

次世代 AI データセンターの相変化冷却に新展開 — 流動沸騰から自己吸引沸騰へ —

本研究成果のポイント

- ◆ 生成 AI の普及に伴う AI 半導体（GPU 等）の高発熱化により、液体の蒸発潜熱を利用する「相変化冷却（沸騰冷却）」への期待が高まっています。
- ◆ 研究グループは外部ポンプを用いず、拡張流路内で膨張する気泡と表面張力が生む局所的な低圧を利用し、多孔質層を通して液体を自律的に吸引する「自己吸引沸騰」を考案・実証しました。
- ◆ これまでのポンプ駆動型（流動沸騰）の研究成果を発展させ、最適構造で最大熱伝達率 8.6 倍、限界熱流束 3.3 倍を達成しました。
- ◆ 下向き加熱面でも自己吸引による伝熱促進が機能することを国内講演会で報告しており、今後は姿勢依存性の解明と応用展開を進めます。

概要

生成 AI の普及に伴い、AI 半導体とデータセンターの高発熱化が進み、沸騰の潜熱を利用する相変化冷却への期待が高まっています。福井大学の研究グループはこれまで、放射状拡張流路を共通基盤として、ポンプ駆動の流動沸騰における流動安定化、入口二相流、3D 給液、複数熱源の直列・並列冷却を段階的に実証してきました[1-5]。今回、その一連の研究を「流動沸騰から自己吸引沸騰へ」と発展させました。拡張流路内で気泡が膨張すると、表面張力に伴う圧力差によって局所的な低圧領域が生じ、液体が多孔質層を通して加熱面へ吸引されます。最適構造では最大熱伝達率 8.6 倍、限界熱流束 3.3 倍を達成しました。また、下向き加熱面でも自己吸引による伝熱促進が機能することを国内講演会で報告しており、今後は姿勢依存性の解明と応用展開を進めます。

〈研究の背景と経緯〉

生成 AI を支える高性能 GPU などの AI 半導体では、限られた面積から大量の熱を除去する必要があり、次世代データセンターでは冷却性能が計算性能、消費電力、信頼性を左右します。液体が蒸気へ変化するときの潜熱を利用する相変化冷却（沸騰冷却）は、高熱流束を小さな温度差で除去できる有力な方法です。しかし実装には、単に高い熱伝達率を得るだけでなく、微細流路内の気泡による逆流や流量偏りを抑えること、局所的な乾きを防ぐこと、複数の発熱源を安定して冷却すること、さらにポンプ動力やシステムの複雑さを抑えることが求められます。

研究グループは、中心から外周へ流路幅が広がる「放射状拡張流路」を共通基盤として、これらの課題に段階的に取り組んできました。まず、低流動慣性条件でも気泡の逆流を抑え、安定した流動沸騰を維持できることを示しました[1]。次に、入口がすでに二相流となる条件でも安定した熱輸送が可能であることを実証しました[2]。ICT 機器を対象とした高熱流束冷却では、流路の cut-off・gap 構造によって蒸気排出と液膜維持を改善しました[3]。さらに、多孔質銅を用いた 3D 給液機構により、流路上方から液体を供給して局所ドライアウトを抑制しました[4]。最近では、複数熱源を想定した冷却器の直列・並列接続を実験し、システム化に向けた安定性を検証しています[5]。

ここまでの研究は、外部ポンプで冷却液を送り込む「流動沸騰」を高性能化・安定化する研究でした。今回の最新成果では、その拡張流路を、単なる冷媒の通り道ではなく、気泡の膨張と表面張力に伴う圧力差によって局所的な低圧領域を形成し、多孔質層から液体を吸引する構造として利用しました。すなわち、外部から流れを与える「流動沸騰」から、沸騰そのものが液体供給の駆動力を生み出す「自己吸引沸騰」へ発展させることが研究の狙いです。

〈研究の内容〉

今回の複合沸騰面では、放射状拡張マイクロチャネルの上に多孔質銅フォームを配置しました。従来の流動沸騰では拡張流路へポンプで冷却液を供給していましたが、今回は外部流量を与えません。多孔質層が気泡の自由な鉛直成長を抑えることで、気泡は拡張流路内で外周方向へ膨張します。このとき、気液界面の曲率差に由来する表面張力の効果によって流路内に局所的な低圧領域が形成され、その圧力差が駆動力となって、液体が多孔質層を通して加熱面へ吸引されます。同時に、膨張した蒸気は拡張流路の広い出口側へ導かれます。研究グループは、この「気泡膨張→低圧領域の形成→多孔質層からの液体吸引→方向性を持った蒸気排出」が外部ポンプなしで繰り返される機構を「自己吸引沸騰（self-pumping boiling）」（注 1）と呼んでいます。重要なのは、液体吸引の主因が気泡排出時の不安定な圧力変動ではなく、拡張流路内での気泡膨張と表面張力に伴って形成される圧力場である点です。

純水を用いた大気圧付近での実験では、多孔質層の細孔密度と厚さを変えて性能を比較しました。その結果、20 PPI（注 2）、厚さ 1 mm の銅フォームを用いた構造が最も高い性能を示し、最大熱伝達率（注 3）は約 $45 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ に達しました。これは平滑な銅表面の約 8.6 倍です。また、限界熱流束（注 4）は平滑面の約 3.3 倍となり、約 $400 \text{ W}/\text{cm}^2$ の高い熱流束でも高い熱伝達性能を維持しました。

高速度カメラによる観察では、蒸気領域が放射状流路に沿って外側へ伸びる様子と、加熱面近傍への液体再供給が確認されました。一方、細孔が細かすぎる場合や多孔質層が厚すぎる場合には、蒸気移動と液体吸引の流動抵抗が増え、性能が低下しました。これらの結果は、自己吸引沸騰では、気泡の拘束、蒸気の通りやすさ、液体保持量、多孔質層を通した液体吸引抵抗のバランスが重要であることを示しています。局所的な低圧領域と多孔質層内の吸引流量の直接計測・可視化は次段階の課題であり、現在その検証を進めています。

〈今後の展開〉

本論文は、AI データセンター向け相変化冷却の一連の研究において、「流動沸騰から自己吸引沸騰へ」と進む転換点に位置づけられます。これまでの研究では、ポンプ駆動の流動沸騰を安定化し、3D 給液や複数熱源への拡張を進めてきました。今回、拡張流路と多孔質層を組み合わせ、気泡膨張と表面張力に伴う局所的な低圧を液体吸引の駆動力として利用する新しい自己吸引機構を提案し、上向き加熱面で高い伝熱性能を示しました。

さらに、本機構は下向き加熱面においても自己吸引による伝熱促進が機能することを国内講演会で報告しており（現在、詳細をジャーナル論文として投稿準備中）、姿勢依存性の解明を進めています。本機構は、拡張流路内での気泡膨張と表面張力に伴う圧力差を液体吸引の駆動力とするため、通常の浮力支配とは異なる新たな伝熱メカニズムとして、下向き等を含むあらゆる姿勢での機能が期待されます。今後は、姿勢依存性を統一的に説明する物理モデルの構築や、局所低圧と多孔質層を通る液体吸引の直接可視化・定量化、流路形状と吸引性能の関係、気泡挙動と伝熱機構の解明を順次進めます。さらに、実用的な作動流体や冷却システムへの展開を進め、次世代 AI データセンターの高熱流束冷却に加え、加熱面が下向きとなる機器や、将来的には微小重力環境・宇宙機器など、重力に依存しにくい熱制御技術への応用を目指します。

〈参考図〉

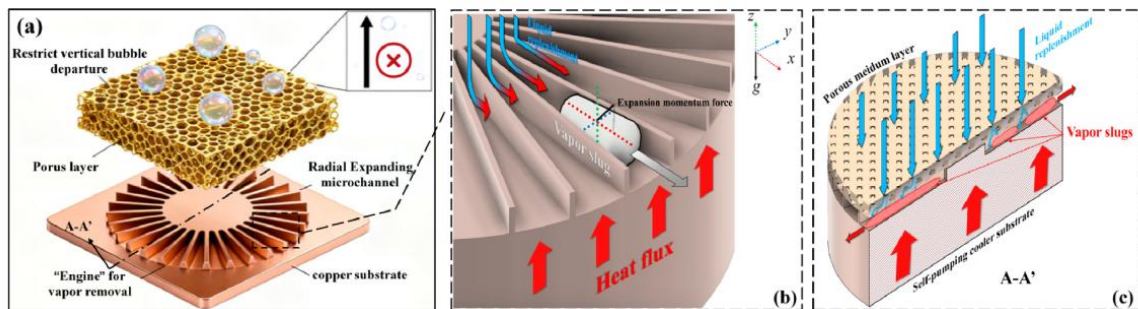


図 1：自己吸引沸騰の作動概念。気泡が拡張流路内で膨張すると、表面張力に伴う圧力差によって局所的な低圧領域が形成され、液体が多孔質層を通して加熱面へ吸引される。同時に、蒸気は拡張流路に沿って外周へ導かれる。

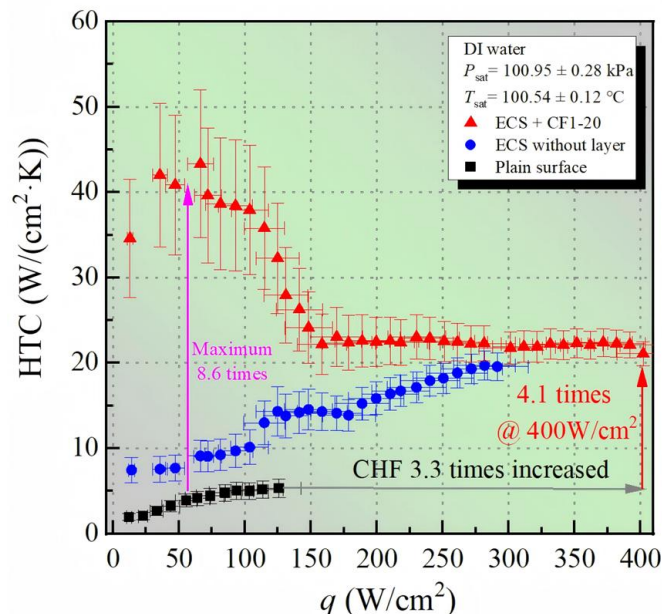


図 2：平滑銅面、拡張流路のみ、自己吸引構造の熱伝達性能比較。自己吸引構造では最大熱伝達率 8.6 倍、限界熱流束 3.3 倍を確認した。

出典：S. Yang et al., International Journal of Heat and Mass Transfer 272 (2027) 129566 (CC BY-NC)

〈用語解説〉

〔注 1〕 自己吸引沸騰 (self-pumping boiling)

外部ポンプを用いず、拡張流路内で気泡が膨張する際に、気液界面の曲率差に由来する表面張力の効果で局所的な低圧領域を形成し、その圧力差を駆動力として多孔質層から液体を加熱面へ吸引する沸騰・伝熱機構。気泡排出時の流動不安定による一時的な吸引を主機構とするものではありません。

〔注 2〕 PPI (Pores Per Inch)

多孔質材料の細孔密度を表す指標で、1 インチあたりのおおよその細孔数を示します。一般に PPI が大きいほど細孔は細くなります。

〔注 3〕 熱伝達率 (HTC : Heat Transfer Coefficient)

加熱面と冷却液の温度差 1 度あたり、単位面積からどれだけの熱を移動できるかを表す値です。値が大きいほど、小さな温度差で多くの熱を除去できます。

〔注 4〕 限界熱流束 (CHF : Critical Heat Flux)

沸騰冷却で安定して除去できる熱流束の上限です。この値を超えると加熱面が蒸気で覆われやすくなり、表面温度が急激に上昇します。

〈論文タイトル〉

“Self-pumping boiling mechanism bridging passive and active cooling performance”

(日本語タイトル : 「受動冷却と能動冷却の性能を橋渡しする自己吸引沸騰機構」)

〈著者〉

英語表記

Shaobo Yang, Sihui Hong*, Chaobin Dang*

所属・職名

楊 少博 (Shaobo Yang) (東京大学大学院新領域創成科学研究科)

洪 思慧 (Sihui Hong) (浙江大学 電気工学院 研究員・博士課程指導教員)

党 超鋌 (Chaobin Dang) (福井大学 学術研究院工学系部門 教授)

*責任著者

〈発表雑誌〉

雑誌名「International Journal of Heat and Mass Transfer」(インターナショナル・ジャーナル・オブ・ヒート・アンド・マス・トランスファー)

巻 : 272 (2027) 、論文番号 : 129566

受理 : 2026 年 9 月 10 日 / オンライン公開 : 2026 年 9 月 13 日

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.129566>

本論文はオープンアクセス (CC BY-NC) で公開されています。

〈研究支援〉

日本学術振興会 科学研究費助成事業 (25K07616、20K04320、16K06109) 、公益財団法人 JKA (2023M-372、2020M-118) 、JST SPRING (JPMJSP2108) 、National Natural Science Foundation of China (52406202) 、Amano Institute of Technology (J24-763) 、TAKEUCHI Scholarship、Suzuken Memorial Foundation

〈関連する主な参考文献〉

- [1] 低流動慣性・流動安定化 : S. Hong, C. Dang, E. Hihara, “Experimental investigation on flow boiling in radial expanding minichannel heat sinks applied for low flow inertia condition,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 143 (2019) 118588. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118588
- [2] 入口二相流 : S. Hong, C. Dang, E. Hihara, “Experimental investigation on flow boiling characteristics of radial expanding minichannel heat sinks applied for two-phase flow inlet,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 151 (2020) 119316. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119316
- [3] ICT 機器・高熱流束 : S. Hong, C. Dang, E. Hihara, H. Sakamoto, M. Wada, “Improved two-phase flow boiling in a minichannel heat sink for thermal management of information and communication technology (ICT) equipment,” Applied Thermal Engineering, 181 (2020) 115957. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115957
- [4] 3D 給液 : S. Hong, C. Dang, E. Hihara, “A 3D inlet distributor employing copper foam for liquid replenishment and heat transfer enhancement in microchannel heat sinks,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 157 (2020) 119934. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119934
- [5] 多熱源・直列／並列接続 : S. Hong, C. Li, C. Dang, M. Song, H. Sakamoto, “Experimental research on cooling performances of radial expanding-channeled heat sinks applied for multiple heat sources,” Applied Thermal Engineering, 237 (2024) 121789. doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.121789