

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：17301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06501

研究課題名(和文)地球温暖化係数の小さいフロン系作動流体を用いる高性能冷却デバイスの研究

研究課題名(英文)A High Intensity Cooling Device Using Low GWP Refrigerants

研究代表者

近藤 智恵子(KONDOU, Chieko)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50752870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器の急速な高性能化に伴い半導体素子からの発熱密度が増加し続けており、除熱性能を飛躍的に向上するため、相変化型冷却器が導入されつつある。冷媒は熱輸量が大い、沸騰熱伝達率が高いなど、作動流体としての利点が多い。本論では自然循環式冷却器を用い、作動流体にR1234ze(E)、R1234ze(Z)を用いた場合の性能を実験的に評価した。R1234ze(E)、R1234ze(Z)の安全作動領域をそれぞれ、1250、1110 kWm⁻²まで拡大出来る事を示した。以上に対し、レーザ加工を施した沸騰伝熱面を使用することによって、安全作動領域をさらに1400、1350 kWm⁻²へ拡大出来る事を実証した。

研究成果の概要(英文)：With rapid development of electronic devices, their internal heat generation become significantly denser. For the heat dissipation performance improvement in limited installation spaces, passive two-phase cooling technique using water is being applied. Using refrigerants is advantageous in many aspects. In this study, a gravity-driven cooling circuit using R1234ze(E) and R1234ze(Z) are experimentally investigated. The well-known hysteresis of boiling inception was confirmed but negligible with R1234ze(E) and R1234ze(Z). The experimental circuit successfully kept the heating block temperature below 80 °C at heat fluxes up to 1250 and 1110 kWm⁻² with R1234ze(E) and R1234ze(Z), respectively. Furthermore, by using a LISS boiling surface, the heat flux was extended to 1400 and 1350 kWm⁻² in R1234ze(E) and R1234ze(Z). The experiment demonstrated that using the selected volatile working fluids, instead of water, and the LISS surface can be a beneficial solution for electronic device cooling.

研究分野：熱工学

キーワード：低GWP冷媒 電子機器冷却 超親水 レーザ加工 沸騰冷却 CPU冷却器

1. 研究開始当初の背景

電子機器の急速な小型化および高性能化に伴い、電子機器の温度上昇は深刻な問題となっている。信頼性や製品寿命などの問題を回避するためには、熱制御が最重要課題となる。今後の更なる発熱密度増加を考慮すれば、潜熱輸送を利用する沸騰冷却技術は有効な手段であると考えられ、ヒートパイプ、ペーパーチャンバ、サーモサイフォンはその代表的なものである。特に凝縮器と蒸発器の位置が選択可能で固定できる場合であれば、このうち最も搬送熱量を確保しやすいループ型サーモサイフォンが適しているとされている。ただしその作動流体のほとんどが、水といった大気圧以下で作動する低压作動流体である。同じく相変化を利用するヒートポンプでは、高压流体の核沸騰熱伝達率が非常に高く性能向上に大きく寄与することが良く知られている。しかし、そのような高压作動流体を CPU 冷却等へ適用した研究例は数少ない。

2. 研究の目的

本研究では自然循環式沸騰冷却ループの除熱性能向上を目的とし、高压作動流体の有効性について実験的に検証する。冷媒 R134a, その低 GWP 代替冷媒 R1234ze(E) と R1234ze(Z) を取り上げ、水と比較しその優位性を考察する。さらに沸騰面表面性状の変更を試みる。微細孔と親水性を合わせ持つ超親水沸騰面が、核沸騰を促進するとともに最高除熱熱流束を増加させることが水で明らかにされている。そのような微細孔構造と高い濡れ性を同時に付与する方法として LISS (Laser Interference Surface Structuring) 法がある。この方法では、極短時間で安価に、耐久性のある超親水性を金属表面へ直接付与することができ、コーティング法で生ずる接着の問題なども回避することが出来る。本研究では LISS で製作された銅製超親水伝熱面を用いた場合の除熱性能を測定し、水よりも著しく表面張力の小さい R1234ze(E) などの高压作動流体に対しても核沸騰促進と最高除熱熱流束引き上げの効果が得られるかを確認する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

図 1 (a) に実験装置概略図、図 1 (b) に沸騰部概略図を示す。

(2) 試験沸騰面および試験作動流体

図 2 は、3 種の試験沸騰伝熱面の概観写真である。図 2 (a) は機械加工のみの非加工面、図 2 (b) は機械加工後レーザーで超親水加工を施した伝熱面、図 2 (c) は機械加工後サンドブラスト加工を施した伝熱面である。

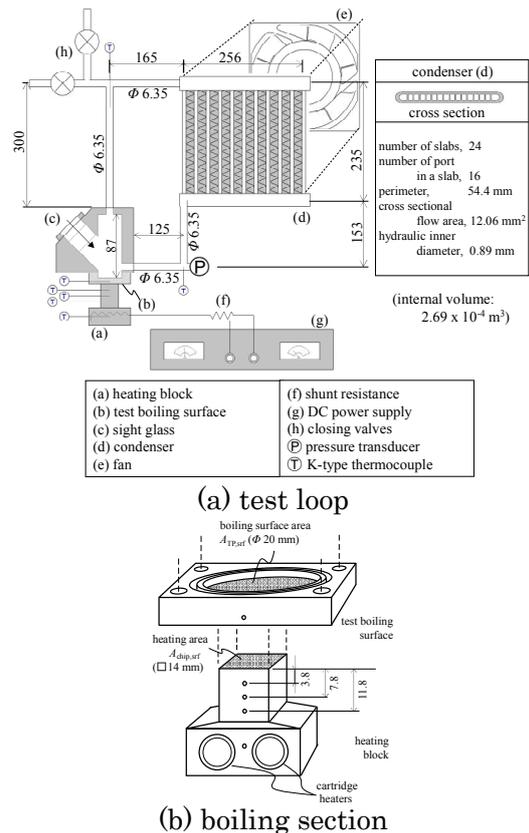


Fig. 1 Experimental apparatus

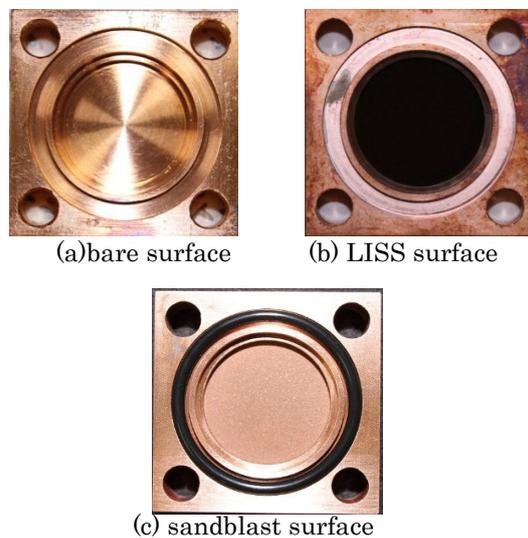
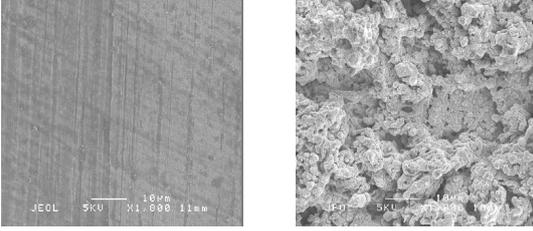


Fig. 2 Test boiling surfaces

図 3 (a) は非加工面、図 3 (b) は超親水面伝熱面の大気圧下における純水に対する接触角測定時の写真である。接触角は、接触角測定装置（協和界面科学（株）製 Drop Master500）を使用し、純水 0.05 ml を用いる液滴法で評価した。



(a) Bare surface (b) LISS surface
Fig.3 Contact angle with pure water.



(a) bare (x1800) (b)LISS surface (x1800)
Fig. 4 SEM images

図4 (a)は、非加工面、図4 (b)は、超親水面伝熱面拡大倍率 1800 倍の SEM 画像である。表 1 に加熱ブロック、試験沸騰伝熱面の寸法および性状を示す。試験伝熱面は銅製で、沸騰伝熱面積 $A_{TP,srf}$ は 314 mm^2 ($\phi 20$)、加熱ブロックとの接触面積 A_{chip} は 196 mm^2 ($\square 14$)であり、面積拡大率が 1.6 となっている。また、表 2 に実験条件および作動流体の熱物性を示す。

(3) データ整理方法

CPU からの熱負荷 (熱流束) を模擬する加熱ブロックからの熱流束 q_{chip} は、加熱ブロック上部の直方部分で一次元熱伝導が成り立つと仮定し、式(1)より求められる。

$$q_{chip} = -\lambda_{HB} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{HB} \quad (1)$$

$$\lambda_{HB} = 401 - 0.645(\bar{T}_{HB} + 273.15) \text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (2)$$

ここに、 $(dT/dx)_{HB}$ は加熱ブロック角柱部 3 点で測定された温度から最小二乗法により決定される加熱ブロック内温度勾配である。除熱性能の評価には、熱抵抗 R_{sys} を用いる。

$$R_{sys} = (T_{chip} - T_{air}) / (q_{chip} \times A_{chip}) = R_{cond} + R_{boil} + R_{TP} + R_{cont}$$

$$\begin{cases} R_{cond} = (T_{sat} - T_{air}) / (q_{chip} \times A_{chip}) \\ R_{boil} = (T_{TP,srf} - T_{sat}) / (q_{chip} \times A_{chip}) \\ R_{TP} = (T_{TP,btm} - T_{TP,srf}) / (q_{chip} \times A_{chip}) \\ R_{cont} = (T_{chip} - T_{TP,btm}) / (q_{chip} \times A_{chip}) \\ = 0.0714 \text{ [KW}^{-1}] \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 R_{cond} 、 R_{boil} 、 R_{TP} 、 R_{cont} はそれぞれ、凝縮器、沸騰面、試験伝熱面内熱伝導、試験伝熱面と加熱ブロックとの接触による熱抵抗である。接触熱抵抗 R_{cont} は試験片着脱の度に 0.026 KW^{-1} から 0.092 KW^{-1} のばらつきを示したため、本報告では一律 0.0714 KW^{-1} と仮定し作動流体および伝熱面の効果を評価する。

4. 研究成果

(1) 作動流体の効果

図 5 に、沸騰曲線の測定結果を示す。縦軸の熱流束 $q_{TP,srf}$ は沸騰伝熱面 $A_{TP,srf}$ に基づく値である。同熱流束条件において、水の壁面過

Table 1 Specification of the heating block and the test boiling surface.

surface	bare	super-hydrophilic	sandblast
material	oxygen free copper (Cu > 99.6%)		
thickness [mm]	5.2		
boiling area [mm ²]	314 ($\phi 20$)		
heating area [mm ²]	196 ($\square 14$)		
arithmetic mean roughness [μm]	0.07	0.93	3.52
contact angle with water [°]	90.3	3.2	-

Table 2 Experimental conditions and fluid information.

working fluid	water	R134a	R1234ze(E)	R1234ze(Z)
boiling surface	bare	bare, s-hydrophilic	bare, s-hydrophilic, sandblast	bare, s-hydrophilic
filling ratio ξ [%]	25 ~ 60			
facing air velocity [m s^{-1}]	0.5 ~ 4.0			
heat flux [kW m^{-2}]	20 ~ 1500			
ambient temperature [°C]	20			
pressure [MPa]	0.005 ~ 0.01	0.55 ~ 0.70	0.17 ~ 0.20	0.42 ~ 0.53
GWP ₁₀₀ [-] (Myhre et al., 2013)	-	1300	< 1	< 1
critical pressure [MPa]	22.06	4.06	3.63	3.53
critical temperature [°C]	373.95	101.06	109.36	150.12
surface tension [mN m^{-1}] (at 30 °C)	71.2	7.4	8.2	12.2
latent heat of vaporization [kJ kg^{-1}] (at 30 °C)	2430	173	163	203
density (liquid / vapor) [kg m^{-3}] (at 30 °C)	0.03 / 996	38 / 1187	31 / 1146	10 / 1208
liquid viscosity [mPa s]	0.80	0.18	0.19	0.28

熱度は R134a, R1234ze(E) と R1234ze(Z) に比して著しく高い。一方, R134a が最も低く次いで R1234ze(E), R1234ze(Z) の順に低い。図中矢印で示すのは, Kandlikar(2001) と Zuber(1961) の式による CHF (限界熱流束) の値である。予測された CHF を超過した辺りから実験で得られた R134a, R1234ze(E) および R1234ze(Z) の沸騰曲線の傾きは段階的に緩やかとなる。また, 限界熱流束の値が予測値に比して大きく向上している。R1234ze(E) では, 予測結果よりもかなり高い 800 kWm^{-2} 付近で緩やかな壁面過熱度の上昇がみられる。また, R1234ze(Z) では, 熱流束 740 kWm^{-2} 付近において膜沸騰遷移開始と見られる比較的明確な壁面過熱度上昇が見られるものの, この値はプール沸騰の予測値よりも 280 kWm^{-2} 程高い。

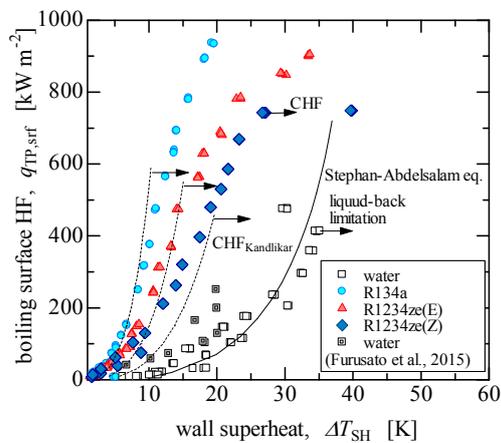
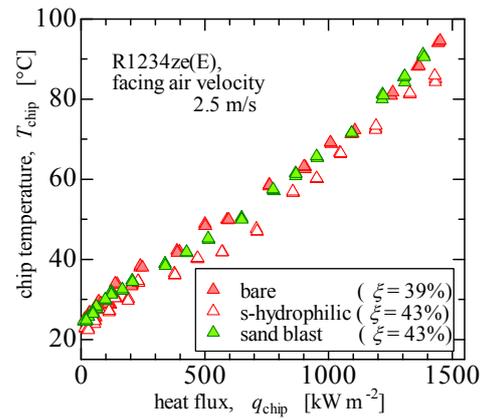


Fig. 5 Boiling curves of tested working fluids

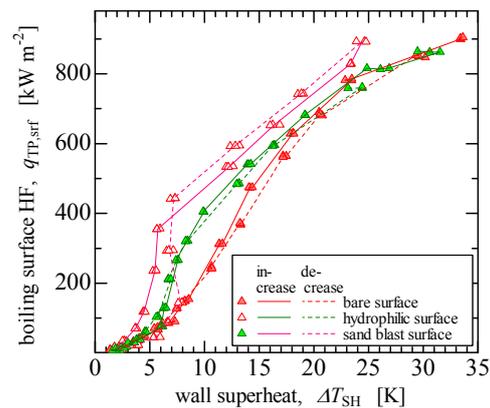
(2) 沸騰面表面粗さと親水性の効果

図 6 に, 沸騰面表面粗さと超親水性の効果を確認するための測定結果を示す。非加工面, 超親水面, およびブラスト面を用いた場合の CPU 表面温度と沸騰曲線について, 作動流体は R1234ze(E), ファン平均風速は 2.5 ms^{-1} の条件で, 比較を行う。図 6 (a) に, CPU (加熱ブロック) 表面温度を示す。R1234ze(E) の加熱ブロック表面温度が $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ に達する熱流束は, 非加工面と超親水面でそれぞれ, 1250 kWm^{-2} および 1350 kWm^{-2} と, 約 100 kWm^{-2} 増加した。このことから, 超親水面の採用は, CPU 安全動作範囲を拡張する手段として有効であることが確認できる。また, 非加工面とブラスト面ではほぼ同等の熱流束 1250 kWm^{-2} で $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ に達する。ブラスト面では, CPU 安全動作範囲を拡張する手段としては大きな効果が期待できない。図 6 (b) に, 沸騰曲線を示す。沸騰面熱流束 700 kWm^{-2} 以下における壁面過熱度は, 超親水面が最も低く, 次いでブラスト面, 非加工面の順に低いが, 熱流束 700 kWm^{-2} 以上では, 非加工面とブラスト面の壁面過熱度に差が無くなる。このこ

とから, 低熱流束域ではブラスト面に多く存在するキャビティが有効に核沸騰を促進するものの, 高熱流束域ではむしろ沸騰面上の液供給が支配的要因となるために非加工面との差異がなくなるものと考えられる。一方, LISS で製作された超親水面は沸騰面表面粗さと親水性の両方を持ち合わせていることから, 低熱流束域では高い核沸騰熱伝達率と, 高熱流束域ではウィッキング効果 (毛管作用) による CHF の拡張が可能となる。



(a) chip temperature



(b) boiling curve

Fig. 6 Enhancement of heat dissipation performance by using the LISS (super-hydrophilic) and sand blast surfaces.

図 7 は, 熱流束 750 kWm^{-2} における, 水, R134a, R1234ze(E) および R1234ze(Z) の熱抵抗の内訳である。縦軸は各熱抵抗を示しており, 上から順に凝縮器熱抵抗, 沸騰熱抵抗, 試験沸騰面熱伝導熱抵抗, 接触熱抵抗である。非加工面およびブラスト面においては, 熱抵抗の大部分を沸騰熱抵抗 R_{boil} が占めている。一方, いずれの条件においても R_{boil} に比して凝縮器熱抵抗 R_{cond} が小さいのは, 十分な凝縮器伝熱面積を確保することが出来ているためである。また, R_{TP} は試験伝熱面の素材に依るため, 流体に依存せずほぼ一定であり, 全体の 20% 程度を占める。接触熱抵抗 R_{cont} は一律 0.0714 KW^{-1} としたが, 全体の 30% 程

度であることから軽視は出来ない。 高压作動流体を使用することにより R_{boil} が大きく低減し、このことにより水よりもシステム熱抵抗を著しく低減できる。 さらに、超親水面の採用により R_{boil} が低減することで、高压作動流体のシステム熱抵抗を低減できることが分かる。 また超親水面採用による R_{boil} の低減度合いは、R134a, R1234ze(E)および R1234ze(Z) を使用した場合で、それぞれ 0.04 KW^{-1} , 0.05 KW^{-1} , および 0.1 KW^{-1} であり、R1234ze(Z) は R134a, R1234ze(E)に比して 2 倍以上の低減度合いを示している。 しかし一方で、R1234ze(E)の凝縮熱抵抗 R_{cond} が減少しているのに対し、R1234ze(Z)での R_{cond} の減少が小さいため、全熱抵抗は R1234ze(Z)の方が高い結果となった。

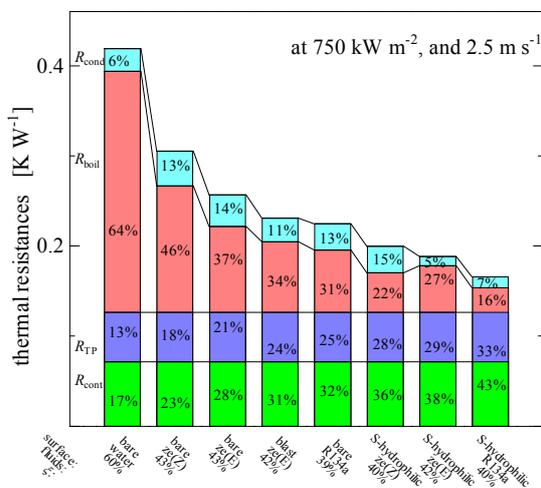


Fig. 7 Breakdown of thermal resistance.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 近藤智恵子, 梅本翔平, 小山繁, 水戸岡豊, レーザ加工により親媒性を付与した銅製沸騰伝熱面を用いる自然循環式電子機器用冷却器, 銅と銅合金 第 56 巻 印刷中. (査読有)
- ② Kondou, C., Umemoto, S., Koyama, S., Mitooka, Y., “Improving the heat dissipation performance of a looped thermosyphon using low-GWP volatile fluids R1234ze(Z) and R1234ze(E) with a super-hydrophilic boiling surface”, Applied Thermal Engineering, 118, 147-158 (May.2017). (査読有)
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.02.073
- ③ 近藤智恵子, 梅本翔平, 小山繁, 水戸岡豊, 低沸点低 GWP 作動流体を用いる相変化型電子冷却機器の親水性沸騰面による性能向上, 日本機械学会論文集, 83 (848) p.16-00474 (2017 年 3 月) (査読有)
DOI:10.1299/transjsme.16-00474

[学会発表] (計 8 件)

- ① Kondou, C., Umemoto, S., Koyama, S., Mitooka, Y., “A Thermosyphon Having Super-hydrophilic Boiling Surface using R1234ze(E) and R1234ze(Z) for Electronic Devices”, Proc. 1st Asian Conference on Thermal Sciences, Jeju, Korea, ACTS-P00250, Mar. 26-30, 2017.
- ② Kondou, C., Umemoto, S., Watanabe, K., Matsuzono, T., Koyama, S., Mitooka, Y., “Heat Dissipation of Passive Two-Phase Cooling Using Low-GWP Refrigerant R1234ze(E) and Super-Hydrophilic Surface for Electronic Devices” Proc. 4th Int. Forum on Heat Transfer IFHT2016, no. IFHT2016-1852, 1-6, Sendai International Center, Miyagi, Sendai, Nov. 2-4, 2016.
- ③ Umemoto, S., Kondou, C., Koyama, S., Hayashida, M., Mitooka, Y., “Utilizing refrigerants in passive two-phase cooling for electronic devices”, Proc. the 8th Asian Conf. Refrig. Air Conditioning, no. ACRA2016-068, Taipei, Taiwan, May 15-17, 2016.
- ④ 近藤智恵子, 梅本翔平, 小山繁, 水戸岡豊, 短パルスレーザー加工を施した銅製超親水伝熱面を用いる電子機器用沸騰冷却器, 日本銅学会第 56 回講演大会, 東海大学高輪キャンパス, 東京, 港区, 121-122 (2016 年 10 月 29-30 日).
- ⑤ 渡邊耕介, 梅本翔平, 近藤智恵子, 小山繁, 水戸岡豊, 低沸点作動流体と超親水沸騰面を有する電子機器冷却デバイス, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, 九州大学伊都キャンパス, 福岡, 福岡 (2016 年 9 月 11-14 日).
- ⑥ 梅本翔平, 合田彬人, 近藤智恵子, 小山繁, 水戸岡豊, 低 GWP 冷媒と超親水沸騰面を有する電子機器冷却デバイス, 2016 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, no. A353, 神戸大学六甲第二キャンパス, 兵庫, 神戸 (2016 年 9 月 6-9 日).
- ⑦ 梅本翔平, 近藤智恵子, 小山繁, 水戸岡豊, 超親水沸騰面と冷媒を用いる自然循環式相変化型電子機器冷却器, 第 53 回日本伝熱シンポジウム, Paper no. C134, 1-6, グランキューブ大阪, 大阪, 大阪 (2016 年 5 月 24-26 日).
- ⑧ 梅本翔平, 近藤智恵子, 小山繁, 水戸岡豊, 超親水沸騰面を有する電子機器冷却デバイス-作動流体としての低 GWP 冷媒の有効性, 第 50 回空気調和・冷凍連合講演会, 講演番号 4, 1-4, 東京海洋大学 85 周年記念会館, 東京, 江東区 (2016 年 4 月 13-15 日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 智恵子 (KONDOU, Chieko)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50752870