

マイクロスケールの微細構造金型による機能表面加工

東京電機大学 工学部機械工学科

教授 松村 隆

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009018)

キーワード:機能表面, 集束イオンビーム, インクリメンタルフォーミング, プラスチック成形

1. 緒言

表面の微細構造により, その表面と接触する物質との物理的および化学的性質を制御する機能表面は, 今日, 多くの工業製品に応用されている¹⁾. 現在, 機能表面の多くは, めっき, 蒸着, コーティング等の処理により表面の材質を変化させ, 一様で単一の機能を発現させている. しかし, 薄膜の剥離や摩耗により, 機能性が劣化することが問題となっている場合がある. 一方, 最近では, 単一の表面でも複数の機能やその強度の制御が要求されている場合も少なくない. このような機能表面を製造するには, 異物質を表面に付与する方法では困難である. そこで, 表面に微細構造を成形し, 機能を制御する技術に関心が高まっている.

表面機能の一つであるぬれ性は, 材料の表面エネルギーに依存し, 固体表面における液体の流れや異物質との付着等に関連付けられている²⁾. ぬれ性は固体表面の材料のみならず, 表面の微細構造によっても変化することが知られており, Wenzel はそのモデル化を試みた³⁾. また, Cassie らは撥水性に関して別のモデルを提案しており⁴⁾, Patankar は, それらのモデルを表面エネルギーの観点から議論した⁵⁾. これらの知見に基づき, Onda らや Bico らは表面の微細構造を加工し, 撥水性の高い表面を示している^{6, 7)}. これらの微細構造の加工は, いずれもエッチング等の化学的処理によるものであるため, 加工に対する自由度は低い. そのため, このような微細構造を数値制御によって機械的に加工できれば, 表面機能に対する制御性が高まる⁸⁾.

以上の背景を踏まえ, 本研究では表面機能としてぬれ性と付着性を対象とし, 表面の微細構造を機械的に加工して, それらの機能を任意に制御することを目的としている. まず, 表面の微細構造に対する機械的加工法について述べる. 次に, 微細構造を有する表面におけるぬれ性の変化を調べ, Cassie のモデルとの関連づけを試みた. また, 乳酸菌の付着に対する微細構造の影響を調べ, その理論的な背景を CFD 解析によって示した.

2. 表面微細構造の機械加工法

2.1 加工工程

集束イオンビームによるスパッタリングでは, 加工速度がきわめて遅いため, 大きな表面に対して微細構造を加工

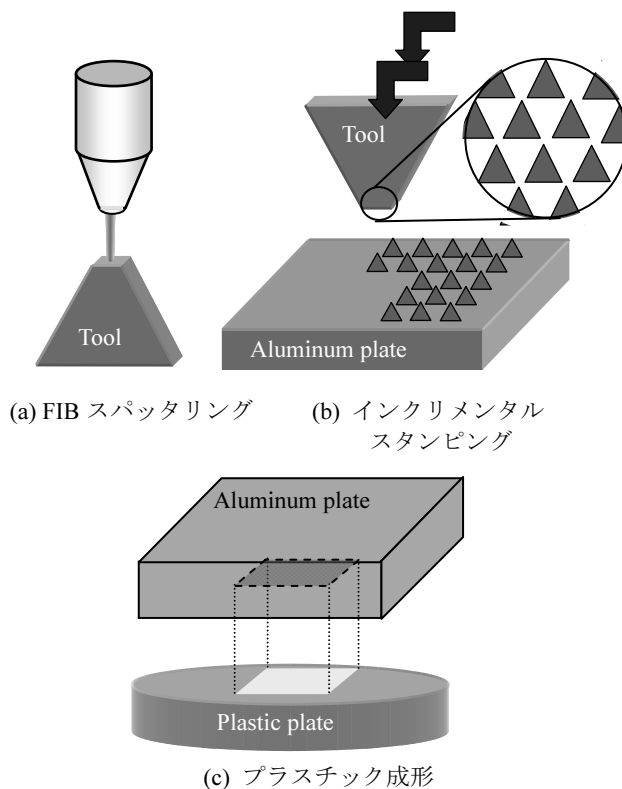


図 1 微細構造の加工プロセス

することは時間的に困難である. そこで, 図 1 の工程により広い領域に微細構造を効率的に加工する. この加工法は以下のプロセスから構成されている.

- (1) 集束イオンビーム (Focused Ion Beam)によって, 工具先端に微細構造を加工する. 以後, この工具をストラクチャ工具と呼ぶ.
- (2) 図 2 のインクリメンタルスタンピング加工機によって, 数値制御 (Numerical Control) でストラクチャ工具を一定間隔で移動させながら, 反転した微細構造を金属板に押し込んで金型を加工する. 同機は, 機械上部にストラクチャ工具を固定し, 被削材を固定したテーブルの上昇, 下降, 移動を繰り返しながら金型を製作する. 各軸はステップモーターで駆動し, 位置決め分解能は X, Y 軸が $25\mu\text{m}$, Z 軸が $2.5\mu\text{m}$ である. また, テーブル下部には圧電型動力計が取り付けられており, 工具の接触と加工時の荷重を監視する.

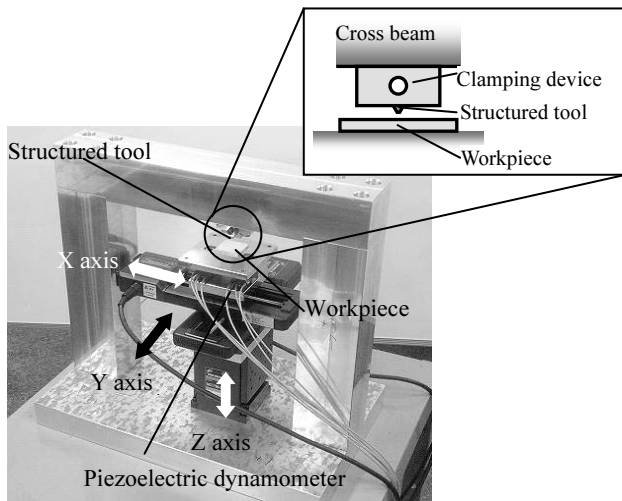
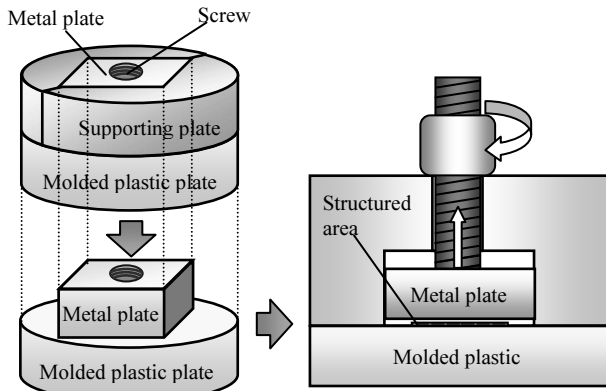


図2 インクリメンタルスタンピング加工機



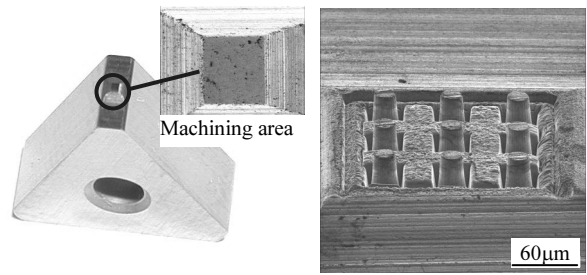
(a) プラスチック成形機(試料作製用埋込み機)



(b) 離型装置

図3 プラスチック成形

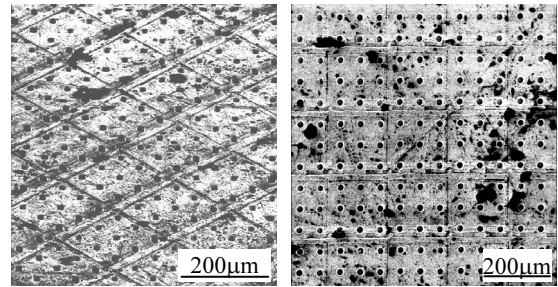
(3) 製作した金型を用いたプラスチック成形により、ストラクチャ工具と同様の微細構造をプラスチックに転写する。ここでは、図3(a)に示す走査型顕微鏡などの試料作成用埋込み機を使用し、温度 180°C、圧力 180KPa、加熱時間 20 分、冷却時間 20 分の条件で成形した。なお、離型時のプラスチックに対する曲げによって微細構造が破損するため、図3(b)のように離型する。まず、金型外周部にプラスチックが充填されないように補助プレートをつけて成形し、成形後に金型



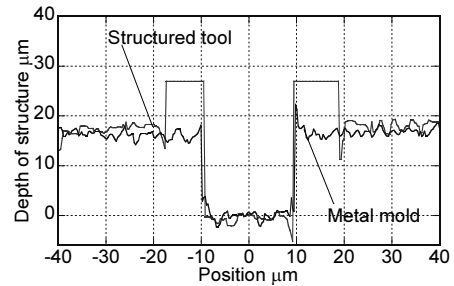
(a) 加工領域

(b) 微細構造

図4 ストラクチャ工具



(a) 微細構造部



(b) 微細構造部の加工精度

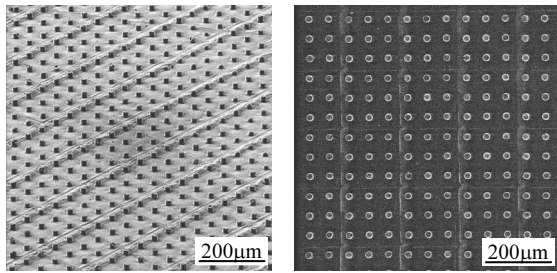
図5 インクリメンタルスタンピングによる微細構造金型

を残してプレートを取り外す。次に、金型と同形状の中空部を有する離型装置により、中空部内面をガイドとして、ねじ機構により金型をひき抜く。

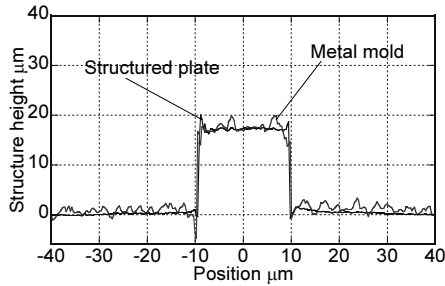
2.2 微細構造の加工事例

図4は、集束イオンビームにより 140µm の領域に直径 18µm、高さ 18µm の微細円柱をピッチ 60µm の間隔で成形したストラクチャ工具の事例である。同図(a)のように超硬合金工具の先端部を研削してスタンピング領域を限定し、集束イオンビームで、Ga イオンをドーズ量 2.0×10^{14} ions/cm² で照射する。粗工程では、プローブ電流 14nA で 8 時間、仕上げ工程では 5.2nA で 8.5 時間照射し、同図(b)のように 9 本の微細円柱の周りをスパッタリングする。

図5は、インクリメンタルスタンピングで、アルミニウム合金板の一辺 2mm の領域に微細構造を加工した金型である。同図は、図4のストラクチャ工具を用いて加工したものであり、反転した微細構造になっている。また、加工時は潤滑剤として灯油を用い、摩擦による形状精度の劣化と材料の付着を抑制している。図5(b)はストラクチャ工具の突起部と金型の押込み部の形状を比較したものである。金型のストラクチャ部は、押込み時の弾性変形により、若

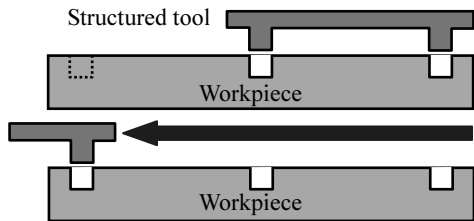


(a) 微細構造部

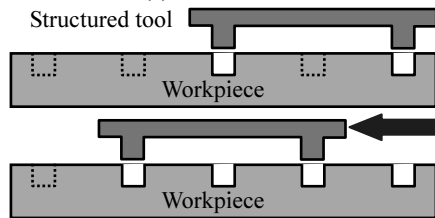


(b) 微細構造部の加工精度

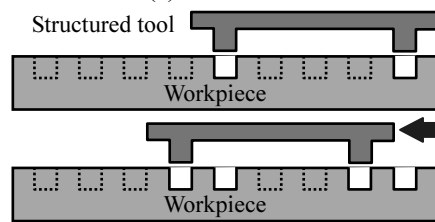
図6 プラスチック成形による表面の微細構造



(a) フルピッチ



(b) 1/2 ピッチ

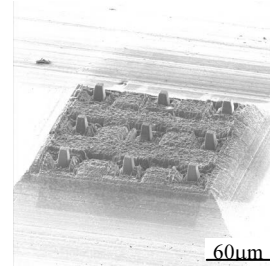


(c) 1/4 ピッチ

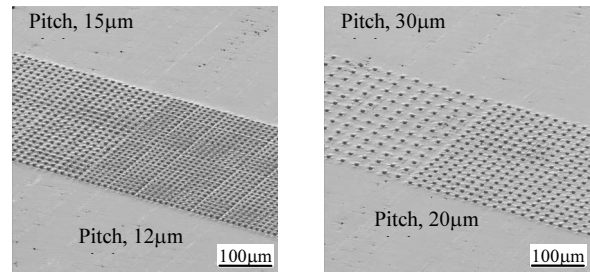
図7 微細構造のピッチ制御

干, 誤差が生じているが, 突起高さ $18\mu\text{m}$ のストラクチャ工具の反転形状とほぼ同様のプロファイルとなり, 高精度な押込みが確認できる.

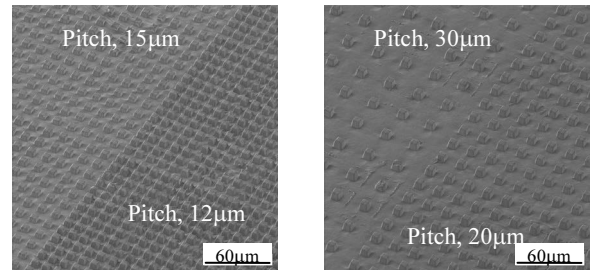
図6はプラスチック成形した微細構造であり, 同図(b)は使用した金型と成形したプラスチック表面の微細形状とを比較したものである. プラスチック上の微細構造も金型と同様であり, 十分に高い精度が得られている.



(a) ストラクチャ工具



(b) 微細構造金型



(b) プラスチック成形による微細構造
図8 異種微細構造の連続成形加工

2.3 微細構造の連続制御

一般に異種微細構造を加工するためには, 異なったストラクチャ工具を用意し, 工具を交換しながら加工することになる. しかしながら, 工具製作に時間がかかるだけでなく, 工具交換に伴う加工部位の位置決めが困難となる. そこで, 図7のように隣接する突起の間隔が大きいストラクチャ工具を製作し, インクリメンタルスタンピングにおける工具の移動ピッチを変化させて微細構造を制御する. この方法であれば, 一つのストラクチャ工具で配列の異なる微細構造を効率良く加工でき, 工具交換や位置決め作業が必要ない. また, 撥水性は突起の間隔に依存するため, インクリメンタルスタンピングにおける工具の移動ピッチを変化させることで, 表面の撥水性を制御できる.

図8にその加工事例を示す. 同図(a)に示す一辺 $6.3\mu\text{m}$, 高さ $10\mu\text{m}$ の突起を間隔 $60\mu\text{m}$ で配置したストラクチャ工具を用い, インクリメンタルスタンピングでアルミニウム合金板に同図(b)のように金型を製作した. ここでは, 加工領域を4つに分け, それぞれをピッチ $30\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$ で加工している. 同図(c)は製作した金型によってポリエチレン樹脂に微細構造を転写したものである.

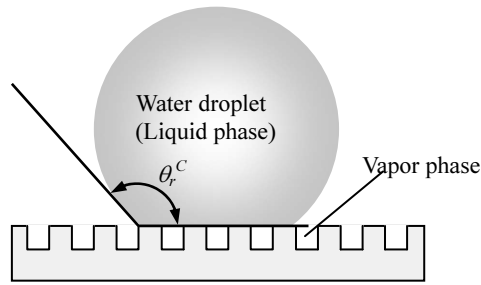


図9 微細構造部におけるぬれ性モデル

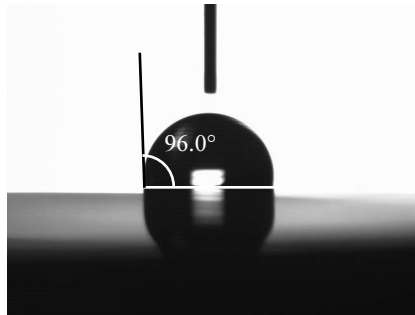
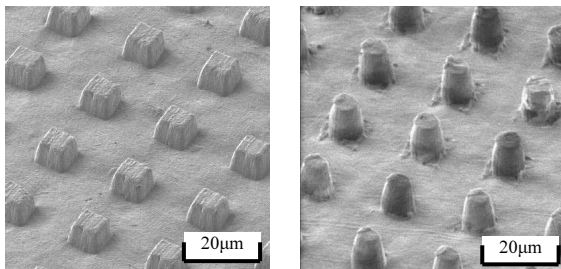
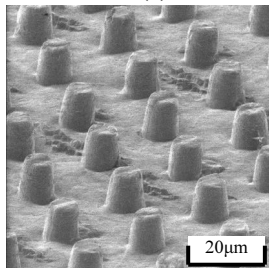


図10 平面における水滴形状



(a) 異方性形状異方性配列 (b) 等方性形状異方性配列



(c) 等方性形状等方性配列

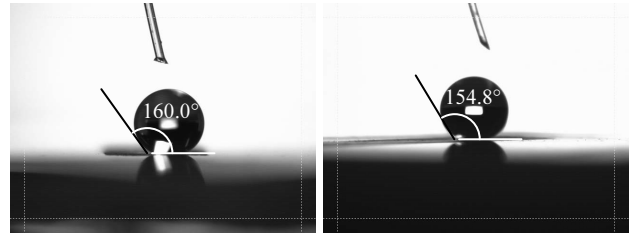
図11 微細構造の形状と配列

3. 固体表面の微細構造によるぬれ性の変化

3.1 撥水性に関するモデル

Cassie-Baxter のモデルによれば、微細構造に液体を滴下すると、図9のようにそれぞれの突起の隙間に空気が入り込み、液体と固体の接触が限定されると撥水性が大きくなる。一般に、ぬれ性は液適法により液体と固体の接触角で定量的に評価されており、このモデルによれば、微細構造を有する表面の見かけ上の接触角は、以下の式で表される。

$$\cos \theta_r^C = \phi_s \cos \theta_e + \phi_v - 1 \quad (1)$$



(a) 縦横方向からの観察 (b) 対角方向からの観察
図12 等方性形状異方性配列の水滴形状



(a) 平面 (b) 微細構造表面
図13 金属蒸着膜表面の水滴形状

ただし ϕ_s は表面全体の面積に対する突起先端部分の面積の割合である。また θ_e は図10に示すように平坦な面における液体の接触角であり、ポリエチレン樹脂における水の接触角では 96° である。

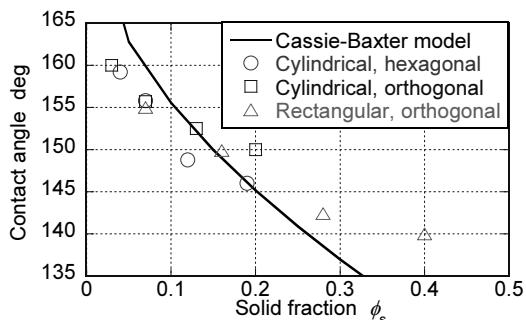
3.2 固体表面の微細構造の形状と配置

微細構造の突起形状と配置における等方性と異方性が、水滴のぬれ性に及ぼす影響を調べた。図11はポリエチレン樹脂に微細構造を作成した例である。同図(a)は、一辺 $6\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ 、突起間隔 $20\mu\text{m}$ の正方形突起を格子状に配列した微細構造である。これは突起および配置の対角方向と縦横方向の大きさと距離が異なり、両者に対して異方性のある構造となっている。同図(b)は、直径 $6\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ 、突起間隔 $20\mu\text{m}$ の円形突起を格子状に配列した微細構造であり、形状に対しては等方的であるが、配置に対して異方性を有している。同図(c)は、直径 $6\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ 、突起間隔 $20\mu\text{m}$ の円形突起を六方向に配置した構造であり、形状および配置に対して等方性がある。

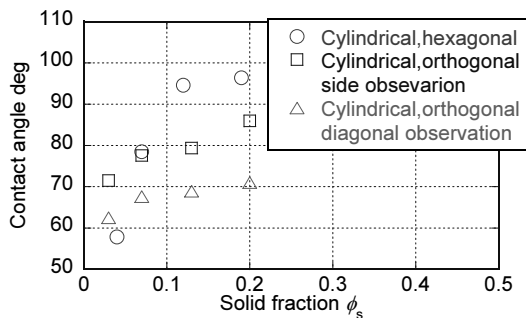
3.3 微細構造がぬれ性に及ぼす影響

図12はポリエチレン樹脂で、配列異方性のある微細構造の表面における水滴形状である。同図は、正方形配列の縦横方向と対角方向から観察した場合を比較したものであり、突起間の距離の違いによって接触角が異なる。

図13(a)は平坦なポリエチレン樹脂に金を 1000\AA 蒸着させた表面の水滴形状である。表面は撥水性から親水性に変化し、接触角は 80° となっている。同図(b)は金薄膜を有する図11(c)の微細構造に対して、水滴形状を示したものである。図13(a)と比較すると、さらに接触角の減少し微細構造によって接触角が変化していることが確認できる。



(a) プラスチックの微細構造表面



(b) 金属蒸着膜上の微細構造表面

図 14 微細構造表面の ϕ_s と接触角の関係

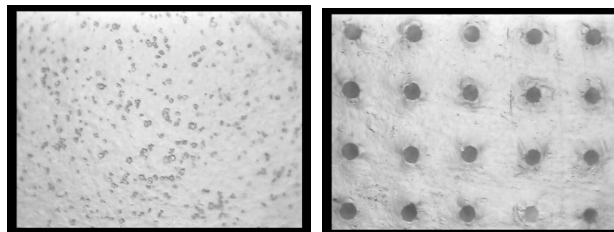
図 14 は接触角と ϕ_s の関係を示したものである。ポリエチレン樹脂に対する水のぬれ性は撥水性を示し、その傾向は Cassie-Baxter のモデルと同様に、 ϕ_s の減少に伴い接触角が増加する。さらに突起の形状および配置が等方的な場合は、モデルに最も近い特性を示している。また、接触角に対する突起形状の影響は大きくないが、配列における異方性は、 ϕ_s に対する接触角の変化率を変わる効果がある。一方、ポリエチレン樹脂に金薄膜を蒸着すると、同図(b)のように ϕ_s の減少に伴い接触角が減少し、微細構造によって、より親水性が大きくなる。

4. 固体表面の微細構造による付着性制御

4.1 付着試験

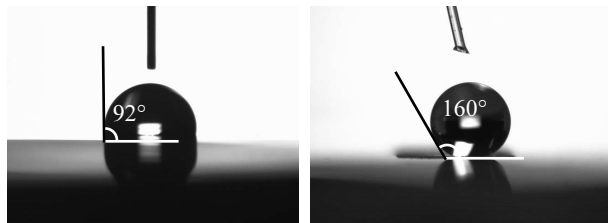
乳酸菌 LG21 を 0.2% に希釈した溶液を、平面および間隔 $30\mu\text{m}$ のピラーで構成される微細構造表面に流して付着性を比較した。図 15 は試験後に表面を乾燥させ、レーザ顕微鏡で乳酸菌の付着状況を観察したものである。同図の黒点が乳酸菌であり平面上には多くの付着が観察されるが、微細構造表面には、乳酸菌の付着は少ない。特にピラー間に乳酸菌の付着がないため、図 9 のようにピラー底部への液体の侵入がないと考えられる。

図 16 は両者の表面における乳酸菌の液滴形状を示したものである。微細構造を有する表面の水滴の接触角は大きく、付着性の抑制は微細構造の撥水性に起因することが確認できる。



(a) 平面 (b) 微細構造表面

図 15 乳酸菌(LG21)の付着量



(a) 平面 (b) 微細構造表面

図 16 金属蒸着膜表面の液滴形状

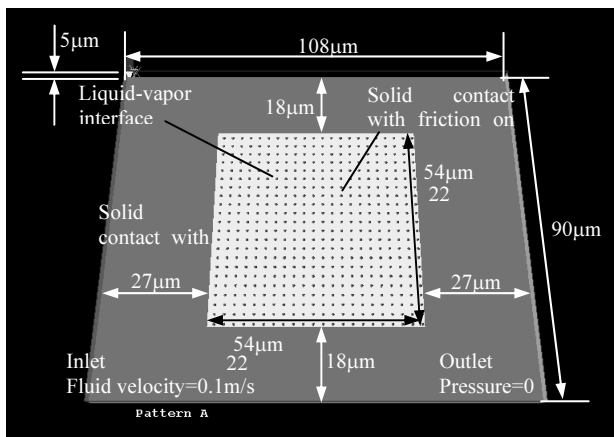


図 17 平坦部と微細構造部の CFD における解析モデル

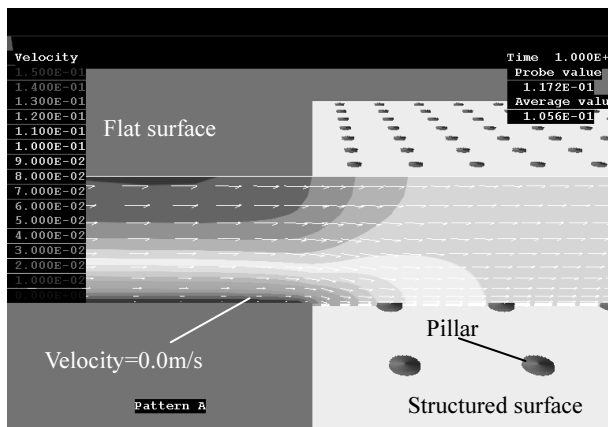


図 18 平坦部と微細構造部の流速分布

4.2 CFDに基づく付着性抑制に対する考察

微細構造が付着性を抑制する効果を流体力学的に検討するために、図 17 に示す解析モデルに基づき定常流れを解析した。ただし、液体の物性値は、 20°C の水のものを用いている。ポリエチレン樹脂の固体表面が撥水性であることから、Cassie-Baxter のモデルに基づき、図 9 のように突

起間は、気体と考え摩擦係数を 0 としている。また、流れは同図の左から右に流れ、入口部での流速を 0.1m/s とした。

図 18 は平坦部と微細構造部における液体の流速分布を示したものである。平坦部における固体と液体との接触界面では流速は 0m/s となるため、表面近傍では乳酸菌が付着しやすい。一方、微細構造部では、固体と液体との接触は、突起上部のみであるため流速降下が小さい。そのため、乳酸菌が付着する確率は小さくなる。以上のように、微細構造が液体の流れの場に及ぼす影響からも付着性が抑制されることがわかる。

5. 結論

- (1) 表面にマイクロオーダーの微細構造を高効率に加工するために、微細金型を用いたプラスチック成形法を提案した。金型は、集束イオンビームのスパッタリングによって微細構造を有するストラクチャ工具の製作し、そのストラクチャ工具を用いたインクリメンタルスタンピングにより製作する。その金型を用いたプラスチック成形によって、微細構造を有する表面を高効率に精度良く加工できる。
- (2) 間隔の広いストラクチャ工具を製作し、移動ピッチを制御することで、一つのストラクチャ工具で複数の微細構造を連続的に精度良く加工できる。
- (3) 微細構造を有する表面によって、液体のぬれ性が変化する。ポリエチレン樹脂のような撥水性を有するぬれ性は、微細構造部の固体表面と液体との接触面積の割合が小さくなるほど、撥水性が大きくなる。一方、金属表面のように親水性の高い表面では、微細構造によって親水性が高くなる。
- (4) 乳酸菌の微細構造を有する表面の付着性は、ぬれ性と関連付けられ、撥水性を有する材料では、表面への付着量が少ない。また、平坦部における液体の流れは、固体表面の近くで流速が低下し、乳酸菌が付着しやすい。一方、微細構造を有する表面では、流速降下が小さく、付着しにくい。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団(天田金属加工機械技術振興財団)平成 21 年度一般研究開発助成にて実施したものである。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Bruzzone A.A.G., Costa H.L., Lonardo P.M., Lucca D.A.: Advances in engineered surfaces for functional performance. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57 (2008), 750-769.

- 2) Hartland S.: Surface and Interfacial Tension- Measurement, Theory, and Application, (2004), Marcel Dekker, Inc., New York, NY.

- 3) Wenzel R.L.: Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water, Industrial and Engineering Chemistry, 28-8 (1936), 988-994.
- 4) Cassie A.B.D., Baxter S.: Wettability of porous surfaces. Trans. Faraday Soc., 40 (1944), 546-551.
- 5) Patanker N.A.: On the Modeling of Hydrophobic Contact Angles on Rough Surfaces, Langmuir, 19 (2003), 1249-1253.
- 6) Onda T., Shibuichi S., Satoh N., Tsujii K.: Super-Water-Repellent Fractal Surfaces, Langmuir, 12 (1996), 2125-2127.
- 7) Bico J., Marzolin C., Quere D.: Pearl Drops, Europhysics Letter, 47-2 (1999), 220-226.
- 8) Yoshino M., Matsumura T., Umehara N., Akagami Y., Aravindan S., Ohno T.: Engineering surface and development of a new DNA micro array chip. Wear, 260 (2006), 274-286.