



液体滑落技術の食品容器への適応可能性

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点 独立研究者
天神林 瑞樹

1. 液体の付着防止技術

レトルトカレーやドレッシングを容器から出すとき、壁面への食品の付着に苦労しているのではないだろうか。食品が少し残っているだけといってもその弊害はあなどれない。フードロス、容器の汚染によるリサイクル性の低下、菌繁殖、洗浄コスト、ストレスなど多くの問題につながる。液体の付着防止に向けて、材料の表面処理・加工技術の研究が盛んに行われている（図1）。液体の付着防止技術の種類と細かい特徴は、我々のオープンアクセス総説論文で系統的にまとめているので参考にいただければと思う¹⁾。

第一世代：表面エネルギーが低い素材で膜形成すると、被膜の液体に対する付着仕事は小さくなり、くっついても剥がれやすくなる。実用化している例を紹介すると、フライパンの表面はテフロンというフッ素樹脂で被覆されており、食品がくっつきづらい特性を持つ。他にもシリコン樹脂製品は離型剤や汚れづらい素材として日常生活で多く使われている。

第二世代：1990年代後半より超撥水技術の研究が行われてきた²⁾。超撥水膜表面では水滴が球形状となり、 $\sim 5^\circ$ の傾斜でコロコロと転がり落ちる。超撥水性は低表面エネルギー素材で $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールの微細な凹凸構造を形成することで発現する。この微細構造素材は撥水性であるため、水滴は凹凸構造の隙間に入り込むことができない。その結果、凹凸構造には空気層がトラップされ、水滴は凹凸構造の先端に触れるのみとなる。低表面エネルギー素材で小さくなった付着仕事に加え、水滴の付着面積が平坦面と比べて極端に小さくなるため、水滴が僅かな傾斜で転落するのだ。しかし、微細凹凸構造は脆く機械耐久性に課題がある³⁾。そのため、実用化の例は限られており、例えばヨーグルトの蓋の裏など摩耗損傷が起きない部分で利用されている。また、再塗装を前提とした超撥水塗料が実用化している。その他の課題としては、光を散乱させるため透過性と両立が困難である⁴⁾。さらには特殊な微細凹凸構造を形成し、フッ素素材で表面を被覆すれば油滴をはじくことも可能であるが、転落可能液体は限られる⁵⁾。

第三世代：2011年、液体を潤滑液によりツルツル滑落させる液体滑落技術が報告された^{6,7)}。液体滑落膜も超撥水膜と同等の傾斜で液滴を除去することが可能である。しかし、メカニズムは異なる。液体滑落膜は、下地層と潤滑液層の2層構造で構成される。成膜基材に対してまず $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールの多孔質構造を形成する（下地層）。続いて下地層に潤滑液を含浸させることで潤滑液層を形成する。下地層は潤滑液層を基板に保持し安定化させるために必要である。潤滑作用により、液滴の摩擦が低下し、ツルツル滑り落ちるのだ。水たまりで車のタイヤが浮き上がり滑っていくハイドロプレーニングに似た現象が液滴

に対して起こっているのだ⁸⁾。この液体滑落膜は、潤滑液により表面が平坦であるため、超撥水膜の課題である機械耐久性や透明性を克服できる。さらには、潤滑液や下地層の組み合わせによって水以外の液滴を滑落可能である。

以上の背景より、液体滑落技術は非常に有望な技術であり、液体滑落膜を簡便な手法で形成するための研究が行われてきた^{9,10)}。しかし、液体滑落には2層構造（潤滑液層と下地層）が必要であるため、どんなに簡便な手法でも、少なくとも2段階の工程が必要であった。

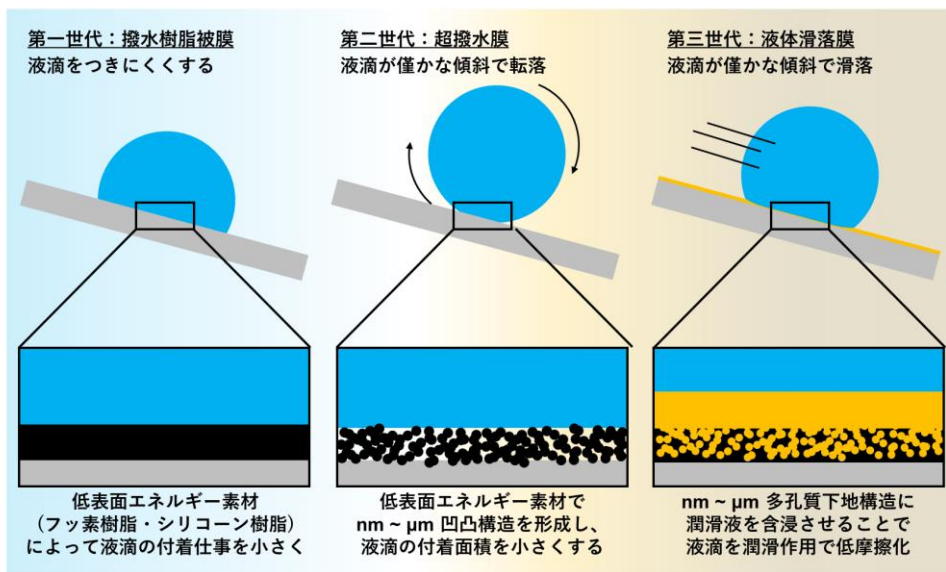


図1. 液体の付着防止技術のまとめ

2. 液体滑落塗料¹¹⁾

今回我々は、液体滑落膜を形成可能な塗料を開発した（図2A）¹¹⁾。塗料の成分は、潤滑液（シリコンオイル）、溶媒（イソプロパノール）、ナノ粒子（シリカナノ粒子）、樹脂（シリコン樹脂）である。これらの材料はフッ素フリーかつ工業的に大量生産されている市販品のみで作製可能である。フッ素素材は環境やコストが懸念されている¹²⁾。潤滑液を植物油に代替することも可能である。詳細メカニズムは省くが、開発塗料を基材に塗布すると、溶媒揮発に誘起され相分離メカニズムにより下地層（ナノ粒子と樹脂による）と潤滑液層が同時に形成される。スプレー塗布や浸漬塗布などのウェットプロセスで成膜可能であり、図2Bのようにアルミ、プラスチック、ゴム、ガラス、ステンレス基材への膜形成を確認した。

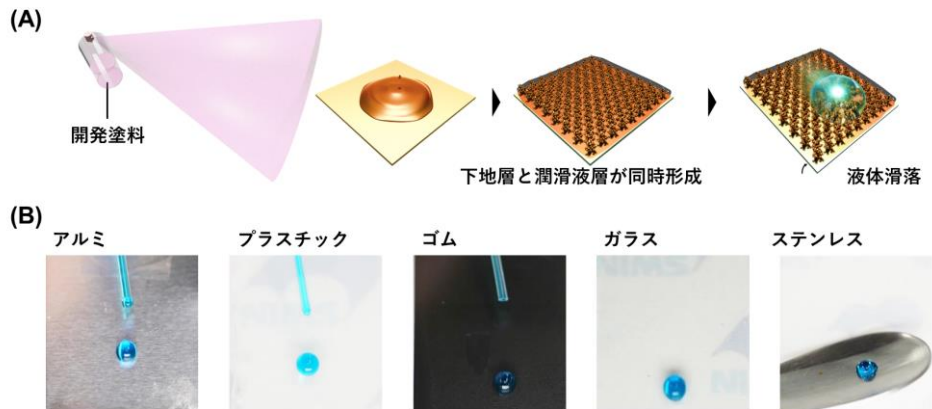


図2. 開発塗料による液体滑落膜のウェットプロセス形成技術。

(A) 膜形成過程の概要図。(B) 様々な基材への成膜性¹⁾。

3. 液体滑落機能と食品離型

一般に、液体の表面張力が小さくなるほど液体は濡れやすく（撥液しづらく）なる（図3）。例えば、超撥水塗料は、水滴や水溶液など表面張力の高い（約 50mN/m 以上）液体をはじくことができるが、油など表面張力の低い液体には濡れてしまう。フッ素を含む超撥水塗料を使えば、（ $40\text{--}50\text{mN/m}$ ）程度の液体もはじくもの存在するが、除去可能な油の種類は限られる。それに対し、開発塗料による被膜は水だけでなく、油・有機溶媒・そしてフッ素溶媒を滑落可能である（図3上写真）。

液体食品も、種類によって表面張力が変化する。醤油やケチャップ、ヨーグルトといった水性液体は超撥水膜により除去可能であるが、油分を含むドレッシングなどは滑落困難である。一方、本塗料をガラス容器内壁になじませると、容器内部に液体滑落性能を付与可能である（図4A）。これにより、本来ガラス容器にくっつく BBQ ソース、ドレッシング、ケチャップがツルツル滑落し、付着損失をなくすことができる。また、図4Bに示されるように開発塗料をシリコンチューブに流し通すと、チューブ内壁に液体滑落膜が形成され、摩擦が減少する。それにより、水滴の送液速度が約 50 倍に上昇したことを確認した。

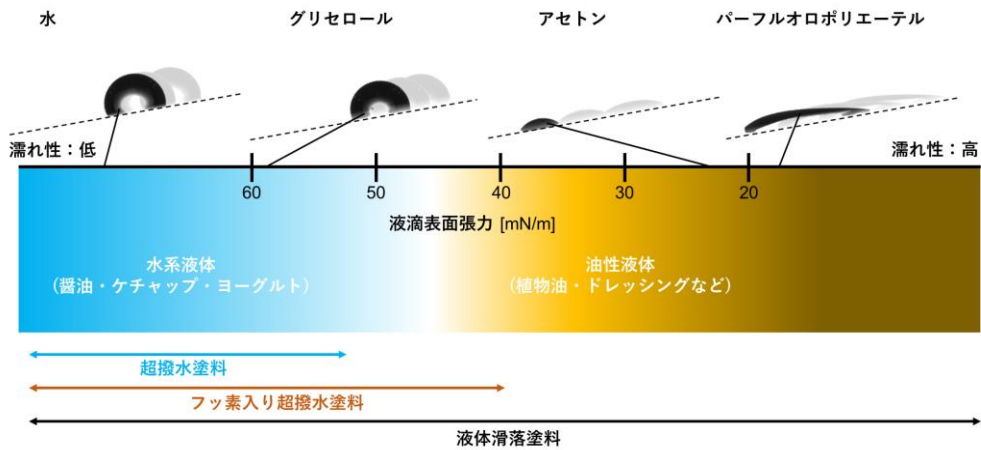


図3. 液体滑落塗料による被膜の撥液性（液体が滑落する写真）¹¹⁾、と液体食品の表面張力のイメージ。除去可能液体の表面張力範囲を既存塗料と比較した図。

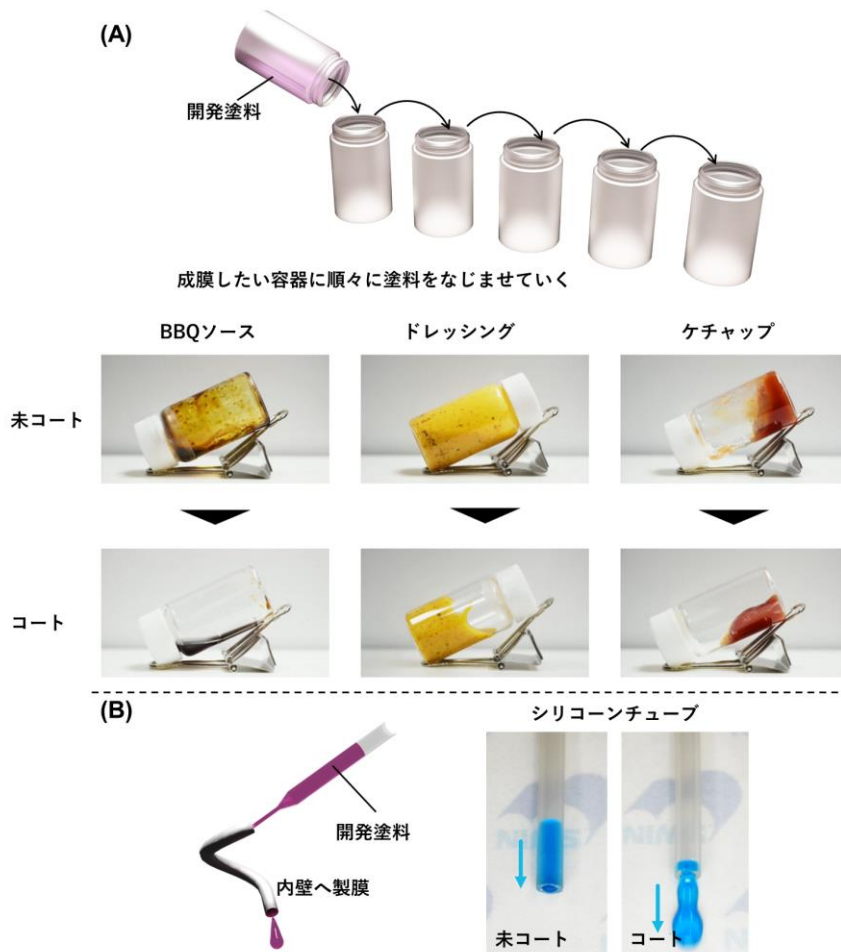


図4. (A) 開発塗料のガラス容器への適応と食品の付着防止性能。
(B) シリコンチューブ内壁への成膜による送液速度の上昇¹¹⁾。

4. 微小液滴・高温液滴の滑落性と易洗浄機能

液体滑落技術を食品容器に応用するとき、容器の蒸気や結露による微小液滴の付着や、液体の温度上昇、固体成分の付着が懸念される。超撥水表面のような微細な凹凸構造を有すると、微小水滴が凹凸構造の隙間に入り込んでしまうため、ミストや高温液滴などの除去は困難である¹³⁾。一方で液体滑落膜は潤滑液層により、表面が平坦であるため、これらの懸念はない。図5Aは液体滑落膜に、ミスト（微小水滴）を吹きかけた様子である。液体滑落膜の成膜部分では、微小水滴が頻繁に癒合し、大きな液滴が形成され、滑落していく様子が観察された。同様に高温水滴に対しても滑落性を示した（図5B）。また、固体成分の付着挙動についても調査した。砂を振りかけると、被膜表面にくっついたが、その上から水滴を滴下すると、砂汚れが水滴に吸収されて一緒に滑落し、表面が洗浄される（図5C）。これは、砂汚れが水滴への親和性が高いためであると考えられる。多くの場合、食品の固形成分は、液体部分との親和性が高いと考えられるので同様の挙動が期待できる。

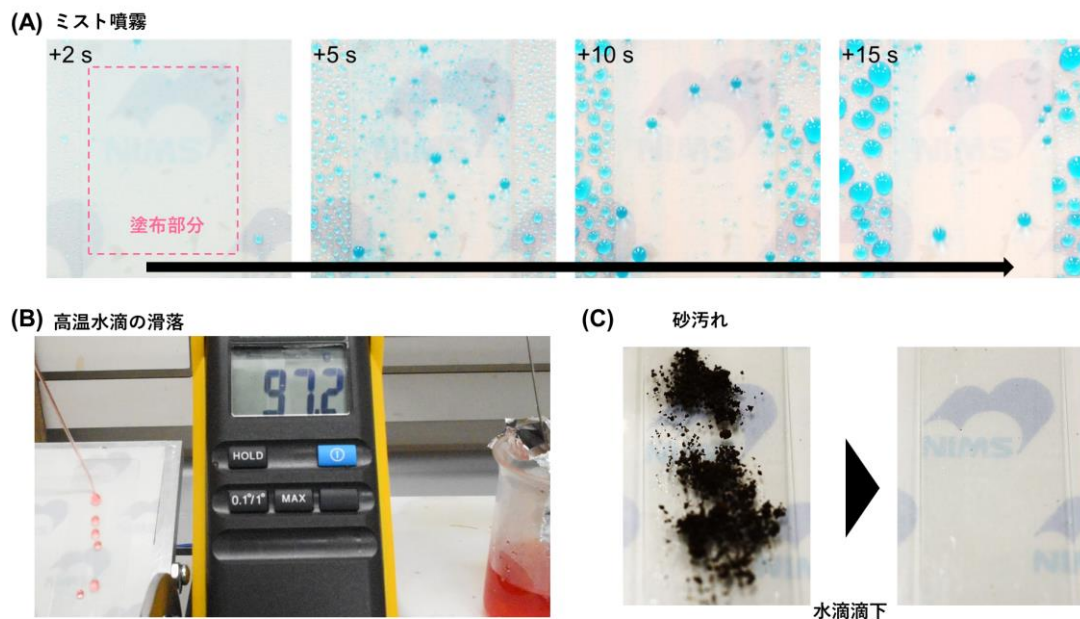


図5. (A) 微小液滴の滑落性 (B) 高温液滴の滑落
(C) 砂汚れの水滴滴下による易洗浄性¹¹⁾。

5. おわりに

本稿では、液体滑落技術の食品容器への適応可能性について紹介した。我々が開発した液体滑落塗料を、基材に塗布することで食品の付着を抑制可能であり、フードロスなどの問題解決に貢献可能と考えている。現状では、滑落性を確認した食材はわずかであるが、様々な粘弾性・表面張力を持つ液体で実験したいと考えている。塗料成分の生体適



合性や耐久性の検討も必要である。しかし、本研究により液体滑落技術を塗料という形で普及することができるため、様々な分野で気軽に有効性を確認できる。また、不本意な付着による輸送効率の低下を抑制できれば、食品容器以外にも様々な産業分野で役立つと期待している。

謝辞

共同研究者の(国研)物質・材料研究機構の早瀬 元 博士、廣井 卓志 博士、上木 岳 博士、そして研究をアシスタントいただいた藪根 牧子 氏に深く感謝する。本研究は、科研費 21H01643 の支援の元行われた。

参考文献

- (1) M. Tenjimbayashi, K. Manabe, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 23, 473 (2022).
- (2) W. Barthlott, C. Neinhuis, *Planta* 202, 1 (1997).
- (3) T. Verho et. al., *Adv. Mater.* 23, 673 (2011).
- (4) M. Cao et. al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 3615 (2016).
- (5) A. Tuteja et. al., *Science* 318, 1618 (2007).
- (6) A. Lafuma, D. Quéré, *Nat. Mater.* 2, 457 (2013).
- (7) T-S. Wong et. al., *Nature* 477, 443 (2011).
- (8) D. Daniel et. al., *Nat. Phys.* 13, 1020 (2017).
- (9) L. Chen et. al., *Adv. Mater. Interfaces* 7, 2000305 (2020).
- (10) X. Gou, Z. Guo, *Langmuir* 36, 8983 (2020).
- (11) M. Tenjimbayashi et. al., *Adv. Mater. Interfaces* 9, 2200497 (2022).
- (12) A. L. Choi et. al., *Environ. Health. Perspect.* 120, 1362 (2012).
- (13) T. Mouterde et. al., *Nat. Commun.* 10, 1410 (2019).

著者情報 -----



天神林 瑞樹 (TENJIMBAYASHI, Mizuki)

物質・材料研究機構、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点、独立研究者。2017年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士(工学)取得。2018年 物質・材料研究機構 ポスドク研究員。2019年より現職。

専門分野：界面科学(特に濡れ現象を専門)、ナノ材料工学。

<趣味>フットサル

〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1

E-mail: TENJIMBAYASHI.Mizuki@nims.go.jp