

令和3年10月18日

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学

原子力発電所の安全性向上につながる液滴飛散現象の解明

【ポイント】

- * スプラッシュ現象における飛散液滴の総量とサイズ分布の評価手法を飛躍的に高度化
- * 高速炉ナトリウム火災や軽水炉シビアアクシデントの事故進展の予測精度向上に貢献
- * 化学プラントでの気液分離効率向上や河川排水口でのエアロゾル発生量予測にも利用可能

【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科の大川富雄教授らの研究グループは、液体の噴流が固体面に衝突した時に生じるスプラッシュ（液滴飛散）現象^[1]において、液滴の総量とサイズ分布を高精度に評価する手法を世界で初めて開発しました。スプラッシュは、原子力発電所における事故進展や化学プラントにおける気液分離^[2]性能に加え、河川に設けられた排水口におけるエアロゾル^[3]の発生等でも中心的な役割を果たす重要かつ基礎的な流体现象です。本現象を理解することで、原子力発電所の安全性や化学プラントの性能、ウイルスの拡散とも関連するエアロゾルの発生量等をより正確に予測できるようになります。これらの工業プラントの性能向上につながるほか、エアロゾル発生量を低減するための方策もより効率的に検討できるようになります。

一例として、冷却材として液体ナトリウムを使用する高速炉^[4]では、軽水を用いる通常の原子炉（軽水炉^[5]）に比べて、高温かつ低圧でシステムを組むことができます。しかしながら、ナトリウムは化学的に高活性であるため、漏えいすると燃焼を生じてナトリウム火災を引き起こす恐れがあります。ナトリウム燃焼は液体ナトリウムの表面で生じる化学反応であり、スプラッシュによって液体ナトリウムの表面積が増大すると、これに応じてナトリウム火災も激しくなります。このため、高速炉におけるナトリウム火災の事故進展を正確に予測するには、漏えいした液体の噴流が床や天井などの構造物に衝突した際に生じるスプラッシュ液滴の総量やサイズを把握する必要があります。

研究グループは、液体噴流が固体面に衝突する際のスプラッシュの発生メカニズムを、詳細な可視化実験によって実験的に調べました。その結果、衝突時における噴流の流動状態と関連づけることで、飛散液滴の総量とサイズ分布の予測精度が飛躍的に向上することが分かりました。

本研究は、日本原子力研究開発機構と共同で行い、その成果は国際学術誌「Experimental Thermal and Fluid Science」に掲載されました。また、千代田化工建設(株)と共同で気液二相噴流に関する研究も別途実施しており、液体噴流に関する研究成果を化学プラントにおける気液分離性能の向上に展開する試みも行っています。

【背景】

ナトリウム冷却高速炉において冷却材が漏えいしてナトリウム火災が生じる際、その火災の規模は液体ナトリウムの表面積に強く依存します。そのため、火災の規模を知るには、液体ナトリウムの噴流が原子炉の建屋の床や天井に衝突したときに発生する飛散液滴の挙動、具体的には、飛散液

滴の総量と液滴径の分布についての定量的な実験情報と信頼性の高い予測モデルが欠かせません。しかしながら、スプラッシュはミルククラウン（王冠状の構造）と類似の身近な流体现象であるものの、その過程はきわめて複雑で、正確な予測モデルは存在しませんでした。

そこで研究グループは、ノズルから噴出する液体噴流が固体面と衝突する事象を詳細に観察し、スプラッシュによって生じる飛散液滴の総量と滴径の分布を正確に予測するモデルの開発を試みました。

【手法】

実験では、まず安定した液体噴流を作り出す装置を設置し、噴流の流動および液滴の飛散の状況を高速カメラを用いて詳細に観察しました。液滴の総量は、飛散液滴を紙製のウエス（拭き取り布）に吸収させ、実験前後のウエスの重量変化によって計測しました。また、液滴径の分布は、シリコンオイル中に捕獲した飛散液滴の顕微鏡観察により丹念に計測しました。液体物性の影響を明らかにするために、試験流体は水とエタノール水溶液、グリセリンの水溶液を使用しました。このほか、噴流の流出方向や噴出ノズルの形状の影響を実験的に調べるとともに、数値シミュレーションによる検討も行いました。

【成果】

液体噴流はノズルを流出した直後は連続したジェットを形成しますが、流体力学的な不安定さによって分裂し、やがて液滴列を形成します（図 1）。詳細な観察の結果、スプラッシュは常に起きているのではなく、分裂液滴が衝突したときに間欠的に生じる現象であり、噴流の分裂が進むにつれて飛散液滴量も増大することを見出しました。

液体噴流の分裂により生じる液滴衝突の回数は、最小分裂長さ（噴流の分裂開始までに要する距離）、最大分裂長さ（噴流の分裂終了までに要する距離）、最大液滴衝突頻度（噴流の分裂が終了した後の衝突頻度）の三つを知ればおおむね予測できます。そこで、これら3種類の物理量を正確に予測できるモデルを開発しました。

さらに、衝突1回あたりの液滴飛散量と飛散液滴のサイズ分布は、ウェーバー数^[6]と呼ばれる無次元数の関数となることを示しました（図 2, 3）。これにより、飛散液滴の総量と滴径の分布を高精度に予測をできるようになりました。

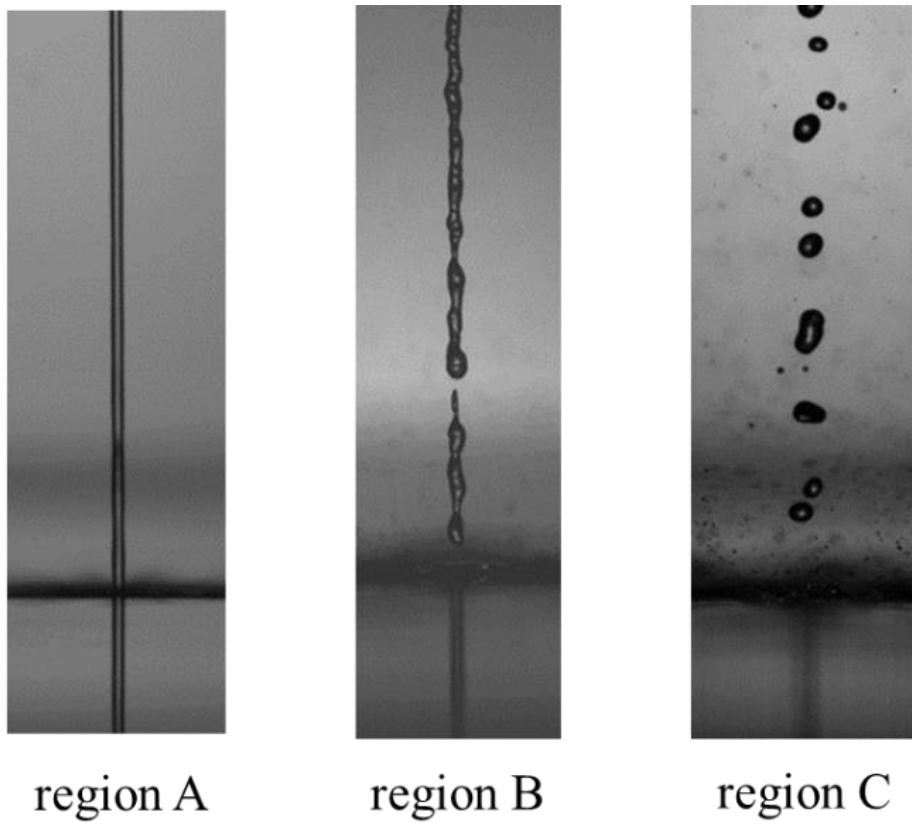


図1 液体噴流の流動状況と液滴飛散の激しさの関係

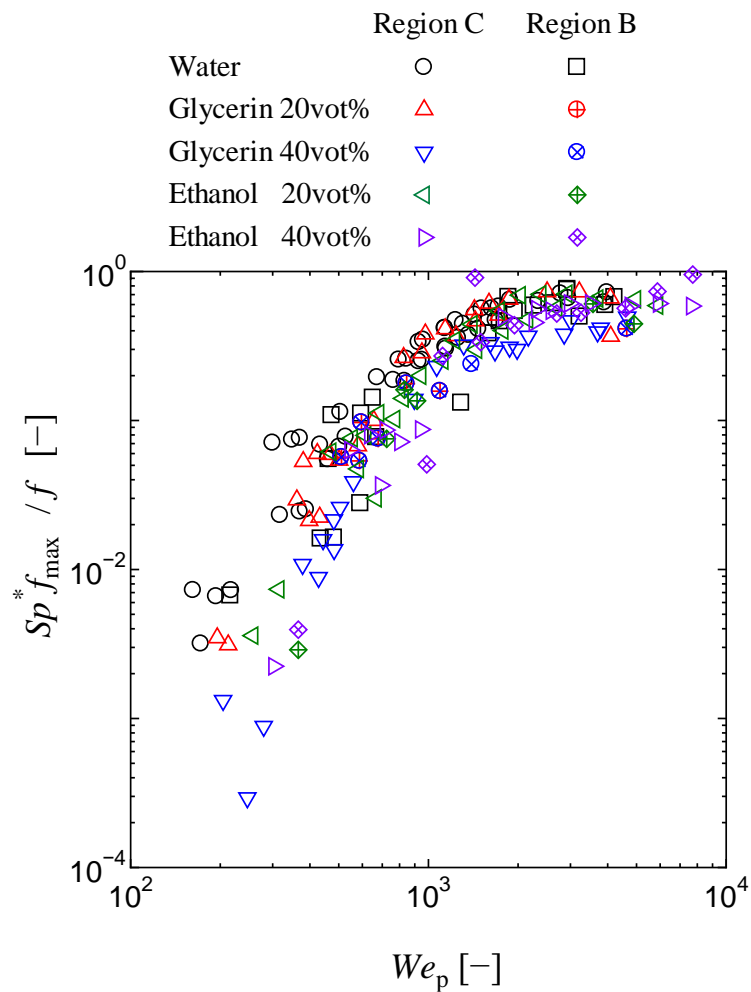


図2 衝突1回あたりの液滴飛散量とウェーバー数の関係

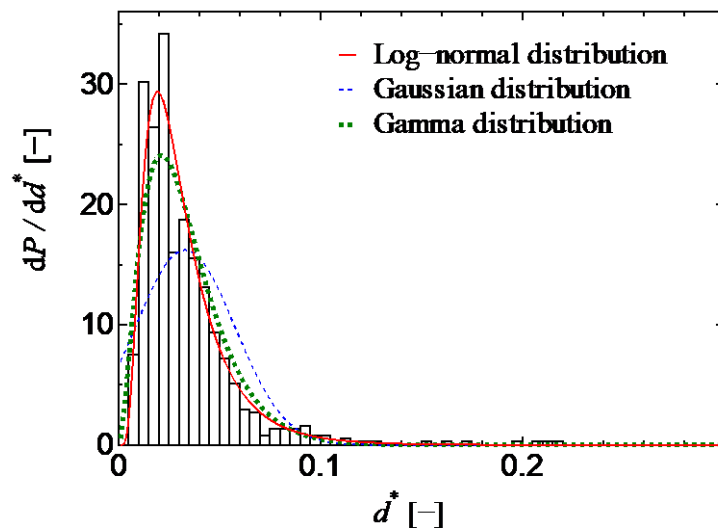


図3 飛散液滴径分布の実験結果と予測値の比較

【今後の期待】

開発した評価手法を使って、スプラッシュ現象で生成される液体ナトリウムの飛散液滴の総量とサイズを推定することにより、高速炉ナトリウム火災の事故進展の評価精度の向上に貢献すると期待されます。スプラッシュ現象は基本的かつ重要な流体现象であるため、ナトリウム冷却高速炉の安全性向上だけでなく、軽水炉でシビアアクシデント^[7]が生じた場合の放射性物質移行挙動の予測や、化学プラントにおける気液分離性能の向上、ウイルスの拡散とも関連するエアロゾルの発生量評価等に応用することも可能と考えられます。

(論文情報)

雑誌名：「Experimental Thermal and Fluid Science」

論文タイトル：Droplet generation during spray impact onto a downward-facing solid surface

著者：Yi Zhan, Guofu Sun, Tomio Okawa, Mitsuhiro Aoyagi, Takashi Takata

DOI 番号：10.1016/j.expthermflusci.2021.110402

(用語説明)

- [1] スプラッシュ（液滴飛散）現象：ミルククラウンのように液滴と液膜が衝突したときに液滴が飛散する現象
- [2] 気液分離：気体と液体の混合物を、遠心力などを使って気体と液体に分離すること
- [3] エアロゾル：気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子
- [4] 高速炉：高速中性子により核分裂を生じる原子炉で、運転中に燃料を生産できる
- [5] 軽水炉：冷却材として軽水を用いる最も一般的な原子炉
- [6] ウェーバー数：慣性力と表面張力の比を表す無次元数
- [7] シビアアクシデント：原子炉において燃料溶融を伴う重大な事故

【連絡先】

<研究内容に関する事>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科
教授 大川富雄

Tel : 042-443-5404 E-Mail : okawa.tomio@uec.ac.jp

<報道に関する事>

電気通信大学 総務企画課 広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp