

蒸発過程にある水滴周りの空気の温度変化の可視化法

Measurement of the air temperature around an evaporating water

北海道大学大学院工学院 ○学生員 齋藤翔大 (Shota Saito)
 北海道大学工学研究院 正員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)
 北海道大学工学研究院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

近年、世界中で気候変動および異常気象への対策が喫緊の課題となっており、気象現象を精度よく予測する手法の確立は急務である。気象現象は、大気-海洋間で絶えず行われている熱交換に大きく左右される。夏は台風、冬は爆弾低気圧による暴風波浪の脅威に晒される我が国においては、その影響を強く、直ちに受けるため、精度の高い予測のためには熱交換の正確な評価は必須である。大気-海洋間の熱交換の要因としては、風によって生じられる乱流がもたらす界面におけるものと、海上に生成される飛沫によるもの、これら2つが主に挙げられる。特に後者の影響は近年、異常気象の頻発化・激甚化が懸念されている中で、暴風波浪場が形成される際には大量の飛沫が大気に放出されることから、昨今その重大性を増している。Perricら¹⁾は、飛沫の影響を考慮した場合としない場合とで温帯低気圧下における熱交換の差異を検討しており、特に強風時において飛沫が効果的な熱交換を促進することを示している。飛沫の影響の正確な評価は重要である一方、飛沫が周辺空気の温度や湿度に与える影響を実験によって定量的に調べることは難しい。

飛沫を構成する液滴周りの空気密度を可視化する方法として、光の屈折率の変化を用いる Background Oriented Schlieren (BOS)法^{2,3)}の適用が進められており、例えば Zhangら⁴⁾は、沸点が34℃と蒸発速度が速い HFE-7000を用いて落下中の液滴周りの蒸気濃度場を推定しており、猿渡ら⁵⁾はエタノールを対象として液滴周辺の空気密度分布の可視化を行っている。一方、上記の対象液滴に比べ、水滴の蒸発によって生じる空気の密度勾配は非常に小さいため、水滴での同様の可視化は非常に困難であるとの言及もなされている⁶⁾。しかし、気象予測のさらなる高精度化のためには、水滴の蒸発に伴う周辺空気の温度分布等、詳細な熱輸送過程の解明は不可欠である。

これらを踏まえ、本研究では、BOS法によって蒸発過程にある水滴周りの空気の温度変化の可視化を試み、

波飛沫の熱輸送量の評価に資する基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 BOS法による屈折率の算出

水滴周辺の空気は、水滴の蒸発による潜熱交換に伴って密度が増加し、付随して光の屈折率も増加する。本研究では、BOS法を用いて水滴周辺空気の屈折率分布を調べ、これをもとに空気の温度分布を推定する。本研究でのBOS法のセットアップを図-1に示す。BOS法は、テストセクションの後方に背景パターンを設置し、そのパターンをカメラで撮影することによって行う。本研究では、背景パターンとして0.25mm毎に等間隔でドットが描かれた透明なガラスを用いた。光源から照射される光の経路中の空気の密度勾配が一様であれば、ゆがみのない背景パターンの画像がカメラによって取得される。しかし、光の経路中の空気に何らかの密度勾配が生じていれば、光は屈折し、背景パターンはまるで移動したかのように見えることとなる。したがって、密度勾配の生じる前後において画像を取得すれば、その背景パターンの移動量により、テストセクション断面でのみ光が屈折していると仮定すると、屈折角が次式で得られる。

$$\varepsilon_y \approx \frac{\Delta y}{Z_d} \quad (1)$$

ここに、 ε_y はy軸方向の屈折角、 Δy はy軸方向の背景パターン移動量、 Z_d はテストセクションから背景パターンまでの距離である。x軸方向も同様である。図-2に、本実験で得られた典型的な背景パターンの移動を示す。これは水滴近傍の領域であり、水滴の存在によって周辺空気の密度が変化し、それによって背景パターンが移動している様子が見られる。以上より得られた屈折角分布をもとに、以下に示す Poisson 方程式を立て、これを解くことによって屈折率の変化率を求める。

$$\frac{\partial^2 \bar{\delta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\delta}}{\partial y^2} = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial y} \quad (2)$$

ここに、 x, y は図-1に示した方向であり、 $\bar{\delta}$ は屈折率の変化率の光の経路積分値、 ε はそれぞれの方向の屈折角である。続いて、屈折率の変化率 δ は次式から得られる。

$$\bar{\delta} = \int \delta dz \quad (3)$$

ここに、 z の方向は図-1に示した通りである。さらに、次式を n について解けば、屈折率が得られる。

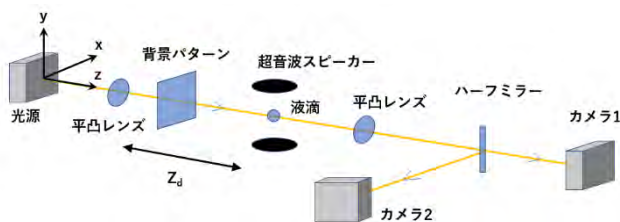


図-1 BOS 実験の概略図

$$\delta = \frac{n}{n_0} - 1 \quad (4)$$

ここに、 n はBOS実験での屈折率、 n_0 は空気が一様な場合での屈折率である。さらに、 δ の分布は、テストセクション内の屈折率の投影であると考えられるため、複数方向からの画像を取得すれば、CT画像再構成と同様の手法により、三次元屈折率分布を得られる。一方、本実験では、背景パターンのずれを一方向のみから取得しているが、屈折率場が軸対称であると仮定すれば、準三次元屈折率空間分布を推定することができる^{7),8)}。表-1に本実験での撮影条件を示す。

2.2 水滴浮遊実験

前節で述べた通り、BOS法では光の経路上の空気の密度勾配によって生じる屈折率の変化から空気密度を算出する。本研究では、波飛沫を持つ熱輸送量の解明に資する知見を得ることを目的としているため、光の経路上には蒸発過程にある水滴を浮遊させることで密度勾配を生じさせる。図-3に示すように、周波数40kHzの超音波が上下から発せられるスピーカ内に生じる定在波の節の部分に、水滴を電動ピペットで生成し浮遊させた。水滴は、蒸発を促進させるため沸騰させた高温の水とし、初期体積は浮遊可能な最小体積である5μLとした。また、BOS法による空気の屈折率の計測のための画像撮影は、背景パターンにピントを合わせて行うが、これと同時に、図-1に示した通りハーフミラーによって光を分岐させ、水滴にピントを合わせた画像も同時に取得した。これによって、水滴の蒸発速度を見積もることが可能となる。撮影は、浮遊させた10秒後、さらに100秒後から500秒後まで100秒間隔で、計6ケース行った。表-2に、本実験時の条件を示す。

2.3 水滴周りの空気温度の推定

2.3.1 状態方程式による推定

水滴周辺の空気の温度 T は、空気密度 ρ から状態方程式を用いて求めることができる。はじめに、 ρ は以下に示すGladstone-Daleの式によって得られる。

$$\rho = \frac{n-1}{G} \quad (5)$$

ここに、 G は空気のGladstone-Dale定数であり、 $G = 2.26 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$ とした。上式中の n に、2.1節で述べた三次元屈折率分布を用いることで、水滴周りの空気密度分布が得られる。さらに、水滴から十分離れた場所での実験時の気温 T_{amb} を用いれば、状態方程式から水滴周辺空気の温度が次式で得られる。

$$T = \frac{T_{amb}}{\rho/\rho_{air}} \quad (6)$$

ここに、 ρ_{air} は、水滴から十分離れた場所での実験時の空気密度である。以上より、水滴周りの空気温度分布を可視化することが可能となる。ただしこのとき、空気の密度および温度の計算において、水滴の蒸発に伴う湿度の変化、すなわち水滴周りのガスの組成変化はないものと仮定しているため、それに伴う温度の推定誤差が生じる可能性がある。

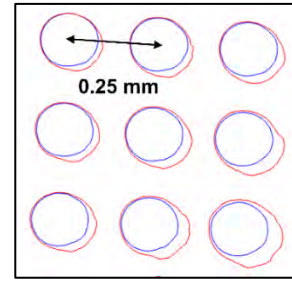


図-2 水滴浮遊前（青）と水滴浮遊後（赤）の背景パターン

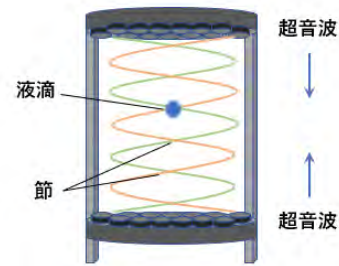


図-3 液滴浮遊装置概要図

表-1 撮影条件

露光時間	10000μs
フレームレート	8fps
有効画素数	5472 × 3648pixels
取得画像枚数	100枚/1case

表-2 BOS実験時の条件

気温	20.8 °C
湿度	29.0 %
CO ₂ 濃度	929 ppm
光の波長	643 nm
気圧	1019.5 hPa

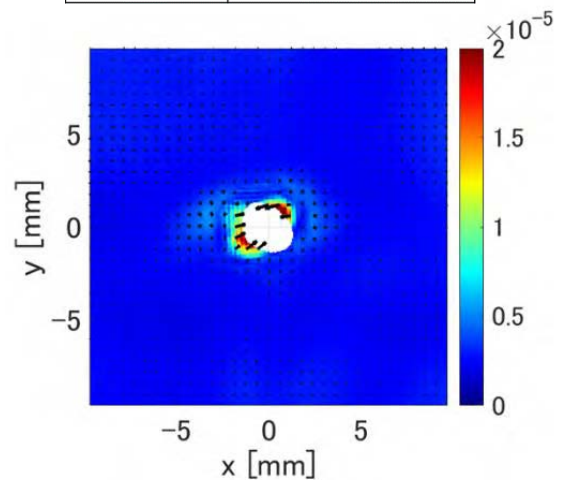


図-4 水滴浮遊 500 秒後の水滴周りの光軸の屈折角度（カラー）と背景パターン移動方向（ベクトル）

2.3.2 Ciddor 式による推定

空気の温度分布は上述の通り状態方程式で得られる一方で、温度、湿度、CO₂濃度、光の波長、気圧をパラメータとして屈折率を求める Ciddor 式⁹⁾からも求められる。すなわち、温度以外のパラメータを実験時の条件に固定し、実験で得られた屈折率から温度を逆算することで、水滴周りの温度分布を推定することができる。

本研究では、上記の二通りの方法で周辺空気の温度分布を推定し、比較することでその妥当性を評価する。さらに Ciddor 式において、湿度を変えながら計算を行うことで、水滴の蒸発に伴う湿度変化が、屈折率および周辺温度に与える影響を明らかにする。

3. 結果と考察

3.1 水滴周りの屈折角分布と背景パターン移動量

図-4に、水滴を浮遊させた500秒後の屈折角分布を示す。図中のカラーは屈折角を、ベクトルは背景パターンの移動方向を示している。同図より、水滴周辺の屈折角は、水滴から離れた位置に比べ大きく、さらに背景パターンは水滴中心に向かって内側に移動している。これは、水滴の蒸発に伴う潜熱交換によって、空気が冷やされ密度が増加したことに起因する。

3.2 水滴周りの空気の温度分布

図-5に、状態方程式より屈折率から推算した水滴周りの温度分布を示す。なお、水滴の蒸発に伴って、水滴近傍の湿度は増加するものと考えられるが、ここでは全域を実験条件の湿度29%から変化しないものとして計算を行っている。また、同条件で Ciddor 式より屈折率から推算した温度分布を図-6に示す。両図より、水滴の蒸発による潜熱交換に伴って水滴周りの温度が低下している様子が可視化された。図-5と図-6を比較しても明確な差は見られないことから、本研究での温度分布の推算は妥当なものと考えられる。また、両図より、水滴を浮遊させた10秒後から100秒後の間に潜熱輸送は平衡状態に達することが明らかとなった。

しかし、これらの推算は上述の通り全域において湿度が29%から変化しないと仮定しているため、湿度変化に伴う屈折率の変化が温度の推定へ与える影響を考慮できていない。そこで、Ciddor 式において湿度をそれぞれ、10%、50%、100%に設定した際の温度分布を推定し、その差を比較することで湿度の変化が温度の推定へ与える影響を検証した。図-7に、それぞれの湿度における、液滴から十分離れた位置での温度と液滴近傍での温度との差を示す。図より、湿度を変化させても温度変化量は変わらないことが分かる。また、図-8に、Ciddor 式においてCO₂濃度、光の波長、気圧を実験時の条件に固定して、温度と湿度を変えながら計算した屈折率の等高線図を示す。図より、湿度の変化に伴う屈折率の変化よりも、温度の変化に伴う屈折率の変化の方が支配的であることが分かる。これにより、図-7に示した各湿度での温度変化量がほとんど変わらなかった結果が説明される。

したがって、水滴の蒸発に伴う周辺空気の温度分布を推定する際に、本研究では湿度変化の影響を考慮してい

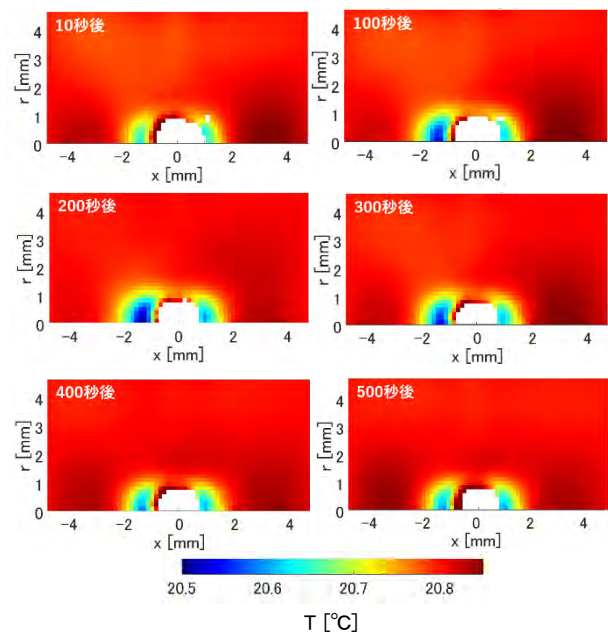


図-5 状態方程式から推算した水滴周辺の温度分布

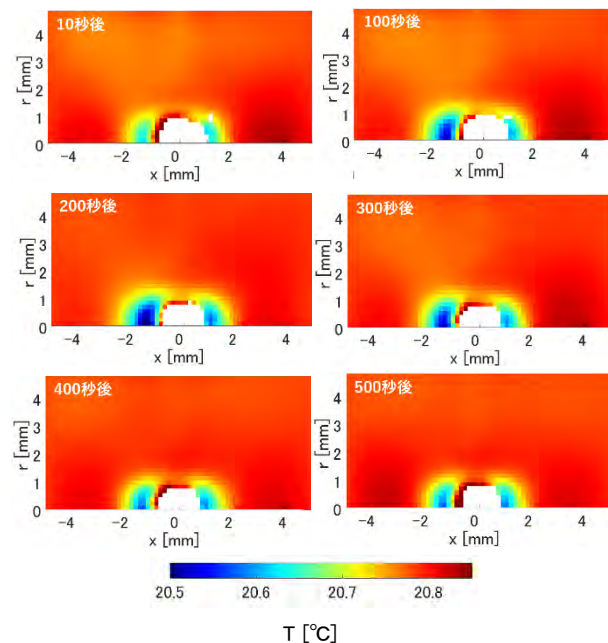


図-6 Ciddor 式から推算した水滴周辺の温度分布

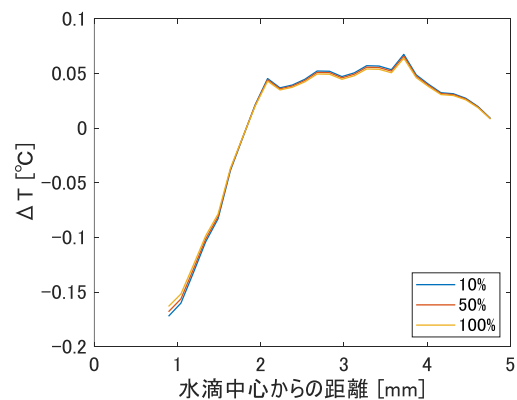


図-7 各湿度における温度変化量

ないが、これによる影響は小さいといえるため、示した結果は妥当であると考えられる。

3.3 水滴の蒸発速度

BOS 法での実験と同時に取得した、水滴にピントを合わせた画像から、水滴の体積を算出した。図-9に、水滴浮遊後の経過時間に伴う体積の変化を示す。図より、浮遊100秒後から急激に勾配が緩やかに切り替わり、その後は直線的に体積が減少している様子が確認できる。これは、浮遊からおよそ100秒以内に蒸発速度が平衡状態に達したことを意味する。この結果は、図-5および図-6に示した結果と対応しており、蒸発速度が平衡状態に達することで、周辺空気の温度変化もそれに付随するように平衡状態に達することを示している。

4. まとめ

本研究では、浮遊させた水滴に対して BOS 法を適用することで、水滴周辺の空気の温度分布を可視化した。結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 浮遊した水滴周辺の温度分布を BOS 法で得られた屈折率を用いて、状態方程式および Ciddor の式から推算した。その結果、二つの結果に明確な差はみられなかったことから、BOS 法を用いて水滴周辺の温度分布を推算することが可能であることが明らかとなった。

(2) 水滴の浮遊から、およそ100秒後までに周辺空気の温度変化は平衡状態に達した。これは、水滴の蒸発速度勾配が急激に緩やかに切り替わる現象と対応している。

(3) 本研究での水滴周辺空気の温度分布推定は、蒸発に伴う湿度の変化を考慮していないが、温度変化の方が、湿度変化よりも空気の屈折率に与える影響が支配的であることから、本研究での水滴周辺の温度分布の推算は妥当であると考えられる。

本研究は、蒸発過程にある水滴周辺空気の温度分布の可視化にとどまっているが、気象現象は、大気-海洋間の水蒸気フラックスによっても大きく影響されることから、今後は、蒸発過程にある水滴の水蒸気輸送の可視化を図り、気象予測の高精度化に資するための検討を行っていく。また、本研究では対象液滴を高温の水としたが、今後は海水での実験を行うなど、より実現象に即した検討を行っていく。

参考文献

- 1) Perrie, W., Andreas, E. L., Zhang, W., Li, W., Gyakum, J., McTaggart-Cowan, R.: Sea spray impacts on intensifying midlatitude cyclones, *Journal of the atmospheric sciences*, Vol.62, pp.1867-1883, 2005.
- 2) Raffel M: Background-oriented Schlieren (BOS) technics, *Experiments in Fluids*, Vol. 56, pp.60, 2015.
- 3) Dalziel, S., Hughes, G., and Sutherland, B.: Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren', *Experiments in Fluids*, Vol. 28, pp.322-335, 2020.

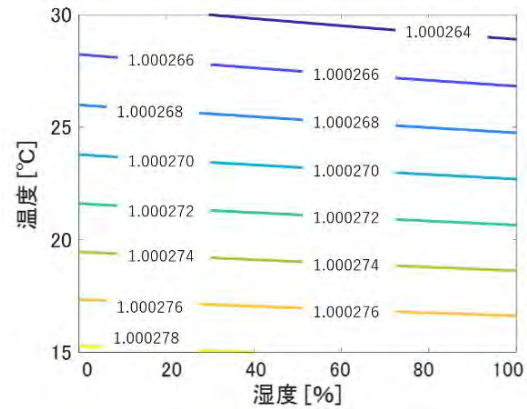


図-8 湿度と温度の変化に伴う屈折率の等高線図

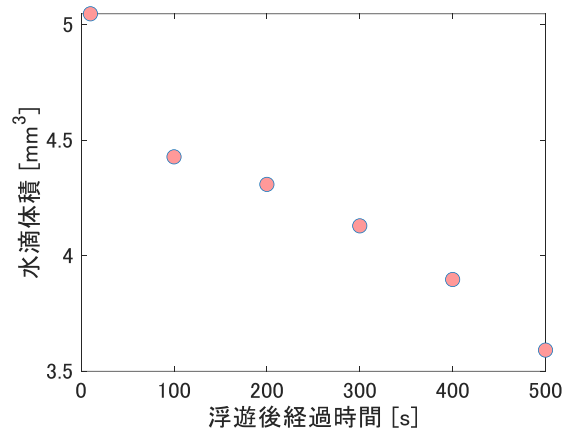


図-9 浮遊後の経過時間に伴う水滴体積変化

- 4) Zhang, P., Xu, Z., Wang, T. and Che, Z.: A method to measure vapor concentration of droplet evaporation based on oriented Schlieren, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.168, 120880, 2021.
- 5) 猿渡亜由未, 小林正法, 渡部靖憲: 単一浮遊液滴からの熱境界層剥離と蒸発速度, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.78, I_31-I_36, 2022.
- 6) Dehaeck, S., Rednikov, A., and Colinet, P.: Vapor-based interferometric measurement of local evaporation rate and interfacial temperature of evaporating droplets. *Langmuir*, Vol.30, pp.2002-2008, 2014.
- 7) Tan, D. J., Edgington-Mitchell, D., and Honnery, D.: Measurement of density in axisymmetric jets using a novel background-oriented schlieren (BOS) technique, *Experiments in Fluids*, Vol.56, pp.204, 2015.
- 8) Xiong, Y., Kaufmann, T., and Noiray, N.: Towards robust BOS measurements for axisymmetric flows, *Experiments in Fluids*, Vol.61, pp.178, 2020.
- 9) Ciddor, Philip E: Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Applied optics*, Vol.35, 1566-1573, 1996.