

バブルバースティングによる飛沫と周囲の空気イオン濃度の計測

Measurement of Droplets Generated by Bubble Bursting and Ambient Air Ion Concentration.

北海道大学工学部

○学生員

竹下勝利 (Katsutoshi Takeshita)

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

白波砕波や沿岸砕波によるジェットの着水や、海中の混入気泡が水面に浮上した際のバースティング等により、海面からは絶えず波飛沫が発生している(Veron,2015). 発生時の飛沫サイズは0 (1-100 μm)と非常に微細なため飛散過程の中で急速に蒸発し、周囲の熱、湿度環境を変化させる(Saruwatari & Abe, 2014). また飛沫が蒸発した後に残る海塩粒子は海洋性エアロゾルとして空気中に供給される. 更に、強風速条件下において大量に飛沫が発生すると、海面上に高数密度の気液混相乱流場が形成されるため海面抵抗が変化する. この様に海上気象を決定する重要なファクターのひとつである海からの飛沫の生成量は、外洋における現地飛沫観測結果に基づき、海上風速をパラメータとしたモデル Sea Spray Source Function (S3F) により推定されてきた(e.g. Andreas, 1998). 多くの場合、海上の飛沫濃度は光散乱式パーティクルカウンタを用いて測定されるが、これは粒子を含む空気流にレーザー光を照射したときの散乱光強度を測定することにより粒子の径と通過量を測定するものであるため、測定した粒子の組成を識別することは不可能であり、粒子が飛沫由来か否かを確定することはできない. 海上には飛沫由来の海塩粒子のほか陸由来のエアロゾルも飛来している為、現地観測結果から飛沫量を正しく測定するためにはデータを慎重に選別する必要がある.

一方古くから、砕波帯や滝、噴水などの付近の空気中にはレナード効果によりマイナスイオンが高濃度で含まれていることが知られている(Lenard, 1892). 水面に存在する水分子は水素結合により内部から引っ張られると水イオン (H^+ , OH^-) に電離する. その内 H^+ は即座に水面下へと輸送されるため、水面に取り残された OH^- により水面はマイナスに帯電している. 気泡のバースティングやジェットの着水により発生する微細飛沫はマイナスに帯電した水面極近傍の流体が分裂することにより形成されるため、飛沫もまたマイナスに帯電している(Chaplin, 2009). マイナスを帯びた飛沫周辺にはプラスに帯電した空気イオンが吸着するため、周囲の空気イオン濃度は相対的に上昇する. この様に水面近傍の空気イオン濃度は水面からの飛沫の生成と関連しており、空気イオン濃度をパラメータとして飛沫の発生数や発生量などを推定できる可能性がある.

本研究は飛沫の発生量と周囲の空気イオン濃度との関係を調査することを目的としている. これは空気中のイオン濃度が海上飛沫の発生量の推定の為のパラメータとして利用できる可能性を探り、最終的には新たな飛沫測定法の開発を目指すものである.

2. 実験方法

本実験では、水しぶきによる飛沫とマイナスイオンの生成量の関係性を調べた. 飛沫は平常時の外洋において支配的な発生機構であるバブルバースティングにより生成した. 19cm 四方、深さ 35cm のガラス製の水槽内で水深を 15cm として、水槽の底面の中心にバブリング装置を設置し行った(図-1). バブリング装置は、ポンプにより送られた空気がエアストーンを介してバブルとなる構造である. ポンプは最大吐出量 3500 cc/分、圧力 16kPa、消費電力 4.5W(50Hz)のものを用いる. エアストーンは直径 5cm のものを用いる.

10-100 μm の飛沫の飛散過程を水槽背面に設置した青色 LED パネルから照射される光をバックライトとしてマクロレンズを装着した高速カメラにより撮影した. 撮影条件はフレームレート 1000fps、シャッタースピード 1/2000sec、FOV46 mm×46 mm、解像度 1024×1024pixelとした. 水槽のカメラ側の側面から 10.5cm の断面にフォーカスして撮影した.

空気イオン濃度は、エーベルト氏式ゲルディエンコンデンサ法を採用したエアリーオンカウンター(コムシステム株式会社製の COM-3600F)により測定した. 測定分解能は 1 個/cc、サンプリング周波数は 10Hz である. また、エアリーオンカウンター内を通過する空気の温度、湿度も測定した. また、風など外的要因を除外するため、高さ 90cm の紙製のボックスで装置全体を囲って実験を行った.

2.1 ピントのレンジ

カメラのフォーカス領域の奥行きを調べる為、フォーカス面である 10.5cm 位置の前後に、直径 1 mm の点を 5 mm 間隔のグリッド状に配したキャリブレーション

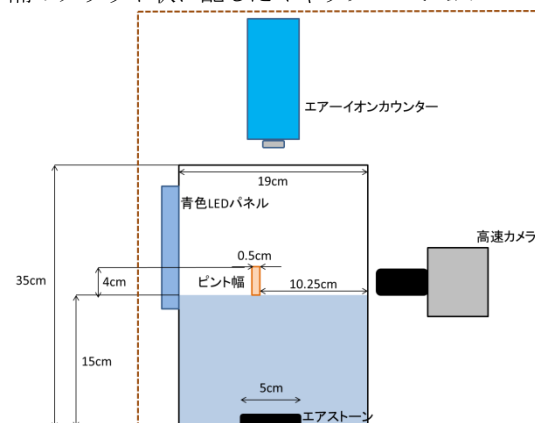


図-1 実験方法

ボードを設置した際の撮影画像のボケ具合を評価した。図-2はキャリブレーションボード上の点に2次元ガウス関数をフィッティングさせたときの分布の幅 σ とボードの設置位置との関係である。本結果と実画像との比較より $\sigma \leq 5.5\text{pixs}$ 、即ち水槽壁面から $10.5 \pm 0.25\text{cm}$ の範囲をフォーカス領域と定義した。

2.2 飛沫の検出

高速カメラにより撮影した各ケース 100 枚の連続画像の平均をバックグラウンド画像とし、撮影画像のそれぞれからバックグラウンドを引いた画像に対し円形の Hough 変換を行うことにより飛沫の中心位置を検出した(図-3)。赤で囲んだ部分はフォーカス範囲、青で囲んだ部分はフォーカス範囲内で検出した飛沫を表す。

3. 結果

3.1 飛沫の速度解析

図-4に飛沫の中心位置の時間変化をプロットした。飛沫は発生時に上方への初速度をもって放出され、その後重力により水面へと落下する軌道を描く。発生する飛

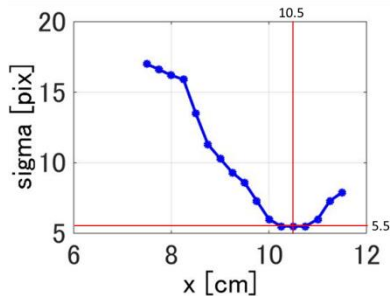


図-2 水槽側面からの距離と σ との関係

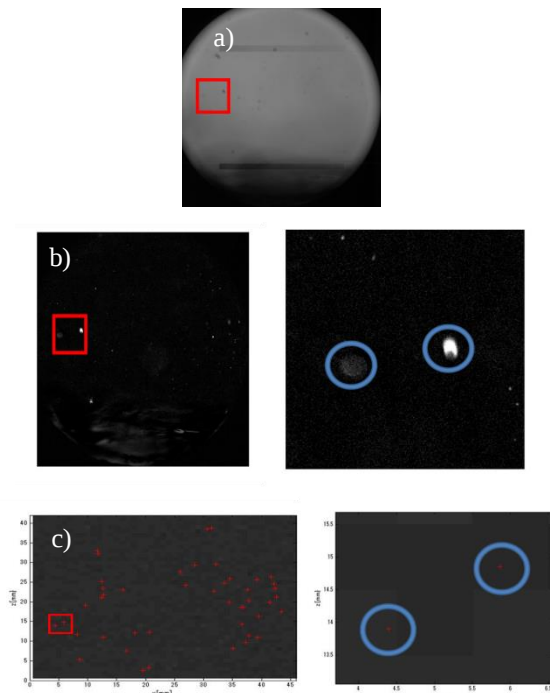


図-3 a): 実画像 b):実画像からバックグラウンドを引く c):解析画像

沫の径は撮影解像度以下のものから $0(100\mu\text{m})$ のものまで様々で、飛散速度、飛散高さにもばらつきがある。ほとんどの飛沫は上方への飛散から落下までの飛散過程の全てが撮影されており、フォーカス領域を外れる飛沫は少なかった。即ち飛沫の初速度はほぼ鉛直上方に向いているものと推察される。

フレーム数枚の連続画像から求めた飛沫中心位置のうち、加速度が最小になる組み合わせを求めることにより Particle Tracking Velocimetry(PTV)を行った。その結果を図-5に示す。ここで速度の単位は全て[pix/frame]としている。上方への飛散速度は最大で $46.9[\text{pix/frame}]$ 、平均で $4.61[\text{pix/frame}]$ であった。求められた速度場と原画像との比較から、妥当な速度場が計算されていることを確認した。

3.2 飛沫の平均数密度分布

図-3の解析画像を用いて、飛沫の平均数密度分布を求めた(図-6)。鉛直方向に 1mm の間隔で飛沫の数をカウントし、その数を1秒間で平均化した後、測定領域の体積で割ることで飛沫数密度を求めた。このうち $z \leq 5\text{mm}$ の範囲の結果はフォーカス面外のパルク水面の映り込みにより正しく測定されていない。よく報告されているように鉛直上方に向けて指数関数的に飛沫数密度が減少するようなプロファイルが得られた。

飛沫は時間的に間欠的に発生しており、図-6に示す5秒間を通して、飛沫数密度の時間的なばらつきが確認された。

3.3 マイナスイオンと温度、湿度の関係

エアロイオンカウンターによりマイナスイオンの個数とともに、エアロイオンカウンター内を通過する空気温度、湿度も測定した(図-7、図-8)。

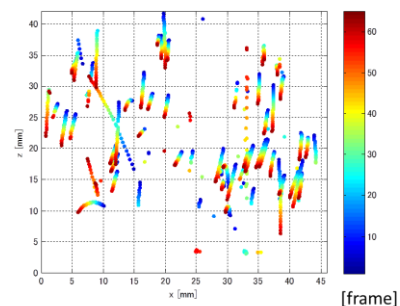


図-4 飛沫の軌道

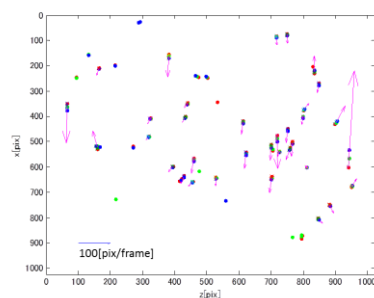


図-5 飛沫の速度

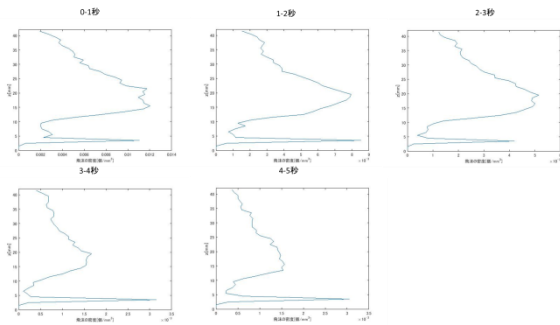


図-6 飛沫の平均数密度

右図から、今回のケースではマイナスイオンの増減は温度や湿度に大きな影響を与えていないとみられる。

3.4 マイナスイオンと飛沫の関係

測定開始5秒間のマイナスイオンの数と飛沫の個数を比較した(図-9)。マイナスイオンの個数は図-6をもとに密度の平均を算出し、飛沫の発生範囲の体積を乗じることによって算出した。ただ、 $0 \leq z \leq 5$ の範囲については平均の算出からは除外した。飛沫の発生範囲はエアーストーンの面積を底面とした高さ 42 mmの円柱と想定。マイナスイオンの個数は1秒おきに出力されるデータの1秒間の平均により算出した。

右図から、今回の実験からは飛沫の個数とマイナスイオンの個数の増減に明確な関係性を見出すことはできなかった。

4. まとめ

本研究ではバブルバースティングにより発生する飛沫を画像計測すると共に、その周囲の空気イオン濃度の変化を測定するシステムを構築した。

周囲の空気イオン濃度は飛沫の発生開始に応答して明らかに上昇しており、両者には何らかの関係性があることが確認できた。

今後、本セットアップにより、飛沫の生成と空気イオンの変化との関係をより詳細に調査し、新たな飛沫測定法の開発に向けて更なる研究を行いたい。

参考文献

- 1) Veron: Ocean Spray, Annu.Rev.Fluid Mech., 47, pp.507-538, 2015.
- 2) Saruwatari, Abe: Relationship Between Latent Heat of Sea Spray and Uncertainty of a Meteorological Field, Applied Ocean Research, 44C, pp.102-111, 2014.
- 3) Andreas: A New Sea Spray Generation Function for Wind Speed up to 32ms^{-1} , J.Phys.Oceanogr., 28, pp.2175-2184, 1998.
- 4) Chaplin: Theory vs Experiment: What is the Surface Charge of Water?, WATER, 1, pp.1-28, 2009.
- 5) Philipp Eduard Anton Lenard: Über die Electricität der Wasserfälle, Wiedemanns Analen Der Physik, Vol.46, pp.585-636, 1892.

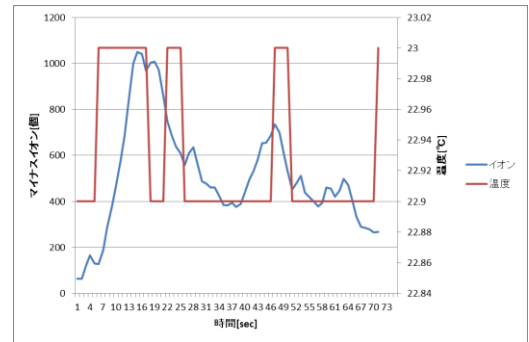


図-7 マイナスイオンと濃度

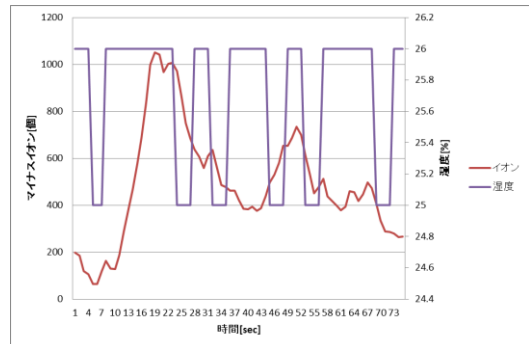


図-8 マイナスイオンと湿度

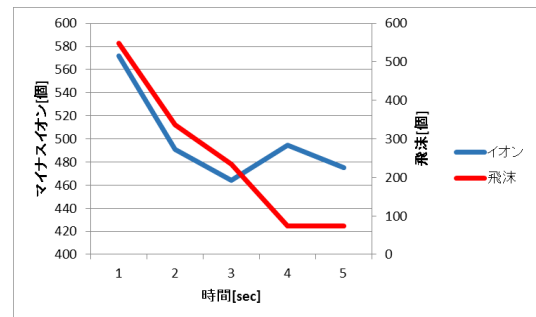


図-9 マイナスイオンと飛沫