

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 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：2012～2014

課題番号：24246038

研究課題名(和文)急速冷却を革新する微小液滴蒸発の物理と表面性状効果

研究課題名(英文) Mechanism and Effect of Surface Conditions on Evaporation of Small Droplets for Innovative Rapid Cooling

研究代表者

高田 保之(Takata, Yasuyuki)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70171444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,700,000円

研究成果の概要(和文)：急速冷却技術の革新のためには、液滴と高温面との相互作用に及ぼす表面性状の影響とそのメカニズムを理解することが重要である。本研究では、まず噴霧冷却の素過程である単一液滴蒸発に関して高速度赤外カメラにより固液接触部分の温度分布および熱流束分布を測定した。さらに、マイクロジェットディスペンサーを駆使した擬似スプレー冷却系での試験を実施し、表面粗さの影響や衝突時の各種因子の影響を調査した。影響因子の一つである衝突角度について調査し、高速度カメラの画像解析から高温面衝突時に液滴が表面を移動する現象を捉え、その移動特性と冷却特性の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Clear understanding of mechanism and effect of surface condition on droplet evaporation is indispensable for the development of innovative rapid cooling technique. The present study consists of two parts; (1) measurement of temperature and heat flux distributions of liquid-solid interface by means of high-speed infrared camera, and (2) pseudo-spray cooling by means of micro-jet dispenser with stainless samples with different surface treatment and with different impact angles. Observation by high-speed camera revealed that impacting angle of the drop, one of the key parameters, influences the cooling rate. During collision of droplet with hot surface, the drop moves along the surface before taking-off and the relation of moving length with cooling rate was obtained.

研究分野：熱工学

キーワード：スプレー冷却 表面粗さ 濡れ性 液滴 固液接触 赤外計測

1. 研究開始当初の背景

「冷却」は古くから工学の基盤的技術であるとともに現在でも原子炉事故から熱中症予防に至るまでその高性能化が望まれ続けている。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などに対応して、 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。近年の研究により、相変化伝熱系においては表面の濡れ性が大きな影響を及ぼすことが明らかにされ、超親水性伝熱面におけるプール沸騰では通常面の約2倍の限界熱流束が得られることもわかってきた。また濡れ性を向上させれば浸漬冷却の速度も増大する。この知見を用いて超親水面と超撥水面をマイクロなスケールで三次元的に組み合わせれば、低い伝熱面温度で発泡を開始しながら限界熱流束が高いという理想的な沸騰伝熱面の開発も可能となる。このような特性を持つ伝熱面は年率7.1%の高水準で増加しつつあるデータセンターの冷却用電力の削減にも大いに効果が期待できる。さらに、この表面性状効果を噴霧冷却に生かすことができれば、福島第一原子力発電所の事故でも注目された緊急かつ急速に高温面を冷却する技術の革新的な性能向上が期待できる。

高温面上における液滴の蒸発は噴霧冷却の基本的な素過程であるが、液滴の蒸発現象においても表面の濡れ性は蒸発速度や冷却限界（濡れ限界温度やライデンフロスト温度）に大きな影響を及ぼすことがこれまでの申請者らの一連の研究により明らかになっている。しかしながら、液滴の蒸発に対する濡れ性を含む表面性状の影響、衝突速度や液滴のサイズの影響はいまだに十分解明されたとはいえない。特に噴霧冷却に使われる直径1mm以下の液滴の場合は観察が難しく、研究報告は極めて少ない。

2. 研究の目的

本研究では、噴霧冷却の素過程である液滴の蒸発に及ぼす表面性状の影響を詳細に調査する。実施する研究項目は大別して、以下の2つである。

(1) 単一液滴の蒸発特性評価

高速度赤外カメラとマイクロ天秤を組み合わせた超高感度の微小液滴蒸発測定システムを開発し、蒸発液滴の上下面の温度、熱流束分布、液滴蒸発速度を同時計測するとともに、液滴内部に発生する不安定対流の発生条件と特性を調べる。これまでの研究で得られたノウハウを駆使し、種々の濡れ性、表面粗さの加熱面において単一液滴の蒸発特性を測定する。

(2) 衝突液滴群の冷却性能評価

噴霧冷却の熱伝達性能の予測は今なお成功していない。その理由は、通常の実験装置では液滴のサイズ、衝突速度、頻度(流量)を独立に変化させることができないからである。本研究では先行研究で開発した、これらのパラメータを独立に変化させることが可能な液滴射出装置をマルチノズルタイプに改造して噴霧冷却試験を実施する。その際、高度に管理された実験条件から高温面に衝突する液滴1個が奪う熱量を測定し、伝熱量に及ぼす液滴サイズ、速度、流量の影響および表面濡れ性の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

研究目的で記した2つの研究項目それぞれに対する実験系を構築した。

(1) 単一液滴蒸発過程観察装置

液滴の基板上での蒸発過程を高速度赤外カメラ(IRカメラ)により観察し、画像情報から液滴内部の温度分布と熱流束分布を求めた。また、蒸発時の質量の減少から液滴への伝熱量を求めるために電子天秤を使用した。図1は基板、IRカメラおよび電子天秤の配置を模式的に示したものである。

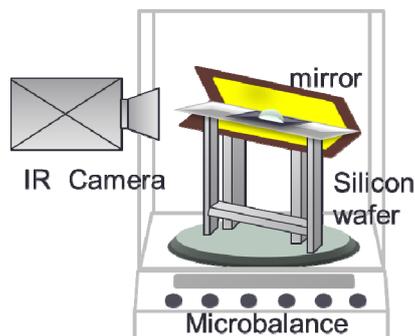


図1 赤外カメラおよび電子天秤による液滴蒸発過程の観察

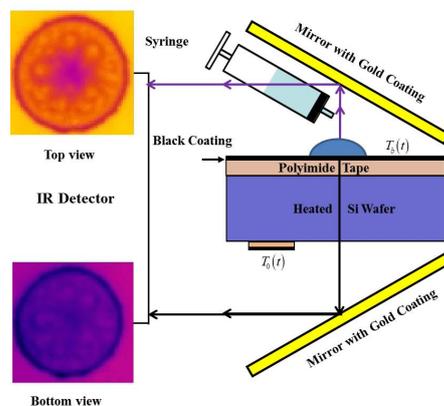


図2 シリコン基板を通じた赤外画像計測

基板の上下に金メッキを施したミラーが45°の傾斜で設置してあり、このミラーにより赤外線を反射することで、1台のIR

カメラで上下から蒸発の様子を観察することができる(図2). シリコン基板上面にはブラックコーティングを施したカプトンテープが貼り付けてあり, 下面より計測した赤外画像のデータを用いて基板厚み方向の一次元非定常熱伝導方程式を数値的に解くことで, 固液界面の温度分布および熱流束分布を求めることができる.

(2) 衝突液滴群の冷却性能評価試験装置

図3に衝突液滴群の冷却性能を測定する装置を示す. 基本構成は以前使用したマイクロジェットディスペンサーと同じであるが, ノズルを8本に増設し, 擬似的なスプレー冷却を行うことができる(図4). その際に, リバンド液滴の再衝突を防ぐために, 水平より傾斜をつけて試料を設置した.

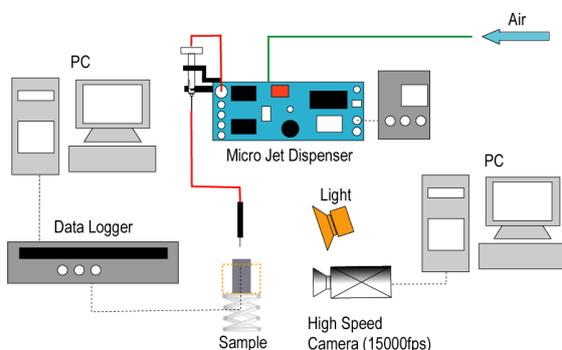


図3 衝突液滴群蒸発試験装置

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おり, 液滴サイズは, 300~700 μm , 液滴速度は1, 2.5, 4m/s で変化させることができる.

今回は噴霧液滴の衝突角度の影響を中心に実験を行った. そのため, 液滴径は 500 μm , 液滴速度は 2.5m/s で固定して実験を行った. 液滴速度については一般的にはスプレー冷却では液滴速度は 10m/s だといわれているが, 本実験では 4.0m/s 以上の液滴速度は出すことが困難だったためこの条件範囲が設定されている. 同じく中間値として 2.5m/s を選択した. 水量密度液滴径を変化させても, はほぼ一定になるように射出頻度が設定されている.

各実験条件について液滴を射出しないで試料を自然冷却する実験を行った. 目的は, 表面角度や表面性状の変化がスプレー冷却時の冷却曲線に及ぼした変化が, スプレー冷却時にのみ現れることを確認することと, 自然冷却の場合の冷却曲線とスプレー冷却時の冷却曲線の温度降下量の差より液滴1個当たりの奪う熱量を計算することである.

表1に実験条件を示す.

表1 実験条件

液滴径 (μm)	衝突速度 (m/s)	射出頻度 (1/s)	表面粗さ (Ra)	衝突角度 (deg)
500	2.5	11	0.04 10	15
				30
				45
				60

実験に使用した試料は図4に示す2種類である. いずれも材質は SUS304 であり, 粗さの影響を調べるために鏡面加工仕上げ面とサンドブラスト処理で粗さを付けた面を使用した.

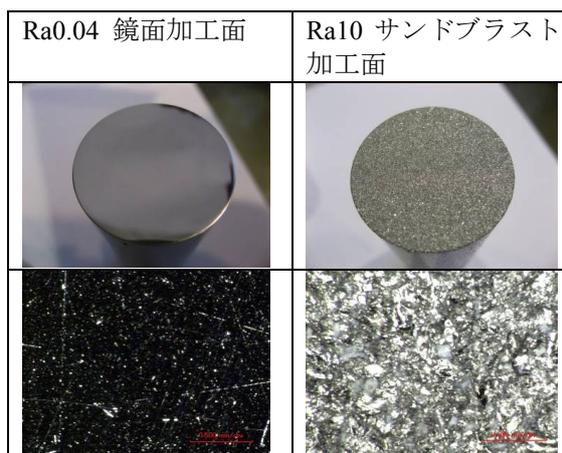


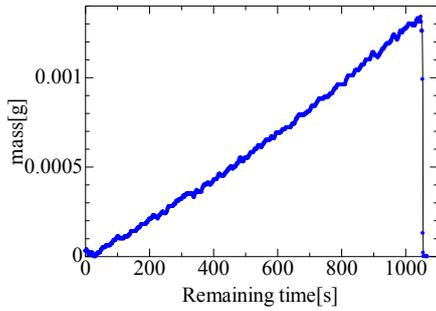
図4 SUS30 試料

4. 研究成果

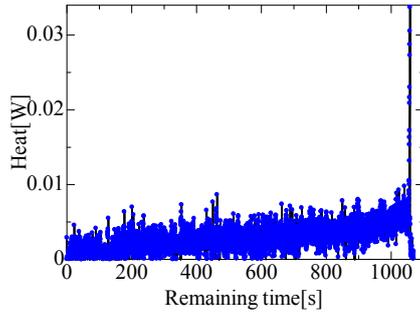
(1) 単一液滴の蒸発特性評価

水滴の蒸発に関して, IR カメラと電子天秤による同時測定を行った. 図5(a)に電子天秤によって測定した水の質量減少を示す. 実験は基板温度 18 $^{\circ}\text{C}$, 非加熱で行った. 水の場合, 質量はほぼ一定の速度で減少することがわかる. 図5(b)に IR カメラから求めた伝熱量変化を示す. この結果からも固液界面での伝熱量はほぼ一定であり, 質量減少が一定の速度で進むことが予想される.

この質量測定結果から蒸発潜熱を見積もり, IR カメラの情報を解析して求めた固液界面における伝熱量と比較を行った. 拡散による伝熱量とも比較を行った. 室温での水の蒸発量は, 拡散が支配的であるため理論式より予測が可能である. よって, 本実験装置から求められる IR カメラでの伝熱量が妥当な値であれば, 電子天秤から求めた伝熱量, そして拡散の式から求めた伝熱量とほぼ一致すると考えられる. 表2に各方法で求めた伝熱量を示す. 各値ともほぼ等しくなっており, 本実験装置から求められる固液界面の伝熱量の値は妥当なものであると考えられる.



(a) 電子天秤による質量減少の計測



(b) IR カメラによる伝熱量計測

図5 非加熱基板上的水滴の蒸発過程

表2 IR カメラ, 電子天秤および拡散理論による伝熱量比較

液滴径 (mm)	接触角 (deg)	電子天秤 (mW)	IR カメラ (mW)	拡散理論 (mW)
2.00	84	3.31	3.35	3.52
1.875	84	2.96	2.77	3.30

図6に基板温度 100°Cの時の水液滴蒸発時の伝熱量の時間変化を示す. 図7は熱流束分布の時間変化であり, 図6の縦軸の値は IR カメラから求めた熱流束を伝熱計算領域全体で空間積分したものであり, 横軸は液滴が蒸発し終わるまでの時間としている.

水の場合, 液滴が基板に触れるときの大きな伝熱量はその後, 急激に減少し, 減少した後は一定の値を保つ. 水は接触角一定で蒸発することを踏まえれば, 水液滴の蒸発において接触径と伝熱量は比例関係にあると考えられる. 基板温度が高くなると, はじめに液滴が接触するときの伝熱量と接触径一定で蒸発するときの伝熱量は大きくなっている.

基板上的水液滴の蒸発過程は図6に示すようにその伝熱量から3段階に分類できると考えられる. 図は基板温度 100°Cの蒸発の様子を表している. 領域①では液滴と基板が接触し, 液滴温度が基板温度付近まで上昇することから大きな伝熱量を基板から奪う. 最初に接触する液滴の中心部分の熱流束分布がとくに大きくなる. その後②では伝熱量は急激に小さくなる. 図7には熱流束分布を示している. この領域では熱流束分布の最大値が液滴中心部から端部に移動し, 図7の $t=47.8s$ に示されるように液滴全体で熱流束分

布はほぼ一定である. ほぼ一定の熱流束分布は中心部からその値が小さくなり ($t=45.9s$), 領域③では液滴の端部, つまり3相界面で熱流束分布が大きくなる. この領域③は蒸発の大部分を占めており, しばらくの間は熱流束分布に変化はない. 液滴蒸発は主に3相界面で起こることが固液界面の熱流束分布からも確認できる. 蒸発終了間近になり液滴が収縮し始めると, 熱流束分布は再び一定近づく ($t=1.8s$). これは液滴が小さくなることで液滴内部の温度分布が小さくなることに起因していると考えられる. 水液滴の場合, 他の基板温度についても同じような傾向が観察された.

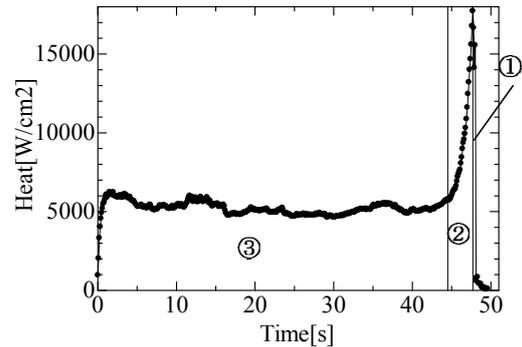


図6 蒸発時の全熱流束 (基板温度 100°C)

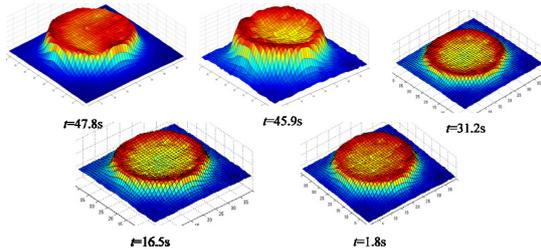


図7 熱流束分布 (基板温度 100°C)

(2) 衝突液滴群の冷却性能評価

実験結果として鏡面および Ra10 のサンドブラスト加工面の試料の冷却曲線をそれぞれ図8および9に示す. グラフは縦軸に試料温度, 横軸に経過時間を表示している. 1つのグラフの中に同一条件で表面の角度を変化させた結果を示している. 破線で描かれている線が空冷の時の冷却曲線であり, 実線で描かれているのが水冷の時の冷却曲線である. 空冷の冷却曲線も表面の粗い方の冷却が速くなっているが, これは表面が粗くなることによって表面積が増加したことが原因ではないかと考えている.

まず, スプレーを射出せずに試料を自然冷却した場合の結果についてみると, 2種類の表面粗さのどちらの場合においても, 表面角度を変えることによって冷却速度にわずかに差が生じていることがわかる. 試料の姿勢が変わることで, 試料表面での対流の様子が変化し, 熱伝達率に違いが現れた可能性が考

えられる。

次に、スプレーで冷却した結果を比較する。表面粗さ Ra0.04, Ra10 の 2 つについては共通の傾向が見られ、表面角度 45° (黒色実線) のとき冷却がもっとも早く進んだ。いずれも、表面角度による冷却の違いは濡れ開始温度以下で現れ始めた。

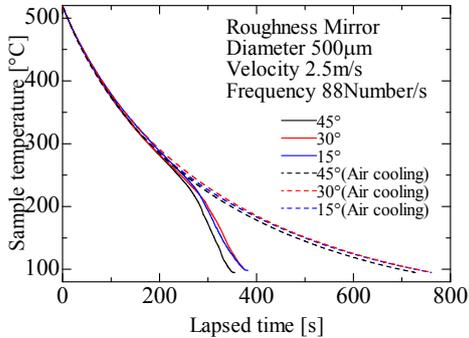


図 8 冷却曲線 (鏡面)

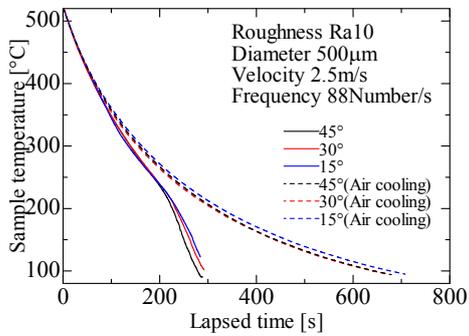


図 9 冷却曲線 (Ra10)

冷却曲線全体の傾向として、鏡面試料の場合、試料温度が 500°C~300°C 付近の高温領域においてはスプレー冷却の影響は現れておらず、空冷の場合とほとんど等しい温度推移となっている。一方 Ra10 の試料の場合、上記の高温領域においてもスプレー冷却の影響が現れ、空冷の場合よりも冷却が早く進んでいることがわかる。しかしながら、このグラフだけでは 45° で冷却が最大となる理由が理解できない。そこで、一つの液滴に着目して高速度カメラによる観察を行った。

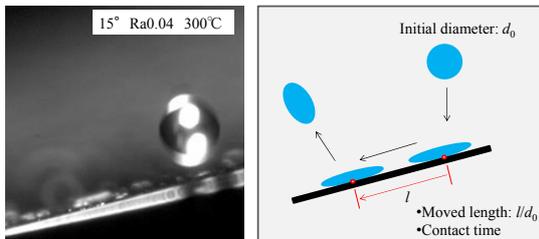


図 10 高温面衝突時の液滴の挙動

図 10 はその一例を示したものであるが、液滴は衝突時に高温面をなぞるようにして移動した後にリバンドして伝熱面から離脱することがわかった。そこで、衝突時の移動距離を液滴直径で除した値

を無次元移動距離として高速度カメラの画像データからこの値をもとめた。

また、高温面に接触している時間も合わせて計測した。その結果を図 1 1 と 1 2 に示す。図 1 1 から表面の粗さに関わらず、45° の場合が移動距離が最も大きいことがわかる。また、図 1 2 からは接触時間の長短と傾斜角度の関係は読み取れない。つまり接触時間には顕著な違いは見られないが、移動距離は 45° の時が一番大きい。すなわち一つの液滴が接触する高温面の面積は 45° が一番大きいことになる。これが 45° で冷却速度が最大となる理由ではないかと推察される。

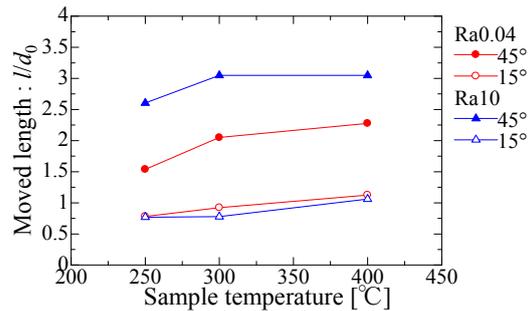


図 1 1 液滴移動距離 (無次元)

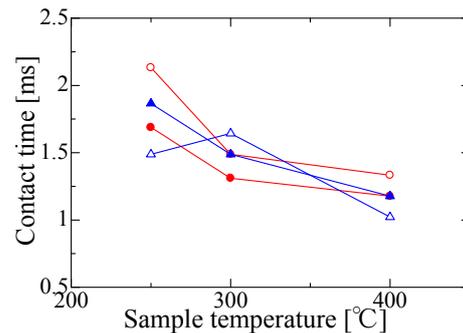


図 1 2 高温面との接触時間

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 1 1 件)

- ① E.-S. R. Negeed, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, High speed camera investigation of the impingement of single water droplets on oxidized high temperature surfaces, International Journal of Thermal Sciences, Vol.63, pp.1-14, 2013 January
- ② Takashi Nishiyama, Takanori Nakayama, Koji Takahashi, Yasuyuki Takata, The effect of nanocarbon materials on surface wettability, Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer, IFHT2012-173, Nagasaki, 2012 November
- ③ Fukatani, Y., Fukuda, S., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., Heat Transfer of Small Droplet Impinging onto a Hot Surface (Effects of

Droplet Diameter, Impinging Velocity, Surface Roughness), Proceedings of the ECI-8th International Conference on Boiling and Condensation, Lausanne, p.1521, 2012 June

- ④ Tashiro, M., Suroto, B.J., Kakitani, T., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., Subcooled Boiling from a Surface with Spotted Patterns of Hydrophilic and Hydrophobic Coatings, Proceedings of the ECI-8th International Conference on Boiling and Condensation, Lausanne, p.1520, 2012 June
- ⑤ Khellil Sefiane, Yuki Fukatani, Yasuyuki Takata, Jungho Kim, Thermal Patterns and Hydrothermal Waves (HTWs) in Volatile Drops, Langmuir, Vol.29, pp.9750-9760, 2013 July
- ⑥ E.-S.R. Negeed, S. Hidaka, M. Kohno, and Y. Takata, Effect of the surface roughness and oxidation layer on the dynamic behavior of micrometric single water droplets impacting onto heated surfaces, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 70, pp.65-82, 2013 August
- ⑦ Fukuda, S., Kohno, M., Tagashira, K., Ishihara, N., Hidaka, S., Takata, Y., Behavior of small droplet impinging on a hot surface, Heat Transfer Engineering, Vol. 35, Issue 2, pp.204-211, 2014 January
- ⑧ Deendarlianto, Yasuyuki Takata, Sumitomo Hidaka, Indarto, Adhika Widyaparaga, Samsul Kamal, Purnomo, Masamichi Kohno, Effect of static contact angle on the droplet dynamics during the evaporation of a water droplet on the hot walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.71, pp.691-705, 2014 April
- ⑨ El-Sayed R. Negeed, M. Albeiruttya, Y. Takata, Dynamic behavior of micrometric single water droplets impacting onto heated surfaces with TiO₂ hydrophilic coating, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 79, pp.1-17, 2014 May
- ⑩ Daniel Orejon, Khellil Sefiane, Yasuyuki Takata, Effect of ambient pressure on Leidenfrost temperature, Physical Review E, Vol. 90, pp.053012-6, 2014 November
- ⑪ S. Hussain, Y. Fukatani, M. Kohno, K. Sefiane, Y. Takata, 2D Simulation of FV72 Sessile Droplet Evaporation in the Constant Contact Line Region, International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol.8, No.1, 2014 January

[学会発表] (計7件)

- ① Yuki Fukatani, Takaaki Wakui, Suhaila Hussain, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Khellil Sefiane, Jungho Kim, Analysis of Droplet Evaporation Using IR Thermography, Y International Symposium on Innovative Materials for Process in Energy Systems 2013, Fukuoka, September 4-6, 2013
- ② 深谷侑輝, 涌井敬明, フセインスハイラ, 河野正道, 高田保之, セフィアンケリル,

キムジョンホ, 揮発性液滴の蒸発に及ぼす周囲湿度の影響, 第51回日本伝熱シンポジウム, 2014年05月21日~2014年05月23日, 浜松市

- ③ 深谷侑輝, Orejon Daniel, 河野正道, 高田保之, Kim Jungho, Sefiane Khellil, 揮発性液滴の蒸発に及ぼす周囲温度と湿度の影響, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2014, 2014年11月08日~2014年11月09日, 東京
- ④ 喜多由拓, 深谷侑輝, Orejon Daniel, 河野正道, 高田保之, Kim Jungho, Sefiane Khellil, 揮発性液滴の内部対流および蒸発速度に及ぼす周囲温度および湿度の影響, 日本機械学会九州支部総会・講演会, 2015年03月13日, 福岡市
- ⑤ M. Kohno, T. Wakui, Y. Fukatani, S. Hidaka, Y. Takata, Effect of Impinging Angle on Heat Transfer of Small Spray Droplets, Fifth International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (HTFFM-V), 2014年04月22日~2014年04月25日, Marseille, France
- ⑥ Yuki Fukatani, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Khellil Sefiane, Jungho Kim, The Effect of Humidity in Ambient Gas on HTWs in Volatile Drops, 15th International Heat Transfer Conference, 2014年08月10日~2014年08月15日, 京都
- ⑦ T. Wakui, Y. Fukatani, S. Hidaka, M. Kohno and Y. Takata, Heat Transfer of Spray Droplets Impinging onto Hot Inclined Surface, 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014年11月05日~2014年11月07日, Krabi, Thailand

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

高橋厚史 (TAKAHASHI KOJI)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 10243924

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

(3) 研究協力者

Khellil Sefiane
エディンバラ大学・教授

Jungho Kim
メリーランド大学・教授