

液滴の蒸発におよぼす加熱面性状の影響

Effect of Characteristics of Heated Surface on Evaporation of Water Droplet

高島 武雄, 巻島 有希*

TAKASHIMA Takeo, Yuki MAKISHIMA

1. はじめに

高温固体面上での水滴の蒸発特性については古くから多くの実験・研究が行われている。蒸発特性のうち蒸発様相や蒸発時間には加熱面温度 T_w を始め多くの因子が関係する。

加熱面上の水滴の代表的な様相を毎秒4000コマの速度で撮影した高速度ビデオカメラによる写真をFig.1に示す。Fig.1(1)は $T_w=150^\circ\text{C}$ の様相で核沸騰、(2)は $T_w=200^\circ\text{C}$ の様相で遷移沸騰、(3)は $T_w=250^\circ\text{C}$ の様相で膜沸騰の様相である。蒸発時間は T_w が最も低い(1)が短くなり、蒸発速度が最大となる。

蒸発速度に影響を与える因子の一つに伝熱面の表面粗さが考えられる。一般的に、Fig.1の(1)や(2)のライデンフロスト温度 (Leidenfrost温度、以下、LF温度とする) 以下の様相では、接触角が小さいほど蒸発速度が短くなる⁽¹⁾が、広い温度範囲に渡って接触角と蒸発速度の関係は明らかではない。

滴下時に固液が接触する温度の上限は、液滴と加熱面の接触時の界面温度が、液滴の自発核生成温度が固体面温度に達するときと考えられ、このときの加熱面温度はLF温度より高温となる。LF温度以上では、LF膜沸騰によって、液滴と伝熱面が蒸気膜で隔てられるため、蒸発時間が極めて長くなるが、伝熱面にセラミック被覆を施したり⁽²⁾、ガラス繊維のウイックを設けたり⁽³⁾することで、LF温度を高温側に移行して、広い温度域で蒸発時間を短縮できることが報告されている。

一般に固液が接触する温度領域における、蒸発時間を支配する表面性状因子には以下の因子があげられる。

①物理的表面形状 (例、表面粗さ、ガラス繊維設置面⁽³⁾)、②表面処理 (セラミックス被覆面⁽²⁾、酸化チタン被覆面⁽¹⁾)、③表面物性、④複合効果、など。

しかしながら、LF温度以上の温度域での濡れ性の向上や伝熱面粗さと蒸発時間の関係は必ずしも明確にされておらず、セラミックス面での蒸発時間の改善は、低い熱伝導率のためとされており⁽⁴⁾、濡れ性に関しては言及されていない。

本研究では、①および②の影響について実験的に調べた。

①については、(1-a)表面粗さの異なる加熱面、(1-b)メッシュの異なるステンレス製金網設置面、(1-c)多数の金属球設置面、②については、(2-a)フッ素樹脂コーティング材をスプレーで塗布した面、(2-b)窒化ホウ素微粒子を含む離型剤をスプレー塗布した面 (以下離型剤面とする)、加熱面上に設置あるいは塗布したときの蒸発時間を測定して、上記の関係を明らかにすることを目的とした実験を行った。

なお、本研究では①と②を含めて加熱面性状とした。

2. 蒸発時間を支配する表面性状因子

加熱面上の液滴の蒸発時間に関する①物理的表面形状の影響については、評価は接触角によって行う。

通常の金属面と水では、接触角 $\theta < 90^\circ$ なので表面粗さが粗いほど濡れ性は向上するが、実際の粗面では極値を持つことが示されている⁽⁵⁾。しかし、シリコン油で撥水処理を施した面では、 $\theta > 90^\circ$ となるため、平滑面に較べて加工を施した粗面では、撥水性が向上する⁽⁶⁾。

また、②表面処理のうち、酸化チタンを塗布することによって親水性の向上をはかることができる。セラミックス被覆、フッ素樹脂被覆、離型剤などの塗布は濡れにくい材質を塗布することで撥水性の向上をはかることができる。この効果はLF膜沸騰温度域でも有効かは明らかにはされていない。また、セラミックス被覆は、熱伝導率の低下による蒸気膜の形成という④複合効果も期待できる。

本研究では、表面粗さを変化させる方法の一つとして、加熱面上に金属の小球を規則的に並べた表面と金網面を設置した表面を用いた。小球を規則的に並べた表面は理想表面といえるのに対し、金網面を設置した表面は方向性を持つ面である。両者の間には濡れ性に相違があること紹介されている⁽⁵⁾。

本研究では、粗面の理想面として小球を規則的に並べた面を、不均質固体表面として金網面を考えた。

ガラス繊維に滴下した液滴の蒸発速度が大きくなる⁽⁴⁾のも、もともと清浄なガラスが水とよく濡れることと、繊維状にすることで表面を粗面としていることが考えられる。

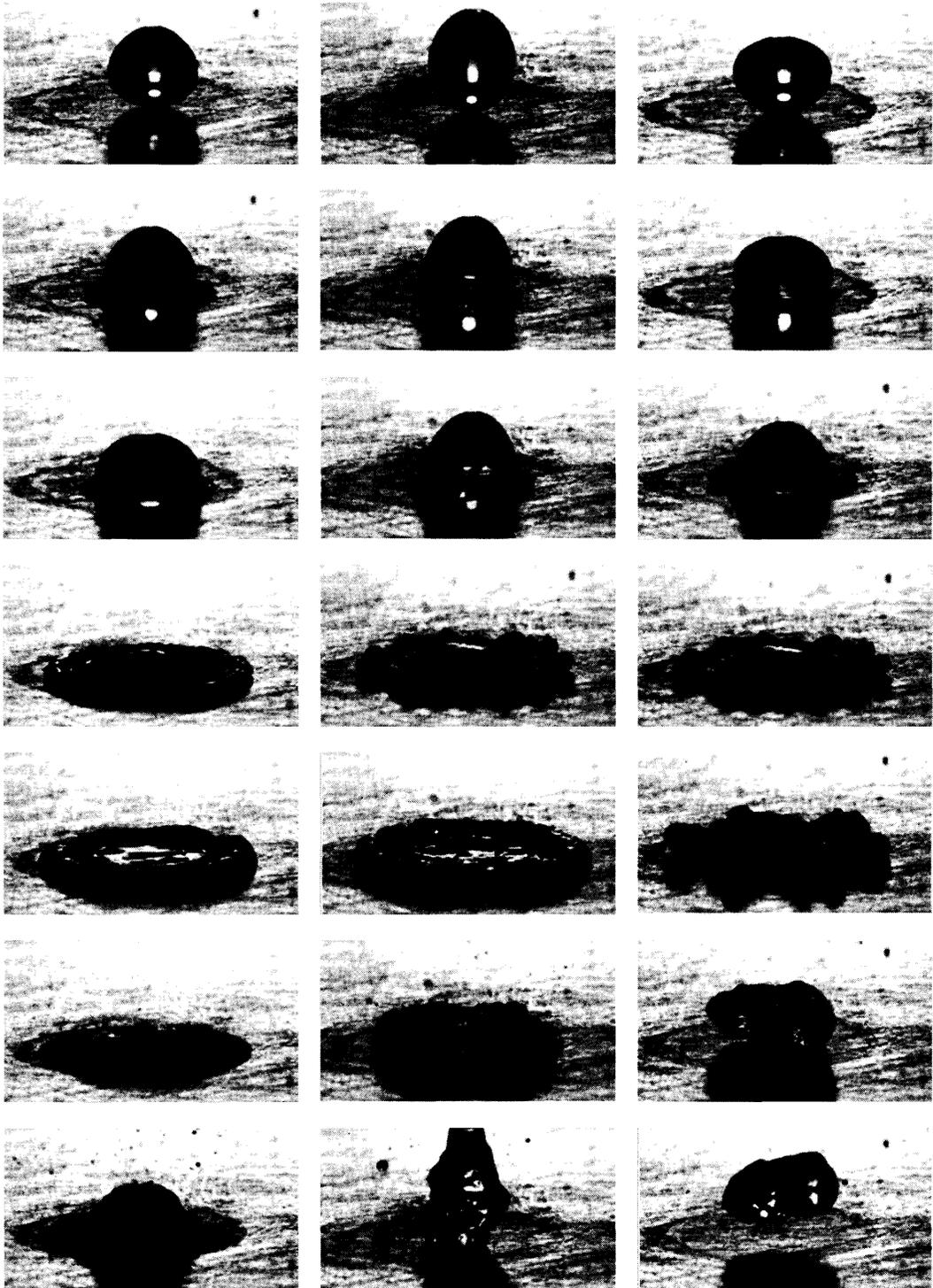
3. 実験装置と方法

Fig.2に実験装置概略を示した。直径60mm、厚さ30mmの黄銅製伝熱体をヒーターで下面から加熱する。所定の温度に達した後、55mm上方からシリンジを用いて平均直径3.2mmの蒸留水液滴を滴下して、ストップウォッチで蒸発時間を測定する。金網接置面の蒸発特性を調べるために、エタノール液滴による実験も行った。

滴下時の液滴温度は室温とした。加熱面から約2mm離れた位置の伝熱体の温度を測定して加熱面温度とした。Fig.1は滴下高さが42mmの様相である。

測定に用いた加熱面は、粗さを変えた黄銅面(1-a面)、黄銅面にフッ素樹脂コーティング材をスプレーで塗布した面 (2-a面) 以下テフロン面とする)、黄銅面に窒化ホウ素微粒子を含む離型剤をスプレー塗布した面 (2-b面) である。被覆層厚さは測定していないが、テフロン面は30回、離型剤面は10回スプレー塗布した。

*2004年度 専攻科電子システム専攻修了生



$T_w=150^{\circ}\text{C}$
(1)Nucleate boiling

$T_w=200^{\circ}\text{C}$
(2)Transition boiling

$T_w=250^{\circ}\text{C}$
(3)The Leidenfrost film boiling

Fig.1 High-speed photographs of water droplet dropping onto hot plate from 42 mm height

加熱面粗さの蒸発時間に対する影響を調べる実験では(A)黄銅面を粗さの異なるサンドペーパーで研磨することで表面粗さを変えた。使用したサンドペーパーの粗さ番号は、#40, #320, #800, #2000である。表面粗さは算術平均粗さRaで評価し、黄銅面は触針式、被覆層を施した面はレーザーを用いた非接触式の粗さ測定機で測定した。

金網設置加熱面は、銅、黄銅、ステンレス製金網をそれぞれ加熱面に密着させるように置いたものを用いた。ボール面は、直径2mmのボールベアリング用のボールを加熱面上に並べたものを用いた。温度はいずれの場合も、伝熱体に挿入した熱電対の値である。

$h=55\text{mm}$ のときのウェーバー数(We)は52となり、衝突による分裂が生じる値(80)以下となった。

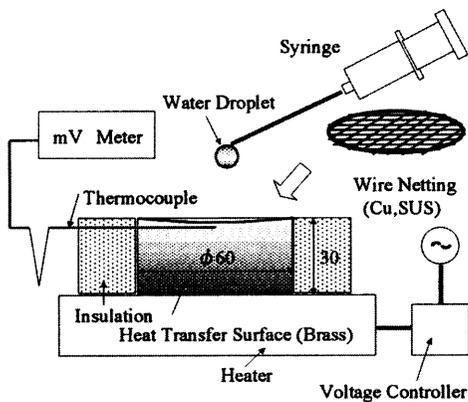


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 実験結果

4.1 表面形状の影響-(1-a)表面粗さの異なる加熱面について- Fig.3に各粗さにおける蒸発時間曲線を、Fig.4に算術平均粗さRaに対するLF温度の関係を示す。LF温度は、 $Ra < 10^{-1}$ (μm)ではRaの増加に伴って低下するが、 $Ra > 10^{-1}$ (μm)ではRaの増加に伴って上昇する傾向となった。図中には銅⁽⁷⁾、アルミニウム⁽⁷⁾、SUS⁽³⁾の文献値も示した。

$Ra < 10^{-1}$ (μm)でRaの増加に伴ってLF温度が低下する原因は、プール核沸騰の理論で明らかのように、半径の大きい発泡点ほど発泡しやすいことから、より低い温度でも発泡によって蒸気膜が形成するに十分な蒸気が生成されるためであると思われる。他方、 $Ra > 10^{-1}$ (μm)でRaの増加に対してLF温度が上昇する原因は、発泡によるLF温度を低下させる効果以上に、面が粗いほど衝突時の発泡による液滴の分裂の効果の影響が上回るためと思われる。すなわち、遷移域が高温側に移動するとともに、分裂によって液滴径が小さくなり蒸発時間が短くなるためと考えられる。しかし、文献値(7)のアルミニウム面のLF温度の傾向は、 $Ra > 10^{-1}$ (μm)の範囲に対して本実験の結果と逆になっている。この理由は明らかではないが、落下高さ等、実験条件の違いが関係していると推定される。

4.2 表面処理面-(2-a)フッ素樹脂塗布面について-

Fig.5は黄銅加熱面にテフロンを塗布した面上の水滴の蒸発時間曲線である。塗布回数10と30の場合を黄銅面と比較して示した。

この加熱面の特徴は、黄銅面に比べて①核沸騰開始温度が高温側に移動すること、②高速蒸発温度域が広いこと、③高温域で蒸発時間が短いことにある。

①に関しては、液滴が加熱面に広がらず、表面温度が 170°C 付近になるまで核沸騰が始まらない。②については、約2倍となっている。さらに③については、たとえば 300°C では半分以下の蒸発時間となっている。

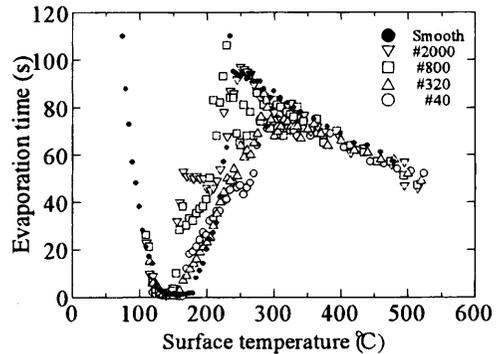


Fig.3 Evaporation time curves of water droplet on solid surface (Effect of surface roughness)

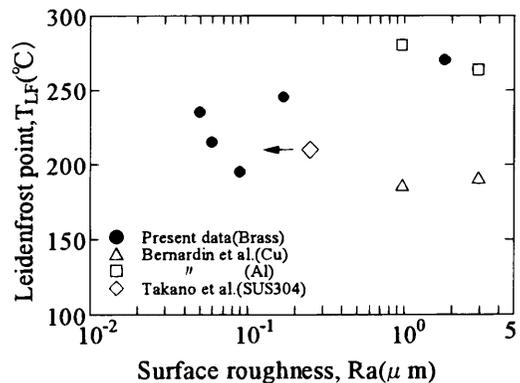


Fig.4 Change of LF temperature to surface roughness

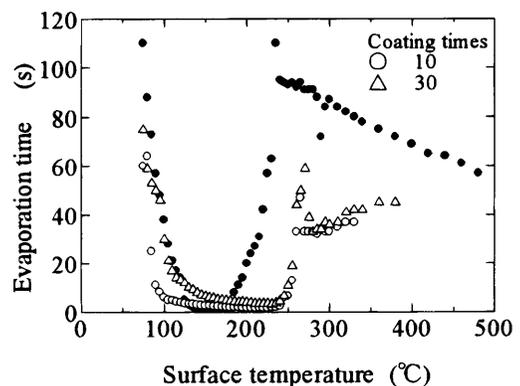


Fig.5 Evaporation time curves of water droplet on teflon coating solid surface

塗布回数については核沸騰の開始温度とLF温度での蒸発時間にやや相違が見られるが、必ずしも回数の影響は明らかではない。

(2-b) 離型剤塗布面について

Fig.6は離型剤面の蒸発時間曲線である。この加熱面の特徴は、表面温度 T_w が300℃以下のとき核沸騰状態になるものの、表面の濡れ性や蒸気泡の発生が他の面での様相と異なり、液滴の分裂などにより蒸発時間の再現性に乏しい結果となった。一方、 $T_w > 300$ ℃の高温域では膜沸騰状態とならず、突沸が起こり蒸発様相を変えながら高速蒸発した。この現象は他の伝熱面では観察されない特異な性質である。

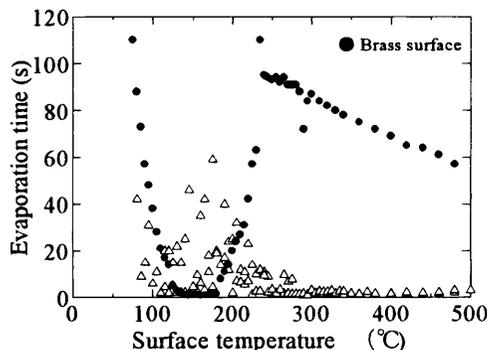


Fig.6 Evaporation time curves of water droplet on bollon coating solid surface

4.3 金網設置面上での液滴の蒸発

Fig.7は、金網がない場合と、同じメッシュの異なる2種類の金属金網面上での蒸発時間を比較したものである。金網を設置することで、加熱面温度に対する水滴の蒸発時間がどのように変化するかを測定したものである。界面温度が水の自発核生成温度になる銅、ステンレス加熱面温度も示してある。

●は黄銅面上に滴下した蒸留水水滴の蒸発時間である。よく知られているように、自然対流による蒸発域、核沸騰による急速蒸発域を経て、ライデンフロスト膜沸騰による蒸発域に至る経過を表している。

○は10メッシュ（網目間隔である目開きが約1.7mm）の銅製、△は同じメッシュのステンレス製金網の場合である。銅の金網では、急速蒸発域での蒸発時間がやや長くなるが、 $T_w > 250$ ℃の高温領域でも、短時間で蒸発する。 $T_w = 450$ ℃までにLF膜沸騰は見られない。ステンレス製金網では、 $T_w =$ 約120℃から急速蒸発となり、その温度範囲が $T_w = 270$ ℃付近まで伸びている。 $T_w > 250$ ℃付近から、飛散しなくなり、滴下直後に「ジュウ」という音を立て、すぐに金網の上に薄く拡がる。このときは音がないことから、伝熱面とは接触していないと共に、金網からの発泡もない。温度が高くなるに連れて、発泡音を発生している時間が長くなり、消滅時まで持続する。

$T_w > 270$ ℃から金網に付着するようになり、蒸発するの約10秒ほどで、さらに $T_w = 540$ ℃付近まで温度をあげても、LF膜沸騰が変わる兆しは現れない。しかし30メッシュ（目開き約0.5mm）のステンレス網では $T_w = 500$ ℃付近になると、滴下直後に一瞬であるがLF膜沸騰が見られるようになる。 $T_w > 535$ ℃では、LF膜沸騰が持続し、黄銅面上での蒸発時間とほぼ等しく

なる。

Fig.8は、金網がない場合と、メッシュの異なる2種類の金網面上での蒸発時間を、比較したものである。熱伝導率の異なる金網によって、加熱面温度に対する水滴の蒸発時間がどのように変化するかを測定したものである。Fig.7との相違はメッシュが細かいことである。

核沸騰域では金網がない場合より蒸発時間が長くなるが、高温域では蒸発時間は極めて短くなる。

●は黄銅面上に滴下した蒸留水水滴の蒸発時間である。△は、70メッシュ（網目間隔が0.35mm）のステンレス製金網の場合で、加熱面温度が高くなるに連れて蒸発時間は短くなるが、 $T_w > 150$ ℃付近から、滴下直後に飛散して金網に残るようになる。

▲は黄銅製の金網の場合の蒸発時間である。

Fig.7のように粗いメッシュの金網では、 $T_w > 300$ ℃で熱伝導率の小さいステンレス製金網でLF膜沸騰が観察されるのに対し、メッシュの細かい金網では、金網の種類による蒸発時間の差は顕著とはいえない。従って金網の熱伝導率の影響は明確ではない。また水滴では実験範囲内でLF温度が明確ではない。

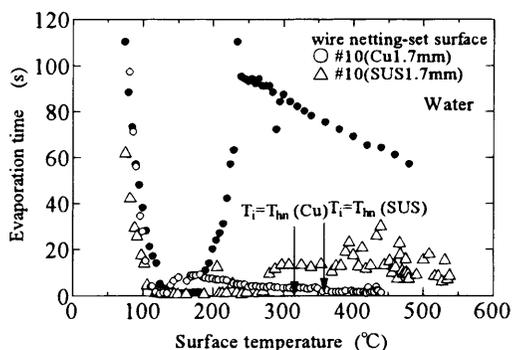


Fig.7 Evaporation time curves of water droplet on solid surface and solid surface with metal net

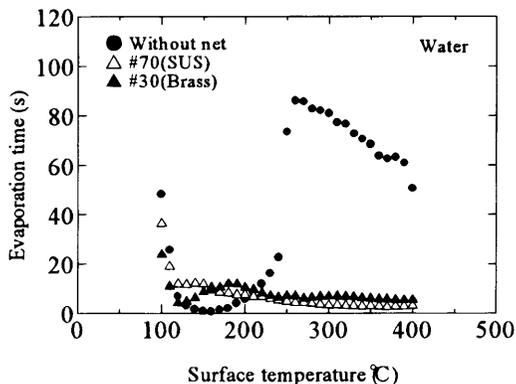


Fig.8 Evaporation time curves of water droplet on solid surface and solid surface with metal net(SUS and brass)

そこで液滴をエタノールとした場合の蒸発時間を調べた。Fig.9は、金網メッシュを20,30,50,70と変えたときの蒸発時間を、金網がない場合と比較して示した。メッシュによるが、LF膜沸騰がかなり高温側にシフトすることがわかる。

エタノールでは、 $T_w=250^\circ\text{C}$ 付近からメッシュによらず蒸発時間が長くなり金網のない状態に近づいていく。膜沸騰域であらうメッシュほど蒸発時間が短くなるが、 $100^\circ\text{C} > T_w > 220^\circ\text{C}$ の範囲ではメッシュの細かいほど短くなる。

Fig.10はエタノールLF温度に対する主にSUS製金網のメッシュの影響を示したものである。金網がないときに約 180°C であるので、金網を装着することで約 120°C 以上LF温度を高くすることができる。メッシュが細かいほど、金網のない場合との差が大きいのは意外である。#70以下の細かい金網による実験ができる興味深いのであるが入手できなかった。

Fig.10には銅や黄銅の結果もあわせてプロットした。それによると熱伝導率が大きいほどLF温度が高くなる傾向が見られる。

Fig.11は#20の金網の場合のエタノールのLF温度横軸に金網の熱伝導率(銅, 黄銅, ステンレス)をとって、LF温度に及ぼす金網の熱伝導率の影響を示したものである。LF温度は、熱伝導率の増加に伴って増加

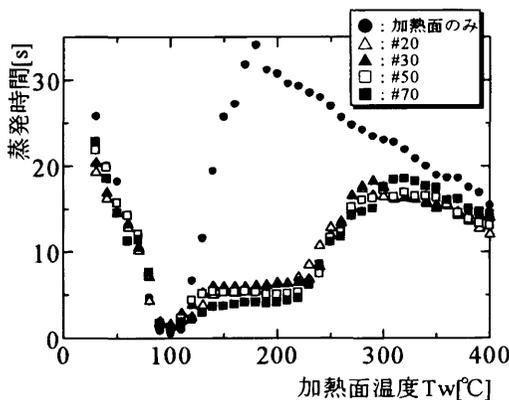


Fig.9 Evaporation time curves of ethanol droplet on solid surface and solid surface with metal net

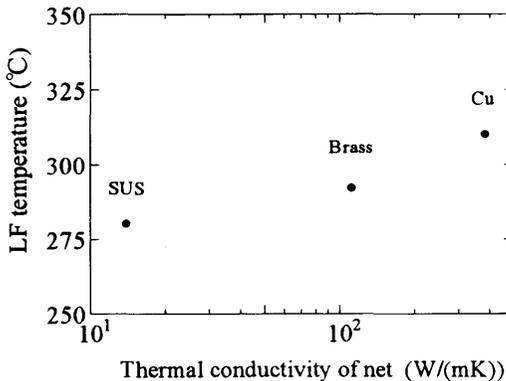


Fig.10 Effect of mesh on the Leidenfrost temperature of ethanol drop

する傾向がある。これは熱伝導率の小さいものほど滴下時に金網部分の温度低下が大きくなるためであると推定される。銅とSUSでは約 30°C 差が見られた。

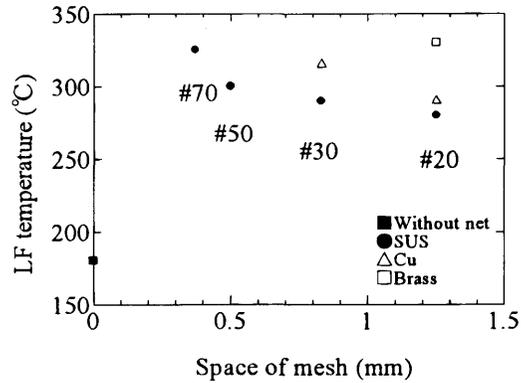


Fig.11 Effect of thermal conductivity of metal net on the LF temperature

4.4 金属ボール設置面上での液滴の蒸発 黄銅加熱面にベアリング用の金属小球を規則正しく並べてもので、加熱面の温度としては、ボールがないときの温度と同じとした。ボールの熱伝導率を用いて計算したボール面温度は、加熱面表面の温度とほとんど変わらない結果となった。

Fig.12は、ボール面上の蒸発時間の結果を、黄銅面の結果と比較したものである。直径2mmのクロム球は $T_w < 110^\circ\text{C}$ までは、水がボールの隙間にしみ込み音もなく蒸発する。 $115^\circ\text{C} > T_w > 170^\circ\text{C}$ では、滴下直後に1~4個程度のボールが飛び上がり周りのボールに乗ってしまう。

$170^\circ\text{C} > T_w > 350^\circ\text{C}$ では、ボールの飛び上がりはないものの、 200°C 以上で、液滴が分裂して付着するものと、LF膜沸騰になるものに分かれる。 $T_w > 310^\circ\text{C}$ からLF膜沸騰となり、蒸発時間が長くなる。固体面に較べるとやや短くなる。

直径1.2mmの球面では、ボールが移動して伝熱面が球面といえなくなり、 $118 \sim 300^\circ\text{C}$ の温度範囲で蒸発時間の測定が困難となる。 $T_w > 372^\circ\text{C}$ からLF膜沸騰となり、蒸発時間が長くなる。固体面とほぼおなじ時間となる。直径2mmの球面と異なる点である。

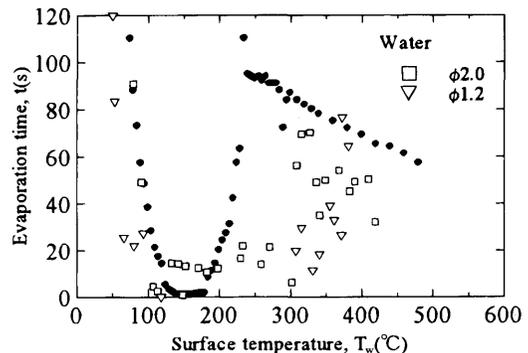


Fig.12 Evaporation time of water droplet on surface placed balls

5. まとめ

加熱面の濡れを考慮して、液滴の蒸発時間に及ぼす加熱面性状の影響を明らかにする目的で、金網や球面という非平滑面での液滴の蒸発実験を行い次の結果を得た。

- (1) LF温度は、算術平均粗さ $Ra < 10^{-1}$ (μm)ではRaの増加に伴って低下するが、 $Ra > 10^{-1}$ (μm)ではRaの増加に伴って上昇する傾向となったが、顕著とは言えない。
- (2) テフロン面は、飽和温度に達しても高速蒸発せず、高速蒸発域は広く高温側にある。LF時や、それ以降の温度域でも蒸発時間が短い。
- (3) 離型剤面は、 300°C 以上の高温域では高速蒸発するが、それ以下の温度域では蒸発時間の再現性に乏しい。

(4) 金網面では蒸発時間の短い領域が高温部分まで拡がり、粗面の方がより広範囲となる。

(5) ボール面では蒸発時間の短縮は、金網面ほど期待できない。

文献

- (1) 高田ら, 第38回伝熱シンポ講論集, G123(2001), 287.
- (2) 高野・小林, 機論B,54-503(1988),1820.
- (3) 高野・小林, 機論B,53-488(1987),1338.
- (4) 奥山邦人・ほか3名, 化学工学論文集, 第29巻, 第1号(2003), 131-136.
- (5) 中江, 金属, 72-2(2002)147.
- (6) 松本・ほか2名, 第38回伝熱シンポ講論集, H113(2001),329.
- (7) J. D. Bernardin et al., Int.J.Heat Mass Trans.,40-1(1997),80.

「受理年月日 2005年8月24日」