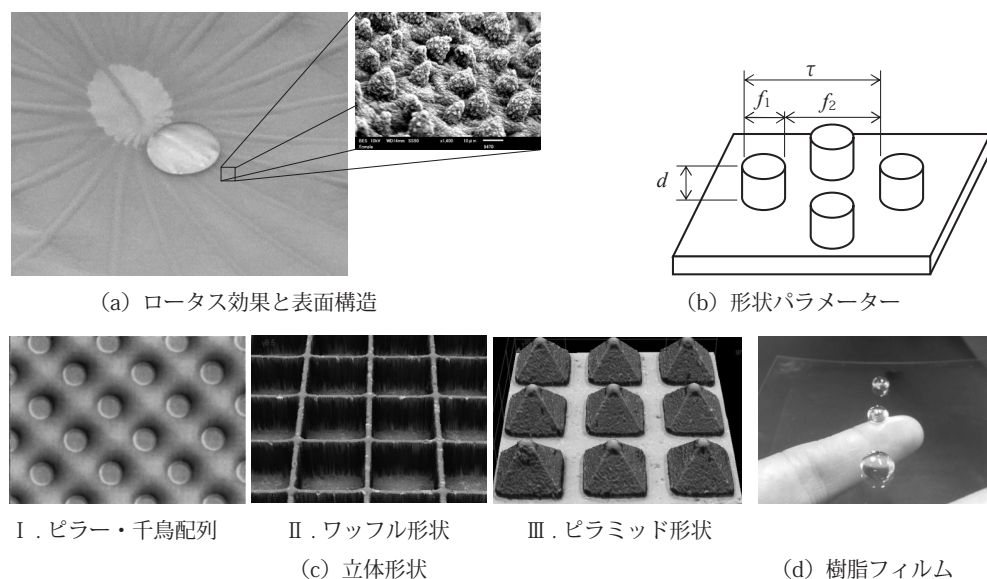


図1 バイオミメティクス構造とは

の自重に比べて大きい時に付着・凝集が発生する。無極性分子でも、瞬間的な電子の片寄によって相互作用が生じる。撥水性を例にとると、空気が非常に疎水性の高い物質であることを利用している。液滴の水分子は、表面自由エネルギーを小さくするようふるまうため、分子間力によって分子密度の高い内側に引っ張られる。そのため、凝集エネルギーは高くなり、丸くなって気体中では球状となる。固体表面上では、固体、液体、気体の3つの相互作用として、固体の撥水性が高いほど液体が固体との間の角度（接触角）が大きくなる。結果的に、バイオミメティクス構造という表面構造が、気体の疎水性と協調して固体そのものの撥水性をあたかも増幅するように作用し、超撥水性へと導くのである。

バイオミメティクス構造の作成方法には、物理的方法と化学的方法がある。ここでは、ものづくり現場の生産技術と整合性の良い物理的方法に焦点を当てたい。樹脂、金属やセラミックスの超微細加工技術は、微小電気機械システム (MEMS; micro electro mechanical systems) 製造技術と称されることもあり、バイオミメティクス構造の作成に様々なヒントを与えてくれる。

まず、物理的方法としては 1) 微細粒子を塗布する方法と 2) モールドと呼ばれる雛型を作成しておいて転写する方法がある。簡便性やコストの面では、スプレー等による微細粒子の塗布が有効である。100 nm 領域の小さな直径のマイクロ粒子を用いれば、透明性の良い撥水

面を作成することもできる。ただし、多くは非周期構造となるので撥水性を大幅に向上するのは困難で、剥離の問題も依然として解決されない。

モールドを用いる方法では 1) モールドの作成方法と 2) 転写方法で様々な組み合わせが選択できる。モールドの作成方法としては、切削、レーザー加工、エッチング (フォトリソグラフィ)、マスキングメッキが挙げられる。電鍍でいったんレプリカモールドを作成し、タイリングで大面積化を図れば、さらに自由度は広がる。工具や研磨方法の進歩によって、切削でも 10 μ m 領域の加工が可能である。切削とレーザー加工に共通している制約条件としては、平面上に溝を 1 本 1 本加工しなければならないので加工に時間がかかることである。ただ、フェムト秒レーザーで表面波干渉という物理現象を用いれば、加工スピードが桁違いに速くでき、例えば幅 4 mm に 5,000 本 (800 nm ピッチ) の微細周期構造を、5 mm/秒という走査速度で、平面、曲面を問わず形成できる²⁾。フォトリソグラフィは、マスクのパターニングに電子線描画という方法を用いれば、10 nm 領域の加工が可能である。

転写方法としては、射出成形やブロー成形などの樹脂成形、光硬化や熱成形などのナノインプリント、ロール・ツー・ロール成形、スピコーターによる遠心薄膜成形などが挙げられる。構造物への転写には樹脂成形が用いられ、量産に用いている金型モールドにバイオミメ

ティクス構造を追加するだけで新たな物理機能を付与できるのが魅力であろう。他の3方法はフィルムへの転写に用いられ、ロール・ツー・ロール成形は量産性に優れるが、特に深さ方向の転写率の向上に工夫が必要である。

3 産業への実装

液体と固体の境界面で見られる現象には、親水性、撥水性（疎水性）、水はけ性、付着性などがあり、濡れ性と総称される。図2には、界面と流体の相互作用に着目し、バイオミメティクス構造の産業への実装可能性をまとめて示した。食品・衣料分野、医療福祉分野、エネルギー分野、輸送分野、安全・防災分野など、様々な産業分野における高付加価値な製品の創出に活用されることが期待される。バイオミメティクス構造でどのような流体や界面をコントロールできるのかを知るために、いくつかトピックスとして取り上げておこう。

3.1 水はけ性

フライパンの焦げ付き防止加工のように、撥水性はフッ素樹脂などの高分子を塗布して化学的に付与されてきたが、材質だけでは接触角を 120° とするのが限界である。バイオミメティクス構造による撥水性は、材質自体の化学的効果と重畳して現れるので、 150° を超える接触角も実現できる。産業分野では、動的な濡れ性の制御、すなわち水はけ性が求められることが多い。そこで、フィルムの表面にピッチ (τ) $12\mu\text{m}$ 、溝幅 (f) $8\mu\text{m}$ 、深さ (d) $5\mu\text{m}$ の千鳥配列の円筒ピラーのバイオミメティクス構造を、紫外線硬化樹脂で転写成形した。平滑面では水滴が滑落しないのに、バイオミメティクス構造面ではフィルムを水平から少し傾けるだけで液滴がつるつると滑落する(図1(d))。

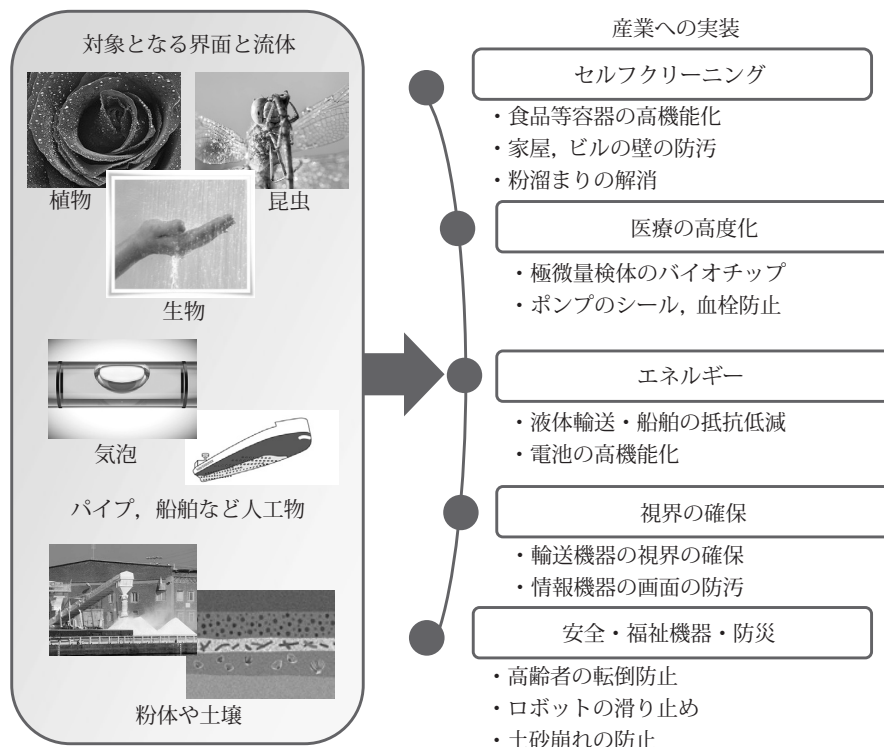


図2 界面と流体に着目したバイオミメティクス構造の産業への実装

3.2 気体や粉体のコントロール

空気中で液滴が丸くなるように、液体中の気泡の形状や挙動をコントロールすることもできる。樹脂表面にバイオミメティクス構造を施すことで、水中での気泡の接触角を 50° （平坦面）から 89° へ 80% 増大させた³⁾。タンカーなどの船舶において、船首から船底に向けてマイクロバブルを発生させることで流体摩擦を低減できたという報告もある。

また、粉体の搬送において配管内に粉溜まりが発生することがある。粉体の凝集の主たる原因は、先に述べた分子間力と静電引力が考えられるので、バイオミメティクス構造がその改善に利用できる可能性がある。

3.3 面積の増大効果

ヤモリが垂直な壁を登り下りできるのは、直径 200-500 nm の繊維が束になったスパチュラ（へら）状の剛毛群によって表面積を増大させ分子間力を大きくすることで、接着力が生じているからである⁴⁾。つまり、バイオミメティクス構造が表面積を増大させるために作用している。また、簡単な計算式で算出できるが、平板上に球を千鳥配列させると、平板のみに比べて表面積は最大で 7 倍弱になる。二次電池の電極で充放電特性の向上に利用されているように、多孔性の微粒子を用いればその面積増大効果はさらに高くなる。

参考文献

- 1) 山口 昌樹, 石川 拓司, 大橋 俊朗, 中島 求: 初めての生体工学, 講談社サイエンティフィク (2016) 1-30
- 2) Masaki Yamaguchi, Shinya Sasaki, Shojiro Suzuki, Yuki Nakayama: Injection-molded Plastic Plate with Hydrophobic Surface by Nano-periodic Structure Applied in Uniaxial Direction, *Journal of Adhesion Science and Technology*, **29** (1), 247-35 (2015)
- 3) 山口 昌樹, 平岡 仁: 微細周期構造の付与で検出特性を改善した気泡センサ, *電気学会論文誌 E*, Vol. **136-E** (4), 108-114 (2016)
- 4) Michael D. Bartlett, Andrew B. Croll, Daniel R. King, Beth M. Paret, Duncan J. Irschick, Alfred J. Crosby: Looking Beyond Fibrillar Features to Scale Gecko-Like Adhesion, *Adv. Mater.* **24**, 1078-1083 (2012)