

補助事業番号 2021M-180  
 補助事業名 2021年度高時空分解熱イメージングによる滴状凝縮の動的熱伝達特性の解明  
 補助事業  
 補助事業者名 九州大学 喜多由拓

## 1 研究の概要

滴状凝縮は、50年以上も前から高効率な熱輸送特性を持つ事が知られているが、一般性のある理論式や整理式がなく、工学的に実現されていない。理由は、凝縮核生成→液滴成長・合体→離脱という滴状凝縮サイクルにおける局所かつ非定常の熱輸送現象がこれまで未知であったからである。本研究では感温塗料を用いた、安価かつ**高空間・時間・温度分解能を両立した熱計測システムを開発し、滴状凝縮における局所非定常伝熱特性を実験的に明らかにする**。将来的には、実験事実から滴状凝縮熱伝達の理論を完成させ、最適な滴状凝縮サイクルを実現する伝熱面の創成に繋げる。

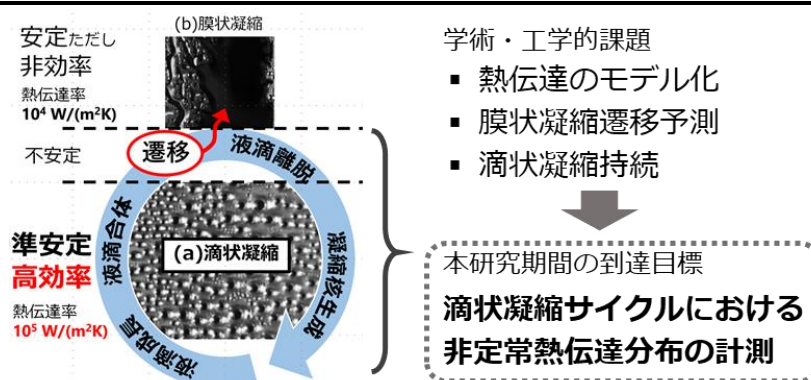


図1 本研究の全体構想

## 2 研究の目的と背景

気液相変化現象(沸騰・凝縮)は、潜熱により小さい温度差で大量の熱を輸送できる最も効率の良い伝熱機構の一つであるため、様々なエネルギー機器および電子機器冷却で積極的に利用されている。歴史のある沸騰伝熱研究に対して凝縮に関する研究はそれほど進んでおらず、多くの「伝熱工学」の教科書でも凝縮に関する頁数は沸騰のその半以下である。凝縮は蒸気が伝熱面上で冷やされて液体となる状態変化であるが、一般に以下の二つのモードに大別される：

(a) **滴状凝縮**: 伝熱面上に凝縮液滴が分布するモード(熱伝達率 $\sim 10^5$  W/(m<sup>2</sup>K))

(b) **膜状凝縮**: 伝熱面が凝縮液膜に覆われるモード(熱伝達率 $\sim 10^4$  W/(m<sup>2</sup>K))

熱輸送効率の高い(a)モードは凝縮開始初期によくみられるが、時間の経過とともに周囲の凝縮液滴同士が成長・合体を繰り返して最終的に(b)に移行してしまう。**エネルギーの高効率利用には(a)を利用することがカギ**になるが、その現象の複雑さから熱伝達率はおろか(b)への遷移予測も不可能である。そのため、(a)モードを利用することは半ば諦められ、機器の小型化・高効率化にとって最大のボトルネックとなっている。

そこで、本研究は「滴状凝縮で見られる凝縮核生成→液滴成長・合体→離脱のサイクルに伴う局所の非定常熱現象を明らか」にし、「理想的な滴状凝縮サイクルを持続可能な伝熱面を創出」することを最終目的としている。これに先駆け、本事業期間内では「高い空間・時間・温度分解能を両立した熱計測技術を開発」し、「滴状凝縮における非定常熱伝達分布の初実測」を行う。

### 3 研究内容

#### (1) 温度・熱流束分布計測システムの開発

(<https://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~heat/research.html>)

本研究の核となる温度・熱流束分布計測システムの開発に取り組んだ。本研究では、可視光による温度測定を可能にする感温塗料(TSP)を用い、その計測原理およびノウハウを取得するための基礎実験を行った。その後、凝縮実験装置の設計・製作を行った(図2)。さらに本実験装置専用の伝熱面構造を検討し、試作を行った。この伝熱面はTSP、金属膜および接着剤の複層構造のため、この成膜方法や膜厚などの諸条件の最適化は本事業を通して行われた。TSPから放たれる光信号を温度に変換するための校正方法の検討およびPythonを用いた画像解析アルゴリズムの開発を行った。

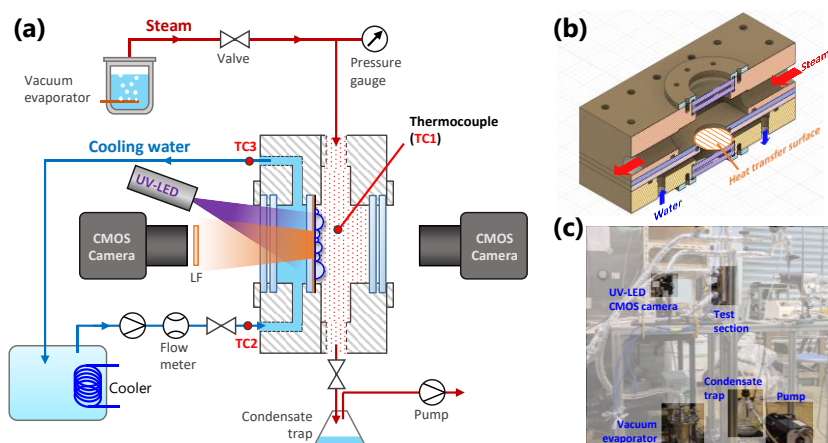


図2 (a) 実験装置の概略図. (b) テストセクションの3Dモデル. (c) 装置外観.

#### (2) 滴状凝縮熱伝達の実計測

(<https://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~heat/research.html>)

(1)で確立した計測技術を用いて、実際に凝縮伝熱試験を行った。試験条件は、系圧力6.3 kPa (飽和温度は37.1 °C)であり、冷却水(入口温度4.7°C)の流量は1.85 L/minとした。結果として出口温度は5.8°Cとなった。図3(a)に蒸気側から撮影した凝縮液滴の画像を示す。本実験範囲では滴状凝縮が維持されていることが分かり、液滴が成長・合体により大きくなると、重力により流れ落ち、その後無数の小さな液滴が発生し、再度成長・合体を繰り返す挙動が確認された。この凝縮挙動に伴う温度分布の時間変化ならびに計算された熱流束分布をそれぞれ図3(b)および(c)に示す。大きな液滴が存在する位置では温度が低下しており、熱流束も周囲に比べて小さいことが

分かる。これは凝縮液滴が熱抵抗として作用しており、蒸気からの伝熱が阻害されていることが分かる。一方で液滴が流れ落ちた後は、伝熱面と蒸気の直接接触が再開されるため、蒸気からの熱が効率よく伝わり、結果として伝熱面温度の上昇ならびに熱流束の増加が見られた。これらの熱挙動は概念としては理解されていたが、実測により確認された例はこれまでになく、本実験データは貴学術的に価値の高いものである。現状では直径1.2 mm以上の液滴は温度分布からも識別可能であったが、今後、基板構造ならびに実験条件を最適化することでより微小かつ高速な現象を捉えることを目指す。

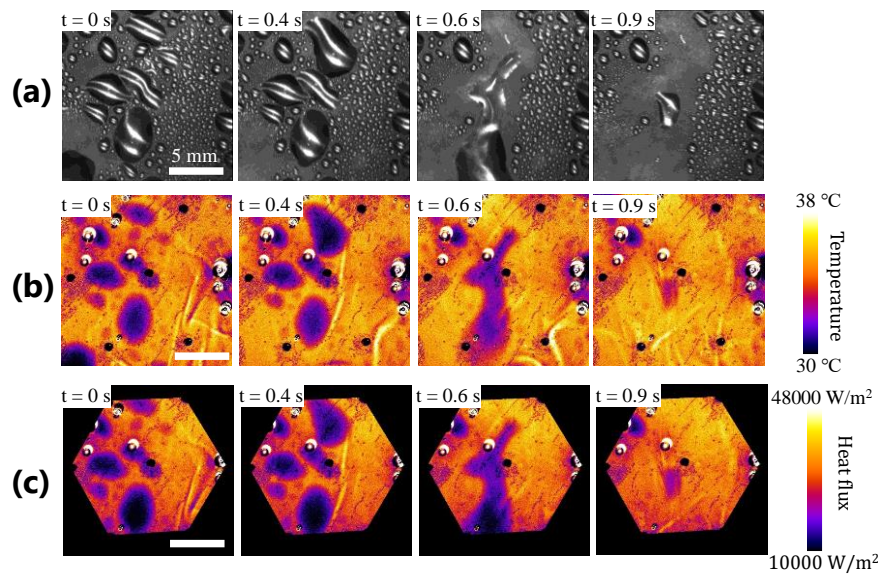


図3 (a) 液滴画像. (b) 温度分布. (c) 熱流束分布.

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究は、これまで発展を半ば諦められていた凝縮伝熱分野に新しいアプローチと知見を吹き込むものであり、熱工学コミュニティに本分野の重要性を再認識させるものであることから学術的価値も高い。また、詳細な滴状凝縮の物理的メカニズムが明らかになることで、材料や表面科学とのコラボレーションを通して滴状凝縮を持続・促進させるような伝熱面の開発方針を立てることが可能になる。試算によれば、滴状凝縮伝熱面の実現により凝縮器全体の熱抵抗を半減させることができ、発電所および空調機器におけるエネルギー効率の飛躍的向上が期待される。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者は熱工学の専門家であり、2019年から九州大学工学研究院機械工学部門の熱流体物理研究室で、気液相変化を伴う熱輸送現象について研究を行うと共に、大学院および学部で熱工学関連科目の教育を行ってきた。事業者は、これまで液滴の蒸発に伴う熱流動現象を研究対象とし、赤外線サーモグラフィを用いた計測を得意としてきた。本研究で対象とする滴状凝縮は

蒸発の逆過程であるが、前述の通り詳細な計測はできていなかった。本研究は、事業者の得意とする熱流動可視化に関するノウハウを活かし、滴状凝縮に適用可能な新たな計測法を確立させ、これまで停滞していた凝縮研究の再加速を試みるものである。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

K. Matsushima, T. Uchimura, N. Sakoda, and Y. Kita, Local and Transient Heat Transfer Measurement for Dropwise Condensation Using Temperature Sensitive Paints, Proceedings of the 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 7-10 August 2022, Tokyo, Japan (投稿済)

#### 7 補助事業に係る成果物

特になし。

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：九州大学(キュウシュウダイガク)

住 所：〒819-0395

福岡市西区元岡744

担 当 者：助教 喜多 由拓(キタ ユウタク)

担 当 部 署：大学院工学研究院 機械工学部門

(ダイガクインコウガクケンキュウイン キカイコウガクブモン)

E - m a i l : [kita@mech.kyushu-u.ac.jp](mailto:kita@mech.kyushu-u.ac.jp)

U R L : <http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~heat/>