

様 式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420146

研究課題名(和文)電気絶縁性液体に電界を印加した場合の沸騰熱伝達促進に関する研究

研究課題名(英文) A study of boiling heat transfer in dielectric liquid with the electric field enhancement

研究代表者

鹿野 一郎 (Ichiro, Kano)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10282245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000 円

研究成果の概要(和文)：電気絶縁性液体によるプール沸騰飽和沸騰を対象として、電界印加による沸騰熱伝達促進、伝熱面微細構造化による沸騰熱伝達促進、前記の相乗効果による沸騰熱伝達促進を実験的、解析的に明らかにした。電界を印加した場合の限界熱流束(CHF)は、自然対流沸騰熱伝達に対して最大で4倍の熱伝達促進効果が得られた。また、伝熱面微細構造化によってCHF発生時の過熱度は最大8K低減し、CHFは40%促進することを明らかにした。さらに、電界印加と伝熱面微細構造化による相乗効果によって、CHFは4.5倍の熱伝達促進効果を実現した。加えて、詳細な気泡挙動の観察により沸騰促進モデルを構築し、解析式を提案した。

研究成果の概要(英文)：This study describes the results of dielectric liquid pool boiling experiments on a polished copper wall with the application of an electric field. Then, micro-structured surfaces were used as the boiling surface. Finally, the combination of the application of electric field and the micro-structured surface was tested. In addition, the effect of the electric field and the micro-structured surface on critical heat flux (CHF) were analytically investigated. The maximum CHF with the application of electric field was 4 times greater than that for the pool boiling. The CHF were increased by the micro-structured surface, and showed maximally 40 % higher than the CHF for the polished surface. The combined effects of the electric field and the micro-structured surface increased the CHF significantly, which was 4.5 times greater than that for the pool boiling. The combined effect on CHF was sufficiently detected by the analysis results.

研究分野：工学

キーワード：熱交換器 沸騰熱伝達 伝熱促進 限界熱流束 静電圧力 微細構造化

1. 研究開始当初の背景

図1は、フッ素系液体中に加熱金属を浸した場合の冷却熱量と発熱体の表面温度を示す。この液体は電気絶縁性であり、沸点は55である。加熱金属を浸して沸騰させただけの自由対流沸騰の場合、液体が沸騰する温度範囲は71～80で、冷却熱量は4W/cm²～22W/cm²である。本研究では、沸騰温度範囲を広くし(65～100)、冷却熱量を100W/cm²に増加させる手法を研究する。これが実現できれば、レーザーダイオードなどの高出力光源に対する小型でメンテナンス性の良い冷却装置が期待できる。国内外において、電子機器の発熱量増加に伴い、沸騰冷却に関する様々な研究が盛んに行われている。伝熱面上にダイヤモンド微粒子を塗布して、表面粗さを大きくすることにより沸騰開始温度を下げて最大冷却熱量を増加する研究、また、電気流体を利用した沸騰促進を行う研究などがある。ただし、電気流体を利用する場合、電気絶縁性液体に数十キロボルトの高電圧を印加しなければならないという欠点があった。

本研究申請者は、これまでに電気絶縁性液体に発生する電気対流効果について研究を行ってきた。従来、電気対流を発生させるためには数十キロボルトの高電圧を印加しなければならなかったが、半導体微細加工技術(MEMS)により、数百Vの電圧で液体を流動させることが可能となった。この原理を応用したマイクロポンプを開発し、圧力や流量の高出力化などを実現している。また、電圧印加による蒸気泡の制御により、沸騰熱伝達促進効果についても研究を行ってきた。

以上、本研究申請者がこれまでに蓄積してきたマイクロ加工技術と電気対流効果の知見により、1.5kVで45W/cm²の沸騰熱伝達促進が実現でき、低電圧印加での沸騰熱伝達促進効果が可能となった。ところが、本研究で目標としている冷却能力は100W/cm²であり、これまでの研究実績である45W/cm²では目標値には到達していないのが現状であった。

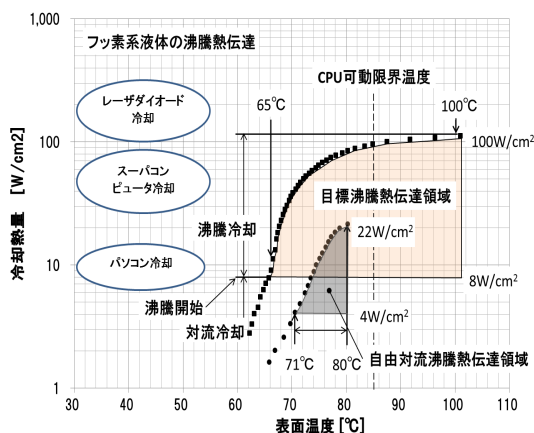


図1 沸騰曲線.

2. 研究の目的

本研究では、冷却能力100W/cm²以上を実現するために、次の3つの課題に取り組み、電気流体及び伝熱面微細構造が沸騰熱伝達促進へ及ぼす影響を明らかにする。

(1) 電界印加による沸騰熱伝達促進

電界によって蒸気泡の挙動が制御できるマイクロオーダの最適電極形状を提案し、この電極を組み込んだ沸騰型マイクロ熱交換器の試作と性能評価を行う。

(2) 伝熱面微細構造による沸騰熱伝達促進

伝熱面表面にダイヤモンド電着層を設け、表面積の増加と微細構造化による沸騰促進効果のメカニズムを明らかにする。

(3) 電界印加と伝熱面微細構造を組み合わせた場合の沸騰熱伝達促進

(1)の電界印加による蒸気泡制御と(2)の伝熱面微細構造による沸騰熱伝達促進の相乗効果を調べて、さらに高効率な沸騰熱伝達機構を研究する。

3. 研究の方法

(1) 電界印加による沸騰熱伝達促進

実験装置全体図を図2に示す。実験装置は液体タンク、バルブ、予熱タンク、ポリカーボネート製のチャンバー、マイクロ電極、テフロン製の断熱ブロック、無酸素銅製の加熱ブロック、カートリッジヒーター、凝縮器で構成されている。チャンバーに液体を流入させる前に、予熱タンクで液体を飽和温度まで過熱した。作動流体には電気絶縁性であり耐食性に優れ、沸点が約55.5であるフッ素系液体のAE-3000(AGC)を使用した。加熱ブロック上部には、上端部が沸騰伝熱面となっている直径15mm、長さ38mmの温度測定部を有している。また、温度測定部には、温度勾配を測定するために伝熱面から13mm、19mm、25mmの位置に設けたφ1.7の穴に、±0.04Kに校正したT型熱電対を挿入して測定した。熱流束及び伝熱面温度は温度勾配からフーリエの式及び外挿により算出した。伝熱面の表面性状の均一化を図るため、伝熱面を旋盤加工後に伝熱面の表面粗さがRa=0.05μmになるまで#2000と#8000のラッピングフィルムシート(3M)を用いて研磨した。チャンバー内壁の寸法は50mm×50mm×50mmである。液面は伝熱面から40mmの高さの所で一定となるよう、タンク内の液体とのヘッド差によって調整されている。チャンバー上部の凝縮器は大気圧解放されており、確認のためチャンバー内の圧力を測定している。

本実験で用いたマイクロスリット電極を図3に示す。気泡を排出するため、幅700μmのスリットを等間隔に配置している。また、スリット角部は電界勾配を発生させるため45°のテーパを設けている。このテーパ面を伝熱面と対向して距離H=200μm～600μmの間隔で設置し、電界の変化(E=-3,-5,-7kV/mm)が及ぼす沸騰曲線への影響を調べた。

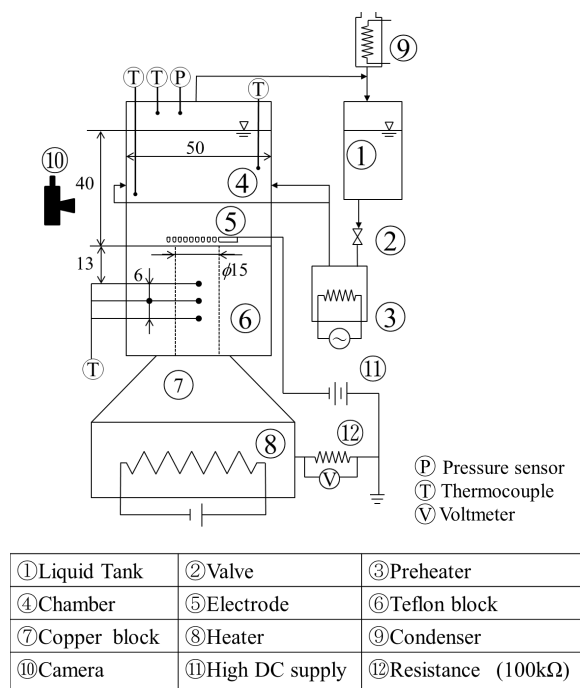


図 2 実験装置全体図．

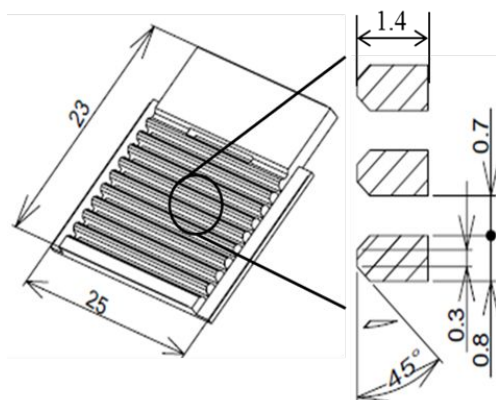


図 3 電極形状．テーパ面を伝熱面と対向して距離 $H=200\ \mu\text{m} \sim 600\ \mu\text{m}$ の間隔で設置する．

(2) 伝熱面微細構造による沸騰熱伝達促進

低い過熱度で沸騰熱伝達を促進させることを目的として、伝熱面上にダイヤモンド粒子を電着した．粒子径には $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ および $5\ \mu\text{m}$ と $1.5\ \mu\text{m}$ の粒子を混在させたものを採用し、粒子径の違いが及ぼす熱流束の影響を調べた．図 4 にダイヤモンド粒子電着層の構成を、表 1 に電着層の厚さを示す．また、表 2 にそれぞれの粒子径における算術平均粗さ、粒子の数密度、絶縁性液体（AE-3000）と伝熱面との接触角を示す．接触角の測定は JIS R 3257(1990)に従い、 $1/2\ \theta$ 法を用いた．

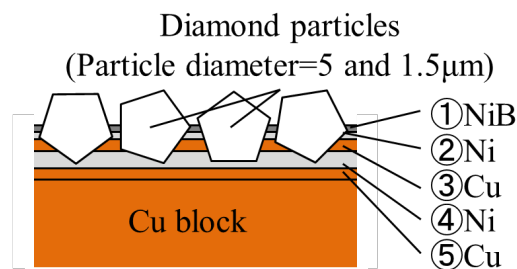


図 4 伝熱面微細構造．ダイヤモンド粒子を 5 層の電着層によって固定する．

表 1 電着層の厚さ．

Material	D = 15 (μm)	D = 10 (μm)	D = 5 (μm)	D = 5 and 1.5 (μm)
Ni + B	1.0	1.0	0.5	0.5
Ni	1.0	1.0	0.5	0.5
Cu	5.0	3.0	1.0	1.0
Ni	1.0	1.0	0.5	1.5
Cu	1.0	1.0	1.0	1.0

表 2 表面粗さと接触角．

Particle diameter (μm)	Surface roughness (μm)	Number density (Num./mm ²)	Contact angle (degree)
Cu surface	0.05	0	13.4, 14.5
D = 15 ± 5	0.42	7208	8.69
D = 10 ± 2	0.36	8250	9.38
D = 5 ± 1	0.17	22167	9.89
D = 5 ± 1 and 1.5 ± 0.5	0.19	47396	10.2, 11.0

(3) 電界印加と伝熱面微細構造を組み合わせた場合の沸騰熱伝達促進

電界印加と伝熱面微細構造化の相乗効果によって沸騰現象が激しくなることから、チャンバー壁面と蒸気泡が干渉することが予測されたので、チャンバーを大きく再設計した．チャンバーは、内径 100mm で高さが 150mm である．液面は伝熱面から 100 mm の高さで一定となるよう、予備タンク内の液体とのヘッド差によって調整されている．実験装置の概略図を図 5 に示す．その他実験装置の構成や機能、液体は図 1 で述べた内容と同じである．

接触角の影響を調査するため、銅平滑面とダイヤモンド電着面に加えて Sn めっき、Cr めっき、NiB めっきを追加した．各めっき面は、磨いた銅表面上に $1.0\ \mu\text{m}$ 厚でめっきを施した．表 3 にそれぞれのメッキ層の厚さと絶縁性液体（AE-3000）との接触角を示す．

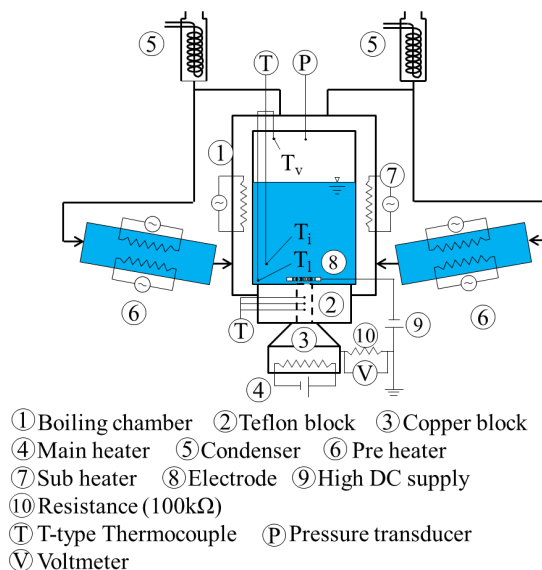


図 5 実験装置全体図．

表 3 伝熱面の性状．

Surface material	Thickness (μm)	Contact angle (degree)
Sn	1.0	12.1
Cr	1.0	12.4
NiB	1.0	12.8

4．研究成果

(1) 電界印加による沸騰熱伝達促進

プール沸騰および電界を印加した場合の沸騰曲線を図 6 に示す．また，図 6 には電界を印加した場合に液体に流れる電流値も示している．電極は設置高さ $H = 600 \mu\text{m}$ で，電界は $E = -5 \text{ kV/mm}$ である．電界を印加した場合，限界熱流束(CHF)は過熱度 55.7 K の時に 86.2 W/cm^2 を示した．電界を印加する事によって CHF はプール沸騰の場合 (22 W/cm^2) よりも約 4 倍向上した．図 6 において電界を印加した場合に沸騰曲線の傾きが変化した点をそれぞれ A, B, C, D 点とし，それぞれの点から点へ遷移する過程を AB, BC, CD 領域と呼称する．また，D 点は熱伝達率の最大値を示す点である．以下にそれぞれの過程について考察する．

AB 領域ではプール沸騰と比べ熱流束が高くなる傾向を示した．これは EHD 対流と電極により構成される狭小流路に毛細管力で液体が侵入すること，および誘電泳動力による気泡の排除により過熱液層が攪乱され熱伝達特性が向上したと考えられる．また，過熱度の増加に伴う伝熱面近傍の過熱液層の温度上昇に伴い，液体の電気伝導率が大きくなり，電流の絶対値は増加する．BC 領域において沸騰曲線は垂直に近い傾きを示し，熱流束が著しく増加した．B 点へ到達すると気泡挙動の観察から伝熱面の広い領域で蒸気泡が

発生したことが確認できた．そのため，蒸気が絶縁体となり電流の絶対値は減少している．CD 領域では沸騰曲線の傾きが小さくなり熱伝達性能が低下した．この領域では十分に発達した核沸騰に移行したと考えられる．また，過熱度が増加するため電流の絶対値は上昇した．D 点を超えると過熱度の増加に伴い，蒸気泡が合体して限界熱流束へ到達する．

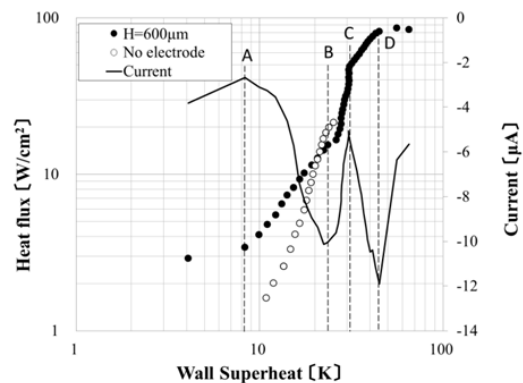


図 6 自由対流沸騰と電界を印加 ($E = -5 \text{ kV/mm}$) した場合の熱流束の変化．

沸騰伝熱面の沸騰痕の観察と高速度カメラによる気泡の挙動から，図 7 に示す蒸気柱モデルを仮定した．気液界面には静電圧力と表面張力が働くため，電極下部に液体が保持され，スリット部に蒸気柱が形成される．蒸気の上昇速度によって蒸気柱側面には Kelvin-Helmholtz 不安定性による振動が生じる．そこに静電圧力による力が加わることで振動数が増加し，伝熱面上に形成される薄液膜形成周期の増加によって CHF が促進されると仮定した．このモデルから気泡の相転移に伴う蒸発潜熱考慮し，理論式を導出した．

$$q_{EHD \max} = \frac{\pi \lambda}{48} L_s \rho_v \frac{L_s}{A} \left[\frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l \rho_v} \left\{ \frac{2\pi\sigma}{\lambda} + E_0^2 (\epsilon_l - \epsilon_v) \tanh\left(\frac{2\pi X_0}{\lambda}\right) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots (1)$$

ここで $q_{EHD \max}$ は，電界を印加した場合の CHF， λ は Kelvin-Helmholtz 不安定波の波長， σ は液体の表面張力， ϵ_l は液体の誘電率， ϵ_v は蒸気の誘電率， E は電界， X_0 は電極中心から気液界面までの距離， L_s はスリットの総長さ， A は伝熱面積である．Kelvin-Helmholtz 不安定波の波長 λ は，モデルを参考に電極設置高さ H の 2 倍 ($\lambda = 2H$) とし，距離 X_0 は電極幅 W_E の $1/2$ ($X_0 = W_E/2$) とした．

次に，式(1)を Zuber (ASME J. Heat Transfer, 80, 1958) の理論式で割って次の無次元式を導き出した．

$$\frac{q_{EHD \max}}{q_{\max}} = \frac{\lambda L_s \left[\frac{2\pi\sigma}{\lambda} + (\epsilon_l - \epsilon_v) E_0^2 \tanh\left(\frac{2\pi X_0}{\lambda}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}{2A [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{\frac{1}{4}}} \quad \dots \dots (2)$$

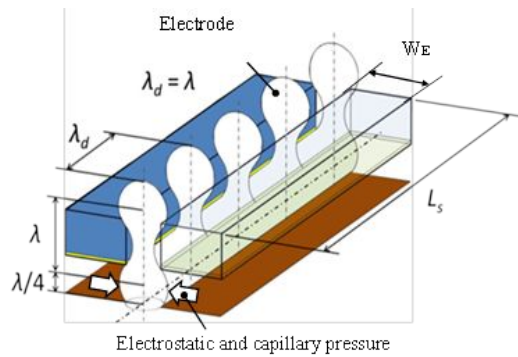


図 7 スリット電極から排出される蒸気排出モデル。本モデルは、高速度カメラによる詳細な観察から構築した。

電極設置高さ H および電解 E の変化による無次元 CHF の理論曲線（式(2)）と実験値との比較をそれぞれ図 8, 9 に示す。HTC（熱伝達率）が最大となる D 点以降は沸騰現象が不安定となる（図 6）。したがって、CHF は HTC の最大値以降に発生すると考え、 D 点と CHF 点の双方をプロットしている。 H が大きくなると無次元 CHF は大きくなり、理論曲線と実験値は良い一致を示した。また、 E が大きくなると無次元 CHF は大きくなり、理論曲線と実験値は良い一致を示した。式(2)から、 H が高くなると生成される蒸気泡の大きさが大きくなり、また、 E を高くすると薄液膜の生成周期が早くなることで熱伝達性能が向上することが予測できる。

(2) 伝熱面微細構造による沸騰熱伝達促進

接触角の変化による熱伝達促進を評価するために、Lüttich(Int. J. Therm. Sci., 43(12), 2004)らが提案した薄液膜密度の計算式を式(1)の理論式あるいは Zuber の理論式との比を取って次式を導き出した。

$$\frac{CHF}{q_{\max}} \text{ or } \frac{CHF}{q_{\max,EHD}} = C_A \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} + C_B \frac{1}{\sin \phi} \quad (3)$$

ここで、 C_A および C_B は定数である。

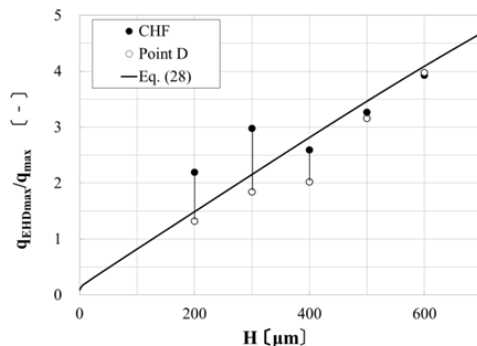


図 8 電界を印加($E = -5\text{kV/mm}$)して電極設置高さを变化させた場合の無次元 CHF の変化。

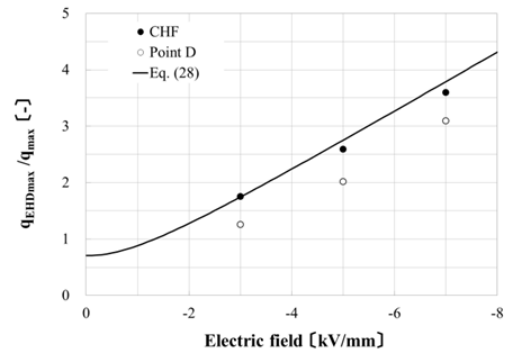


図 9 電極設置高さを固定($H = 400\text{ }\mu\text{m}$)して印加電圧を变化させた場合の無次元 CHF の変化。

接触角変化の影響を調べるために、銅平滑面とダイヤモンド電着面の場合の CHF を調べた。また、銅平滑面に Sn, Ni, NiB をメッキして接触角を変えた場合の沸騰曲線を測定した。図 10 に接触角の違いにおける CHF の変化を示す。接触角の低下に伴い熱流束が増加している。また、図 10 には式(3)による計算値を示している。(3)式中の定数はそれぞれ $C_A = -0.00766$, $C_B = 0.283$ であり、実験値から最小二乗法で求められた値である。実験結果と式(3)は良い相関性を示している。式(3)の導出過程から、接触角が減少することで、伝熱面上の薄液膜密度が増加し、薄液膜沸騰の領域が増加するために蒸発が促進されることが推測できる。

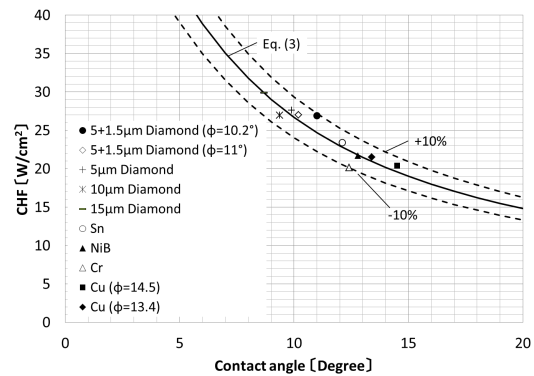


図 10 接触角を变化させた場合の自由対流沸騰の場合の CHF 変化。

(3) 電界印加と伝熱面微細構造を組み合わせた場合の沸騰熱伝達促進

ダイヤモンド電着面($5\text{ }\mu\text{m} + 1.5\text{ }\mu\text{m}$)と銅平滑面に -5 kV/mm の電界を印加した場合の沸騰曲線を図 11 に示す。スリット電極の設置高さは $600\text{ }\mu\text{m}$ である。ダイヤモンド電着面に電界を印加した場合は 33.5 K の過熱度で 99 W/cm^2 の CHF を示し、低い過熱度で高い熱流束が得られた。銅平滑面の場合(59.7 K , 67.2 W/cm^2)と比較すると CHF は 1.5 倍に増加した。また、図 10 の銅平滑面の場合で自由対流沸騰の場合(21.5 W/cm^2)と比較すると CHF は 4.5 倍に増加し、伝熱面の微細構造化

による濡れ性向上と電界印加による沸騰熱伝達促進効果が高いことがわかった。

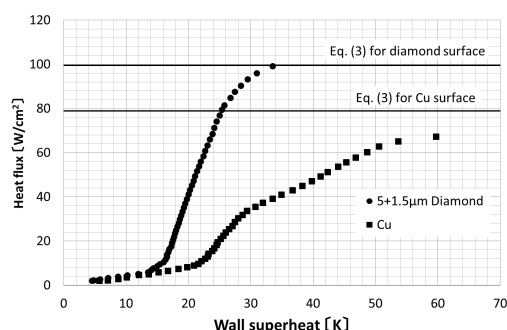


図 11 ダイヤモンド電着面(5 μm + 1.5 μm)と電界印加による沸騰熱伝達の相乗効果($H = 600 \mu\text{m}$, $E = -5 \text{ kV/mm}$)。

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 9 件)

1. I. Kano, T. Sato, and N. Okamoto, Experimental Verification of Analytical Prediction of Pool Boiling CHF Incorporating the Effects of EHD and Contact Angle, *InterPACK2015 & ICNMM2015*, 査読有, San Francisco (USA), InerPACKICNMM2015-48661, pp. 1-7, (2015). DOI: 10.1115/ICNMM2015-48661
2. I. Kano, Pool Boiling Enhancement by Electrohydrodynamic Force and Diamond Coated Surfaces *ASME Journal of Heat Transfer*, 査読有, 137, pp. 091006(1-9), (2015). DOI: 10.1115/1.4030217
3. I. Kano, Pool Boiling Enhanced by Electric Field Distribution in Microsized Space, *4th Micro and Nano Flows Conference*, 査読有, London (UK), pp. 1-8, (2014). <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/9347>
4. I. Kano, Effect of Electric Field Distribution Generated in a Microspace on Pool Boiling, *ASME Journal of Heat Transfer*, 査読有, 136, pp. 101501(1-9), (2014). DOI: 10.1115/1.4027881
5. I. Kano, and K. Sato, Effect of Electric Field Distribution Generated in a Micro Space on Pool Boiling Heat Transfer, *Proceedings of the ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, 査読有, ICNMM2013-73118, Sapporo (Japan), pp. 1-10, (2013). DOI: 10.1115/ICNMM2013-73118
6. I. Kano, Boiling Heat Transfer Enhancement by Utilizing Electrohydrodynamic (EHD) Force in Micro Sized Space, *2013 IEEE*

Industry Applications Society Annual Meeting, 査読有, 2013-EPC-0345, pp. 1-8, Florida (USA), (2013).

DOI: 10.1109/IAS.2013.6682446

7. I. Kano, Compound Effect of EHD Force and Micro-Structured Surface Coated with Diamond Particles, *Proceedings of the ASME 2013 4th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*, 査読有, MNHMT2013-22062, Hong Kong (China), pp. 1-9, (2013). DOI: 10.1115/MNHMT2013-22062
8. I. Kano, Y. Higuchi, and T. Chika, Development of Boiling Type Cooling System Using Electrohydrodynamics Effect, *ASME Journal of Heat Transfer*, 査読有, 135, pp. 091301(1-8), (2013). DOI: 10.1115/1.4024390
9. I. Kano, and Y. Takahashi, Effect of Electric Field Generated by Microsized Electrode on Pool Boiling, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 査読有, 49-6, pp. 2382-2387, (2013). DOI: 10.1109/TIA.2013.2263213

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 岡本直樹, 佐藤貴仁, 鹿野一郎, 静電圧力効果と接触角変化による沸騰熱伝達の促進, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3 日, 福岡国際会議場(福岡県福岡市)。
2. 佐藤貴仁, 鹿野一郎, 沸騰伝熱面における伝熱面性状と EHD の複合効果について, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2014 年 5 月 22 日, アクトシティ浜松・コンgres センター(静岡県・浜松市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鹿野 一郎 (Kano, Ichiro)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 10282245