

論文の内容の要旨

論文題目 微小液滴操作技術の開発とそのマイクロ液体物性測定への応用

氏 名 石綿 友樹

インクジェット技術の発展により、プリンタは一般家庭にまで広く普及している。またインクジェット技術はその利便性から微細加工への応用も研究され始めている。微小な構造体を形成する手法の一つとして、空中で液滴同士を衝突・融合させたのち硬化させる方法が考えられる。しかしながらこのような複雑な構造体をインクジェット技術により生成するためには液滴を制御し、観察する技術が必要となる。本研究の目的は、微細構造体を形成していくうえで必要となる、液滴制御技術および制御技術を応用した状態観察技術の開発である。

1. 液滴の制御技術

まず液滴を生成する装置の開発を行った。家庭用プリンタとして広く利用されているオンデマンド型インクジェットは利用できる液体に制限があり、特に粘度においては $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 程度に限られる。そこで利用可能な液体の種類を拡張するため、連続型インクジェット技術を用いた装置を開発した。本装置を用いることで粘度 $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ までの液体を吐出することが可能になった。またノズルヘッドに内径 $8 \sim 30 \mu\text{m}$ のガラス毛細管を採用したため強酸・強アルカリなども吐出可能である。

液滴の飛翔を制御する手法として、電場と誘電体の相互作用を利用した。誘電体に対して電場を印加すると誘電体の内部と外部で誘電エネルギーの差が生じ、界面に対して応力が働く。この誘電による力を利用することで液滴を非帯電かつ非接触で飛翔制御することが可能となる。またこの誘電による力の特長として体積力であること、力の分布の局在化が可能であることなども挙げられる。体積力であるということは、文字通り力が体積に比例するということであるが、体積依存性が慣性力と打ち消しあうため液滴の加速度は液滴の径に依存しなくなる。誘電による力を用いることによって液滴径に依存せず制御することが可能となる。また電場の形状を $\sim r^2$ とした際に液滴に働く力の分布は $\sim r^5$ となり、力の及ぶ範囲がクーロン相互作用に比べ短距離に限られる。ゆえに電極の形状や電圧の印加時間を調整することにより任意の液滴のみに力を印加することが可能である。

液滴の飛翔制御として、まず液滴の偏向制御を試みた。液滴の飛翔経路の近傍に電極を設置し誘電相互作用を誘起する。このとき電極の形状として針型を用いたため、液滴

が飛翔する経路上では電場が $\sim r^2$ で分布していると考えられ、電極に最も近い液滴のみに力を印加することが可能である。電極電圧を変化させながら液滴の偏向角度を測定した結果が Fig. 1 である。偏向角度は電圧の 2 乗に比例しており誘電相互作用の特徴をよく表している。本手法を用いることで液体の物性に依存せず空中での液滴制御が可能となった。また、電極電圧を液滴の生成シグナルと同期させることによって、任意の液滴の偏向制御にも成功した。

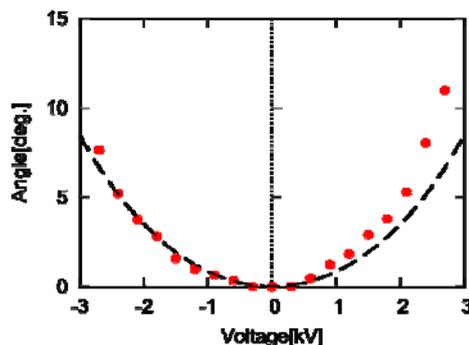


Fig. 1 液滴の飛翔方向の変化

続いて液滴の加速・減速制御を行った。偏向制御においては 1 本の電極を用いたが、2 本の電極を用いることで、進行方向を変えずに速さのみ変えることが可能である。2 本の電極をそれぞれ液滴の飛翔経路を挟むように設置する。液滴が電極を通過する前に電圧を印加すると液滴は加速し、通過後に電圧を印加すると液滴は減速する。Fig. 2 は撮影開始時からの液滴の飛翔距離を示している。液滴の飛翔に同期させて電場を印加しており、特定の液滴のみの加速制御に成功していることがわかる。またこのときの液滴は 2.4 m/s から 2.8 m/s まで加速しており、理論と比較しても妥当な結果である。空中で飛翔する液滴は常に空気抵抗を受けているため、1 ms 程度で終端速度となり重力で落下する。本原理を用いることで液滴の飛翔距離を伸ばし、より複雑な空中プロセスを可能にする。また液滴を減速させ空中に固定することで、光散乱による液体の状態測定なども可能となる。

液滴の物性評価、液滴の状態を測定するためには液滴を変形させてその応答を見る方法が考えられる。液滴の変形にはこれまでの方法と同じく誘電相互作用を用いる。またさらに加速・減速制御用の系と同じ系を利用可能であるため、飛翔制御と同時に行うことも可能である。二本の電極に挟まれた空間では電場は一様電場とみなせる。このとき液滴には楕円状に引き伸ばされるように応力が生じる。液滴の変形量は応力と表面張力とのつり合いから求めることができ、電極間隔 100 μm に 1k V の電圧を印加とすると液滴を 1 割程度変形させることが可能である。このときの変形は数 μs という非常に高速な変形であり、この変形を解析することにより高時間分解能な物性測定が可能となる。

構造体を形成させた後の回収方法として、別の液体へ突入させることで減速・回収する手段が考えられる。そこで蒸留水の液滴を静止した油の層へと突入させその挙動を観察した。油の粘度を変えて観察した結果、粘度が 1

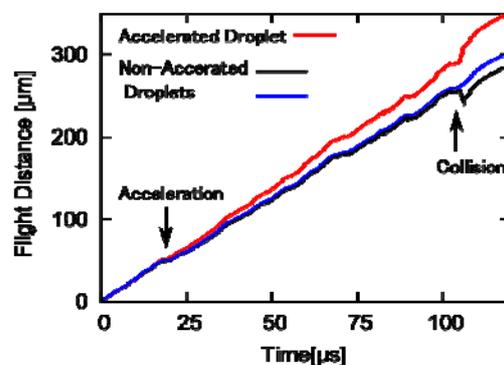


Fig. 2 加速制御時の液滴の飛翔

mPa・s 程度では安定して液滴を油中に突入させることができたが、粘度が 5 mPa・s 以上に高くなると安定しなかった。これは粘度が高くなると突入時に液滴が油表面で破裂したり、液滴同士が衝突したりしていることが原因と考えられる。

そこでこれらの破裂や衝突を回避しながら水性の液滴を油中に分散させるため液体ジェットを利用した。一度液滴を液体ジェットに入れることでセル内に安定に回収できる。半径 36 μm 液滴を粘度 20 mPa・s の液体ジェットに突入させ、ジェットごとセルに回収した後に顕微鏡で観察した。突入前の液滴と同程度の液滴が観察され、液滴の破裂や衝突を回避できたものが確認された。本手法を用いることでインクジェットにより生成した微細な構造体を安定に回収させることが可能となる。

2. 液滴振動を用いた物性測定

微小構造体を生成するうえで液滴の表面状態を観察することは非常に重要である。界面活性剤溶液は平衡状態において界面活性剤分子が表面に吸着するため表面張力が溶媒よりも低くなる。新たな表面を形成した場合には時間とともに界面活性剤の表面吸着が進行し、それに伴って表面張力が変化する現象がみられる。このような表面張力の時間変化を測定する手法として最大泡圧法があるが、この手法では 1 ms よりも短い時間領域における表面張力を測定することはできない。また表面張力の時間変化はインクジェットに関してだけでなく洗剤の起泡性などにも重要な要素であり、このような表面張力の時間変化を測定することは産業的にも重要である。

そこで液滴の振動モードを観察し 1 ms よりも短い時間スケールにおける表面張力の時間変化を測定する手法を開発した。まず本研究によって開発された手法を用いて液滴を瞬間的に変形させる。次に、変形した液滴が平衡状態へ戻る際の振動を観察する。この振動は表面張力を復元力としているため、振動周波数を測定することによって表面張力を求めることができる。また本装置は 100 μs で液滴を生成することができるため最大泡圧法に比べ非常に高速な領域の測定が可能である。また、測定の時間分解能は液滴の振動周期($\sim 10 \mu\text{s}$)と同程度となるため非常に高くなる。この技術を用いることにより表面膜の形成過程を測定することができ、微小な構造体をインクジェットで形成していく際の重要な観察手法となる。

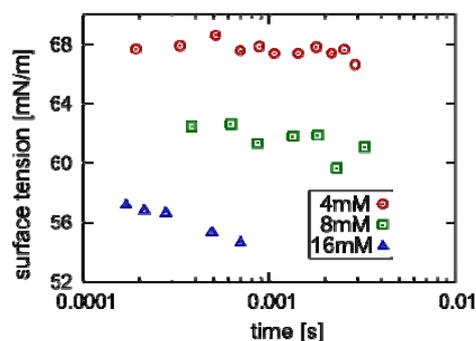


Fig. 3 デシル硫酸ナトリウム水溶液の表面張力変化