

液体近傍の屈折率変化の可視化における

Background-Oriented Schlieren (BOS) 法の有効性の検討

In visualization of refractive index change near liquid

Examination of the effectiveness of the Background-Oriented Schlieren (BOS) method

北海道大学工学部 ○学生員 高須賀 啓孝(Nobutaka Takasuka)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

台風等による暴風下では白波砕波に伴い海中に混入した気泡が水面に浮上し弾ける際や、発達した高波のクレスト部が強風により引きちぎられる際などに大量の飛沫が海上に放出される (Grythe et al., 2014¹⁾). 飛沫を介した潜熱顕熱交換は台風の成長過程を決める重要なファクターの一つであると言われている。即ち、海洋表面と同じ温度である飛沫は生成後顕熱交換により気温に応じて周辺空気を冷却又は加熱する。その後概ね 10 μm 以下の小径飛沫は即座に蒸発し潜熱を周辺空気から奪うことにより気相を冷却する。一方滞空時間の短い大径飛沫は蒸発前に海洋に再着水する為、大気側の熱を海洋に輸送する効果がある。このような飛沫を介した大気-海洋間熱輸送を評価しないと台風強度の予測精度が確保されないことが指摘されている (Andreas & Emanuel, 2001²⁾). 今後気候変動に伴う台風の巨大化が懸念される中、台風の発達過程を正しく予測する為には飛沫を介した熱輸送過程を詳細に理解する必要がある。

温度や水蒸気量の変化により生じる空間的な屈折率分布を可視化する方法として Schlieren 法が古くから用いられてきた (e.g. Davies, 1981³⁾). 本研究では Schlieren 法をベースに空間内の屈折率分布をより定量的に測定する為提案された Background Oriented Schlieren (BOS) 法 (Ota et al., 2011⁴⁾) を用いて飛沫近傍の屈折率分布を可視化し、飛沫が蒸発する際の熱、湿度交換過程を詳細に理解すると共に、大気海洋間の熱輸送現象への飛沫の寄与を推定することを最終的なゴールとしている。本論文はその為の基礎研究として、BOS 法を用いて液体周辺の屈折率分布の可視化を行うセットアップを構築すると共に、本方法の飛沫の蒸発過程の可視化計測への適用性を検討することを目的とするものである。

2. BOS 法

図 1 に BOS 法の概略を示す。この方法では、一般的に背景画像としてランダムドットパターンが用いられる。計測対象とするものを温度等による攪乱のない状態で撮影した画像を参照画像とし、攪乱のある画像と比較することで背景画像のずれ Δh を検出する。このずれは、屈折率勾配の積分量と背景画像と密度勾配までの距離 l_b 、

密度勾配からカメラまでの距離 l_c 、カメラの焦点距離 f により式 (1) のように表される。また、屈折率と密度の関係は式 (2) で表される。ここで n は屈折率、 ρ は密度、 K は Gladstone-Dale 定数である。

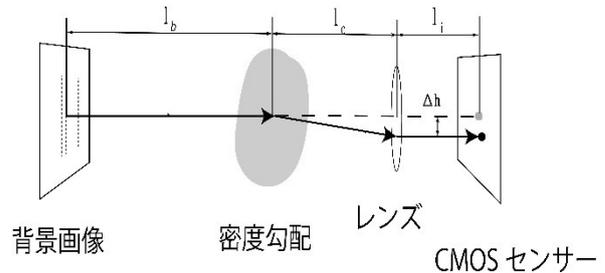


図 1 BOS 法の概略

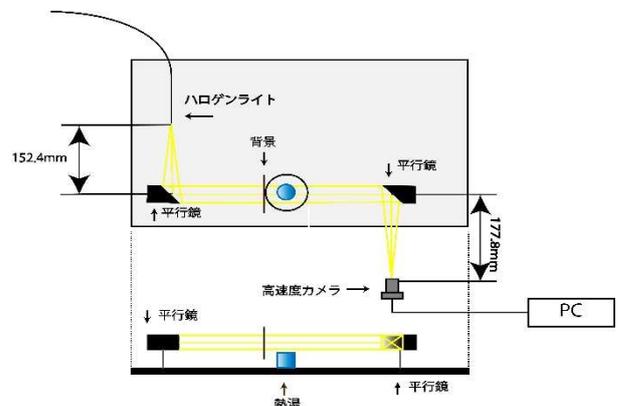


図 2 実験器具

$$\Delta h = \frac{l_b f}{l_b + l_c} \frac{1}{n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r} dl \quad (1)$$

$$n = K\rho + 1 \quad (2)$$

3. 実験方法

実験装置の概略を図 2 に示す。ハロゲンライトから照射した点光源を焦点距離 152.4 mm の放物面ミラーによ

って平行光にし、テストセクションを経由して焦点距離 177.8 mm の放物面ミラーにより再び平行光を再び集光し、その先に設置した高速度カメラにより Schlieren 画像を取得するという工学系セットアップを行った。テストセクション背後には間隔 1 mm のドットパターンを配置しこれを背景画像として用いた。またハロゲンライト前面には減光フィルタを設置し光量を調節した。

本研究では温度による気相の屈折率変化の可視化のテストとして表 1 に示すケースの実験を行った。即ち種々の温度の物体（高温金属と熱湯水面）をテストセクション内に設置することによりドットパターンの位置の変化を測定した。

表 1 実験ケース

CASE	物体	温度(°C)
Case1	ハンダゴテ	400
Case2	熱湯	50
Case3	熱湯	70
Case4	熱湯	80

4. キャリブレーション

実験によって得た画像は、図 3(a)のように Schlieren セットアップやレンズの条件により歪んで撮影される。そこで本研究では背景画像のドットパターンを基に画像座標を実座標に変換するためのキャリブレーション操作を行った。2 次の多項式を仮定して座標変換を行うことにより図 3 (b) のように正投影画像へと変換した。

5. 実験結果

画像内ドットサイズに対応した 2 次元ガウス分布をドットの代表輝度パターンとして仮定し、ガウス分布の撮影画像へのフィッティングを行うことにより各ドット位置をサブピクセル精度で検出した。背景の参照画像および各実験ケースでの撮影画像を比較することにより、検出されたドット位置のずれ Δh を求めた。 Δh の大きさと方向の分布を図 4～図 5 に矢印により表す。それぞれの図中で (a) から (d) は、連続画像から求めた Δh 分布の時間変化を表す。

いずれの画像からも高温物体から間欠的に Δh の大きな領域が上方に向かって伝搬していく様子が確認された。これは物体により暖められた気体が気流の中で組織的に流動している様子が捕えられたものと考えられる。特に、図 4 (a)～(d)では蒸発水面近傍における屈折率変化が可視化されていることから、今後セットアップを改良していくことにより本研究の最終目的とする液滴周辺における蒸発過程が可視化できる可能性があることが示唆された。

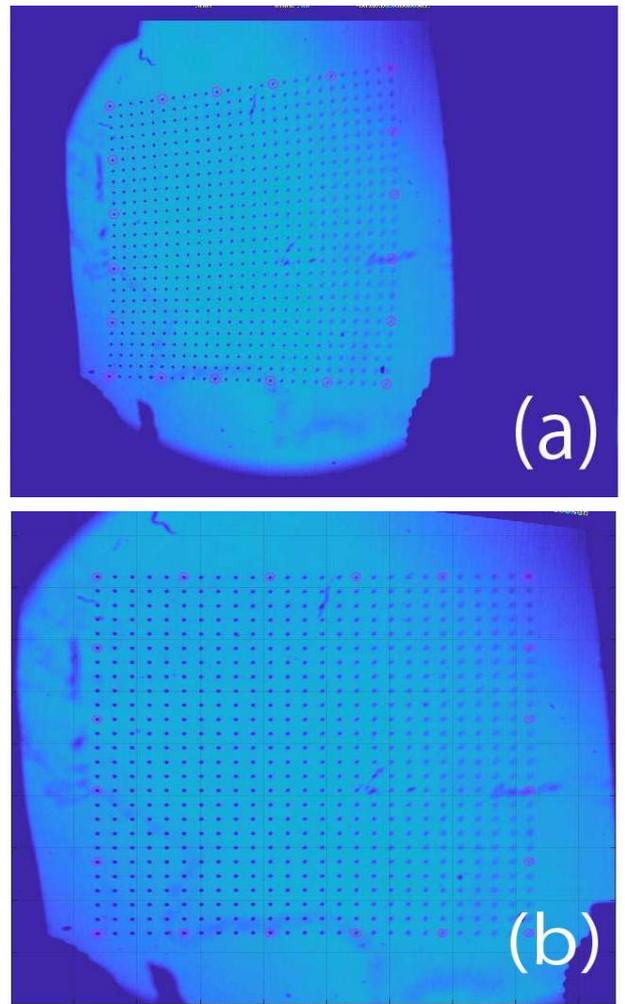


図 3 (a): キャリブレーション前, (b): キャリブレーション後

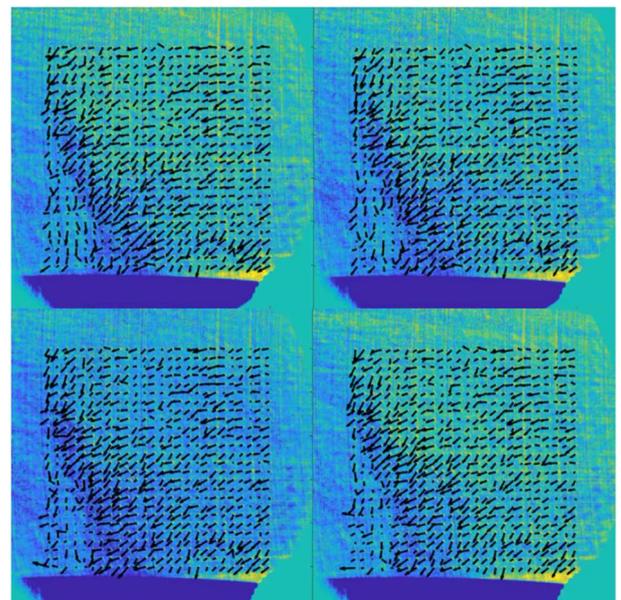


図 4 蒸発水面近傍の屈折率変化の可視化画像



図5 400℃近くまで熱されたハンドウォーマー近傍の屈折率変化の可視化画像

6. 結言

今回の実験により、BOS法による液体近傍の屈折率変化の可視化の有用性が確認された。

参考文献

- 1)Grythe et al. (2014)
A review of sea-spray aerosol source functions using a large global set of sea salt aerosol concentration measurements
Atmos. Chem. Phys., 14, pp. 1277–1297.
- 2) Andreas & Emanuel (2001)
Effects of Sea Spray on Tropical Cyclone Intensity
J. Atmos. Sci., 58, pp. 3741-3751.
- 3)Daview (1981)
Schlieren photography—short bibliography and review
Optics & Laser Technology, 13, 1, pp. 37-42.
- 4)Ota et al. (2011)
Computed-tomographic density measurement of supersonic flow field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique
Meas. Sci. Technol., 22, 10, 104011.