

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14910

研究課題名(和文) 近接する液滴の蒸発によって誘起される液滴移動と物質堆積パターンの理解

研究課題名(英文) Study on droplet motion induced by evaporation of neighboring droplets and related deposition patterns

研究代表者

山田 寛 (Yamada, Yutaka)

岡山大学・自然科学研究科・講師

研究者番号：60758481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：液滴蒸発挙動の把握では、撥水面上に滴下した純水液滴1滴および液滴間の距離を変えた2滴について側面から蒸発の様子を観察した。その結果、液滴間の距離を近づけることで蒸発モードが遷移するまでに時間に変化が見られることを確認した。蒸発完了までの時間は液滴直径の1割程度まで近づけた条件では3割程度伸びることを確認し、液滴直径の3.5倍程度離すことで1液滴の蒸発と同程度となることを示した。また、レーザー光を用いた2液滴内対流の可視化実験では、近接側の三相界線から液滴頂点を經由して遠方側の三相界線に至る流れが観察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で注目した液滴蒸発は熱伝導の素過程として様々な工業プロセスで見られる現象である。特に、複数液滴の系は実環境では多くみられるものであるにも関わらず、研究の進んでいない領域であった。そのため、ここで得られた成果は2液滴のみならず、さらに多くの液滴が近接して存在する環境における蒸発現象や、蒸発によって誘起される液滴内の流れを理解するために重要である。また、工業的に応用されているスプレー冷却の効率的な運用やインクジェット印刷における物質堆積の理解などに役立つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the present study, one or two droplets evaporation was experimentally investigated to understand the detail behavior of evaporation. The evaporation mode such as constant contact radius, constant contact angle and mixed mode were observed in the evaporation of multi-droplets while the transition time between each mode from deposition was elongated. The time for complete evaporation was elongated about 30% when two droplets center were separated within 2.5 mm. On the other hand, evaporation time becomes comparable when the separation was about 7.0 mm. In addition, the visualization experiment in the flow of two droplet revealed that the liquid flow directed to the far side of three-phase contact line along the liquid-gas interface was observed.

研究分野：熱工学

キーワード：液滴蒸発 液滴内流れ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

身近な相変化現象の 1 つである液滴の蒸発は、現在でも熱工学や化学工学の中で絶えず研究されており、蒸気拡散によるモデル化や蒸発を通じた物質堆積などの知見が蓄積されている。しかしながら、これまでに行われた研究の大部分は 1 つの孤立した液滴を対象にしていたのに対し、例えば窓ガラスに付着した雨滴やインクジェット印刷された固体面上の液滴など、現実の系では複数の液滴が互いに近接した環境にある。この違いが液滴の蒸発に何をもたらすのか？という問いが本研究の核心である。

近年の研究では、液滴が接近することで蒸発挙動が変化することが報告されており[1]、その結果として液滴内に誘起される流れ場にも変化が生じると考えられる。しかしながら、液滴同士が近接することによって生じると考えられるこれら現象の詳細は、十分に理解されていない。

2. 研究の目的

上記の背景から、複数液滴が近接する系における蒸発の挙動や蒸発によって誘起される液滴内流れの様子について理解し、自然現象や産業応用で見られる蒸発が引き起こす現象を把握することが本研究の目的である。具体的には、側方からの観察による液滴蒸発挙動の把握とレーザーを利用した液滴内部流れの可視化などを行うことで、現象を理解することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、調温湿された環境における直径 2 mm 程度の液滴の蒸発や、その内部対流を観察した。具体的な手法は以下に述べるものである。

液滴を滴下する固体面には Teflon コーティングされたシリコン基板を用い、液体は純水とした。固体面の静的接触角はおおよそ 115° であり、後退接触角は 110° であった。実験時には、 $3.5 \mu\text{l}$ の液滴を基板の上に滴下し、側方に設置されたカメラにより蒸発挙動を観察した。2 滴における挙動観察時には、1 滴目滴下から 10 秒以内に 2 滴目を滴下した。また、得られた画像を解析することで液滴の高さや固液接触部分の半径を取得し、 $1/2\theta$ 法により接触角を求めた。

液滴内部流れの可視化時の装置構成を Fig. 1 に示す。上方に設置されたレーザー発振装置からシート状にしたレーザーを液滴に照射し、その様子を側方から観察した。トレーサー粒子として表面がカルボキシ基で修飾された直径 $1 \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を液滴に混ぜることで、レーザーシートが照射されている部分の可視化を可能としている。

液滴の温度測定には、直径 0.1 mm の K 型熱電対を用いた。これらを液滴両側の三相界線付近および液滴頂点に静かに挿入した。

なお、上記の実験における空気温度は $25.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度は $50 \pm 5\%$ となるように恒温水槽やヒーター、加湿器などを用いて調節した。

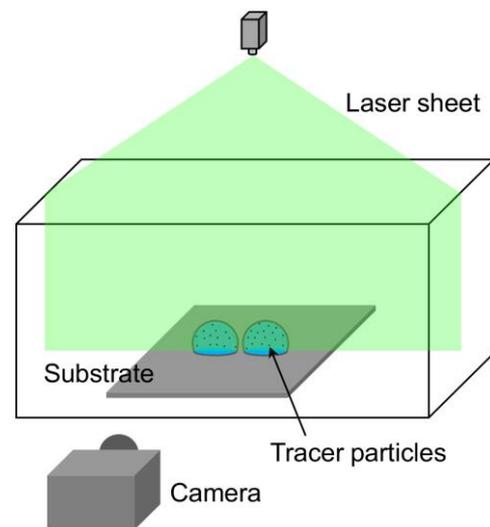


Fig. 1 Experimental setup for the observation of droplet inner flow.

4. 研究成果

得られた蒸発挙動の一例を Fig. 2 に示す。蒸発初期は接触半径一定で接触角が減少する Constant contact radius (CCR)モードが見られ、次いで接触角一定で接触半径が減少する Constant contact angle (CCA)モードとなり、最後に両者が増加する Mixモードが見られた。また、CCA モードにおける接触角はおおよそ 110° であり、後退接触角と一致した。加えて、各モードへ遷移する時間や接触角の履歴などに液滴間の差異は見られなかった。これより、液滴蒸発が正常に行われたことが確認できる。なお、蒸発完了までの時間は液滴中心間の距離に依存し、液滴中心間距離 L と初期液滴直径 D_1 の比が 1.1 の場合は、1 液滴の場合と比較して 1.3 倍ほど長くなることが確認された。

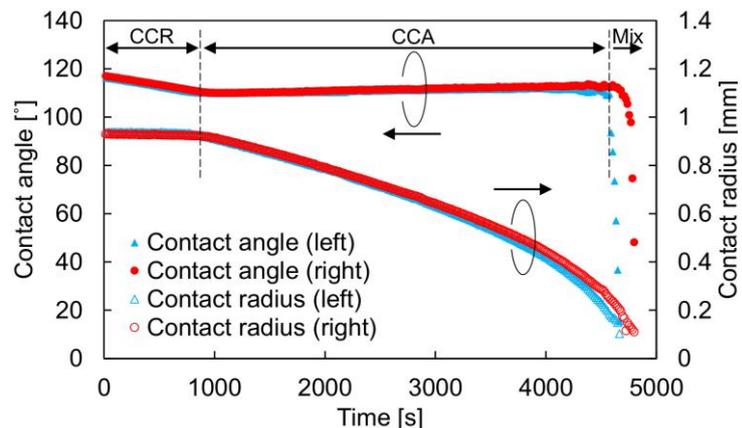


Fig. 2 Example of the evaporation behavior.

Fig. 3 に初期の液滴体積で規格化した左側に滴下された液滴の体積と液滴滴下からの経過時間の関係を示す。 $L/D_1=3.5$ 程度でおおよそ1液滴と同じ挙動となり、 L/D_1 が低下することで蒸発完了までの時間が延びることがわかった。これは液滴間の水蒸気濃度が1液滴周囲の濃度と比較して高くなったためと考えられ、水蒸気の拡散のみを考慮した解析によって得られた液滴周りの水蒸気濃度分布からも理解できる。

次に、液滴同士が近接することで液滴内部流れに及ぼす影響を評価するため、流れの可視化を行った。 Fig. 4(a) に示す1液滴の結果では、

三相界線から固液界面を沿って液滴中心に向かい、液滴中心軸上で上昇流となる流れが観察された。この結果は、他の研究例と一致する。一方、 Fig. 4(b) に示す L/D_1 を1.1とした場合では、近接側の三相界線から気液界面に沿って遠方側の三相界線に至る流れが観察された。通常、液滴内の流れは Capillary flow, Buoyancy flow および Marangoni flow と呼ばれる3つの流れが関わっている。ここで、Coffee ring effect と呼ばれる堆積物が三相界線に集まる現象を引き起こす Capillary flow は主に親水面で見られるため、本研究では見られない。また、本実験で用いた液体が純水であることを考慮すると、温度差に起因する Buoyancy flow および Marangoni flow によるものと考えられる。また、 Fig. 4(c) に示す L/D_1 を3.5程度とした場合では、1液滴と同等な流れが観察された。

上記の液滴内流れの可視化によって得られた結果を考察するにあたり、液滴内の温度を把握することが重要である。そこで、液滴内に熱電対を挿入することで温度測定を試みた。その結果を Fig. 5 に示す。 Fig. 5(a) に示す1液滴の場合では、熱電対挿入後に左右の三相界線付近の温度は同程度の値に近づき、液滴頂点は三相界線と比較して 1.5°C ほど低いことがわかった。一方、 Fig. 5(b) では隣接する液滴を滴下することで近接側三相界線の温度が特に上昇し、遠方側三相界線との温度差が生じていることがわかった。

これらの結果を踏まえて液滴内流れの可視化実験で得られた様子を考える。 Buoyancy flow は温度差に起因する流体の密度差に由来する一方、 Marangoni flow は温度差に起因する表面張力差に由来し、水では低温において表面張力が大きいいため、高温側から低温側への流れ(つまり、

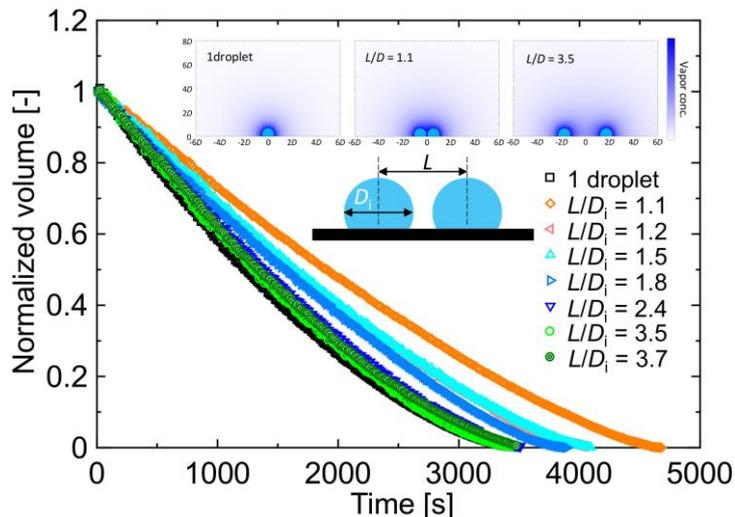


Fig. 3 The relation between normalized volume and time from droplet deposition. Inset panels show the vapor concentration analyzed by diffusion based model.

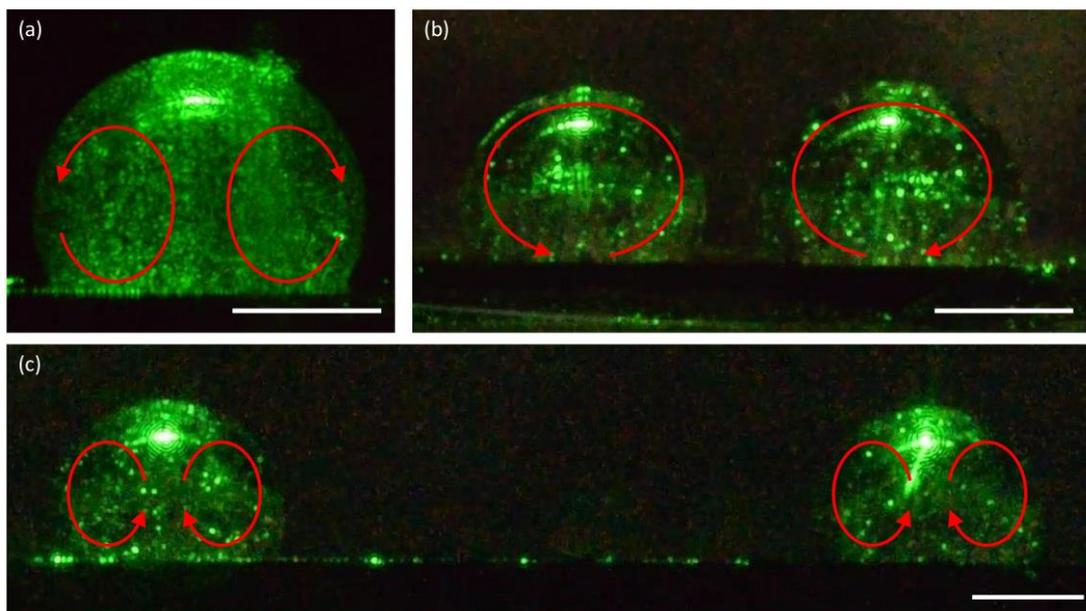


Fig. 4 Liquid flow visualization results of (a) single droplet, (b) droplets pair ($L/D_1 \approx 1.1$), and (c) droplets pair ($L/D_1 \approx 3.5$). Scale bars in each panel show 1 mm.

三相界線から液滴頂点へ向かう流れ)となる。しかし、1液滴の結果では Marangoni flow は見えておらず、Buoyancy flow 支配であると考えられる。これは先行研究でも報告されているように水でみられる現象であり、気液界面のコンタミネーションによって表面張力差が得られなかったためと考えられる[2]。2液滴の場合では、近接側の温度が高くなったため、こちら側からの上昇流が強くなった結果1方向の流れが発生したものと考えられる。

最後に、本研究で見られた現象の発生経緯についてまとめる。液滴が滴下された場合、蒸発および拡散により液滴周囲に水蒸気濃度場が形成される。これは蒸発による液滴形状変化と比較して短時間の現象である。その結果、近接した2液滴間の水蒸気濃度は Fig. 3 内に示した解析結果からもわかるように遠方側と比較して高くなると考えられる。これによって近接側における蒸発が抑制され、蒸発完了までの時間が長期間かしたものと考えられる。また、温度の観点から考えると、近接することによる部分的な蒸発の抑制により、奪われる蒸発潜熱量が低下する。そのため、近接側と遠方側の間に温度差が発生する。加えて、基板として用いた Si より熱が伝わり、液体の熱伝導率が基板の熱伝導率と比較して数桁低いため、液滴の固液界面側と液滴頂点で温度差が発生したと考えられる。これらの結果、最終的に液滴内部の流れが誘起されたといえる。

参考文献

- [1] A. J. D. Shaikeea and S. Basu, Langmuir, 2016, 53, 1309-1318
 [2] H. Hu and R. G. Larson, J. Phys. Chem. B, 2006, 110, 7090-7094

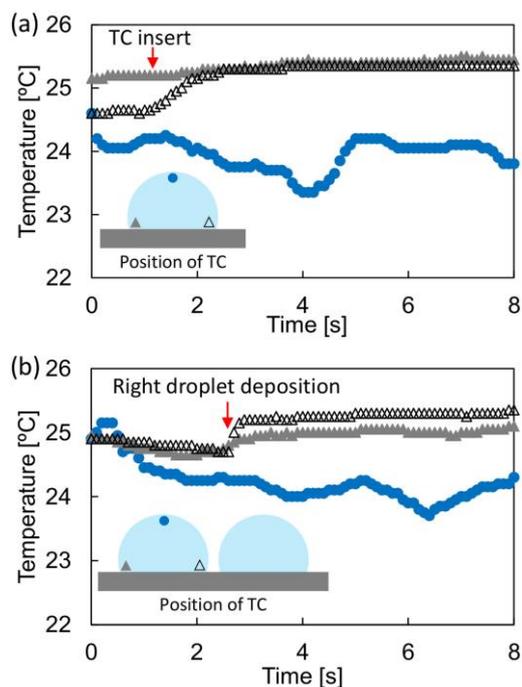


Fig. 5 Temperature in the (a) single droplet and (b) droplets pair (left droplet). Inset figure on each panel show the position of thermocouples and symbols.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長絵理菜, 島垣浩樹, 山田寛, 堀部明彦
2. 発表標題 近接する2つの液滴の蒸発に関する基礎的研究
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田寛, 長絵理菜, 島垣浩樹, 宮下翼, 堀部明彦
2. 発表標題 複数の液滴が近接する系における液滴の内部流動
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下翼, 磯部和真, 山田寛, 堀部明彦
2. 発表標題 複数液滴の関係を模擬した環境における液滴の蒸発挙動
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------