

TED Plaza

沸騰冷却デバイスの研究・開発



鹿野 一郎

山形大学 准教授
 学術研究院理工学研究科
 kano@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

プロジェクターは、従来の映画のような平面スクリーンに映し出す用途に加え、建物に映像を張り合わせるプロジェクションマッピングなどの新たなニーズが出てきている。投影される対象は建物だけではなく、水面、滝、広場、通路、広場など様々な場所で使われ、躍動感のある立体的で動的な映像を楽しむことができる。現在、この光源に使われているのが高輝度レーザダイオードバンクであり、従来の水銀ランプよりも高効率、長寿命である。しかし、高効率とはいえ投影する対象が大きいだけに、発熱量もかなり高くなる。明るさは10,000 lmから50,000 lm、消費電力は1 kWから4 kWであり、家庭用プロジェクター(2,000 lm~4,000 lm, 200 W~350 W)に比べて発熱量は10倍高くなる。現状の業務用レーザダイオードバンクの発熱密度は、著者の計算では15~20 W/cm²程度である。日本機械学会が報告している技術ロードマップ(矢部他, 2016)にレーザダイオードバンクの発熱量推移を追加したものを図1に示す。加工用レーザ光源の発熱密度はすでに100 W/cm²を超えており、今後も右肩上がりですり上がっていくことが予測される。発熱密度が上昇する原因は、製品の高出力化、小型化が原因であり、業務用プロジェクターも今後さらに発熱密度が上昇することが予測できる。水冷による業務用のプロジェクターの優位性は、静穏、小型で高輝度にあり、これを実現するには熱設計が重要となる。空冷であっても、冷却面積を増大したり、ファンの速度を上げて風量を増大したりすれば冷却はできる。しかし、水冷の長所は、熱を高効率に液体に吸収し、放熱する場所をラジエータの位置で自由に変えることができるので小型化、静穏化が実現できることである。今後、さらに高出力化や小型が求められると、発熱密度がさらに大きくなり、水冷に代わる新たな冷却手法が望まれるだろう。

熱伝達率のおおよその大きさを図2に示す(庄司, 1995)。発熱した物体を気体または液体中に放置して自然対流で冷却する方法は熱伝達率が低い。ファンなどを使って気体を強制的に対流して冷却すると液体の自然対流よりも約10倍熱伝達率が高くなる。比熱の高い液体を強制対流させる液体強制対流はさらに10倍高くなるが、最も熱伝達率が高いのが沸騰・凝縮である。工業製品としての発熱体の冷却法を振り返ると、第二次世界大戦中のレシプロ戦闘機のエンジン冷却法が分かりやすい。空冷エンジンは、冷却の効率上ピストンを放射状に配置した星形が一般的な形になり、正面面積が増え、空気抵抗が増加する。液冷は、ピストンの配置を並列にでき、冷却器の開口部が空気抵抗に加わるが、星型エンジンの場合よりも小さい。当時、日本の航空機エンジンはメンテナンス性の良さから空冷編重であったが、アメリカの場合は五分五分、その他の国は液冷が主力であった(渡辺, 2006)。戦後の日本は、自動車へと工業技術の発展が移行したが、温度コントロールがしやすくコンパクトなエンジン設計が可能なること、騒音が小さいことからエンジンの排気量(発熱密度)が大きくなるに従って水冷エンジンに移行していった(伊丹, 2010)。また、電気デバイス分野においても、デバイスの集積度が上がることでより熱伝達率の高い冷却法を採用する方向に移行している。事実、静粛性を重視したパソコンには騒音の大きいファンを嫌

って水冷方式が採用されている。最近では、電気絶縁性液体中に半導体デバイスを沈めて冷却する液浸冷却装置が販売された（日経 xTECH, 2018）。冒頭で説明したプロジェクターも業務用の高出力タイプのもは水冷が採用されている。以上のように、科学技術が進展して高出力化・小型化が求められると、高効率な冷却手法へと移行している。その中でも、沸騰熱伝達は熱伝達率が最高の値を示すので、当然、様々な研究が盛んにおこなわれている。沸騰熱伝達を冷却法として採用するのに障害となる点は、いまだその冷却特性が分からないことがあるためである。一般的に、半導体の駆動限界温度はコアの温度が 85°C で、冷却面では 60°C になるように設計する。そのため沸点が低い冷媒を採用するか、回路内圧力を減圧して、沸点を下げるなど様々な条件を考えなくてはならない。水以外の冷媒を使用する場合、沸点が 10°C から 50°C の冷媒は存在するが、比熱や潜熱が水に比べて低くなる。特に、沸騰熱伝達には、限界熱流束（CHF）と呼ばれる冷却の限界点が存在するので、この限界値も把握しなければならない。さらに、プロジェクターなどの電気製品は 180° 反対にして天井に固定する場合もあり、蒸気の浮力による熱伝達性能の低下はどうなるのか、CHF はどこまで下がるのかなど、設計上解決しなければならない課題が残っている。

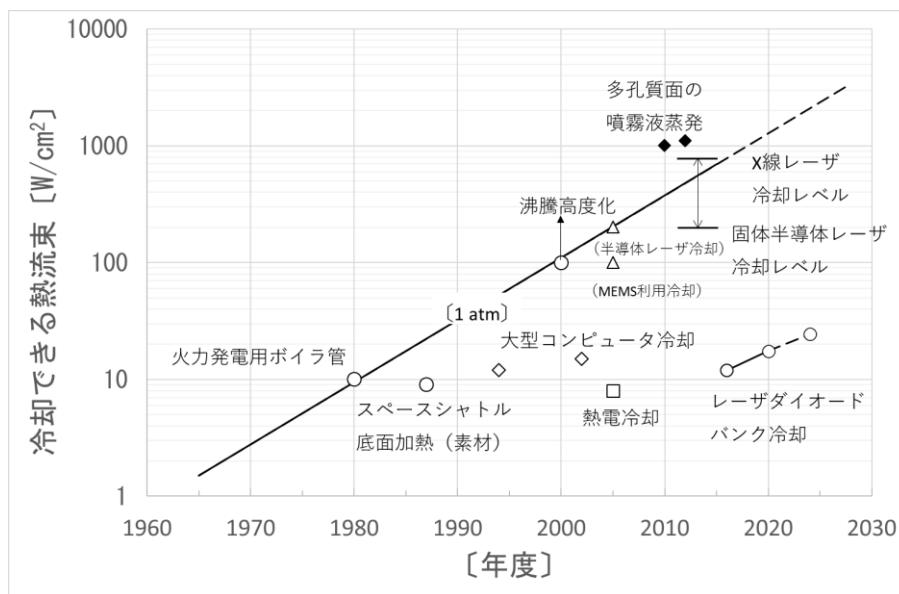


Fig. 1 The road map of cooling capacity for high heat flux

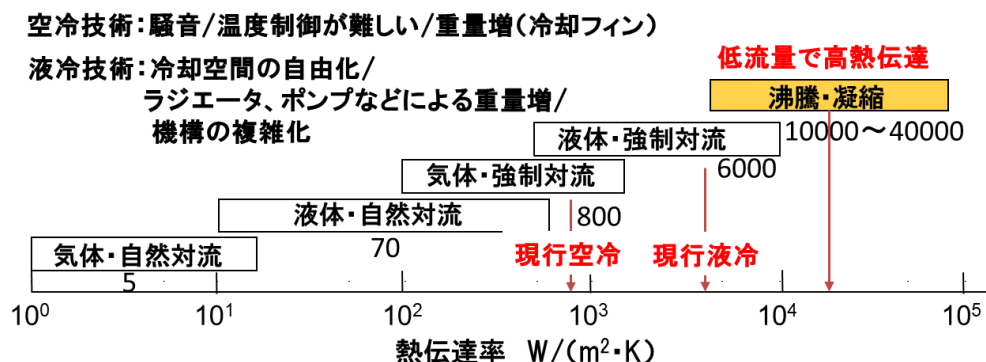


Fig. 2 Heat transfer coefficients

2. 沸騰熱伝達促進技術

沸騰熱伝達を促進させる手法には、受動的あるいは能動的な方法がある。受動的な方法は沸騰面の表面性状を変化させて液体と沸騰面の濡れ性を変える方法、あるいはポーラス金属を使用して CHF を向上させる技術など実に様々な手法が報告されている。表面性状を変化させて沸騰熱伝達性能を向上する方法は、CHF の向上はもちろん沸騰開始点を下げることが可能である。著者は、切削加工で使われるダイヤモンド電着技術を沸騰面に適用し、濡れ性の向上による CHF の増加について調べたので、この点については後程述べる。能動的な手法としては、電界印加による方法が有名である。電界印加による沸騰熱伝達促進に関する研究は、1960 年あたりから論文がよく見られるようになった (Johnson, 1968)。次に、この電界印加における電気流体力 (EHD) について説明する。

3. 電気流体力 (EHD) による体積力

誘電液体に電圧を印加するとき、液体に流れが起きる現象を EHD と呼ぶ。流れが起きる原因には大きく三つの流体力があり、次の式で表される (Landau et al., 1960, Panofsky, 1962)。

$$\mathbf{f}_e = q\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\nabla\epsilon + \nabla\left[\rho\frac{E^2}{2}\left(\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho}\right)_T\right] \quad (1)$$

ここで、 q は電荷密度 (C/m^3)、 \mathbf{E} は電界 (kV/m)、 ϵ は誘電率 (F/m)、 ρ は密度 (kg/m^3)、そして $(\partial\epsilon/\partial\rho)_T$ はある温度 T における密度変化に対する誘電率の変化量である。式 (1) の第 1 項、第 2 項、そして第 3 項は、それぞれ、クーロン力、ある電界中で誘電率の違いに起因する体積力、そして電歪力を示す。誘電性液体は電気絶縁性なので、第 1 項のクーロン力は無視できるほど小さい (Landau et al., 1960)。しかし、電気絶縁破壊強度以上の電圧 (通常は数十 kV 以上) を印加する場合や、液体中に水などの不純物がある場合には、第 1 項のクーロン力は無視できなくなり、このクーロン力によってイオンが液体中を移動し、流れを引き起こすのがイオンドラッグポンプである。イオンドラッグポンプは、1960 年前後から広く知られるようになり (Stuetzer, 1959, Pickard, 1963)、液体には、4 フッ化硫黄 (SF_4)、液体窒素、フレオン 113、ケロシン、絶縁性オイル、鉱物オイル、シリコンオイル、ひまし油などが使われた (Stuetzer, 1959)。また、Atten と Yagoobi は、クーロン力によって発生する EHD 効果にコンダクションポンピングという新たな動作原理を提案した (Atten and Yagoobi, 2003)。

右辺第二項は、流体中に誘電率の不均一があるところに発生する流体力で、具体的には沸騰が起きている気液二相流で発生する。この場合は、電気分解を起こすほどの高電圧を印加する必要はなく、式 (1) の右辺第 1 項のクーロン力は無視できる。この不均一な誘電率に起因する流体力には、液体中の気泡界面に働く静電圧力がある。具体的に、図 3(a) に示すように、シャーレの中に入っている電気絶縁性液体中に、2 枚の電極を張り合わせた電極対の下側を液体に浸した場合を考えてみる。初めは表面張力で液体が上昇するが、さらに電界をかけると、静電圧力によって電界強度の二乗で上昇する。この場合、式 (1) の第 1 項と第 3 項は第 2 項に比べて非常に小さいので無視でき、次のように表すことができる。

$$\Delta P_{EHD} = \frac{1}{2}(\epsilon_l - \epsilon_g)\left(E_t^2 + \frac{\epsilon_l}{\epsilon_0}E_n^2\right). \quad (2)$$

さらに、 $E_t \gg E_n$ の条件を満足するので、次式のように簡単に表すことができ、この圧力を静電圧力とよぶ。

$$\Delta P_{ESP} = \frac{1}{2}E_t^2(\epsilon_l - \epsilon_g). \quad (3)$$

図 3(b) に示すように電界に勾配がある場合に半径 R の球体に働く力を考えてみる。誘電率 ϵ_l の液体中に誘電率 ϵ_p の直径 R の固体や蒸気泡が存在したりする場合の固気あるいは気液二層流の場合を考えると、式 (1) は次式のように変形できる (Jones, 1995)。

$$f_{EDP} = 2\pi\epsilon_l R^3 \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_l}{\epsilon_p + 2\epsilon_l} \right) \nabla E^2 \quad (4)$$

式(4)は電界印加による誘電分極に起因する。液体よりも誘電率が小さい蒸気の場合は、電界の大きい方向に力が働くが、液体よりも誘電率が大きい固体の場合は、電界の小さい方向に力が働く。蒸気泡に電界の勾配を与えることによって蒸気泡を加熱面から排除して熱伝達を促進させる効果もある (Patel and Yagoobi, 2017)。

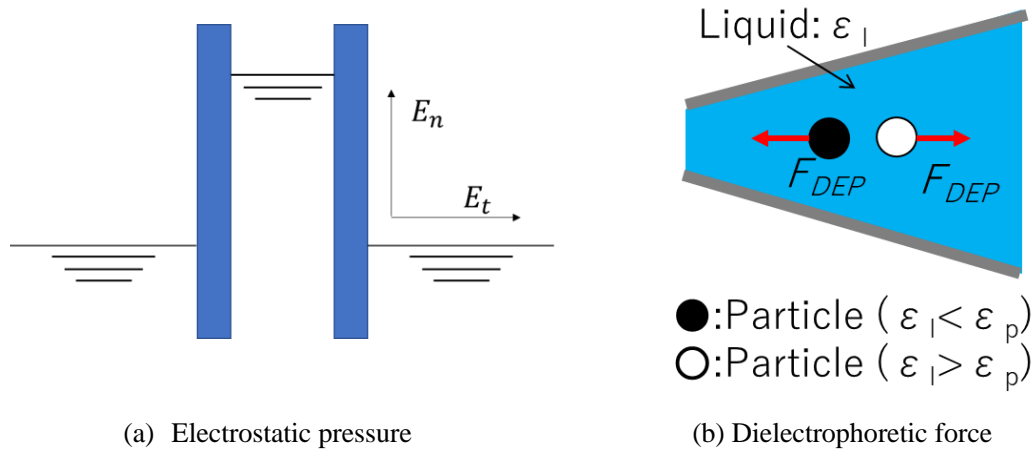


Fig. 3 Electrical body force

4. 冷媒の選定とダイヤモンド電着面によるプール沸騰熱伝達促進技術

本研究では、電界を印加して沸騰を促進させる方法を採用するため、使用する液体は電気絶縁性液体でなくてはならない。エアコンなどに使われる冷媒は大抵電気絶縁性液体なので、様々な沸点の液体を選ぶことができる。本研究では、沸点が 55.5°C の HFE-347-pc-f (AE-3000, AGC) を選定した。表 1 に本研究で採用する冷媒の物性値を示す。冒頭でも述べたが、蒸発潜熱は水の約 15 分の 1、比熱は約 3 分の 1 であるので液体としての冷媒の能力は水よりも低い。この物性から推測すると、沸騰熱伝達に使うには限界熱流束 (CHF) の値が低くなるのが懸念され、沸騰促進技術を適用し、CHF を高くする新たな手法を適用する必要がある。

この電気絶縁性液体を使った場合のプール沸騰熱伝達での CHF を図 4 に示す (Kano and Okamoto, 2017)。沸騰面は直径 15 mm の無酸素銅を使用しており、表面には #8000 のラッピングフィルムシート (3M) で磨いた銅表面、及び粒形 5 μm と 1.5 μm のダイヤモンド粒子を電着した場合の 2 種類を使用した。ダイヤモンド電着は砥石に使われる技術で、表面粗さ Ra が 0.19 μm と荒いのに対し、磨いた銅表面は 0.05 μm である。沸騰促進との相関が高いのは静的接触角 θ であり、磨いた銅表面と AE-3000 では 14.5° に対して、ダイヤモンド電着面の場合は 10.5~11.0° と小さく、銅表面より濡れ性が高い。図 4 を見ると、銅表面の場合の CHF は 20 W/cm² であるのに対して、ダイヤモンド電着面は 27 W/cm² と 35% の増加を示し、CHF 発生時の過熱度は 12 K 減少する。CHF が発生する表面温度は 75 °C であるので、電子機器部品の冷却には適しているが、CHF は 30 W/cm² 程度である。実用性を考えれば、CHF を 100 W/cm² に向上できる促進技術を適用したい。そこで、本研究では、次に述べるように電界を印加してさらに CHF を向上させる能動的な沸騰熱伝達促進技術を採用した。

Table 1 Typical physical properties for AE-3000 (HFE-347-pc-f)

項目	HFE-347-pc-f
沸点 (°C)	55.5
絶縁破壊強度 (kV/mm)	16
電気伝導率 at 23°C (S/m)	7.7×10^{-10}
蒸発潜熱 (kJ/kg) at 55.5 °C	147
密度 (kg/m ³) at 55.5 °C	1393
粘度 (mPa s) at 25 °C	0.646
比誘電率 (-) at 25 °C	7.2
表面張力 (mN/m) at 55.5 °C	12.2
蒸気密度 (kg/m ³) at 55.5 °C	7.82

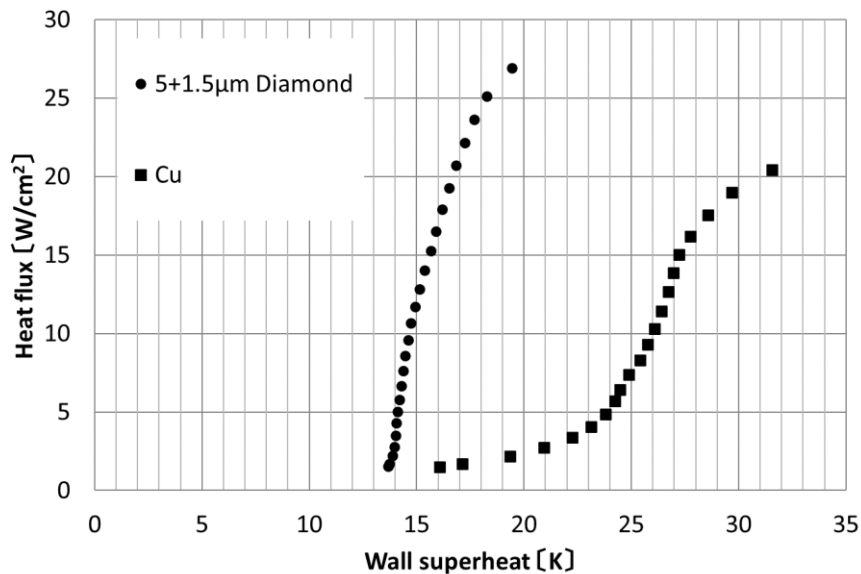


Fig. 4 Boiling curve for pool boiling on the different heating surface ($P_{\infty} = 1\text{atm}$).

(Diameter of boiling surface was 15 mm, Static contact angles between AE-3000 and boiling surface were 14.5 for polished Cu and 10.5 – 11.0 for diamond coating)

5. 電界印加によるプール沸騰熱伝達促進

図5に沸騰面に電界を印加するための電極構造を示す (Kano and Okamoto, 2017). 図5(a)は、電極を上から見た図で、直径 15 mm の沸騰面の上に電極が設置されている。電極は図5(b)に示すように幅 (W_E) が 800 μm で、幅 (W_S) が 700 μm のスリットが設けられており、沸騰面から 600 μm の高さ (H) で固定されている。また、図5(b)には沸騰が十分発達した場合の蒸気泡の挙動の概略図も示している。核沸騰が十分発達すると、スリットに沿って気泡柱が形成され、気泡はスリットを過ぎると、周期性をもって蒸気泡として電極上面から離脱する。沸騰面と幅 W_E の電極との間の液体には、図の矢印に示されるように気液界面に図3で示した静電圧力が働く。この界面には -5 kV/mm の電界で約 600 Pa の静電圧力が働くことが理論的に計算でき、CHF に到達するまで沸騰面と電極の間に液体をポンピングし続けることが可能になる。図6に示すように、このポンピング効果は、CHF の向上に効果的であり、磨いた銅表面では 65 W/cm²、ダイヤモンド電着面に対しては 100 W/cm² の冷却性能を実現している。なお、100 W/cm² での過熱度は 33 K (88°C) であり、電子機器部品の冷却に適用可能である。

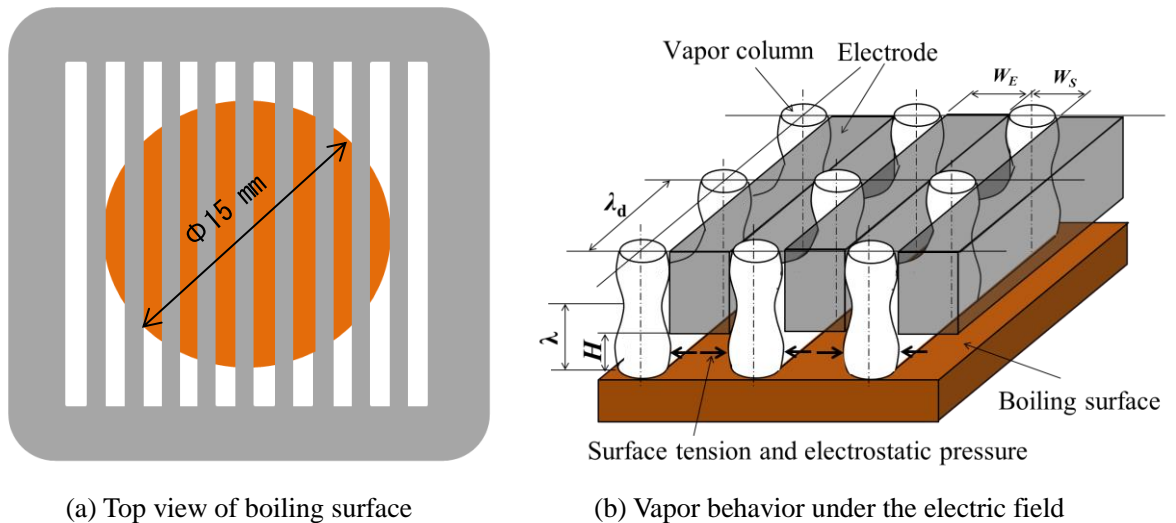


Fig. 5 Electrode arrangement above the boiling surface.
 ($H=600 \mu\text{m}$, $W_E=800 \mu\text{m}$, and $W_S = 700 \mu\text{m}$)

6. 電界印加によるサブクール流動沸騰熱伝達促進

プール沸騰では、沸騰面が少しでも傾くと蒸気泡の浮力の影響で熱伝達性能は大きく変化する。そこで、姿勢が変化した場合でも安定した冷却性能を得るために、本研究で発明した沸騰熱伝達技術をサブクール流動沸騰熱伝達に適用した (Kano, 2019)。プール沸騰熱伝達の場合と大きく違うところは、ギアポンプを使用して液体を電極と沸騰面に強制的に流すことである。流量は 1.9 g/s と低く設定し、加熱面上で沸騰が起きやすいようにした。図7に流入液温を変化させた場合の沸騰曲線を示す。実験は大気圧下で行った。流入液温が高くなるほど CHF が上昇し、最大で 120 W/cm^2 を得ている。液温が高くなると冷却性能が向上するのは、湯き度 (Vapor quality) が高くなり、蒸発潜熱による冷却が高くなったことが原因であると考えている。沸騰面の温度が $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 付近で 120 W/m^2 を冷却できる性能は電子機器部品の冷却条件に非常に向いていると思われる。

7. 終わりに

本稿では、高発熱密度の電子機器部品の冷却法として、沸騰熱伝達による冷却法の優位性について述べ、沸騰熱伝達を促進するための受動的及び能動的促進法について述べた。受動的促進法については、濡れ性の向上が沸騰開始点の低下や CHF の増加を可能にすることを述べた。本稿では、濡れ性の向上にはダイヤモンド電着法を採用している。また、能動的促進法として、電気絶縁性液体に電界を印加したときに現れる電気流体力 (EHD) 効果について説明した。EHD 効果による沸騰熱伝達促進法により、プール沸騰の場合は CHF が 3 倍の 100 W/cm^2 を実現した。ダイヤモンド電着による効果は、CHF 点での過熱度の低下に大きく貢献し、 100 W/cm^2 での過熱度は 33 K (88°C) であり、電子機器部品の冷却法への適用可能性を示した。また、姿勢変化に対応するために本促進技術をサブクール流動沸騰に適用した。低流量 (1.9 g/s) での駆動で、CHF は 120 W/m^2 を示し、その時の沸騰面の温度は $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 付近であった。この結果から、高発熱密度の電子機器部品の冷却技術として有効な手段になるものと期待している。

以上、電界印加による沸騰熱伝達促進技術について述べてきた。沸騰面の温度は 85°C で 120 W/cm^2 を冷却できるわけであるから、実用化へ向けての期待が高まってくる。しかし、実際の冷却システムを考えると、回路は閉回路であるため、温度の上昇に伴う飽和温度の上昇と冷却性能との関係を明らかにしなければならない。また、実際の使用においては、 180° 反転した状態も考えなければならない。これらの諸条件に対し、さらに研究を進める予定である。

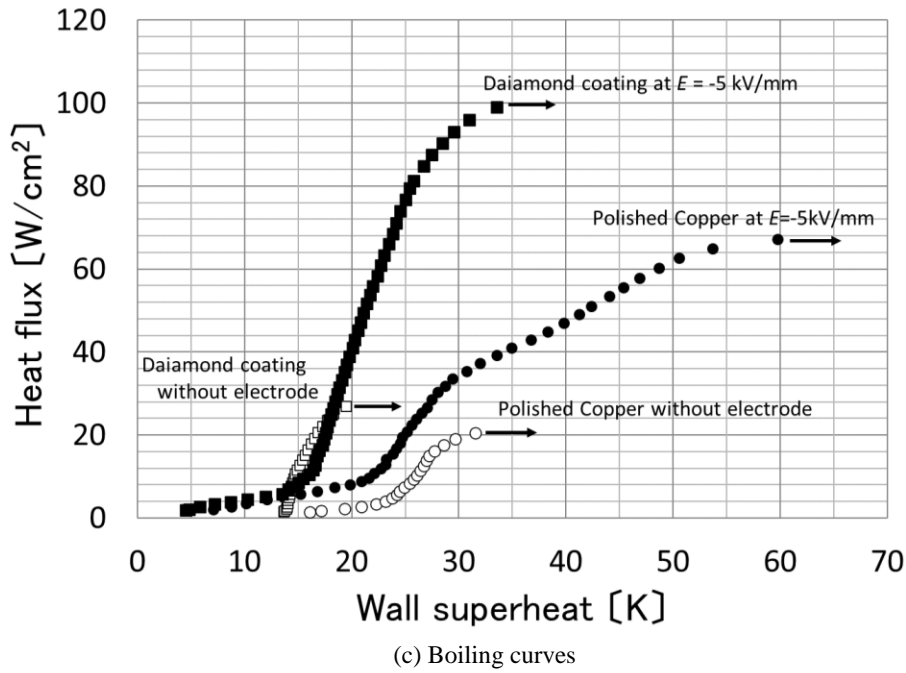
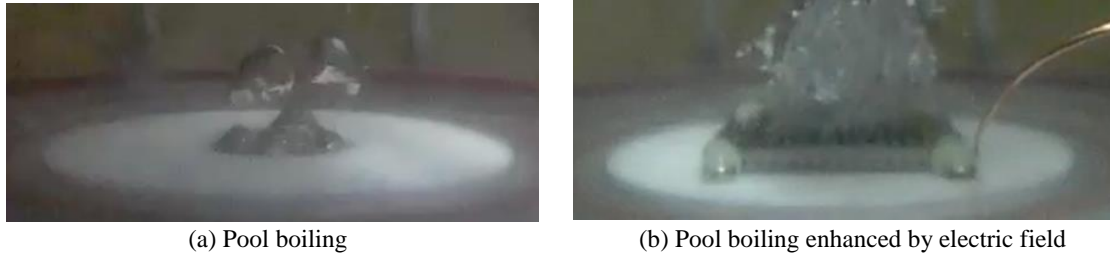


Fig. 6 Effect of electric field on boiling curve in saturated pool boiling ($P_{\infty} = 1 \text{ atm}$)

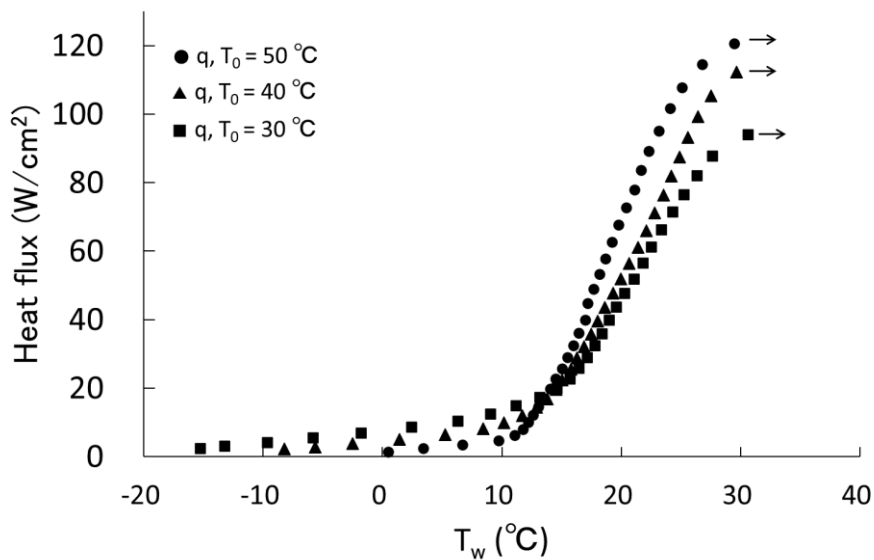


Fig. 7 Effect of inlet temperatures on subcooled flow boiling
 ($\dot{m} = 1.9 \text{ g/s}$, $E = -5 \text{ kV/mm}$, $P_{\infty} = 1 \text{ atm}$)

謝 辞

EHD の原理と性能評価においては、山形大学大学院理工学研究科物質化学専攻の仁科辰夫教授にご協力いただいた。また、沸騰熱伝達の原理や計測法においては、高橋一郎山形大大学名誉教授にご協力いただいた。なお、本研究は、平成 18 年度第 1 回産業技術研究助成事業 (06B44014a) を受けて研究の基盤が確立し、その後、科学研究費補助金(c)No.25420146 および科学研究費補助金(c)No.16K06106 を受けて研究が行われたことを記し、謝意を表す。

文献

- 矢部彰 他, JSME 技術ロードマップ, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1170 (2016), pp. 283–323.
- 庄子正弘, 伝熱工学 (1995), 東京大学出版会.
- 渡部洋二, 液冷戦闘機「飛燕」(2006), 文藝春秋.
- 伊丹敬之, 本田宗一郎 (2010), ミネルヴァ書房 (2010).
- 武居智久, サーバーを液体に浸す, 富士通が新冷却システムで狙う市場 (2018), 日経 xTECH/日経コンピュータ.
- Johnson, R. L., Effect of an electric field on boiling heat transfer, AIAA Journal, Vol. 6, No. 8 (1968), pp. 1456–1460.
- Landau, L. D., Lifshitz, E. M., and Pitaevskii, L.P., Electrohydrodynamics of Continuous Media, 2nd edition, 8, Butterworth–Heinemann (1984).
- Panofsky, Wolfgang K. H., Classical Electricity and Magnetism, Second Edition, Dover Publications (2005).
- Stuetzer, O. M., Ion drag pressure generation, Journal of Applied Physics, Vol. 30, No. 7 (1959), pp. 984–994.
- Pickard, W. F., Ion-drag pumping. I. Theory, Journal of Applied Physics, Vol. 34, No. 2, 1963, pp. 246–250.
- Jones, T. B., Electromechanics of particles, Cambridge University Press (1995).
- Atten, P., and Seyed-Yagoobi, J., Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 1 (2003), pp. 27–36.
- Patel V. K., and Seyed-Yagoobi, J., Combined dielectrophoretic and electrohydrodynamic conduction pumping for enhancement of liquid film flow boiling, Journal of Heat Transfer, Vol. 139 (2017), pp. 061502 (1–9).
- Kano, I., and Okamoto, N., Experimental verification of a prediction model of pool boiling enhanced by the electrohydrodynamic effect and surface wettability, Journal of Heat Transfer, Vol. 139 (2017), pp. 084501 (1–7).
- Kano, I., Subcooled flow boiling under an electric field on surface enhanced by diamond particles deposition, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 134 (2019), pp. 959–969.