

孤立液滴の表面張力振動に基づく液体物性の評価

Evaluation method of liquid properties based on surface tension oscillations of isolated droplets

海洋大・工（正）*田中 健太郎

Kentaro Tanaka*

*Tokyo University of Marine Science and Technology

1. はじめに

粘性と表面張力は、言わずと知れた重要な物性である。トライボロジーにおいても、たとえば流体潤滑の理論では、粘性がなければ荷重負荷能力は生じ得ないし、表面張力がわからなければ境界条件が定まらない。またキャビテーションの議論もできない。

粘性と表面張力を測定する方法は、それぞれ種々あるが、一般には固体が必要である。粘性測定であれば、毛細管式、落球式、回転式、振動式があり、表面張力測定であれば、垂直板法、輪環法、懸垂液滴法、気泡圧法などがある。いずれも、管、球、板などが流路、回転子、測定子等として必要である。つまりこれらの方法で液体の物性を測定するときには、固体表面との相互作用を排除することができない。通常の液体の測定では、固体表面との相互作用は無視して構わない。しかし、固体表面と反応性の高い液体などを対象とする場合も無視してよいだろうか。

本研究では、液滴の表面張力振動に基づく、粘性と表面張力の測定方法を提案する。空間中に孤立した液滴を用いる方法で、固体表面との相互作用を完全に排除した状況で測定を行なうことができる。

2. 液滴の表面張力振動

小さな液滴は、表面張力によって球形状に保たれるが、何らかの刺激によって、非球形にある場合は、表面張力の作用によって、振動変形しつつ球形状に至る。この表面張力振動の振動数は表面張力と、振動振幅の減衰は粘性と関連付けられることが知られている。すなわち液滴の表面張力振動を観察することにより、表面張力と粘性を評価することができる¹⁾。次の関係式において、 f と τ は表面張力振動の周波数と、減衰の時定数で、 ρ 、 σ 、 μ は液体の密度、表面張力、粘性である。また r_0 は液滴の半径、 l は振動モードを表す整数である。

$$f^2 = \sigma \frac{l(l-1)(l+2)}{\rho r_0^3} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\rho r_0^2}{\mu(l-1)(2l+1)} \quad (2)$$

しかし、空气中に液滴を生成し、その液滴に表面張力振動を励起する、またその振動を観察するためには、それなりに大掛かりな実験装置が必要となることが多い。たとえば、インクジェット方式で液滴を射出する方法²⁾、超音波浮遊法で浮遊させた液滴に振動を励起する方法などがある^{1,3)}。

3. 液体架橋破断法

本研究では、基本的には二本の丸棒と丸棒を動かす機構が必要なだけの、簡易な方法で微小な液滴の表面張力振動を得る方法を提案する。二本の丸棒の間に液体架橋を形成し（図1），棒を引き離すことによって液体架橋を伸長させると、液体架橋の中央付近のくびれが徐々に細くなり、破断する。この破断の際に、微小な液滴が生成されることがある^{4,5)}。この液滴をサテライト液滴と呼ぶことがある。サテライト液滴は、二本の丸棒の隙間の中間地点に生成される。また生成直後には、丸棒の軸方向に引き伸ばされた棒形状をしており、その後は表面張力の作用によって、振動変形をしつつ球形状に至る。この振動変形を高速度カメラで撮影することによって、表面張力係数と粘性係数を評価することができる⁶⁾。図2は、この液体架橋破断法（Capillary Bridge Break-up Method）を用いて生成した、オクタン液滴の表面張力振動を撮影（20万fps, ASC-1 M60）した結果である。破断直後には両端が尖った細長い棒状であるが、表面張力によって両端から丸まりはじめ、ダンベル形状になる。その後は両端が丸い棒状になり、これがつぶれてパンケーキ状、さらにその後は、反動により再び棒状に戻り振動を繰り返しつつ減衰して、球形状に至る。

4. 実験結果

直径1mmのガラス製丸棒二本を図1のように直列に配置し、その隙間に1.5μLのオクタンを付着させて液体架橋を形成する。隙間を徐々に広げて液体架橋破断を行う。このときの液滴の観察例が図2である。得られた液滴振動の動画を処理して、液滴の横幅と縦幅の時間変化を抽出する（図3）。横幅・縦幅とともに減衰振動である。架橋伸長方向に一致する横幅の方が初期の振幅が大きい。これらの時間変化から周波数と減衰の時定数、液滴の半径を得て、式(1), (2)により、表面張力と粘性を計算すると、横幅振動からは21.1mN/mと0.60mPas、縦幅振動からは

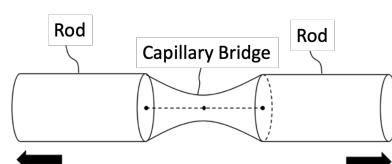


Fig. 1 Capillary bridge between rods

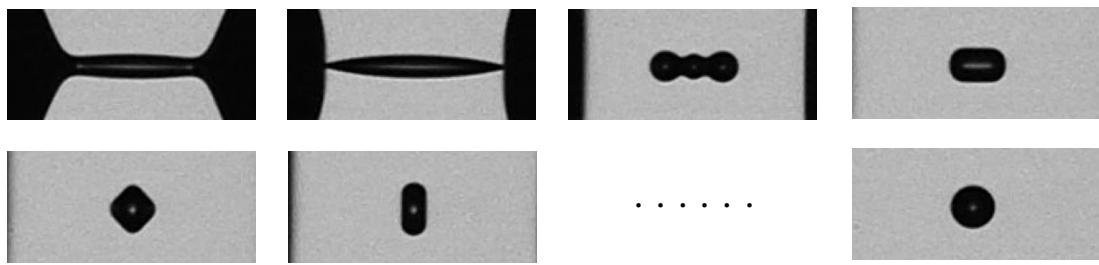


Fig. 2 Snapshots of surface tension oscillation of isolated droplet of octane

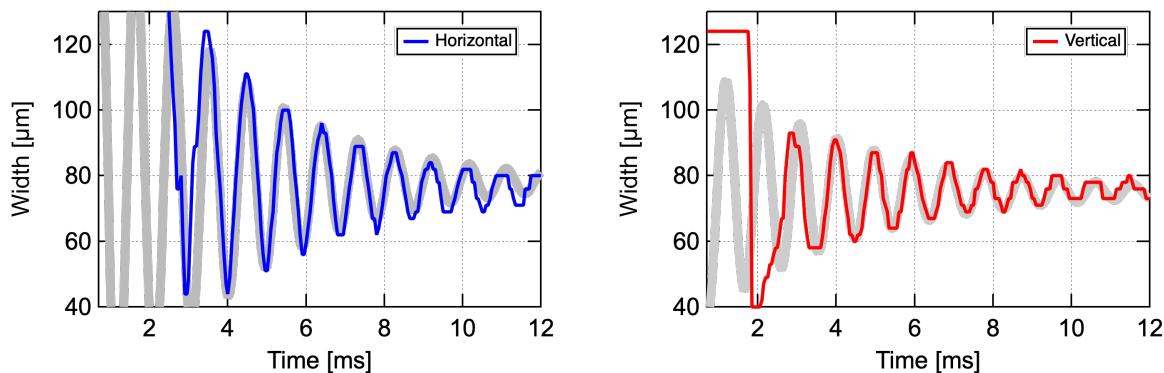


Fig. 3 Time evolution of horizontal and vertical width of octane droplet oscillation

21.2mN/m と 0.52mPas の値が得られる。オクタンの文献値 (@20°C) は 21.6mN/m と 0.56mPas であり、近い値である。

5. おわりに

液体架橋破断法を用いて生成した孤立液滴の表面張力振動に基づく、粘性と表面張力の測定について述べた。オクタンを用いた実験では文献値に近い結果が得られた。オクタンよりも粘性が大きいヘキサデカンの場合、振動が早く減衰するため、周波数と減衰の時定数を確定するのが難しくなり、文献値とのずれが少々大きくなるが、それなりに近い値が得られる事がわかっている。粘性がさらに大きくなると、過減衰となって振動が生じない、あるいは、そもそもサテライト液滴が生じない。このため、この方法はすべての液体に対して行える方法ではないが、数 mPas 以下の低粘度液体に対しては、固体表面との相互作用を排除した理想的な環境で、粘性と表面張力を測定する方法として期待ができる。測定系の簡素化等、今後も研究開発を進めていく予定である。

謝辞

この研究の一部は、精密測定技術振興財団による研究助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

文献

- 1) J. Kremer, A. Kilzer & M. Peterman: Simultaneous measurement of surface tension and viscosity using freely decaying oscillations of acoustically levitated droplets, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 89 (2018), 015109.
- 2) H. J. J. Staat et.al.: Ultrafast imaging method to measure surface tension and viscosity of inkjet-printed droplets in flight, *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 2 (2017).
- 3) A. Watanabe, K. Hasegawa & Y. Abe: Contactless Fluid Manipulation in Air: Droplet Coalescence and Active Mixing by Acoustic Levitation, *Scientific Report*, Vol. 8 (2018), 10221.
- 4) 浅野・田中・岩本：液体架橋の伸長破断に伴い生成される微小液滴の大きさ-架橋体積が生成液滴の大きさに与える影響-, IIP2018 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集 (2018), 1C06.
- 5) P. P. Bhat, O. A. Basaran et. al.: Formation of beads-on-a-string structures during break-up of viscoelastic filaments, *Nature Physics*, Vol. 6 (2010), 625.
- 6) 浅野・田中：液体架橋破断法により生成した液滴の表面張力振動測定に基づく気液界面物性評価, 第 12 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集 (2021), MN2-11A3-6