

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246036

研究課題名（和文） 超親水から超撥水まで濡れ性を制御した高温面上の相変化現象の
学理と技術研究課題名（英文） Phase Change Phenomena on Hot Surfaces with a Variety of Wettability
from Superhydrophilic to Superhydrophobic

研究代表者

高田 保之（TAKATA YASUYUKI）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70171444

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高温面上の液滴の蒸発に及ぼす濡れ性や表面性状の効果を調べるために、濡れ性の制御技術の開発と液滴蒸発に及ぼす濡れ性や表面性状の影響評価実験を実施した。濡れ性と密接な関係がある表面粗さの異なる試料を用いて、液滴蒸発試験を行い、液滴が加熱面と接触する時間は、衝突速度の減少および液滴直径の増加とともに増加すること、液滴の最大広がり直径は、衝突速度とともに増加すること、冷却速度は表面粗さとともに増加することなどが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

The present study aims to make clear the effect of surface wettability and roughness on evaporation of water drop on hot surfaces. Water drop evaporation experiment has been performed using surface samples with a variety of roughness. The experimental setup we have developed can control the diameter, impacting velocity and frequency of impinged water drops independently. The results show that (a) liquid-solid contact time increases with the decrease in impacting velocity and with the increase in drop diameter, and (b) maximum spread of water droplet increases with surface roughness.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
2010年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2011年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
年度			
年度			
総計	33,000,000	9,900,000	42,900,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：表面・界面物性，熱工学，接触角，酸化チタン，液滴蒸発，超撥水，濡れ性，噴霧冷却，伝熱特性

1. 研究開始当初の背景

日本機械学会の高熱流束除熱の技術ロードマップによると、電子機器の高発熱密度化、原子炉事故時の緊急冷却などに対応して、将来的には 10^7W/m^2 の超高熱流束除熱を実現する冷却技術が囑望されており、とりわけ沸騰・蒸発など相変化を利用した除熱冷却シス

テムへの期待が高い。相変化を伴う伝熱系においては、表面の濡れ性が種々の特性値に影響を及ぼす。近年の研究により、超親水性伝熱面を利用すれば、通常面の約2倍の限界熱流束が得られることが明らかになっており、伝熱面の濡れを制御することが、超高熱流束除熱や高精度な温度管理を必要とする制御

冷却を実現する技術的なブレークスルーとして期待されている。

2. 研究の目的

光励起超親水化現象等を駆使して、接触角 $0\sim 150^\circ$ の広範囲で表面の濡れ性のみを人為的にコントロールする技術を確認し、次いで、この技術を微小液滴蒸発実験に適用することで、気液相変化に表面の濡れが及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。さらには、濡れ性と相変化現象の学問的理解を進めて、先進的な冷却技術の開発を目指す。本研究では、大別して、(1)濡れの制御技術の開発、(2)液滴蒸発に及ぼす表面性状の影響評価の2つを実施する。

3. 研究の方法

(1)濡れの制御技術の開発

伝熱面に親水性を持たせる場合は、金属面に酸化チタンをスパッタ法で $100\sim 200\text{nm}$ のコーティングを行う。この面を紫外線に長時間照射することにより超親水性を実現することができる。また、効果の持続は限定的ながらも瞬時的な方法としてプラズマ照射が使用できるが、本研究では主に前者を利用した。

撥水性については電解メッキによる超撥水コーティング(接触角約 150°)を使用していたが、耐久性の問題が解決しないため、テフロン(PTFE)に変更した。

一方加熱と冷却による SUS304 の濡れ性変化の特性を明らかにするために、加熱時間や加熱温度と冷却直後の接触角の関係、表面の元素分析やラマン分光による測定を実施した。

また、濡れ性と表面粗さは非常に密接な関係がある。そこで、液滴蒸発の伝熱特性に及ぼす粗さの影響を調べるために Ra0.1~10 の SUS304 試料を作成した。

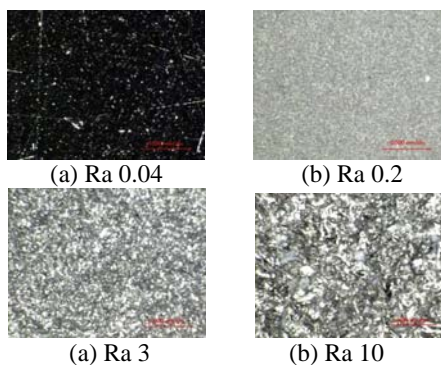


図1 粗さ試験用の SUS304 試料表面

加えて、プール沸騰の限界熱流束向上と低過熱度で沸騰を開始できる伝熱面の試作を行った。これは、撥水性領域と親水性領域を

伝熱面上で組み合わせることにより実現できる。撥水領域は気泡核が形成されやすく、伝熱面過熱度が 5K 以下で沸騰を開始させることが可能である。一方、親水性領域は高熱流束域において伝熱面への液供給を担うことができ、限界熱流束を向上させることが期待できる。この効果を確認するために、酸化チタン伝熱面の上に斑点状の PTFE コーティングを実施し親水・撥水複合伝熱面を試作する。プール沸騰実験により、この効果を確認するが、本報告では紙面の都合で結果を省略する。

(2)液滴蒸発に及ぼす表面性状の影響評価

図2に液滴蒸発熱伝達評価用の伝熱試験装置の構成を示す。

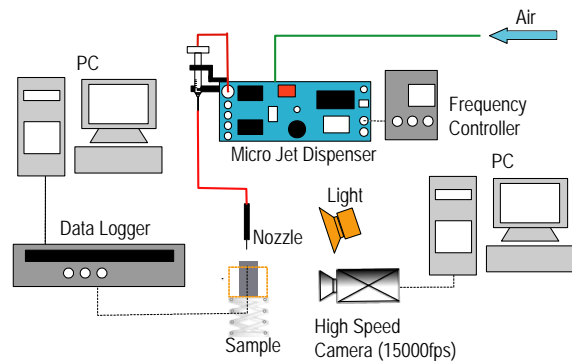


図2 液滴蒸発伝熱試験装置

図2の装置は、マイクロジェットディスペンサーにより、液滴のサイズ、速度、射出頻度をそれぞれ独立に制御できるように調整されている。表1に示すように液滴サイズは、 $300\sim 700\mu\text{m}$ 、液滴速度は1, 2.5, 4m/s で変化させることができる。

表1: 液滴の実験条件

Diameter (μm)	Velocity (m/s)		
	1.0	2.5	4.0
300	1.0	2.5	4.0
500	1.0	2.5	4.0
700	1.0	2.5	4.0

たとえば、流量と液滴サイズを固定し、速度だけを変化させることが可能である。この装置により、これまで2次的パラメータとして、その影響が明らかではなかった衝突速度および液滴直径の影響を明らかにすることが可能である。

まず、高速度カメラにより加熱面に衝突する際の液滴の挙動を観察し、液滴が加熱面に衝突してリバウンドして伝熱面を離脱するまでの液滴接触時間、および衝突した液滴が加熱面上に広がる際の最大広がり直径を求めた。使用した伝熱面試料は、Ra0.1~10の粗さの面である。これらを 600°C まで加熱し、ノズル直下におき、温度降下する間に単一液

滴の衝突時の挙動を撮影する。また、伝熱特性を調べる場合は、複数ノズルで冷却試験を実施し、衝突液滴の個数から、衝突時の液滴1個当たりの伝熱量を計算する。

4. 研究成果

(1)加熱冷却時の濡れ性の変化

測定に使用した SUS304 試料の大きさは、 $7 \times 7 \times 1\text{mm}$ であり、エメリーペーパーと研磨機を使用して鏡面に仕上げている。この試料を窒素雰囲気（酸素濃度 3%）、あるいは、大気雰囲気の電気炉内で設定した時間と温度で加熱し、大気中で冷却した。

接触角と経過時間の関係を調べ、図3に示した。この図にみられるように初期接触角は約 87° であり、電気炉で 600°C 、6時間加熱し冷却直後は接触角 0° である。その後2時間ほど経過すると、初期の状態に近づき、約6時間ではほぼ元の接触角に戻る。

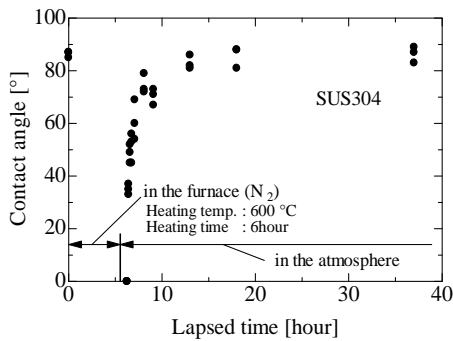


図3 加熱冷却からの経過時間と接触角

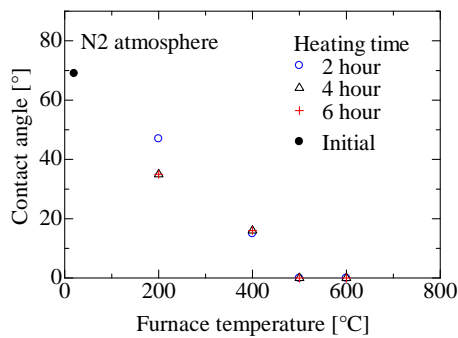


図4 冷却直後の接触角と加熱時間の関係

図4に、窒素雰囲気中での加熱、冷却後の接触角と加熱温度の関係を示す。加熱時間をパラメータとしており、加熱温度 200°C では加熱時間により接触角が異なっている。加熱温度が 500°C を超えると加熱時間に関係なく接触角は 0° となっている。

(2)液滴蒸発に及ぼす表面性状の影響評価

図5に、Ra0.04の時の 600°C の加熱面上の

液滴の挙動を示す。

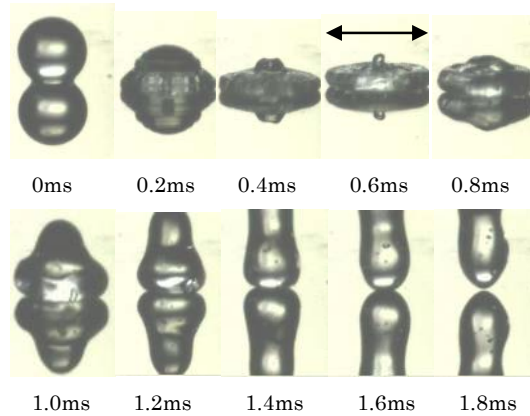


図5 加熱面上の液滴の挙動
($700 \mu\text{m}$, 1.0m/s , 600°C)

0.6ms の時に液滴は広がり最大となり、この時の直径を最大広がり直径と呼ぶ。また、この写真では液滴の接触時間は 1.8ms である。この値は Rayleigh の液滴自由振動周期と同じオーダーである。

図6に衝突速度 1.0m/s 、液滴直径 $700 \mu\text{m}$ における液滴接触時間と加熱面温度の関係を表面粗さをパラメータとして示した。図からわかるように、液滴接触時間は粗さとともに増加する傾向にある。また、 250°C では値がばらついているが、この温度領域は濡れ限界温度に近く、不安定な領域である。 300°C 以上では、粗さとともに接触時間が増加することがわかる。

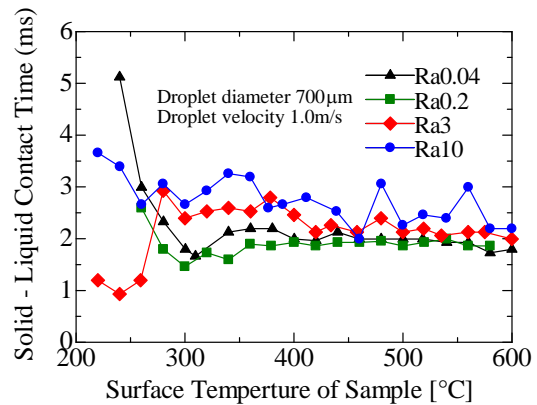


図6 液滴接触時間に及ぼす粗さの影響

図7は R10、液滴直径 $700 \mu\text{m}$ における液滴接触時間に及ぼす衝突速度の影響である。この図から液滴接触時間は衝突速度が大きくなると減少することがわかる。

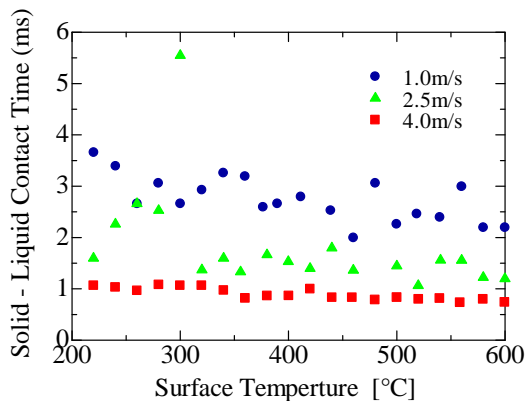


図7 液滴接触時間に及ぼす衝突速度の影響 (Ra 10, 700 μ m)

図8はR10, 液滴直径 700 μ mにおける最大広がり直径に及ぼす衝突速度の影響である。この図からは、衝突速度が大きいほど広がり直径も大きいことがわかる。

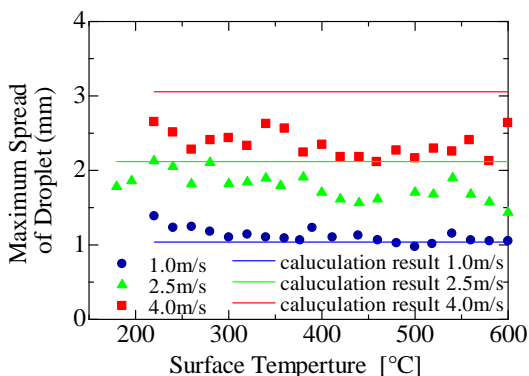


図8 最大広がり直径に及ぼす衝突速度の影響 (Ra 10, 700 μ m)

液滴接触時間が短いということは、液滴が加熱面から熱を授受する時間が短いということであり、これは伝熱量が減少する方向に作用する。一方、最大広がり直径が大きいということは、伝熱面積が増加することを意味し、伝熱量が増加する方向に作用する。結論から言えば、液滴速度が大きい方が熱伝達は良好である。これらの図から直ちに判断することはできないが、別の冷却実験より液滴一個当たりの伝熱量を計算したところ、液滴速度が大きい方が伝熱量が大きいということが分かった。

図9は最大広がり直径に及ぼす表面粗さの影響を示したものであるが、この図からわかるように、最大広がり直径は粗さには無関係である。表面温度の増加とともに最大広がり直径も減少するが非常に緩やかである。もちろん液滴径や衝突速度にも依存することはいうまでもない。

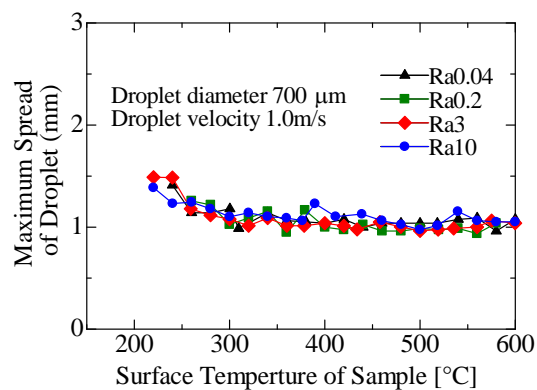


図9 最大広がり直径に及ぼす粗さの影響

以上をまとめると、以下ようになる。

- 液滴が加熱面と接触する時間は、衝突速度の減少および液滴直径の増加とともに増加する。
- 最大広がり直径は、衝突速度とともに増加する。
- 冷却速度は表面粗さとともに増加する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① El-Sayed R. Negeed, N. Ishihara, K. Tagashira, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, Experimental study on the effect of surface conditions on evaporation of sprayed liquid droplet, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, No. 12, pp.2250-2271, 2010 December
- ② Yasuyuki Takata, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Effect of Surface Wettability on Pool Boiling -Enhancement by Hydrophobic Coating, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vo.20, No.1, 1150003, 2012 March

[学会発表] (計 12 件)

- ① 日高澄具, 石原寛也, 田頭圭祐, 河野正道, 高田保之, 高温面に衝突する微小液滴における表面性状の影響, 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009年6月(京都市)
- ② 田頭圭祐, 石原寛也, 日高澄具, 河野正道, 高田保之, 高温面に衝突する微小液滴の熱伝達に関する研究(液滴径、液滴速度、表面性状および材質の影響), 第47回日本伝熱シンポジウム, 2010年5月(札幌市)
- ③ 日高澄具, 有田誠, 田頭圭祐, 福田慎也, 河野正道, 高田保之, SUS304の加熱と冷却による表面濡れ性の変化と表面分析, 第48回日本伝熱シンポジウム, 2011年6月(岡山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田保之 (TAKATA YASUYUKI)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70171444

(2) 研究分担者

増田正孝 (MASUDA MASATAKA)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：40165725
※病気休職のため 2009 年度末まで

河野正道 (KOHNO MASAMICHI)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：50311634

久保田裕巳 (KUBOTA HIROMI)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：10117103

有田 誠 (ARITA MAKOTO)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：30284540
※増田の後任として 2010～2011 年度