

温度差によって液面上に液滴を保持する空気層の膜厚及び流動の測定

Measurement of Flow and Thickness of a Thin Air Film

Which Sustains a Droplet on the Liquid Pool by the Temperature Difference

○学 小林 弘紀 (鳥取大) 正 中井 唱 (鳥取大) 正 後藤 知伸 (鳥取大)

Hiroki KOBAYASHI, Tonau NAKAI, Tomonobu GOTO

Tottori University, 4-101 Koyamacho, Minami, Tottori, 680-8552, Japan

Key Words: Temperature, Thin film thickness, Air film, Droplet

1. 緒言

液面に水滴が落ちる所を見ると、水滴が液面と一体化せずに球形を留めたまま液面上に保持される現象を観察できることがある。このように、液面上にそれと同種の液体を滴下した時に、液滴が液面上に浮かぶ現象が 1899 年に Lord Rayleigh によって最初に報告された⁽¹⁾。

この現象が起こる原因は、液面上にそれと同種の液滴を滴下した時、液滴と液面との間に非常に薄い空気層が作られ、それが液滴を支えていることで一体化が妨げられているからである⁽¹⁾。液滴が長時間保持される条件のうち、液滴と液面の温度差がある場合には、液面における局所的な温度勾配によって液面表面にマランゴニ対流が発生する⁽²⁾⁽³⁾。このとき、空気層の中心方向に向かう流動速度が外側に向かう流動速度よりも速い場合に空気層内の圧力が上昇し、液滴が保持されると考えられる。この空気層に発生する圧力は、液面及び液滴表面の流動の速度差と空気層の厚みを計測することによって見積もることができる。

液滴と液面の間に存在する空気層の厚みについてレーザ変位計による計測が試みられている⁽⁴⁾。この手法は液滴の上端の変位を計測することによって空気層の変位を推定するというものだったが、液滴の変位は液滴が一体化する直前の時刻までほとんど見られず、空気層の厚みは計測精度以下のサブ μm 程度であると考えられている⁽⁴⁾。そのため、この空気層の厚みを精度良く計測するまでには至っていない。

変動する流体薄膜の膜厚計測は光干渉法によって高精度に行うことが可能である⁽⁵⁾。そこで、本研究では単色光を液滴を保持する空気膜に照射しその反射光の強度を連続的に検出することによって膜厚の計測を行った。また液体に粒子を混合することで流動速度を計測し、流動による液滴保持の妥当性の検証を行った。

2. 空気層の膜厚測定

2.1 実験方法

本研究では液滴よりも液面の方が温度が高い場合に液滴を保持する空気膜の膜厚計測を行う。本研究で用いる光干渉法とは反射光の干渉効果によって、周期的に変化する光強度から膜厚を測定するものである⁽⁶⁾。干渉を引き起こす 2 つの光の光路差が膜厚の 2 倍に対応し、また受光出力の極大極小間の位相差が π なので、この手法を用いると波長の 1/4 以下の分解能での膜厚計測が可能となる。またこの手法で薄膜計測が可能であることは、レーザ変位計を用いてアルコール膜の液面変位を測定することによって確認している。

実験にはシリコンオイル (信越シリコン社製 KF96-500CS) を用いた。120~130°C まで加熱したシリコンオイルに注射器を用いて液面上約 10mm の高さから同種の常温 (25°C) 液体を滴下し、液面上に液滴を保持させる。

2.2 実験装置

実験装置の模式図 (側面図) を図 1 に示す。水平方向からの入射光をハーフミラーを用いて鉛直上向きに反射させ、空気膜の中央部に投光する。膜面で反射したハーフミラーを透過する光をフォトダイオードモジュール (浜松ホトニクス C10439-01) によって検出する。空気膜厚が減少し、やがて消滅するまでの光強度を計測した。

液体を入れるシャーレは、XY ステージを用いて計測時に液滴保持位置の微調整を行えるようにした。また、検出する光にシャーレでの反射光が入ると可視度が悪くなり干渉による光強度変化を測定するのは困難であるため、XY ステージに傾斜ステージを接着し、ステージを傾けることでシャーレでの反射光が検出されないよう調整を行った。

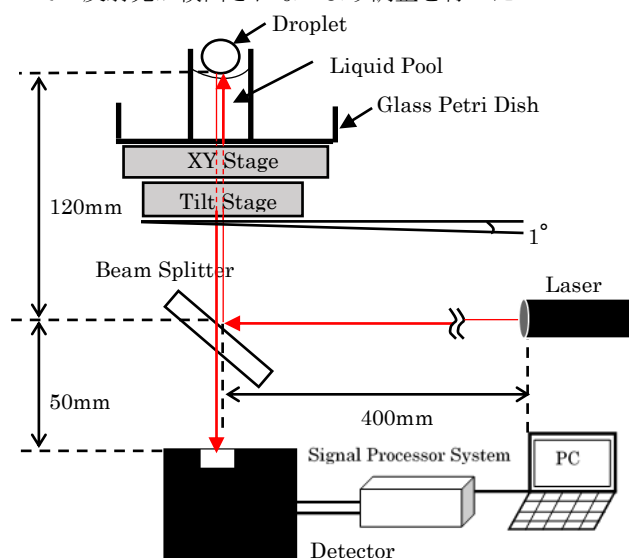


Fig.1. Diagram of the experimental device.

2.3 実験結果

図 2 は測定開始 60 秒までの光強度変化とそれに伴う膜厚変化を示したグラフである。光強度は測定開始約 20 秒までの時間周期的な激しい変化が見られる。20 秒以降では光強度変化は緩まり、出力が徐々に下がることが確認できる。

液滴が一体化した時刻から光強度変化を遡ることで膜厚を測定することが可能となる。液滴が一体化した時刻を膜厚 0nm として極値をとるごとに $\lambda/4=159\text{ nm}$ の膜厚変化がある。60 秒以降ではこれ以上の光強度の増加は見られていない。よって 35 秒付近に確認できる極大値の時刻に計測可能な最小の膜厚である 159nm の膜厚があったとしている。図 2 中の膜厚は、約 1000nm まで急激に減少するが 1000nm 以下では緩やかに減少している。これは膜厚が小さくなることで空気膜に働く圧力が急激に上昇するためだと考えられる。

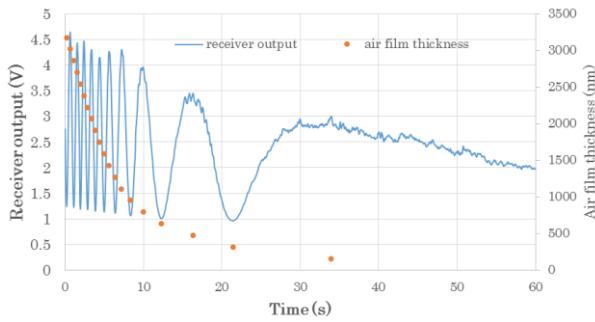


Fig.2. Receiver output and the air film thickness.

3. 流動速度の測定

3.1 実験方法

液滴と液面の表面で発生する流動の速度差を見積もるため、流動の観察を行った。液体に粒子を混合し、粒子の動きを追うことによって流動の観察および流動速度の測定を行った。粒子にはナイロン粒子の ORGASOL (粒子径 $50\mu\text{m}$) を使用し、シリコンオイル 200ml に対して粒子 0.01g を混合した。

3.2 実験結果

30fps で撮影した映像では図 3(a)及び (b)で示す通り、粒子を確認できる。この粒子が流動によって動く位置をフリー解析ソフト imageJ を用いて特定し、流動速度を測定する。

(a)

(b)

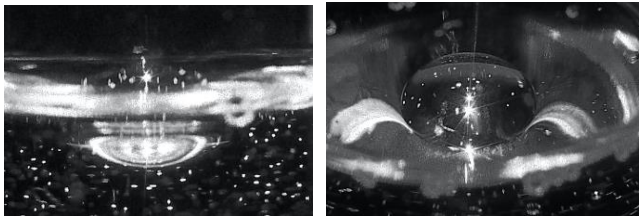


Fig.3. Particles in the liquid pool and droplet.

(a) Observing the liquid pool from horizontal direction.

(b) Observing the droplet from an oblique angle.

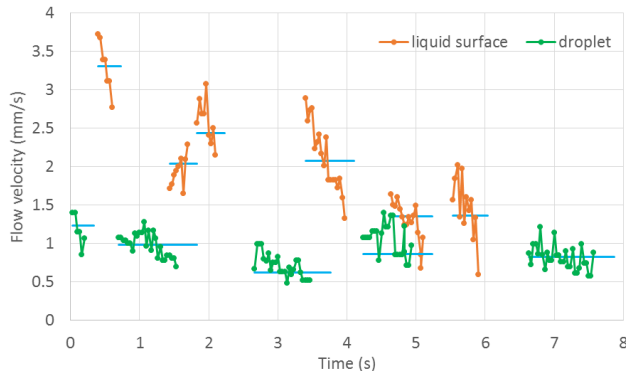


Fig.4. Flow velocity in the liquid pool and droplet.

液面と液滴での流動速度をそれぞれ図 4 に示す。粒子は流動によって液内に入り込み、一つの粒子を追いつけることは不可能である。そこで複数の粒子を追うことによって流動速度を示している。橙色と緑色の点は 10 フレームごと、青色の線は粒子ごとの平均速度を示している。液滴滴下後 8 秒までは液滴より液面の方がおよそ $0.4\sim 2\text{mm/s}$ 速いことが分かる。液滴表面では空気層の外周に向かって流動しており、液面表面では空気層の中心に向かって流動していることから、中心方向の流動速度が外周方向の流動速度より大きいと言える。

4. 空気層の膜厚変化シミュレーション

表面が接線方向に動く平板と平面の隙間流れを想定して行った膜厚変化シミュレーションの結果を図 5 に示す。緑の印は実験による測定結果を示しており、青い線は 3.3 節の流動速度測定実験の結果から累乗関数によって流動速度差を近似したものである。図 5 を見ると実験結果と同様に膜厚が薄くなるにつれて膜厚の減少速度が緩やかになることが確認でき、わずかな流動の速度差でも空気膜が減少することで液滴保持可能な圧力を発生させていることが分かる。定量的には一致しておらず流動速度差 0mm/s の時刻にも膜厚が存在している結果となった。

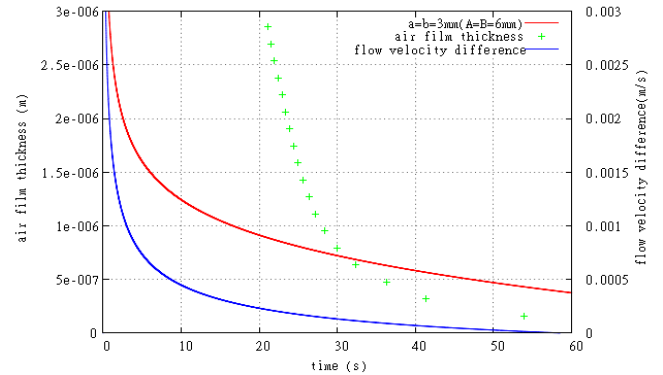


Fig.5. Simulation of variation of the air film thickness.

5. 結言

光干渉法を用いた液滴液面間の空気膜の膜厚計測を行った結果、膜厚は 1000nm 以下では緩やかに減少することが分かり、これは膜厚が減少することで空気層に働く圧力が上昇するためだと考えられる。

液滴及び液面に働く流動の速度は液滴開始後 8 秒までは液面の方が $0.4\sim 2\text{mm/s}$ 速く、空気層に空気を流入させる方向に大きく働いていることが分かった。

膜厚変化シミュレーションでは実験結果と同様に膜厚が薄くなるにつれて膜厚の減少速度が緩やかになり、わずかな流動の速度差でも空気膜が減少することで液滴保持可能な圧力を発生させていることが分かった。

文献

- (1) Lord Rayleigh, Investigations In Capillarity, Philos. Mag. Vol. 48, pp.321-337 (1899).
- (2) R. Savino, D. Paterna and M. Lappa, Marangoni flotation of liquid droplets, J. Fluid Mech. vol. 479, pp. 307-326 (2003).
- (3) T. Nakai, T. Ueno, K. Kanzawa, T. Goto, Temperature Dependence of the Lifetime of a Droplet on a Liquid Surface, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 3, pp. 386-392 (2011).
- (4) 神澤顕司, 中井唱, 後藤知伸「液面上に空気層を介して保持された液滴における流動及び圧力に関する研究」日本機械学会 中国四国支部講演会 講演番号 1301. (2012).
- (5) 小林弘紀, 中井唱, 後藤知伸、「光干渉法を用いた変動する流体薄膜の膜厚計測装置の構築」日本機械学会 中四国学生会 学生員卒業研究発表講演会 講演番号 419. (2014).
- (6) 金原 繁, 藤原英夫, 『薄膜』, pp. 31-34(1979).