

ジェット着水に伴う微細飛沫に関する水理実験

Experiments on the tiny sprays generated by splashing jet

北海道大学工学部 ○学生会員 藤澤 正樹 (Masaki Fujisawa)
 北海道大学工学研究院 正員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

海上では様々な要因により絶えず飛沫が発生している。例えば砕波ジェットが水面に着水する際には着水点から 10—100 μm 程度の飛沫が大量に跳ね上がる。砕波等により海中に混入した気泡が水面へと浮上しそれが弾ける時には数 μm の微細な飛沫が発生する。また強風の際には波のクレスト部分の流体が風により引きちぎられる事によっても飛沫が発生する。飛沫の発生により曲率と総表面積の増した水面は即座に蒸発する為、飛沫発生量は海面近傍の気温、湿度場を決定する重要なファクターとなる⁴⁾。共著者ら⁵⁾は飛沫が海上気象場に与える影響について調査する為、気象モデルに飛沫の蒸発による気温変化の影響を組み込み、通常の気象条件下では飛沫により 0.1–0.3 $^{\circ}\text{C}$ 程度の気温低下がもたらされ得る事を明らかにすると共に、飛沫による影響は飛沫発生量とサイズ分布を表す為の関数 Spray Generation Function (SGF) に大きく依存する事を明らかにした。

一方沿岸域では定常的に砕波が発生している為 20 μm 以上の飛沫の発生量が外洋よりも多い事が報告されている²⁾。更にそのサイズの飛沫は特に気象場に与える影響が大きい事が知られている事から¹⁾、沿岸域における局所気象に対する飛沫の影響は大きいと考えられる。しかし現在多くの SGF のモデルが提案されているものの e.g. 1), 3) その殆どが外洋の観測結果を元に構築したモデルであり、沿岸域における飛沫発生量やサイズ分布の変化を考慮したモデルは非常に少ない。また、殆どの SGF モデルは海上風、気温、湿度を主なパラメータとして飛沫発生量をモデル化しているが、飛沫の発生に直接関係がある筈の波浪の状態と飛沫発生量との関係については殆ど不明である。

そこで本研究ではジェット着水に伴い発生する飛沫のサイズ分布、発生量、飛散高さ、またそれらの時間変化等について室内実験により測定し、ジェット着水現象下における飛沫発生現象を特徴化する事を目的としている。これは将来的に沿岸砕波に伴う飛沫の発生量及びサイズ分布の予測モデルを構築する為の基礎的研究として行うものである。

2. 実験方法

図-1 (左) に示す幅 40cm×奥行 25cm の水槽に 17cm の水深まで淡水を入れて実験を行った。本来は飛沫発生において海水を用いるのが望ましいが、本実験ではまず飛沫発生現象の特徴を理解するために淡水を使用した。水槽内には直径 1.5cm のホースにつない

だポンプを入れ、水槽内の水を吸い上げ、静水面より高さ 20cm から再び水槽内に放水する。ここではジェット着水点から水が直接引きちぎられて形成される飛沫と、ジェット着水と共に混入した気泡が水面で弾ける際に発生する飛沫との両方が混在した状態となっている。気相は水面から高さ 75cm までを密閉した状態としており基本的には無風状態と考えてよいが、着水ジェットの落下速度を駆動力とした対流が水槽内で生じている可能性がある。水面から 10, 20, 30, 40, 70cm の高さに設けた測定孔からプローブを水槽内に挿入し、飛沫数密度 N の鉛直分布を測定した。実験時の湿度は 40–44%、気温は 13–16 $^{\circ}\text{C}$ 、水温は 12–15 $^{\circ}\text{C}$ であった。

計測装置には図-1 (右) に示す空中浮遊粒子測定用パーティクルカウンター (APC エルゴタッチ) を使用した。測定対象とする粒径は 5 μm 、1.0 μm 、0.3 μm とし、30 秒ごとの空気 1 m^3 中の平均粒子数密度を測定するように設定した。測定時間はジェット放出の開始時刻から 5 分間とし、30 秒おきに測定を行った。また、各計測点において 10 回ずつの試行実験を行った。着水開始からの経過時間を t 、静水面から鉛直上方を z 軸と定義する。本実験条件下では、1 試行終了後、実験により発生した飛沫が沈降し粒子数密度がほぼ初期状態に戻るまで、1 回の試行毎に 10 分程度水槽を静置した。本測定器では空気中の塵や埃などの粒子も計測してしまうため、バックグラウンドの粒子濃度 (着水開始時刻) からの差をジェット着水による飛沫と考えた。

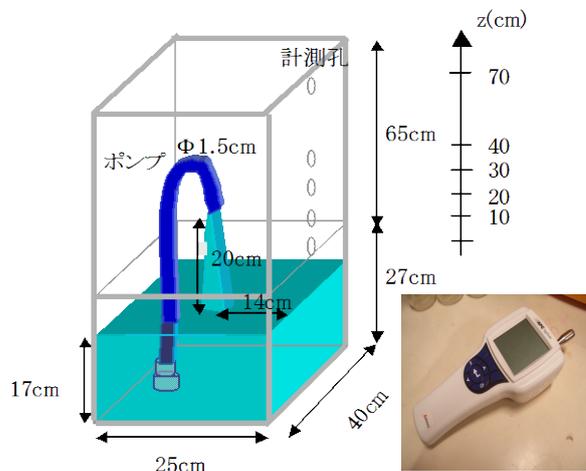


図-1 実験水槽(左)とパーティクルカウンター (APC エルゴタッチ) (右)

3. 実験結果

3-1 飛沫数密度の鉛直プロファイル

図-2 は本実験により得られた平均飛沫数密度の鉛直プロファイルの時間変化を表す. Ling and Kao (1976) は波浪上に発生する飛沫数密度は水面近傍から鉛直上方にかけて指数関数的に減少する様な分布形状となる事を示している. そこで本実験による結果を次式によりフィッティングさせた. (図-2 実線)

$$N = A \exp(-BZ)$$

本研究の数密度分布も彼らの結果と矛盾しない形状となることを確認した. 水面から 40cm 付近において特に $D = 0.3, 1.0\mu\text{m}$ の分布に他よりも大きな数密度が現れているが, これは密閉水槽内の気流の影響もしくは実験装置の構造上の問題によるものと考えられる.

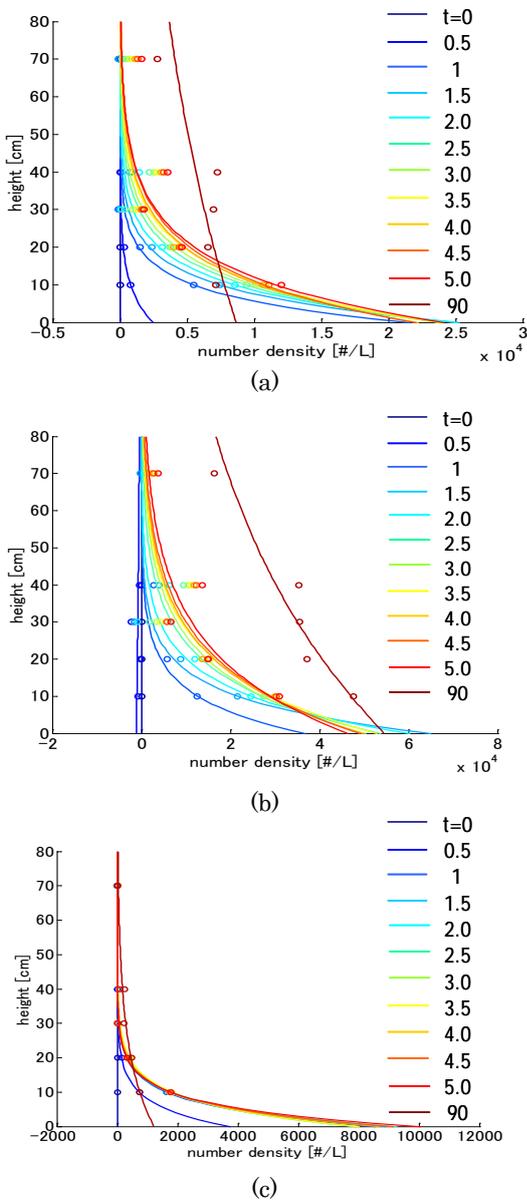


図-2 平均飛沫数密度の鉛直プロファイル (○)と指数関数によるフィッティング曲線 (—)
(a)0.3μm (b)1.0μm (c)5.0μm

3-2 鉛直積分飛沫数密度

測定した飛沫数密度を水面から本実験の水槽上部の高さまで鉛直方向積分する事により総飛沫数密度 N_{tot} を求める.

$$N_{tot} = \int_0^{75\text{cm}} N dz$$

図-3 は総飛沫数密度の時間変化を示している. $D=5.0\mu\text{m}$ の飛沫が $t = 1 \text{ min}$ には平衡状態に達した一方, $D=1.0, 0.3\mu\text{m}$ の飛沫は $t = 5 \text{ min}$ においても尚緩やかに増加している. 飛沫にかかる重力と浮力, 抗力が Stokes 則に従う場合, 飛沫の終端落下速度は次式により表される.

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_p - \rho_f) g}{\eta}$$

ここで, r は飛沫半径, ρ_p は水の密度, ρ_f は空気密度, g は重力加速度, η は空気の粘度である. 上式より飛沫径が十分に小さい時, その落下速度は径の 2 乗に比例する. 即ち径が小さくなるに従い急激に飛沫が落下しづらくなる. 従って, 図-4 のように飛沫径の小さな $0.3, 1.0\mu\text{m}$ は, 短時間で飛沫発生数が平衡状態にならない.

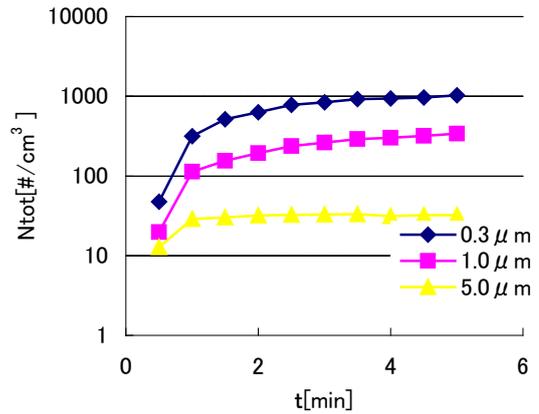


図-3 総飛沫数密度の時間変化

3-3 Spray Generation Function

Spray Generation Function とは単位海表面積, 単位時間あたりに発生する飛沫の発生量を表す関数であり, 飛沫径の増分に対する飛沫数密度の増加量として定義される. 本研究の測定結果から求めた SGF の飛沫径との関係を図-4 に示す. De Leeuw (1999) は砕波帯における海洋性エアロゾル濃度の現地観測結果から SGF を求めたが, その結果も併せて図-4 にプロットしている. 本実験は彼らの実験とはスケールや条件は全く異なるものの, 各飛沫径における SGF のオーダー及び測定高さとの関係が一致した.

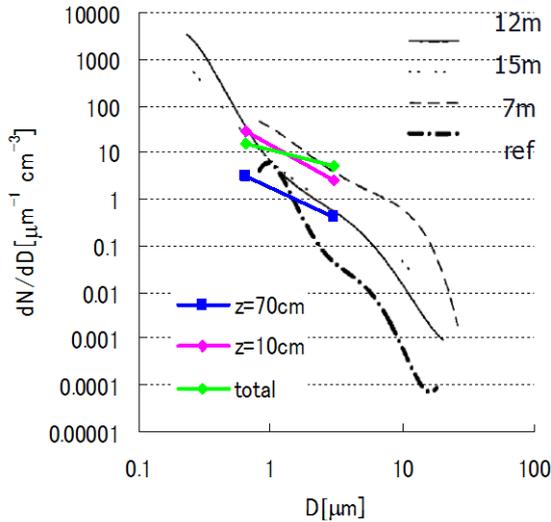


図-4 本実験により得られた SGF (青, 赤, 緑) 及び De Leeuw (1999) による測定結果 (黒) の比較

Oceanogr., 6, pp. 306-315, 1976.

- 5) 猿渡亜由未、阿部伸弘：海からの飛沫の発生に対する海面近傍の気温分布の応答、*土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 67, 2, pp. I_371-375, 2011.

4. まとめ

本研究ではジェット着水に伴い発生する飛沫のサイズ分布、発生量、飛散高さ、またそれらの時間変化等について測定した。飛沫数密度の鉛直プロファイルにより、水面近傍から鉛直上方にかけて指数関数的な減少傾向が示された。

測定された飛沫数密度を水槽上部の高さまで鉛直積分することで、水槽内総飛沫数密度の時間変化を示した。比較的粒径の小さな飛沫ほどその落下速度も小さくなり、飛沫の滞空時間が長くなるため、ジェット放出開始から数密度が平衡状態に達するまでに要する時間が増加した。

測定結果によって求めた SGF は De Leeuw (1999) が求めた SGF と条件やスケールは違うものの、その傾向は一致した。今後種々の条件で実験を行うことによりジェット着水時の条件と飛沫発生量との関係について明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) Andreas, E. L.: Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes. *J. Geophys. Res.*, 97, C7, pp. 11429- 11441, 1992
- 2) De Leeuw, G. et al.: Sea spray aerosol production from waves breaking in the surf zone. *J. Aerosol Sci.*, 30, Suppl. 1, pp. S63-S64, 1999.
- 3) Gong, S. L.: A parameterization of sea-salt particles. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 4 1097, 2003.
- 4) Ling, S. C. and T. W. Kao: Parameterization of the moisture and heat transfer process over the ocean under whitecap sea states. *J. phys.*