

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560212

研究課題名（和文）高温固体面と液滴の突然接触による過渡的沸騰現象

研究課題名（英文）Hydrodynamics and boiling phenomena of droplets impinging on hot solid

研究代表者

藤本 仁 (FUJIMOTO HITOSHI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：40229050

研究成果の概要（和文）：液滴が加熱固体に衝突した際の変形挙動と固液界面の沸騰現象を高時空間分解能で観察する手法を確立した。その手法を用いて滑らかな金属面と水液滴の衝突を観察したところ、熱伝導理論で推定される接触面温度と液体として存在できる過熱限界温度の大小関係で、過渡的沸騰現象が整理できることが示された。また、単一液滴衝突において、固液界面で安定的に蒸気膜が形成される高温条件では、液滴の慣性力と表面張力の比で定義される無次元数が変形挙動を支配することも確認できた。

研究成果の概要（英文）：Deformation behavior and boiling phenomena of droplets impinging on hot solid was observed by means of a two-directional flash-photography technique using two digital still cameras and three flash units developed by the present researchers. The boiling phenomena can be roughly explained in terms of the interfacial temperature given by one-dimensional heat conduction theory and the limit of superheat of liquid. At interfacial temperatures higher than the limit of superheat, a vapor film is formed immediately after the collision. The dynamical similarity of the liquid motion is roughly obtained by the Weber number (the ratio of the inertia force to the surface tension force) alone.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：対流，液滴，沸騰，可視化

### 1. 研究開始当初の背景

金属材料の製造プロセスでは水スプレーによる高温金属面の冷却が広く利用されている。例えば、鉄鋼業では連続鋳造プロセス

の2次冷却帯で凝固直後の鋳片を噴霧冷却法によって緩冷却している。この冷却は鋳片内部の微細組織の制御という役割を担っており、冷却速度が不適切であったり、不均一性

があったりすると金属組織構造も一様でなくなり、鋳片品質が低下する。そのため、冷却は重要な要素技術と位置づけられ、より高精度かつ効率的な冷却技術の確立が求められている。

実操作における冷却条件は、冷却装置固有の実測データに基づいて経験的に決定されている。したがって、装置の新設や改良にはデータベース再構築のための膨大な資金の投入と準備期間が必要である。このプロセスの短縮のため、汎用性のある噴霧冷却特性の評価・予測法が望まれている。

噴霧冷却特性はこれまで多数の研究者によって研究されており、熱伝達係数予測式も数多く提案されている。それらをおおまかに分類すると、冷却現場における実用性を重視した簡易経験式、様々な冷却因子を含む比較的複雑な冷却特性の整理式、噴霧冷却の流れ場と温度場を理想化した理論モデルと実験係数からなる構成式などである。汎用性のある噴霧冷却特性の評価には理論の裏づけが不可欠であるが、噴霧冷却は液相(多数の微小液滴)と気相(空気、蒸気)が存在する非常に複雑な混相流で、その物理現象を簡略な理論で記述することは容易ではない。汎用性のある噴霧冷却特性の予測を行うには、まず噴霧冷却で見られる基礎的な物理現象をできる限り詳細に把握することが肝要である。すなわち液滴と高温固体の衝突における変形と沸騰現象をできる限り詳細に把握することが重要と考えるが、それについての知見は不十分であった。

## 2. 研究の目的

微少流量の噴霧冷却では個々の液滴が固体面に離散的に衝突しているとみなせるので、単一液滴の熱と流れの物理の解明が最初になされねばならない。過去の研究事例を調査したところ、単一液滴衝突の研究事例は多数あるものの衝突条件が噴霧冷却と大きく異なっていることが分かった。噴霧冷却の液滴直径は数百マイクロメートルであるが、既存の研究は直径 2~3 mm の衝突実験がほとんどである。小液滴の先行研究が少ない理由は、衝突に伴う変形がごく短時間で起こるため、高時空間分解能の観察手法が確立できていないことが考えられる。

さらに、実際の噴霧冷却では、固体面近傍で液滴同士の相互干渉がかなりの頻度で発生しており、それが冷却特性に及ぼす影響は無視できないが、それに関する先行研究は希少であり、知見がない。

以上のことから、本研究の目的は、液滴とその沸騰点よりはるかに高温の固体面とが突然接触(衝突)する際に起こる過渡的かつ局所的な沸騰現象と変形挙動を観察する手法

を確立し、それらを基礎実験によって明らかにすることである。また、衝突前液滴直径、衝突速度、衝突角度、固体面温度、液滴間相互作用などの諸因子の影響を明らかにすることも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 観察実験手法の確立

直径数百マイクロメートルの液滴が衝突速度数メートル毎秒で衝突する際の液滴形状と固液界面の沸騰現象を高い時間・空間解像度で観察する手法を確立するために、フラッシュ撮影法を適用した。これはマクロレンズを装着したデジタルカメラと発光時間が非常に短いフラッシュライトを用いて液滴の瞬間静止画像を多数撮影する方法である。液滴変形挙動の再現性を仮定し、同一衝突条件でフラッシュの発光タイミングを少しずつずらして多数の衝突写真撮影し、それらを時系列に並べることで変形挙動を追跡する。

本研究では2つの光学系を用意し、一つの光学系で変形途中の液滴形状をバックライト法と2重露光法を併用して撮影した。液滴が固体面に衝突する前にフラッシュを1度発光させて液滴直径を確認し、衝突後にもうひとつのフラッシュを発光させて変形中の液滴画像を得る。また、フロントライトで液滴を撮影する別の光学系で液滴の3次元形状と液滴内部の沸騰を観察した。2つのカメラの撮影タイミングを同期させることで、液滴形状を多方面から観察することが可能となる。

### (2) 観察実験

(1)で説明した実験手法を用いて、突前液滴直径、衝突速度、衝突角度、固体面温度、液滴間相互作用などの諸因子の影響を明らかにした。1度の実験で、数百枚~数千枚の写真撮影し、それらすべての液滴形状や衝突後経過時間を計測するため、データ処理に多大な時間が必要である。研究期間を4年とした理由は、これを考慮したためである。

## 4. 研究成果

本研究で得られた結果は、大別すると下記の3点である。

### (1)

衝突液滴を多方面から同時観察する手法を上述のように確立した。この手法を用いて、まず直径 0.6mm の水液滴と滑らかな加熱インコネル板との衝突現象を研究した。表面温度(170℃~500℃)および慣性力と表面張力の比で定義されるウェーバ数の影響を調査した。

液滴が加熱固体面に衝突すると、まず固液直接接触が起こり、それによる固体面近傍の液体の急加熱と液体から気体への相変化が発生する。また、初期接触時に空気の巻き込みが起こる。そのため固液界面近傍には、蒸気膜/気泡が観察される。一方、固液界面以外の領域の液体温度は低いいため、その部分では蒸気の凝縮が起こり得る。その結果、蒸気気泡/蒸気膜の固体面からの離脱はほとんど発生しない。

固体面温度が低温域では固液界面に孤立気泡が、高温域では蒸気膜が形成される。そのような沸騰現象は理想化した1次元非定常熱伝導理論から予測される固液界面温度と、液体の状態が存在できる過熱限界温度の大小関係で大まかに分類可能であることが明らかになった。

つぎに、直径が2.3mmの水液滴を使用して同様の実験を行った。直径0.6mmおよび2.3mmの変形挙動を詳細に比較した結果、衝突直後に固液界面で蒸気膜が形成される高温域ではウェーバ数が等しければ、変形挙動に力学的な相似性があることが定量的に示された。しかし、低温域では、沸騰気泡、濡れ性および粘性摩擦の効果が無視できないためウェーバ数だけで変形挙動を整理できないことが分かった。この研究成果は International Journal of Multiphase Flow 誌に掲載された。

## (2)

斜め衝突における固液界面の沸騰現象が変形挙動に及ぼす影響について検討した。直径が約0.6mmの水液滴を滑らかなインコネル合金面に斜め衝突させたところ、垂直衝突と同様、一次元熱伝導理論で推定される接触時の固液界面温度が水の加熱限界温度よりもかなり低い場合は沸騰気泡が、高い場合は蒸気膜が形成された。

斜め衝突では沸騰気泡が存在する低温域領域で、液滴の変形は3次元性を示した。沸騰気泡は固液接触直後から発生・成長する一方、液滴は球形から、薄い紡錘形状に変形する。液膜の薄い部分では、蒸気気泡の破裂が発生し、液滴の破壊が促進された。

蒸気膜が形成される高温度域では、斜め衝突にもかかわらず、液滴の形状は比較的軸対称性を維持した。また、変形中の液滴は固体面を滑るように移動し、その移動速度は固体面に平行な方向の衝突速度成分にほぼ一致した。これは蒸気膜の存在により、軸対称性を阻害する液滴と壁面との粘性摩擦が小さくなるためと考えられる。

また、このときの液滴の広がり径や、衝突から離脱までの滞留時間は、固体面に垂直な速度成分で慣性力を評価した修正ウェーバ数で整理可能であることも分かった。この結果は Transactions of the ASME Journal of

Fluids Engineering 誌に掲載された。

## (3)

2液滴連続衝突時の変形挙動と沸騰現象を研究し、単一液滴実験では評価できない液滴間相互作用を研究した。実施した実験条件は次のとおりである。供試液体は常温の水であり、液滴直径は約0.6mm、液滴速度は1.5~2.5m/s、2液滴の間隔は直径の数倍以下である。衝突板は表面が滑らかなインコネル合金及びサファイアガラスで、その表面温度を170、200、300、400、500°Cと変化させた。また、液滴と固体面の衝突角度は90°(垂直衝突)から45°まで変化させた。

固体面に衝突・変形した先行液滴に後続液滴が衝突すると、2液滴が合体し、その内部に干渉流が発生する。ウェーバ数が30程度の垂直衝突では固液界面で非常に弱い沸騰しか発生しない場合(固体面温度=170°C)と固液界面に蒸気膜が安定して形成される500°Cの場合に、合体液滴は軸対称に近い変形挙動を示した。しかし、それ以外の温度条件では沸騰気泡の破裂により液滴形状は3次元性を示した。

また、固体面温度が170、200°Cの場合、先行液滴衝突時に固液界面で蒸気気泡が離散的に発生するが、後続液滴が衝突すると蒸気気泡の数密度やサイズが明らかに減少した。これは固液界面およびその近傍の温度低下による蒸気気泡の凝縮が理由であると考えられる。さらに液滴間距離が重要な支配因子となることも分かった。液滴間距離が小さい場合は、合体液滴の広がり径が大きくなり、液滴の分裂が起こりやすい。これら垂直衝突の結果については、International Journal of Transport Phenomena 誌に掲載が決定している。

傾斜衝突では液滴変形挙動は固体面温度によらず必ず3次元になる。これは、後続液滴が先行液滴に衝突する際、先行液滴が斜面下方に移動しており、オフセット衝突になるためである。オフセット量は衝突速度、衝突角度、液滴間距離に依存するが、ここでは液滴間距離の影響を調査した。

固液界面に安定した蒸気膜が形成される高温域では、合体液滴と固体面との見かけの最大接触長さは液滴間距離によって変化するものの、液滴の衝突から反発までの滞留時間にはあまり影響を及ぼさないことが分かった。

また、このときの流動現象は3次元数値解析によっても解明した。計算コードは研究代表者が開発したものであり、流体の粘性、重力、表面張力、自由表面等を考慮している。数値解析結果は実験結果と良好に一致し、合体液滴は表面張力の影響で複雑な拡大・収縮

挙動を示すことが明らかになっている。この結果については、投稿論文を執筆している段階である。

以上述べたように、加熱固体面に衝突する液滴の基礎的な変形と沸騰現象についての知見が得られたため、研究の所期の目的は達成されたと考えている。とくに複数液滴衝突については先行研究が希少であるため、本研究で得られたデータの学術的な価値は非常に高いと自負している。その一方で、さらなるデータ蓄積の必要性も感じており、今後も研究を継続したい。

ところで、本研究で採用した観察手法では液滴衝突に伴う固体から液滴への熱移動が評価できない。噴霧冷却の冷却特性予測には、非常に短時間で起こる局所的な温度変化を精度よく計測する手法の確立が必須であり、将来解決すべき課題として残されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. “An Experimental Study of the Deformation behavior of Water Droplets Impinging Obliquely on a Hot Substrate,” *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 17-2(2010), pp. 1-16, Hitoshi Fujimoto, Yosuke Oku, Tomohiro Ogihara, Takayuki Hama, and Hirohiko Takuda, DOI: 10.1615/JFlowVisImageProc.v17.i2.20 (査読有)
2. “Hydrodynamics and boiling phenomena of water droplets impinging on hot solid,” *International Journal of Multiphase Flow*, 36-8(2010), pp. 620-642, Hitoshi Fujimoto, Yosuke Oku, Tomohiro Ogihara, Hirohiko Takuda, DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.04.004. (査読有)
3. “An Experimental Study on the Oblique Collisions of Water Droplets with a Smooth Hot Solid,” *Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering*, 134-7(2012), paper #071301, Hitoshi Fujimoto, Ryota Doi, and Hirohiko Takuda. DOI: 10.1115/1.4006926 (査読有)
4. “Successive Collision of Two Water

Droplets with Hot Solid,” *International Journal of Transport Phenomena* 2013, H. Fujimoto, T. Ogihara, S. Yoshimoto, T. Hama and H. Takuda, in press. (査読有)

[学会発表] (計4件)

1. H. Fujimoto, “Successive Collision of Two Water Droplets with Hot Solid,” 23rd International Symposium on Transport Phenomena, Auckland, New Zealand 19-22 November 2012.
2. 藤本仁, 高温固体面に連続衝突する2液滴の変形挙動, 日本鉄鋼協会講演大会, 2012年9月20日, 大阪大学吹田キャンパス.
3. H. Fujimoto, Experimental Study on Oblique Collisions of Water Droplets with Hot Solid, ASME IMECE2010, 2010年11月14日, Vancouver Canada.
4. 藤本仁, 高温固体面に衝突する液滴変形挙動の力学的相似性, 日本鉄鋼協会, 2010年3月29日, 筑波大学.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

藤本 仁 (FUJIMOTO HITOSHI)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・  
准教授  
研究者番号：40229050

##### (2) 研究分担者

宅田 裕彦 (TAKUDA HIROHIKO)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・  
教授  
研究者番号：20135528