

論文の内容の要旨

氏名：HAN YUXUAN

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Droplet Wettability and Impact Behavior on High-Temperature Microstructured Surfaces
(高温微細構造表面上での液滴の濡れ性と衝突挙動)

本論文は、微細加工技術を利用して形成した微細構造表面上での液滴の濡れ性と衝突挙動に関し、表面の温度との関係を系統的に研究したものである。微細構造表面上での液滴の濡れ性と衝突挙動は20年ほど前に研究が始まり、MEMS（微細電気機械システム）、マイクロ流体システム、マイクロ化学分析システムなどへの応用が期待され、重要な研究課題の一つになっている。しかしながら、今までに報告された微細構造表面の濡れ性に関する研究は、表面上での微細構造の形、大きさ、高さなどの輪郭形状との関係について重点的になされてきた。実際の濡れ性の因子には温度が深くかわるが、微細構造表面の濡れ性を温度も含めて系統的に検討したものは見当たらない。したがって、本研究の目的は微細構造表面上での液滴の濡れ性と衝突挙動を温度も含めて系統的に評価、特徴付けを実施することとした。

表面の濡れ性は表面温度と微細構造の各因子によって決定される。より深く検討するために本研究では、静的な濡れ性の温度依存性のほかに、熱せられた微細構造表面へ液滴を衝突させ、衝突挙動を評価することによって動的な濡れ性の検討も行った。微細構造表面を形成して、親水性、疎水性を例えば温度によって制御できれば工業的な利用価値があり、その観点から、微細構造表面上の濡れ性の温度依存性を評価した。親水性、疎水性、超疎水性は微細柱状構造の幅、高さ、間隔によって異なることはすでに知られていたが、本研究によって表面温度によって濡れ性が変化することが分かった。動的な小滴衝突による動的濡れ性においても温度によって変化することが示された。

第一章では、研究背景および研究の目的などを述べた。研究背景では生物が微細構造表面の濡れ性、超疎水性を利用した生態的な事例を紹介し、あわせて工業的な有用性を示した。また、この論文の主題である濡れ性と微細加工について理論的な記述と先行研究の取りまとめを行い、本研究の位置づけと有用性を示した。

第二章では、異なる温度での濡れ性を検討するにあたって、基本となる幅 $10\mu\text{m}$ レベルのマイクロピラーを対象とした。マイクロピラーはそれぞれ三角柱、四角柱、六角柱の3つの形状であり、配置間隔も異なるものとした。シリコンウェハ表面にICPドライエッチングをもちいたフォトリソグラフィによって製造し、エッチング深さを変化させることによって異なる高さを持つマイクロピラーとした。濡れ性の温度依存性は、ステージ温度を変化させつつ、観察した画像から接触角の測定を用い算出した。以上の結果をもとに幅 $10\mu\text{m}$ 程度の微細構造表面上での濡れ性の温度依存性に関して議論をした。

第三章では、幅 $5\mu\text{m}$ 程度の微細構造表面における超疎水性と温度の関係について接触角の測定をもとに詳しく調べた。シリコンウェハ表面に三角柱、四角柱、六角中、円柱の4種類のマイクロピラーを幅 $5\mu\text{m}$ で製作した。測定は第二章と同様に行い接触角の温度依存性から超疎水性と温度の関係を特徴づけた。超疎水性の濡れ転移はCassie-BaxterからWenzelへの濡れモデルの転移によって引き起こされることがこれまでに報告されている。本実験においては、水滴の濡れ挙動はマイクロピラーの形状で異なることが観察され、さらに特定の形状においては、 70°C を境にCassie-Baxter状態からWenzel状態への濡れ転移があることが観察された。

第四章では、表面粗さによって影響を受ける超疎水性の熱力学的メカニズムに焦点を当てた。この章では、接触角と自由エネルギー障壁に及ぼす影響を調べるために、3次元角柱マイクロピラーモデルを採用した。接触角と自由エネルギー障壁に及ぼすピラー幅、ピラー間隔およびピラー高さの影響を計算によって導きだした。計算結果は実験で得た測定結果と本質的に一致した。本手法は、超疎水性表面を設計するための理論的指針を

提供することになる。

第五章では、濡れ性の動的挙動について、その温度依存性を調べることを目的とし、加熱した微細構造表面に液滴衝突実験を実施し、動的液滴リバウンド温度を測定し特徴づけた。疎水性あるいは超疎水性を示すピラー形状、ピラー幅、ピラー間隔およびピラーの高さのシリコン微細構造表面を対象に、表面に衝突する水滴の動的挙動を高速度カメラによって観察し調べた。実験結果は、液滴のリバウンド温度の差が、液体と接触する実際の面積と加工表面上への投影面積との比である固形分率に影響されることが示された。このことは、残余の液膜がピラーの頂部に現れるメカニズムが本質的に液系のピンチオフによるものである可能性を示す。

第六章では、研究のまとめを行った。固体表面上の微細構造は濡れ性に影響を与え、表面温度も濡れ性に影響を与える。微細構造表面と温度の組み合わせを濡れ性に積極的に利用することによって、例えば、流動抵抗を減らすための超疎水性表面、あるいは、液滴の自己駆動を達成するための濡れ性勾配表面の実現など、より機能的な表面設計への展開が期待される。本研究を遂行することによって、マイクロ熱交換器、マイクロ流体、マイクロ分離器およびエンジンなど温度依存を伴う機器の設計に、微細構造表面を導入し、濡れ性を制御する理論的指針を提供することが展望される。