

高温液体金属表面に衝突する液滴の沸騰挙動に関する研究

47106716 安井 哲
指導教員 岡本 孝司 教授

Boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface was experimentally investigated. Droplets showed boiling behavior accompanied by the delay time when using liquid metal as the collision surface. And high speed splash from the bottom of droplets was observed at high superheat. We defined this delay time by rapid change of contact angles and measured the delay time by changing superheat, collision velocity of droplets, and ambient pressure. As the results of measurements, we found that the delay time affected by these parameters and made a qualitative model to explain the mechanism of the characteristic boiling phenomena by these results.

Key words: Droplet, Boiling, Leidenfrost point

1 緒言

噴霧冷却は、高温物体に液体を噴霧することで冷却を行う冷却方法であり、供給流量に対して高い冷却性能を有することや、均一な冷却が可能であることから、鉄鋼製造工程における冷却装置や、原子力発電所における緊急炉心冷却装置など、工学上の幅広い分野の冷却用途に使用され、そのさらなる性能向上が求められている^[1]。この実現には、素過程である高温金属表面に衝突する液滴の沸騰現象に関する詳細な知見が不可欠であるが、その沸騰現象は非常に複雑なものであり、様々なパラメータが影響を及ぼすことが知られている。その中でも、金属の表面性状、特に表面粗さは液滴と金属表面との接触状況を決定づける重要な因子であるが^[2-5]、その制御は非常に困難である。

本研究では、完全に滑らかな表面形状を有する衝突面として液体金属を使用し、表面粗さの影響を排除することで、液滴と金属表面との相互作用を明らかにすることを目的として、高温液体金属表面に衝突する液滴の沸騰挙動を高速カメラによる撮影を中心として調査した。実験の結果、液体金属を衝突面として使用した場合、液滴は遅れ時間を伴う沸騰現象を呈すること、およびこの遅れ時間は過熱度、衝突速度、雰囲気圧力により変化することが明らかとなった。また、これらの結果をもとに、この遅れ時間が発生する原理を定性的なモデルにより説明し、表面粗さが液滴と表面との相互作用に与える影響を明らかにすることを試みた。

2 実験装置

図 1 に実験装置の概要を示す。ポンプを用いてシリンジからチューブに液体を送り出し、その先端で液滴を生成・落下させる。そして、この液滴が下方に設置された液体金属の表面に衝突する際の様子を、前方に設置した高速カメラにより撮影する。液体金属はホットプレートにより加熱し、実験を行った過熱度範囲は 0K から 220K である。液体金属には Bi、Cd などの合金である低融点金属 U アロイ 70 (沸点：70°C，比重：9.98) を使用し、液体金属の過熱度は、表面から約 2mm 下方に設置した熱電対により測定する。液滴には市販の精製水を使用した。液滴の衝突速度、直径はそれぞれ撮影画像より計測し、衝突速度範囲は 0.26m/s から 0.73m/s、直径は 2.5mm である。液滴温度はチューブ先端に設置した外径 0.5mm の熱電対により測定した。その温度は液体金属の過熱度により変化し、19°C から 27°C までの間であった。光源にはハロゲンランプを使用し、カメラ設置位置と同方向より照射を行う。

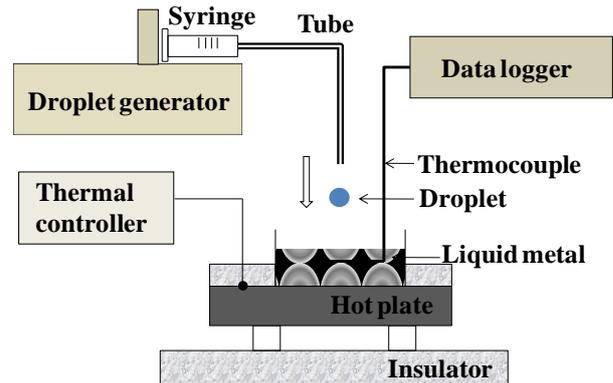


Fig.1 Schematic of the experimental setup of experiment in atmospheric pressure condition

3 大気圧下沸騰挙動評価実験

3.1 沸騰挙動観察

図 2 に沸騰挙動撮影結果の一例を示す。このとき、衝突速度は 0.37 m/s、過熱度は 207K、撮影速度は 10000fps である。また、液滴が液体金属表面に衝突した時刻を 0 ms と定義し、0.5 ms ごとの撮影結果を示す。

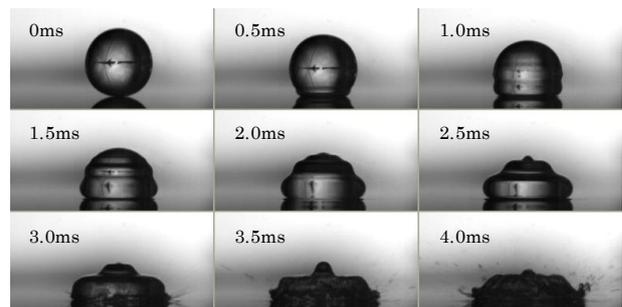


Fig.2 Time sequential images of boiling behavior of the droplet impinging on the heated liquid metal surface in atmospheric pressure condition. The superheat was 207K. The collision velocity of the droplet was 0.37m/s.

この結果をみると、2.5ms までは、液滴は静的に液体金属表面上に広がり、その下部形状は球形となっている。しかし、3.0ms において、液滴下部の形状が大きく変化し、液滴下部から突如として液体が高速で噴出している。さらに、3.5ms からは、液滴の形状は不安定となり、下部から

微細液滴を飛散しながら変形する。液滴が高温液体金属表面に衝突する場合には、このような、ある時刻を境として液滴の下部形状が大きく変化する現象、及び下部から液体が高速で噴出する現象が発生する。なお、この現象は高温固体金属表面に衝突する場合にはほとんど観察されない。

3.2 変形挙動測定

前節で示した特徴的な沸騰挙動を定量的に把握するため、画像処理による接触角変化の測定を行った。接触角は、物体表面上における液滴形状により測定される角度で、その値は、物体の表面張力、液滴の表面張力、及び物体と液滴との界面張力の釣り合いにより決まる。そのため、接触角の測定から液滴と物体表面との接触状況を定量的に把握することが可能である。なお、本研究ではUアロイ 70 と水の密度差が十分に大きいことから、液体金属表面を水平面と仮定し、運動している液滴の接触角を測定する。測定は、撮影画像から液滴形状を検出し、その左右端の形状より近似的に算出することにより行う。

図 3 に過熱度が 102K、衝突速度が 0.53m/s、0.43m/s、0.39m/s における接触角測定結果を示す。この結果をみると、接触角はある時刻において急激に減少し、その時刻は衝突速度により異なっている。衝突速度が 0.53m/s の場合、接触角は 1.1ms から 1.2ms の間において、 177° から 20° に減少し、衝突速度が 0.43m/s の場合、接触角は 1.6ms から 1.8ms にかけて、 162° から 18° へ減少している。また、衝突速度が 0.39m/s の場合、接触角は 2.8ms から 2.9ms の間において、 168° から 12° へと減少している。接触角の定義より、このある時刻における接触角の急激な減少は、液体金属表面と液滴下部とが直接接触を開始することにより生じるものであり、この時刻以前においては、液滴と液体金属とは直接接触していないと考えられる。以下では、この接触角が急激な減少を示す時刻を「遅れ時間」と定義し、その特性を調査した結果について示す。

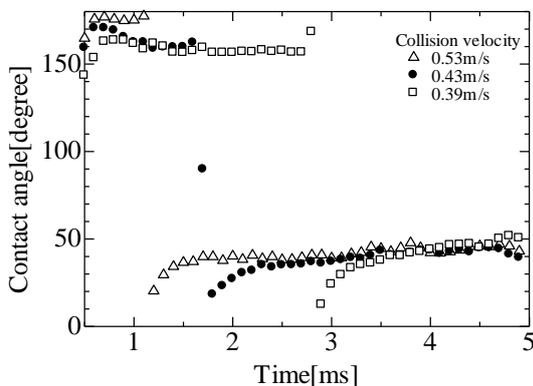


Fig.3 The change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The superheat was 102K. The each collision velocities were 0.53m/s, 0.43m/s, and 0.39m/s.

3.3 遅れ時間測定

前述した遅れ時間の定義を使用し、過熱度、衝突速度が遅れ時間に与える影響を調査した。

図 4 に過熱度が 0K から 220K における遅れ時間の測定結果を示す。測定は衝突速度が 0.37m/s (図中□)、0.41m/s (図中●)、0.51m/s (図中△) の場合について行い、図中の値は各条件における複数測定値の平均値である。遅れ時間はすべての衝突速度の場合において、過熱度が 60K から 80K の間で急激な増加傾向を示す。また、過熱度が 60K 以下において、遅れ時間は過熱度の上昇に対してほぼ一定値となり、過熱度が 80K 以上においては衝突速度により変化特性が異なる。衝突速度が 0.37m/s の場合(図中□)、遅れ時間は、過熱度が 80K から 117K においてはほぼ一定値となり、過熱度が 117K から 128K においては増加傾向を示す。そして、過熱度が 138K 以上においては、液滴と液体金属との接触が発生しなくなる。この過熱度を接触限界温度 T_{cl} と定義し、図中に破線で示す。衝突速度が 0.41m/s の場合(図中●)、遅れ時間は、過熱度が 80K から 180K において緩やかな減少傾向を示し、180K から 206K においては急激な増加傾向を示す。衝突速度が 0.51m/s の場合(図中△)、遅れ時間は、過熱度が 80K から 180K において緩やかな減少傾向を示し、180K から 206K において増加傾向を示す。なお、衝突速度が 0.41m/s、0.51m/s の場合、接触限界温度は 220K 以上であり、測定されなかった。

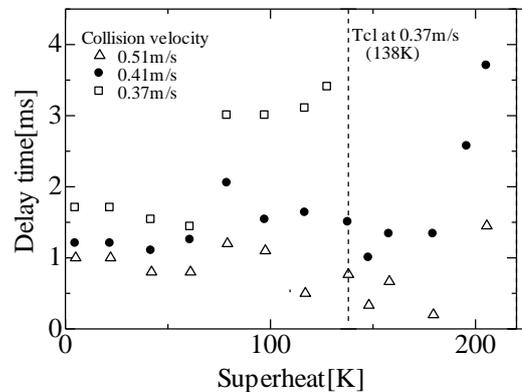


Fig.4 The delay time at different superheat. T_{cl} shows contact limit superheat.

図 5 には衝突速度が 0.26m/s から 0.63m/s における遅れ時間の測定結果を示す。測定は過熱度が 200K(図中△)、98K(図中●)、4K(図中□) の場合について行い、図中の値は各条件における複数測定値の平均値である。遅れ時間はすべての過熱度の場合において、衝突速度の増加にともない減少傾向を示しているが、その減少傾向は過熱度により異なる。過熱度が 4K の場合(図中□)、遅れ時間は衝突速度の増加に比例して減少するため、その変化は衝突速度の一次関数として表すことができる。過熱度が 98K の場合(図中●)、遅れ時間の減少傾向は、衝突速度の累乗関数に

より表される。しかし、衝突速度が約 0.53m/s 以上においては、衝突速度の一次関数によっても十分に表すことができるため、一概にその特性を判断することができない。また、衝突速度が 0.34m/s 以下においては、液滴と液体金属の接触が発生しない。このような接触が発生しうる最小の速度を接触限界速度 v_{cl} と定義し、図中に破線で示す。過熱度が 200K の場合(図中△)、遅れ時間の減少傾向は、過熱度が 98K の場合と同様に衝突速度の累乗関数として表すことができるが、その指数は過熱度が 98K の場合と比較して小さくなっている。つまり、衝突速度に対して遅れ時間の変化が大きくなっている。また、衝突速度が 0.41m/s 以下においては接触が発生しない。

以上のように、遅れ時間は過熱度、衝突速度により変化し、その変化特性は、各パラメータと単純な比例関係にはないことがわかる。

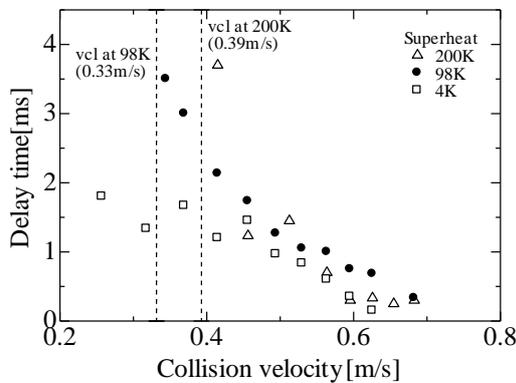


Fig.5 The delay time at different collision velocity of droplets. The v_{cl} shows contact limit velocity.

4 減圧下沸騰挙動評価実験

Dell'Aversana^[6]らによれば、異なる温度に保たれた液滴同士を接近させた際、十分な温度差があると液滴同士が接触しない現象が観察される。Dell'Aversanaらは、この現象が発生するメカニズムを、マランゴニ対流により液滴表面間に形成される空気の流れによって説明している。本研究においては、液面と液滴の液体が異なるものの、現象としては異なる温度に保持された液面と液滴との接近であり、上述の空気の流れによる非接触現象が発生し、遅れ時間が生じると考えることができる。この空気の流れの影響を実験的に検証するため、減圧下における実験を行った。減圧下では、周囲の空気密度が低く、空気の流れが接触を妨げる働きは弱くなり、遅れ時間の測定結果からその影響を評価することが可能である。

減圧下実験では、大気圧下実験で使用した測定装置を、密閉性アクリル容器内に設置し、減圧ポンプを用いて容器内の圧力を調整して、これまでと同様に実験を行った。容器内の圧力はデジタル圧力計により測定し、実験を行う圧力は液滴を安定して形成することのできる最低圧力である $50 \pm 3 \text{ kPa}$ とした。このとき、液滴(精製水)の沸点は

81.3°Cとなる。また、液滴の衝突速度は 0.43m/s で一定として実験を行った。

4.1 減圧下沸騰挙動観察

図 6 に、過熱度が 142K における撮影結果を示す。この結果から、減圧下においても遅れ時間が発生していることがわかる。また減圧下においては、液滴が液体金属と接触した後、液滴の底部全体が上方に向かい跳ね上がるような現象が発生しており、大気圧下で過熱度が高い場合に発生した液滴底部からの液体の噴出現象は観察されない。これは減圧下においては、液滴の初期温度が高く、液体金属との接触時に液滴底部の大部分で急激な相変化が生じるためである。このように、減圧下においては、接触後に液滴の呈する沸騰現象に違いはあるものの、遅れ時間が発生していることがわかる。

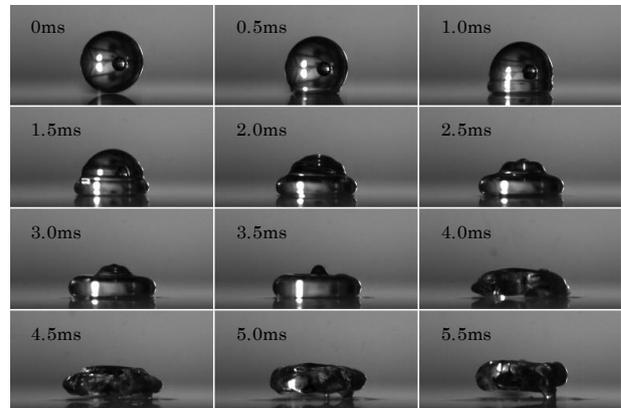


Fig.6 Time sequential images of boiling behavior of the droplet impinging on the heated liquid metal surface in reduced pressure condition. The superheat was 142K. The collision velocity of the drop was 0.43m/s. The ambient pressure in the vessel was 50.7kPa.

4.2 減圧下遅れ時間測定

減圧下において、過熱度が 5K から 142K における遅れ時間の測定結果を図 7 に示す。なお、過熱度が 142K 以上においては安定して液滴を形成することが出来ず、測定を行っていない。また、比較のため大気圧における測定結果を(衝突速度: 0.41m/s)図中に白丸○で記載した。減圧下における遅れ時間の変化特性は、大気圧における場合と同様であり、過熱度の上昇に伴い急激に増加する領域(過熱度: 24K から 80K)と、減少傾向を示す領域(過熱度: 80K から 142K)が存在する。しかし、過熱度が 24K においては、遅れ時間が発生せず、過熱度が 80K 以上においては大気圧における遅れ時間の約 2 倍の値となる。この結果より、遅れ時間の発生する主要因がマランゴニ対流の効果により界面間に発生する空気の流れではないことがわかる。

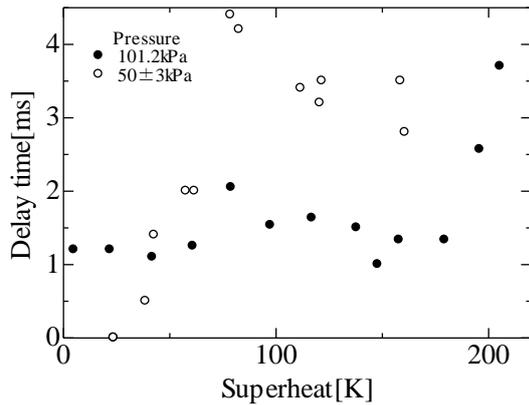


Fig.7 The delay time at different superheat in reduced pressure condition. The collision velocity of droplets was 0.43m/s at reduced pressure experiment, and 0.41m/s at atmospheric pressure condition.

5 考察

以上に示した実験結果より、遅れ時間を発生させる要因は、液滴と液体金属との界面間に存在する空気、および、液滴の蒸発により生成される蒸気であり、過熱度により支配的となる要因が異なると考えられる。また、過熱度が高温の場合、表面粗さが存在しないことにより液滴底部が過熱された状態となり、自発核生成が生じている可能性がある。以下では、遅れ時間を発生させる要因の異なる過熱度領域ごとに分けて考察を行う。

・過熱度: 0K~60K

過熱度が 0K から約 60K においては、図 4 に示したように、遅れ時間は過熱度に対して一定値となる。また、図 5 に示したように、過熱度が 4K の場合、遅れ時間の変化は衝突速度の一次関数として表すことができる。さらに、図 7 に示したように、減圧下(50±3kPa)で、過熱度が 24K の場合、遅れ時間は発生しない。これらの結果より、この過熱度領域において、遅れ時間は、液滴と液体金属との界面間に存在する空気が、衝突の慣性力により外部に排出されるまでに要する時間であるといえる。

・過熱度: 60K~80K

過熱度が約 60K から 80K においては、図 4 に示したように、遅れ時間は過熱度の増加に対して急激な増加傾向を示している。また、図 5 に示したように、過熱度が 98K の場合、遅れ時間の変化特性は、衝突速度の累乗関数として表すことができる。さらに、図 7 に示したように、減圧下で、過熱度が 60K から 80K の間において、遅れ時間は急激な増加傾向を示し、過熱度が 80K においては、大気圧下の値の約 2 倍の値となっている。これらの結果より、この過熱度においては、液滴底部において蒸発が発生しており、それにより生成される蒸気が遅れ時間を発生させる主要因であるといえる。

・過熱度: 80K~接触限界温度 T_d 付近

過熱度が 80K 以上においては、図 4 に示したように、

遅れ時間は過熱度の増加に対して緩やかな減少傾向を示す。また、この傾向は図 7 に示した減圧下の遅れ時間でも同様である。このため、この過熱度領域においては液滴と液体金属とが接触する前に、自発核生成による沸騰が生じていると考えられる。液体金属に衝突する場合、液滴と液体金属表面とは非常に薄い(表面粗さと同程度)蒸気層によっても接触が妨げられる。このため、液滴と液体金属表面との距離が、通常のライデンフロスト現象(膜沸騰)における液滴と物体表面との距離と比較して、非常に近くなっている。このとき液体金属表面から蒸気層にかけて形成される温度勾配は非常に大きく、液滴と液体金属表面との距離がわずかに異なるだけでも、液滴底部の温度は大きく変化する。このため、この過熱度領域においては、液滴底部が過熱された状態となり、自発核生成温度に達している可能性がある。

・過熱度: 接触限界温度 T_d 付近~

過熱度がさらに高くなると、液滴と液体金属との接触、および自発核生成は発生しなくなる。この過熱度は衝突速度により異なり、図 4 に示したように、衝突速度が 0.37m/s の場合には 138K となり、衝突速度が 0.41m/s、0.51m/s の場合には、220K 以上となる。この過熱度領域においては、衝突のさいに液滴と液体金属表面との間に十分な厚さの蒸気層が形成されるため、液滴は過熱されず、自発核生成は発生しない。また、同様の理由により接触も生じない。このため液滴は衝突した後、そのまま液体金属表面より反発する。

6 結論

液滴と高温金属表面との相互作用を明らかにすることを目的として、高温液体金属表面に衝突する液滴の沸騰挙動を調査し、以下に示す知見を得た。

- ①液滴は高温液体金属表面に衝突する場合、遅れ時間をとれない接触・沸騰する。
- ②この遅れ時間は接触角の変化により定量的に定義することが可能である。
- ③遅れ時間は、表面温度、衝突速度、雰囲気圧力により変化する。
- ④自発核生成の発生を仮定したモデルにより、この遅れ時間の発生機構が定性的によく説明される。

文献

- 1) 柳謙一：燃料、55 (595)、892 (1976)
- 2) 西尾茂文、平田賢：機論、43 (374)、3856 (1977)。
- 3) 日高澄具、山下秋満、高田保之：同上誌、71 (709)、2309 (2005)
- 4) J.D.Benardin, C.J.Stebbins : Int Journal of Heat and Mass Transfer, 40, (1), 73, (1996)
- 5) S.someya, S.Yoshida, K.Okamoto, Y.R.Li, M.Tange, M.M.Uddin : Journal of visualization, 13 (1), 41, (2010)
- 6) P.Dell'Aversana, J.R.Banavar, and J.Koplik : Physics of Fluids, 8, (1), 15, (1996)