

飛沫群のレーザー光干渉画像計測

Interferometric Laser Imaging of droplets

北海道大学工学部 4年 ○学生員 坂東美晴 (Miharu Bando)
 北海道大学院工学研究院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

外洋では強風下において、波浪は白波化し、大量の気泡の海中への混入、飛沫の気中への放出を経て海面のエアレーションが進行する。一般に風速に対して単調に増加すると考えられてきた海面抵抗は(Large and Pond 1981), 35m/s を超える強風時には減少する可能性が報告され(Powell et al. 2003), その後この発見を支持する研究成果(Donelan, Takagaki et al. 2012)が報告されてきた一方、海面抵抗の減少を矛盾なく説明できる原因は依然不明である。白波化による海面のエアレーションは、相対的に比重の低い空気混合層の流動により海面抵抗現象の要因となる可能性が指摘されてきた一方(Powell et al. 2003), 暴風下において混相化した境界層内で気液の運動学的・幾何学的物理量を計測することは困難であり、原因解明の直接的問題となっている。

大塚ら(2014)は風洞波浪実験において、バックライト画像計測を適用し混入気泡及び飛沫のサイズ分布を与えた一方、特に高速で輸送される微細飛沫を正しく見積もるためには著しく高い解像度及び照度が必要であり、その結果は風速約 15m/s 以下、最小飛沫径 1mm の条件に制限されている。

一方、Maeda et al.(2002)はレーザー光干渉法によってノズルジェットから分裂する飛沫サイズ及び速度を見積もった。この方法はレーザーシート上の飛沫からの反射及び屈折光の干渉縞の defocus 画像から μm オーダの飛沫径を撮影解像度に依存することなく取得可能であり、暴風下の微細飛沫サイズの計測に適用できる可能性がある。

本研究は、砕波飛沫を模擬した人工飛沫に対して、レーザー光干渉計測を適用し、同期されたバックライト計測結果によってその精度ならびに信頼性を検証すると共に、干渉縞抽出に関わる画像処理アルゴリズムを提案するものである。

2. レーザー光干渉計測の原理

レーザーによる干渉縞から飛沫のサイズ分布を算定する原理を説明する。飛沫にレーザー光が当たる際、飛沫の表面を反射する光と飛沫の中を通り屈折する光で光路差が生じ、両者の位相差から defocus 面において干渉縞が発生する(図-1)。

干渉縞のフリンジ数は飛沫のサイズによって異なり、飛沫のサイズが大きくなるとフリンジ数が増える。以下のフリンジ数と飛沫の直径との関係は Yuzuru Niwa ら(2000)などによって求められている(式(1))。

$$d = \frac{2\lambda N}{m\alpha} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{\sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 1}}} \cdots (1)$$

d は飛沫の直径, λ はレーザー光の波長, m は屈折率, α はレンズの画角, θ は撮影角度, N はフリンジ数である。

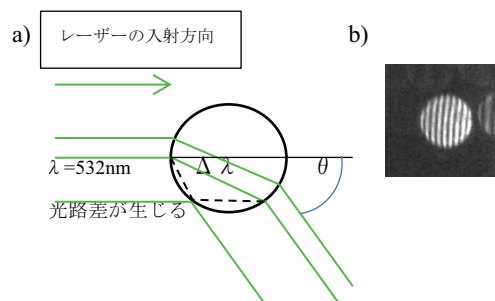


図-1 a)反射と屈折による光路差の発生 b)実際に撮影される干渉縞飛沫

3. 実験方法

レーザーによる干渉縞の撮影と、赤色 LED バックライトパネルの照射による飛沫流れの撮影を同時に行う。干渉縞を撮影するため画角が既知のレンズ ($\alpha=15.3^\circ$) を取り付けカメラと飛沫流れを撮影するためのカメラを用意し、図-2のように設置する。波長が 532nm のレーザーを鉛直方向にシート状に広げ水槽側面から照射し、レーザーシートに向けて霧吹きで飛沫を生成する。バックライトによる飛沫流れの撮影はレーザーシートに対して垂直に行い、レーザー光による干渉縞の撮影はレーザーシートから角度 θ で行う。干渉縞を撮影するレンズにはバックライトを遮断する緑色のフィルター、飛沫流れを撮影するレンズにはレーザー光を遮断する赤色のフィルターを取りつけ、LED バックライトやレーザー光による、それぞれの撮影への影響を最小限に抑える。干渉縞を撮影するカメラはレーザーシート上の飛沫のみが撮影範囲だが、飛沫流れを撮影するカメラは画角内の、カメラの軸方向の全ての飛沫が撮影できてしまい、撮影範囲に差異があるということが注意点である。

撮影は 1000fps で行い、シャッタースピードは、バックライト計測は 1/20000, レーザー光干渉計測の撮影は 1/6000 で行う。また、2つのカメラをトリガーによって同期し、同時刻での撮影を行った。

カメラ等をセットアップ後、レーザーシート上に方眼

メモリを設置し、両カメラともレーザーシート上にフォーカスを合わせ、キャリブレーション用の画像を撮影し、カメラ座標を実座標で較正する。バックライト撮影を行うカメラはレーザーシートに垂直であるため、その撮影は容易だが(図-3 a), レーザー光による干渉縞の撮影を行うカメラはレーザーシートから角度がついているため、フォーカスが一度で全てに合わない(図-3 b)。よってフォーカス位置をずらしたものを複数枚撮影し、フォーカスのあっているそれぞれの部分を切り取って合成し、キャリブレーション画像とした(図-3 c)。

実験条件の中で撮影角度 θ 以外は既知であり、まず撮影角度による違いを調べる。干渉縞が撮影できる θ の範囲は $30^\circ \sim 80^\circ$ とされているため(Maeda et al. 2002)その中で実験を行う。

図-4 は $\theta = 50^\circ, 60^\circ, 68^\circ$ として実験した際の撮影結果である。角度が小さい場合、実際の飛沫のサイズにかかわらず撮影できる干渉縞飛沫の円の大きさに幅があり、フリンジの明瞭さに差がある。角度が大きくなるにつれその幅は小さくなり、フリンジも明瞭になっていくため、 $\theta = 68^\circ$ にて今後の実験を行っていくことにした。

レーザーシートが水槽の壁面から近い距離にあると干渉縞を撮影した際に壁面に付着した水滴が邪魔をすることから、レーザーシートは壁面からある程度離れた面で作る(図-5)。

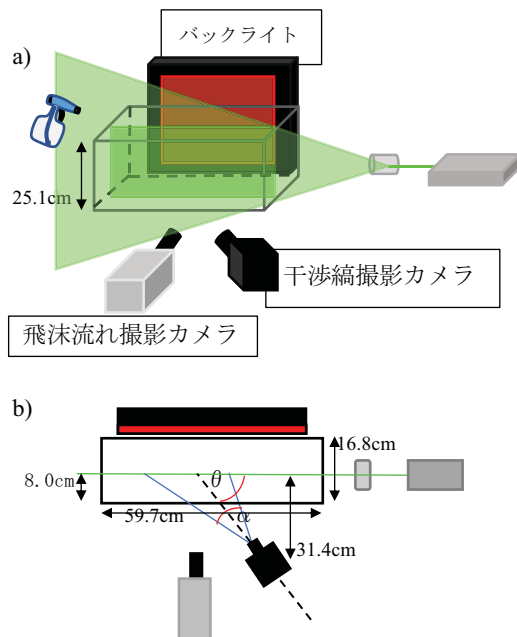


図-2 a) setup 方法 b) 平面図

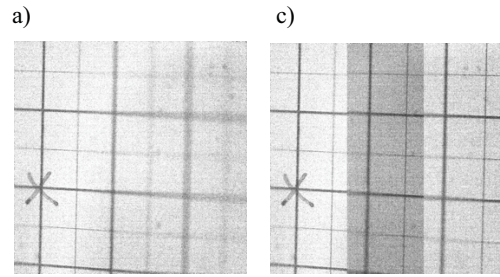
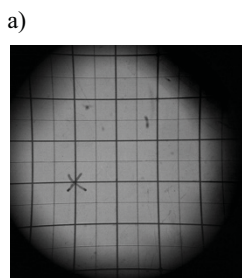
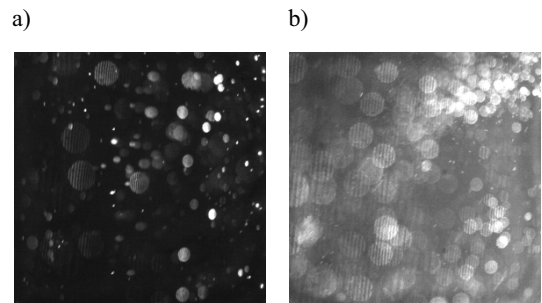


図-3 キャリブレーション用画像 a)バックライト法飛沫流れ撮影カメラ b)レーザー光干渉縞撮影カメラ フォーカスが一部分のみあっているもの c)複数のbを合成したもの



c)

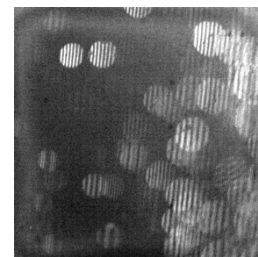


図-4 a) $\theta = 50^\circ$,b) $\theta = 60^\circ$,c) $\theta = 68^\circ$ での撮影結果

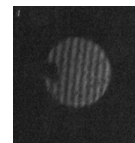


図-5 壁面の水滴によって影ができた干渉縞飛沫

4. バックライト画像解析

図-6 は輝度を反転させた飛沫のバックライト画像と同一時刻における干渉縞画像を比較したものである。

Watanabe and Ingram(2015)と同様に Level Set 法を用いて、飛沫エッジを検出し(図-7)、飛沫の重心と、干渉縞による飛沫画像との関係を調査した。キャリブレーションを通して撮影領域は一致しているが、干渉縞飛沫の撮影は角度をつけているため、両画像上の飛沫位置は一致せず、個々の飛沫を同定することはできなかった(図-7)。バックライト画像上の検出した全ての飛沫に対して、等価円の直径によるサイズ分布を調査した。図-8 は 7/3000 秒間に渡る単位面積当たりの飛沫サイズ分布

を表している。ピーク径 $137.5\mu\text{m}$ をもつ正規分布に近い分布となることがわかった。

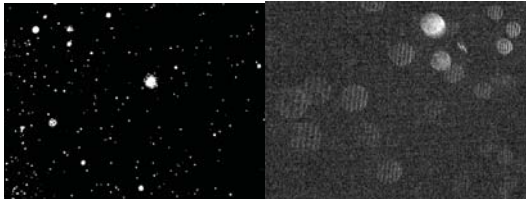
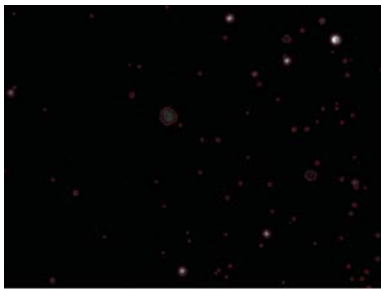


図-6 左) 飛沫分布 右) 同時刻の干渉縞飛沫画像

a)



b)



c)

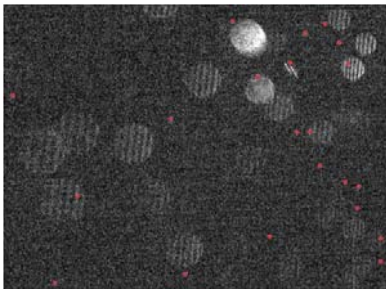


図-7 a)可視画像 b)Level Set 法にて飛沫を抽出
c) b で抽出した飛沫の重心と干渉縞飛沫画像を重ね合わせたもの

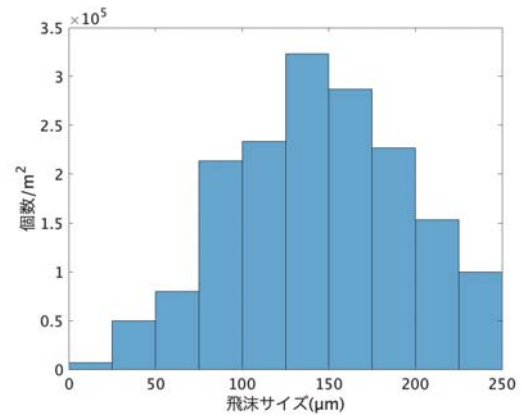


図-8 サイズ分布 ピクセル数より

5. 干渉縞画像解析

図-9は干渉縞飛沫の撮影結果の例である。画像から飛沫の個数とフリンジ数を測定し、バックライト計測と同一期間内の飛沫サイズ分布を式(1)によって求めた。測定したフリンジ数は主として3~7本で、その単位面積あたりの飛沫サイズのヒストグラムを図-10に表す。

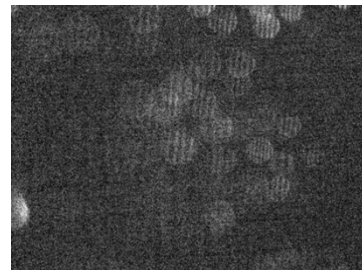


図-9 干渉縞画像

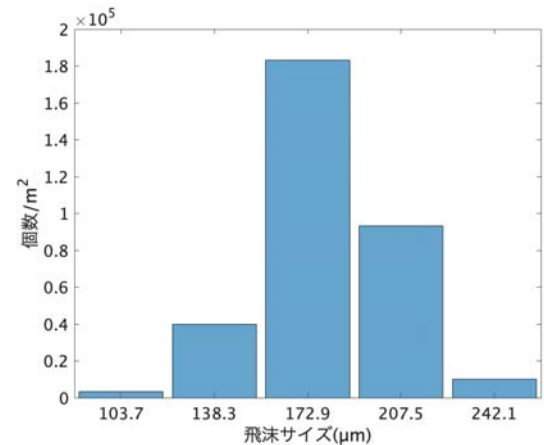


図-10

6. 結果

図-8と図-10のヒストグラムを比較すると、干渉縞飛沫のサイズ計測はおおよそ合致したと考える。バックライト法によるサイズ分布において飛沫の個数が干渉縞のフリンジ数のものより多くなっている原因は2つ考えられる。1つは、飛沫を抽出する際に閾値を設定しなかったため、レーザーシート状の飛沫以外の解析対象外のものも Level Set 法で抽出した可能性がある。閾値を設定すると小さな飛沫はほとんど全てが消えてし

まうため、閾値の設定の仕方も、今後考えなければいけない点である。2 つ目は干渉縞飛沫を目視で測定したことによる、目視では発見し難い強度値の低い飛沫の見落としが考えられる。強度値が低い場合、フリンジ数を測定することも困難であるため、より正確な測定方法が不可欠である。

また、図-8を見ると、干渉縞飛沫から求められるサイズ分布のビンの幅はおよそ $25\mu\text{m}$ となっている。(図-6では図-8のビンの幅がおよそ $25\mu\text{m}$ であったため合わせた。)干渉縞飛沫から飛沫サイズを求める場合に必要なのはフリンジ数で、その値は整数値である。よって飛沫の実際の細かいサイズを求めることは難しいのだが、撮影角度 θ が小さければ小さいほどビンの幅が小さくなることが式(1)よりわかる。よって、より正確なサイズ分布を求めるためには、極力 θ を小さくすることが求められる。干渉縞飛沫の個数・フリンジ数のより正確な測定方法が考えられれば、 θ が小さい場合も測定可能になるのではないかと考えている。

よって、干渉縞飛沫の個数・フリンジ数測定方法は今後、深く考えていかなければならない課題である。

7. まとめ

今までの研究で分かったことをまとめる。

- 1) 両者のヒストグラムがおおよそあったことから、レーザー光による干渉計測はこの研究において適切であると考えられる。
- 2) 飛沫流れ画像と干渉縞飛沫画像の画像処理アルゴリズムは、干渉縞飛沫の撮影角度 θ によらないものでなければならない。
- 3) 飛沫流れ画像処理は解析対象外のものを取り除く条件が必要。
- 4) 干渉縞飛沫画像の撮影角度 θ は小さければ小さいほどヒストグラムのビンの幅は小さくなり、より正確なヒストグラムが求められる。

8. 参考文献

- 1) WG Large, S Pond: Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds, 1981
- 2) Mark D, Powell, Peter J, Vickey, Timothy A. Reinhold: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, 2003
- 3) M. Maeda, Y. Akasaka, T. Kawaguchi: Improvement of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray, 2002
- 4) 大塚淳一, 渡部靖憲, 田代晃基, 大山高弘, 猿渡亜由未, 山田朋人: 風波砕波下の飛沫と気泡の同時画像計測, 2014
- 5) Yuzuru Niwa, Yoshihiro Kamiya, Tatsuya Kawaguchi, Keio University: Bubble Sizing by Interferometric Laser Imaging, 2000
- 6) Y. Watanabe and D.M. Ingram: Transverse instabilities of ascending planar jets formed by wave impacts on vertical walls, 2015