微細加工と表面機能研究分科会 微細・精密加工技術を利用した 機能表面の創製*

Fabrication of Functional Surfaces with Micromachining Processes

諸貫信行**
Nobuyuki MORONUKI

Key words micromachining, structured-surface, functional surface

1. はじめに

固体表面に設けた微細構造により種々の機能が発現でき、それらの応用が増えつつある。しかし、そのような表面機能の設計から製作に至るプロセスについては解決すべき課題が多い。

図1にはこれらの関係を示す。加工→構造→機能発現という連鎖の中の前半の加工プロセスに着目すると、近年の微細加工技術は古典的な除去加工プロセスに加えて、MEMSのような半導体製造技術、インプリントによる形状転写やスパッタ付着等、多様なものが用いられようになってきている。同一寸法の構造を製作するための加工技術が唯一無二であるということは決してなく、技術の進展に伴って加工分解能やコスト等も常に変動していると考えられるべきであろう。また、加工単位がサブミクロンのレベルになると、工具形状とその運動軌跡の転写を原理（母性原則）とする、いわゆるトップダウンプロセスよりも、自己組織的なプロセス、いわゆるボトムアッププロセス¹⁾が有利となる領域がある。要求に合わせた加工プロセスの選択においては適切な組合せも考える必要があろう。

次に、上記連鎖の後半の機能設計に着目する。表面構造で発現される機能は多岐にわたり¹⁾、その典型例として、摩擦、濡れ性、光学特性の制御が挙げられる。これらの機能と構造寸法の関係は一部で設計論が確立されているものの、検討が十分でないものもある。したがって、所望の機能を発現するための構造と加工技術を選択するための一般論確立が今後必要であると考えられる。

本分科会は、上記のような微細加工法と機能発現の間を

つなぐための調査と体系化を行うことを目的としている。なお、加工技術そのものも重要な研究の対象であるが、本分科会では加工は手段と捉えており、必ずしも目的とは捉えていない。

2. 分科会の視野に含める機能

表面機能という言葉は多様な意味をもち、例えば化学修飾等はこれまで長く研究が行われてきている。本分科会ではこれらの領域とのバッティングを避け、機械的な構造による機能発現に焦点を絞っている。以下では筆者が関連した幾つかの代表例を紹介する。

2.1 表面微細構造による濡れ性の制御

表面構造による濡れの制御も多くの研究が既に行われてきており、ハスの葉が水をはじく様子が典型的な例であろう²⁾。特に表面粗さの影響については古くから議論されており、Wenzelは粗さによって親水/疎水の性質が強まるとし³⁾、CassieとBaxterは粗さの凹部と凸部で性質が異なる場合にその平均的な性質になると考えた⁴⁾。Bicoらは古典的なYoungとWenzelの式を実際の表面形状に適用できるように拡張するとともに、寸法形状が既知の構造を作成して検証を試みた⁵⁾。さらに、微細構造をもった表面（テクスチャ）の機能の応用についての検討も行った⁶⁾。これらの成果をまとめた書籍もあるが⁷⁾、これまでの研究では粗さをランダムなものとして扱う傾向があり、高精度な加工技術により決定論的な形状を製作できるという視点に立つものは少ない。

図1 加工プロセス、微細構造および表面機能の関係

*原稿受付 平成19年7月20日

**正会員 首都大学東京システムデザイン学部
(東京都日野市旭が丘6-6)

諸貫信行

1981年東京都立大学大学院修士課程修了。工学博士。日本楽器製造、東京都立大学助手、助教を経て首都大学東京教授。

図2 Si基板上の円柱構造が水滴の接触角に及ぼす影響⁸⁾

そこで構造の設計的立場に立ち、シリコン基板に微細円柱構造を設け、寸法を変えながら水の接触角を調べた結果が図2である⁸⁾。上方の図は前進および後退接触角を、下方の図は接触角ヒステリシス（前進接触角と後退接触角の差）をそれぞれ示す。円柱高さが4 μm 以下の場合、円柱直径の減少に伴って前進角は大きく、また、後退角は小さくなった。結果としてヒステリシスは100度を超えるまでも大きくなった。図中には液滴の写真も示しており、性質が大きく異なることがわかる。

興味深いのは円柱高さが8 μm の場合であり、円柱直径の減少に伴って、接触角が大きく、またヒステリシスは小さくなった。これは、円柱構造の下部に空気がトラップされた状態になったためと考えられ、親水的なシリコン表面が疎水的性質を示したことになる。このようなエアトラップの一般的条件を見出すことは難しいものの、表面構造によって濡れ性を親水から疎水まで大きく変えられることがこれらの結果からわかる。

しかし、シリコン基板にドライエッチングで加工するのでは寸法やコスト面での制約が大きく、この成果を実際に適用する際の障害となる。金属や樹脂表面にこのような微細な形状を転写の方が合理的であり、プロセス上の工夫がさらに必要なのは明らかである。つまり、基礎研究から応用に展開する際にはプロセスから見直さなければならないということである。

なお、応用的観点からは接触角だけではなく、転落角（試料面を傾けたときに液滴が転がりだす角度）が重要となる場合が多い。これについての定式化と実験の評価はMiwaらの文献に詳しいものの⁹⁾、設計論や実用化に際してのプロセス選択に際しての課題は多い。

2.2 表面微細形状による摩擦の制御

濡れた床での転倒事故の原因の一つに、靴（あるいは足）と床との間に発生する動圧がある。表面に微細構造を設けることで、発生する圧力を下げることが期待できる。理論的な扱いとしては動圧軸受の設計と類似であるが、構

図3 動圧による滑りと表面微細構造による抑制¹⁰⁾

図4 表面構造による摩擦特性の改善例¹⁰⁾

造の弾性変形を無視することができないため、有限要素法による連成解析が必須となる。これは、自動車のゴムタイヤと路面の関係と類似ではあるものの、設計に関連する文献は意外に少なく、また、加工法の選択指針についても不明な点が多い。

図3左は、いわゆるストライバック曲線を示す。横軸は流体粘度・滑り速度/面圧というパラメータを、縦軸は摩擦係数をそれぞれ示す。粘度と面圧を一定とするならば、滑り速度の上昇に伴って境界潤滑から混合潤滑へ、さらには流体潤滑へと状態が遷移しながら摩擦係数が変化する様子を同図は示す。ここで、表面構造によって2面間に挟まれた流体を積極的に排出できれば動圧の影響が小さくなり、流体潤滑への遷移条件 s_t が大きくなり、ひいては転倒事故を防止すること等が期待できる。

図4は矩形の微細構造を設けた床面とシリコンゴムの間の摩擦を調べた結果を示す。平滑な床（Flatと表記）に対する摩擦は静摩擦係数が小さいだけでなく、流体潤滑への遷移条件 s_t が図の左側に寄っていることがわかる。一方、ピッチ150～300 μm の周期構造を設けた場合、摩擦係数が大きくなる（グラフが上にシフト）だけでなく、図の右側にもシフトしていることがわかる。これは流体潤滑への遷移条件 s_t を変えることができたことを意味し、より滑りにくい表面になったことがわかる。この結果はゴムの硬さや寸法が特定の場合に限られ、一般化のためには更なる研究が必要であることは言うまでもない。また重要なのは加工法の選択である。前述のように、この選択によっては事業化の可能性は全くなってしまふ。

2.3 表面微細形状による光学特性の制御

回折や干渉を利用した光学機能表面の設計はこれまで多く検討されてきており¹¹⁾、波長レベル以下の微細構造を製

図5 自己整列微粒子をマスクとしたエッチングによる光学機能面の製作法¹⁶⁾

図6 微小ピッチの円柱構造 SEM 写真

作する必要があるために加工法の選択は特に重要となる。例えば電子ビームを用いれば波長以下の微細構造は容易に製作できる。窓ガラス表面にこのような構造を設けることで、夏の高い日差しは遮りながら冬の低い日差しを室内に入れるような興味深い機能が発現できる¹²⁾ものの、ナノメートルレベルの微細構造をメートルオーダの広範囲にわたって製作することは容易ではない。

大面積化において有利となるのが自己組織的なプロセスである。典型的な手法としてラングミュア・プロジェクト(LB)膜があり、例えばステアリン酸を水面に落として基板を引上げるだけで単分子膜を製作することができる。類似の方法として、微粒子を分散させた懸濁液から基板を引上げることで微粒子を自己整列させる方法があり、これによれば規模を大きくすることは比較的容易である¹³⁾。筆者らは場所によって濡れ性が異なる基板を用いることで、所望の場所に微粒子を自己整列させる方法も検討しており、応用の自由度を高めようとしている¹⁴⁾。

整列させた微粒子はフォトニック結晶あるいは、構造色による表示素子等に応用することが考えられるが、エッチングの際のマスクとして用いることもできる。図5は反応性イオンエッチングによる加工プロセスの模式図を示す。自己整列した微粒子の間のわずかな隙間を通してイオンが基板に到達し、侵食することで基板に垂直方向への加工が進むとともに、ラジカルによるサイドエッチング作用により、微粒子の下部まで侵食が進む結果、尖った形状が得られると考えられる。このような構造は無反射面として利用することができる¹⁵⁾。

図6は、直径300nmのシリカ微粒子をシリコン基板上に自己整列させた後に上記のような加工を行った結果を示す。微粒子があったであろう場所に平坦部が少し残っているものの、狭ピッチかつ高アスペクト比の加工が行えていることがわかる。反射率を評価した結果、平滑面に比べ2%程度まで低下することがわかった。

ここで示したものはあくまで一例であり、必ずしも一般的な例ではない。ナノメートルレベルの加工技術も、プローブ顕微鏡を応用した手法を含めて多岐にわたる。現状では大面積化の可能性や低コスト化を考えて樹脂への転写加工

が多く行われているようであるが、広い応用を想定した加工プロセスの体系的な把握は十分に行われていない。

3. 活動経過

分科会発足のきっかけは、春秋の大会で継続しているオーガナイズドセッション「マイクロ・ナノ加工とその応用」で、ここ数年常に多数の講演申込みがあったことである。オーガナイザ(森田 昇教授:富山大学, 梅原徳次教授:名古屋大学, 池野順一准教授:埼玉大学, および筆者)の間で相談の上、本分科会の発足を決めた。他のオーガナイザには分科会の幹事団として運営に協力をお願いしている。現在の会員数は名簿上48名であるが、会費を必要とする専門委員会と違って分科会は出入り自由な雰囲気があるため、毎回、各大学の学生を含めた若々しい雰囲気の活動が進められている。

なお、本分科会は他の委員会のように歴史は長くなく、正式発足は2006年2月である。これまでの活動経過と話題提供内容は下記のとおりであり、例会では講演や見学を含めた活動を進めてきている。

第1回(2006.1.13)

- 電気化学プロセスに基づく自己組織化ナノ構造の形成と機能化

首都大学東京/KAST 益田秀樹 教授

第2回(2006.3.15)

- SOGの電子ビーム露光, ダイヤモンド等のイオンビーム加工, ナノインプリントについて

東京理科大学 宮本岩男 教授

第3回(2006.5.12)

- 付着力と摩擦制御のための表面エネルギーの評価法の開発とその応用¹⁷⁾¹⁸⁾

名古屋大学 梅原徳次 教授

- 微細転写に対する東芝機械の取り組み

東芝機械 飯村幸生 氏

第4回(2006.7.18)

- ガラス表面微細加工技術

オリンパス 今村友紀 氏

- 超微細塑性加工について

表1 2007年春季大会でのシンポジウム内容

機能	標 題	スピーカ
光学	光学機能発現の原理	大阪府立大学 菊田 久雄 教授
	高精細表面テクノロジー プラットフォームと応用例	住友スリーエム 雲田 治夫 氏
濡れ	濡れ性制御の原理	協立化学産業 上村 太一 氏
	濡れ性制御の具体例	日立ハウステック 鈴木 弥志雄 氏
摩擦	トライボロジ機能発現の原理	名古屋大学 梅原 徳次 教授
	表面加工による自動車パワートレ ーン性能向上	日産自動車 南部 俊和 氏

東京工業大学 吉野雅彦 助教授

第5回 (2006.9.20)

・ 宇都宮大学での研究紹介と VBL 棟見学

宇都宮大学 市田良夫 教授

(代 佐藤隆之介 助手)

第6回 (2006.11.25) 生産性国際交流センター

・ 機械学会生産加工・工作機械部門講演会にて「微細加工と表面機能」セッション開催

第7回 (2007.3.20) 春季大会シンポジウム (表1)

第7回は春季大会講演会のシンポジウムにあて、表1のような内容の講演と討論を行った。構成として前述の3機能(光学、濡れ、摩擦)それぞれについての基礎と応用の組合せとした。多数の出席者を得て活発な討論を行うことができたが、欲張って3機能を網羅してしまったためやや散漫になり、質疑の時間も十分ではなかったかもしれない。

また、2007年3月以降の分科会活動は、やや停滞してしまっている。言い訳となってしまうが、主査である筆者のキャンパス間移転があったためである。至急、体制の立直しを図りたい。

今後の方向として、多様な加工プロセスの体系化を目標のひとつに加えたい。特定の機能を得るための表面構造が決められたとしても、前述のように加工分解能、生産性、コストなどの点で適切なプロセス(あるいはその組合せ)選択するために、プロセスの特徴を比較対照できるような資料を整備する必要がある。このような体系化に際しては、実際の製造に関連した企業メンバーの協力が必須であり、専門委員会への展開を考える必要がある。

4. お わ り に

本分科会では、加工から機能実現までの一連のプロセスを調査・整理するとともに、加工プロセスの体系化を目指している。さらに現在は表面機能といっても摩擦や濡れ性等、ごく限られた範囲しかこれまでに検討できていないため、今後の高付加価値製品の実現に寄与すべく、対象分野をさらに広げていきたいと考えている。本稿がきっかけとなって今後、様々な分野の方と交流をもつことができれば幸いである。

また、分科会から専門委員会への展開の意思決定時期となっているが、運営体制が必ずしも十分には整っていない状況にある。今後、体制の整備を進めながら、専門委員会としての再スタートを図りたい。

参 考 文 献

- 1) C.J. Evans and J.B. Bryan: "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces, *Annals of CIRP*, **48**, 2 (1999) 541.
- 2) W. Barthlott and C. Neinhuis: Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces, *Planta*, **202** (1997).
- 3) R.N. Wenzel: *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 988 (1936).
- 4) A.B.D. Cassie and S. Baxter: Wettability of Porous Surface, *Trans. Faraday Soc.*, **40** (1944) 546.
- 5) J. Bico, C. Marzolin and D. Quéré: Pearl Drops, *Europhysics Letters*, **47**, 2 (1999) 220.
- 6) J. Bico, U. Thiele and D. Quéré: Wetting of Textured surfaces, *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **206** (2002) 41.
- 7) ドウジェンヌ他: 表面張力の物理学, 吉岡書店, (2003).
- 8) 諸貫信行, 高山明典, 金子新: 濡れ性制御のためのテクスチャ設計, *日本機械学会論文集 B 編*, **70**, 693 (2004) 1244.
- 9) M. Miwa et al.: Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces, *Langmuir*, **16**, 13 (2000) 5754.
- 10) N. Moronuki, D. Kajita and A. Kaneko: Micro-structure Design of the Floor to Prevent Slip, *Proc. 7th Euspen*, (2007) 513.
- 11) 精密工学会春季大会シンポジウム資料集, (2007) 5.
- 12) Leistungen und Ergebnisse Jahresbericht, *Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme*, (2001).
- 13) N.D. Denkov and K. Nagayama et al.: *Nature*, **361**, 6407 (1993) 26.
- 14) 諸貫信行, 小木曾淳一, 金子新: 濡れ性パターンを用いた微粒子の自己整列 (第1報), *精密工学会誌*, **72**, 9 (2006) 1113.
- 15) 豊田宏: 無反射周期構造, *光学*, **32** (2003) 489.
- 16) 諸貫信行, 金子新, 小林隼人: 自己整列化微粒子をマスクとした表面微細加工とその光学特性, *日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集*, (2007) 259.
- 17) 梅原徳次, 梅原康平: ESEMによる摩擦による表面エネルギーの変化の評価, *日本機械学会年次大会講演集 V*, (2002) 93.
- 18) M. Yoshino et al.: Engineering Surface and Development of a New DNA Micro Array Chip, *Wear*, **260**, 3 (2006) 274.