

## 撥水性固体表面での水滴の動的挙動と固 - 液界面での流動ダイナミクス

東京工業大学大学院 理工学研究科 材料工学専攻 准教授  
神奈川科学技術アカデミー中島「ナノエッセンス」プロジェクト前リーダー  
中島 章

【緒言】固体表面の濡れ制御は物理と化学の境界に位置する技術課題であり、その応用範囲はあらゆる工学分野に及ぶ最も基礎的かつ重要な領域である。流体やゲルには表面張力や粘性流動など、通常の固体では顕在化しない特徴があり、それらを積極的に制御・利用することで、従来にない機能性を有する表面や部材を作製しようとする試みが、近年盛んになってきている。

従来、固体表面の濡れはヤングの式を基礎として接触角の測定等から得られる“静的な”濡れと、固体表面の組成や構造との関係が評価・検討されてきた。しかしながら近年、各種の工学分野で“動的”な濡れの重要性が認識され始めている。撥水性表面での動的な濡れ性は“液滴の除去性能”の指針として特に重要である。一般に評価されているものは転落角、接触角ヒステリシス（前進接触角と後退接触角の差）であるが、これらには速度論的な情報（転落速度、転落加速度）が含まれていない。実際の工業材料では「傾斜角が何度で水滴が転落するか」ということよりも「一定の傾斜角でどれくらいの速さで水滴が転落するか」という点の方が重要な場合が多い。

我々はこの「動的撥水性」に着目し、固体表面材料科学の視点から、支配因子の検討、計測技術の開発、動的撥水性の外場制御と機能濡れ表面の開発、の3点について検討を実施してきた。本講演ではこれらの課題についての我々の最近の成果について述べる。

### 【支配因子の検討】

我々は「固体表面が動的撥水性に及ぼす因子の主要因は表面粗さと表面組成、およびその分布の階層にある」という考え方を基本にし、表面粗さを徹底的に排除した超平滑な表面を作製することを実施した。具体的にはまず一定の平滑性が確保された基板上に、そして各種の自己組織化単分子膜（SAMs）を表面粗さ 0.2nm 以下でコーティングする技術を確立した。特にフッ素系シランの超平滑コーティングの技術は現時点でも世界に類例を見ない。開発したこれらのコーティング技術にフォトリソグラフィ技術を組み合わせ、

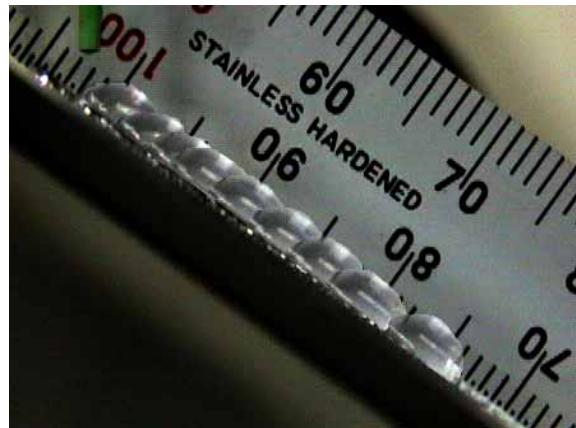


Figure 1. Sliding behavior of a water droplet on a hydrophobic Si surface coated with SAMs

様々な階層での表面エネルギー分布を作製し、水滴の転落挙動の評価を行った。その結果、フッ素系シランにおいて超平滑なコーティングが得られるプロセスウィンドウはアルキル系よりかなり狭いこと、平滑性を高度に高めると、常温近傍でのフッ素系とアルキル系の転落加速度の違いはほとんどなくなること、高度に平滑な表面では接触角と転落加速度にある程度相関が見られること、表面粗さや不均一部分は、転落角への影響が最も大きく、転落加速度、接触角の順に影響が小さくなること等が明らかになった。

### 【計測技術の開発】

動的撥水性の研究の進展を阻んできた最大の要因の一つが、再現性と精度が確保された計測システムがない、ということであった。我々は研究開始当初から、転落挙動解析システムの開発に着手し、高速度カメラと専用光源のアセンブリによる独自の画像取り込み技術と、取得した動画を処理する新しいアルゴリズム（幾何学的パターンマッチング、サブピクセル処理）を開発することにより、液滴の転落挙動を高精度で且つ再現性良く、短時間で計測できる世界初の「全自動転落挙動解析システム」を実現し、そのプロトタイプも試作した。

更に独自の粒子画像流速測定（PIV）法をこのシステムと組み合わせることにより、転落する水滴の内部流動の可視化に成功し、転落時の液滴の滑り/回転比率の同時計測と、転落する液滴の固-液界面の境界層の厚さの直接計測を可能にした。また固体に挟まれた液体の転落時に生じる二層流の可視化にも成功し、撥水固体表面での層流の発生状況を詳しく調べられるようにし、この視点から撥水表面の特徴づけを行うことができた。

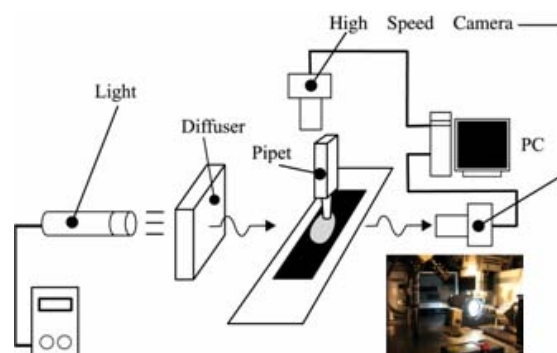


Figure 2. Schematic illustration of the droplet-sliding-behavior analysis system

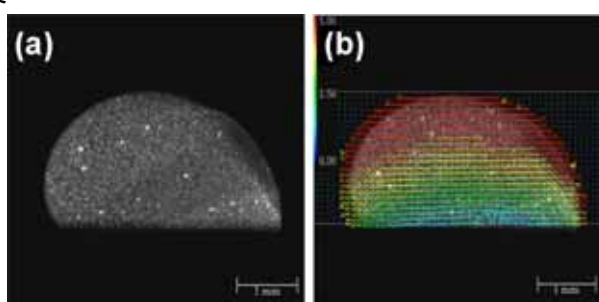


Figure 3 (a) Image of the droplet section showing internal fluidity in the sliding droplet. (b) Distribution of the velocity vector of the internal fluidity in the sliding droplet.

### 【動的撥水性の外場制御と、機能濡れ表面の開発】

動的撥水性の支配因子に関する知見と評価技術を生かし、撥水性固体表面での流体の様々な挙動を制御、応用することを検討した。動的撥水性は特に輸送機械におけるニーズが大きいことから、実験風洞を作製し水滴の転落と上昇に関する特徴づけと理論解析を行った。その結果、風圧による水滴の除去性能は、無風時の水滴の転落加速度が最も良いものが優れているとは必ずしも限らず、風の力を効果的に受けることが出来る表面が優れていることが明らかになった。この他、濡れを利用した液滴分離表面（表面クロマトグラフィー）、濡れ性を一定時間記憶する性質を有する超撥水コーティング、超撥油コーティング、動的撥水性の光スイッチ表面等を試作した。

### 【今後の展望】

従来の学問体系では、流体の dynamics を支配する固体表面の性質に関する知見はほとんど無かった。我々は材料科学の視点からこの課題に対して1つの道筋をつけたと考えている。流体やゲルは固体には無い変化の大きさと柔軟性を持ち、固体によるそれらの制御は、新しい機能表面や機能デバイスに発展できる可能性を秘めている。今後、これらの検討を通じて得られた道筋を更に広げ、固体材料の科学と技術に関する新しい1つの分野に発展させていきたい。