

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月12日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14166

研究課題名（和文）減圧環境下における微小液滴の加熱面衝突時局所熱伝達特性に関する研究

研究課題名（英文）Local heat-transfer characteristic of a micro droplet impacting onto a heated surface under depressurized environment

研究代表者

畠中 龍太（Hatakenaka, Ryuta）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：80725333

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：将来的な宇宙用噴霧冷却器の開発へ向けて、減圧環境下における単一液滴の加熱面衝突現象の解明を進めた。その結果、減圧環境特有の液滴挙動を2つ発見し、そのうちの1つの発生メカニズムを説明し得る物理モデルを提案し、さらに液滴-壁面間の気泡生成/成長の直接観察によってその妥当性を確認した。また、噴霧冷却で用いられるマイクロ液滴に対してはSplash現象の発生条件に関する既存モデルが適用できないことを明らかにした。さらに、液滴衝突時の局所的な熱伝達特性を評価するための高速応答熱電対アレイに関する要素試作を行い、技術的に実現可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

減圧環境下に特有の液滴挙動が新たに識別され、その発生メカニズムにおける気泡成長特性の重要性が示されたことは、減圧環境下における液滴挙動を予測するために重要な知見である。また、過去に提案された各種物理モデルを大きく異なる液滴径に適用できるかを検証できないことが多いため、本研究で得られたマイクロ液滴の実験的知見は貴重である。また、相変化を伴う冷却技術の研究では蒸発/沸騰に伴う局所的・過渡的な熱流束を適切に評価することが極めて重要であり、本研究で開発を進めた高速応答熱電対アレイを適用できれば新たな学術的な成果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：For the development of spray cooling device for space use, single drop impacting onto a heated surface under depressurized environment has been studied. Two characteristic drop behaviors of depressurized environments are newly identified. A theoretical model for the mechanism of one of those has been proposed, whose validity is confirmed by direct observation of growing bubble between the drop and surface. In addition, existing theoretical models for the splash threshold are confirmed not to be directly applicable to micro-sized droplet, which is commonly used for spray cooling. Finally, an elemental prototyping of a fast-response thermocouple array aiming to measurement of local heat flux distributions at the heated surface during drop impact has been conducted, which has successfully demonstrated its feasibility.

研究分野：宇宙工学、伝熱工学、流体工学

キーワード：液滴 ライデンフロスト 減圧環境 真空環境 熱電対 気泡成長 全反射法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

流体の蒸発潜熱を利用した噴霧冷却は、単位質量辺りの蓄冷効率がよく制御性にも優れることから、将来の再使用型有人宇宙往還機のキー技術である。しかしながら、噴霧冷却は液滴-壁面間、液滴-液滴間、液滴-液膜間の相互作用が関係し合う極めて複雑な物理過程を伴うため、現状では解析的予測が困難であり、経験的な手法で設計されているのが実情である。例えば著しい伝熱特性低下と急激な温度上昇を引き起こす「ライデンフロスト現象」は噴霧冷却にとっては致命的な事象であるが、この事象が減圧環境下でどう変化するかは単一液滴の場合ですら十分に解明されていない。核沸騰領域であれば壁面加熱度（流体の飽和温度と壁面温度の差）を高くすれば高い冷却性能を発揮できるが、宇宙用途では高い安全性が求められ、また実環境を模擬した試験が極めて高コスト（あるいは不可能）であるため、保守的/冗長な設計にせざるを得ないのが現状である。

宇宙用噴霧冷却は、環境圧力が高真空～大気圧の範囲で変動する状況下で使用される。相変化を伴わない常温壁への液滴衝突を低真空～大気圧環境下で評価した研究例(Xu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 2005 等)は近年数多く報告されているのに対し、加熱面衝突に関して減圧環境の影響を評価した研究例はほとんど報告されていない。減圧環境下における液滴の加熱面衝突では、1)飽和温度低下による蒸発促進、2)発生蒸気の流出による浮上力低下、の2つの効果が同時に生じることが予想される。研究代表者らは本研究開始前の予備実験において減圧環境では壁面過熱度が高く衝突速度が遅い場合でも液滴-壁面間の接触が生じやすいことを確認していたが、各圧力領域・温度領域でどのような現象が発生するか俯瞰的な理解がされておらず、また各現象の発生メカニズムは解明されていなかった。

### 2. 研究の目的

将来的な宇宙用噴霧冷却器の高性能化および効率的な開発を目的として、噴霧の加熱面衝突現象に関して環境圧力を考慮した物理モデルを構築することを目指す。本研究では噴霧冷却の基礎過程として単一液滴の加熱面衝突現象に着目し、減圧環境下の液滴加熱面衝突における液滴挙動の相図作成、減圧環境特有の液滴挙動の物理モデル構築および検証、液滴衝突現象における液滴サイズの影響評価、液滴衝突実験に適した高速応答熱電対アレイの試作、の4点を主な目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 減圧環境下の液滴加熱面衝突における液滴挙動の相図作成

まずは現象の全体像を把握するために比較的広い環境圧力(1-100kPa)と壁面温度(60-250 )で網羅的なデータ取得を行い、液滴挙動の相図を作成した。真空チャンバ内で直径約2mmの液滴を加熱面に衝突させ、側方から高速度ビデオ撮影を行った。真空チャンバは油回転ポンプによって減圧し、圧力計、圧力コントローラ、および電磁弁によって圧力一定制御を行った。液滴生成はシリジポンプを用いた自然落下方式により行った。減圧環境では溶存ガスの脱離あるいは蒸発による気泡生成・膨張が発生しやすく、また衝突速度を小さくするために滴下針が加熱面に近接させると針先端で沸騰が発生し、液滴の安定生成ができない。本研究では、実験前に十分な脱ガス処理を行った上で、実験中は低温冷媒の常時循環あるいは揮発性ガス噴射による間欠的な冷却によって、滴下針の温度を常温以下に保った。

#### (2) 減圧環境特有の液滴挙動の物理モデル構築および検証

上記(1)の実験で識別された減圧環境特有の液滴挙動(magic carpet breakup)の現象に関して、プール沸騰条件を前提として過去に提案された気泡成長モデルと液滴の壁面上で拡張する運動を関連付けた物理モデルを提案し、解析的な予測結果と実験結果を比較した。

さらに、提案したモデルの妥当性を検証するために、全反射法を用いて液滴-壁面間の接触状況の直接計測を行った。加熱面としてサファイア製のプリズムを用い、2台の高速度カメラを用いて側方と下方(全反射法)の2方向同時撮影を行った。

#### (3) 液滴衝突現象における液滴サイズの影響

液滴衝突に関するほとんどの実験的研究では液滴生成が容易なミリ液滴が用いられているが、噴霧冷却で使われる液滴径は数十～数百 $\mu\text{m}$ オーダが一般的であり、過去に構築された各種モデルの適用可否を検証することは重要である。例えば先行研究(Visser *et al.*, *Soft matter*, 2012)では大気圧下におけるマイクロ液滴の衝突の場合にはSplashが発生しないことが報告されており、研究分担者も予備試験で同様の傾向を確認していたが、両者とも理論的な解釈を与えるには至っていない。そこで、まずは大気圧環境下において、研究分担者が開発した2つの手法(レーザ集光を用いる手法((Tagawa *et al.*, *Phys. Rev. X*, 2012))および液体に撃力を加える手法(大貫&田川, *混相流*, 2015))によって生成したマイクロ液滴(直径50-700 $\mu\text{m}$ , 速度1-50 m/s)を常温のシリコン基板に衝突させ、液滴衝突の様子を側方から撮影してSplash発生条件に関して実験結果と既存の理論モデルの比較を行った。

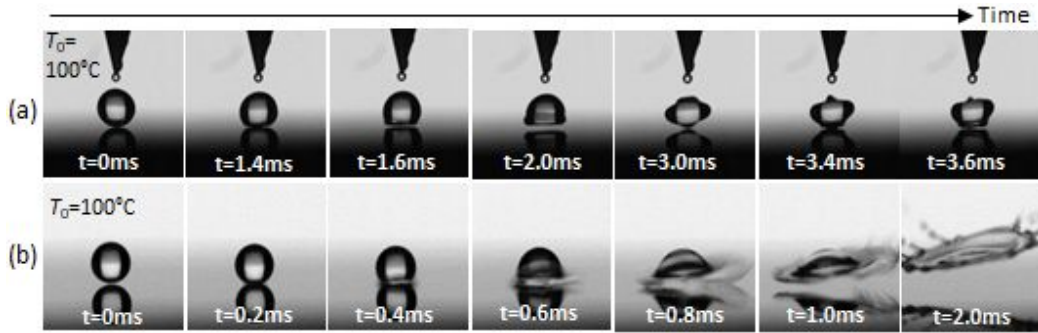


図1 減圧環境下で新たに識別された液滴挙動：(a) tiptoeing、(b) magic carpet breakup (Hatakenaka et al., 12<sup>th</sup> EMFC, 2018)

(4) 液滴衝突実験に適した高速応答熱電対アレイの試作

プール沸騰実験においては高速応答温度センサアレイを用いて局所的且つ高速な表面温度変化を計測し、逆問題法によって熱流束分布を推定する試みは過去に数多くの研究者に行われてきた。液滴衝突の場合、衝突位置や気泡核生成位置を精密に制御することが難しいため、比較的広範囲に渡って2次元的にセンサを配置する必要がある。さらに、減圧環境下の液滴衝突の場合、液滴-壁面間に生成されるガス層の厚さは  $10^{-2} \sim 10^0 \mu\text{m}$  程度と予測されるため (Mani et al., *J. Fluid Mech.*, 2010)、表面の凹凸高さを可能な限り小さく (少なくとも精密研磨面の表面粗さ  $0.1 \mu\text{m}$  以下まで) 抑えることが望ましい。また、沸騰に伴う大きな熱流束を評価するためには熱電対データを高速 (10kHz 程度) 且つ低ノイズ (振幅 1 以下) で読み出す回路が必要であるが、市販の高速温度ロガーはチャンネル単価が極めて高く 100ch を超える熱電対アレイの実現は難しいため、信号増幅/読み出し回路を現実的なコストで準備する必要がある。本研究ではこれらの技術課題を解決するために熱電対および読み出し回路の試作を行った。

4. 研究成果

(1) 減圧環境下における加熱面衝突後の液滴挙動の相図の作成

環境圧力 25 ~ 100kPa では、大気圧環境下の実験で過去に報告されている挙動 (Deposition, Rebound) のみが発生し、両挙動の閾値温度が圧力低下と共に低下すること、その低下トレンドが流体の飽和温度トレンドと概ね一致していることを確認した (Hatakenaka et al., 14<sup>th</sup> ICLASS, 2018)。この傾向は最近発表された Limbeek らの報告 (*Phys. Rev. Fluids*, 2018) と良く一致している。

一方、環境圧力が 10kPa 以下の領域において、Deposition と Rebound の間の温度領域で2つの新しい液滴挙動 (tiptoeing および magic carpet breakup) を発見した (Hatakenaka et al., 14<sup>th</sup> ICLASS, 2018)。前者では液滴下端において部分的な接触を繰り返しながら最終的に跳ね返る (図 3a) のに対し、後者では衝突直後 (壁面上で伸長する前) に液滴全体が大きく水平方向に変形してそのまま跳ね返る (図 3b) あるいは再衝突する。magic carpet breakup における跳ね返り速度は衝突直前の液滴の速度を上回ることもあり、変形後の液滴最大直径や液滴の跳ね返り速度は、直観に反して、壁面温度上昇によって小さくなる傾向であることを示した。

また、壁面温度を上げると magic carpet breakup から tiptoeing に遷移し、その後 rebound に遷移する傾向が見られたが、環境圧力が低い方が (同一壁面温度では壁面過熱度は高くなるにも関わらず) rebound への遷移温度が高くなることを確認した (Hatakenaka et al., 14<sup>th</sup> ICLASS, 2018)。液滴の常温壁衝突においては液滴-壁面間で形成される空気薄膜が減圧環境により薄くなり液滴-壁面間の接触が生じやすくなることが実験的に確認されており (Li et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2017)、類似の事象が加熱壁衝突の場合でも起こっている可能性を示した。

(2) 減圧環境特有の液滴挙動の物理モデル構築および検証

magic carpet breakup の発生メカニズムに関して、a) 液滴衝突時の微小気泡が取り込み、b) それを核とした気泡成長と液滴の壁面上での伸長 (spreading)、c) 気泡径が液滴-壁面間の接触部径を超えることによる気泡破裂、d) 水平方向の大変形と跳ね返り (あるいは減速) という仮説を提案した (図 2)。この仮説に基づき、プール沸騰実験を対象として過去に構築された気泡成長モデル (Mikic et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1970) を導入し、壁面への接触後

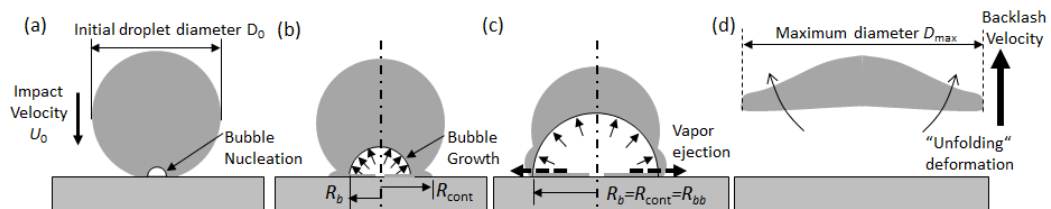


図2 Magic carpet breakup の物理モデル (Hatakenaka et al., 14<sup>th</sup> ICLASS, 2018)



の気泡核生成時間と気泡成長速度を予測し、解析的に予測される気泡破裂まで時間が実験結果と良く一致することを示した(Hatakenaka *et al.*, 14<sup>th</sup> ICLASS, 2018)。さらに、本仮説の妥当性を確認するために全反射法(図3)を用いて液滴-壁面間の接触状況の直接計測を行った結果、まず液滴が加熱面に直接接触し、その後接触部中心に気泡が現れ、その気泡が接触部サイズと同等のサイズまで成長することで崩壊し、(側方観察における)液滴の水平方向の大変形と壁面からの脱離につながっていることを確認し(図4)、これによって提案した物理モデル(図2)の妥当性を確認することに成功した。ただし、1つ目の気泡が大きく成長した後に、多くの場合はドーナツ形接触部の外縁付近で2個目以降の気泡が発生/成長し、1個目の気泡と連結することで気泡崩壊に至っていた。これは現モデルでは考慮していない効果であるため、今後更なるモデル改良が必要であることを明らかにした。

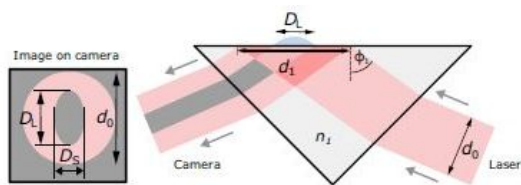


図3 全反射法による液滴-壁面の接触部評価 (Shirota M. *et al.*, *Eur. Phys. J. E*, 2017)

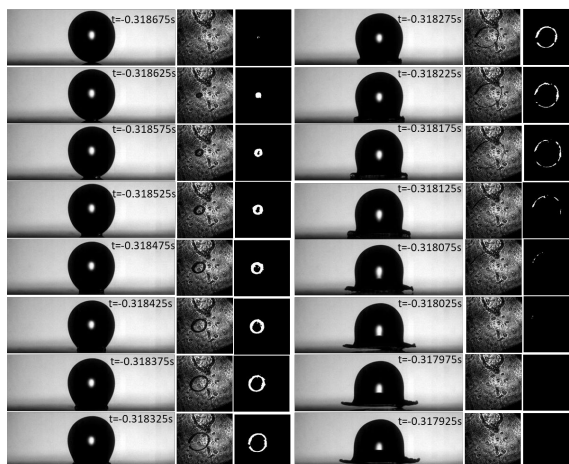


図4 液滴-壁面間接触状況(左:側方、中央:全反射法生画像、右:画像処理結果)

### (3) 液滴衝突現象における液滴サイズの影響

実験結果を先行研究により提案された Splash 発生予測モデルと比較した結果を以下に示す。Riboux & Gordillo(2017)モデル(*Phys. Rev. E*, 2017)

ミリ液滴および直径  $3 \sim 5 \times 10^{-4}$  m の範囲では実験結果とモデルは良い一致を示しているのに対し、直径  $3 \times 10^{-4}$  m 未満では We 数の増加にかかわらず Deposition のみが発生し、モデルの予測(臨界 We 数  $\sim 100 - 200$ )に反する結果となった。本モデルでは液滴衝突時に生じるラメラが物体表面から離れて浮遊することが Splash 発生条件であるとしている。そこで、本モデルで予測されるラメラ射出速度と実験における二次液滴射出速度を比較し、全体的にモデル予測値の方が大きく、液滴径が小さくなるほど乖離が大きくなることを確認した。これにより、マイクロ液滴の Splash 発生条件を予測にはモデル改良が必要であることを示した。

Xu *et al.*(2005)モデル(*Phys. Rev. Lett*, 2005)

液滴が物体表面に急接近すると、液滴と物体間の空気薄膜が圧縮され圧力波が生じる。Xuらのモデルでは、(1) 圧力波に起因する空気薄膜内の圧力上昇  $P_g$ 、(2) 液滴のラプラス圧  $P_\sigma$  の比がある一定値を上回ったときに Splash が発生すると予測している。閾値は実験によって決定づけられる定数であり、Xuらは減圧環境下の実験において  $= 0.5$ 、Staatら(*J. Fluid Mech.*, 2015)は加熱面上の実験において  $= 0.8$  を提案している。本研究の実験結果では、ミリ液滴の場合には  $P_g/P_\sigma \sim 0.8$  を境界として Splash の発生が起こっており、本モデルの予測と整合している。一方、サブミリ液滴( $D = 150 - 650 \mu\text{m}$ )ではミリ液滴とは異なる閾値( $P_g/P_\sigma \sim 0.4 - 0.5$ )で Splash が発生し、さらにマイクロ液滴( $D = 50 - 100 \mu\text{m}$ )では Splash 発生がほぼ確認されていない。このことから、本モデルにおいても液滴サイズが小さくなった場合の Splash 発生条件を予測できず、周囲気体効果に関する理論モデリングを修正する必要がある可能性を示した。

### (4) 液滴衝突実験に適した高速応答熱電対アレイの試作

本研究では、2次元アレイ化した際に配線レイアウトが容易な共同電極方式(Liu&Takase *Necl. Eng. Design*, 2012)と、設計自由度が大きく将来的な微細化がしやすいリソグラフィ技術を用いた手法(丹下ら, *機論 B 編*, 2009)の2つの方法で試作を行った。両者共に熱電対としての機能していることは確認できたものの、共同電極方式の場合は  $200 - 400\text{nm}$  程度の突起が残る傾向があった(図5a)。これは、測温接点の成膜前の精密研磨工程において、絶縁層を含む3種の材料が共存していることによって均一な研磨ができないことが原因と考えられる。一方、リソグラフィ方式では表面凹凸レベルは成膜目標厚さにほぼ一致しており(図5b)、厚さが2倍になる接合部に  $100\text{nm}$  以下に抑えることが十分可能であることを確認できた。ただし、薄膜熱電対の場合、膜厚が極端に薄くなるとゼーベック係数が変化するという研究報告(Liu *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.*,

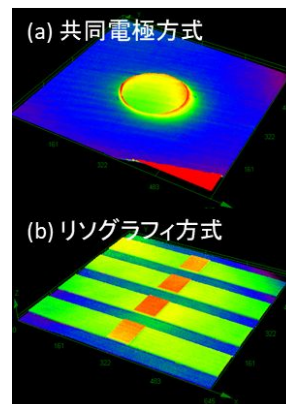


図5 熱電対試作品の表面凹凸分布

2011)もあるため、今後、様々な膜厚に対して校正データを取得する必要がある。

リソグラフィ方式の場合、測温部周辺の微細化や多点化は比較的容易である一方で、正極・負極の2本の配線パターンをウェハ外縁まで引き出して手作業で配線を接合する必要があり、それが実現可能な総ch数(4インチ基板の場合は100ch程度)の制約となっている。今後、配線接合手法を改善すれば、更なるch数増加が期待できる。また、読み出し回路においては中別府ら(機論B編, 2006)の手法を採用し、計装アンプを用いた低ノイズ信号増幅回路を製作して比較的安価な高速電圧ロガーで読み取ることで、今回使用したロガーの最大サンプリング速度(20kHz)でもノイズ振幅を±1 未満に抑えることに成功した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

R. Hatakenaka, J. Breitenbach, I. V. Roisman, C. Tropea and Y. Tagawa, Magic carpet breakup of a drop impacting onto a heated surface, *Proceedings of 14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems(ICLASS)*, 257, 2018, 査読有

他 4 件

[学会発表](計 10 件)

R. Hatakenaka, J. Breitenbach, I. V. Roisman, C. Tropea, Y. Tagawa, Magic carpet breakup of a drop impacting onto a heated surface, *12th European Fluid Mechanics Conference*, Vienna (Austria), 2018

藤田 裕太、田川 義之、高速マイクロ液滴を用いた Splash 発生条件の実験的解明、日本機械学会 2018 年次大会、大阪(日本), 2018

Y. Fujita, T. Tran, Y. Tagawa, Y., Xie, C. Sun, D. Lohse, High-speed micro-droplet impact on a super-heated surface, *70th Annual Meeting of The American Physical Society Division of Fluid Dynamics*, Denver (USA), 2017

R. Hatakenaka, Y. Tagawa, Droplet impact on a Heated Surface under a Depressurized Environment, *69th Annual Meeting of The American Physical Society Division of Fluid Dynamics*, Portland (USA), 2016.

他 6 件

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

田川 義之 (TAGAWA Yoshiyuki)

東京農工大学・大学院 工学研究院 准教授

研究者番号：70700011

(2)研究協力者

藤田 裕太(Fujita Yuta)

Tuan Tran

Jan Breitenbach

Iliia V. Roisman

Cameron Tropea

Kirsten Harth

Detlef Lohse

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。