

東京大学大学院新領域創成科学研究科

人間環境学専攻

修士論文

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

2012年2月13日提出

指導教員 岡本 孝司 教授 印

学生証番号 47106716

安井 哲

目次

第1章 序論.....	11
1.1 研究背景	11
1.1.1 噴霧冷却.....	11
1.1.2 液滴の熱伝達特性.....	12
1.2 関連研究	16
1.3 研究目的	21
1.4 本論文の流れ.....	22
第2章 実験方法.....	23
2.1 実験装置	23
2.1.1 概要	23
2.1.2 液滴系	25
2.1.3 衝突面系.....	26
2.1.4 撮影系	27
2.2 予備実験	27
2.2.1 液体金属内部温度および表面温度測定.....	27
2.2.2 液滴衝突後の表面温度推移測定.....	29
2.2.3 液滴温度.....	31
2.3 変形挙動測定.....	33
2.3.1 液滴の形状検出.....	33
2.3.2 測定パラメータの定義と測定方法.....	34
2.3.2.1 接触角.....	34
2.3.2.2 見かけの接触径.....	34
2.3.2.3 広がり直径.....	34
2.3.2.4 高さ.....	34
2.3.2.5 衝突速度.....	36
2.3.2.6 液滴直径.....	36
第3章 大気圧下沸騰挙動評価実験	37
3.1 沸騰挙動観察.....	37
3.1.1 表面温度に対する変化.....	37
3.1.2 衝突速度に対する変化.....	41

第1章 序論

3.2	変形挙動測定.....	44
3.2.1	接触角 θ	44
3.2.2	接触径 d_s	48
3.2.3	高さ h	52
3.3	遅れ時間測定.....	55
3.3.1	表面温度に対する変化.....	55
3.3.2	衝突速度に対する変化.....	57
第4章 減圧下沸騰挙動評価実験		59
4.1	概要	59
4.1.1	液液非接触現象.....	59
4.1.2	実験方法.....	64
4.2	沸騰挙動観察.....	66
4.3	遅れ時間測定.....	68
第5章 考察.....		70
5.1	遅れ時間発生モデル.....	70
5.1.1	過熱度:0K~60K.....	70
5.1.2	過熱度:60K~80K.....	72
5.1.3	過熱度:80K~接触限界温度 T_{cl} 付近.....	74
5.1.4	過熱度:接触限界温度 T_{cl} 付近~	77
5.2	流体物性の影響.....	78
5.2.1	FC-3283	78
5.2.1.1	沸騰挙動観察.....	78
5.2.1.2	遅れ時間測定.....	84
5.2.2	水道水	86
5.2.2.1	表面温度に対する変化.....	86
5.2.2.2	衝突速度に対する変化.....	88
5.2.2.3	精製水との比較.....	89
5.3	高速撮影による沸騰挙動観察.....	94
5.4	液体金属表面の変形による影響評価.....	98
5.5	上昇運動中の接触開始現象.....	103
5.6	遅れ時間と蒸発時間の関係.....	106
第6章 結論.....		109

参考文献.....	112
付録	115
A) 遅れ時間とジェットエクストラクション現象の関係.....	115
謝辞	125

目次

Fig. 1.1 Sessile drop evaporation curve. The curve displays droplet evaporation lifetime versus surface temperature and exhibits the four distinct heat transfer regimes [29].	15
Fig. 1.2 Observation method of surface contact condition by quartz prism [16].	16
Fig. 1.3 Behavior of surface contact during collision process at 450°C [16].	17
Fig. 1.4 Behavior of surface contact during collision process at 730°C [16].	17
Fig. 1.5 Time sequential images of the droplet during jet ejection between 100 and 600 μ s after the impact. These images were obtained almost parallel to the hot surface. They show the detailed behavior of the droplet. The temperature of the hot surface was 240°C. The droplet velocity just prior to impact with the surface was 0.54m/s. Inside the droplet, the vapor cloud was generated due to rapid evaporation at the bottom interface of the droplet [17].	19
Fig. 1.6 Time sequential images of droplet behavior during jet ejection. The temperature of the hot surface was 240°C. The droplet velocity just prior to impact with the surface was 0.54m/s. A portion of the water reached the highest point, which was close to the droplet release point, 6ms after impact with the hot surface. Right: image for surface temperature of 260°C [17].	20
Fig. 2.1 Schematic of the experimental apparatus in atmospheric pressure condition.	24
Fig. 2.2 Temperature distribution in the liquid metal and around its surface. The dotted lines show the measured temperature of liquid metal at H=-10mm.	28
Fig.2.3 Schematic of measurement method of temperature distribution in liquid metal. H shows the distance from the surface of the liquid metal to the top of the thermocouple. The measuring range of H is from -10mm to 10mm.	28
Fig. 2.4 Changes of surface temperature of liquid metal after collision of the droplet when the liquid metal was stirred. The horizontal dotted line shows the value of initial surface temperature of liquid metal.	30
Fig. 2.5 Changes of surface temperature of liquid metal after collision of the droplet. The horizontal dotted line shows the value of initial surface temperature of liquid metal.	30
Fig. 2.6 Droplet temperature just before falling from the tube at different surface temperature.	32
Fig. 2.7 Schematic of measurement method of droplet temperature. The diameter of the thermocouple was 0.5mm and the diameter of tube was 0.36mm. The droplet diameter was around 2.5mm	32
Fig. 2.8 Example images of detected edge of the droplet, (a) original image, (b) detected edge, (c) binarized image	33
Fig. 2.9 Definition of contact angle	35

Fig. 2.10 Equilibrium of force at liquid liquid interface edge.....	35
Fig. 2.11 Definition of contact angle, spreading drop diameter, visible contacting drop diameter, and drop height [20].....	35
Fig. 2.12 Relationship between the falling height and the collision velocity.....	36
Fig. 3.1 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.37m/s. The surface temperature were 106°C(Left), 202°C(Center), 307°C(Right).....	39
Fig. 3.2 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated copperplate surface. The collision velocity of droplets was 0.39m/s. The surface temperature were 108°C(Left), 211°C(Center), 313°C(Right).	40
Fig. 3.3 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface. The surface temperature was 300°C. The collision velocity of droplets was 0.37m/s(Left), 0.41m/s(Center), 0.51m/s(Right).	42
Fig. 3.4 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface. The surface temperature was 313°C. The collision velocity of droplets was 0.39m/s(Left), 0.43m/s(Center), 0.53m/s(Right).	43
Fig. 3.5 Change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.37m/s.	46
Fig. 3.6 Change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.41m/s.....	46
Fig. 3.7 Change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.51m/s.....	47
Fig. 3.8 Change of d_c after the collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity was 0.37m/s. The formula shows the fitted curve of measured result in case of copperplate.....	50
Fig. 3.9 Change of d_c after the collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity was 0.41m/s. The formula shows the fitted curve of measured result in case of copperplate.....	50
Fig. 3.10 Change of d_c after the collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity was 0.41m/s. The formula shows the fitted curve of measured result in case of copperplate.....	51
Fig. 3.11 Change of droplet height after collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.37m/s.....	53
Fig. 3.12 Change of droplet height after collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.41m/s.....	54
Fig. 3.13 Change of droplet height after collision of droplets to liquid metal surface. The	

collision velocity of droplets was 0.51m/s.....	54
Fig. 3.14. Delay time at different surface temperature. T _{cl} shows contact limit temperature. The plot is original data.....	56
Fig. 3.15. Delay time at different surface temperature. T _{cl} shows contact limit temperature. The plot is arithmetic average values.....	56
Fig. 3.16 Delay time at different collision velocity, T _{cl} shows contact limit velocity. The plot is original data	58
Fig. 3.17 Delay time at different collision velocity, T _{cl} shows contact limit velocity. The plot is arithmetic average value.	58
Fig. 4.1 Experimental apparatus showing pendant and sessile drops. [22].....	60
Fig. 4.2 Sketch of the flow two non-coalescing drops held at different temperatures. The gap thickness is exaggerated to display the direction of motion in the entrained air film [22] .	61
Fig. 4.3 Non-coalescence of two 5 cSt silicone oil drops. The rods have a diameter of 3.00mm. Pressing against one another clearly deforms the interfaces. [22]	61
Fig. 4.4 Drop against drop at different temperatures: (a) drop formation and thermalization; (b) first contact; (c) further squeezing; (d) slipping; (e) detachment; and (f) the drops are brought in contact again. After one hour without coalescence ΔT is progressively reduced: (g) coalescence at $\Delta T=2.5^{\circ}\text{C}$ and consequent formation of a liquid bridge; (h) new drops obtained by stretching and breaking the liquid bridge; (i) immediate coalescence with $\Delta T=0$. [22].....	62
Fig. 4.5 (a) Schematic of the temperature gradient inside the droplet when the droplet approaches to the liquid metal surface.	63
Fig. 4.6 Schematic of experimental setup of experiment in reduced pressure condition	65
Fig. 4.7 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface in reduced pressure condition. The collision velocity of droplets was 0.43m/s. The surface temperature was 124°C (Left), 164°C (Center), 240°C (Right). The pressure was 49.7kPa (Left), 52.2kPa (Center), 50.7kPa (Right).	67
Fig. 4.8 Comparison of delay time at atmospheric pressure and reduced pressure. The collision velocity of atmospheric pressure was 0.41m/s and the one in reduced pressure condition was 0.43m/s.....	69
Fig. 4.9 Delay time at different surface temperature in reduced pressure condition. The collision velocity was 0.43m/s. The pressure in the vessel was 50±3kPa. The plot is original measured data.....	69
Fig. 5.1 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 0K to 60K.....	71
Fig. 5.2 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 60K to 80K.....	73
Fig. 5.3 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 80K to around	

contact limit temperature T_{cl} . The droplet initiate boiling without contacting to the liquid metal surface at this superheat region. (a) Before start of spontaneous nucleation (b) After initiation of boiling.	76
Fig. 5.4 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 80K to around contact limit temperature. The droplet does not contact to the liquid metal surface at this superheat region.	77
Fig. 5.5 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 0ms to 6.0ms. The collision velocity of droplets was 0.42m/s. The surface temperature was 106°C(Left), 147°C(Center), 208°C(Right).	80
Fig. 5.6 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 7.5ms to 13.5ms. The collision velocity of droplets was 0.42m/s. The surface temperature was 106°C(Left), 147°C(Center), 208°C(Right).	81
Fig. 5.7 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 0ms to 6.0ms. The surface temperature was 138°C. The collision velocity of droplets was 0.37m/s(Left), 0.42m/s(Center), 0.52m/s(Right).	82
Fig. 5.8 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 7.5ms to 13.5ms. The surface temperature was 138°C. The collision velocity of droplets was 0.37m/s(Left), 0.42m/s(Center), 0.52m/s(Right).	83
Fig. 5.9 The delay times of FC-3283 droplets at different surface temperature. T_{cl} shows the contact limit temperature.	86
Fig. 5.10 The delay times of tap water droplet at different surface temperature. The plots are arithmetic average value of some measured results at each condition.	87
Fig. 5.11 The delay times of tap water droplet at different collision velocity. The plots are arithmetic average values of some measured results at each condition. V_{cl} shows contact limit velocity.	88
Fig. 5.12 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different surface temperature. The collision velocity of purified water droplet was 0.37m/s and the collision velocity of tap water droplet was 0.39m/s. T_{cl} shows contact limit temperature.	90
Fig. 5.13 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different surface temperature. The collision velocity of purified water droplet was 0.41m/s and the collision velocity of tap water droplet was 0.43m/s.	90
Fig. 5.14 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different surface temperature. The collision velocity of purified water droplet was 0.51m/s and the collision velocity of tap water droplet was 0.53m/s.	91
Fig. 5.15 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different collision velocity. The surface temperature of purified water result was 104°C and the surface	

temperature of tap water result was 105°C.	92
Fig. 5.16 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different collision velocity. The surface temperature of purified water result was 198°C and the surface temperature of tap water result was 202°C. vcl shows contact limit temperature.....	93
Fig. 5.17 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different collision velocity. The surface temperature of purified water result was 298°C and the surface temperature of tap water result was 305°C. vcl shows contact limit temperature.....	93
Fig. 5.18 Time sequential images of droplet boiling behavior. The shooting speed was 100000fps. The surface temperature of the liquid metal was 245°C. The collision velocity of the droplet was 0.41m/s. The numbers in the images show time from the moment of the collision.....	96
Fig. 5.19 Time sequential images of droplet boiling behavior when the direction of irradiation of light was changed from Fig. 5.18. The shooting speed was 100000fps. The surface temperature of the liquid metal was 245°C. The collision velocity of the droplet was 0.41m/s. The numbers in the images show time from the moment of the collision.....	97
Fig. 5.20 Schematic of the way of pressure propagation between interfaces when the vapor film exists between the droplet and surface.....	99
Fig. 5.21 Time sequential images of the FC-3283 droplet impinging to the copperplate. The surface temperature was 200°C. The collision velocity of droplet was 0.42m/s. The droplet diameter was 1.2mm.	99
Fig. 5.22 Comparison between ds of liquid metal and ds of copperplate at 0.42m/s. The surface temperature was 200°C.	101
Fig. 5.23 Comparison between ds of liquid metal and ds of copperplate at 0.60m/s. The surface temperature was 200°C.	101
Fig. 5.24 Comparison between dmax of liquid metal and dmax of copperplate, at different collision velocity of droplets. The surface temperature was 200°C.	102
Fig. 5.25 Time sequential images of behavior of the droplet impinging to the liquid metal surface. The surface temperature was 214°C. The collision velocity was 0.32m/s. The droplet does not contact to the liquid metal and bounces on the surface.	104
Fig. 5.26 Time sequential images of contacting phenomena during moving upward. The droplet is moving upward at velocity of 0.075m/s. The droplet is same with the one in . The images are the behavior of the droplet after bouncing from the liquid metal surface six .	105
Fig. 5.27 Delay time and evaporation time at different surface temperature. The collision velocity of droplets was 0.37m/s. The right vertical axis shows the delay time and the left vertical axis shows the evaporation time. T _{cl} shows contact limit temperature and T _{wl} shows wetting limit temperature. The plots are the arithmetic average of measured values.	

.....	107
Fig. 5.28 Delay time and evaporation time at different surface temperature. The collision velocity of droplets was 0.41m/s. The right vertical axis shows the delay time and the left vertical axis shows the evaporation time. The plots are the arithmetic average of measured values.	108
Fig. 5.29 Delay time and evaporation time at different surface temperature. The collision velocity of droplets was 0.51m/s. The right vertical axis shows the delay time and the left vertical axis shows the evaporation time. The plots are the arithmetic average of measured values.	108
Fig. 1 Time sequential images of the droplet during jet ejection between 2.5ms and 4.8ms after impact. The surface temperature of the liquid metal was 306°C. The collision velocity of the droplet was 0.40m/s.	118
Fig. 2 Time sequential images of the droplet during jet ejection between 0.8ms and 3.5ms after impact. The surface temperature of the liquid metal was 303°C. The collision velocity of the droplet was 0.51m/s.	119
Fig. 3 Time sequential images of the droplet during jet ejection. The collided surface was heated copperplate. These images are the behavior of droplet during second collision. The surface temperature of the plate was 313°C. The first collision velocity of the droplet was 0.34m/s. The dotted red line circle shows the movement of the vapor that was generated at the the bottom interface of the droplet.	120
Fig. 4 Time sequential images of the droplet during jet ejection. The collided surface was heated copperplate. These images are the behavior of droplet during first collision. The surface temperature of the plate was 311°C. The first collision velocity of the droplet was 311°C.....	121
Fig. 5 Time sequential images of the droplet during jet ejection. These images are the behavior of the droplet in Fig. 4 during second collision to the copperplate surface.....	122
Fig. 6 Time sequential images of the droplet during jet ejection. These images are the behavior of the droplet in Fig. 4 during third collision to the copperplate surface.	123
Fig. 7 Time sequential images of the droplet impinging to the heated copperplate surface. These images are the behavior of droplet during first collision to the plate surface. The surface temperature of the plate was 258.6°C. The collision velocity of the droplet was 0.51m/s. At this condition, the jet ejection did not occur. But the generation of the vapor cloud inside the droplet is observed.	124

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 噴霧冷却

噴霧冷却は、低温液体を微細な液滴群にして高温物体に衝突させることで冷却をおこなう冷却方法であり、

- ①供給流量に対する高い冷却性能
- ②優れた制御性
- ③広域な使用可能環境

などの利点を有することから、工学上の様々な分野における冷却用途に使用されている[1].

例えば、鉄鋼製造においては、連続鋳造の二次冷却、鋼板の冷却、焼入など、様々な工程で使用されている[2]. そして近年、高品質鋼材製造のために圧延法や熱処理法が複雑化しており、噴霧冷却の更なる冷却性能向上が必要とされている[3]. また、原子力発電所においては、緊急炉心冷却装置(ECCS : Emergency Core Cooling System)に噴霧冷却が使用されている. ECCS は原子力発電所において配管破断や炉心の損傷などにより冷却材の損失が生じたとき(LOCA : Loss of Coolant Accident)に、炉心冷却をおこなう安全装置であり、確実な冷却性能が必要となる[4]. さらに、スペースシャトルなどの宇宙往還機では、大気圏再突入時に冷却パネルの展開が困難な場合、フラッシュ蒸発器によって機体内部の放熱をおこなう. このフラッシュ蒸発器は、冷却対象に向けて低温液体を噴霧し、液体を蒸発させることで熱交換をおこない、噴霧冷却と同様の原理により作動する. その他にも宇宙環境に

における材料プロセスでの冷却手段，マイクロエレクトロニクスでの冷却，大型宇宙構造物での緊急冷却等，様々な宇宙での用途が予測されている[5].

このように噴霧冷却は工学上の様々な分野の冷却用途に使用され，各用途において冷却性能の向上が必要とされている．そして，この実現のためには，素過程である高温物体への液滴衝突現象に関する詳細な知見が必要不可欠であり，本研究では，この基礎的研究として，高温液体金属表面に衝突する液滴の沸騰現象に関して調査をおこなう．

1.1.2 液滴の熱伝達特性

一般的に，液滴による熱伝達特性は，蒸発曲線を用いてその特徴を把握することができる．Fig. 1.1に蒸発曲線の模式図を示す．図の横軸は過熱度，縦軸は蒸発時間を表す．蒸発時間は液滴が高温物体表面上においてすべて蒸発するのに要する時間であり，その定義から平均熱流束に対応する．図に示したように，蒸発時間は過熱度に対して変曲点をもつ変化を示し，この変曲点を境として液滴の沸騰挙動は，核沸騰領域，遷移領域，膜沸騰領域に分類される．核沸騰領域においては，液滴と物体表面とが接触した状態にあり，活発な沸騰が生じるため，蒸発時間は過熱度の上昇にともない減少する．核沸騰領域において，蒸発時間が最小となる過熱度は濡れ限界温度として定義される．一方，遷移領域においては，蒸発時間が過熱度の上昇にともない増加する．これは沸騰により生成された蒸気によって液滴と物体表面との接触状況が不安定なものとなるためであり，その熱流束は核沸騰領域に比べ小さくなる．そして，さらに過熱度の高い膜沸騰領域においては液滴と物体表面間に安定した蒸気膜が形成され，液滴と物体表面との接触が生じなくなることから，蒸発時間が他の領域に比べて非常に長くなる．このとき液滴は蒸気膜上に浮遊状態となり，この現象はライデンフロスト現象と呼ばれる．また，膜沸騰領域において最大の蒸発時間を与える過熱度は，ライデンフロスト点として定義される[6]．ライデンフロスト点は液滴の熱伝達特性を評価する上で非常に重要な指標であり，その特性を評価するための研究が数多くおこなわれている．

西尾ら[7]は金属表面性状がライデンフロスト点に与える影響について調査している．十分に酸化させた酸化黄銅と，新鮮な黄銅面におけるライデンフロスト点を測定し，水滴を使用した場合，ライデンフロスト点が前者では220℃，後者で175℃と変化する結果を得た．また，水道水滴を表面上で沸騰させる操作を数回おこなうことで表面を汚染した黄銅面上では，ライデンフロスト点が275℃まで上昇するという結果も報告している．関ら[8]は液滴の蒸発過程に及ぼす表面被覆層の影響について調査をおこなった．関らは，銀とステンレス鋼に熱伝導率の小さいシリコン系耐熱塗料を被覆した伝熱面上における液滴の蒸発時間を測定し，被覆層の厚さが増大するにつれて，ライデンフロスト点が高くなり，その増加割合が，被覆層の厚さが小さいほど顕著であること，および，ライデンフロスト点以下の領域では，蒸発時間が被覆層表面の濡れ性により著しく変化するとしている．Bernardinら

[9]は表面粗さが液滴の沸騰挙動とライデンフロスト点に与える影響を調査した。表面をそれぞれ、研磨面、微粒子塗布面、粗面に加工した銅板を使用してライデンフロスト点を測定し、研磨面においては 225°C となったのに対して、他の表面の場合には、それよりも約 40°C 低い値となったとしている。高田ら[10]は、紫外線照射による光励起超親水化現象を用いて、物体表面の接触角を変化させて液滴蒸発時間の測定をおこなっている。高田らは表面への紫外線照射の有無、およびスパッタリングによる SiO₂ の極薄層形成により、接触角のみを変化させ、接触角がそれぞれ 4°, 14°, 33°, 84° の場合における蒸発時間の測定をおこなった。そして、接触角の低下にともない、濡れ限界温度とライデンフロスト点は上昇し、濡れ限界温度以下における液滴の蒸発時間は低下するという結果を得ている。また、日高ら[11]は、高田らのおこなった実験条件よりも更に広い範囲で接触角を変化させて蒸発時間の測定をおこない、接触角によりライデンフロスト点が大きく変化することを実験的に示している。

また、ライデンフロスト点に関する研究の他にも、熱伝達特性を把握する上で重要となる液滴の沸騰・変形挙動、固液接触状況などの研究がおこなわれている。稲田ら[12]は、固液接触状態に及ぼす液滴サブクール度の影響を調査している。液滴衝突時の瞬時熱流束を、熱伝導方程式の逆問題を壁面下温度の測定値を用いて解くことにより算出し、サブクール度によって加熱度に対する熱流束の変化特性が大きく異なる結果を得ている。Qiao ら[13]は微小重力下において、高温壁面に衝突する液滴の沸騰挙動について調査した。その結果、微小重力下では、液滴は、膜沸騰領域においては形成される蒸気の圧力により跳ね返されるため表面上に安定して存在することができないこと、また核沸騰領域においては沸騰挙動及び熱流束に大きな相違が見られないという結果を得ている。藤本ら[14]は表面粗さの異なる加熱金属平面に衝突する液滴の変形特性について詳しい調査をおこない、表面粗さが、液滴と加熱面との接触がほとんど生じないと考えられる高温条件においても液滴の変形挙動に影響をおよぼすことを明らかにしている。徳岡ら[15]は高温壁面に衝突する液滴の挙動に与える動粘度、表面張力の影響を調査し、動粘度が小さい場合の液滴の分裂形態は表面張力、粘度が変化しても We 数により判別することができ、 $We < 40 \sim 50$ では非分裂となり、 $We > 70 \sim 85$ では微細分裂となるが、動粘度が大きい場合には粘性の影響が顕著に現れ、分裂や変形が起りにくくなり、We 数だけではこれらを整理できなくなるため、動粘度の項を含む無次元数を使用する必要があることを示している。

以上のように、ライデンフロスト点、および液滴の熱伝達特性は金属の表面性状、特に金属の表面粗さにより大きく変化する。しかし、現状においてはその影響を定量的に評価した上で、ライデンフロスト点および熱伝達特性を正確に予測することは困難となっている。これは、ライデンフロスト点を定義する蒸発時間が、長い時間スパンにおける液滴と高温物体表面との熱的相互作用の結果を表す指標であるのに対して、液滴と高温物体表面との接触を妨げる原因となる蒸気の生成は、液滴が高温物体表面に衝突するさいの瞬時的な過程においておこなわれるものであり、このときの液滴と高温物体表面との相互作用に

第1章 序論

関する知見が不足しているためである。このため、液滴が高温物体表面に衝突するさいの液滴と高温物体表面との相互作用，および影響を及ぼすパラメータの調査が必要である。

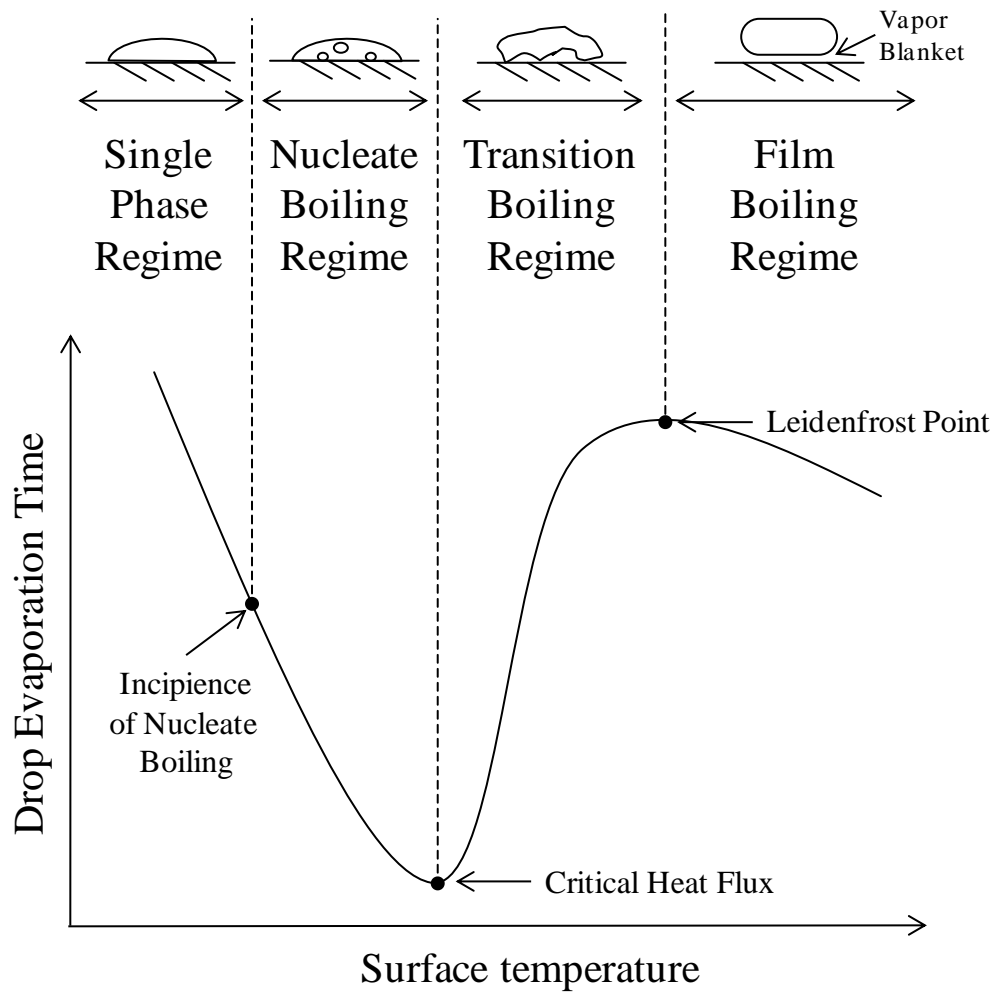


Fig. 1.1 Sessile drop evaporation curve. The curve displays droplet evaporation lifetime versus surface temperature and exhibits the four distinct heat transfer regimes [29].

1.2 関連研究

西尾, 平田[16]は, 石英プリズムを高温物体面として使用することにより, 液滴衝突時の接触面の状況を固体面裏側から直接観察する実験をおこなっている. Fig. 1.2 に西尾らを使用した実験装置の概要を示す. バーナー加熱された $20 \times 20 \times 20 \text{mm}$ の直角石英プリズムを高温固体面として使用し, 光を斜め下方よりプリズム上表面に入射させる. プリズムが乾き面であれば, その部分で入射光は全反射され, 写真では明るく写り, 濡れ面であれば, 写真ではその部分は暗く映ることになり, プリズム表面が乾き面であるか濡れ面であるかを判断することが可能となる. なお, 使用した液滴は水滴である.

Fig. 1.3 に初期表面温度が約 430°C における撮影結果を示す. この場合, 固液接触面は衝突とほぼ同時に円形に形成され, 時間の経過とともに液滴の変形にもなってほぼ円形のまま拡大している. また, その接触面内には, 接触面形成初期より気泡の付着部と思われる乾燥はん点が観察され, 核沸騰と類似した現象が起こっているものと考えられる. Fig. 1.4 は初期表面温度が約 750°C における撮影結果である. この表面温度においては, 衝突と接触面形成との間に時間のずれが生じており, 接触面は液滴の固体面への投影面中央部から形成されるのではなく, 変形した液滴底部の周辺部円周上から発生している. 接触面は液滴の変形にもない放射状に引きずられる形で拡大し, 接触面積の拡大速度も比較的小さくなっている. また, 液滴が最大広がり状態となるときにも, 接触面中央部は完全なぬれ面となっていない. この結果より, 固液接触面はライデンフロスト温度以上においても衝突過程で形成されることがわかる. また, Fig. 1.4 に示したように, 衝突面温度が高温の場合には, 衝突と接触面形成との間にずれが生じ, 接触開始時に形成せれる接触面が放射状となる. しかしこのずれが生じる原因について, その詳細な発生原理は明らかとされていない.

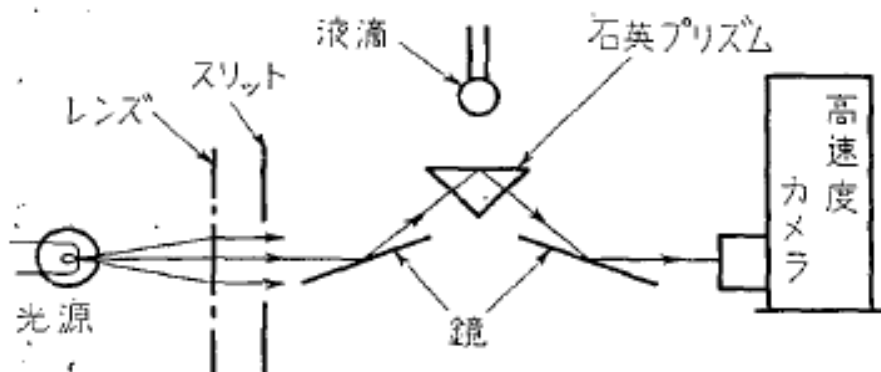


Fig. 1.2 Observation method of surface contact condition by quartz prism [16]

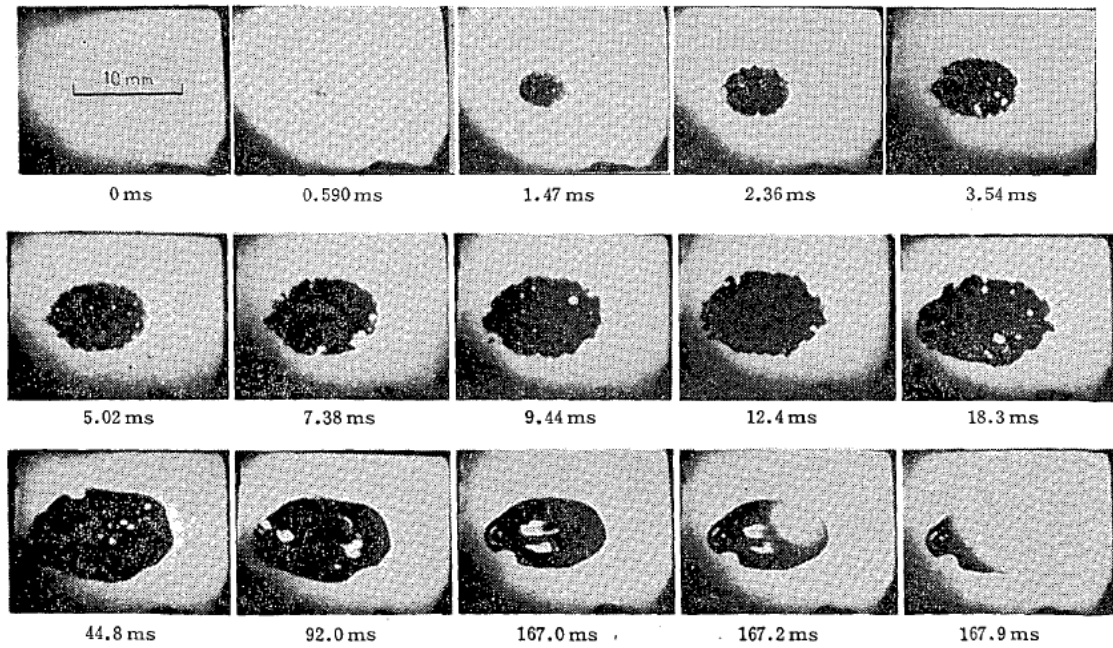


Fig. 1.3 Behavior of surface contact during collision process at 450°C [16]

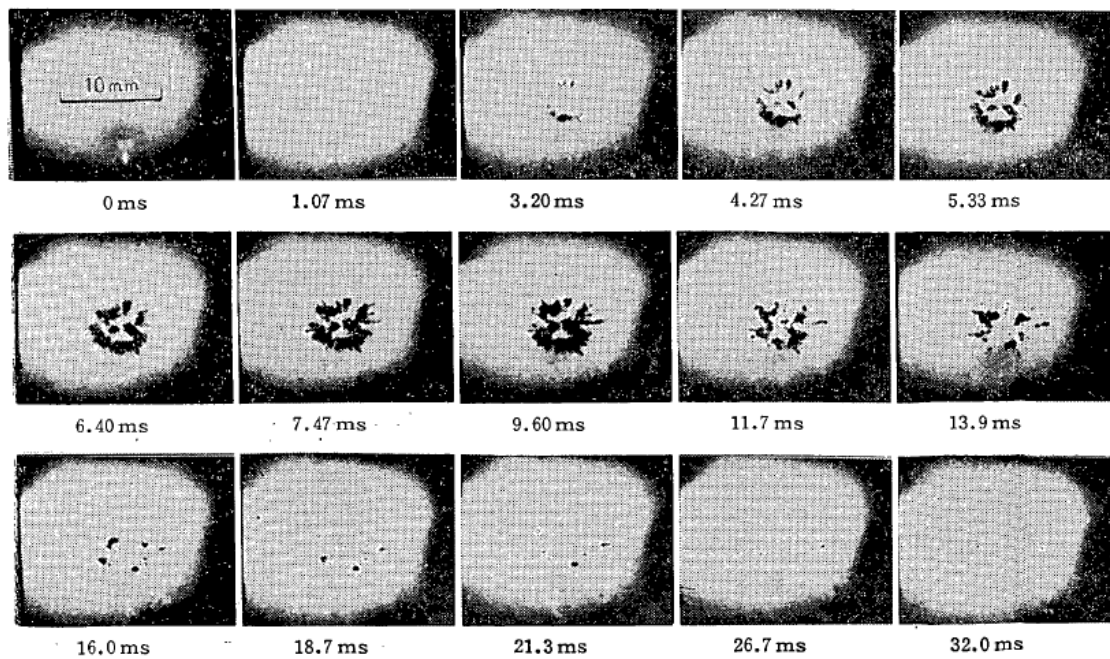


Fig. 1.4 Behavior of surface contact during collision process at 730°C [16]

Someya ら[17]は表面粗さ、および金属の種類が液滴のライデンフロスト温度に与える影響について調査し、ジェットエクストラクションと呼ばれる現象を報告している。以下に、Someya らのおこなった実験の概要を示す。表面状態の異なる 6 種類の金属材料(SUS304, SUS316, アルミニウム, ハステロイ, ジルカロイ, チタン)を用意し、加熱した各材料表面に衝突する液滴の沸騰挙動の撮影、および蒸発時間の測定をおこなう。測定温度範囲は約 100°C から 250°C である。液滴には精製水を使用し、その直径は 2.5mm, 液滴の落下高さは 10, 15, 20mm である。

蒸発時間の測定結果は各種金属材料の表面状態により変化し、ハステロイおよびジルカロイは他の材料に比べ低温域で蒸発時間が長くなるという結果となった。Someya らはこの原因を、ハステロイおよびジルカロイが他の材料に比べ表面粗さが小さいことから、液滴と加熱表面が接触する界面においてその表面積が減少し、結果的に液滴の接触角が変化するためだと考察している。また、液滴落下距離が増加するにつれ、液滴蒸発時間が短くなるという傾向が認められたが、濡れ限界温度はあまり変化しなかった。

Fig. 1.5, Fig. 1.6 に Someya らが発見したジェットエクストラクション現象の高速カメラによる撮影結果を示す。この現象は液滴が加熱面に衝突後の数ミリ秒間で観察され、試験片が SUS304 およびチタン、試験片温度が 240°C から 270°C, 液滴落下距離が 15mm という、ある特定の条件でしか観察されなかった。このことから Someya らは、ジェットエクストラクション現象は金属の表面粗さや温度および液滴落下距離に大きく支配されるとしている。Fig. 1.5 をみると、液滴が試験片と接触(0 μ s)してから 167 μ s 後に固液相界面で小さな気泡が発生していることがわかる。この気泡は接触時の液滴下方における急激な蒸発によって生成されており、433 μ s 後には液滴上方に到達している。Someya らはこの気泡が液滴内を上方に移動する速度は 8m/s 程度であり、圧力波などの伝播速度と比較すると極めて遅いことから、界面で生成された気泡が液滴上方に到達し、この気泡が大気中へ抜けることで、液滴内の圧力差により、ジェットエクストラクション現象が引き起こされると考察している。しかし、このような急激な蒸発が発生する原理・具体的な条件は不明であり、その解明には液滴と金属表面との相互作用について更なる調査が必要である。

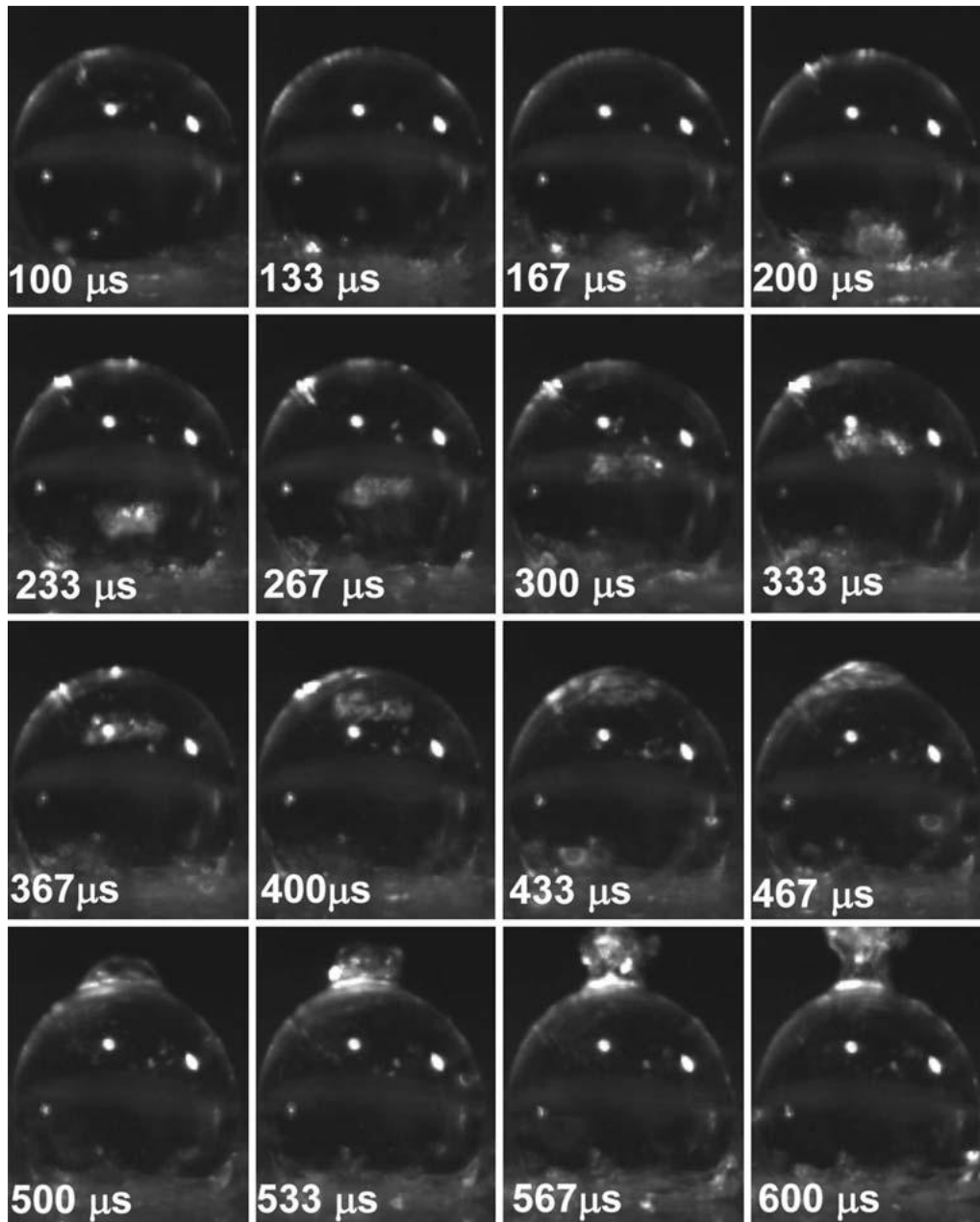


Fig. 1.5 Time sequential images of the droplet during jet ejection between 100 and 600 μs after the impact. These images were obtained almost parallel to the hot surface. They show the detailed behavior of the droplet. The temperature of the hot surface was 240 $^{\circ}\text{C}$. The droplet velocity just prior to impact with the surface was 0.54m/s. Inside the droplet, the vapor cloud was generated due to rapid evaporation at the bottom interface of the droplet [17]

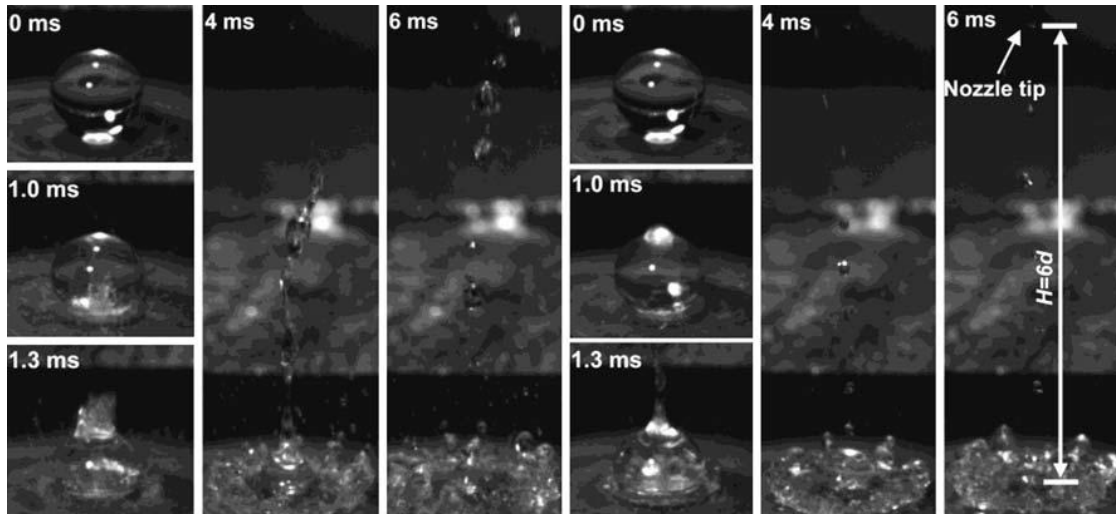


Fig. 1.6 Time sequential images of droplet behavior during jet ejection. The temperature of the hot surface was 240°C. The droplet velocity just prior to impact with the surface was 0.54m/s. A portion of the water reached the highest point, which was close to the droplet release point, 6ms after impact with the hot surface. **Right:** image for surface temperature of 260°C [17].

1.3 研究目的

以上に示したように、液滴の熱伝達特性を把握するうえで重要となる液滴と高温金属表面との相互作用に関する知見はこれまで十分に得られていない。この相互作用には金属の表面性状、特に表面粗さが大きな影響を及ぼすが、上述した既往研究からもわかるように、表面粗さを正確に制御した実験をおこなうことは困難となっている。つまり、対象となる現象が瞬時的なものであるため測定による把握が困難であるうえ、重要なパラメータである金属の表面粗さを正確に制御することができず、定量的な知見を得ることが非常に困難となっている。この問題を解決していくためには、はじめに表面粗さの存在しない単純な系における相互作用に関する知見を得ることが非常に有益であると考えられる。表面粗さが存在しない系における結果をもとに表面粗さが相互作用に果たす役割を定量的に議論することが可能であり、また相互作用において発生している基本的な物理現象を把握することが可能となるためである。すなわち複雑な現象を、系を単純化することで詳しく観察することができるようになり、これは最終的な現象全体を明らかとしていくうえで欠くことのできない重要な知見である。

そこで本研究では、液体金属を衝突面として使用した実験をおこなう。液体金属の表面は、その表面張力の効果により完全に滑らかな表面形状、つまり表面粗さが存在しない状態に保たれる。このため液体金属を衝突面として使用することにより、制御の難しい表面粗さの影響を排除した状態における液滴と金属表面との相互作用を観察することが可能となる。液体金属表面は液滴の衝突により変形するため、固体金属と比較した場合に衝突面として厳密に同一の条件とはならない。しかし、液体の密度が十分に大きい場合にはこの変形の影響は無視し得るほど小さくなり、また実験的にその影響を評価することも可能である。この表面粗さの存在しない単純化された系における液滴と金属表面との相互作用を観察することで、表面粗さが相互作用に果たす役割を相対的に明らかとするばかりではなく、瞬時的な相互作用においてどのような物理現象が生じているのかを定量的に明らかとすることが期待される。ただし、液滴の沸騰開始直後以降においては発生する蒸気により液体金属の表面は大きく変形し、滑らかな表面と仮定することはできない。つまり、この仮定は液滴の衝突から沸騰が開始されるまでの間においてのみ成り立つものである。これは本研究で対象とする相互作用を観察するうえでは十分な期間といえる。

つまり本研究では、高温液体金属表面に衝突する液滴の沸騰挙動を観察することにより、液滴と高温金属表面との相互作用において表面粗さの果たす役割、および相互作用において生じる物理現象を明らかにすることを目的とする。

1.4 本論文の流れ

本論文は、本章および結論を含めた計6つの章で構成されている。

第2章では、実験装置、および測定方法について概説する。

第3章では、大気圧下で高温液体金属に衝突する液滴の沸騰挙動撮影結果を示す。また、観察された特徴的な沸騰挙動を定量的に把握するためにおこなった、液滴の変形挙動測定、および、遅れ時間の測定結果を示す。

第4章では、大気圧下沸騰挙動評価実験において得られた結果をふまえておこなった、減圧下沸騰挙動評価実験の概要、およびその結果を示す。

第5章では、これらの実験結果をもとに、本研究で観察された特徴的な沸騰現象の発生原理について考察する。また、その他実験的検討をおこなった事項についてまとめて説明する。

第2章 実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 概要

Fig. 2.1 に本研究で使用した実験装置の概要を示す。ポンプを使用して、シリンジから液体をゆっくりとチューブに向けて送り出し、チューブ先端において液滴を形成する。この液滴が落下して下方に設置した液体金属プール表面に衝突する様子を、前方に設置した高速度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され、その温度は液体金属容器内に設置した熱電対による測定値をもとに調整される。以下に、実験装置の構成要素を液滴系、衝突面系、撮影系に分けて順にその詳細を説明する。

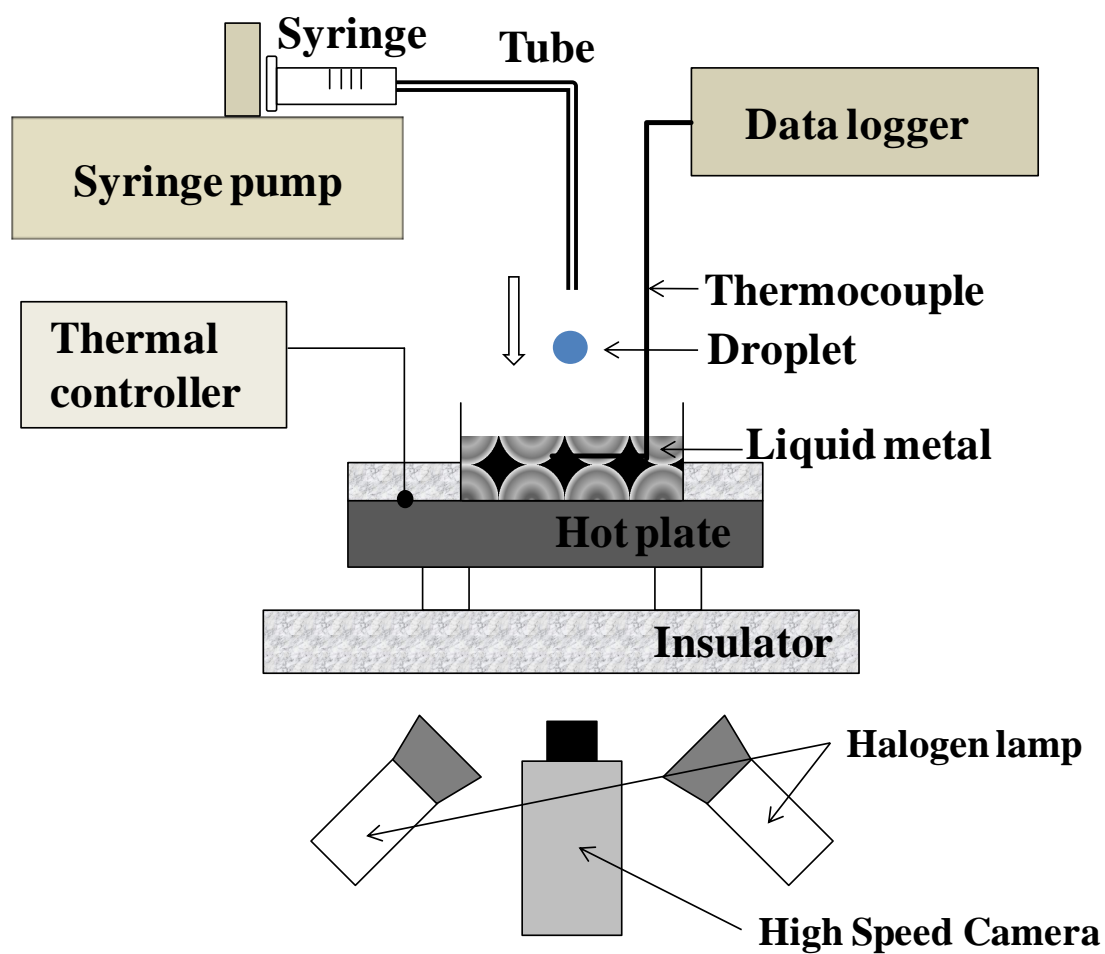


Fig. 2.1 Schematic of the experimental apparatus in atmospheric pressure condition

2.1.2 液滴系

液滴系は、シリンジ、シリンジポンプ、マイクロチューブより構成される。シリンジにはハミルトン製のマイクロシリンジ 1001TLL を使用した。このシリンジの容量は 1 mL で、先端がルアーロック型となっており、マイクロタイトフィッティングと呼ばれるコネクタを使用してマイクロチューブと接続することが可能である。マイクロチューブには PEEK 樹脂製チューブ(内径 150 μm 、外径 360 μm)を使用した。PEEK 樹脂は耐薬品性・物理的強度に優れているうえ、金属管と比較して熱伝導率が低いことから、液滴の温度変動を低く抑えることができる。チューブ先端はほぼ平坦に切断されており、形成される液滴は落下直前まで準静的に保持される。液滴は自重により落下するため、液滴の大きさは使用する液体の表面張力、密度により決定される。本研究では、実験を通して同一寸法のマイクロチューブを使用したため、使用した液体の種類により液滴の大きさは異なる。マイクロチューブ先端部は 1 mm 単位で位置の調整が可能な機構上に固定されており、液滴の衝突速度は、落下位置を変えることで調整する。なお、衝突速度は後節に示す方法により撮影画像から測定した。液滴には、市販のイオン交換法による精製水、FC-3283、および水道水を使用した。Table. 2.1 に精製水および FC-3283 の物性値をまとめて示す。なお、FC-3283 の表面張力温度係数は染矢ら[18]により測定された値である。また、水道水の物性値は不明であるが、表面張力、表面張力温度係数を除き、精製水に近い値をもつと考えられる。

Table. 2.1 Physical properties of water and FC-3283. These properties are values at 25°C. The value of water is same with purified water [30] and the thermal coefficient of surface tension of FC-3283 is the value measured by Someya and Munakata [18]

Physical properties	Water	FC-3283
Boiling point[°C]	100	128
Density[kg/m ³]	996.62	1830
Surface tension[mN/m]	71.69	16
The temperature coefficient of surface tension[mN/(m·K)]	-0.1966	-0.0838
Vapor pressure[kPa]	3.53	1.33
Kinetic viscosity[cSt]	0.86	0.82
Thermal conductivity[W/mK]	0.61	0.067

2.1.3 衝突面系

衝突面系は、液体金属、ホットプレート、温度測定装置、温度調節器より構成される。液滴の沸点近傍から高温領域に至るまでの幅広い温度領域で測定をおこなうため、衝突面となる液体金属には、低融点合金の U アロイ 70 を使用した。U アロイ 70 は Bi, Pb, Cd, Sn の合金である。Table. 2.2 にその物性値をまとめて示す。液体金属の密度が液滴の密度に比べて十分に大きいことから、衝突するさいに発生する液体金属表面の変形はその影響を無視できるほど小さい。なお、この変形による影響に関しては、5.4 において詳しい評価をおこなっている。重要な物性値である液体金属表面張力、表面張力温度係数は不明であり、接触角による測定を試みたが、正確な値を求めることができなかった。しかし、定性的には一般的な他の液体金属と同様に、表面張力は大きく、表面張力温度係数は負の値であると考えられる。液体金属はステンレス製シャーレ(外径 60 mm, 高さ 20 mm)に保持され、底部に設置したホットプレートにより加熱する。ホットプレートは温度調節器と接続されており、所定の温度に 1 °C 単位で設定することが可能である。ホットプレート表面には、液体金属設置部を除き、断熱材を設置し、輻射・熱伝達による液滴の温度変動は最小限に抑えられている。液体金属の熱伝導率が十分に大きいことから、衝突面となる液体金属表面温度は、液体金属表面から約 2mm 下方の位置に設置した熱電対による測定値とした。なお、この仮定を検証するため、2.2.1 に示す予備実験をおこない、その妥当性を確認している。実験においては、時間の経過と共に、液体金属表面に酸化皮膜が形成される。酸化皮膜が存在する場合、液体金属表面は固体となり、滑らかな表面ではなくなる。このため、ステンレス製の細管(外径 1.5mm, 長さ 200mm)により測定ごとに酸化皮膜を除去し、均質な衝突面とした。

また、液体金属に衝突する場合と比較するため固体金属に衝突する場合の液滴の沸騰挙動の撮影をおこなう。固体金属としては銅板(サイズ 30mm×30mm, 厚さ 0.5mm)を使用する。使用にさいしては表面を#1000 のエメリー紙で研磨し、エタノール洗浄を施す。この銅片を液体金属表面における液滴衝突部分に設置することで、固体金属衝突面とする。

Table. 2.2 Physical properties of U-alloy 70. These properties are values at 20°C.

Melting point[°C]	70.00
Density[kg/m ³]	9946.27
Specific Heat[J/(kg·K)]	0.167×10 ³

2.1.4 撮影系

撮影系は、高速度カメラ、レンズ、PC、光源より構成される。高速度カメラは、Fotron 製、FASTCAM SA5 を使用した。本カメラは 3000frame/s で 1024×1024 の解像度における撮影が可能であり、本研究では、主に撮影速度 10000frame/s、解像度 256×256 において撮影をおこなう。高速度カメラはイーサネットケーブルで PC に接続されており、撮影された画像は PC に転送され、保存される。レンズには Nikon 製、AF MICRO NIKKOR 200mm 1:4 D を使用し、光源には Photoron 製ハロゲンランプ、HVC-SL を 2 台使用して、高速度カメラと同方向より照射をおこなう。

2.2 予備実験

2.2.1 液体金属内部温度および表面温度測定

本研究においては、液体金属表面から約 2mm 下方の位置に設置した熱電対による測定値を表面温度として測定をおこなう。これは、上述したように液体金属の熱伝導率が十分に大きく、液体金属の内部温度と表面温度とが等しいとする仮定による。この仮説を検証するため、以下に示す手順で予備実験をおこなった。

Fig.2.3 のように外径 0.5mm の熱電対を、高さ調節が可能な機構上に固定し、液体金属表面を高さ 0mm として、液体金属内部、および周辺の温度分布を垂直方向 2mm ごとに測定する。ただし、液体金属表面近傍においては 1mm ごとに測定をおこなう。実験をおこなう表面温度範囲が 100°C から 320°C であるため、予備実験では液体金属の設定温度が 104°C、206°C、303°C の場合について測定をおこなった。Fig. 2.2 にその結果を示す。この結果より、液体金属内部の温度分布はほぼ一様であり、実験時の熱電対による測定値と実際の表面温度との温度差は約 ±5°C 以内であることが確認される。よって、本研究において表面温度測定値の誤差は最大で約 5% となる。

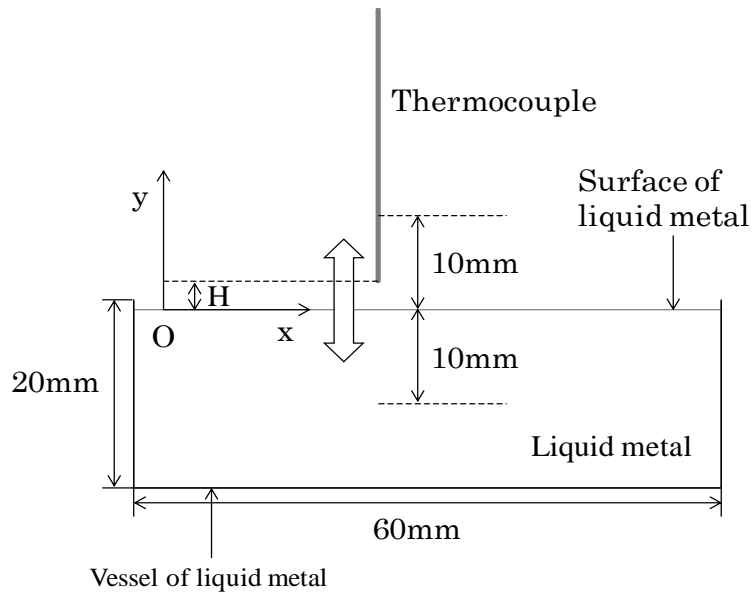


Fig.2.3 Schematic of measurement method of temperature distribution in liquid metal. H shows the distance from the surface of the liquid metal to the top of the thermocouple. The measuring range of H is from -10mm to 10mm.

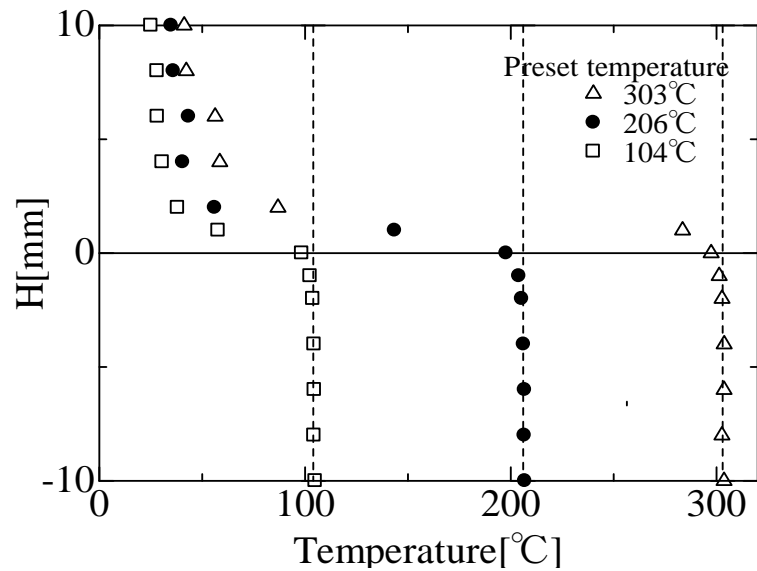


Fig. 2.2 Temperature distribution in the liquid metal and around its surface. The dotted lines show the measured temperature of liquid metal at H=-10mm.

2.2.2 液滴衝突後の表面温度推移測定

液滴が液体金属表面に衝突する場合、表面温度は急激に低下することが予測される。このため、液滴が衝突した後、表面温度が内部温度と等しくなるまでに要する時間を検討する必要がある。そこで、熱電対の先端を Fig.2.3 における $H = -1.0\text{mm}$ の位置に固定し、この熱電対近傍に液滴を衝突させたさいの表面温度変化を測定した。液滴はシリンジを手動で押しこむことにより形成し、熱電対をつたって液体金属表面に落下させる。測定は 0.5 秒ごとに、合計で 60 秒間おこなった。Fig. 2.5 にその結果の一例を示す。このときの液体金属の初期表面温度は 290°C であり、液滴が液体金属表面に衝突した時刻を 0s とする。測定結果をみていくと、液体金属表面温度は、0s から 0.5s において 290°C から 151.9°C まで急降下している。その後、2.0s より上昇に転じ、3.0s から 4.5s にかけて急激に上昇をした後、再び緩やかな上昇傾向を示す。最終的に表面温度は、35s において初期表面温度の約 96%にあたる 279°C まで上昇している。しかし、初期表面温度と同一温度まで表面温度が上昇するには、本測定の測定時間範囲である 60s よりも長い時間を要した。本実験においては、繰り返し測定をおこなうため、表面温度ができる限り短時間で初期温度まで上昇することが望ましい。そこで、液滴が衝突した後、ステンレス製の細管で液体金属内部を攪拌することで、表面温度の回復を早めることを試みた。なお、使用したステンレスの細管は上述した液体金属表面の酸化皮膜を取り除くために使用したものと同一である。攪拌をおこなった場合の表面温度測定結果を Fig. 2.4 に示す。図中の 35s から 52s においてみられる急激な温度降下・上昇は、攪拌のため熱電対を液体金属表面からいったん移動し大気中に置いた後、再び初期設置位置に戻したために生じたものである。攪拌をおこなうことで表面温度は初期温度 287°C の約 99%にあたる 285°C まで回復している。この結果より、測定ごとに液体金属プールを十分に攪拌することで、表面温度を設定温度まで上昇させることが可能であることが確認され、本実験では測定毎に十分に液体金属の攪拌をおこなうことで繰り返し測定をおこなった。

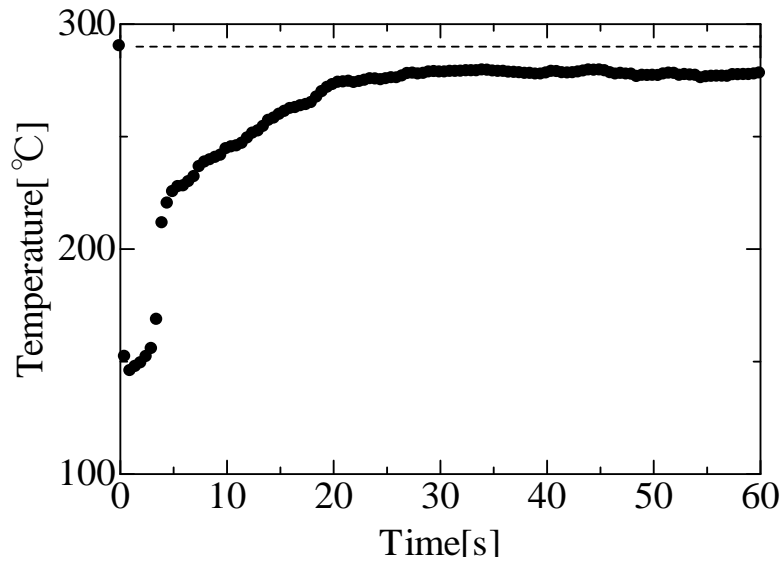


Fig. 2.5 Changes of surface temperature of liquid metal after collision of the droplet. The horizontal dotted line shows the value of initial surface temperature of liquid metal.

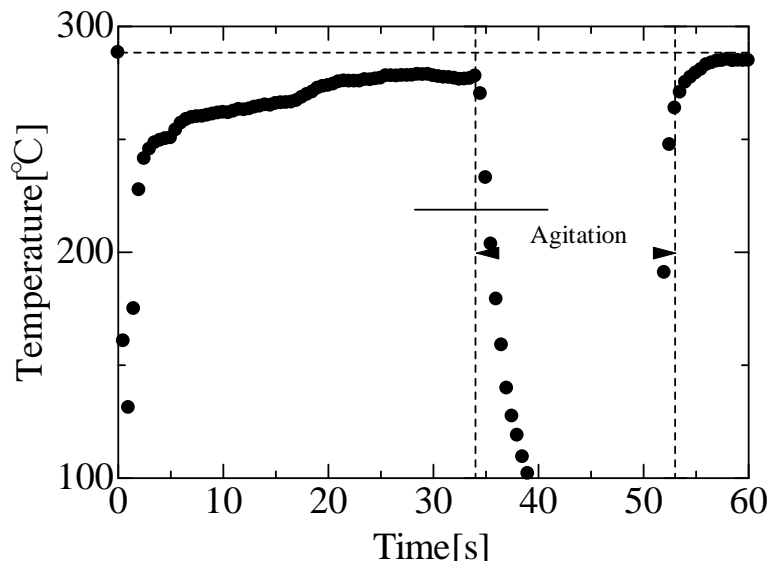


Fig. 2.4 Changes of surface temperature of liquid metal after collision of the droplet when the liquid metal was stirred. The horizontal dotted line shows the value of initial surface temperature of liquid metal.

2.2.3 液滴温度

本研究においては、液滴温度の制御をおこなっていない。液滴温度は液滴の熱伝達特性、特に沸騰挙動に大きな影響を持つことが知られており[7][19]、本来ならば厳密な管理をおこなうことが望ましい。しかし、液滴温度は液体金属表面からの輻射や雰囲気温度などにより変化するため、一定温度に管理して実験をおこなうためには非常に大掛かりな装置が必要となる。特に本研究で扱うような衝突速度が比較的遅い場合においては、液滴と高温物体表面との距離が近くなるため、液滴温度はより変動しやすくなる。本研究では、液滴を形成する前の液体温度を室温に保つのみで、液滴温度の調整装置は設けずに実験をおこなっている。このため、液体金属表面温度の変化による液滴温度の変化を評価しなければならない。そこで、以下に示す手順で液滴温度変化の測定をおこなった。Fig. 2.7のように直径 0.3mm のアルメル線とクロメル線をスポット溶接により繋ぎ合わせた熱電対を液滴が形成されるチューブ先端に固定し、落下直前の液滴温度を測定する。測定は表面温度が 103°C, 204°C, 301°Cの条件についておこなった。また、測定値は各表面温度において 5 回ずつおこない、その平均値を測定値とした。その測定結果を Fig. 2.6 に示す。この結果より、液滴温度の変化は最大で約 8°Cであり、その影響は小さいといえる。

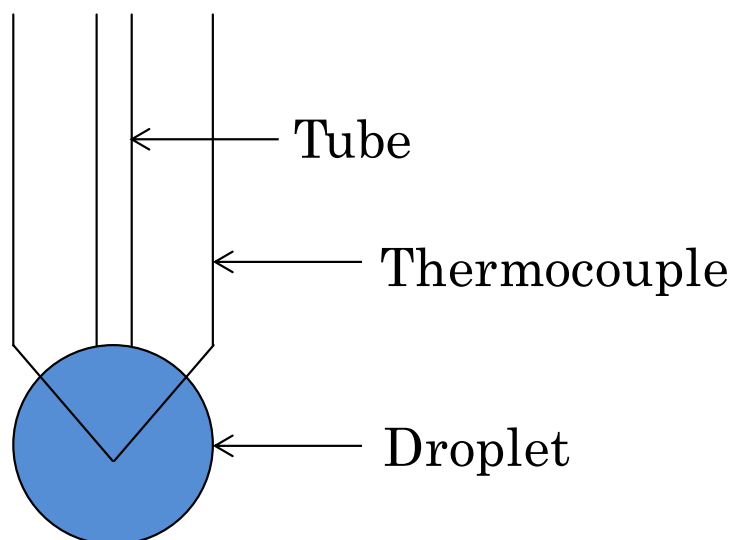


Fig. 2.7 Schematic of measurement method of droplet temperature. The diameter of the thermocouple was 0.5mm and the diameter of tube was 0.36mm. The droplet diameter was around 2.5mm

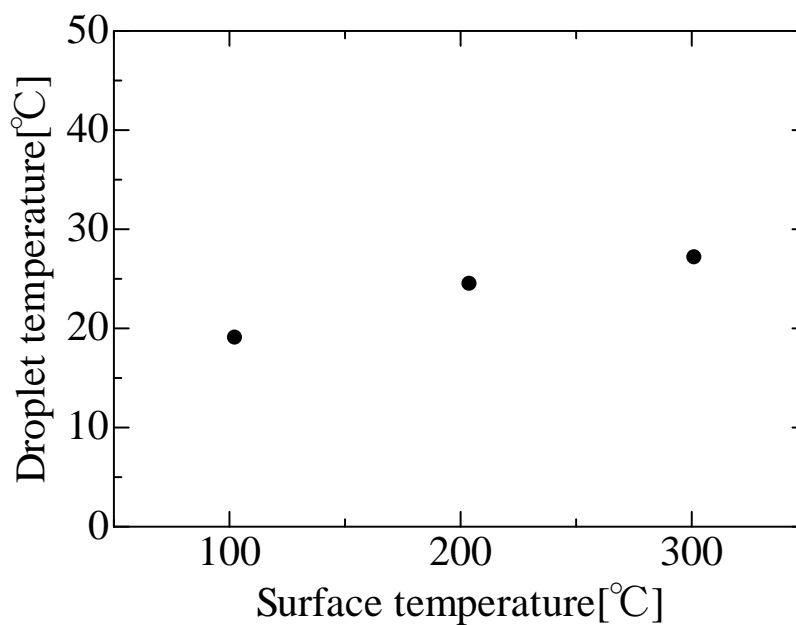


Fig. 2.6 Droplet temperature just before falling from the tube at different surface temperature.

2.3 変形挙動測定

本研究では液滴の沸騰挙動を定量的に把握するため、撮影画像より液滴形状・衝突速度・液滴直径の測定をおこなう。以下では液滴形状の検出方法、測定するパラメータの定義および測定方法を示す。なお、測定パラメータの定義は佐藤ら[20]の研究における定義を参考とした。

2.3.1 液滴の形状検出

液滴の形状検出には、Canny のアルゴリズム[21]を使用し、画像の最適化、勾配算出、細線化、二値化の順に撮影画像の処理をおこなう。それぞれの工程で使用した処理方法は以下のとおりである。

最適化：ガウシアンフィルタ

勾配算出：Sobel フィルタ

細線化：NMS(Non-Maximal Suppression)

二値化：2つの閾値による処理

なお、二値化における閾値は、処理ケースごとに最適と思われる値を目視で判断して設定した。プログラムの作成には、National instruments 社が開発をおこなっている Labview を使用した。Fig. 2.8 に撮影画像の解析結果を (a) 原画像、(b) エッジ検出画像、(c) 二値化画像の順に示す。これらの処理により求めた液滴の形状情報をもとに、次節で示すパラメータの測定をおこなう。なお、画像上の座標は液体金属表面を x 軸、液体金属表面と垂直な方向を y 軸として定義する。液体金属表面の位置は目視により画像から判断した。

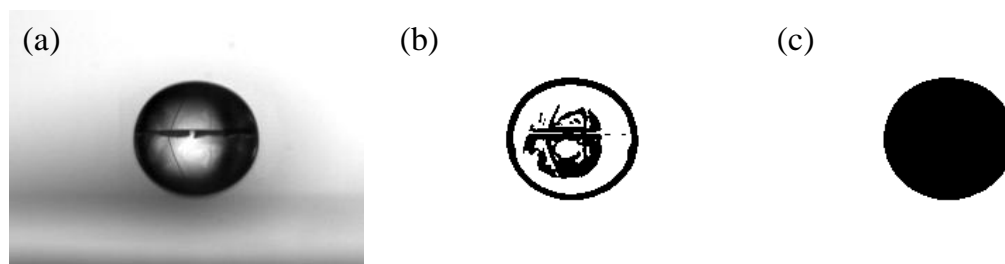


Fig. 2.8 Example images of detected edge of the droplet, (a) original image, (b) detected edge, (c) binarized image

2.3.2 測定パラメータの定義と測定方法

2.3.2.1 接触角

接触角は Fig. 2.9 に示すように、物体の表面張力、液滴の表面張力、および物体と液滴との界面張力の釣り合いにより決定される液滴端部の角度である。その定義より、接触角は表面張力の大きな物体面上では小さくなり、表面張力の小さな物体面上では大きくなる傾向がある。また、表面粗さによっても変化する。このため、接触角は物体の濡れ性を定量的に把握するための指標として使用される。本研究では衝突面として液体金属を使用しており、このとき力の釣り合い関係は、Fig. 2.10 に示すような状態となる。しかし、液体金属 Uアロイ 70 の密度は、Table. 2.2 に示したように液滴の約 10 倍であり、液体金属表面は液滴によりほとんど変形しないとみなすことができるため($\theta_2 \approx 0$)、本研究では Fig. 2.9 の接触角の定義を使用し、Fig. 2.11 に示す θ を接触角として測定する。以下に接触角の測定方法を示す。

2.3.1 に示した処理により求めた液滴の形状情報のうち、液滴端部の位置座標を液体金属表面から y 軸方向に 10pixel 収集する。この位置座標の分布を最小二乗法により直線近似して、その勾配を求める。最後に、この勾配を三角関数により角度に換算して、この角度を接触角とする。なお、左右それぞれの液滴端部より測定した接触角の平均値を測定値とする。

2.3.2.2 見かけの接触径

見かけの接触径は Fig. 2.11 の長さ d_c により定義する。この値は、液滴が物体表面に衝突する様子を水平方向から観察したときに観察される、物体表面における液滴直径である。ただし、ここで定義する見かけの接触径とは、液滴と物体表面とが直接接触しているかどうかは問わない。測定は液体金属表面における液滴直径を形状情報より測定することによりおこなう。

2.3.2.3 広がり直径

広がり直径は Fig. 2.11 の長さ d_s により定義する。この値は、液滴の最大直径である。このため、衝突直後において d_s は液滴直径となる。測定は液滴形状のうち x 方向の最大直径を求めることでおこなう。

2.3.2.4 高さ

高さは Fig. 2.11 の長さ h により定義する。この値は、液体金属表面から液滴最頂部までの距離である。測定は y 軸上における液滴形状の長さを求めることによりおこなう。

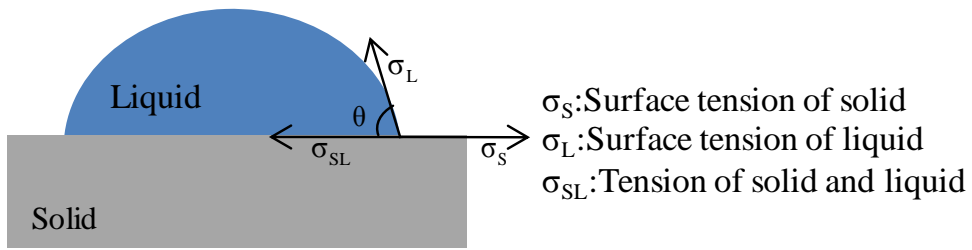


Fig. 2.9 Definition of contact angle

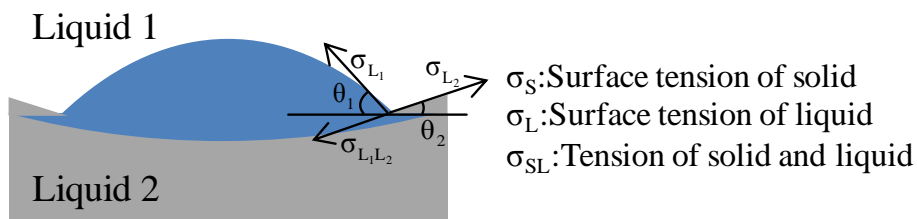


Fig. 2.10 Equilibrium of force at liquid liquid interface edge

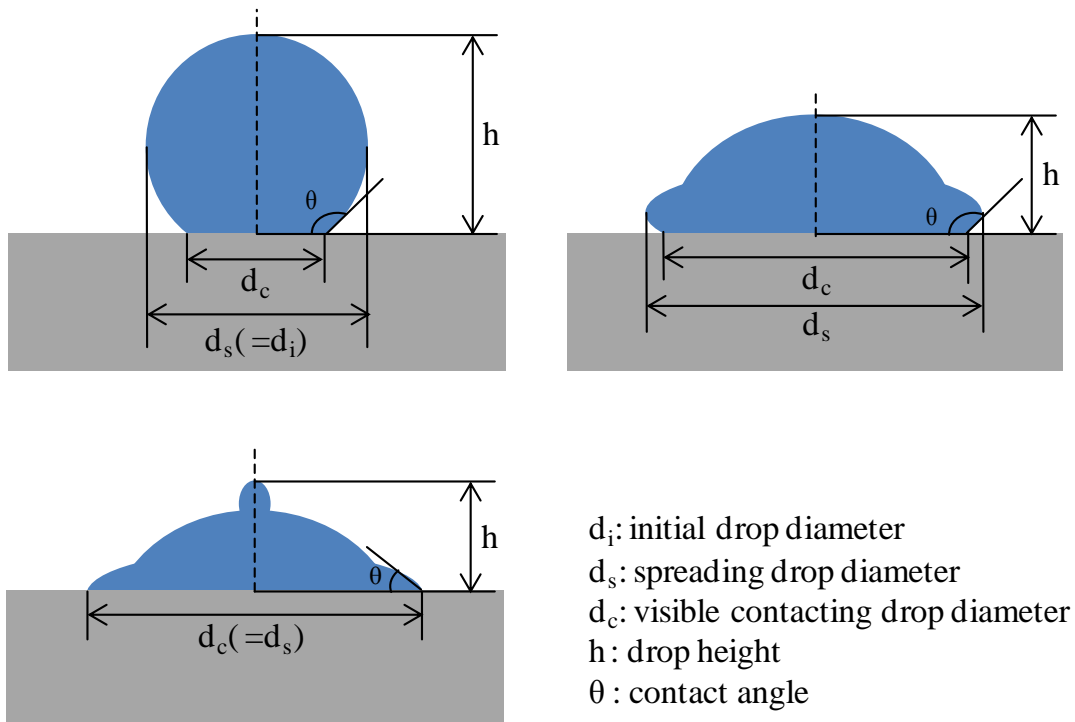


Fig. 2.11 Definition of contact angle, spreading drop diameter, visible contacting drop diameter, and drop height [20]

2.3.2.5 衝突速度

衝突速度は、液滴重心位置の移動速度と定義して測定する。形状情報より液滴の重心座標を算出し、時系列画像よりその移動速度を求める。Fig. 2.12 に本研究における液滴の落下高さとの衝突速度の関係を示す。なお、図中の実線は液滴を剛体球と仮定して、エネルギー保存則より計算した落下速度を比較のため記載したものである。

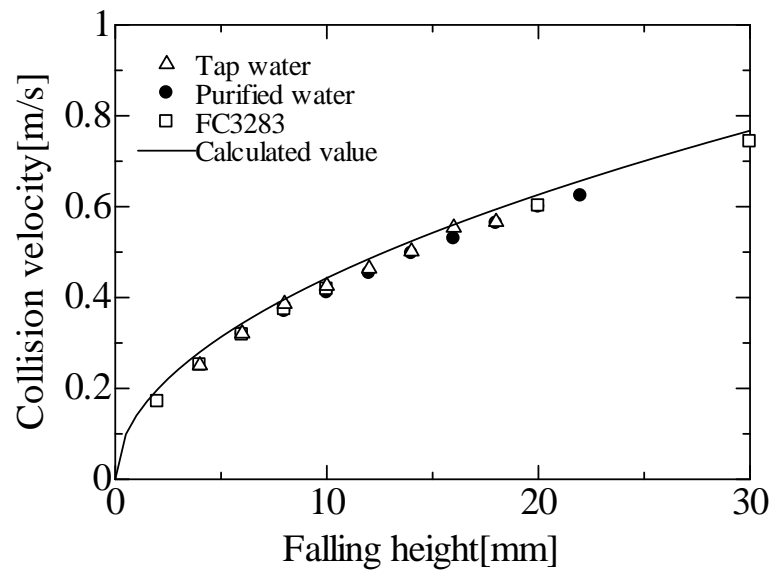


Fig. 2.12 Relationship between the falling height and the collision velocity.

2.3.2.6 液滴直径

液滴直径は、x 軸方向の直径と y 軸方向の直径の平均値として求める。なお、落下中の液滴の自由振動の影響を考慮するため、液滴が液体金属に衝突するまでの 5.0ms 間の各時系列画像より求めた値の平均値を測定値とした。以下に今回使用した液体の液滴直径の測定結果をまとめる。

Table. 2.3 Initial drop diameter of each fluid

Type of fluid	d_i [mm]
Purified water	2.49
FC-3283	1.17
Tap water	2.52

第3章 大気圧下沸騰挙動 評価実験

3.1 沸騰挙動観察

本節では高速度カメラによる沸騰挙動の撮影結果を，表面温度に対する変化，および衝突速度に対する変化ごとに整理して示す．

3.1.1 表面温度に対する変化

はじめに表面温度による沸騰挙動の変化について示す．Fig. 3.1 は衝突速度 0.37 m/s，表面温度 106 °C (図中左)，202°C (図中真ん中)，307°C (図中右) における撮影結果である．図中の上方に記載した数字は表面温度を表し，左側の数字は時刻に対応する．時刻は，液滴が液体金属表面に衝突した瞬間を時刻 0 ms と定義し，図には 0.5 ms ごとの撮影結果を記載している．なお，衝突する瞬間は撮影画像より目視で判断した．以後，断らない限り撮影結果は上述の方法に従い記載する．また，表面粗さを有する固体金属表面への衝突する場合の沸騰挙動と比較をおこなうため，Fig. 3.2 に銅板を使用した場合の撮影結果を示す．このとき，液滴の衝突速度は 0.37m/s，銅板の表面温度は 108°C (図中左)，211°C (図中真ん中)，313°C (図中右) であり，液体金属を使用した場合とほぼ同一条件における結果である．

第3章 大気圧下沸騰挙動評価実験

表面温度が 106°C の場合(図中左), 液滴は沸騰せず時刻の経過とともに静的に表面上にひろがっていく. このとき, 液滴底部の形状が 1.5ms から 2.5ms にかけて大きく変化している様子が観察される. 液滴の底部形状は, 1.5ms まで球状となっているが, 2.5ms においてはその形状が末広がり型に変化しており, 以後, その形状を維持した状態で表面上に広がっていく. また, 2.5ms においては, 液滴内部に気泡が形成されていることがわかる. 表面温度が 202°C の場合(図中真ん中), 2.5ms から 3.0ms にかけて 106°C の場合と同様な液滴底部の形状変化が確認される. また, 3.0ms において液滴内部に多数の微細気泡が形成されていることから, この表面温度においては沸騰が生じていると考えられる. 表面温度が 307°C の場合(図中右), 液滴はこれまで見てきた表面温度の場合と同様に, 2.5ms までは静的に液体金属表面上に広がり, その底部形状は球状となっている. しかし, 2.5ms 以後の液滴の挙動は, これまで見てきた表面温度におけるものと大きく異なる. 3.0ms において, 液滴底部の形状が大きく変化すると同時に, 液滴底部から突如として液体が高速で噴出している. 3.5ms からは, 液滴形状は不安定となり, 底部から微細液滴を飛散しながら大きく変形している. また, 2.5ms 以降の液滴内部の様子は, 表面形状が大きく乱れているために, 観察することができない.

つづいて, Fig. 3.2 の銅板へ衝突する液滴の沸騰挙動についてみていく. 表面温度が 108°C の場合(図中左), 沸騰は発生せず, 液滴は表面上に静的に広がっていく. しかし, 液体金属に衝突する場合に観察された底部形状の急激な変化は発生していない. この場合, 底部形状は 0.5ms から末広がり型となっており, そのままの形で表面上に広がっていくことがわかる. また, 0.5ms において液滴内部に気泡が発生している. なお, この表面温度は, 1.1.2 において述べた核沸騰領域に相当する. 表面温度が 211°C の場合(図中真ん中), 微細な液滴の飛散をとまなう激しい沸騰が生じている. 衝突直後から液滴の表面性状は激しく変形しており, 液滴内部の様子は観察することができない. この表面温度は, 1.1.2 において述べた遷移沸騰領域に相当し, 液滴と銅板との接触状態は, 沸騰により生成される蒸気によって不安定なものとなっている. 表面温度が 313°C の場合(図中右), 表面温度が 211° の場合に観察された微細液滴の飛散をとまなう激しい沸騰現象は発生していない. 液滴は静的に表面上に広がっていき, その底部形状は球状に近い形になっていることがわかる. しかし, その表面形状は非常に不安定であり, 激しく変形している様子が確認される. この表面温度は, 1.1.2 において述べた膜沸騰領域に対応しており, 液滴と銅板との接触は, 沸騰により生成された蒸気によって妨げられ, ほとんど生じていないと考えられる. このため, 表面温度が高温であるにもかかわらず, 液滴の激しい沸騰現象は発生せず, その変形挙動は穏やかなものとなる.

以上のように, 液滴の沸騰挙動は, 表面温度により大きく変化する. そして, 液滴が液体金属に衝突する場合には, ある時刻をさかいとして液滴の底部形状が大きく変化する現象, および液滴底部から液体が高速で噴出する現象が発生する. また, 銅板に衝突する場合には, 1.1.2 に示した各沸騰領域に対応した特徴的な沸騰挙動が観察される.

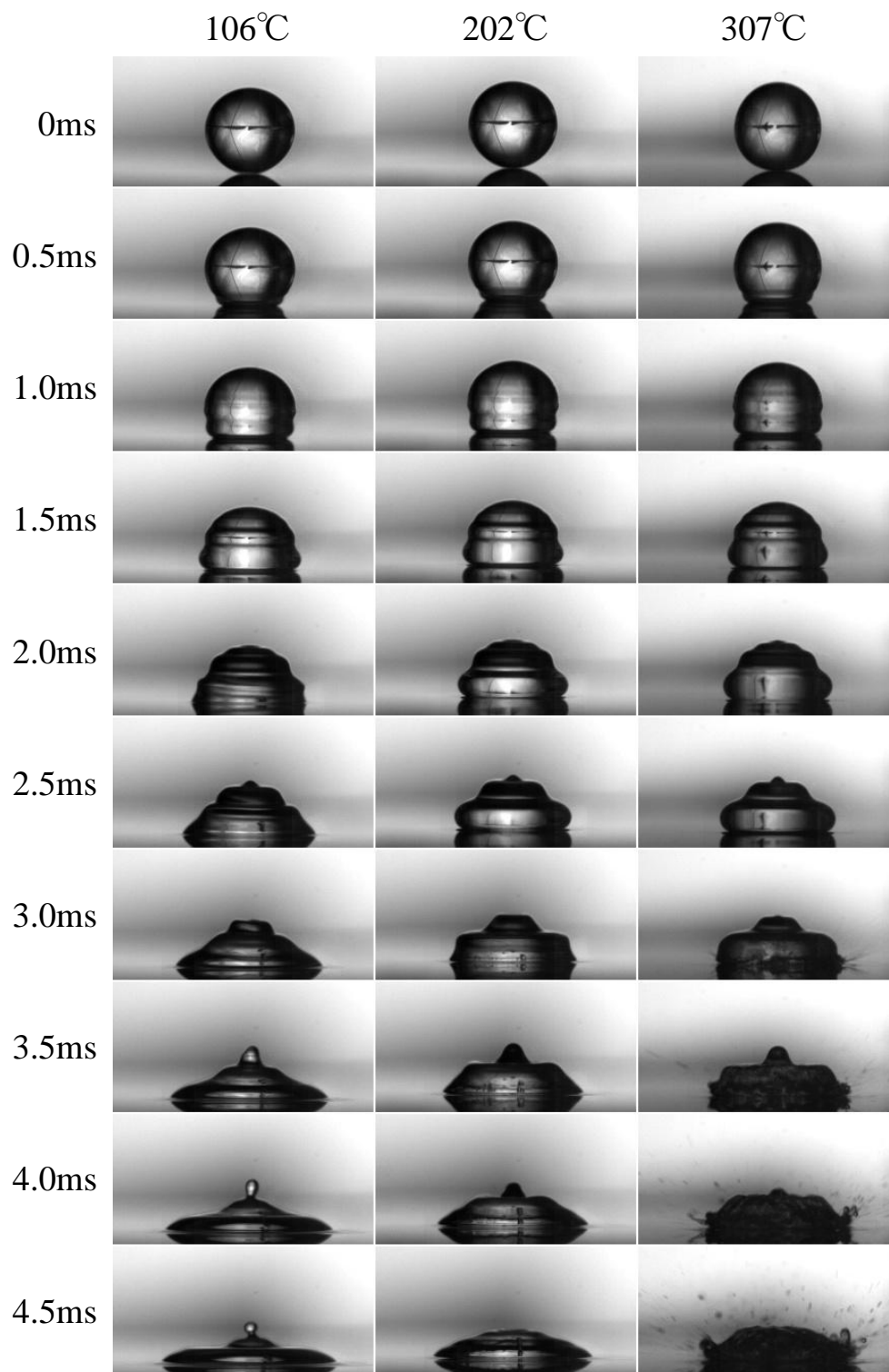


Fig. 3.1 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.37m/s. The surface temperature were 106°C(Left), 202°C(Center), 307°C(Right).

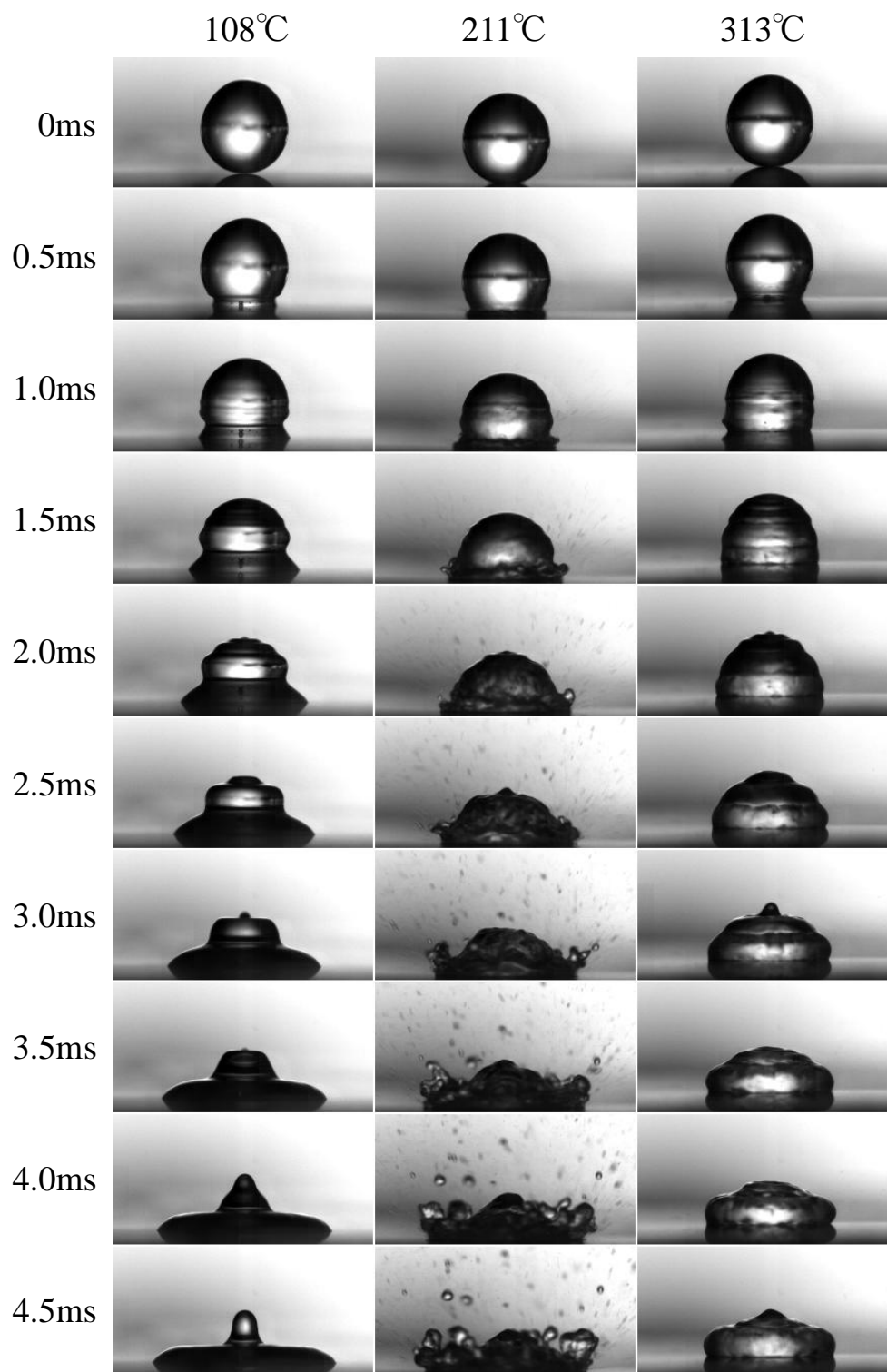


Fig. 3.2 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated copperplate surface. The collision velocity of droplets was 0.39m/s. The surface temperature were 108°C(Left), 211°C(Center), 313°C(Right).

3.1.2 衝突速度に対する変化

つづいて、衝突速度による沸騰挙動の変化を示す。さきほどと同様に、液体金属と銅板のそれぞれを衝突面として使用した場合の結果を Fig. 3.3, Fig. 3.4 に比較して示す。Fig. 3.3 は表面温度 300°C, 衝突速度 0.37m/s (図中左), 0.41m/s(図中真ん中), 0.51m/s(図中右)において液体金属に衝突する場合の撮影結果, Fig. 3.4 は表面温度 311°C, 衝突速度 0.37m/s(図中左), 0.41m/s(図中真ん中), 0.51m/s(図中右)において銅板に衝突する場合の撮影結果である。なお、図中上方に記載した数字は衝突速度を表す。

衝突速度が 0.37 m/s の場合(図中左), 液滴は静的に表面上に広がっていく。液滴の底部形状は、4.5ms においても球状のままであり、衝突直後から変化していない。なお 4.5ms 以後において、液滴は表面張力により収縮し、最終的に表面上から反発する。この過程をとおして、底部形状は球状に保たれ、変化しない。衝突速度が 0.41 m/s の場合(図中真ん中), 3.5 ms までは衝突速度が 0.37m/s の場合と同様に、液滴は静的に表面上に広がり、底部形状は球状となっている。しかし、3.5ms において、液滴底部から液体が高速で噴出している。3.5ms 以後、液滴形状は激しく変形し、底部からは微細液滴が飛散されている。また、4.0ms より、液滴上部からジェットが上方に向かって噴き出している様子が確認できる。衝突速度が 0.51 m/s の場合(図中右), 液滴底部より高速で液体が噴出する現象の発生する時刻が、衝突速度が 0.41m/s の場合と比較して早くなり、1.5ms においてその現象が発生している。1.5ms 以後においては、0.41m/s の場合と同様に、底部から微小液滴が激しく飛散されるとともに、液滴形状は不安定に変化する。また、液体の噴出現象が発生した直後より、液滴内部において大規模な気泡の発生・成長が確認される。さらに、衝突速度が 0.41 m/s の場合に観察されたジェットは発生していないものの、類似した現象として、3.0ms より液滴の上部が大きく盛り上がっている様子が確認できる。

一方、Fig. 3.4 に示した衝突面として銅板を使用した場合についてみると、衝突速度の変化に対して液滴の沸騰挙動は大きな変化を示さないことがわかる。すべての衝突速度において、液滴は微小液滴の飛散や急激な形状変化を伴わず、静的に表面上に広がっていく。ただし、その表面形状は時刻の経過とともに激しく変形している。

このように、液体金属に衝突する場合、液滴の沸騰挙動は衝突速度の変化に応じて大きく変化する。一方、銅板に衝突する場合、沸騰挙動の顕著な変化はみられない。また、液体金属に衝突する場合、液滴底部から液体が高速で噴出する現象が発生し、その発生時刻は衝突速度により異なる。この現象は、これまでに報告例がなく、発生機構など詳細は不明である。次節では、これらの特徴的な沸騰挙動を定量的に把握するためにおこなった変形挙動測定の結果について示す。

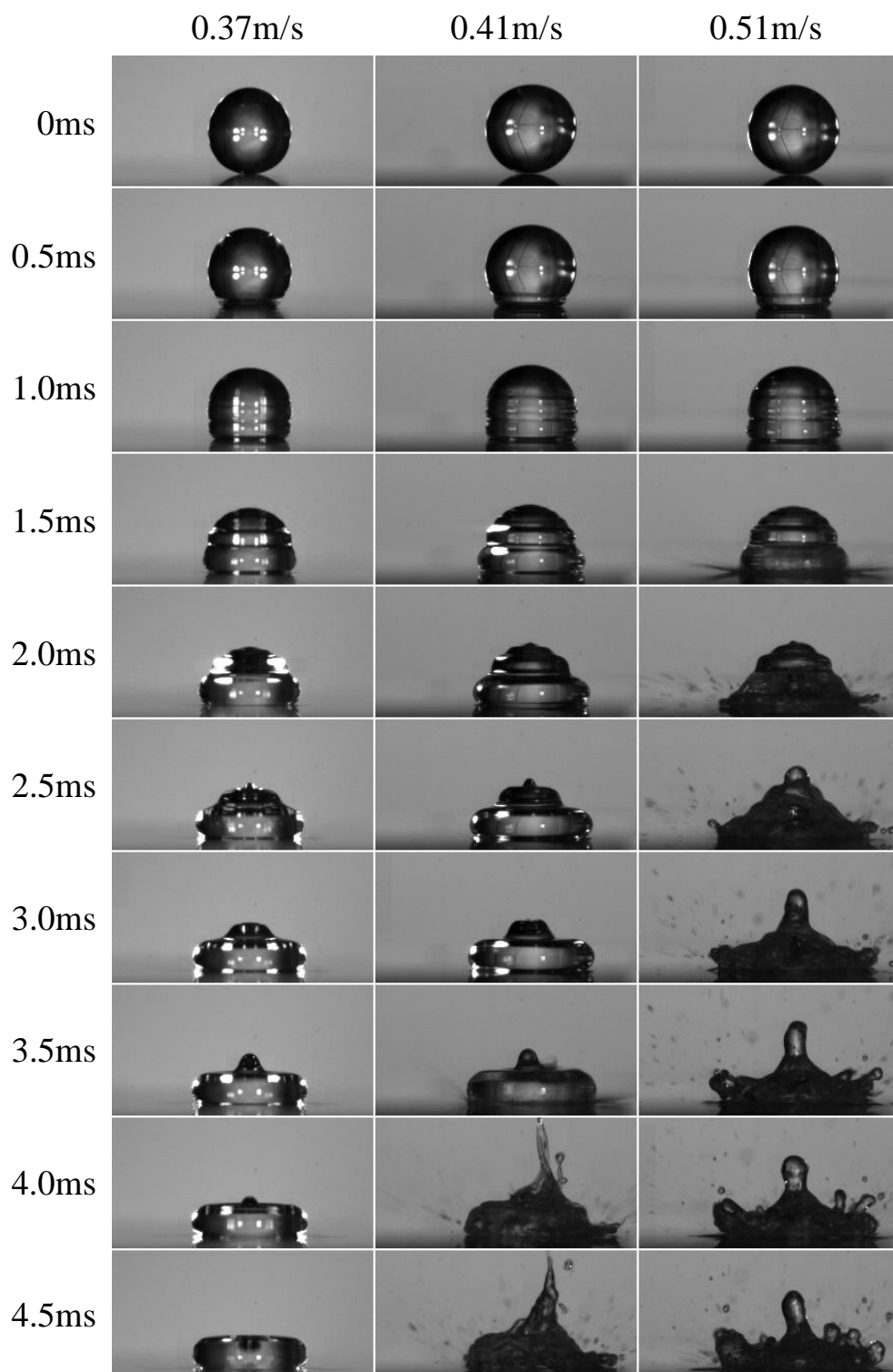


Fig. 3.3 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface. The surface temperature was 300°C. The collision velocity of droplets was 0.37m/s(Left), 0.41m/s(Center), 0.51m/s(Right).

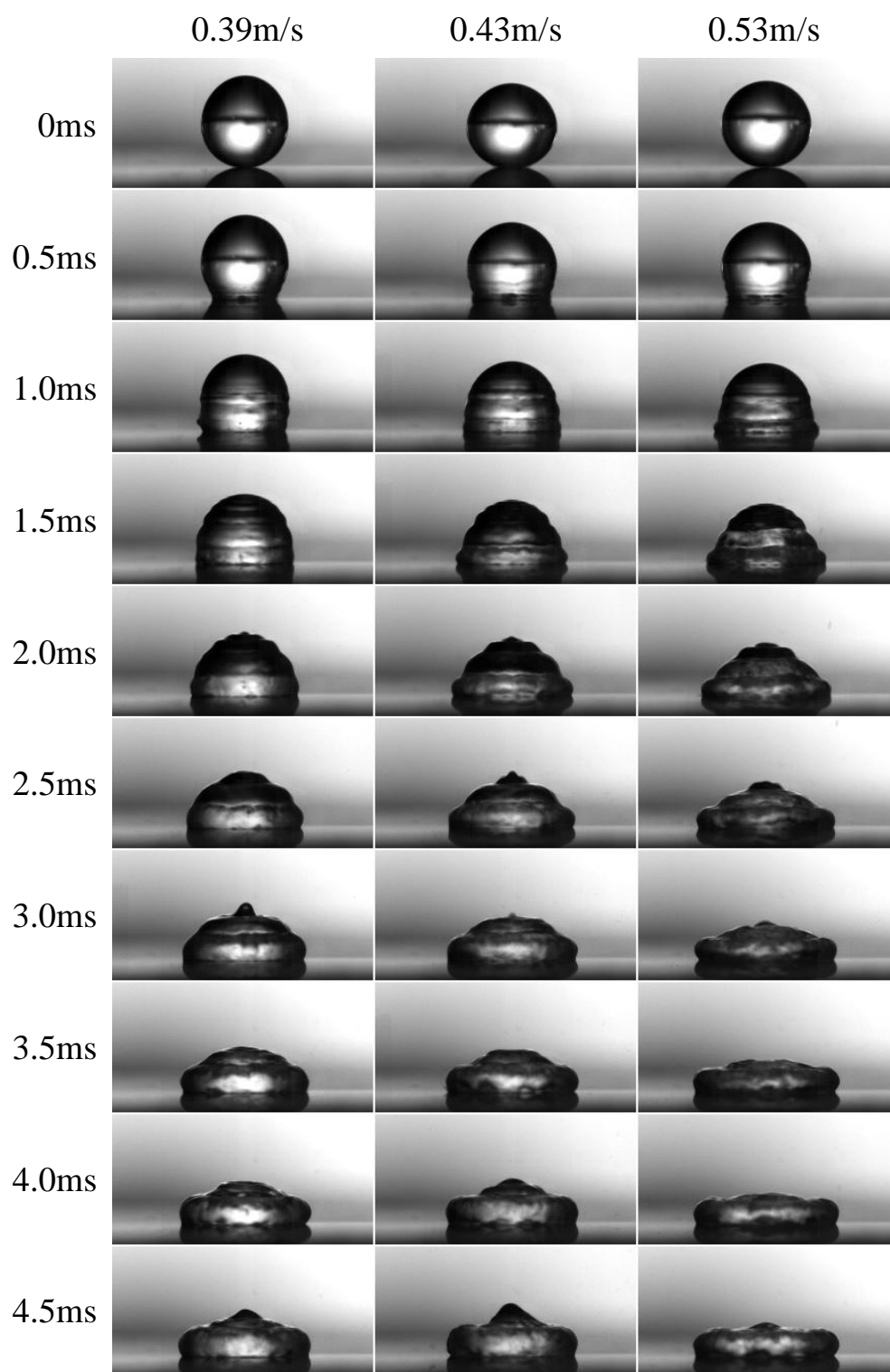


Fig. 3.4 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface. The surface temperature was 313°C. The collision velocity of droplets was 0.39m/s(Left), 0.43m/s(Center), 0.53m/s(Right).

3.2 変形挙動測定

本節では、上述した液体金属に衝突する液滴の特徴的な沸騰挙動を定量的に把握するためにおこなった変形挙動の測定結果を示す。なお、測定は2.3.2に定義したパラメータのうち、接触角 θ 、接触径 d_s 、高さ h についておこない、以下ではその順に結果を示す。

3.2.1 接触角 θ

Fig. 3.5 に衝突速度 0.37m/s、表面温度 106°C(図中□)、202°C(図中●)、307°C(図中△)における接触角の測定結果を示す。なお比較のため、衝突速度 0.39m/s、表面温度 108°Cにおいて銅板に衝突する場合の測定結果(図中+)を合わせて記載する。なお、0ms から 0.5ms においては、近似直線による接触角の算出に必要な液滴端部の形状情報を十分に得ることができないため、測定していない。銅板に衝突する場合(図中+)、接触角は衝突直後より緩やかに増加し、1.5ms からは約 40° のほぼ一定値となって推移している。一方、液体金属に衝突する場合、接触角はある時刻において急激な減少をとともなう推移を示す。表面温度が 106°C の場合(図中□)、接触角は衝突直後より約 150° で推移し、1.7ms から 1.9ms の間において、その値が 163° から 9° へと急激に減少している。表面温度が 202°C の場合(図中●)、接触角は衝突直後から約 160° で推移し、2.8ms から 2.9ms にかけて 168° から 13° へと急激に減少する。表面温度が 307°C の場合(図中△)、接触角は衝突直後から約 160° で推移し、2.9ms から 3.0ms の間において 168° から 23° へと急激な減少を示す。なお、表面温度が 307°C の場合、3.0ms 以降において液滴底部の変形が激しく、測定を正確におこなうことができなかったため、結果を記載していない。

つづいて、Fig. 3.6 に衝突速度 0.41m/s、表面温度 105°C(図中□)、202°C(図中●)、309°C(図中△)における測定結果を示す。また、Fig. 3.5 と同様に、比較のため、衝突速度 0.43m/s、表面温度 110°Cにおける、銅板に衝突する場合の測定結果(図中+)を合わせて記載する。銅板に衝突する場合(図中+)、接触角は衝突直後から緩やかに増加した後、1.0ms より約 40° のほぼ一定値となり推移しており、Fig. 3.5 において示した衝突速度が 0.39m/s の場合と同様の変化特性となっている。液体金属に衝突する場合、表面温度が 105°C の場合(図中□)、接触角は衝突直後より約 155° で推移し、1.0ms から 1.3ms の間において 155° から 11° へと急激に減少している。表面温度が 202°C の場合(図中●)、接触角は衝突直後より約 160° で推移し、1.6ms から 1.8ms にかけて 162° から 18° へと急激に減少する。表面温度が 309°C の場合(図中△)、接触角は衝突直後から約 170° で推移し、0.8ms から 0.9ms の間において 168° から 28° へと急激な減少を示す。なお、表面温度が 309°C の場合は Fig. 3.5 の場合と同様の理由により、1.0ms 以後における結果は記載していない。

Fig. 3.7 は衝突速度 0.51m/s、表面温度 120°C(図中□)、202°C(図中●)、309°C(図中△)にお

ける測定結果である。これまでと同様に、銅板に衝突する場合の測定結果(図中+)を合わせて記載してある。銅板に衝突する場合(図中+), 接触角は衝突直後から緩やかに増加した後, 1.2ms から約 35°Cのほぼ一定値で推移している。表面温度が 120°Cの場合(図中□), 接触角は衝突直後より約 170° となり, 0.9ms から 1.1ms の間において 170° から 17° へと急激に減少している。表面温度が 202°Cの場合(図中●), 接触角は衝突直後から約 175° で推移した後, 1.1ms から 1.2ms にかけて 177° から 20° へと急激に減少する。表面温度が 309°Cの場合(図中△), 接触角は衝突直後から約 170° まで緩やかに増加した後, 0.8ms から 0.9ms の間において 173° から 58° へと急激な減少を示す。なお, 表面温度が 309°Cの場合の 0.9ms 以降における結果は, これまでと同様の理由により記載していない。

このように, 液体金属に衝突する場合の接触角はある時刻において急激な減少を示す。この急激な減少は, 接触角の定義より, その時刻において液体金属と液滴が直接接触することにより生じる変化だといえる。2.3.2.1 において述べたように, 接触角は物体表面と液滴の界面力の釣り合いにより決まり, 表面張力の大きな物体表面において接触角は小さくなる。液体金属の表面張力は, 液滴の表面張力に比べて極めて大きく, 液滴と液体金属とが直接接触をしている状態において, 接触角は 90° 以下の値になると推測される。これは, 液体金属表面における静止液滴の接触角が 20°C以下となることから確認することができる。このため, ある時刻における接触角の急激な減少は, 液滴と液体金属とが直接接触を開始することにより生じるものであるといえる。つまり, 液滴は液体金属に衝突したとき, すぐにはその表面と接触しておらず, ある時刻が経過した後に直接接触することとなる。これは, 前節で示した液滴の沸騰挙動の撮影結果からも定性的に確認することができる。Fig. 3.1 に示したように, 表面温度が 307°Cと液滴沸点よりも 207°C高い表面温度において, 液滴は衝突直後から沸騰するのではなく, 3.0ms より急激な沸騰現象を呈している。液滴が衝突直後より液体金属と直接接触している場合, これだけの時間遅れをとまって沸騰が開始されることはなく, 衝突直後から沸騰が開始されるはずである。一方, 液滴が銅板に衝突する場合, この接触角の急激な減少は確認されず, Fig. 3.2 において示した撮影結果からもわかるように, 液滴は衝突直後より銅板と直接接触しているといえる。

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, 次節以降においてその特性・発生原理を調査した結果を示す。「遅れ時間」は液体金属表面に衝突する場合に見られる特徴的な液滴の沸騰挙動を発生させる主な要因であり, またその発生原理・特性は不明であり, 詳しい調査をおこなう必要がある。

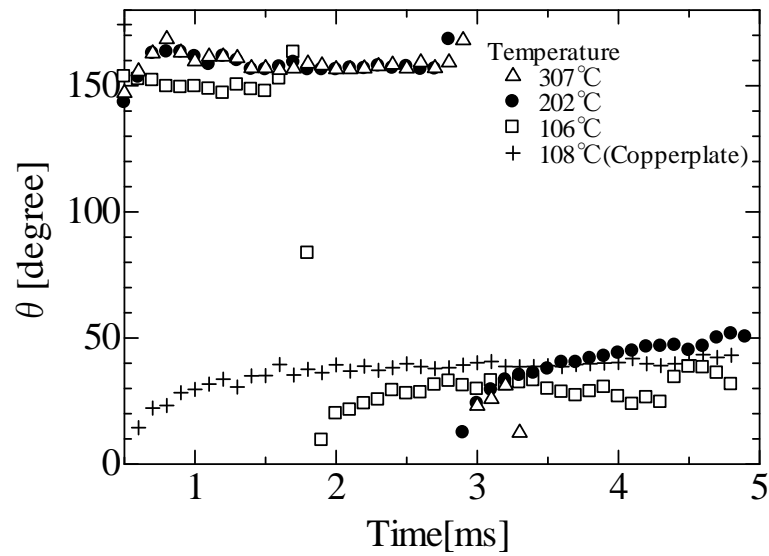


Fig. 3.5 Change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.37m/s.

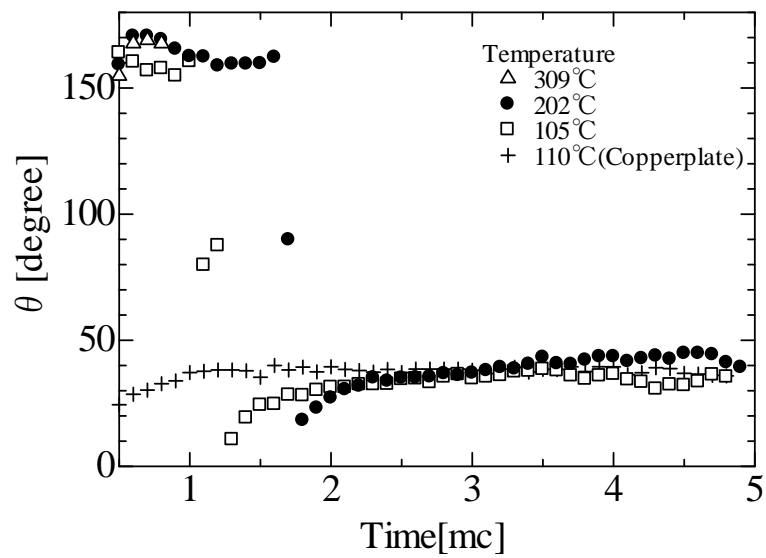


Fig. 3.6 Change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.41m/s

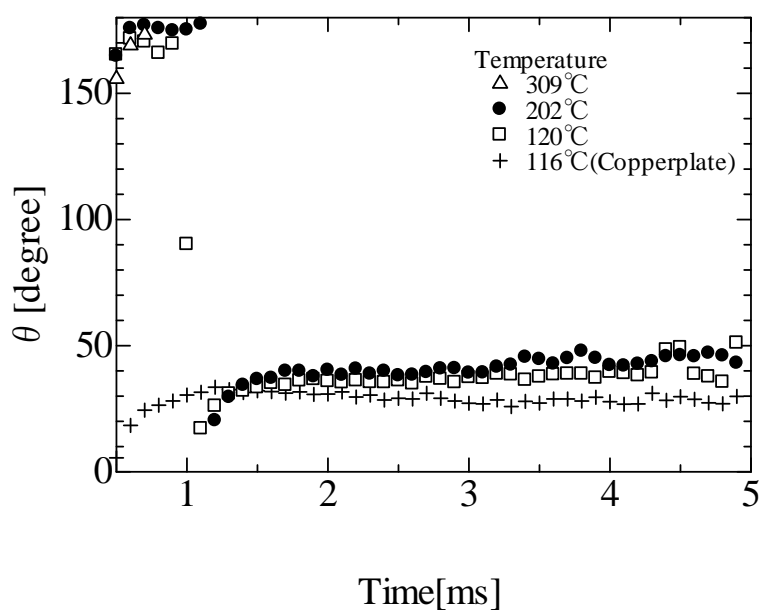


Fig. 3.7 Change of contact angles after collision of droplets to the liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.51m/s

3.2.2 接触径 d_s

Fig. 3.8 に衝突速度 0.37m/s, 表面温度 106°C(図中□), 202°C(図中●), 307°C(図中△)における接触径の測定結果を示す. なお比較のため, 衝突速度 0.37m/s, 表面温度 108°Cにおいて銅板に衝突する場合の測定結果 (図中+) を合わせて記載する. 銅板に衝突する場合(図中+), 接触径は衝突直後より単調に増加し, その変化は図中に近似式により表される. 液体金属に衝突する場合についてみると, 接触径は, 銅板に衝突する場合と比較して, 緩やかな増加傾向を示す. 表面温度が 106°Cの場合 (図中□), 接触径は衝突直後において急速に増加した後, 徐々に増加割合が緩やかになっている. しかし, 1.7ms から 1.9ms にかけて勾配が急激に変化している. この時刻は, 上述の接触角の測定結果(Fig. 3.4)において, 接触角の急激な減少が生じた時刻と一致しており, 液滴と液体金属が直接接触した結果, 界面における力の釣り合い関係が変化したことで生じたものだと見える. また, 勾配が増加するのは, 直接接触により接触径の拡大要因に液体金属表面の濡れ性の効果が加わり, その速度が増加するためである. 表面温度が 202°Cの場合(図中●), 接触径は衝突直後において急速に増加した後, 徐々に増加割合が緩やかになっている. しかし, 2.8ms から 2.9ms において勾配が急激に増加している. 表面温度が 307°Cの場合(図中△), 接触径は, 他の表面温度の場合と同様に, 衝突直後において急速に増加した後, 徐々に増加勾配が緩やかとなる. しかし, 2.9ms から 3.0ms において勾配が急激に増加している.

つづいて, Fig. 3.9 に衝突速度 0.41m/s, 表面温度 105°C(図中□), 202°C(図中●), 309°C(図中△)における測定結果を示す. なお比較のため, 衝突速度 0.43m/s, 表面温度 110°Cにおいて銅板に衝突する場合の測定結果 (図中+) を合わせて記載する. 銅板に衝突する場合(図中+)の接触径は, 衝突速度が 0.37m/s の場合と同様にして, 図中に記載した近似式とほぼ同様の推移を示す. ただし, 衝突速度が 0.37m/s の場合と比較して, 近似曲線との差異が大きいことがわかる. 液体金属に衝突する場合についてみると, 接触径は銅板の場合と比較して緩やかな増加傾向を示す. ただし, 衝突速度が 0.37m/s の場合と比較して, 液体金属に衝突する場合と銅板に衝突する場合の差は小さくなっている. 表面温度が 105°Cの場合(図中□), 1.0ms において勾配の増加がみられる. 表面温度が 202°Cの場合(図中●), 1.6ms から 1.8ms において勾配が急激に増加する. 表面温度が 307°Cの場合(図中△)も同様に 0.8ms において勾配の急激な増加が確認される.

Fig. 3.10 は衝突速度 0.51m/s, 表面温度 120°C(図中□), 202°C(図中●), 309°C(図中△)における測定結果である. これまでと同様に, 比較のため, 衝突速度 0.43m/s, 表面温度 116°Cにおいて銅板に衝突する場合の測定結果 (図中+) を合わせて記載している. 銅板に衝突する場合の接触径は, これまでに示した衝突速度における結果と異なり, 時刻に対して対数的な変化を示す. これは, 衝突速度が 0.37m/s, 0.41m/s においては接触径の拡大を引き起こす支配的要因が銅板の濡れ性であるのに対して, 衝突速度が 0.51m/s においては衝突による慣性力が支配的要因になるためだと考えられる. 液体金属に衝突する場合についてみると,

他の衝突速度における結果と比較して、銅板に衝突する場合との差が小さくなっていることがわかる。表面温度が 120°C の場合 (図中□), 0.9ms から 1.1ms にかけて勾配の増加が確認される。表面温度が 202°C の場合 (図中●), 1.1ms から 1.2ms において勾配が増加している。表面温度が 307°C の場合 (図中△), 0.9ms から 1.0ms にかけて勾配が増加した後、値が不安定に変動する。これは Fig. 3.3 に示したように、衝突直後から液滴の底部形状が激しく変形するためであり、正確な測定が行われていないと考えられる。また、この速度において確認される勾配の増加は、他の速度の場合と比較して小さいことがわかる。くわえて、衝突速度が増加するにともない、銅板に衝突する場合と液体金属に衝突する場合の差は小さくなっており、この速度においては衝突初期においてはほぼ同様の变化特性を示しており、最終的には液体金属に衝突する場合のほうが大きな値となっている。

以上のように、液体金属に衝突する場合の接触径は遅れ時間をさかいとして拡大速度が増加する。これは直接接触が生じることにより、液体金属の濡れ性が接触径を拡大させる力が加わるためである。この結果からも、接触角の変化により定義した遅れ時間が、直接接触が開始される時刻を表していることが確かめられる。また、銅板に衝突する場合との差、および遅れ時間における勾配の増加は、衝突速度が大きいほど小さくなる。

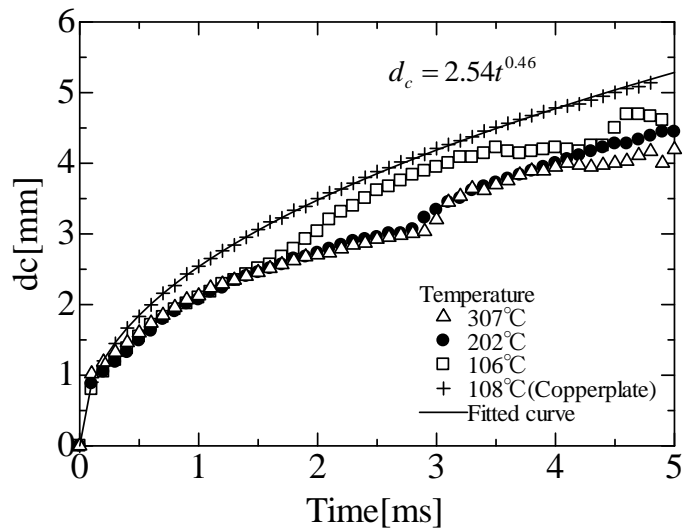


Fig. 3.8 Change of d_c after the collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity was 0.37m/s. The formula shows the fitted curve of measured result in case of copperplate.

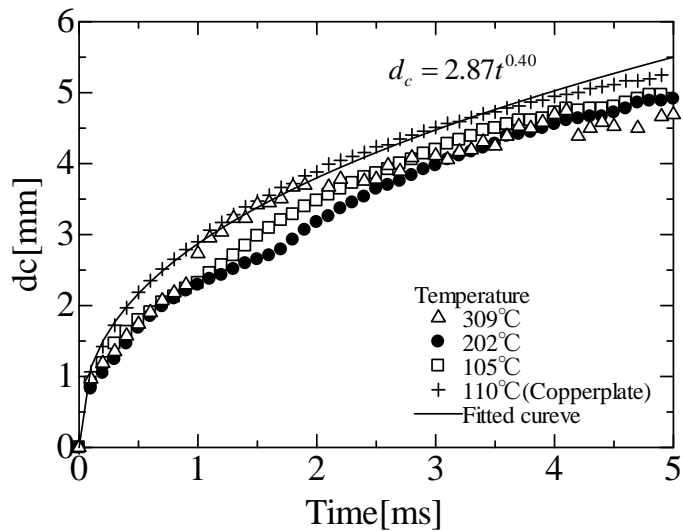


Fig. 3.9 Change of d_c after the collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity was 0.41m/s. The formula shows the fitted curve of measured result in case of copperplate.

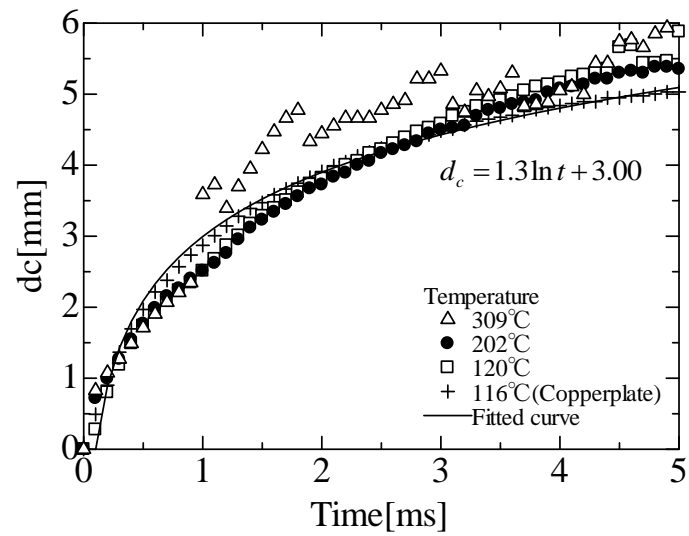


Fig. 3.10 Change of d_c after the collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity was 0.41m/s. The formula shows the fitted curve of measured result in case of copperplate.

3.2.3 高さ h

高さの測定結果においては、これまでに示した接触角、接触径と異なり、遅れ時間における急激な値の変化がみられない。これは、液滴と液体金属との接触が、液滴底部において発生する現象であり、その影響が高さに反映されるまでにはある程度の時間を要するためである。そのため、高さの測定結果は、時刻の径過とともに、各条件の差異が顕著になって現れる結果となっている。

Fig. 3.11 に衝突速度 0.37m/s, 表面温度 106°C (図中□), 202°C (図中●), 307°C (図中△) における高さの測定結果を示す。なお比較のため、衝突速度 0.39m/s, 表面温度 108°C において銅板に衝突する場合の測定結果 (図中+) を合わせて記載する。高さは 3.0ms まで、条件による相違はみられずほぼ同様の値で推移している。3.0ms において、液体金属に衝突する場合には増加傾向を示すが、銅板に衝突する場合には 3.5ms まで減少傾向となっている。表面温度が 106°C の場合、他の表面温度の場合と比較して 3.0ms 以降の値が大きくなっている。また、表面温度が 307°C の場合、4.5ms より急激な増加傾向がみられる。各表面温度条件における 3.0ms 以降の高さの推移は上下に変動していることがわかる。ただし、他の速度条件と比較して表面温度条件による相違は小さいといえる。

つづいて、Fig. 3.12 に衝突速度 0.41m/s, 表面温度 105°C (図中□), 202°C (図中●), 309°C (図中△) における測定結果を示す。また、比較のため、衝突速度 0.43m/s, 表面温度 110°C において銅板に衝突する場合の測定結果 (図中+) を合わせて記載する。高さは 2.5ms まで条件による相違はなく、同様の推移を示している。表面温度が 105°C の場合 (図中□), 高さは時刻の径過とともに単調に減少しており、衝突速度が 0.37m/s においてみられる増加傾向への反転は発生しない。これは衝突による慣性力が増加したことにより液滴が表面により強く抑えつけられるために高さ方向の変動も少なくなるためである。また、表面温度が 202°C の場合 (図中●), 高さは 3.0ms より急激に増加した後、3.4ms より急激な減少を示している。表面温度が 309°C の場合 (図中△), 高さは 3.2ms より急激な増加傾向を示す。これらの急激な増加傾向は、遅れ時間をさかいとして液滴と液体金属表面との接触が生じたときに発生する蒸発により生成される大量の蒸気のうち、底部から外部へと逃れることのできなかった蒸気が液滴内部を上方に運動して上部に達することにより、液滴上部の形状が変化するために生じるものである。

Fig. 3.13 は衝突速度 0.51m/s, 表面温度 120°C (図中□), 202°C (図中●), 309°C (図中△) における測定結果である。この衝突速度においては、表面温度が 309°C の場合 (図中△), 3.0ms より急激な増加が発生している。この増加傾向は、Fig. 3.3 に示したように、接触直後に液滴上部が盛り上がる現象を反映したものであり、その発生原理は上述したとおりであるが、衝突速度が速いほど増加傾向が顕著となっていることから、衝突速度が大きいほど、接触により発生する蒸気のうち液滴内部を上方に向かって運動する蒸気の量が多いと考えられる。また、この衝突速度においては、表面温度が 309°C の場合を除いてほぼ同様の

変化特性を示しており、衝突による慣性力が変形を生じさせている支配的な要因となっており、熱により引き起こされる変化の影響は小さくなっていると言える。

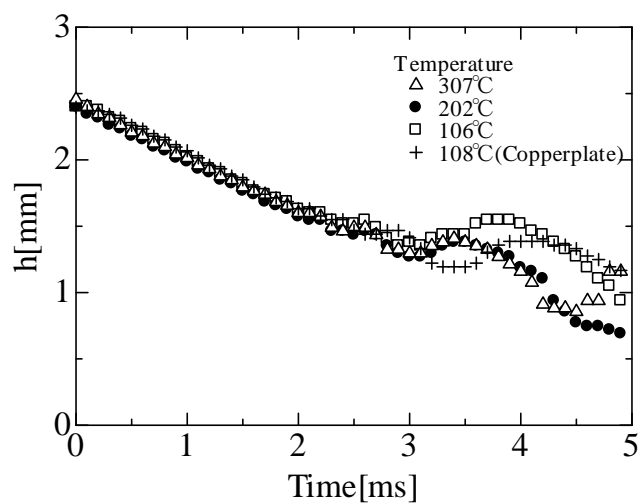


Fig. 3.11 Change of droplet height after collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.37m/s

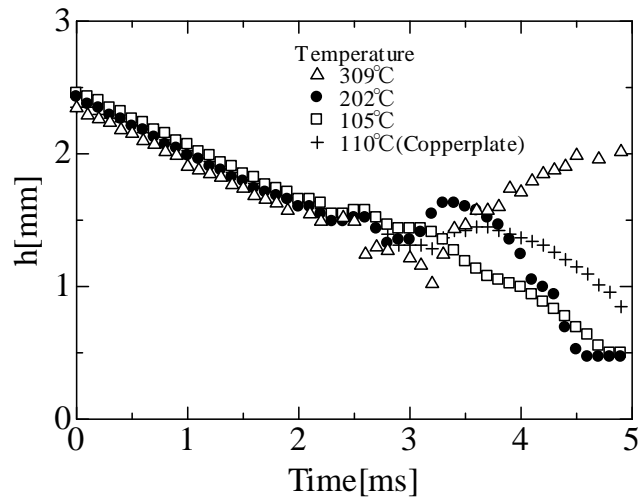


Fig. 3.12 Change of droplet height after collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.41m/s

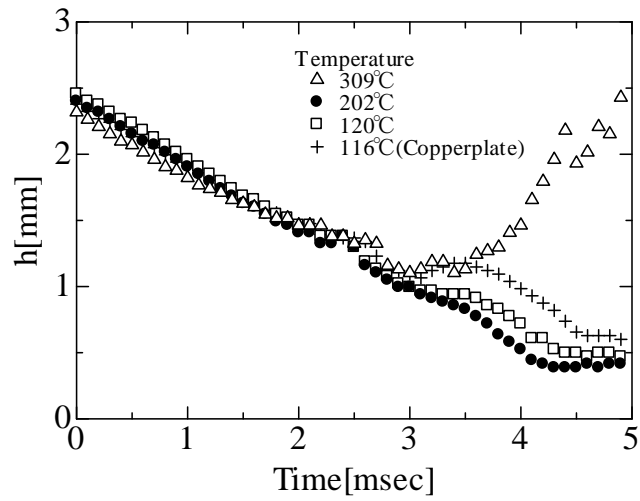


Fig. 3.13 Change of droplet height after collision of droplets to liquid metal surface. The collision velocity of droplets was 0.51m/s

3.3 遅れ時間測定

本節では、3.2.1 において定義した遅れ時間に、表面温度、衝突速度が及ぼす影響を調査した結果について示す。この遅れ時間は、液滴が液体金属に衝突する場合に観察される特徴的な沸騰挙動を引き起こす要因であり、その発生原理・特性を明らかにすることで液滴と高温金属表面との相互作用に関して新たな知見を得ることができると考えられる。

3.3.1 表面温度に対する変化

Fig. 3.14, Fig. 3.15 に表面温度が 100°C から 320°C における遅れ時間の測定結果を示す。なお、測定は衝突速度が 0.37m/s (図中□), 0.41m/s (図中●), 0.51m/s (図中△) の場合についておこなった。Fig. 3.14 は測定値をそのまま記載した結果であり、Fig. 3.15 は各表面温度における測定値の平均値を記載したものである。Fig. 3.14 に示したとおり、測定値に多少のバラツキはあるものの、Fig. 3.15 に示した平均値は各条件における遅れ時間の特徴を表した結果となっており、以下では Fig. 3.15 についてみていく。遅れ時間はすべての衝突速度において、表面温度が 160°C から 180°C の間で急激な増加傾向を示す。このときの増加量は衝突速度が小さいほど大きなものとなっている。また、表面温度が 160°C 以下においては、表面温度の上昇に対してほぼ一定値となり、表面温度が 180°C 以上においては衝突速度により変化特性が異なる。なお、遅れ時間は各表面温度条件において衝突速度が大きいほど小さな値となっている。衝突速度が 0.37m/s の場合(図中□)、遅れ時間は、表面温度が 180°C から 217°C においてはほぼ一定値となり、表面温度が 217°C から 228°C においては増加傾向を示す。そして、表面温度が 238°C 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。このある衝突速度条件において接触が発生しなくなる最小の表面温度を接触限界温度 T_d 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、表面温度が 180°C から 280°C において緩やかな減少傾向を示し、280°C から 306°C 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、表面温度が 180°C から 280°C において緩やかな減少傾向を示し、280°C から 306°C 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 320°C 以上であり、測定されなかった。

このように遅れ時間は表面温度に対して単調に変化するのではなく、急激な増加傾向を示す温度領域(表面温度:160°C から 180°C)、および減少傾向を示す領域(表面温度:180°C から 280°C)が存在することが明らかとなった。このため、遅れ時間は表面温度のみの関数として表すことができず、その特性を把握するためには、衝突速度、および遅れ時間に影響を及ぼす諸現象の効果を考慮しなければならない。

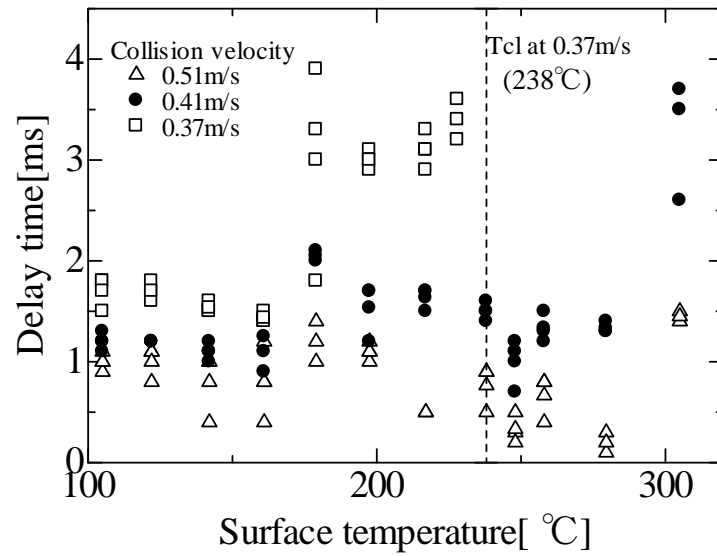


Fig. 3.14. Delay time at different surface temperature. Tcl shows contact limit temperature. The plot is original data

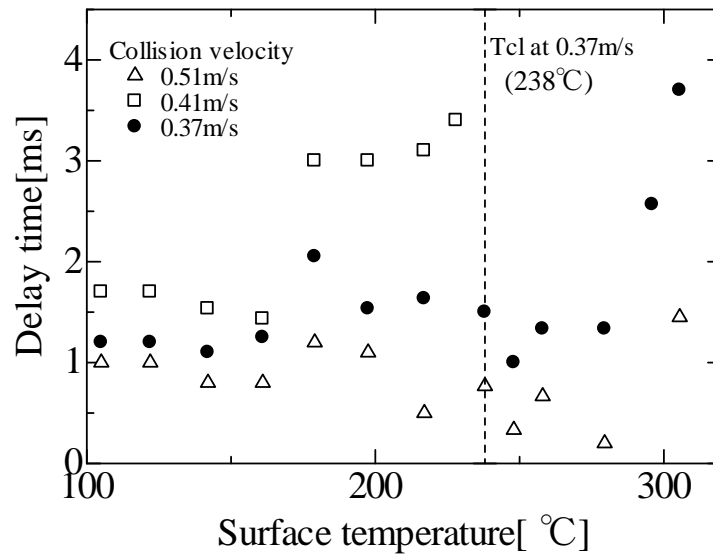


Fig. 3.15. Delay time at different surface temperature. Tcl shows contact limit temperature. The plot is arithmetic average values.

3.3.2 衝突速度に対する変化

Fig. 3.16, Fig. 3.17 に、衝突速度が 0.26m/s から 0.68m/s における遅れ時間の測定結果を示す。上述した表面温度との関係を示した場合と同様に、Fig. 3.16 は各衝突速度における測定値をそのまま記載した結果であり、Fig. 3.17 はその平均値を記載したものである。測定は表面温度が 104°C (図中□), 198°C (図中●), 300°C (図中△) の場合についておこなった。Fig. 3.17 においてその変化特性をみていくと、遅れ時間はすべての表面温度の場合において、衝突速度の増加にともない減少傾向を示しているが、その減少傾向は表面温度により異なる。表面温度が 104°C 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。表面温度が 198°C 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、衝突速度に対する遅れ時間の変化が表面温度が 104°C の場合と比べて大きくなっていることがわかる。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と定義し、図中に破線で示す。表面温度が 300°C の場合(図中△), 遅れ時間の減少傾向は、表面温度が 198°C 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、その指数は大きくなっている(衝突速度に対する変化が大きくなっている)。また、この表面温度条件における接触限界速度は 0.41m/s となり、表面温度が 198°C の場合と比較して高くなっている。

衝突速度が約 0.45m/s 以上においては、表面温度が異なる場合でも遅れ時間はほぼ同様の变化特性を示していることがわかる。この結果より、衝突速度が 0.45m/s 以上においては遅れ時間を決定するうえで衝突による慣性力が支配的となるということが出来る。すなわちこのときの遅れ時間は、液滴と液体金属表面との界面間に存在する、両者の接触を妨げている空気、または蒸気が衝突の慣性力により界面間から外部に排出されるまでに要する時間として説明することができる。そして表面温度などの他のパラメータは遅れ時間に対してほとんど影響を及ぼさない。表面温度が 104°C の場合、遅れ時間は衝突速度の一次関数として表されることから、表面温度の影響は小さい、つまり蒸発は発生していないと考えられる。表面温度が 198°C, 300°C においては衝突速度に対する遅れ時間の変化が大きくなり、この傾向が衝突速度が小さいほど顕著となっていることから、表面温度の影響、つまり蒸発の影響が大きくなっているといえる。衝突速度が小さいほど液滴は液体金属の表面から多くの熱量を受け取るため、結果として蒸発により生成される蒸気量は増加する。衝突速度の増加にともない、慣性力の低下による蒸気排出速度の低下とともに、この液滴への供給熱量が大きくなる効果も加わるため、衝突速度に対する遅れ時間の変化は大きくなると考えられ、表面温度が 198°C, 300°C の場合の結果はこれを反映したものであるといえる。

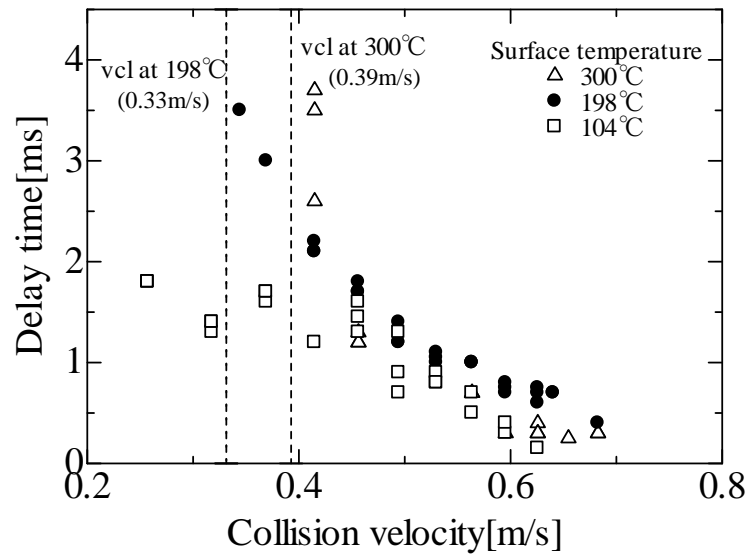


Fig. 3.16 Delay time at different collision velocity, T_{cl} shows contact limit velocity. The plot is original data

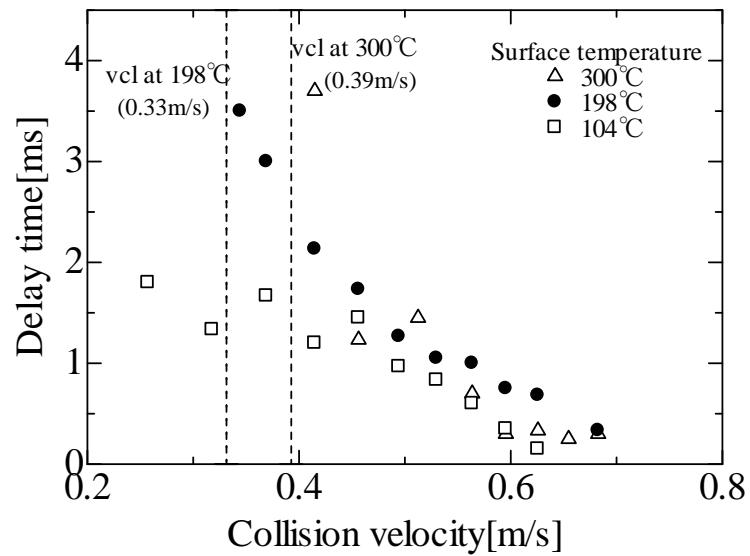


Fig. 3.17 Delay time at different collision velocity, T_{cl} shows contact limit velocity. The plot is arithmetic average value.

第4章 減圧下沸騰挙動評価実験

4.1 概要

4.1.1 液液非接触現象

Dell'Aversana ら[22][23][24]の研究によれば,異なる温度に保たれた液滴同士を接近させたさいに,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 らはこのような現象が発生する原理を,液滴同士が接近するさいに形成される温度勾配を駆動力とした,マランゴニ対流により発生する液滴表面間の空気の流れにより説明している.

Fig. 4.1 に Dell'Aversana らのおこなった実験の概要について示す[22]. 上下のロッド先端に液滴を保持し,上側の液滴温度を下側の液滴温度よりも高い値に設定する. ロッド先端にはペルチェ素子を取り付けられており, -20°C から 94°C の範囲で先端温度を設定することが可能である. それぞれのロッドを準静的に接近させ,そのときの液滴の接触状況を観察する. 異なる温度に保たれた液滴同士が接近したさい,それぞれの液滴内部にはマランゴニ対流により Fig. 4.2 のような流れが発生する. このマランゴニ対流とは表面張力の不均一分布を駆動力として発生する対流であり,液体の表面張力が温度に対して変化するために生じるものである. この対流の様子は微細なガラス粒子をトレーサーとして使用した対流

第4章 減圧下沸騰挙動評価実験

の可視化実験により確かめられている。液滴表面間では、この対流により周囲の空気が引きずられることにより、Fig. 4.2のような空気の流れが発生し、液滴同士の接触を妨げるため、液滴同士が接近後も直接接触をしないと考えられている。Fig. 4.3は Dell'Aversana らのおこなった実験結果の一例である。液滴には 5cSt シリコンオイルを使用し、その直径は 3.0mm である。また、Fig. 4.4 には Dell'Aversana らのおこなった実験手順を示す。このとき液滴には 5cSt シリコンオイルを使用し、その直径は 1.5mm である。図中上部のグラフは両液滴の温度推移を表し、上部液滴の初期温度は 45°C、下部液滴の初期温度は 15°C に設定され(イラスト a)、ゆっくりと接近する(イラスト b)。このとき、上述した原理により液滴表面間に空気の流れが形成され、液滴同士は接触せず(イラスト c)、例えば両者が滑る位置までロッドを接近させても接触は発生していない(イラスト d)。この現象は液滴同士をいったん引き離し、再び接触し場合にも繰り返し観察される(イラスト e, f)。その後、接近させた状態で約 1 時間放置しても、両者は接触しない状態に保たれる。しかし、両者の温度差を次第に小さくしていくと、温度差がある温度を下回ると接触が開始される(イラスト g)。5cSt シリコンオイルの場合、この温度差は $3.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ となる。このような結果は上下の温度関係が逆の場合にも観察される。Dell'Aversan らは、ここに示した実験の他にも、異なる流体を使用した実験、微小重力下における実験、また高速回転する液面上に等温条件で液滴を接近させる実験をおこない、液滴の物性値により接触が生じなくなる最小の温度差が異なること、等温条件においても界面間に空気の流れが存在する場合には非接触現象が発生することなどを明らかとしている。また Dell'Aversan らは分子動力学法によるシミュレーションをおこなり、定性的な説明を加えている。

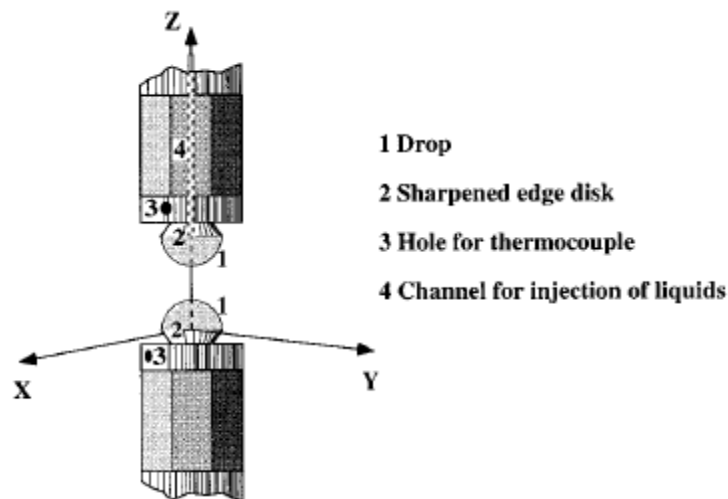


Fig. 4.1 Experimental apparatus showing pendant and sessile drops. [22]

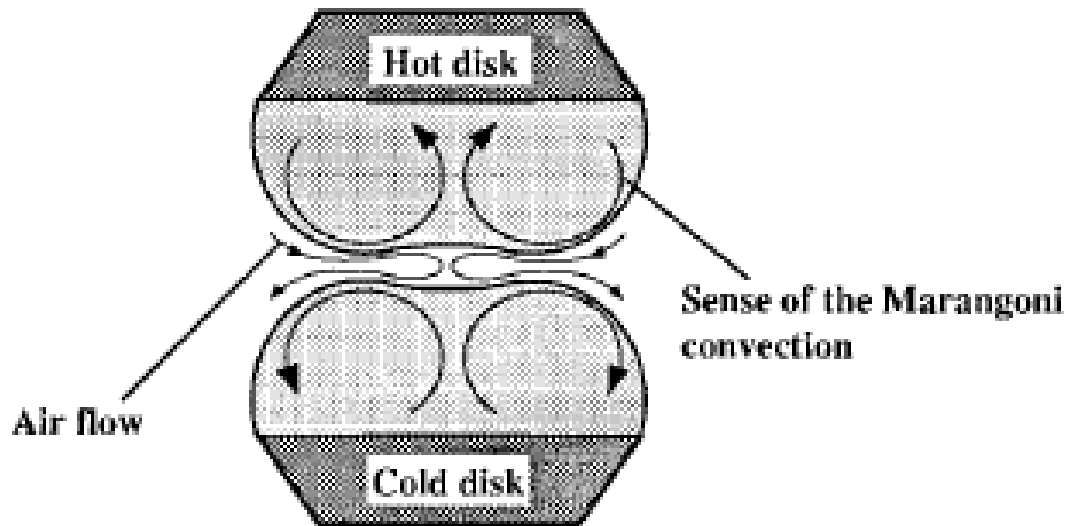


Fig. 4.2 Sketch of the flow two non-coalescing drops held at different temperatures. The gap thickness is exaggerated to display the direction of motion in the entrained air film [22]



Fig. 4.3 Non-coalescence of two 5 cSt silicone oil drops. The rods have a diameter of 3.00mm. Pressing against one another clearly deforms the interfaces. [22]

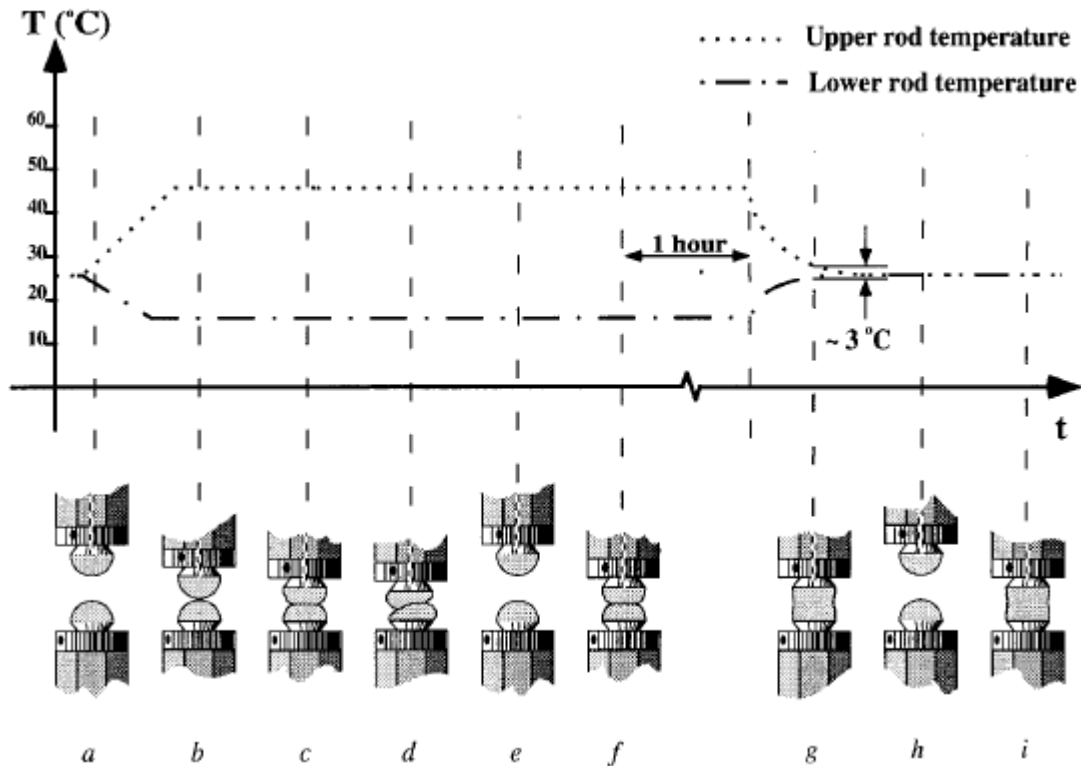


Fig. 4.4 Drop against drop at different temperatures: (a) drop formation and thermalization; (b) first contact; (c) further squeezing; (d) slipping; (e) detachment; and (f) the drops are brought in contact again. After one hour without coalescence ΔT is progressively reduced: (g) coalescence at $\Delta T=2.5^{\circ}\text{C}$ and consequent formation of a liquid bridge; (h) new drops obtained by stretching and breaking the liquid bridge; (i) immediate coalescence with $\Delta T=0$. [22]

この空気の流れによる非接触現象は、液滴が異なる温度に保たれた液面、または滑らかな固体表面に接近する場合にも発生し、Monti ら[25][26][27]は低温固体表面に高温液滴を接近させた場合に発生する非接触現象に関して、マランゴニ対流により発生する空気の流れの層の厚さをカメラによる撮影、およびレーザー干渉法により測定している。さらに界面間における N-S 式を液滴表面における表面張力勾配を境界条件として解くことにより数値的に空気層厚さを算出し、実験結果とよい一致を示す結果を得ている。

ここで、本研究で扱う高温液体金属に液滴が衝突する場合に、液滴と液体金属表面との間に形成される空気の流れについて考える。液滴が高温の液体金属表面に接近したとき、液滴内部には Fig. 4.5(a)のような温度勾配が形成される。そしてこの温度勾配により、Fig. 4.5(b)に示すようなマランゴニ対流が発生する。ただし、Uアロイ 70 の表面張力温度係数は本研究においては測定することができず不明なため、一般的な液体の表面張力温度係数と同様に負であると仮定する。なお、マランゴニ対流の発生と同様に、自然対流が発生すると考えられるが、液滴の直径が 2.5mm と非常に小さく、表面張力の効果が、密度変化と比

較して支配的な力となるため考慮しない. この対流により, 液滴と液体金属との間には Fig. 4.5(b)に示すような空気の流れが形成される. これは Fig. 4.2 に示した Dell'Aversana らの実験における流れと逆方向の流れであり, この空気の流れにより, 液滴と液体金属表面との接触が生じないことは十分に考えられる. そこで, このマランゴニ対流により形成される空気の流れによる非接触現象発生の有無を実験的に検証するため, 減圧下においてこれまでと同様の実験をおこなった. この空気の流れによる非接触現象が生じるとき, 大気中に存在する空気が接触を妨げる直接の要因となる. このため, 周囲空気密度が低い環境においては, 巻き込まれる空気の密度が低下することから, 直接接触を妨げる働きが弱くなり, この非接触現象が発生しないことが予想される. よって減圧環境下においてこれまでと同様の実験をおこなうことで, 衝突時に形成される対流により誘発される空気の巻き込みが遅れ時間を発生させる要因か否かを確認することができる.

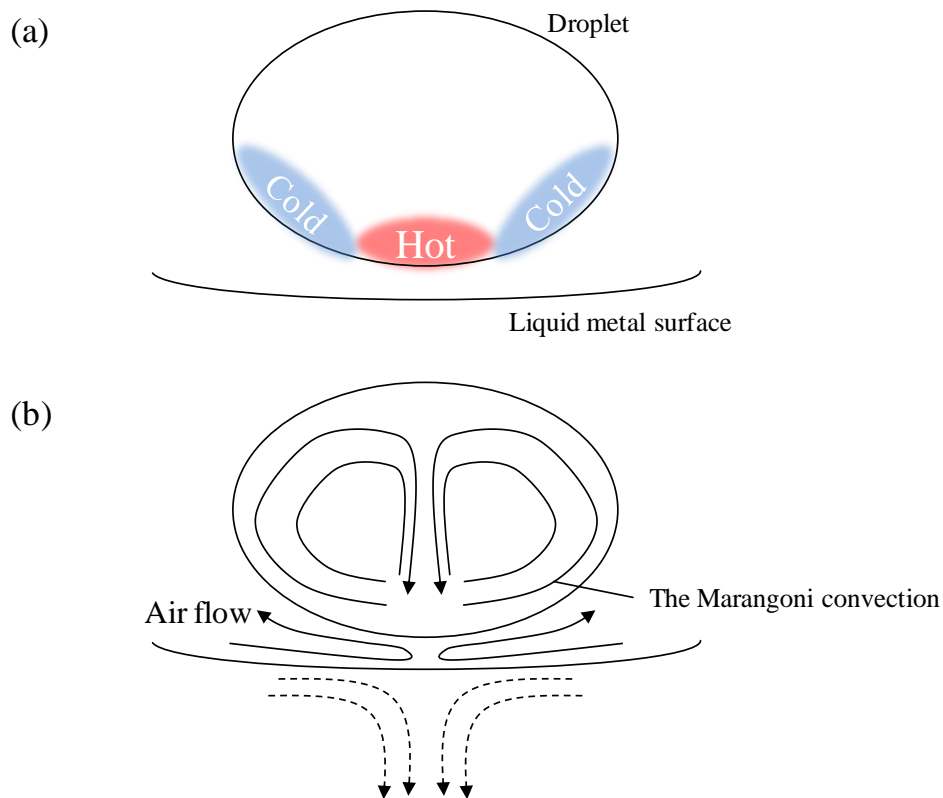


Fig. 4.5 (a)Schematic of the temperature gradient inside the droplet when the droplet approaches to the liquid metal surface.

(b)Schematic of the flow patterns of the marangoni convection inside the droplet and the air flow between the surface of the droplet and liquid metal surface.

4.1.2 実験方法

以下に減圧下実験で使用した実験装置について説明する。Fig. 4.6は減圧下実験において使用した装置の概要図である。減圧下における実験を実現するため、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て減圧ポンプにより容器内の圧力を調整し、これまでと同様に高温液体金属に衝突する液滴の沸騰挙動を高速度カメラを使用して撮影する。アクリル容器、および、圧力調整のための機器以外は、2.1で示した大気圧下における測定で使用したものと同一である。容器内を密閉するために、ホットプレートの電源、熱電対、PEEK チューブはゴム栓に穴を開け、その中を通して外部と接続されている。このゴム栓の穴はシリコンコンシーラにより密閉する。容器内の圧力はデジタル圧力計により測定し、本装置により実現することのできる最小の圧力は3.0kPaである。しかし、圧力の減少にともない、液滴の沸点は低下し、たとえば3.0kPaにおいて精製水の沸点は24.1°Cとなる。この温度は実験をおこなった部屋の室温(約23°C)とほぼ同じであり、液滴はシリンジからチューブ先端に至る過程において沸騰してしまうため、液滴が安定して形成されない。また圧力の低下にともない、容器内の密閉性が高まるため、ホットプレートの熱によって容器内が高温となり液滴の形成はさらに困難なものとなる。このため、本研究では液体がチューブ内において沸騰せず、液滴が安定した形で形成される最低圧力である50±3kPaにおいて測定をおこなうこととした。なお、この圧力における液滴の沸点は、81.3°Cである。液滴には精製水を使用し、液滴の直径は2.48mm、液滴の衝突速度は0.43m/sで一定とした、高速度カメラによる撮影速度は10000fpsである。

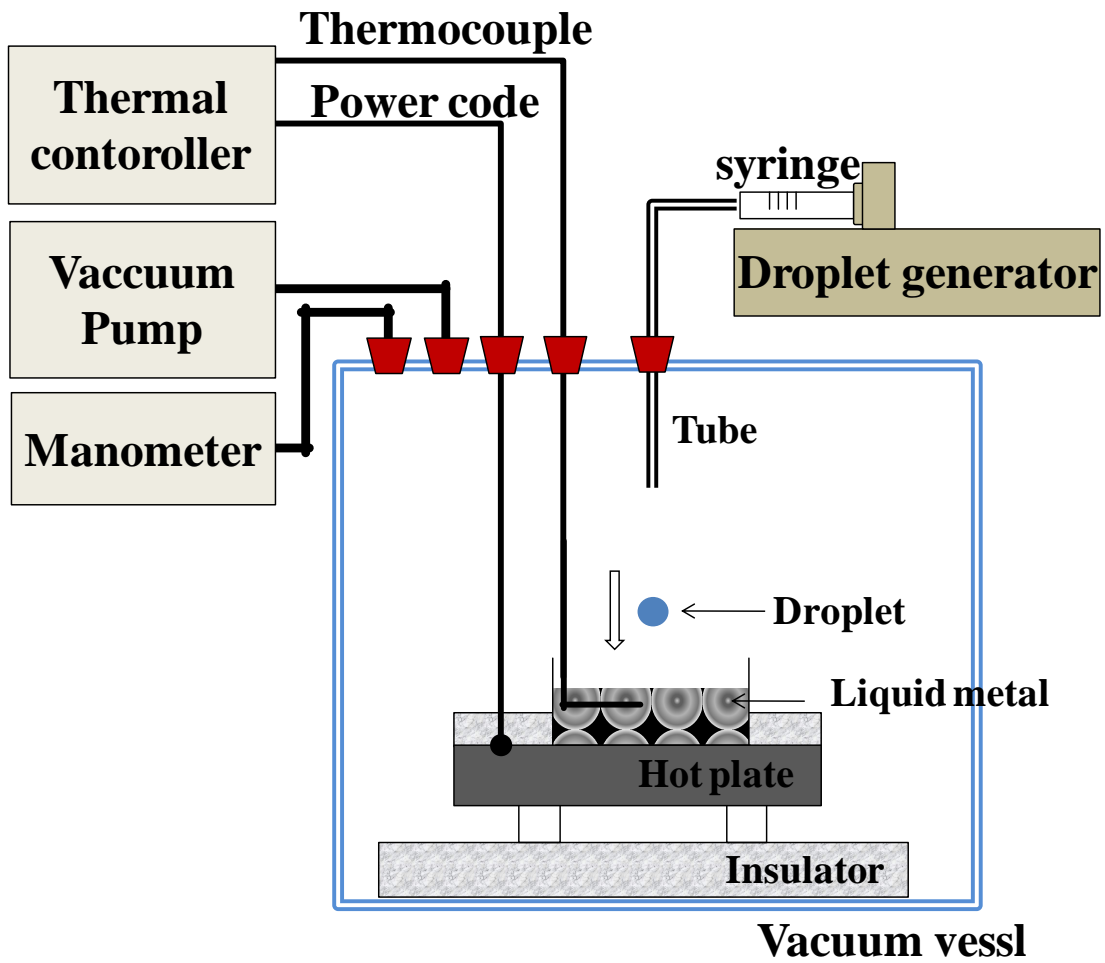


Fig. 4.6 Schematic of experimental setup of experiment in reduced pressure condition

4.2 沸騰挙動観察

Fig. 4.7 に衝突速度 0.43 m/s, 表面温度 124°C(図中左), 164°C(図中真ん中), 240°C(図中右)における撮影結果を示す. なお, 各結果の圧力はそれぞれ 49.7kPa(図中左), 52.2kPa(図中真ん中), 50.7kPa(図中右)であり, 図中上方の括弧内に記載する. この結果より, 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. 表面温度が 124°Cの場合(図中左), 液滴は沸騰せず, 時刻の径過とともに静的に表面上にひろがっていく. そのさい, 液滴の底部形状が 1.5ms から 2.5ms にかけて大きく変化している様子が観察される. 液滴の底部形状は, 1.5ms まで球状となっているが, 2.5ms においては末広がり型になっており, 以後, その形状のまま表面上に広がっていく. この様子は, Fig. 3.1(図中左)に示した大気圧下の挙動と類似している. また 2.5 ms においては, 液滴内部に気泡が形成されていることがわかる. この気泡は液滴と液体金属との接触が不均一におこなわれるために, 接触面の一部分に空気が取り込まれるために生じるものである. 表面温度が 164°Cの場合(図中真ん中), 4.0ms から 4.5ms にかけて底部形状の変化が確認される. Fig. 3.1(真ん中) に示した大気圧における結果と比較すると, 形状変化の開始タイミングが遅くなっていることがわかる. また, 4.5ms 以後においては, 液滴内部に多数の微細気泡の成長・消滅が観察され, この表面温度においては沸騰が生じていると考えられる. 表面温度が 240°Cの場合(図中右), 3.5ms まで液滴は静的に表面上に広がり, その底部形状は球状となっている. しかし, 4.0ms において, 液体金属と接触した直後に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いる. このとき減圧下では, Fig. 3.1(図中右)に示したような液滴底部からの液体の噴出現象は発生しない. これは減圧下では液滴の初期温度が大気圧下と比べて高く, 接触が発生する時点において液滴底部の大部分が加熱された状態にあり, ひとたび接触が生じると液滴底部の全体において急激な相変化が生じるためである. 大気圧下の場合には液体金属表面と直接接触した底部の一部分のみが急激な沸騰を開始することにより, それにより生成された蒸気が周りの液体を巻き込んで外部に放射状に噴出する.

以上のように, 減圧下では, 大気圧下と比較して液滴と液体金属との接触後に発生する沸騰現象に多少の違いはあるものの, 全体的な挙動は類似しており, 時間遅れが発生することがわかる.

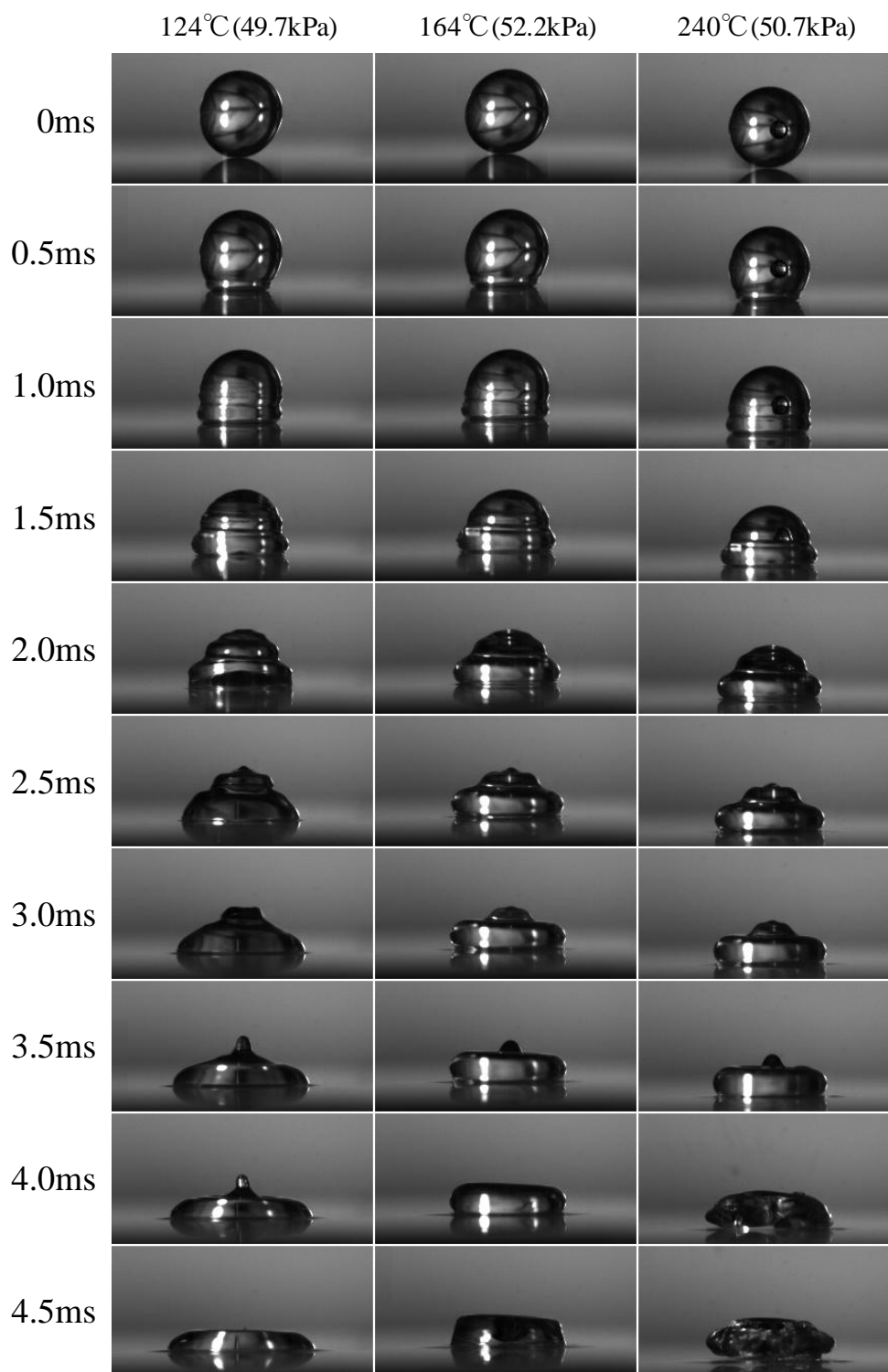


Fig. 4.7 Time sequential images of boiling behavior of droplets impinging to heated liquid metal surface in reduced pressure condition. The collision velocity of droplets was 0.43m/s. The surface temperature was 124°C (Left), 164°C (Center), 240°C (Right). The pressure was 49.7kPa (Left), 52.2kPa (Center), 50.7kPa (Right).

4.3 遅れ時間測定

減圧下実験においては遅れ時間の表面温度に対する変化のみ測定をおこなった。Fig. 4.9 に表面温度が 105°C から 240°C における遅れ時間の測定結果を示す。なお、表面温度が 240°C 以上においては液滴を安定に形成することができず、測定をおこなっていない。また、Fig. 4.8 に大気圧下の測定結果 (図中○, 衝突速度: 0.41m/s) との比較のため、横軸を過熱度とした測定結果を示す。図中の値は、測定値をそのまま記載したものである。減圧下の遅れ時間の変化特性は、大気圧下の場合と同様であり、遅れ時間が過熱度の上昇にともな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 242K) 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。減圧下において遅れ時間が急激な増加傾向を示す領域が大気圧下におけるそれと若干異なるのは、減圧下実験の初期液滴温度が大気圧下と比較して高いためである。

この結果より、減圧下でも遅れ時間が発生すること、およびその過熱度に対する変化特性は大気圧下のものとほぼ同様であることがわかる。この結果より、マランゴニ対流により形成される空気の流れは、遅れ時間を発生させる主要因でないといえる。また、過熱度が 80K 以上において減圧下の遅れ時間が大気圧下の遅れ時間の約 2 倍となるという結果は、遅れ時間の発生に蒸発により生成される蒸気に関係していることを示唆するものであると考えられる。

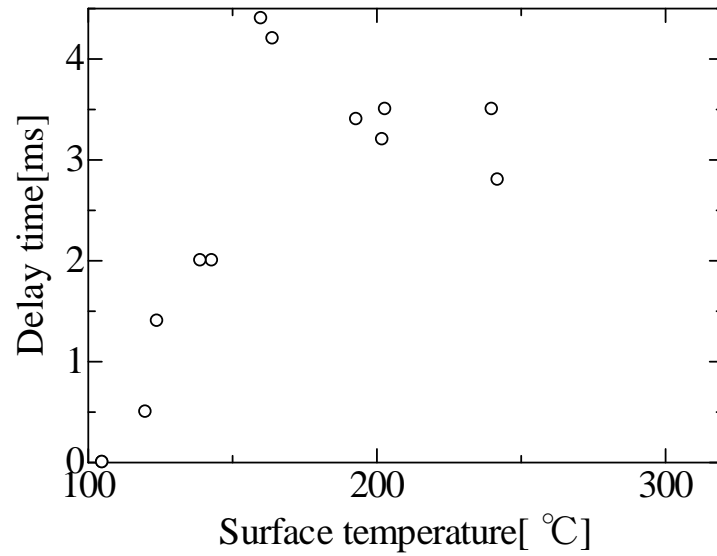


Fig. 4.9 Delay time at different surface temperature in reduced pressure condition. The collision velocity was 0.43m/s. The pressure in the vessel was 50 ± 3 kPa. The plot is original measured data.

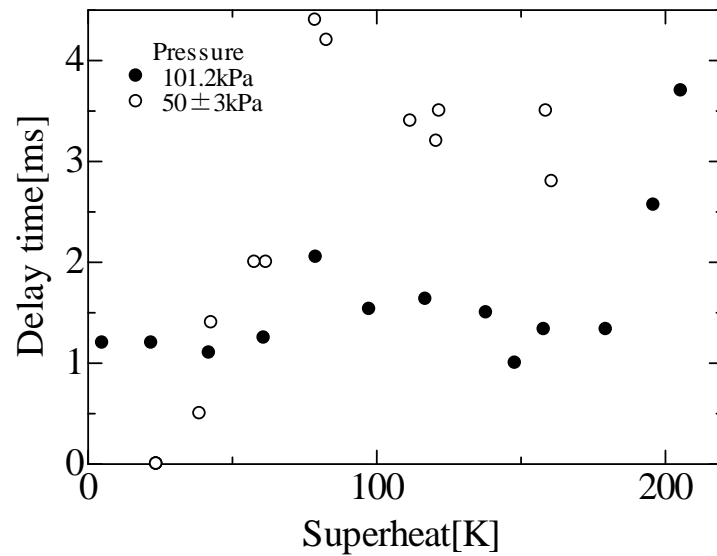


Fig. 4.8 Comparison of delay time at atmospheric pressure and reduced pressure. The collision velocity of atmospheric pressure was 0.41m/s and the one in reduced pressure condition was 0.43m/s.

第5章 考察

5.1 遅れ時間発生モデル

これまで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，表面温度により支配的となる要因が異なると考えられる．また，表面温度が高温の場合，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，遅れ時間の発生要因が異なると考えられる過熱度領域ごとに分けて，遅れ時間発生モデルの検討をおこなっていく．

5.1.1 過熱度:0K~60K

Fig. 3.15 に示したように，過熱度が 0K から 60K においては，遅れ時間は過熱度に対して一定値となる．また，Fig. 3.17 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．つまり遅れ時間は衝突速度に比例して減少する．さらに，Fig. 4.8 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，Fig. 5.1 に示すように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界面間から外部に排出されるまでに要する時間であるといえる．このと蒸発は発生せず表面温度は遅れ時間の発生に影響を及ぼさない．蒸発により生成される蒸気が，遅れ時間を発生させる要因である場合，遅れ時間は表面温度の増加に対して増加傾向を示す．これは，蒸発による蒸

気生成量が液体の飽和蒸気量により決定されるためであり、表面温度に対して遅れ時間が一定値をとることは、蒸発による影響が存在しないことを意味する。また、遅れ時間が衝突速度の一次関数により表すことができる結果は、遅れ時間が界面間に存在する空気の排出速度として定義できることを示す。界面間に蒸発により蒸気が発生する場合、蒸気の生成量によって遅れ時間は異なる。そして、この蒸気生成量は液体金属表面から液滴に伝わる熱量により決定されるものであり、液滴がゆっくりと液体金属表面に接近するほど液滴は多くの熱量を輻射・熱伝達により液体金属表面より受ける。このため、衝突速度が減少する場合、衝突速度の減少による蒸気排出速度の減少とともに、液体金属表面から伝えられる熱量の増加による蒸気生成量の増加が加わり、遅れ時間は衝突速度に対して単純な比例関係とはならない。このため、表面温度が低い場合においては、蒸発により発生する蒸気はほとんど発生しておらず、遅れ時間に影響していないといえる。そして、この場合には衝突時に液滴と液体金属界面間にもともと存在する空気が、界面間よりすべて排出されるまでに要する時間が遅れ時間となる。そして、空気により遅れ時間が発生するのは、液体金属表面に表面粗さが存在しないため、および液体金属の表面が液滴の衝突により変形するためである。

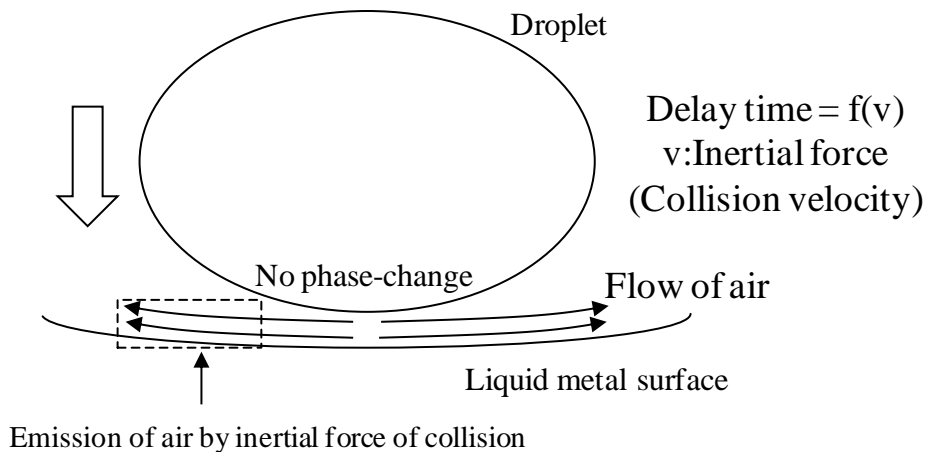


Fig. 5.1 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 0K to 60K.

5.1.2 過熱度:60K~80K

過熱度が 60K から 80K においては, Fig. 3.15 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, Fig. 3.17 に示したように, 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, 過熱度が低い場合と比較して衝突速度に対する値の変化が大きくなっている. 加えて, Fig. 4.8 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, この過熱度領域においては, に示すように, 液滴底部において蒸発が発生しており, それにより発生する蒸気が遅れ時間を発生させる主要因であるといえる. 上述したように, 蒸気により遅れ時間が発生する場合, 遅れ時間は, 飽和蒸気量と温度との関係に従い, 過熱度に対して増加する. Fig. 3.15 に示した過熱度に対する遅れ時間の急激な増加傾向は, この蒸発による蒸気生成量が過熱度に対して増加するため発生するものであるといえる. また, この過熱度に至るまで液滴底部における蒸発がほとんど発生しないのは, 液滴と液体金属との界面間に存在する空気により十分な熱量が液滴に伝えられないこと, および過熱度が低いこと, さらに液体として使用している精製水の揮発性が低いことによる. また, このような蒸発が生じる過熱度においては, 衝突速度の変化による蒸気生成量の変化が顕著となる. 上述したように, 衝突速度が小さいほど, 液滴は液体金属より多くの熱量を得ることができるため, 衝突速度が減少する場合, 遅れ時間は蒸気排出速度の減少と蒸気生成量の増加というふたつの効果により大きく増加すると考えられる. そして, Fig. 3.17 に示したように, 遅れ時間の変化は衝突速度の累乗関数として表され, 特に衝突速度が小さい場合には大きく変化することがわかる. 加えて, Fig. 4.8 に示したように, 減圧下でも遅れ時間は過熱度が 60K から 80K において急激な増加傾向を示し, 過熱度が 80K において, 減圧下の遅れ時間が大気圧下の遅れ時間の約 2 倍の値となっている. 液滴の蒸発により発生する蒸気を理想気体と仮定すると, 減圧下(50kPa)と大気圧下で同じ質量の液体が蒸発して蒸気になる場合, 状態方程式より, 減圧下(50kPa)において発生する蒸気の体積は, 大気圧下で発生する蒸気の体積の 2 倍となる. そして蒸気排出速度が同じ場合(衝突速度が同じ場合), 蒸気の体積が 2 倍になることで, 遅れ時間は 2 倍となる. これらの結果より, 過熱度が 60K から 80K においては, 液滴底部において蒸発が発生しており, こ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となっているといえる. なお, 固体金属に衝突する場合には同様の過熱度においても遅れ時間はほとんど発生しない. これは表面粗さの存在による. 液体金属表面には表面粗さが存在しないため, 一般的な固体金属表面の表面粗さと同程度のオーダー(数 μm ~数百 μm)の厚さの非常に薄い蒸気層によっても液滴と液体金属表面との接触が妨げられる. しかし, 固体金属表面上には表面粗さが存在し, 蒸気層が表面粗さと同程度の厚さの場合には, 表面粗さにより蒸気層を介して接触が容易に生じる. このため, 液体金属に衝突する場合には遅れ時間が発生し, 固体金属に衝突する場合には遅れ時間の発生がほと

んどみられない。また、過熱度が 60K の前後における液滴の沸騰挙動を比較すると、過熱度が 60K 以上の場合には、接触後に液滴の沸騰が発生していることが確認されることから、この液滴底部において蒸発が発生する過熱度が液体金属表面における液滴の沸騰温度と対応していると推測される。

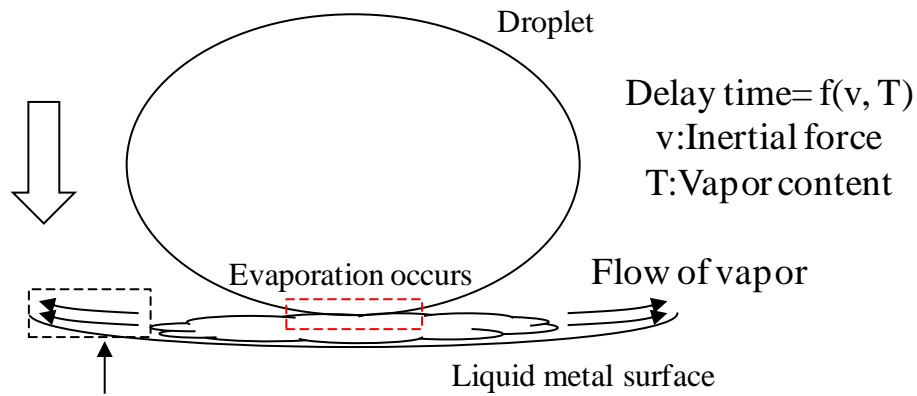


Fig. 5.2 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 60K to 80K.

5.1.3 過熱度:80K~接触限界温度 T_c 付近

過熱度が 80K 以上においては, Fig. 3.15 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 Fig. 4.8 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. これまでに示したモデルによると, この温度領域においては, 液滴底部から発生する蒸気が遅れ時間を発生させる主要因であり, このため, 遅れ時間は過熱度の上昇にともない増加するはずである. しかしそれとは逆に遅れ時間は過熱度の上昇にともない減少傾向を示している. この傾向は, 上述のモデルでは説明することができず, この過熱度領域においてのみ発生する物理現象が考慮されていないためだといえる. このため, この現象について見ていく必要がある. 上述したように, 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, 通常のライデンフロスト現象(膜沸騰)が発生している状況において, その液滴底部は飽和温度になっていると考えられているが, 液体金属表面上においては上述の理由により液滴底部は非常に高温となり, 自発核生成温度に達する可能性がある. 自発核生成は, 沸騰核が存在しない過熱された液体において, 液体分子のゆらぎなどにより沸騰核が自発的に形成される現象であり, 純水の場合, その温度は約 300°C である. ここで, 本研究における液滴の自発核生成温度について考える. 自発核生成温度は液体が汚染されることにより(不純物が混入することにより)大きく変化する. 本研究で使用した実験装置をみると, 実験装置は大気開放されており, 液滴はその形成時, および落下中に表面が汚染されるものと思われる. また, 水は表面張力が大きいことから, その表面は他の液体に比べ非常に汚染されやすい. このため, 本研究における液滴の自発核生成温度は, 純水における自発核生成温度(約 300°C)よりもかなり低くなっている. その結果, 過熱度が 80K 以上の場合には, 接触が生じる前に液滴が過熱されて自発核生成温度に達し, 沸騰が生じるため, Fig. 3.15 に示したように遅れ時間は過熱度の上昇にともない減少傾向を示す. また, Fig. 3.17 に示したようにこの過熱度領域においては, 遅れ時間は衝突速度の累乗関数として表され, その定数は過熱度が 80K 以下の場合と比べて小さくなる(衝突速度に対する変化が大きくなる). これは, 液滴が液体金属にはやく衝突するほど, 蒸気層が薄くなり液滴が自発核沸騰温度にはやく達するためである. つまり, 衝突速度の変化による液体金属から液滴に伝えられる熱量の変化とともに, 衝突したさいの蒸気層が薄くなることによる自発核生成の促進の効果が加わることで, 過熱度が 80K 以下の場合と比べて衝突速度に対する変化が大きくなっているといえる. また, この過熱度領域においては接触限界温度が定義され, 衝突速度

が小さい場合には、液滴と液体金属との表面が十分に離れた状態に保たれるため自発核生成による沸騰は発生せず、また接触も発生しないため、液滴は衝突後にそのまま表面上から反発する。これは次節で示す過熱度領域において見られる膜沸騰状態と同様のものである。

また、Fig. 3.1(図中右)、Fig. 3.3(図中真ん中、右)に示した液滴底部からの液体の高速噴出現象は、上述した原理により自発核生成が生じた場合(または接触が生じた場合)に液滴が過熱状態にあることによる。自発核生成が生じる場合、液滴底部の大部分が過熱状態となっていると推測される。このため、ひとたび自発核生成により沸騰が開始されると、液滴底部では爆発的な蒸発が生じることとなる。これにより大量の蒸気が生成され、この蒸気は過熱されていることにより非常に高圧であるため、液滴底部より勢い良く外部に向けて吹き抜ける。このとき、蒸気が高速で噴出するため液滴の一部が巻き込まれ蒸気と共に高速で外部に向けて噴出される。そして、遅れ時間が大きいほど、また過熱度が高温となるほど液滴が過熱された状態となり、顕著な液体の噴出現象が発生する。以上の原理により、Fig. 3.1(図中右)、Fig. 3.3(図中真ん中、右)に示したような、液滴底部からの液体の噴出現象が発生する。

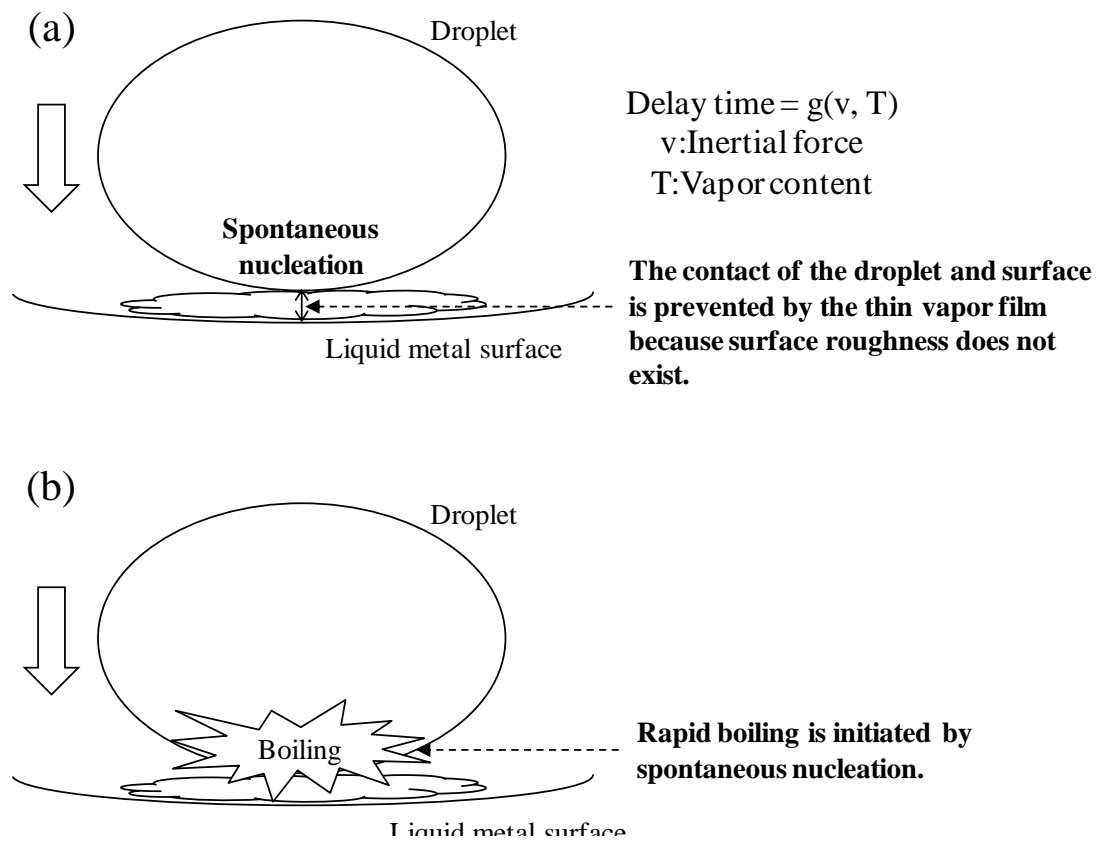


Fig. 5.3 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 80K to around contact limit temperature T_{cl} . The droplet initiate boiling without contacting to the liquid metal surface at this superheat region. (a) Before start of spontaneous nucleation (b) After initiation of boiling.

5.1.4 過熱度:接触限界温度 T_{cl} 付近~

過熱度がさらに高くなると，液滴と液体金属の接触，および自発核生成は発生しなくなる(Fig. 5.4). この過熱度は衝突速度により異なり，Fig. 3.15 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，衝突のときから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．つまり液滴は衝突直後から膜沸騰状態となっている．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．なお，反発する過程において，液滴が液体金属表面から離れる直前において接触が開始される現象が観察されたが，その発生原理は現在のところ不明である．

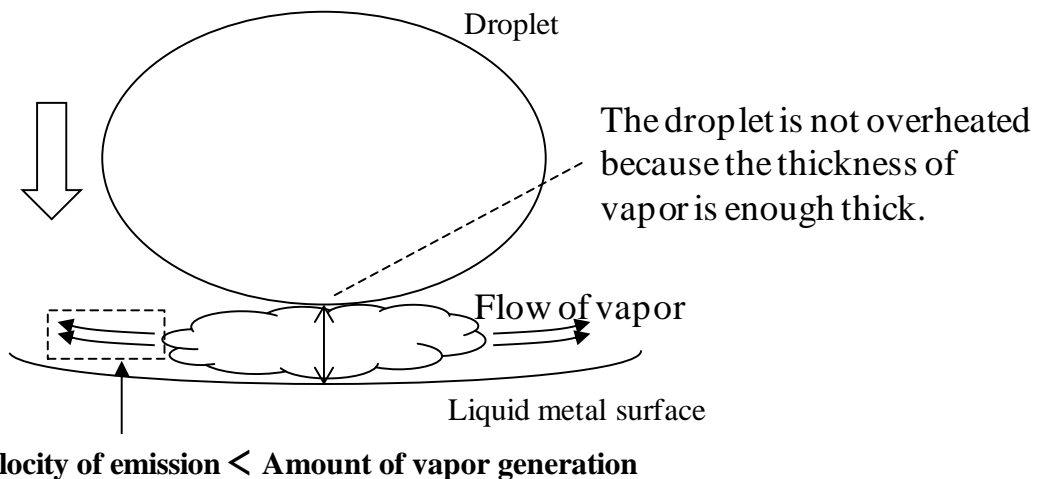


Fig. 5.4 Schematic of generation mechanism of delay time at superheat from 80K to around contact limit temperature. The droplet does not contact to the liquid metal surface at this superheat region.

以上をまとめると，遅れ時間の発生原理は，過熱度に応じて異なり，以下の 4 つの領域に分類される．

- ①蒸発が発生せず，空気が遅れ時間を発生させる領域(過熱度: 0K~60K)
- ②蒸発により発生する蒸気が遅れ時間を発生させる領域(過熱度: 60K~80K)
- ③接触が生じる前に，自発核生成による沸騰が生じる領域(過熱度:80K~接触限界温度 T_{cl} 付近)
- ④蒸気の発生が活発となり，接触・自発核生成が発生しない領域(過熱度:接触限界温度 T_{cl} 付近~)

5.2 流体物性の影響

本節では流体物性が液滴の沸騰挙動および遅れ時間に及ぼす影響を調査するためにおこなった、FC-3283, および水道水を使用した実験結果について示す. 実験の手順は上述した精製水を使用した実験と同様であり, FC-3283 の物性値は, Table. 2.1 に示したとおりである.

5.2.1 FC-3283

5.2.1.1 沸騰挙動観察

Fig. 5.5, Fig. 5.6 に衝突速度 0.42 m/s, 表面温度 106°C (図中左), 147°C (図中真ん中), 208°C (図中右) における FC-3283 を使用した実験の撮影結果を示す. 図には 1.5 ms ごとの撮影結果を記載しており, Fig. 5.5 は時刻 0ms から 6.0ms の撮影結果, Fig. 5.6 は時刻 7.5ms から 13.5ms の撮影結果である. この撮影結果より, 液滴に FC-3283 を使用した場合, 液滴に精製水を使用した場合に比較して, 遅れ時間が非常に長く, 液滴と液体金属との接触が極端に起こりにくいことがわかる. 表面温度に対する現象の変化をみていくと, 表面温度が 106°C の場合(図中左), 5.0ms から 7.5ms の間において底部形状の急激な変化が確認され, この時刻において接触が生じている. また, Fig. 3.1(図中左)に示した衝突速度, 表面温度が同条件における水滴の衝突挙動と比較すると, FC-3283 の液滴は形状変化が大きいことがわかる. これは FC-3283 の表面張力が精製水の約 6 分の 1 の値であるためである. また, 10.5ms より液滴の一部が分離し, 小液滴となって上方に運動している様子が観察される. 表面温度が 148°C の場合(図中真ん中), 液滴は液体金属と接触せず, 表面上に広がった後, 6.0ms より表面張力による収縮運動をおこない, 13.5ms において最終的に表面上から反発している. 接触の生じる表面温度が 106°C の場合と変形挙動を比較すると, 7.5ms よりその違いが顕著となっている. 13.5ms において液滴形状は円柱状となり, その上部から小液滴が分離している. 表面温度が 208°C の場合(図中右), その変形挙動は表面温度が 148°C の場合とほぼ同様である. しかし, 液滴が分離する時刻, および分離した小液滴が上方に運動する速度が若干異なっている.

つぎに, 衝突速度による現象の変化について示す. Fig. 5.7, Fig. 5.8 は表面温度 138°C, 衝突速度 0.37m/s (図中左), 0.42m/s (図中真ん中), 0.52m/s (図中右) における撮影結果である. 図には 1.5 ms ごとの撮影結果を記載しており, Fig. 5.7 は時刻 0ms から 6.0ms の撮影結果, Fig. 5.8 は時刻 7.5ms から 13.5ms の撮影結果である. 衝突速度が 0.37m/s の場合(図中左), 液滴と液体金属との接触は確認されず, 4.5ms まで液滴は表面上に広がり, 6.0ms においては収縮運動を開始している. 13.5ms においては表面から反発する寸前であり, 液滴形

第5章 考察

状は円柱状に変形しており，その上部から小液滴が分離している．衝突速度が 0.42m/s の場合(図中真ん中)， 6.0ms から 7.5ms において液滴の底部形状が球状から末広がり型へと変化しており，接触が生じていることがわかる． 12.0ms においては上部から小液滴が上方に向かって分離しており， 13.5ms においては，分離した小液滴と液滴との間にさらに小さな液滴が形成されている．衝突速度が 0.52m/s の場合(図中右)，液滴の変形挙動は非常に不安定なものとなっている．この衝突速度においては明確な液滴底部の形状変化が確認されず，遅れ時間を定義することができない．また，液滴は 13.5ms においても分裂していない．

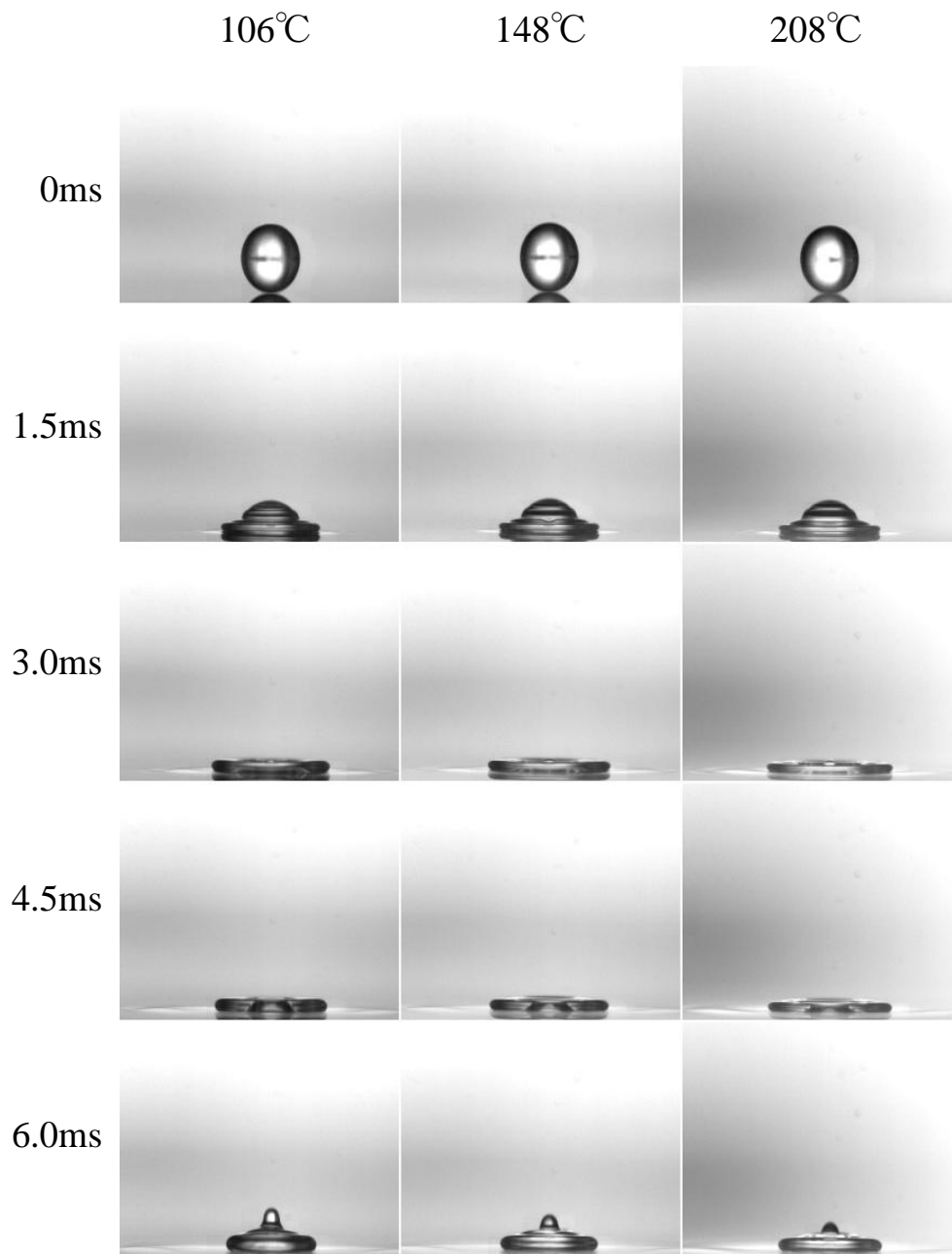


Fig. 5.5 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 0ms to 6.0ms. The collision velocity of droplets was 0.42m/s. The surface temperature was 106°C(Left), 147°C(Center), 208°C (Right).

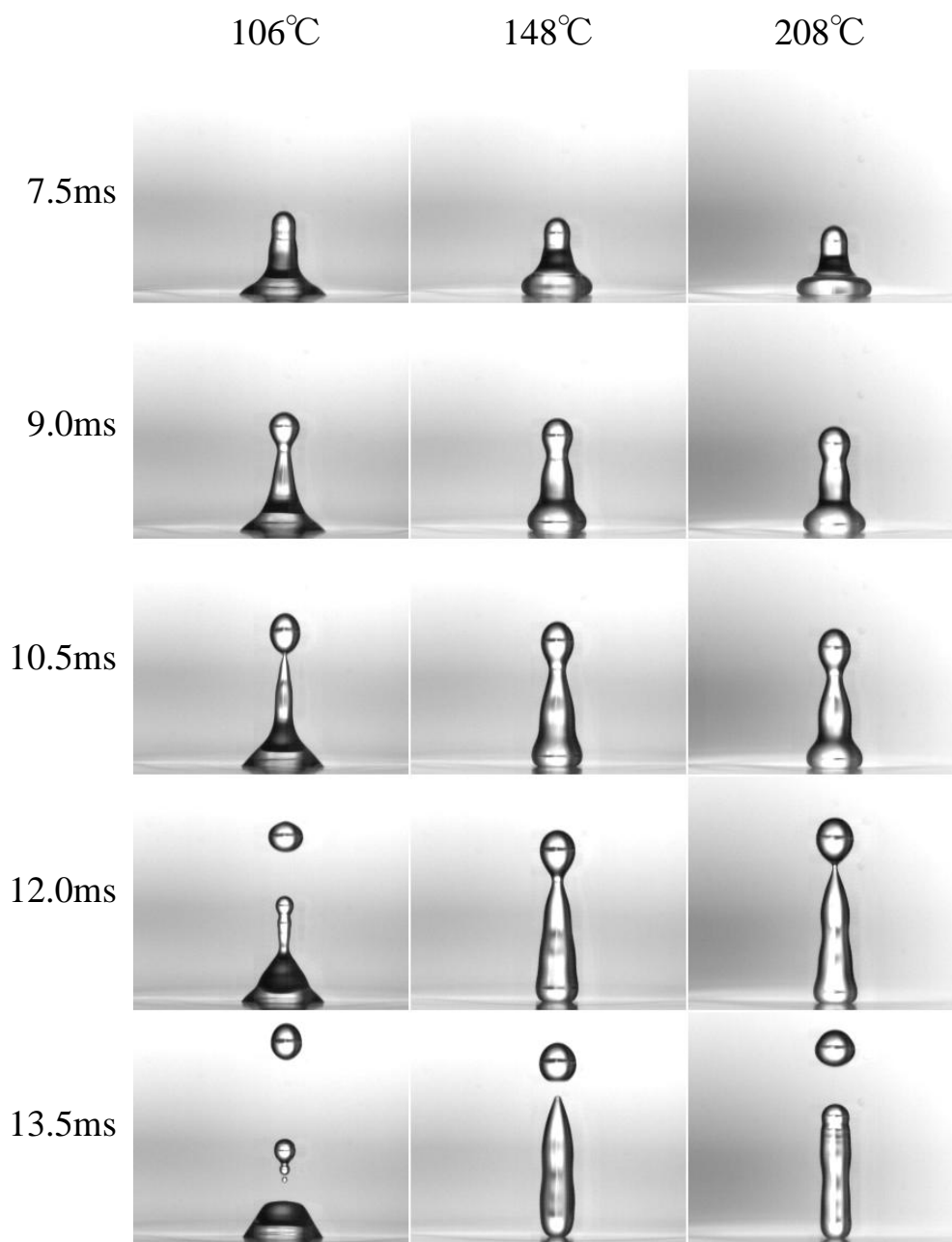


Fig. 5.6 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 7.5ms to 13.5ms. The collision velocity of droplets was 0.42m/s. The surface temperature was 106°C(Left), 147°C(Center), 208°C(Right).

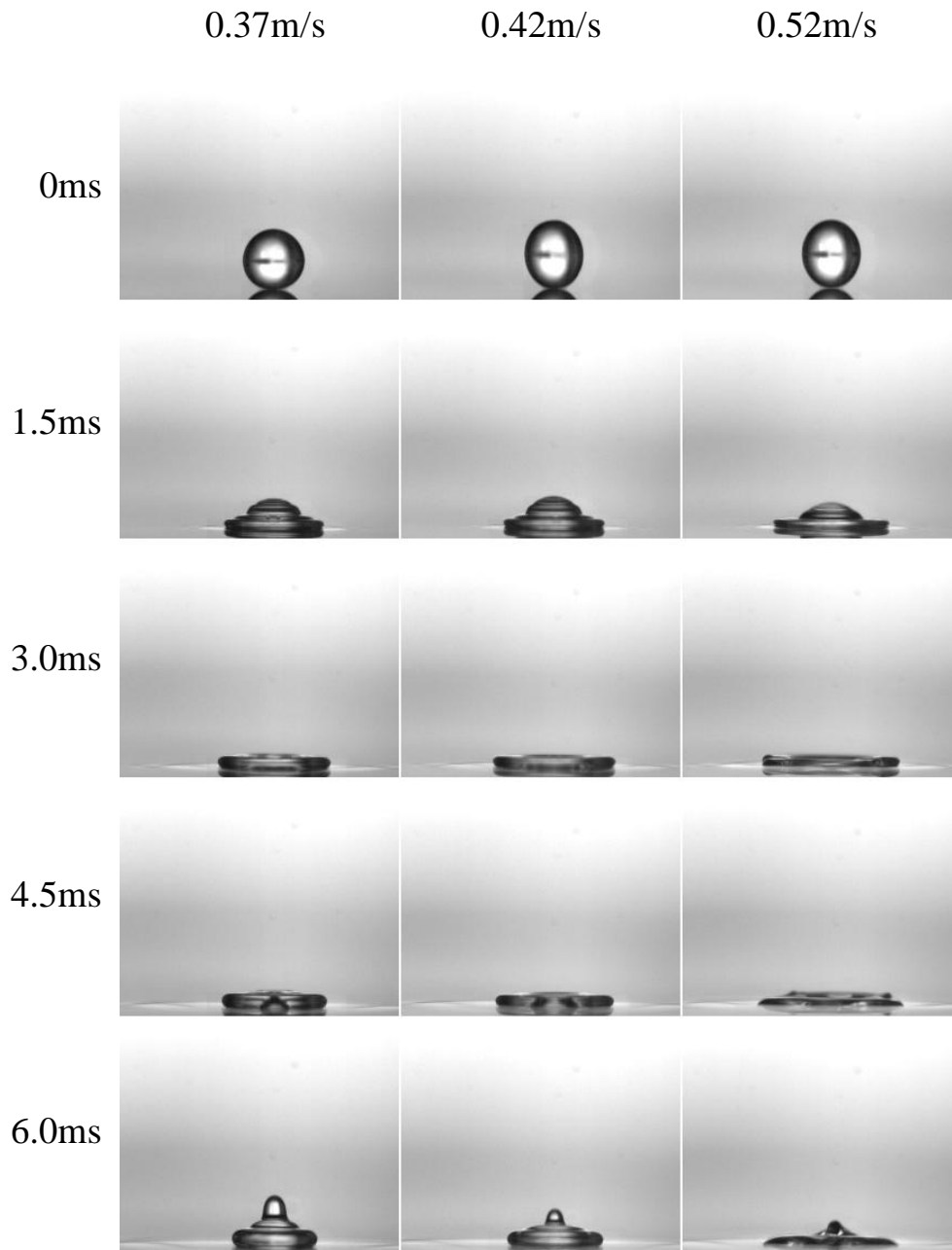


Fig. 5.7 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 0ms to 6.0ms. The surface temperature was 138 °C. The collision velocity of droplets was 0.37m/s(Left), 0.42m/s(Center), 0.52m/s(Right).

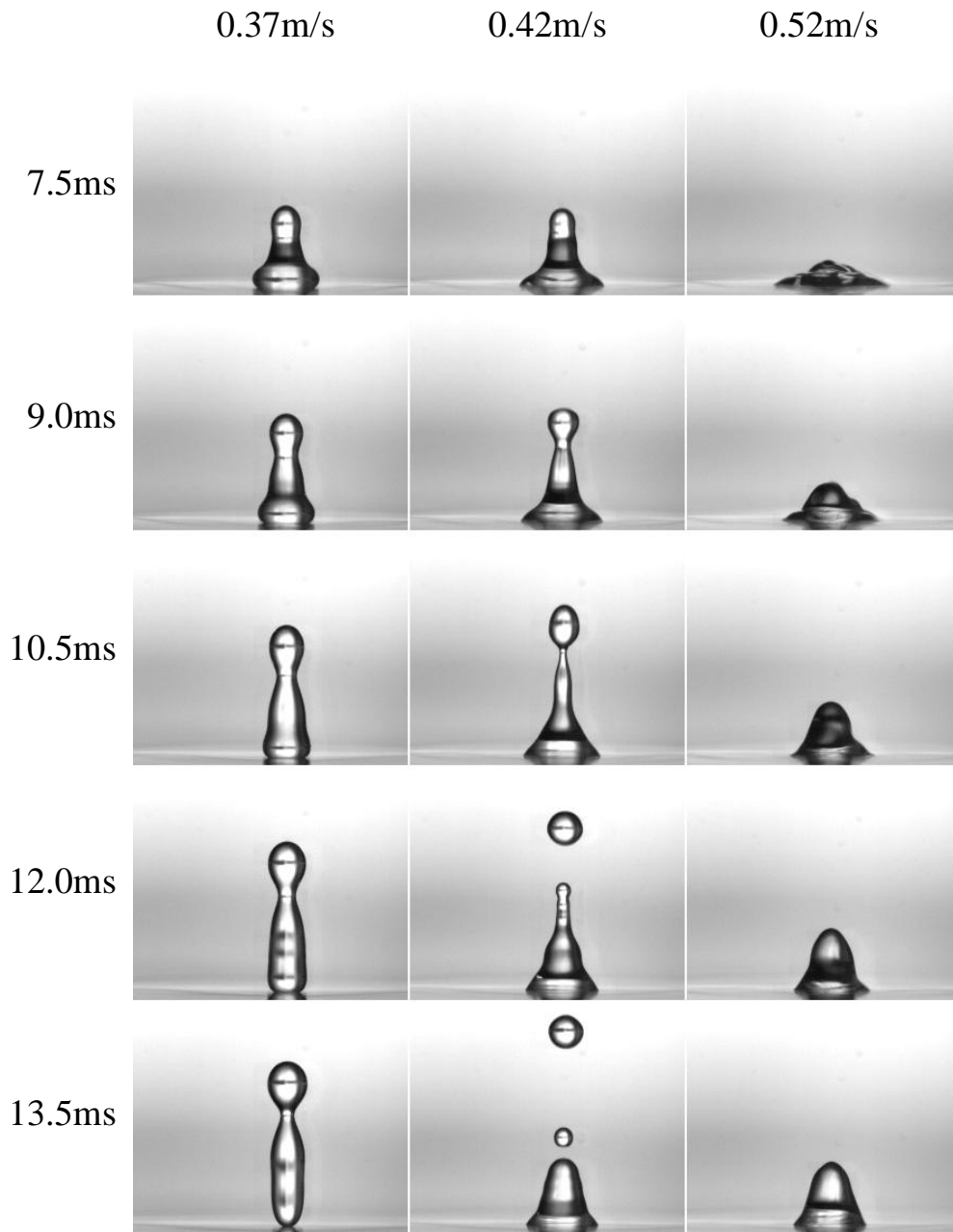


Fig. 5.8 Time sequential images of impinging behavior of FC-3283 droplets to the heated liquid metal surface during 7.5ms to 13.5ms. The surface temperature was 138 °C. The collision velocity of droplets was 0.37m/s(Left), 0.42m/s(Center), 0.52m/s(Right).

5.2.1.2 遅れ時間測定

つづいて、遅れ時間の測定結果についてみていく。上述したように、FC-3283を使用した場合、液滴と液体金属との接触が極端に起こりにくくなる。また、FC-3283の表面張力が小さいため、液滴の変形が大きい。このため、衝突速度が0.41m/s以上においては、接触角の測定が困難であり、遅れ時間の測定をおこなうことができなかった。また、遅れ時間の衝突速度に対する変化も同様の理由により測定していない。Fig. 5.9に衝突速度0.42m/s(図中●)、0.37m/s(図中□)における表面温度に対する遅れ時間の変化を示す。なお、図中の値は、測定により得られた値をそのまま記載したものである。衝突速度が0.37m/sの場合(図中□)、表面温度が132.8℃以上においては接触が生じなかった。また、表面温度が132.8℃以下において遅れ時間は約5.5msの一定値となり、表面温度の増加に対して変化しない。衝突速度が0.42m/sの場合(図中●)、表面温度が147.4℃以上においては接触が生じなかった。この温度以下においては、衝突速度が0.37m/sの場合と同様に、遅れ時間は約6.3msの一定値となり、表面温度に対して変化しない。このようにFC-3283の接触限界温度は精製水を使用した場合の接触限界温度と比較して低い温度となっている。また、遅れ時間の値は、測定範囲内において衝突速度0.42m/sの場合の方が衝突速度0.37m/sの場合よりも大きな値となっており、衝突速度が大きい場合の方が遅れ時間が大きい。これはFig. 3.15に示した精製水を使用した場合の遅れ時間と反対の傾向であるが、その原因は不明である。また、遅れ時間の値としては表面温度が100℃から140℃の間において精製水の場合の約4倍から6倍の値となっている。以上に示したFC-3283を液滴として使用した場合の遅れ時間と精製水を使用した場合の遅れ時間との相違をまとめると以下ようになる。

- ①接触限界温度が著しく低い温度となる
- ②接触限界温度に至るまで表面温度に対して一定値となる
- ③同条件(表面温度・衝突速度)におけるFC-3283の遅れ時間と精製水の遅れ時間とを比較すると、FC-3283の遅れ時間は精製水の遅れ時間の約4倍から6倍の値となる。
- ④衝突速度が大きいほど遅れ時間の値は大きくなる

①、②に関して、FC-3283の遅れ時間は接触限界温度に至るまで表面温度に対して一定値となり、この変化特性は精製水の遅れ時間と大きく異なる。また、その接触限界温度は精製水を使用した場合と比較して約120K低い温度となっている。精製水の遅れ時間は、3.1.1に示したように、表面温度に対して変化し、これは5.1に示したように、遅れ時間の支配的発生要因が表面温度により変化するためだと考えられる。この相違を流体物性の違いをもとに考えると、FC-3283の飽和蒸気圧が精製水のそれと比較して3分の1の値であり、揮発性が非常に高いことが影響していると考えられる。FC-3283の沸点は大気圧下において約128℃であり、遅れ時間の発生する温度領域(接触限界温度以下の過熱度領域)はこの沸点よりも低い過熱度に限定されている。特に衝突速度の小さい衝突速度が0.37m/sにおける接触

第5章 考察

限界温度は約 130°Cと流体の沸点とほぼ同様の値となっている。つまり、FC-3283 を使用した場合、流体の揮発性が非常に高く、ひとたび液滴底部において蒸発が発生すると多量の蒸気が生成されるため、全く接触が発生しなくなる。精製水の場合には、揮発性が低く蒸発が発生した場合にも十分な蒸気が生成されないことから接触が生じる。このため、FC-3283 を使用した場合に測定される遅れ時間は液滴と液体金属の界面間に存在する空気が外部に排出されるまでに要する時間として定義され、蒸発が発生した場合には接触が完全に生じなくなる。

以上の議論を踏まえて、③に関してしてみると、界面間の空気を押し出す速度(排出速度)を決定する衝突による慣性力が、FC-3283 を使用した場合には精製水を使用した場合と比較して小さいために同条件における遅れ時間が大きくなると考えられる。FC-3283 の密度は精製水の約 2 倍であるが、液滴の直径は精製水液滴の直径の約 2 分の 1 の値である。このため、同衝突速度における衝突時に液滴の有する運動量(慣性力)を比較すると FC-3283 液滴の運動量は精製水液滴の運動量の約 4 分の 1 の値となる。このために FC-3283 の遅れ時間が精製水の遅れ時間の約 4 倍から 6 倍の値になると考えられる。

ただし、④に関してはこれまでの考察により説明することができない。遅れ時間を空気が排出されるまでの時間と定義する場合には、遅れ時間は衝突速度の増加にともない増加しなければならず、④の結果はこれとは反対のものである。このような結果となる一つの要因としては、FC-3283 を使用した場合には遅れ時間が非常に長く、接触が開始されるタイミングにおいて液滴が収縮運動をしていることがあげられる。液滴は衝突後、遅れ時間とともない接触を開始するわけであるが、この遅れ時間が長い場合には、表面上で広がった後に収縮運動に移行する。この時の界面間の空気の流れは、衝突時のそれと異なる様相となっていると考えられ、この流れの変化が衝突速度に対する遅れ時間の傾向の変化を発生させていると推測される。また、この収縮運動をしている過程においては、衝突時の液滴の有する慣性力はほとんどない状態となっており、接触を発生させるメカニズムが、これまでに議論してきた界面間の空気、または蒸気の排出といったものとは異なっている可能性もある。後述するように、接触の発生しない条件において液滴が表面から反発する直前において接触が開始される現象が観察され、このときに液滴と液体金属の界面間にまったく圧力が働いていないことから界面間の蒸気、および空気を排出する役割を果たす要因が慣性力以外にも存在する可能性は否定できない。

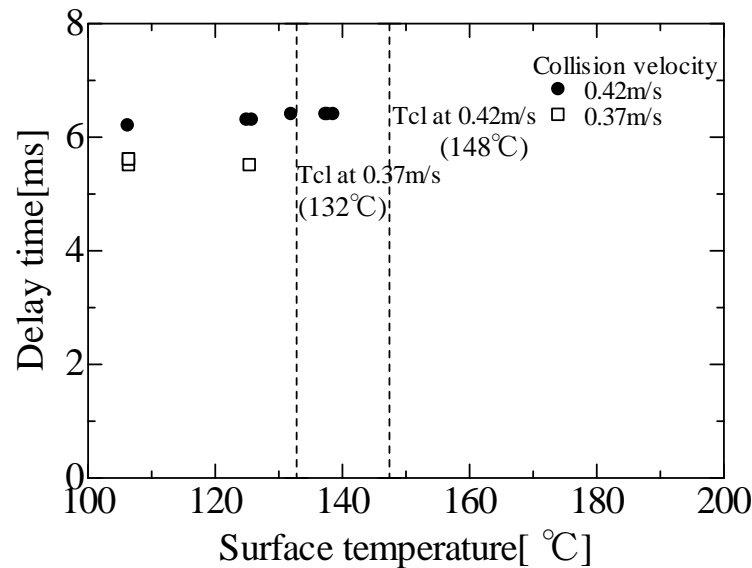


Fig. 5.9 The delay times of FC-3283 droplets at different surface temperature. Tcl shows the contact limit temperature.

5.2.2 水道水

水道水は消毒のために塩素など多くの添加物を含んでいる[28]. 本研究で主に使用しているイオン交換法による精製水とこの水道水の物性の違いについて考えると、塩素などの添加物により影響を受けやすい表面張力は大きく異なり、その他の物性値(例えば密度・動粘度)などは比較的近い値であると考えられる. また、沸騰の核となる添加物を多量に含んでいるため、自発核生成温度は精製水と比較して低くなると推測される. このため、水道水を使用して、精製水を使用した場合と同様にして遅れ時間の測定をおこない、その結果を比較することで、遅れ時間発生モデルの検討、および流体物性が遅れ時間に及ぼす影響の有無を確かめることができる. 以下に液滴に水道水を使用した場合の遅れ時間測定結果を示す. なお、液滴の沸騰挙動は、精製水を使用した場合とほとんど同様の結果となったため、省略する.

5.2.2.1 表面温度に対する変化

Fig. 5.10 に表面温度が 100°Cから 300°Cにおける水道水を使用した場合の遅れ時間測定結果を示す. 測定は精製水を使用した場合と同様に、衝突速度 0.53m/s(図中△), 0.43m/s(図中●), 0.39m/s(図中□)の場合についておこない、図中の値は各条件における複数測定値の平均値である. この結果をみると、水道水を使用した場合の遅れ時間の、表面温度に対する

第5章 考察

変化特性は、Fig. 3.15 に示した精製水を使用した場合と同様なものであり、表面温度に対して遅れ時間がほぼ一定値となる表面温度領域、表面温度に対して遅れ時間が急激な増加傾向を示す領域、表面温度に対して減少傾向を示す領域の 3 つの領域が存在する。衝突速度が 0.39m/s の場合(図中□), 遅れ時間は、表面温度が 106°Cから 183°Cにおいて 1.2ms から 1.6ms のほぼ一定値となり、表面温度が 183°Cから 202°Cにおいては 1.2ms から 2.5ms と急激に増加する。表面温度が 202°Cから 281°Cにおいては 2.5ms から 1.8ms へと緩やかな減少傾向を示し、表面温度が 281°Cから 307°Cにおいて 1.8ms から 2.9ms へと再び急激な減少傾向を示す。衝突速度が 0.43m/s の場合(図中●), 遅れ時間は、表面温度が 106°Cから 183°Cにおいて 0.8ms から 1.1ms のほぼ一定値となり、表面温度が 183°Cから 202°Cにおいては 0.8ms から 1.5ms へと急激に増加する。表面温度が 202°C以上においては緩やかな減少傾向を示している。衝突速度が 0.53m/s の場合(図中△), 遅れ時間は、表面温度が 106°Cから 183°Cにおいて 0.4ms から 0.7ms のほぼ一定値となり、表面温度が 183°Cから 202°Cにおいては 0.7ms から 1.0ms へと増加する。表面温度が 202°C以上においては緩やかな減少傾向を示す。また、衝突速度が大きいくほど、各表面温度における遅れ時間は大きくなっている。なお、水道水を使用した場合には、接触限界温度は測定されなかった。このように、水道水を使用した場合の遅れ時間は、表面温度に対して、精製水を使用した場合と同様な変化特性となる。

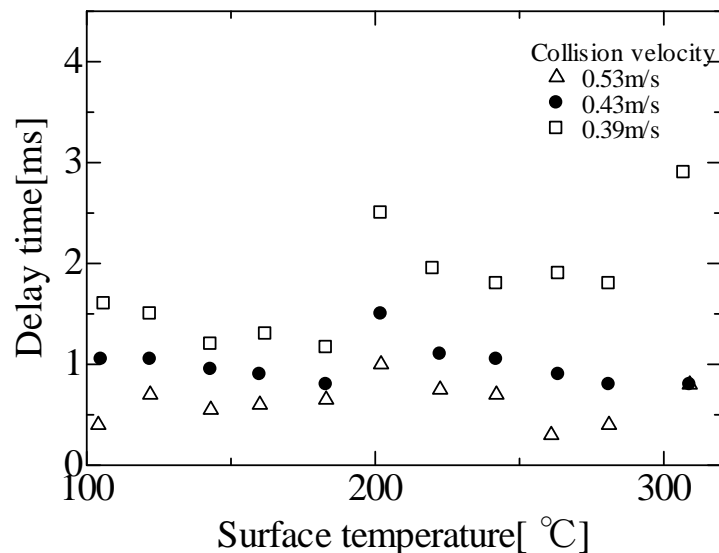


Fig. 5.10 The delay times of tap water droplet at different surface temperature. The plots are arithmetic average value of some measured results at each condition.

5.2.2.2 衝突速度に対する変化

Fig. 5.11 に衝突速度が 0.26m/s から 0.68m/s における遅れ時間の測定結果を示す．測定は表面温度が 105℃(図中□), 202℃(図中●), 305℃(図中△)の場合についておこない，図中に記載した値は各条件における複数測定値の平均値である．この結果より，衝突速度に対する遅れ時間の変化特性は，Fig. 3.17 に示した精製水を使用した場合とほぼ同様であり，すべての表面温度の場合において，遅れ時間は衝突速度の増加に対して減少傾向を示し，その減少傾向は表面温度により異なる．表面温度が 105℃の場合(図中□)，遅れ時間は衝突速度の増加に比例して減少し，その変化は衝突速度の一次関数により表すことができる．表面温度が 202℃の場合(図中●)，遅れ時間は衝突速度の増加に対して急激な減少傾向を示し，その変化は衝突速度の累乗関数として表すことができる．表面温度が 300℃の場合(図中△)，遅れ時間の減少傾向は，表面温度が 202℃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，その指数は表面温度が 202℃の場合よりも小さくなる(衝突速度に対する変化が大きくなる)．また，0.37m/s において接触限界速度が定義される．また，精製水を使用した場合と同様に，衝突速度が 0.45m/s 以上の条件においては表面温度による遅れ時間の変化特性に違いが見られないことから，衝突による慣性力が遅れ時間を決定するうえでの支配的な要因となっていることがわかる．

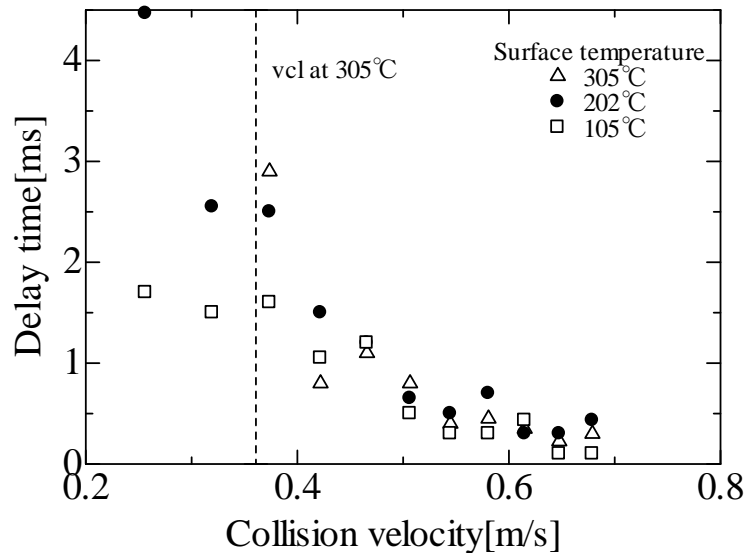


Fig. 5.11 The delay times of tap water droplet at different collision velocity. The plots are arithmetic average values of some measured results at each condition. V_{cl} shows contact limit velocity.

5.2.2.3 精製水との比較

はじめに表面温度に対する遅れ時間の変化について比較をおこなう。Fig. 5.12, Fig. 5.13, Fig. 5.14 は表面温度に対する精製水 (図中●) と水道水 (図中○) の遅れ時間の変化を同様の衝突速度ごとに比較した結果である。Fig. 5.12 は衝突速度 0.37m/s における精製水の結果と、衝突速度 0.39m/s における水道水の結果の比較, Fig. 5.13 は衝突速度 0.41m/s における精製水の結果と、衝突速度 0.43m/s における水道水の結果の比較, Fig. 5.14 は衝突速度 0.51m/s における精製水の結果と、衝突速度 0.53m/s における水道水の結果の比較である。これらの結果より、遅れ時間が急激な増加傾向を示す表面温度領域が精製水と水道水とで異なること、および、各表面温度における水道水の遅れ時間が精製水の遅れ時間よりも小さくなるのがわかる。Fig. 5.12 についてみると、精製水と水道水の遅れ時間は表面温度が 100°C から 160°C の間においてほぼ等しい値となっている。しかし、表面温度が 160°C から 180°C において、精製水の遅れ時間が約 1.5ms から 3.0ms へと急激な増加を示すのに対し、水道水の遅れ時間は一定値のままである。精製水の遅れ時間は、表面温度が 180°C 以上において緩やかな増加傾向を示し、表面温度が 238°C においては接触が発生しなくなる(図中縦点線)。一方、水道水の遅れ時間は、表面温度が 180°C から 200°C の間において 1.2 から 2.5ms へと急激に増加する。また、表面温度が 200°C から 280°C の間において緩やかな減少傾向を示し、表面温度が 280°C から 300°C においては増加傾向となっているが、接触限界温度は定義されない。また、各表面温度において、精製水の遅れ時間は、水道水の遅れ時間よりも大きな値となっており、表面温度が 200°C 以上においてその違いが顕著となる。Fig. 5.13 についてみると、Fig. 5.12 の場合と同様に、遅れ時間が急激な増加傾向を示す温度領域が異なり、精製水の遅れ時間は表面温度が 160°C から 180°C の間において増加しているのに対し、水道水の遅れ時間は 180°C から 200°C の間において増加傾向がみられる。また、精製水の遅れ時間は表面温度が 280°C から 310°C の間において急激に増加しているのに対し、水道水の遅れ時間はほぼ一定値となっている。Fig. 5.14 についてみると、両者の差異はこれまでに見てきた衝突速度の場合と比較して小さいものの、遅れ時間が増加傾向を示す表面温度領域の違いを確認することができる。

以上のように、精製水の遅れ時間と水道水の遅れ時間は、急激な増加傾向を示す表面温度領域が異なり、両者の差異は衝突速度が小さいほど顕著となる。上述したように水道水は精製水と比較して多量の添加物が含まれており、その表面は汚染された状態となっている。このため、水道水の飽和蒸気圧は精製水と比較して高く、蒸発が起こりにくい。また、添加物により自発核生成温度は低くなる。この結果、遅れ時間が増加傾向を示す表面温度領域が精製水と比較して低くなり、また、表面温度が高温の場合(表面温度 200°C~)においては自発核生成が精製水と比較して発生しやすく、遅れ時間は小さな値となる。

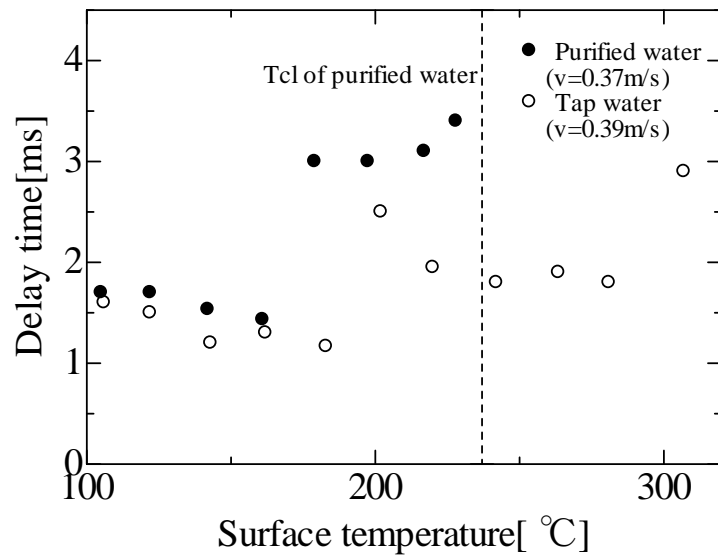


Fig. 5.12 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different surface temperature. The collision velocity of purified water droplet was 0.37m/s and the collision velocity of tap water droplet was 0.39m/s. Tcl shows contact limit temperature.

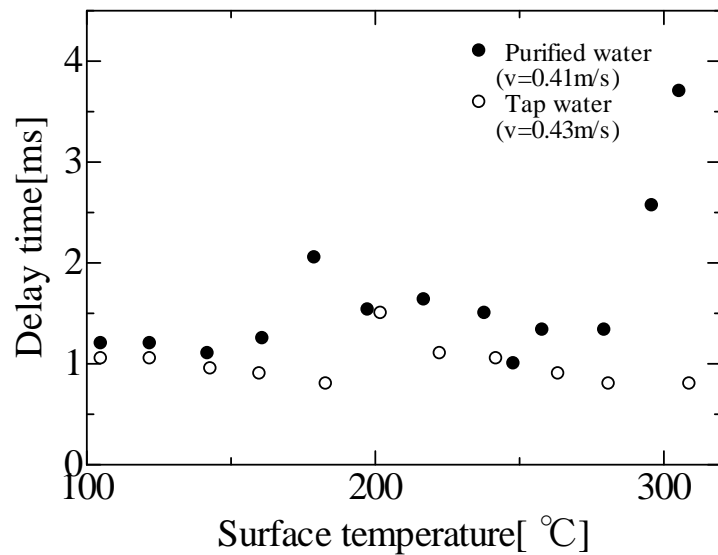


Fig. 5.13 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different surface temperature. The collision velocity of purified water droplet was 0.41m/s and the collision velocity of tap water droplet was 0.43m/s.

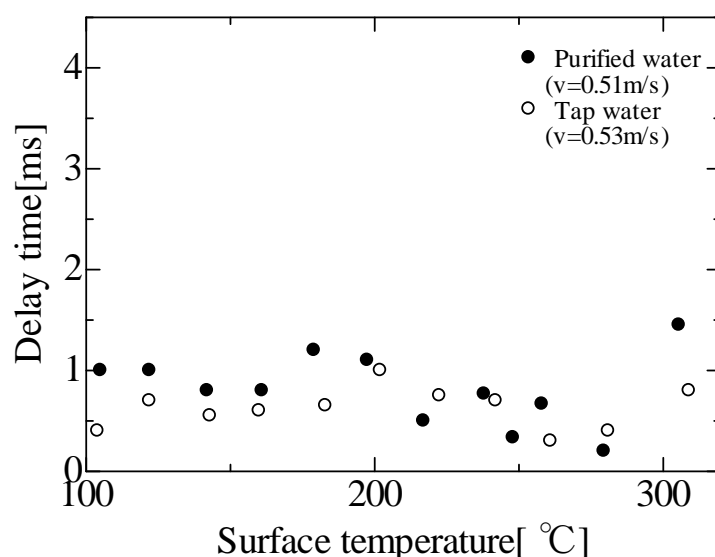


Fig. 5.14 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different surface temperature. The collision velocity of purified water droplet was 0.51m/s and the collision velocity of tap water droplet was 0.53m/s.

つづいて、衝突速度に対する遅れ時間の比較をおこなう。Fig. 5.15, Fig. 5.16, Fig. 5.17 は衝突速度に対する精製水 (図中●) と水道水 (図中○) の遅れ時間の変化を、同様の表面温度ごとに比較したものである。Fig. 5.15 は表面温度 104°Cにおける精製水の結果と、表面温度 105°Cにおける水道水の結果の比較、Fig. 5.16 は表面温度 198°Cにおける精製水の結果と、表面温度 202°Cにおける水道水の結果の比較、Fig. 5.17 は表面温度 298°Cにおける精製水の結果と、表面温度 305°Cにおける水道水の結果の比較である。これらの結果より、精製水と水道水の衝突速度に対する遅れ時間の変化特性は、各表面温度において同様の傾向を示すことがわかる。Fig. 5.15 についてみると、精製水の遅れ時間と水道水の遅れ時間はほぼ同様の結果となっていることがわかる。この表面温度においては、どちらの液体を使用した場合にも蒸発が発生せず、遅れ時間は界面間に存在する空気の排出速度により定義される。このため、流体物性は遅れ時間に影響せず、精製水と水道水の遅れ時間は同様なものとなっている。Fig. 5.16 についてみると、精製水の遅れ時間と水道水の遅れ時間は衝突速度に対して同様の变化傾向を示し、遅れ時間は衝突速度の累乗関数により表される。しかし、精製水の遅れ時間は各衝突速度において水道水の遅れ時間よりも大きな値となっており、精製水を使用した場合、衝突速度が 0.32m/s 以下においては接触が発生しない (図中縦点線)。Fig. 5.17 についてみると、上述した Fig. 5.16 の場合と同様に、どちらの遅れ時間も衝突速度の累乗関数により表される。しかし、各衝突速度における両者の差異は表面温度が 104°C (Fig. 5.15) , 198°C (Fig. 5.16) の場合に比べて大きくなっており、接触限界速度も異なる値となる。

第5章 考察

以上のように、精製水の遅れ時間と水道水の遅れ時間は、衝突速度に対して同様の変化特性を示すが、各衝突速度において水道水の遅れ時間は、精製水の遅れ時間よりも小さくなっており、表面温度が高いほどこの差が顕著となる。これは、上述したように、表面温度が高い場合には、遅れ時間を発生させる主要因が液滴底部における蒸発により発生する蒸気となり、また自発核生成による沸騰が生じるため、表面温度が高いほど流体物性の影響が顕著に現れるためである。また、水道水の遅れ時間は精製水の遅れ時間より小さな値となる。これは、水道水が多量の添加物を含んでおり、精製水と比較して飽和蒸気圧が高くなり、また同時に自発核生成温度が低くなるためである。

以上に示したように、5.1において示した遅れ時間発生モデルは、定性的にはあるが液滴の物性値の影響を含めて測定結果をよく説明できるものであることが確認される。

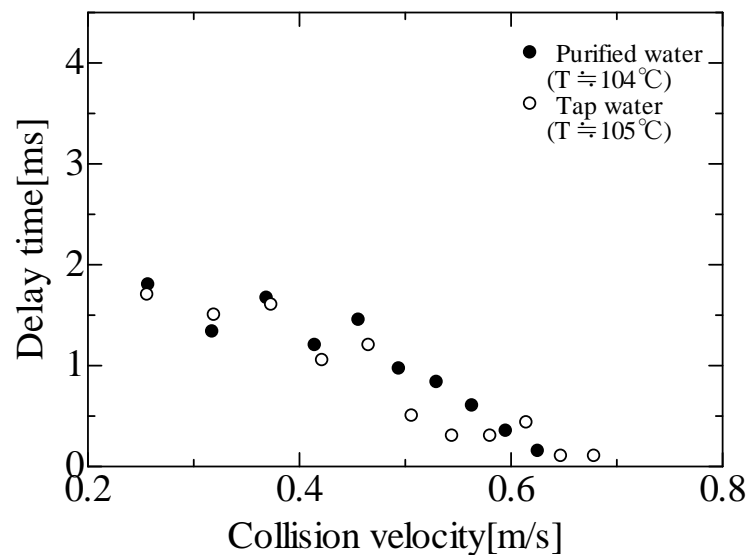


Fig. 5.15 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different collision velocity. The surface temperature of purified water result was 104°C and the surface temperature of tap water result was 105°C.

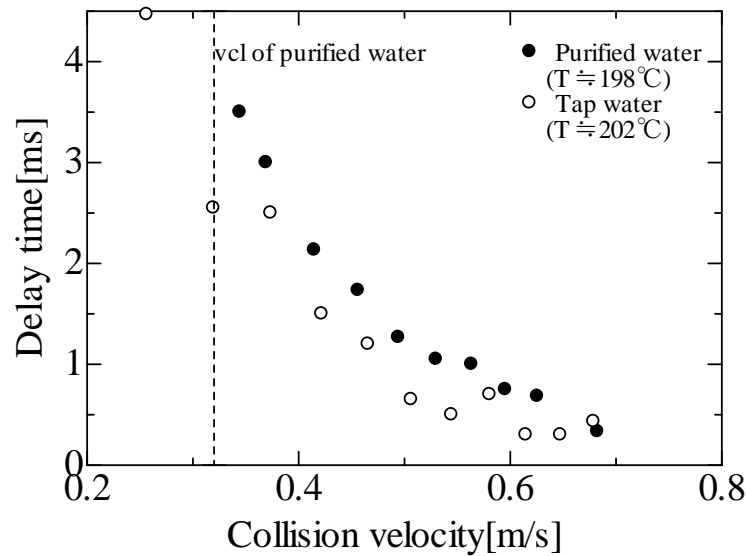


Fig. 5.16 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different collision velocity. The surface temperature of purified water result was 198°C and the surface temperature of tap water result was 202°C. vcl shows contact limit temperature.

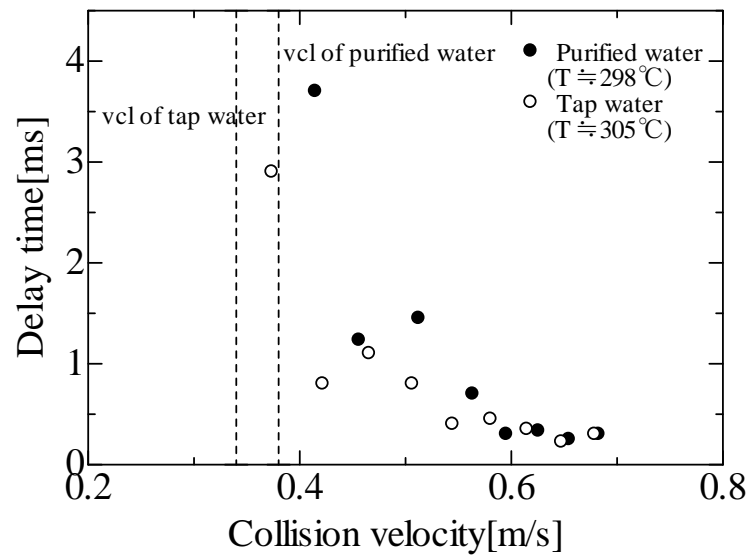


Fig. 5.17 Comparison of the delay times of purified water and tap water, at different collision velocity. The surface temperature of purified water result was 298°C and the surface temperature of tap water result was 305°C. vcl shows contact limit temperature.

5.3 高速撮影による沸騰挙動観察

Fig. 3.1(図中右), Fig. 3.3(図中真ん中, 右)に示したように, 表面温度が高温の場合には, 液滴底部より液体が高速で噴出する現象が発生する. この現象は, 本研究において新しく発見されたものであり, 5.1 においてその発生機構の定性的説明をおこなっているものの, さらなる検討が必要である. しかし, この液体の噴出速度は非常に高速であり, これまでに示したような撮影速度が 10000fps における結果からは, その現象を十分詳細に観察することが難しい. また, 3.2 に示した液滴変形挙動の測定をおこなうためには, 液体金属表面の水平方向より撮影をおこなう必要があり, 接触時の液滴底部の様子を直接観察することができない. このため, 本節では 10000fps よりも高速な撮影速度において, 液滴底部の様子を直接的に観察することが可能な角度より撮影をおこなった結果を示し, 現象の詳しい観察をおこなう. 液滴底部の様子を直接観察するためには, 液滴の落下方向と同軸上より撮影をおこなうことが望ましい. つまり, 液滴底部, または上部より撮影をおこなう必要がある. しかし, 不透明流体である液体金属を衝突面として使用する場合, その底部より液滴の衝突する様子を撮影することは困難である. また, 落下方向真上より撮影をおこなうことは原理的に可能であるが, 非常に大掛かりな装置が必要となる. このため, 本研究においては, カメラをできる限り垂直方向に近い角度まで傾けて撮影をおこなうことで, 液滴底部の様子を観察する. また撮影速度は現象を十分にゆっくりと観察することのできる 100000fps とした.

Fig. 5.18 に衝突速度 0.41 m/s, 表面温度 245°C における撮影結果を示す. また, Fig. 5.19 は同様の条件において, 液体の噴出状況を鮮明に観察するために光源の照射方向を変更して撮影した結果である. 図中に記載した数字は, 液滴衝突時から径過した時刻を示しており, 画像は 10 μ s ごとの撮影結果である. なお, この条件における液滴の沸騰挙動を水平方向から観察した場合, Fig. 3.1(図中右), Fig. 3.3(図中真ん中, 右) に示したものと同様な液体の高速噴出現象が発生していることが確認される. これらの撮影結果より, 液体の高速噴出現象は, 液滴底部における爆発的な沸騰により生成された蒸気が, 液滴底部から液体をともなって放射状に高速で噴出することにより発生する現象であることがわかる. Fig. 5.18 の 2.33ms から 2.35ms における画像, および, Fig. 5.19 の 2.21ms から 2.25ms における画像より, 液滴底部における沸騰はある点における気泡生成をきっかけとして開始され, 液滴底部全体に広がっていく. そして, 液滴底部に沸騰が広がった後, Fig. 5.18 の 2.36ms における画像, および Fig. 5.19 の 2.26ms における画像より, 液滴底部から微細な液滴群が放射状に噴出されることがわかる. また, 撮影動画の観察から, 液滴は沸騰開始直前より振動することが確認された. この振動は液滴底部の中心付近に形成される変動点をもとに発生していることから, 接触直前において液滴底部と液体金属表面との間に存在する蒸気

第5章 考察

膜は不安定な状態となることがわかる。また、Fig. 5.18 に赤点線枠で示したように、沸騰が開始される約 $30\mu\text{s}$ 前より液滴底部の性状変化が確認される。画像よりこの性状変化が物理的に意味することを特定することは困難であるが、液滴と液体金属との接触により生じているものだと考えられる。

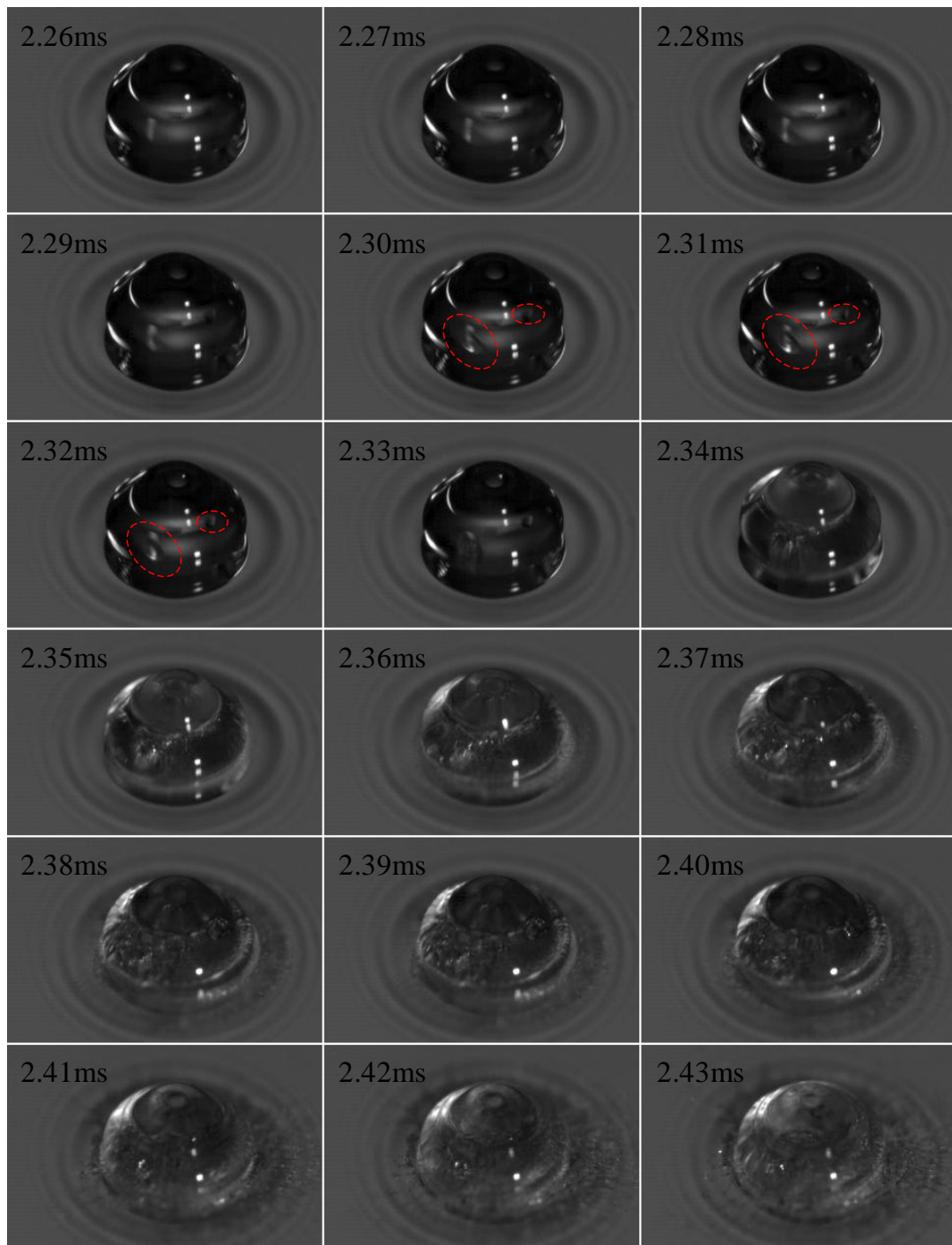


Fig. 5.18 Time sequential images of droplet boiling behavior. The shooting speed was 100000fps. The surface temperature of the liquid metal was 245°C. The collision velocity of the droplet was 0.41m/s. The numbers in the images show time from the moment of the collision.

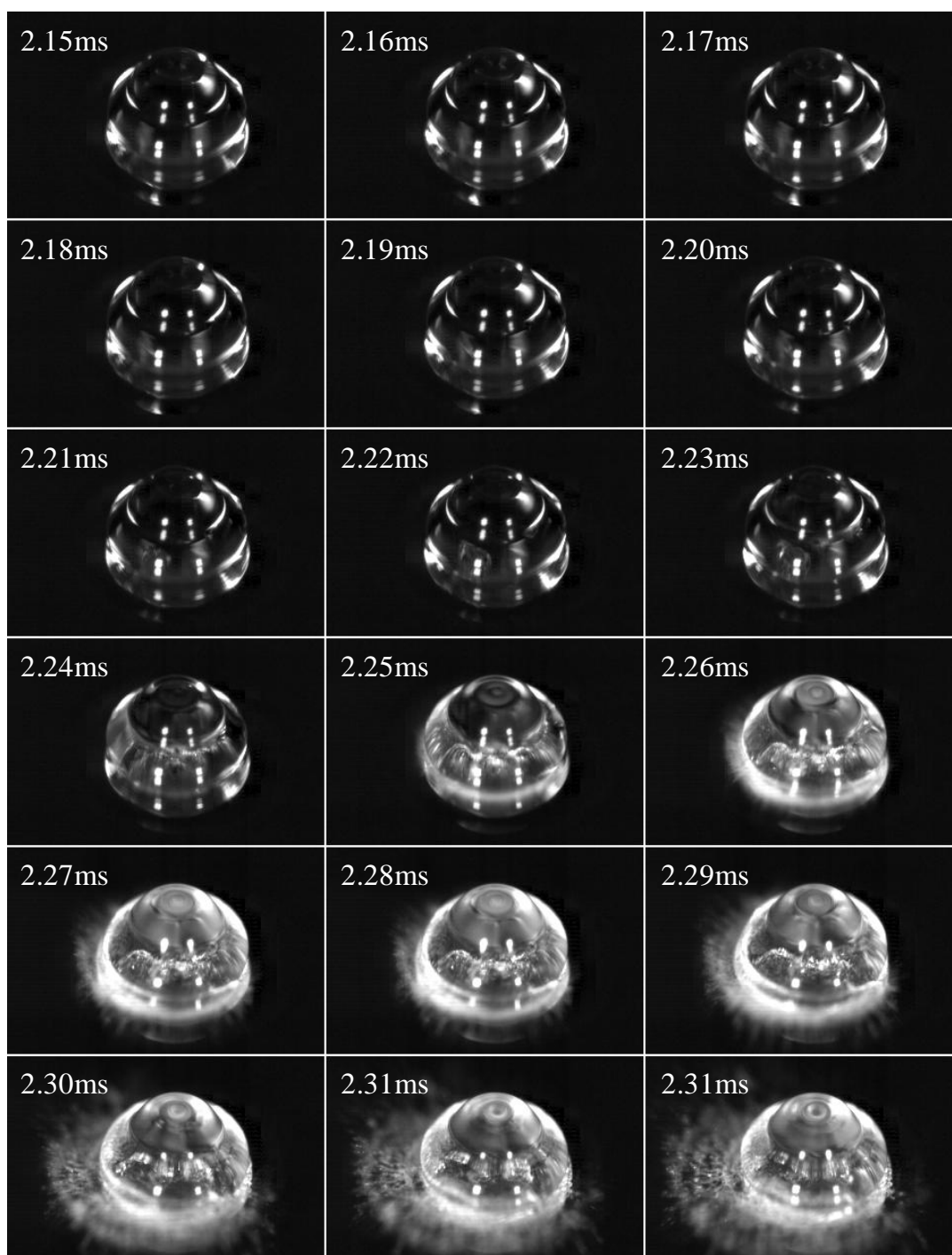


Fig. 5.19 Time sequential images of droplet boiling behavior when the direction of irradiation of light was changed from Fig. 5.18. The shooting speed was 100000fps. The surface temperature of the liquid metal was 245°C. The collision velocity of the droplet was 0.41m/s. The numbers in the images show time from the moment of the collision.

5.4 液体金属表面の変形による影響評価

本研究では、液体金属に衝突する液滴の挙動を観察することで、表面粗さの存在しない滑らかな固体金属表面に衝突する液滴の沸騰挙動を観察できるとしている。これは液体金属の密度が液滴の密度に比べて十分に大きく、また、液体金属の表面張力が大きいことから、衝突のさいに発生する表面変形を無視できるとする仮定による。表面変形が大きい場合、衝突のさいに表面から液滴に加わる力が小さくなり、その影響を無視することはできない。これまでに示した撮影画像からもわかるように、液体金属表面は液滴の衝突により変形しており、この変形が遅れ時間の発生に影響を及ぼしているという可能性は否定できない。このため、液体金属表面の変形による、衝突のさいに液滴に加わる力の変化を定量的に評価しなければならない。そこで、FC-3283が液体金属に衝突する場合の変形挙動と固体金属に衝突する場合の変形挙動を比較することで、実験的にこの変化の評価をおこなった。5.2.1.1で示したように、FC-3283は揮発性が高く、表面温度が高い場合には液体金属と接触しない。これは固体金属に衝突する場合も同様である。接触が生じない場合、液滴と物体表面との界面間には蒸気が存在し、両者は直接接触しない状態に保たれる。このとき、Fig. 5.20に示すように、液滴と物体表面との力のやり取りは蒸気層を介しておこなわれ、液滴の変形挙動は表面性状(例えば濡れ性)の影響を受けない。このため、液滴の変形は衝突により物体表面から加わる力のみにより引き起こされ、この変形挙動を測定することで衝突のさいに加わる力を定量的に把握することができる。変形挙動を把握するための測定パラメータは、Fig. 2.11に示した広がり直径 d_s を使用する。この広がり直径は、他のパラメータと比較して、表面から液滴に加わる力を最も反映した値となり、また安定して正確な測定をおこなうことが可能である。固体金属には2000番のエメリー紙により研磨した銅板を使用する。測定は表面温度が約200°C、衝突速度が0.25m/s, 0.32m/s, 0.37m/s, 0.42m/s, 0.60m/sの場合についておこなった。なお、衝突速度が0.60m/s以上においては液滴の変形が大きく、測定をおこなうことができなかった。Fig. 5.21に表面温度200°C、衝突速度0.42m/sにおける、銅板に衝突する場合の液滴挙動の撮影結果を示す。この結果より、銅板を使用した場合にも液滴は表面と接触せず、変形挙動の比較が可能であることがわかる。

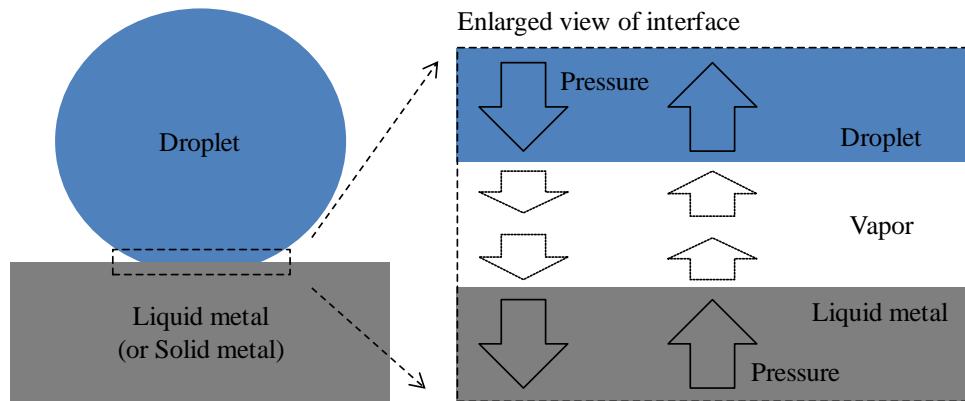


Fig. 5.20 Schematic of the way of pressure propagation between interfaces when the vapor film exists between the droplet and surface.

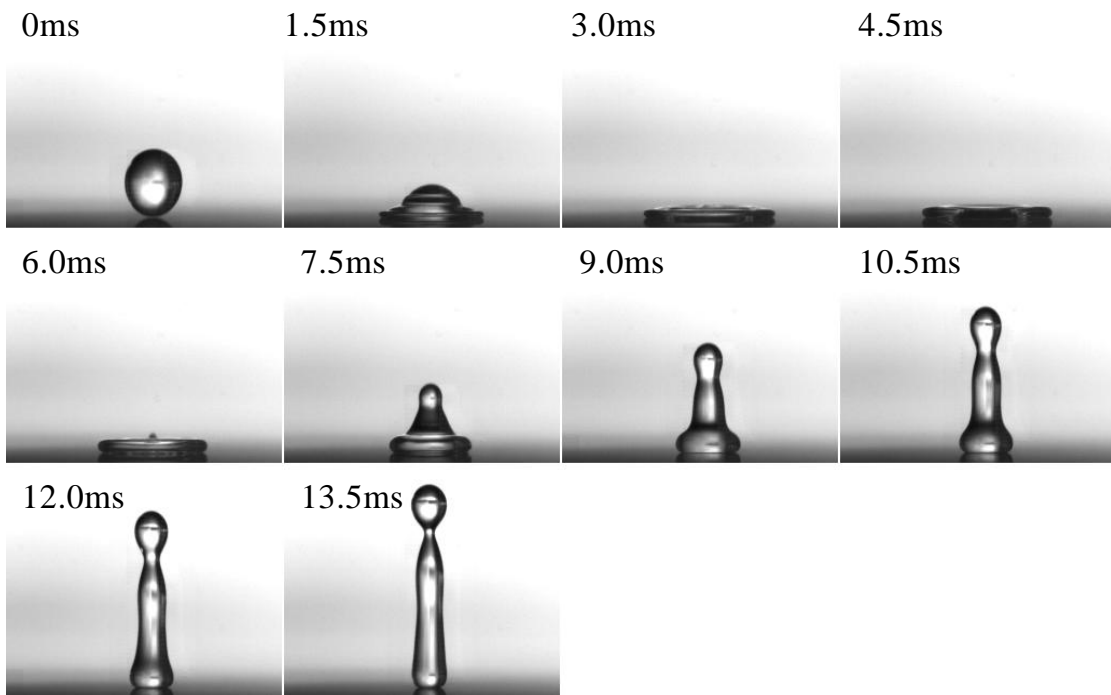


Fig. 5.21 Time sequential images of the FC-3283 droplet impinging to the copperplate. The surface temperature was 200°C. The collision velocity of droplet was 0.42m/s. The droplet diameter was 1.2mm.

Fig. 5.22 に衝突速度 0.42m/s における広がり直径 d_s の測定結果を、液体金属に衝突する場合(図中●)と銅板に衝突する場合(図中○)とを比較して示す。 d_s はどちらの場合においても 0ms から 0.5ms まで一定の値となっている。これは、衝突初期においては液滴直径 d_l が d_s と等しくなるためである。0.5ms 以後、 d_s は時刻の径過とともに増加していき、3.7ms において最大値となる。そして、3.7ms 以後、時刻の径過にともない緩やかに減少する。0ms から 3.7ms における d_s の増加は、液滴が衝突後に表面上に広がっていく現象に対応し、3.7ms 以降における d_s の減少は、表面張力により収縮している現象を表している。液体金属の値と銅板の値とを比較すると、両者の差は時刻の径過にともない大きくなり、 d_s が最大値となる時刻において最大となっている。その後、時刻の径過にともない両者の差は減少し、最終的に、10ms においては再びほぼ同じ値となる。つづいて、Fig. 5.23 に衝突速度 0.60m/s における d_s の測定結果を、衝突速度 0.42m/s の場合と同様に示す。衝突速度が 0.60m/s の場合、上述した衝突速度が 0.42m/s の場合と比較して、液体金属の結果と銅板の結果との差異が大きいことがわかる。 d_s は銅板を使用した場合には 0ms から 0.3ms において、液体金属を使用した場合には 0ms から 0.4ms において d_l と同じ値となり、時刻の径過にともない増加していく。その後、時刻 3.5ms において最大値となり、緩やかに減少する。液体金属の結果と銅板の結果を比較すると、0ms から 0.3ms において、両者はほぼ同じ値となっているが、時刻の径過とともに差が増加し、 d_s が最大値となる時刻において差が最大となる。

このように、液体金属を使用した場合の d_s と銅板を使用した場合の d_s は、ほぼ同様の結果となる。しかし、 d_s が最大値となる時刻付近においては、両者の差が大きくなっている。これは d_s の最大値が、液滴が物体表面より受ける力の総和として定義されるためである。このため、 d_s の最大値は液滴が物体表面より受ける力を代表して表す値といえる。この d_s の最大値を異なる衝突速度において測定した結果を液体金属と銅板とで比較することにより、衝突速度による変形の変化を評価することができる。なお、以下では d_s の最大値を d_{max} と定義する。

Fig. 5.24 は衝突速度が 0.25m/s から 0.60m/s における d_{max} の測定結果を、液体金属に衝突する場合(図中●)と銅板に衝突する場合(図中○)とを比較して示したものである。この結果より、両者の差は衝突速度に比例して増加することがわかる。図中に記載した式は、各 d_{max} の変化を、最小二乗法により、衝突速度の一次関数として近似した結果である。この各近似式の勾配の商を求めることで、液体金属に衝突する場合の衝突速度を、固体金属に衝突する場合の衝突速度に換算するための換算係数を求めることができる。

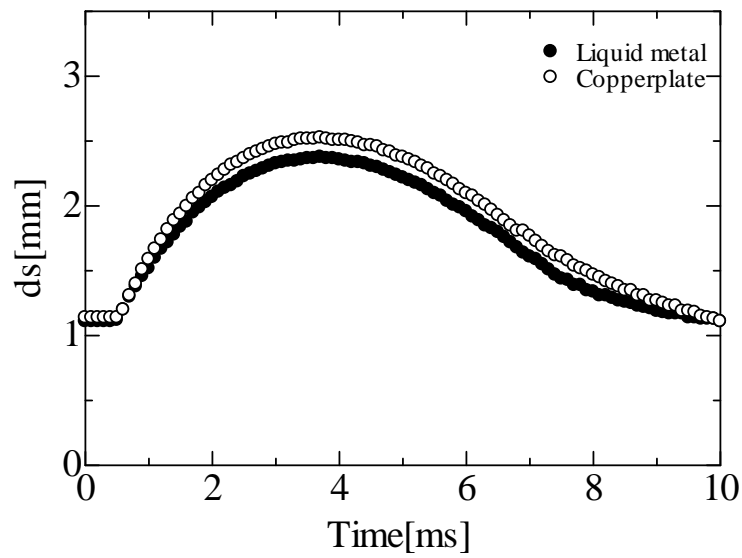


Fig. 5.22 Comparison between ds of liquid metal and ds of copperplate at 0.42m/s. The surface temperature was 200°C.

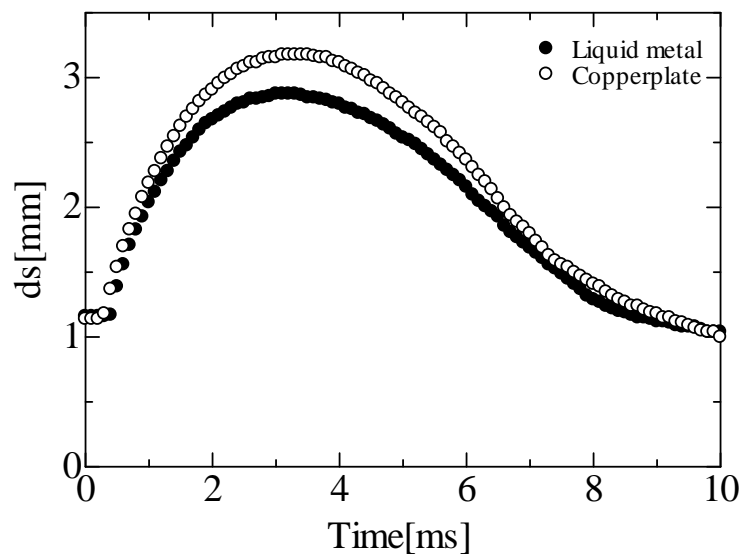


Fig. 5.23 Comparison between ds of liquid metal and ds of copperplate at 0.60m/s. The surface temperature was 200°C.

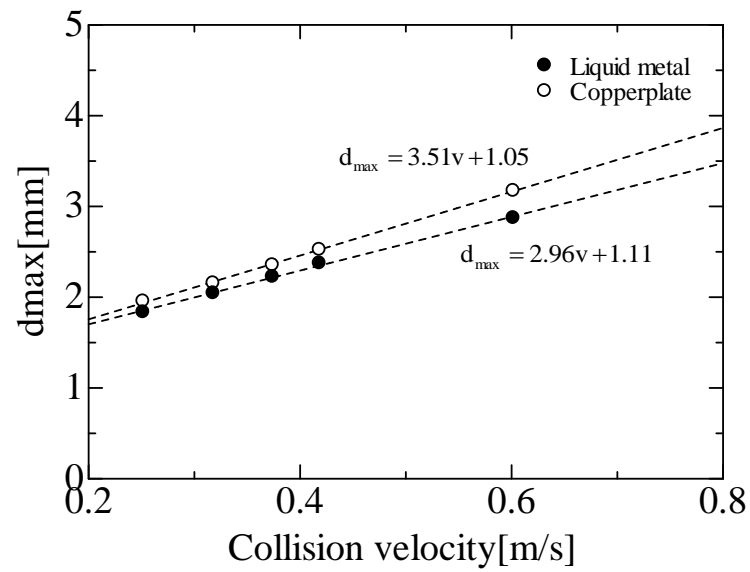


Fig. 5.24 Comparison between d_{max} of liquid metal and d_{max} of copperplate, at different collision velocity of droplets. The surface temperature was 200°C.

5.5 上昇運動中の接触開始現象

Fig. 5.25 は表面温度 214°C ，衝突速度 0.32m/s における液滴衝突挙動の撮影結果である。この撮影結果に示したように，表面温度が高温の場合，および衝突速度が低速の場合には，液滴は液体金属表面と接触することなく，衝突後に表面上に広がった後，表面張力による収縮運動をしてそのまま表面上から反発する。上述した接触限界温度，接触限界速度はこのような接触が生じなくなる表面温度，および衝突速度を定義したものである。この定義からもわかるように，本研究においては，液滴が液体金属の表面に衝突してから，接触・沸騰が生じるまでの間，もしくは表面から反発するまでの間にのみを対象としている。つまり，液滴の初期衝突時のみに注目し，例えば反発した液滴が再び液体金属表面に衝突するときの現象についてはこれまで議論していない。そのため，ここではこの液滴が反発する場合(接触が生じない場合)についてこれまで対象としてきた時間領域よりもさらに長い時間を対象として反発する液滴の呈する現象について観察する。

反発した液滴は，その後再び液体金属に衝突して，以後これを繰り返すこととなる。このとき液滴が呈する現象は以下の2通りに分類される。

- ①バウンドを繰り返し，最終的に表面上に浮遊状態となる
- ②バウンドを繰り返す過程において，接触・沸騰が発生する

①はバウンドの過程において，液滴の有していた運動量がすべて消費されて最終的にバウンドしなくなり，表面上において液滴が蒸気膜上に安定して浮遊した状態となるものである。これは液滴と液体金属表面との接触が全く生じないことをのぞいてライデンフロスト現象と同様の現象である。なお，液滴が安定した浮遊状態となった後に接触が開始される現象が観察されたが，この接触は蒸発により液体金属表面の熱量が消費され，液滴の質量を支えるだけの十分な蒸気が生成されなくなるために生じる現象であると考えられる。

②はバウンドの繰り返しにより液体金属表面の熱量が蒸気生成により消費され，最終的に衝突の慣性力を上回る蒸気が生成されず接触が生じる現象である。このため，接触は液滴が液体金属の表面に衝突した直後において開始されることが多い。しかし，この接触開始時刻について詳しく観察すると，上述した衝突直後のほかに，液滴が収縮運動により表面から離れる直前において接触が開始されることがあった。このような表面から離れる直前における接触開始現象は，衝突直後における接触開始と同等に繰り返し観察された。ただし，バウンドの回数，厳密な接触開始時刻にはばらつきがあり，形式的な分類はおこなうことができなかった。Fig. 5.26 は Fig. 5.25 に示した液滴が6回バウンドを繰り返したのち，7回目の衝突をして表面から離れる直前において接触を開始する様子の撮影結果である。図中の時刻は接触開始時刻を 0ms としたときの経過時間を表す。この撮影結果からもわかるように，この接触開始現象は，液滴がまさに表面から離れる時刻をさかいとして発生するものである。このとき，液滴が上昇運動をしていることから，液滴と液体金属表面との界

第5章 考察

面間には蒸気を外部に排出する慣性力は働いていない。このため、5.1に示した原理とは異なる原理によって接触が誘発されており、特異な現象であるといえる。このような接触を発生させる要因としては、液滴が表面から離れる直前における液滴底部の急激な温度分布の変化が挙げられるが、詳細は不明である。

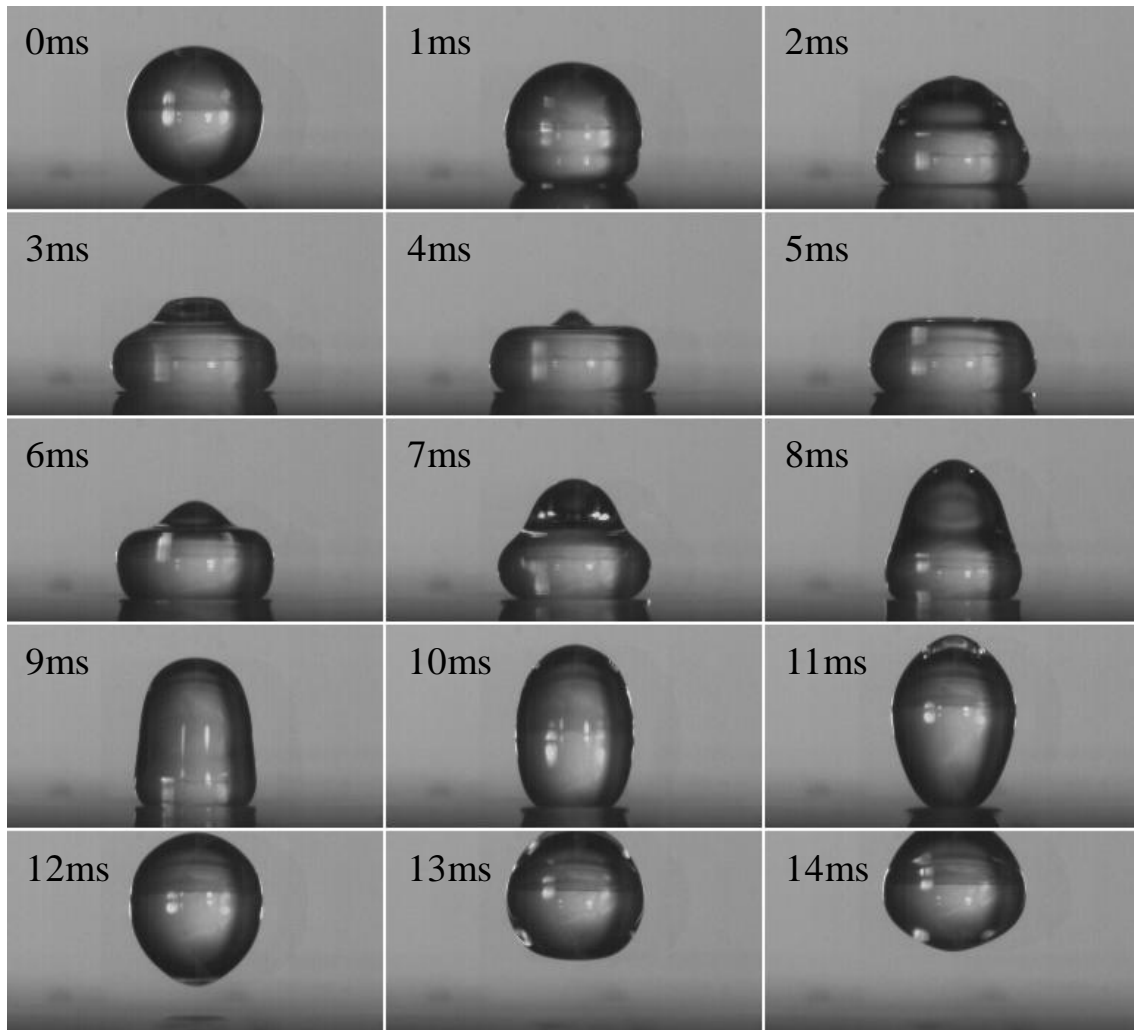


Fig. 5.25 Time sequential images of behavior of the droplet impinging to the liquid metal surface. The surface temperature was 214°C. The collision velocity was 0.32m/s. The droplet does not contact to the liquid metal and bounces on the surface.

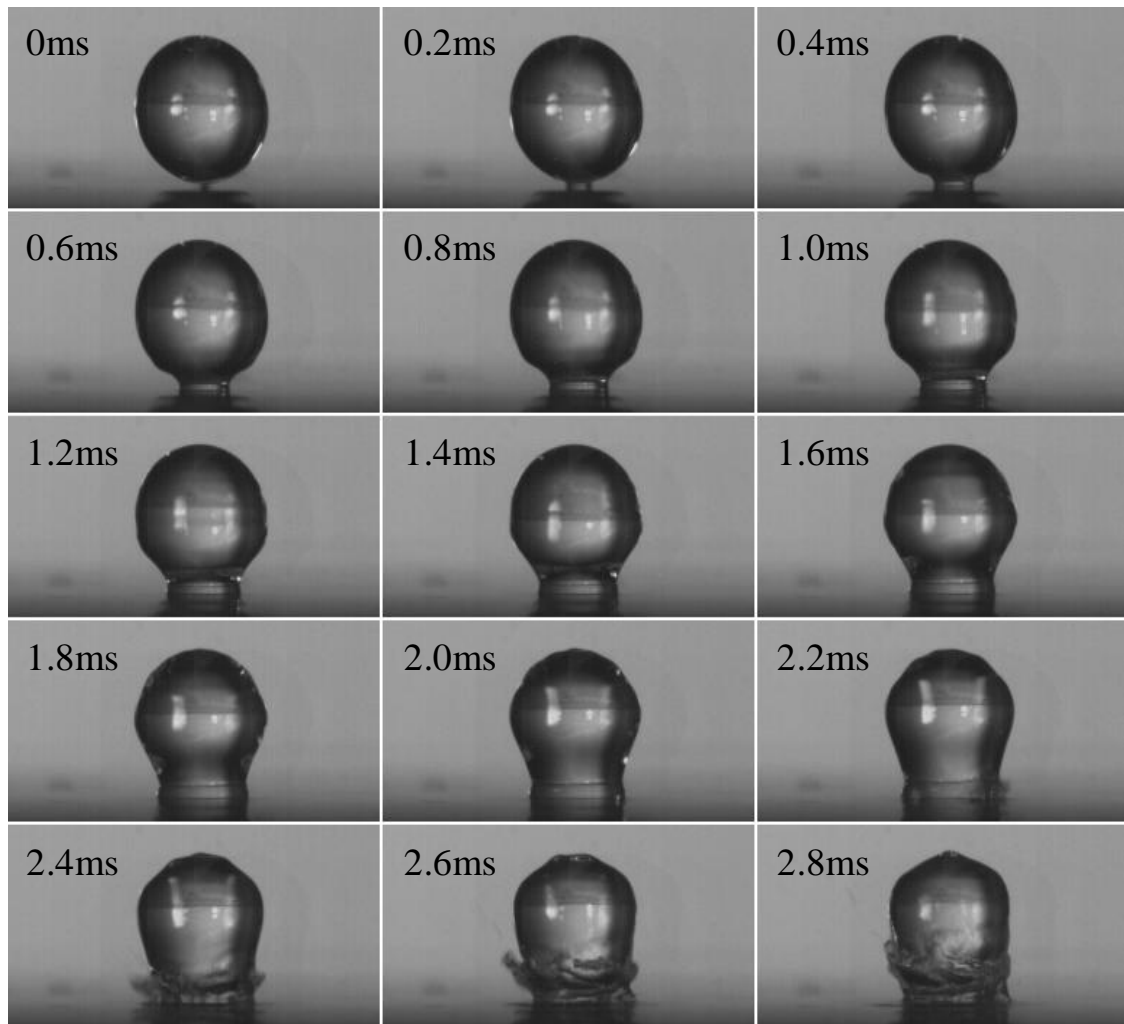


Fig. 5.26 Time sequential images of contacting phenomena during moving upward. The droplet is moving upward at velocity of 0.075m/s. The droplet is same with the one in . The images are the behavior of the droplet after bouncing from the liquid metal surface six

5.6 遅れ時間と蒸発時間の関係

本節では遅れ時間と蒸発時間の関係について示す。蒸発時間は1.1.2について述べたように、液滴が高温物体表面に衝突してからすべて蒸発するまでに要する時間として定義される。本研究においては、液体金属を完全に滑らかな表面を有する金属衝突面と仮定しているが、この仮定は液滴が衝突した後、接触・沸騰が開始される直後までにおいてのみ成り立つものである。液滴が沸騰した場合、生成された蒸気によって液体金属の表面形状は大きく変形し、もはや固体金属表面と同等の伝熱面として扱うことはできない。このため、液体金属を衝突面として使用した場合の蒸発時間は、本研究で対象としている完全に滑らかな高温金属表面に衝突する場合の液滴の蒸発時間ではなく、表面形状が沸騰により不安定に変形する液体金属表面上における固有の蒸発時間となる。よって、この蒸発時間と遅れ時間の対応関係は、実際の応用を検討するうえで重要となる固体金属表面上における蒸発時間と遅れ時間の対応関係を示すものではない。しかし、接触限界温度付近においては、液滴と液体金属表面との接触が生じないことから、上述の仮定が蒸発時間の測定においても成り立つことなど、応用上重要となる液滴の熱伝達特性を議論するうえで遅れ時間と蒸発時間の関係を明らかにすることが必要となる。蒸発時間の測定は、表面温度が100°Cから320°Cの範囲において、衝突速度が0.37m/s, 0.41m/s, 0.51m/sの場合についておこなった。

Fig. 5.27 に衝突速度が0.37m/sにおける蒸発時間の測定結果を示す。図の縦軸左は遅れ時間、縦軸右は蒸発時間に対応する。また図中黒丸(●)は各表面温度における遅れ時間の測定値、図中白丸(○)は蒸発時間の測定値を表す。蒸発時間の測定は液滴が衝突後に液体金属表面に安定して存在する表面温度までについておこなった。なお、表面温度が高温の場合には、浮遊状態となって液滴が表面上を運動して液体金属容器の外部に移動するため測定をおこなうことができなかった。図中に点線で示した T_d は接触限界温度、 T_w は濡れ限界温度を表す。この測定結果をみると、表面温度に対する遅れ時間と蒸発時間の変化特性は異なるものの、その接触限界温度と濡れ限界温度はほとんど等しい値となっていることがわかる。遅れ時間は、3.3.1に示したように表面温度により異なる変化特性を示すが、蒸発時間は表面温度の増加に対して単調に減少している。そして、表面温度が約240°C付近より、遅れ時間と蒸発時間は増加傾向を示す、もしくは測定されなくなる。これは遅れ時間が増加すると最終的に接触が生じなくなり、液滴の沸騰形態が膜沸騰となることにより遅れ時間が増加するためである。このため、本研究におけるライデンフロスト点は、遅れ時間が表面温度の増加にともない増加していき最終的に接触の生じなくなる温度である接触限界温度として定義されると考えられる。ただし、ここでいうライデンフロスト点は、西尾ら[7]が示した力学的特性点である。

Fig. 5.28 は衝突速度0.41m/sにおける遅れ時間および蒸発時間の測定結果であり、結果の記述方法はFig. 5.27の場合と同様である。また、Fig. 5.29 は衝突速度が0.51m/sにおける結

果である。これらの衝突速度条件においては、接触限界速度、および濡れ限界温度は測定されなかった。しかし、衝突速度が 0.41m/s の場合においては、表面温度が 300°C 付近から遅れ時間、蒸発時間がともに増加傾向を示しており、遅れ時間の増加にともない液滴の沸騰形態が膜沸騰に近くなっていることを示しているものといえる。

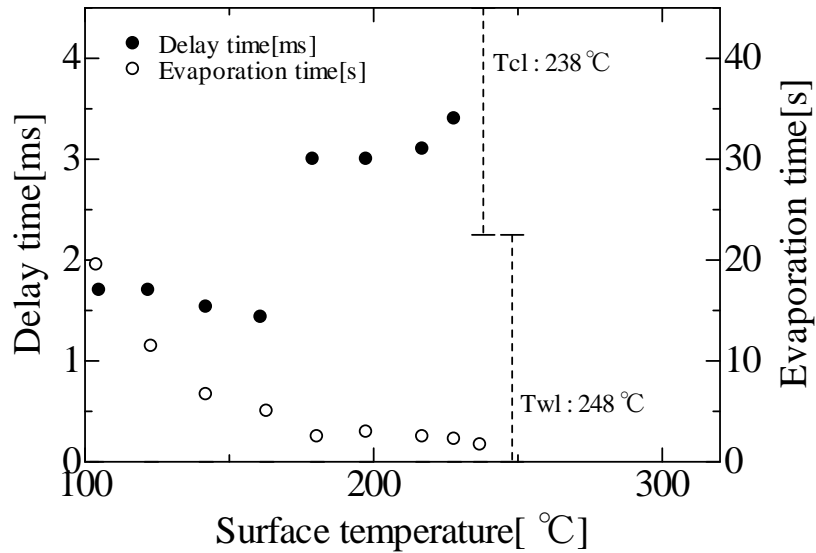


Fig. 5.27 Delay time and evaporation time at different surface temperature. The collision velocity of droplets was 0.37m/s. The right vertical axis shows the delay time and the left vertical axis shows the evaporation time. T_{cl} shows contact limit temperature and T_{wl} shows wetting limit temperature. The plots are the arithmetic average of measured values.

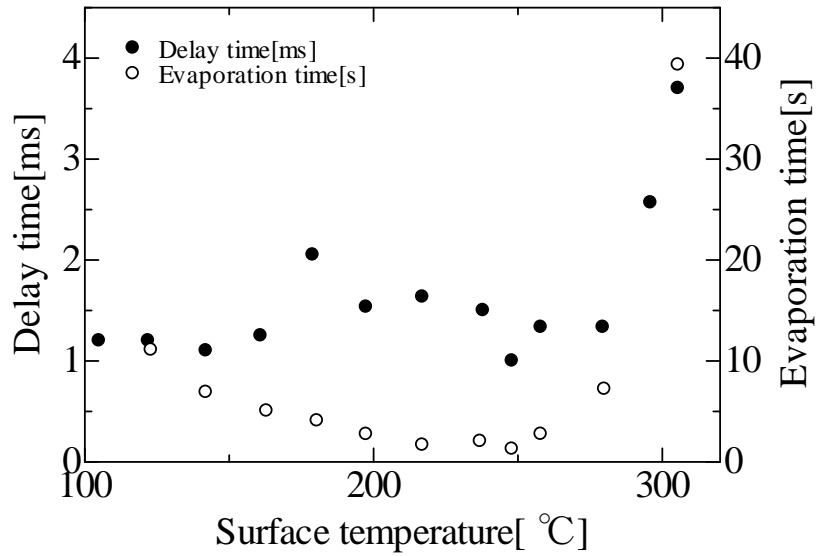


Fig. 5.28 Delay time and evaporation time at different surface temperature. The collision velocity of droplets was 0.41m/s. The right vertical axis shows the delay time and the left vertical axis shows the evaporation time. The plots are the arithmetic average of measured values.

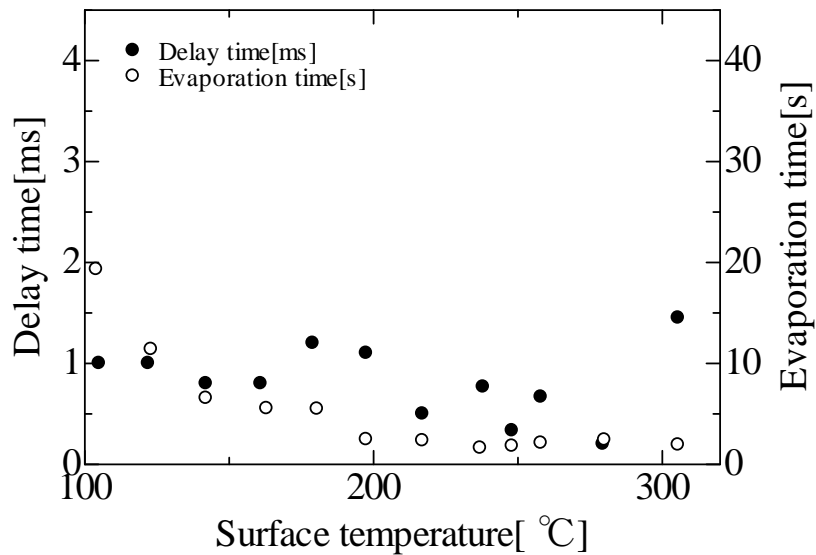


Fig. 5.29 Delay time and evaporation time at different surface temperature. The collision velocity of droplets was 0.51m/s. The right vertical axis shows the delay time and the left vertical axis shows the evaporation time. The plots are the arithmetic average of measured values.

第6章 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高速カメラによる撮影を中心として調査し、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、遅れ時間をともない接触・沸騰する。
特に表面温度が高温の場合には接触と同時に爆発的な沸騰が発生し、液滴底部から液体が高速で噴出される現象、および液滴上部からのジェット噴出現象が生じる。
- ②液滴と液体金属が直接接触することにより、接触角が急激に減少することから、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、および流体物性により変化する。
 - ・表面温度に対しては、遅れ時間は過熱度領域により異なる変化特性を示す。
過熱度：約 0K~60K においては、一定値となる。
過熱度：約 60K~80K においては、急激な増加傾向を示す。
過熱度：約 80K~接触限界温度 T_{cl} 付近においては、緩やかな減少傾向を示す。
過熱度：接触限界温度 T_{cl} 付近~においては、急激な増加傾向を示し、最終的に接触が発生しなくなり、遅れ時間は測定されなくなる。
 - ・衝突速度の増加に対して、遅れ時間は減少傾向を示す。ただし、過熱度条件によりその減少傾向が異なる。
過熱度が低い場合(約 0K~100K)、遅れ時間は衝突速度の一次関数として表される。つまり、

遅れ時間は衝突速度の増加に比例して減少する。

過熱度が高い場合(約 100K~), 遅れ時間は衝突速度の累乗関数として表される。このため、過熱度が低い場合と比較して衝突速度に対する変化が大きくなる。

- ・ 雰囲気圧力に関して、大気圧下と減圧下(約 50kPa)の遅れ時間測定をおこない、過熱度に対して、減圧下の遅れ時間は大気圧下の遅れ時間とほぼ同様の变化特性を示すという結果を得た。ただし、過熱度が低い場合(約 0K~24K), 遅れ時間が発生せず、また過熱度が高い場合(80K~), 大気圧下の約 2 倍の値となる。また、減圧下の液滴沸騰挙動は大気圧下の沸騰挙動とほぼ同様であるが、大気圧下で表面温度が高温の場合に発生する液体噴出現象、およびジェット噴出現象は発生しない。これは減圧下で液滴が過熱された状態となりやすく、接触と同時に液滴の大部分が蒸発するためである。

- ④ 自発核生成の発生を仮定したモデルにより、遅れ時間の発生機構が定性的によく説明される。このため、表面粗さが存在しない場合、表面温度が高温の場合、液滴底部は過熱状態になると考えられる。過熱度領域ごとの遅れ時間発生モデルは以下の通りである。

過熱度：約 0K~60K

遅れ時間は液滴と液体金属表面の界面間に存在する空気が、衝突の慣性力により外部へすべて排出されるまでに要する時間となる。この過熱度領域においては、液滴の蒸発はほとんど発生しない。

過熱度：約 60K~80K

この過熱度領域においては、液滴底部において活発な蒸発が発生する。このため、遅れ時間は蒸発により液滴と液体金属表面の界面間に生成される蒸気が衝突の慣性力により外部へすべて排出されるまでに要する時間となる。

過熱度：約 80K~接触限界温度 T_{cl} 付近

液体金属表面に表面粗さが存在しないため、液滴が過熱状態となり、自発核生成が発生することにより沸騰が開始される。このため、この過熱度領域における遅れ時間は液滴が衝突してから自発核生成温度に到達するまでの時間となる。

過熱度：接触限界温度 T_{cl} 付近~

十分な厚さの蒸気膜が形成されることにより、接触・自発核生成が発生しない。このため、液滴は衝突直後から膜沸騰状態となる。

- ⑤ 流体物性により、遅れ時間は変化する。そして、流体物性のなかでも特に、液体の飽和蒸気圧、および自発核生成温度が遅れ時間を決定する上で重要な要因であるといえる。このため、例えば自発核生成温度が非常に高く、飽和蒸気圧が高い(揮発性が低い)液体の液滴が滑らかな高温金属表面に衝突する場合、液滴が過熱状態となりやすく、接触が生じたさいには爆発的な沸騰が発生し、液滴が激しく飛散すると推察される。

第6章 結論

このため、上述のような物性値を有しており、かつ人体に有害な液体を使用した実験をおこなうさいには注意が必要である。

- ⑥固体金属表面に衝突する場合には遅れ時間がほとんど発生しないことから、表面粗さは、液滴と金属表面との接触を促進する働きを有するといえる。

参考文献

- [1] 小坂暁夫, 安尾晃一, 林勇二郎 滝本昭, "高温加熱面のミスト冷却に関する研究(低加熱度域の伝熱特性)," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 55, no. 595, pp. 3950-3956, 1996.
- [2] 柳謙一, "液滴による高温面の冷却," *燃料協会誌*, vol. 55, no. 595, pp. 892-898, 1976.
- [3] 松田穰, "最近の鋼材製造方法概論," *JFE スチール*, 2005.
- [4] U.M.MEZBAH, "Dynamic Processes And Boiling Phenomena During Droplet And Hot Surface Interaction," Master Thesis of The University of Tokyo 2010.
- [5] 阿部宜之, 岡利春, 森康彦, 長島昭 吉田顕一, "低重力下におけるスプレー冷却," *電子技術総合研究所彙報*, vol. 38, no. 6, pp. 574-580, 1995.
- [6] 日本機械学会編, *沸騰熱伝達と冷却*, 日本機械学会, Ed.: 日本工業出版, 1989.
- [7] 平田賢 西尾茂文, "ライデンフロスト温度に関する研究(第1報: ライデンフロスト温度の基本的性格に関する実験的検討)," *日本機械学会論文集*, vol. 43, no. 374, pp. 3856-3867, 1977.
- [8] 佐古光雄, 菊池義弘 関敬春, "液滴の蒸発過程に及ぼす表面被覆層の影響," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 43, no. 374, pp. 2323-2328, 1991.
- [9] C.J.Stebbins, I.Mudawar J.D.Benardin, "Effects of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes," vol. 40, no. 1, pp. 73-88, 1996.
- [10] 日高澄具, 山本弘志, 中村匡亨, 増田正孝, 伊藤猛宏 高田保之, "液滴の蒸発に関する接触角の効果(光励起超親水化現象を用いた接触角の制限)," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 68, no. 671, pp. 1911-1918, 2002.

- [11] 山下秋満, 高田保之 日高澄具, "濡れ限界温度に及ぼす接触角の影響," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 71, no. 709, pp. 2309-2315, 2005.
- [12] 宮阪芳喜, 西田浩二 稲田茂昭, "加熱面に衝突する液滴の非定常熱伝達(第1報: 固液接触状態に及ぼす液滴サブクール度の影響)," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 51, no. 463, pp. 1047-1053, 1985.
- [13] Y.M.Qiao and S.Chandra, "Boiling of droplets on a hot surface in low gravity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 7, pp. 1379-1393, 1996.
- [14] 福井隆志, 八田夏夫 藤本仁, "表面粗さの異なる加熱金属平面に衝突する微小液滴の変形挙動特性," *鐵と鋼*, vol. 82, no. 12, pp. 975-980, 1996.
- [15] 鈴木敏夫, 佐藤豪 徳岡直静, "高温壁面における液滴の挙動に関する研究(第2報: 液滴の粘性と表面張力の影響)," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 51, no. 465, pp. 1712-1719, 1985.
- [16] 平田賢 西尾茂文, "ライデンフロスト温度に関する研究(第2報: 固液接触面の挙動とライデンフロスト温度)," *日本機械学会論文集*, vol. 44, no. 380, pp. 1335-1346, 1978.
- [17] S.Yoshida, K.Okamoto, Y.R.Li, M.Tange and M.M.Uddin S.Someya, "Jet Ejection from droplets near the Leidenfrost temperature," *Journal of visualization*, vol. 13, no. 1, pp. 41-47, 2010.
- [18] T.Munakata S.Someya, "Measurement of the interface tension of immiscible liquids interface," *Journal of Crystal Growth*, vol. 275, no. 1-2, pp. 343-348, 2005.
- [19] 宮阪芳喜, 西田浩二 田茂昭, "加熱面に衝突する液滴の非定常熱伝達(第1報: 固液接触状態に及ぼす液滴サブクール度の影響)," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 43, no. 374, pp. 3856-3867, 1985.
- [20] 鈴木敏夫, 徳岡直静 佐藤豪, "高温壁面における液滴の挙動に関する研究(第1報: 分裂形態と変形挙動について)," *日本機械学会論文集(B 編)*, vol. 51, no. 465, pp. 1703-1711, 1985.
- [21] 中山浩太郎, 中村健二, 北川悦司, 上山智士, 杉町敏之, 野中一希 田中成典. (2011) アルゴリズム入門 : 第3章 画像処理入門 1. [Online]. <http://msdn.microsoft.com/ja-jp/academic/cc998604>
- [22] J.R.Banavar, and J.Koplik P.Dell'Aversana, "Suppression of coalescence by shear and temperature gradients," *Physics of Fluids*, vol. 8, no. 1, pp. 15-28, 1996.
- [23] P.Dell'Aversana and G.P.Neitzel, "When Liquids Stay Dry," *PHYSICS TODAY*, pp. 38-41, 1998.
- [24] G.P.Neitzel and P.Dell'Aversana, "NONCOALESCENCE AND NONWETTING BEHAVIOR OF LIQUIDS," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 34, no. 34, pp. 267-289, 2002.
- [25] R.SAVINO, and A.CICALA R.MONTI, "SURFACE TENSION DRIVEN-FLOW IN

- NON-COALESCING LIQUID DROPS," *Acta Astronautica*, vol. 38, no. 12, pp. 937-946, 1996.
- [26] R.SAVINO, and S.TEMPESTA R.MONTI, "Wetting prevention by thermal Marangoni effect. Experimental and numerical simulation," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 17, no. 1, pp. 51-77, 1998.
- [27] R.Monti, and G.Alterio R.Savino, "Drops pushing by Marangoni forces," *Physics of Fluids*, vol. 13, no. 5, pp. 1513-1516, 2001.
- [28] 東京都水道局 . (2012, Jan.) 水質基準項目 . [Online].
http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/w_info/s_kijun1.html
- [29] I.Mudawar J.D.Bernardin, "The Leidenfrost Point: Experimental Study and Assessment of Existing Models," *Journal of Heat Transfer*, vol. 121, no. 4, pp. 894-904, 1999.
- [30] 日本機械学会, 伝熱工学資料, 4th ed., 片山功蔵, Ed., 1986.

付録

A) 遅れ時間とジェットエクストラクション現象の関係

ジェットエクストラクション現象とは Someya ら [17]によって発見された、液滴と高温金属との相互作用により引き起こされる現象であり、その詳細は、1.2 に示したとおりである。本研究において、液体金属を衝突面として使用した場合にも同様の現象が観察されたため、本節でその撮影結果を示す。ただし、ジェットが発生する詳細な条件の調査はおこなっておらず、ここではジェットの発生が観察されたという報告をするにとどまる。また、液体金属を衝突面として使用した結果との比較のためにおこなった銅板を使用した実験においては、Someya らとは異なる条件(表面温度・衝突速度・表面粗さ)においてジェットエクストラクション現象が観察されたため、その結果も合わせて示す。

Fig. 1 に液体金属に衝突する場合に観察されたジェットエクストラクション現象の撮影結果を示す。このとき、表面温度は 306°C 、衝突速度は 0.40m/s であり、画像に記載した時刻は液滴が液体金属表面に衝突した時刻を 0ms としたときの経過時間を表す。液滴は 2.5ms までは表面上に静的に広がっており、このため、 2.5ms はこの条件における遅れ時間に対応する。 2.5ms において接触が生じた後、急激な沸騰が液滴底部において発生している。そして、生成された大量の蒸気のうちの一部分が、液滴の内部を上方に運動して、液滴上部に到達することによりジェットが発生している。このときの液滴内部の様子は液滴の変形が大きいため詳細におこなうことができないものの、この現象は Someya らの報告しているジ

ジェットエクストラクション現象と同様の現象であると考えられる。本研究において、この現象は表面温度：約 300°C~320°C，衝突速度：0.39~0.51m/s の条件において観察された。ただし、衝突速度が高速の場合には、ジェットの発生が穏やかなものとなる。Fig. 2 は表面温度 303°C，衝突速度 0.51m/s における撮影結果であり、Fig. 1 と比べて顕著なジェットは発生しないものの、蒸気の運動により液滴上部の形状が大きく変化し、ジェットと類似した現象が生じていることがわかる。上述の条件よりも表面温度が低温の場合には、液滴底部からの液体噴出現象が観察されるのみで、ジェットは発生しなかった。これは表面温度が低い場合には接触のさいに十分な蒸気生成がおこなわれなためである。つまり、ジェットの発生には液滴底部から外部に放出しきれない量の蒸気が接触とほぼ同時に生成される必要がある。また、衝突速度が小さい場合には、接触が発生せず、ジェットが発生しない。

本研究において観察されたジェットの発生には遅れ時間が大きく影響していると考えられる。遅れ時間が大きくなるにともない、接触時における液滴の見かけの接触径は大きくなる。そして、遅れ時間において液滴と液体金属との直接接触が発生したさいに、接触径が大きいほどその時刻において蒸発する液滴の量が増加する。接触は液滴底部のある一点を始点として開始されるわけであるが、接触が生じた瞬間にその点において急激な蒸発が生じると、その蒸気の圧力によって界面が持ち上げられることにより、周辺部も液体金属表面と接触する。このため、見かけの接触径の大部分においてほぼ同時に爆発的な沸騰が生じることから、大量の蒸気が生成され、液滴底部から外部に放出されなかった蒸気が液滴内部を上昇運動して、ジェットを発生させる。遅れ時間が小さい場合には、蒸気の圧力が液滴を表面から引き離す働きをするため、同時に発生する蒸発の規模は小さなものとなり、ジェットは発生しない。

つづいて、Fig. 3 に本研究において銅板を衝突面として使用した場合に観察されたジェットエクストラクション現象の撮影結果の一例を示す。このとき、液滴の初期衝突速度は 0.34m/s，表面温度は 313°C であり、撮影結果は液滴の二次衝突時におけるものである。このため、掲載画像における液滴の衝突速度は 0.34m/s よりも小さい。本研究においては、液滴の初期衝突時においてはジェットの発生は確認されず、二次衝突時、およびそれ以降の複数回衝突時においてジェットが発生した。銅板は#1000 のエメリー紙により研磨したものを使用しており、その表面粗さの定量的な測定はおこなっていないものの、Someya らがジェットを観察した条件と比較して表面粗さは大きいと考えられる。撮影結果から明らかなように、液滴は 0.6ms の遅れ時間をともない銅板と接触・沸騰している。また、蒸気が液滴内部を上方に運動する速度は Someya らの観察した場合と比較して遅く、約 0.25m/s であった。

また、Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 は衝突速度 0.17m/s，表面温度 311°C における液滴の初期衝突、二次衝突、三次衝突の撮影結果である。衝突回数が重なるにつれてジェットの発生が顕著となっていることがわかる。この撮影結果から、ジェットの発生には液滴の温度も重要なパラメータであるといえる。衝突のともなう接触により液滴の温度は上昇するため、衝突回数を重ねるにつれて液滴の温度が上昇する。液滴温度が低い場合には蒸気の凝縮が顕著

となるために液滴上部に到達する以前に蒸気が減速されるためジェットは発生しにくくなる。このため、ジェット発生のためには液滴温度が十分に高く、液滴底部で発生した蒸気が減速することなく、液滴内部を上方に移動して、その上部に到達することが必要となる。

Fig. 7 は衝突速度 0.51m/s 、表面温度 258.6°C における撮影結果である。この場合、接触と同時に液滴底部において蒸気が生成され、その一部が液滴内部に放出され上方運動をするものの、凝縮が発生することにより蒸気が減速されてジェットが発生していない様子が顕著に観察される。この撮影条件は、金属の表面粗さ・種類を除き、Someya らがジェットの発生を観察した条件とほぼ同様のものである。このことから液滴の温度がジェットの発生に影響しているといえる。

以上のように本研究において観察されたジェットイクストラクション現象より、その発生には、遅れ時間、および液滴温度も影響を及ぼすと推察されるが、その確認のためにはより詳細な検証が必要である。

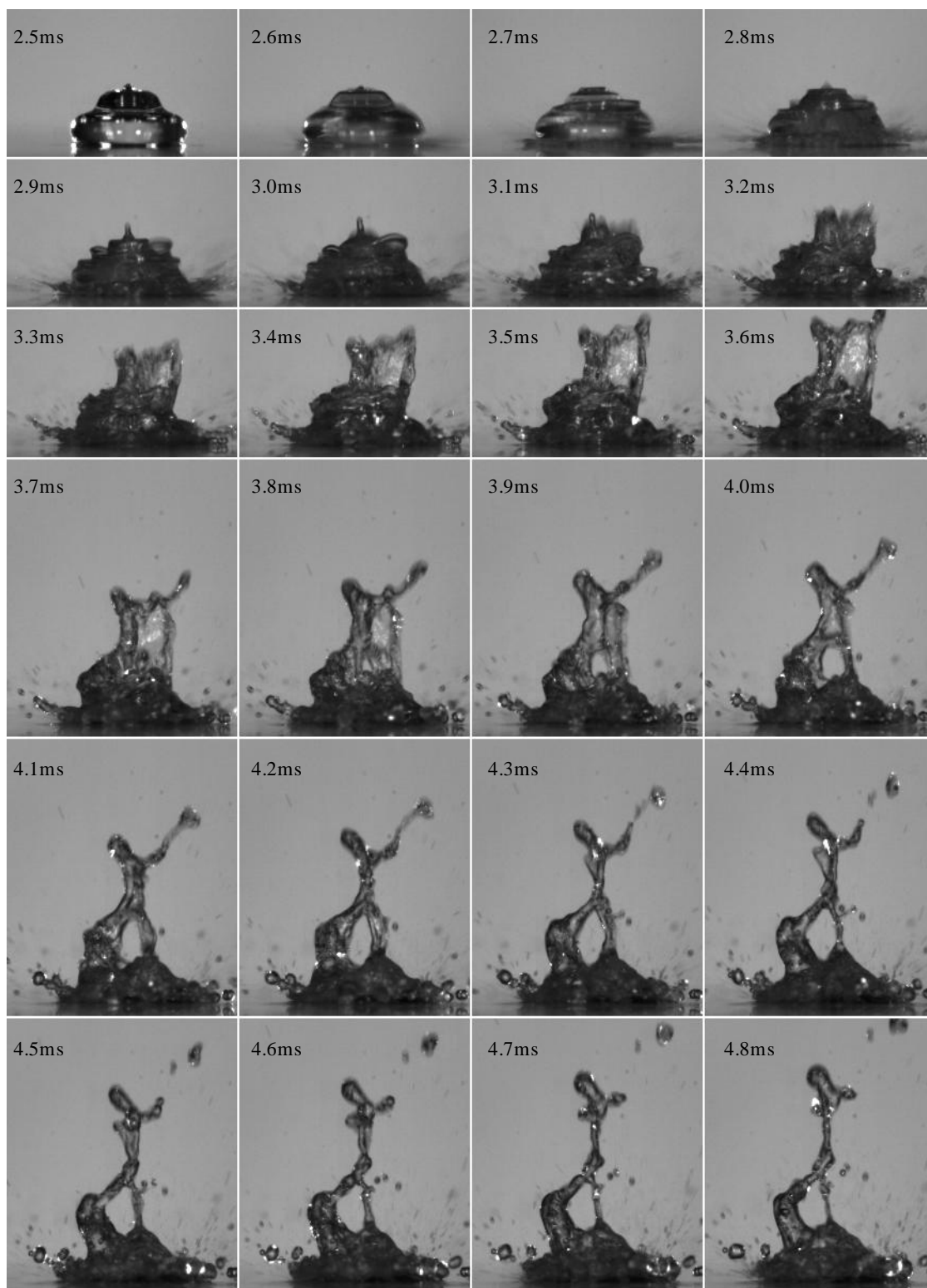


Fig. 1 Time sequential images of the droplet during jet ejection between 2.5ms and 4.8ms after impact. The surface temperature of the liquid metal was 306°C. The collision velocity of the droplet was 0.40m/s.

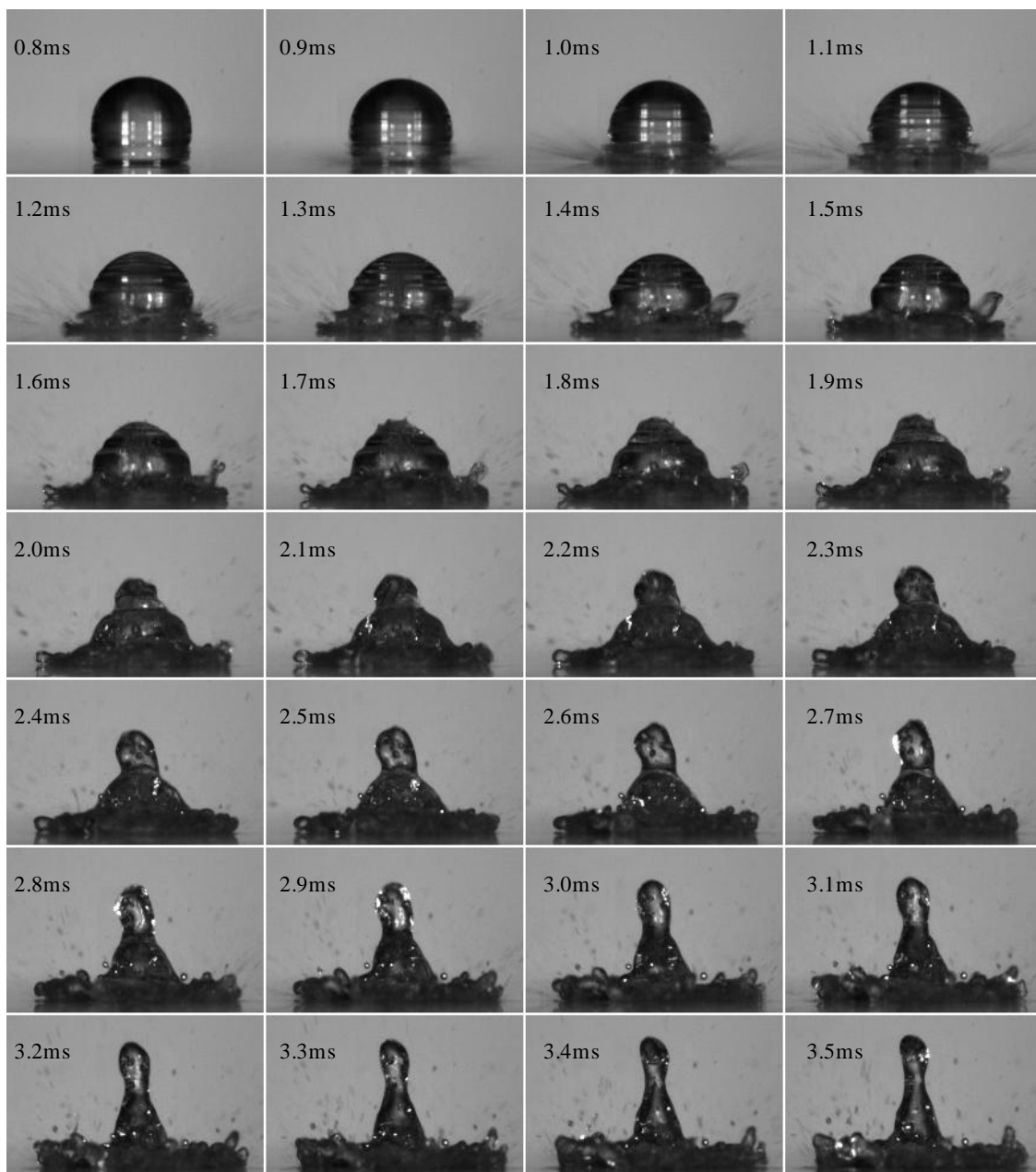


Fig. 2 Time sequential images of the droplet during jet ejection between 0.8ms and 3.5ms after impact. The surface temperature of the liquid metal was 303°C. The collision velocity of the droplet was 0.51m/s.



Fig. 3 Time sequential images of the droplet during jet ejection. The collided surface was heated copperplate. These images are the behavior of droplet during second collision. The surface temperature of the plate was 313°C. The first collision velocity of the droplet was 0.34m/s. The dotted red line circle shows the movement of the vapor that was generated at the the bottom interface of the droplet.



Fig. 4 Time sequential images of the droplet during jet ejection. The collided surface was heated copperplate. These images are the behavior of droplet during first collision. The surface temperature of the plate was 311°C. The first collision velocity of the droplet was 311°C.

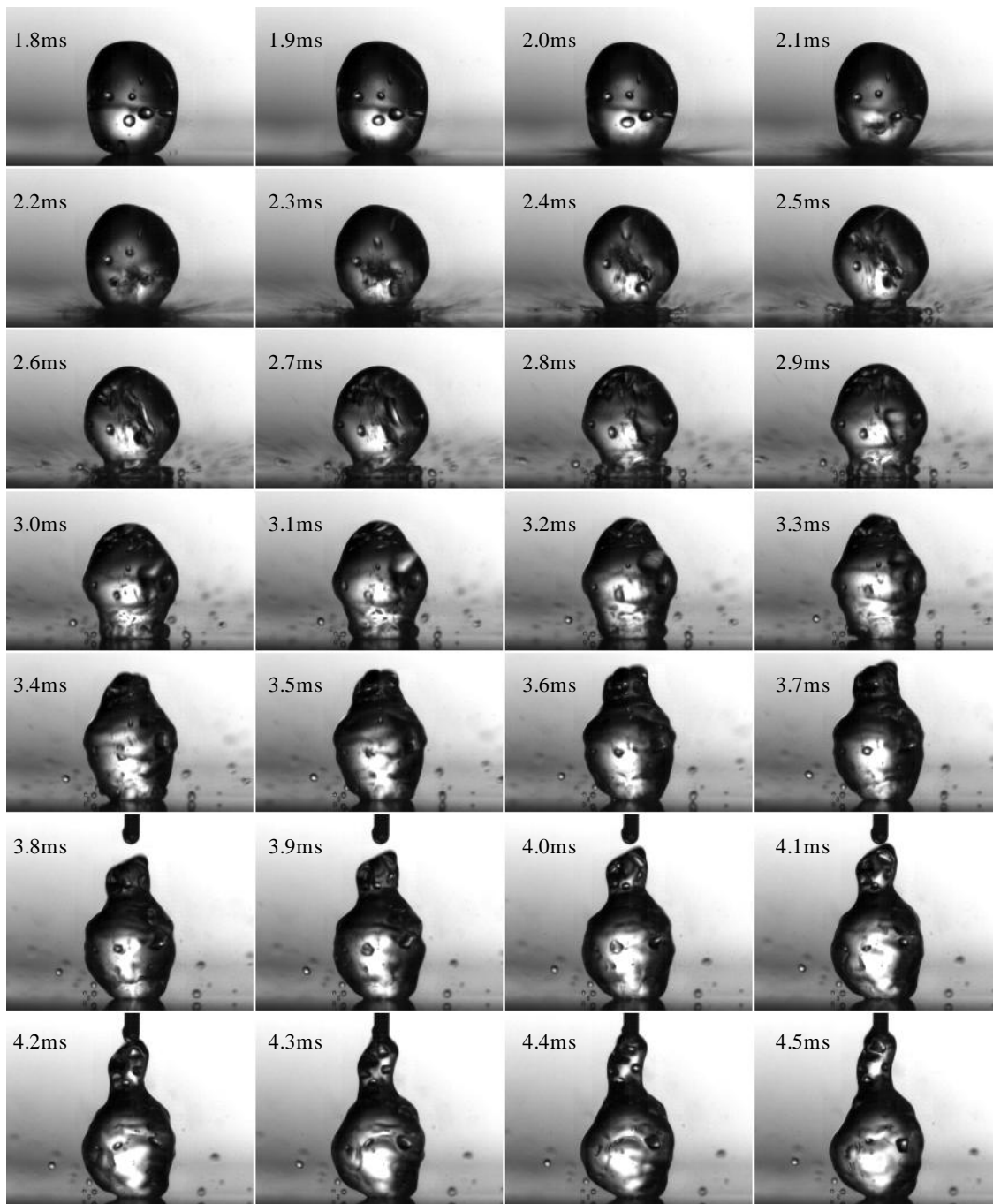


Fig. 5 Time sequential images of the droplet during jet ejection. These images are the behavior of the droplet in Fig. 4 during second collision to the copperplate surface.

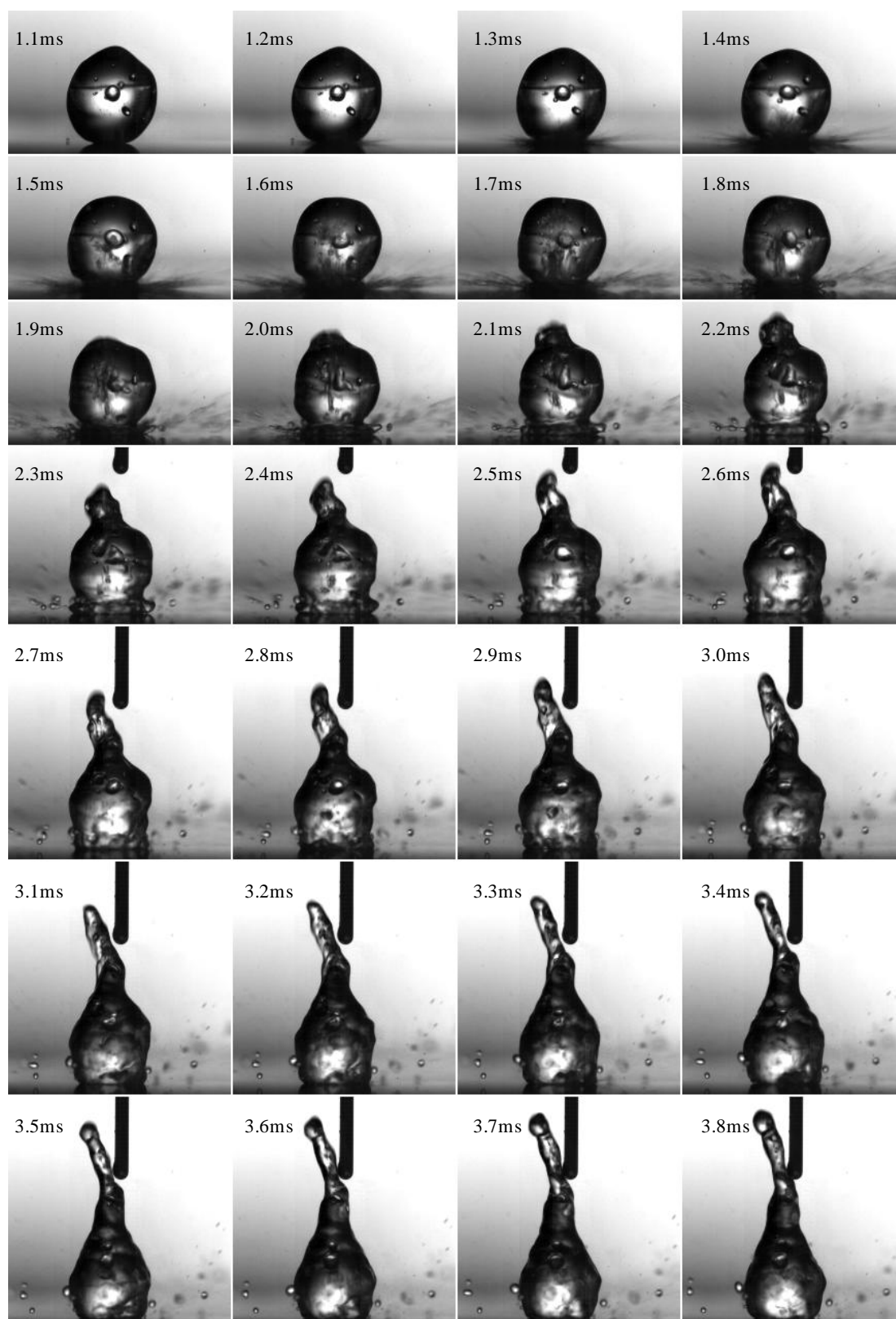


Fig. 6 Time sequential images of the droplet during jet ejection. These images are the behavior of the droplet in Fig. 4 during third collision to the copperplate surface.

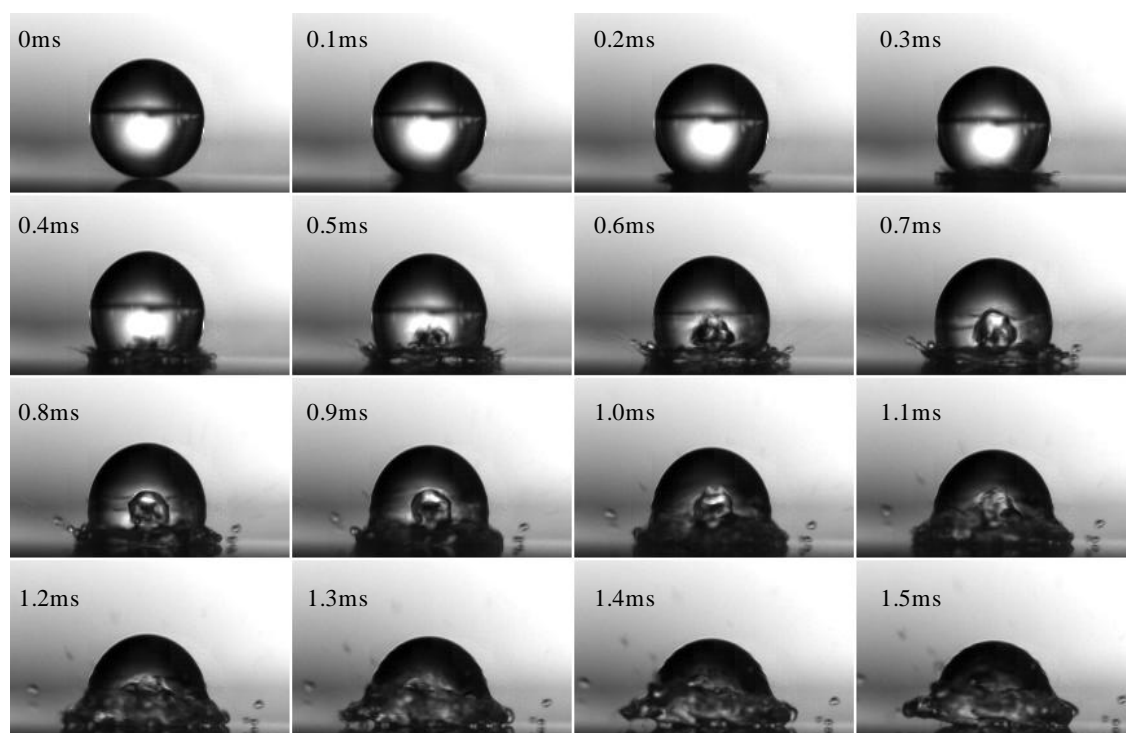


Fig. 7 Time sequential images of the droplet impinging to the heated copperplate surface. These images are the behavior of droplet during first collision to the plate surface. The surface temperature of the plate was 258.6°C . The collision velocity of the droplet was 0.51m/s . At this condition, the jet ejection did not occur. But the generation of the vapor cloud inside the droplet is observed.

謝辞

本論文の執筆にあたり、たくさんの方々にお世話になりました。

岡本先生には研究の指針となる貴重なアドバイスを幾度となく頂きました。入学当初は研究についてほとんど無知であった私が、修士論文という形で本研究をまとめることができたのは、ひとえに岡本先生の温かい・丁寧なご指導のおかげです。さらに、国際学会への参加など、貴重な経験もさせていただきました。心より感謝申し上げます。先生から教えていただいたことを胸に、社会人として頑張っていきたいと思います。

染矢先生には、研究に取り組む姿勢、実験に関する事など様々ことを学ばせて頂きました。先生から頂いたアドバイスによって研究が飛躍的に進んだことは忘れられません。自分と徳光との間では、研究における先生の助言は、僕らの1年分の仕事量に相当するともっぱらの噂です。その知識・研究への取り組みは私の憧れであります。本当にありがとうございました。いつか先生のような研究者になれるように精進していきたいと思います。

研究室の先輩方には、研究に関してご指導いただくだけにとどまらず、研究室旅行や飲み会など人として多くのことを学ばせていただきました。ありがとうございました。ぜひ、またご一緒できればと思います!!

岡本・染矢研の「ボス」である『師匠』には、大学院生活をとおして公私ともに大変お世話になりました。師匠なしには私の大学院生活はありえません!! そして、そんな師匠が私は大好きです。これからも仲良くしてください。あざっす!!

同期であるまっつん、西川、高橋には、いろいろと助けてもらいました。まっつんにはESを見てもらうなど特に就活でお世話になりました。西川には研究に関していろいろと教えてもらいました。高橋のクルマの乗り心地は最高だと思います。ありがとう、そして、これからもよろしくっす!!

美人秘書の下川さん、高橋さんは、私が研究室に行く最大のモチベーションを与えて下さりました。お二人の素敵な笑顔が研究室にあったからこそ、二年間研究室に通いつめることができたと確信しております。本当にありがとうございました。また、自分がだらしないばかりに、いつもお手数をおかけしたことを反省いたします。

席が隣だったリッキーには、ほぼ毎日、自分のくだらない世間話に付き合ってもらいました。いつも研究の邪魔ばかりして本当に申し訳ないっす。これからもがんばっ!!

本郷にはラーメンを食べに連れていってもらったり、飲み会を開いてもらったりとたくさんやる気もらいました。ありがとう!! リッキーと仲良くねっ!!

Song さん、徐さん、お二人とは研究室生活を通して楽しい時間を過ごすことができました!! ありがとうございました。今後ともよろしくお願いします。

最後になりましたが、私をいつもそばで支え、ここまで育ててくれた家族に感謝いたします。親父、おふくろ、ばあちゃん、理、ありがとうっ!! これからは恩返しできるように頑張りますっ!!

平成 24 年 2 月 12 日
安井 哲