

# 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

藤本 仁\*・福井 隆志\*<sup>2</sup>・八田 夏夫\*

Experimental Study of Deformation Process of a Water Droplet Impinging on Polished and Rough Surfaces Heated to above the Leidenfrost Temperature

Hitoshi FUJIMOTO, Takashi FUKUI and Natsuo HATTA

**Synopsis :** This paper treats the comparison of the deformation process of a water droplet impinging upon a hot polished (smooth) surface with that upon a hot oxide scaled (rough) surface. The surface whose material is SUS304 stainless steel, has been heated to 773K for both the smooth and rough cases and a water droplet diameter has ranged between 0.3mm to 0.7mm. The rough surface has been made artificially by rapid-quenching the impingement side of the test surface piece, which has been heated to 1273K in a furnace for about three hours, by water spraying. Thereby, the so-called oxide film has been formed on the surface. The droplet deformation process has been measured for the two cases where the droplet is struck on the smooth and rough surfaces, keeping the other experimental conditions constant. The deformation process has been found to be significantly different between the smooth and rough cases. The irregularity of the droplet configuration on the rough surface has been found to occur even in a short time after collision and to be amplified as the droplet deformation proceeds. For various Weber numbers, it has been found that the time needed for a droplet to reach a maximum diameter on surfaces can not be arranged as a function of the Weber number alone. Again, the difference between the smooth and rough cases becomes remarkable with increasing the Weber number.

**Key words :** spray cooling ; Weber number ; droplet deformation process ; Leidenfrost temperature.

## 1. 緒言

多数の微小液滴粒子を高温平板に衝突させ、その表面を緩冷却するミスト冷却やスプレー冷却の技術は、連続鋳造プロセスの2次冷却など幾つかの鉄鋼製造プロセスに適用されている。この冷却能を理論的に評価するには、まずその流れ場を把握することが必要不可欠であると考えられる。そこで著者らは、まずノズルから噴出する気液2相自由噴流の数値解析を行い<sup>1)</sup>、それによって得られた計算値が実験値と良好に対応することを確認した。ついで、実際の冷却に近い条件を想定して平板面に衝突する気液2相自由噴流の数値解析を、液滴粒子は平板面上で弾性反発するという仮定を導入して行った<sup>2)</sup>。ところが<sup>3)</sup>、実際は、液滴粒子は衝突時のウェーバー数によって分裂または反発することが実験的に知られている<sup>3)</sup>。ウェーバー数が小さい場合、高温平板に衝突した液滴は、まず薄い円盤状に広がり、最大径に達する。そして液滴の表面張力の効果によって収縮し、最後に平板面から反発する。ウェーバー数が大きい場合は、変形の途中で幾つかの小液滴に分裂する。しかし、高温平板

上の液滴粒子の変形や伝熱プロセスの詳細は、未だに充分明らかにされていないのが現状である。そこで、著者は常温および高温の平板に衝突する液滴粒子の変形挙動を数値解析し<sup>4-6)</sup>、その結果と実験結果を比較し、両者の間に良好な一致が得られることを確認している。また、高温平板に衝突する液滴の挙動は実験によっても調査し、液滴の挙動はウェーバー数によって特徴づけられることを示した<sup>7,8)</sup>。

また、高温平板に衝突する液滴の変形挙動は、スプレー冷却やディーゼルエンジンの研究者によっても実験的に調査されている。Wachters and Westerling<sup>9)</sup>、Uedaら<sup>9)</sup>、庄司ら<sup>10)</sup>、Akaoら<sup>11)</sup>、Naber and Farrell<sup>12)</sup>はライデンフロスト温度以上に加熱された金属平板に水やエタノール粒子を衝突させ、その変形挙動を観察している。また、Chandra and Avedisian<sup>13,14)</sup>はn-heptane粒子を使用して変形プロセスの調査を行っている。しかし、ほとんどの研究では滑らかな平板面が使用され、表面が粗い場合の変形挙動を扱ったものは非常に少ない。Chandra and Avedisian<sup>14)</sup>は液滴が衝突する表面に多孔質のセラミックを使用して、滑らかな平板面上のn-heptane粒子の変形挙動との差異を検討した

平成8年6月6日受付 平成8年9月9日受理 (Received on June 6, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

\* 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (Faculty of Energy Science, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606-01)

\* 2 京都大学大学院生 (Graduate Student, Kyoto University)

が、比較的低い温度領域に限定されている。著者らが調査した限りでは、酸化膜のある表面が粗い高温平板上の液滴の変形プロセスは明らかにされていない。

本研究はライデンフロスト温度以上に加熱された金属平板に微小液滴粒子を比較的小さなウェーバー数で衝突させたときの変形挙動を扱ったものである。直径 $300\mu\text{m}$ から $700\mu\text{m}$ の水滴を滑らかな表面と粗い表面の2種類の加熱平板に衝突させ、その変形挙動の差異を実験的に明らかにすることを目的としている。

本研究ではまず、2種類の平板に衝突する液滴の変形プロセスを同一条件で撮影し、両者の変形パターンを比較する。さらに、液滴の広がり幅、平板からの高さの時間履歴を測定し、平板表面の粗さが液滴の変形挙動に及ぼす影響を調べている。また、幾つかの異なった衝突条件で得られた実験結果をウェーバー数によって整理することを試み、液滴の変形特性はウェーバー数だけではなく、表面粗さにも影響を受けることを示している。

## 2. 実験方法

Fig. 1は本研究で用いた実験装置の概要を示したものである。この装置は直径 $300\sim 700\mu\text{m}$ の水粒子を水平に設置された加熱平板に垂直に衝突させ、その変形プロセスを観察できるように構成されている。本研究では加熱平板の表面温度は加熱装置の制約で $773\text{K}$ に固定している。また、表面粗さが全く異なる2種類の平板を用意している。1つはSUS304ステンレス鋼板の表面を滑らかに研磨したものであり、もう1つは圧延ままのステンレス片を3時間 $1273\text{K}$ に加熱した後、水スプレーで急冷し、それによって表面に酸化膜を形成させたものである。本論文では、便宜上、研磨した平板面を滑らかな表面と呼び、表面に酸化皮膜が形成されてい

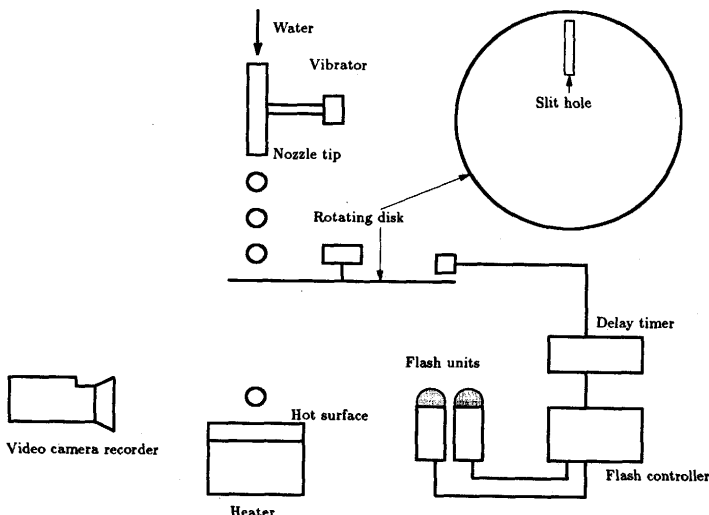


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

る平板面を粗い表面と呼ぶことにする。接触式表面粗さ計で測定した2種類の表面の表面粗さ(最大高さ( $R_{\text{max}}$ ))は、滑らかな場合 $0.4\mu\text{m}$ 、粗い場合 $35\mu\text{m}$ である。また、液滴の変形挙動は水平に設置されたビデオカメラによって調査している。2台のストロボ装置をある時間差で発光させることにより、衝突直前と衝突後の液滴の像を1枚のビデオ画面に2重露光撮影する。そして、多数の2重露光画像から統計的手法を用いて液滴形状の時間変化を測定している。実験装置および測定方法の詳細については既報の文献を参照されたい<sup>7)</sup>。

## 3. 結果と考察

ライデンフロスト温度以上に加熱された平板面に衝突した液滴はウェーバー数 $We(=\rho D_p v_0^2/\sigma; D_p$ ; 初期液滴直径,  $v_0$ ; 衝突速度,  $\rho$ ; 液相密度,  $\sigma$ ; 表面張力)がある臨界値より大きいと、変形途中で分裂し、それ以下のときは反発することがよく知られている<sup>8)</sup>。著者らはすでに臨界ウェーバー数は表面の材質、温度などによって変化し、かつ表面温度が $773\text{K}$ の滑らかなステンレス板に衝突する水滴の臨界ウェーバー数は45であることを確認している<sup>9)</sup>。本研究は、ウェーバー数が45以下の条件で実験を行っている。まず、同一条件で衝突実験を行い、2種類の平板上における液滴の変形プロセスの差異を調べた。実験条件は、直径 $D_p=0.445\text{mm}$ 、衝突速度 $v_0=2.2\text{m/s}$ でウェーバー数 $We=30$ である。

Fig. 2は水滴が滑らかな加熱平板に衝突したときの変形挙動を撮影したものである。液滴が平板面と衝突した瞬間を $T=0\mu\text{s}$ としている。また、これらの液滴画像は1個の液滴の変形挙動を追跡したのではなく、それぞれ異なる液滴の画像を時間経過に従って並べたものである。衝突直後、液滴下部から平板に沿って薄い水膜が形成されている( $T=64\mu\text{s}$ )。水膜は時間経過に従って発達し、同時に液滴の平板からの高さは低くなるので、液滴は薄い円盤状に変形していく( $T=101\sim 202\mu\text{s}$ )。しかし、衝突直後は固液の直接接触が起こるため、液体と平板との摩擦によって液滴の運動量が消耗されていく。また、液膜先端部の自由表面の曲率が大きいため、液膜先端部の内部圧力が中央部よりも高くなる<sup>9)</sup>。従って、液滴の半径方向速度は小さくなり、最大径に達する( $T\sim 292\mu\text{s}$ )。Fig. 2はビデオカメラを水平に設置して撮影した画像であるので観察できないが、このとき既報<sup>9)</sup>で述べているように周辺部にドーナツ状のリング構造が形成され、中心部の高さは周辺部よりも低くなっている。液滴はその後、表面張力の効果によって収縮を始める。周辺部の流体が中心部に向かって流れるため液滴径は徐々に小さくなる。そして、周辺から中心に向かう流れは中央部で合体し、その部分が盛り上がる( $T=688\mu\text{s}$ )。液滴はさらに収縮するので、中心部の高さはさらに高くなり、ついには縦長の形状で反発する( $T=927\mu\text{s}$ )。反発のメカニズムにつ

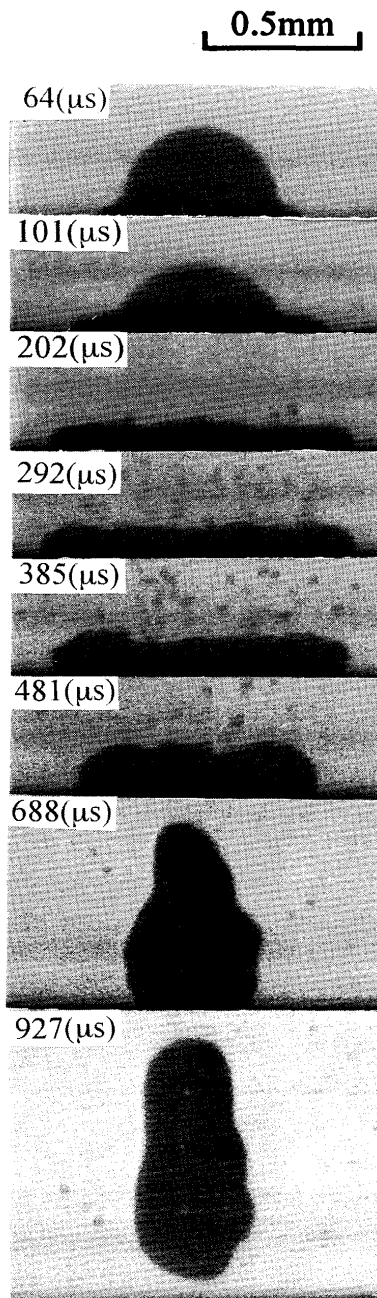


Fig. 2. A sequence of photographs showing droplet deformation process on a polished surface on condition that  $D_p=0.445\text{mm}$  and  $v_0=2.2\text{m/s}$ .

いては文献<sup>5)</sup>を参照されたい。

Fig. 3はFig. 2と同一条件で液滴を粗い加熱表面に衝突させたときの形状の時間的変化を示したものである。液滴が円盤状に広がっていく初期の過程では、滑らかな場合とほぼ同様の变形挙動を示している。しかし、その後は平面が滑らかな場合と大きく異なっている。T=215 $\mu\text{s}$ では、円盤状に広がった液滴の厚さが不均一になっており、リング構造の断面形状が円周方向で変化していることがわかる。リング構造の液膜の厚さが大きいところは流体が集まっており、薄いところは流体が少なくなっている。曲率の小さくなったリング構造の表面張力の効果によって収縮作用が起

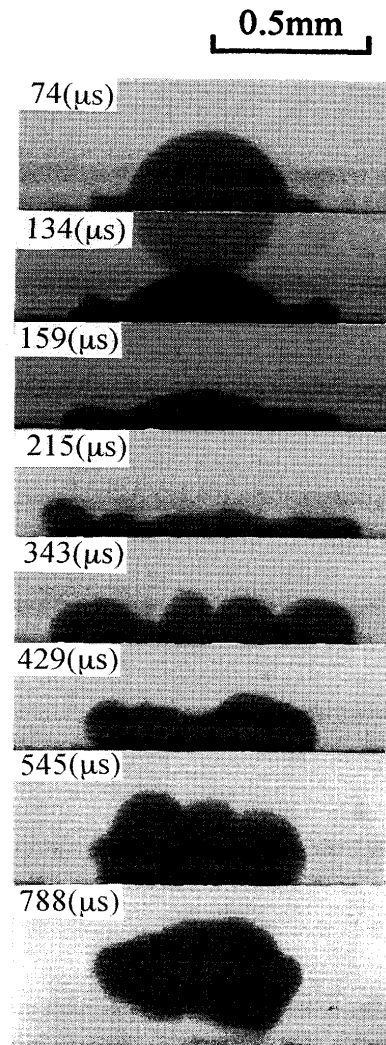


Fig. 3. A sequence of photographs showing droplet deformation process on a rough surface on the same condition as shown in Figure 2.

こるが、その膜の厚さは増え続ける。そのため、リング構造の円周方向の厚さの変化はより顕著になっていく。衝突後T=343 $\mu\text{s}$ では、リング構造は幾つかの半球状の塊が連なったような形状になっているのが観察できる、しかし、液滴の収縮がさらに進行すると、これらの流体塊同士の間隔が狭くなり、やがて合体するので半球状の流体塊の個数は減少する(T=545 $\mu\text{s}$ )。さらに時間が経過すると、液滴はいびつな形状で平板面から反発する(T=788 $\mu\text{s}$ )。なお、Fig. 3に示した反発液滴の形状は幾分横長になっているが、その形状は様々であり縦長のものや、幅と厚さがほぼ同じものなどが存在し、液滴の反発前後では、再現性のある変形パターンは見られない。この点が滑らかな平板上の液滴の变形過程と異なる。

表面が粗い場合の变形をさらに詳しく観察してみると(Fig. 3参照)、衝突直後から平板に沿って発達する薄い水膜が非対称となっていることがわかる(74 $\mu\text{s}$ )。つまり、衝突直後から表面粗さの影響が現れている。平板の表面温度はライデンフロスト温度よりも高いため、液滴の变形途中に

は固液界面に蒸気膜が形成されると考えられる。蒸気膜が形成されると、固液接触が起こらなくなり、表面の液滴挙動に及ぼす影響は小さくなると考えられる。蒸気膜の厚さと形成時期を正確に特定することはできない。しかし、既報<sup>5)</sup>で報告しているように、蒸気膜の形成時期は液滴が最大径に達するときであると仮定して、数値解析を行い、実験結果と比較すると極めて良好な一致が得られている。その事実を考慮すると、液滴の収縮過程では蒸気膜が形成されていると考えても大きな間違いではないだろう。すると、収縮過程では表面粗さは液滴の挙動に大きな影響を及ぼさないことになる。したがって、収縮過程および反発過程で見られる液滴の非対称性は、衝突直後の固液直接接触によって起こった非対称性が時間経過に従って増幅された結果であると考えられる。

つぎに、上記の2種類の平板上の液滴の変形プロセスの差異を、より詳細に検討するため、変形中の液滴径 $D$ 、平板面からの最大高さ $H$ 、液滴が反発した後の液滴最下部と平板面との距離 $C$ の時間推移を調査した。Fig. 4は滑らかな表面および粗い表面にFig. 2および3と同一条件で衝突する液滴の形状変化に伴う $D$ 、 $H$ および $C$ の時間推移を示したものである。ここで、 $D$ 、 $H$ および $C$ の具体的表示はFig. 5によって定義されている。また、図中の測定値は、数多くの液

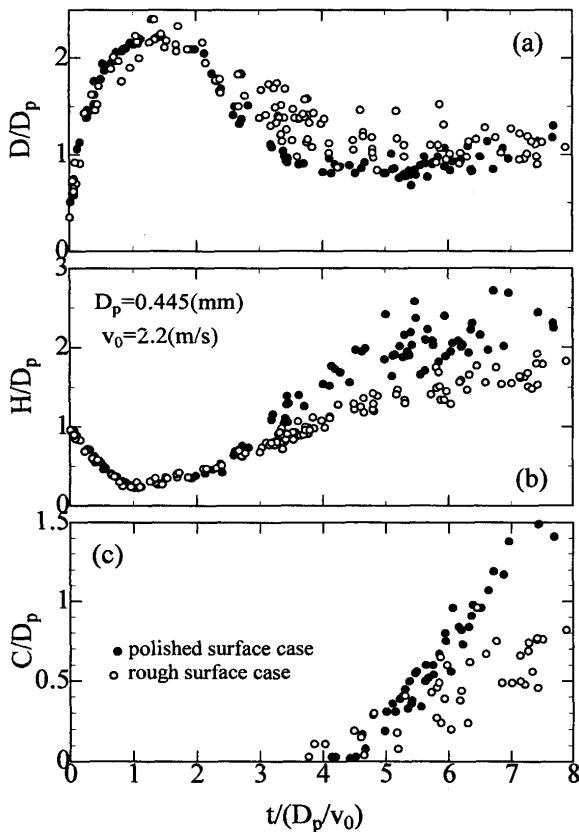


Fig. 4. Time histories of droplet diameter(a) on polished and rough surfaces, droplet height (b) and distance(c) between the bottom of rebounding droplet and surfaces.

滴を2重露光撮影することで得られたものであり、1個の粒子を時間的に追跡したものではないことを付け加えておく。液滴が拡大する過程では液滴高さ $H/D_p$ の時間履歴は、平板表面の粗滑に関係なくほぼ同一の経路をたどっている。液滴径 $D/D_p$ もほぼ同じ経路をたどっているが、粗い表面の場合、幾分ばらつきが見られる。これは、衝突直後の固液の直接接触のために、平板表面の粗さが液滴下部に形成される薄い液膜の半径方向の流動を不均一にするためと考えられる。

平板表面の粗さの違いによる変形プロセスの差は液滴が最大径に達した後、収縮過程で顕著に見られる。粗い表面上の液滴径は滑らかな場合と比べて大きくなっており、測定値もばらついている。また、液滴高さは表面が滑らかな場合よりも小さくなっている。さらに、反発前後の液滴上部および下部の上昇速度を比較すると、滑らかな平板上の液滴のほうが上昇速度が大きくなっており、液滴の反発係数が大きいことがわかる。また、表面が粗い場合、反発後の液滴下部と平板の距離の測定値もばらついている。

つぎに、幾つかの条件で衝突実験を行い、液滴の変形挙動をウェーバー数で整理することによって、平板表面の粗さが液滴の変形挙動に及ぼす効果を調査した。まず、液滴が平板上で衝突後最大広がり径に達するまでの時間 $T_{max}$ は、表面が滑らかな場合、次式のようにウェーバー数のみの関

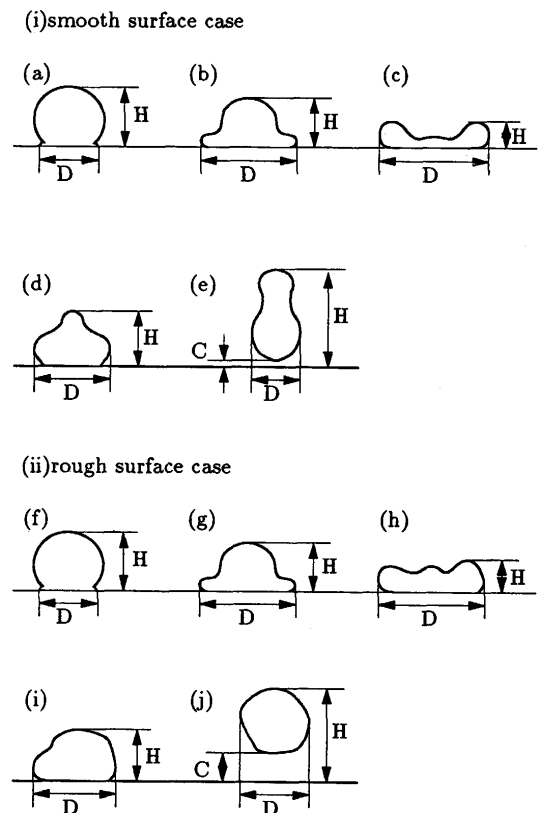


Fig. 5. Definitions of droplet diameter, droplet height and distance between the bottom of rebounding droplet and surfaces.

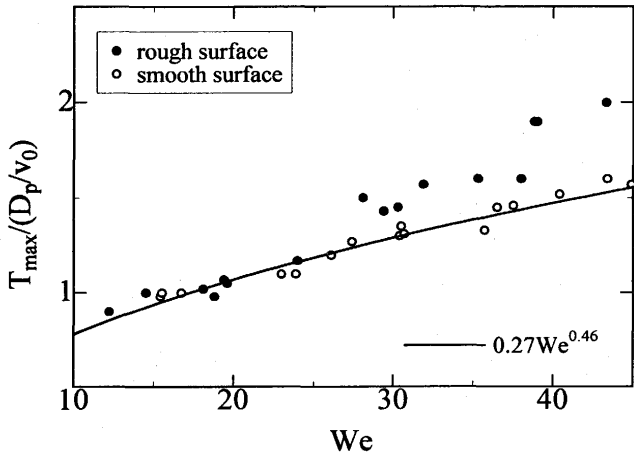


Fig. 6. Relation between the non-dimensional time from the moment of impact to reaching a maximum diameter on surfaces and the Weber number.

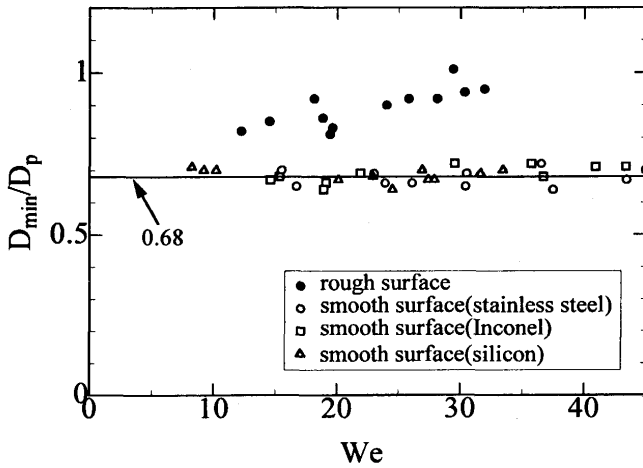


Fig. 7. A minimum diameter of droplet in recoiling process against the Weber number.

数で整理できることがわかっている<sup>8)</sup>。

$$T_{\max}/(D_p/v_0) = 0.27 We^{0.46} \dots \dots \dots (1)$$

上式は、表面材質としてインコネル625合金、ステンレス鋼、シリコンを使用したときの実験式である。Fig. 6はウェーバー数  $We$  と加熱平板に衝突した液滴が最大径に達するまでの無次元時間  $T_{\max}/(D_p/v_0)$  の関係を示したものである。実線は式(1)の計算値である。ウェーバー数が小さい領域では  $T_{\max}/(D_p/v_0)$  は表面の粗さに拘わらずほぼ同様の値になっている。しかし、ウェーバー数が大きくなると、表面が粗い場合の方が滑らかな場合よりも  $T_{\max}/(D_p/v_0)$  の値が大きくなる傾向が見られる。したがって、表面が粗い場合はウェーバー数のみの関数で表示できないことがわかる。

つぎに、液滴が最大径に広がった後、収縮し、その直径が最小になるときの値  $D_{\min}$  を検討してみる。Fig. 7は表面が滑らかな場合と粗い場合の液滴の最小径  $D_{\min}/D_p$  とウェーバ

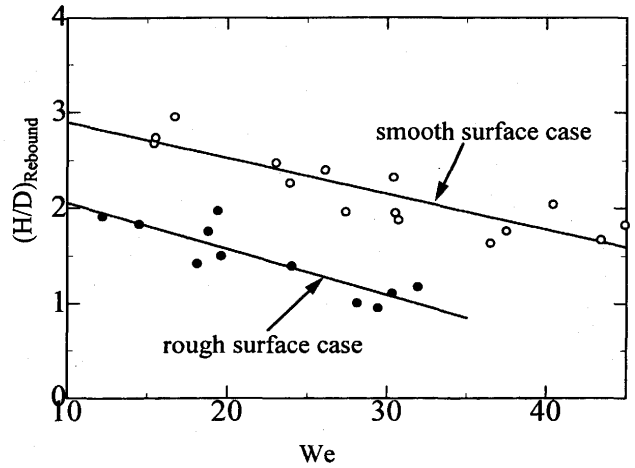


Fig. 8. Ratio of droplet height to droplet diameter at the moment of rebounding from surface against the Weber number.

一数  $We$  の関係を示したものである。なお、液滴径の計測値はFig. 4 (a)で見られるように、かなりばらついているので、最小値は平均値によって定義されている。また、表面が滑らかな場合については、参考のためインコネル625合金およびシリコンの測定値も示している。表面が滑らかな場合はウェーバー数に拘わらず最小径はほぼ一定値になっており、その値は  $D_{\min}/D_p \sim 0.68$  である。また、表面が粗い場合の  $D_{\min}/D_p$  は、表面が滑らかな場合のそれよりも大きく、その値はウェーバー数の増加に従って大きくなっているのが観察される。なお、表面が粗い場合の測定データがウェーバー数が35以下の場合しか存在しないのは、それ以上のウェーバー数では液滴が変形途中で幾つかの小液滴に分裂してしまうからである。

最後に、液滴が反発するときの形状を調査する。Fig. 8は液滴が平板面から反発するときの液滴高さ $(H/D)_{\text{rebound}}$ と液滴径 $D_p$ の比  $(H/D)_{\text{rebound}}$  とウェーバー数  $We$  との関係を示したものである。 $(H/D)_{\text{rebound}} > 1$  のとき、液滴は縦長の形状で反発することを示す。表面が滑らかな方が液滴はより縦長の形状で反発している。また、ウェーバー数の増加に従って  $(H/D)_{\text{rebound}}$  は小さくなっている。

#### 4. 結言

ライデンフロスト温度以上に加熱された金属平板に衝突する液滴粒子の変形挙動を実験的に調査した。滑らかな表面と粗い表面を用いて衝突実験を行い、表面粗さが液滴の変形過程に及ぼす影響を検討した。その結果を以下に列記する。

(1)滑らかな平板表面上では、液滴がほぼ軸対称を維持したまま、拡大、収縮そして反発するのに対して、粗い表面上では、その形状は衝突直後から対称性が失われ、変形過程が進むにつれて非対称性が増幅されていく。

(2) 液滴が平板に衝突後, 最大径に達するまでの時間は, 表面が粗い場合の方が大きい。また, その差はウェーバー数の増加に従って大きくなっていく。

(3) 円盤状に広がった液滴が収縮するプロセスでは, 表面が粗い場合の方が液滴径が大きくなっている。また, 液滴径の最小値は, 表面が滑らかな場合, ウェーバー数によらずほぼ一定値をとるが, 粗い場合はウェーバー数に従って大きくなる傾向が認められる。

(4) 液滴が平板面から反発するときの形状は, 表面が滑らかな場合の方が表面が粗い場合よりも縦長になっている。また, ウェーバー数の増加に従ってその縦横比は小さくなっていく。

本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号07455287)により行った。記して感謝の意を表す。

#### 文 献

- 1) N.Hatta, R.Ishii and H.Fujimoto: Trans. ASME J. of Fluids Engg., **114** (1992), 420.
- 2) N.Hatta, H.Fujimoto and H.Takuda: Applied Scientific Research, **50** (1993), 129.
- 3) L.H.J.Wachters and N.A.Westerling: Chemical Engg. Science, **21** (1966), 1047.
- 4) N.Hatta, H.Fujimoto and H.Takuda: Trans. ASME J. of Fluids Engg., **117** (1995), 394.
- 5) H.Fujimoto and N.Hatta: Trans. ASME J. of Fluids Engg., **118** (1996), 142.
- 6) N.Hatta, H.Fujimoto, H.Takuda, K.Yamamoto, K.Kinoshita and O.Takahashi: ISIJ Int., **35** (1995), 1094.
- 7) N.Hatta, H.Fujimoto, H.Takuda, K.Kinoshita and O.Takahashi: ISIJ Int., **35** (1995), 50.
- 8) N.Hatta, H.Fujimoto, H.Takuda and K.Kinoshita: Trans. ASME J. of Fluids Engg. に投稿中.
- 9) T.Ueda, T.Enomoto and M.Kanetsuki: Bulletin of the JSME, **22** (1979), 724.
- 10) 庄司正弘, 湧永隆夫, 児玉 健: 日本機械学会論文集B, **50-451** (1984), 716.
- 11) F.Akao, K.Araki, S.Mori and A.Moriyama: Trans. ISIJ, **20** (1980), 737.
- 12) J.D.Naber and P.V.Farrell: SAE Technical Paper, **930919** (1993).
- 13) S.Chandra and C.T.Avedisian: Proc. Royal Soc. London A, **432** (1991), 13.
- 14) S.Chandra and C.T.Avedisian: Int.J. of Heat and Mass Transfer, **35** (1992), 2377.