

令和 6 年 5 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14194

研究課題名（和文）高時空間分解熱輸送場可視化による滴状凝縮の動的熱伝達特性の解明

研究課題名（英文）Understanding dynamic heat transfer characteristics of dropwise condensation using high-speed thermal visualization techniques

研究代表者

喜多 由拓 (Kita, Yutaku)

九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・客員助教

研究者番号：40840616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：エネルギーの高効率利用を底上げしうる凝縮伝熱の高度化に向けて、その基本的特性を解明すべく局所非定常熱伝達可視化手法を開発した。感温塗料を用いることで、研究実施者が知る限りでは初の凝縮における高解像度温度分布画像の取得に成功した。この画像から、様々な濡れ性を持った伝熱面上の液滴挙動に付随する伝熱現象を詳細に観察し、特に高熱伝達率を得られる「滴状」凝縮における伝熱メカニズムに迫ることが可能になった。実験範囲を広げることで、滴状凝縮を維持するための重要な伝熱面設計パラメータを特定することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相変化（沸騰・凝縮）を伴うエネルギーシステムにおいて、凝縮部は長年の間、エネルギー効率のボトルネックであった。凝縮には二つの形態（滴状、膜状）があり、滴状凝縮は高い熱伝達率を持つことは知られていたが、現象の複雑さから、伝熱量および低効率な膜状凝縮への遷移条件の予測が困難であった。そのため、現状は膜状凝縮を前提とした運用が行われている。本研究は、従来の凝縮研究に新たなアプローチを加え、滴状凝縮の物理機構解明に大きく寄与するものであり、学術的および工学的に価値の高いものである。

研究成果の概要（英文）：Towards the improvement of condensation heat transfer for efficient energy systems, a local and transient heat transfer visualisation technique has been developed. Using temperature sensitive paints (TSPs), thermographic images during condensation heat transfer have been obtained for the first time, to the best of our knowledge. This achievement enables to observe the behaviour of condensate droplets and accompanying heat transfer in detail, providing insight into the heat transfer mechanism of efficient "dropwise" condensation. This technique also allows us to identify the key design parameters for heat transfer surfaces that enable sustainable dropwise condensation.

研究分野：相変化伝熱

キーワード：伝熱 滴状凝縮 可視化 濡れ性 感温塗料

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気液相変化(蒸発・沸騰・凝縮)は、潜熱により小さい温度差で大量の熱エネルギーを輸送できるため、火力・原子力発電や廃熱回収等様々なエネルギー機器で積極的に利用されている。エネルギー損失を極限まで減少させるためには、相界面における熱輸送メカニズムを解明し、相変化伝熱面高性能化の方向を示すことが必要である。本研究では、気体から液体に相変化する「凝縮」に着目する。一般に凝縮現象は：

- (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 $\sim 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
- (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 $\sim 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

の二つのモードに大別される。(a) 滴状凝縮は、そのポテンシャルの高さから 50 年程前から理論・実験ともに研究が進められてきた。しかしながら、通常の伝熱面では凝縮液滴の離脱が効率的に行われず、滴状凝縮サイクルが崩れて容易に膜状凝縮に移行してしまう。このような問題から、滴状凝縮の実現は早くに諦められ、熱伝達特性の理解も 1980 年代からほとんど進んでいない。ところが近年、ナノ・マイクロスケール構造面を凝縮伝熱面に応用するような研究が現れ、凝縮液滴が微細構造の上を移動したり、伝熱面からジャンプしたりするなど滴状凝縮の持続の助けになる新たな物理が見いだされた。しかしながら、現段階では液滴挙動観察ばかりが行われており、これに連成するはずの伝熱現象については議論が十分に行われていない。

2. 研究の目的

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伝熱を明らかにし、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、これに先駆け本研究では、温度によって発光強度が変化する感温塗料(Temperature Sensitive Paint: TSP)を用いて、**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. 研究の方法

第一に、高速・高解像度の温度・熱流束分布計測システムを構築する。図 2(a)に TSP の計測原理を示す。TSP は紫外線(波長 $\sim 400 \text{ nm}$)により励起され、約 560 nm の燐光を放つ。この燐光をカメラで捉え、信号強度から TSP の温度を算出した。本実験で使用する伝熱面は金属薄板(チタン等)をサファイア基板に両面テープで貼り付けた構造であり、TSP-1 層と TSP-2 層の温度を境界条件としてテープ内の非定常熱伝導を解くことで、熱流束分布を算出した。

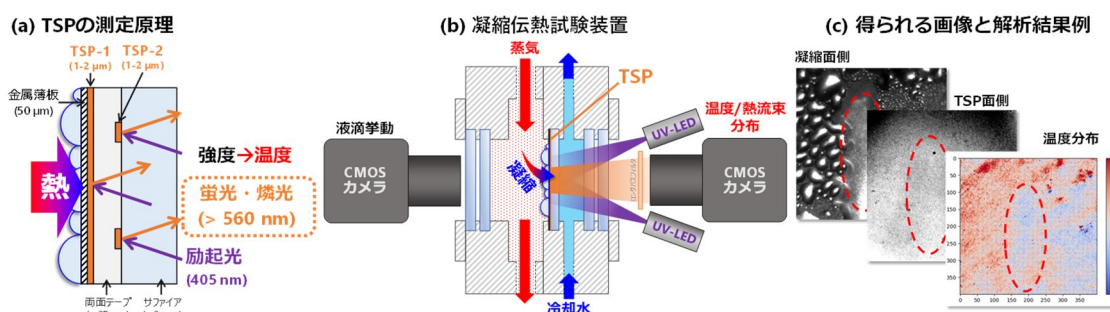


図 1: TSP を用いた凝縮伝熱試験の概要。

TSP 熱可視化システムを凝縮伝熱試験装置に組み込んだ構成を図 2(b)に示す。系圧力は、火力および原子力発電所の復水器の実機条件に即して、5–10 kPa とした。冷却水温度・流量を調整しながら過冷却度を数 K ~ 20 K 程度まで変化させて実験を行う予定であったが、本研究期間では、過冷却度 5 K 程度に留まった。

様々な濡れ性表面で実験を行った。具体的には、基板であるチタン裸面（静的接触角 $\theta \approx 80^\circ$ ，接触角ヒステリシス $\Delta\theta \approx 28^\circ$ ）に加え、撥水コーティング面（ダイキン工業製 OPTOOL， $\theta \approx 106^\circ$ ， $\Delta\theta \approx 28^\circ$ ），低接触角撥水コーティング面（産業技術総合研究所提供， $\theta \approx 36^\circ$ ， $\Delta\theta \approx 5^\circ$ ）およびプラズマ処理面（ $\theta \approx 0^\circ$ ）を用いた。

4. 研究成果

図 2 に一例として、撥水コーティングを施した基板上的凝縮様相（系圧力 6.2 kPa，飽和温度 36.9 °C，冷却水温度 10 °C，冷却水流量 6.5 L/min）と TSP の輝度から算出された温度分布の画像を示す。TSP の塗布条件，試料作成方法，凝縮実験装置の設計・製作に試行錯誤を重ねた結果，最終的には液滴の分布，挙動に付随した基板の温度分布の可視化に成功した。液滴が存在する位置では，液滴が熱抵抗となり，蒸気からの熱流入が妨げられるため，基板温度は低くなる。液滴が滑落した直後の表面は，蒸気との接触により急な熱流入が起きるため，急激な温度上昇が見られる。これは後の熱流束計算によって，滴状凝縮の高熱流束・高熱伝達率達成において重要なメカニズムであることが示唆されている。本研究期間中では，液滴径 1.2 mm 以上の液滴は温度分布として認識可能であった。それより小さい液滴による温度分布は，基板内の熱拡散によりぼやけてしまうが，液滴画像との比較によって従来の平均伝熱量による議論よりも詳細な検討が可能になった。また，本研究期間中では低過冷却度（5 K 以下）条件下のみの実験に留まった。従来の計測技術では，この範囲の実験データは一般に大きな不確かさを含む。しかしながら，研究ではこの低過冷却度条件でも明確な温度分布が可視化された。絶対値の精度に対するさらなる検証は必要であるが，本研究で開発した計測技術のロバスト性が示されたといえる。今後は広範な条件で実験を行い，最終目的である滴状凝縮の局所的非常伝熱機構の解明を目指す。

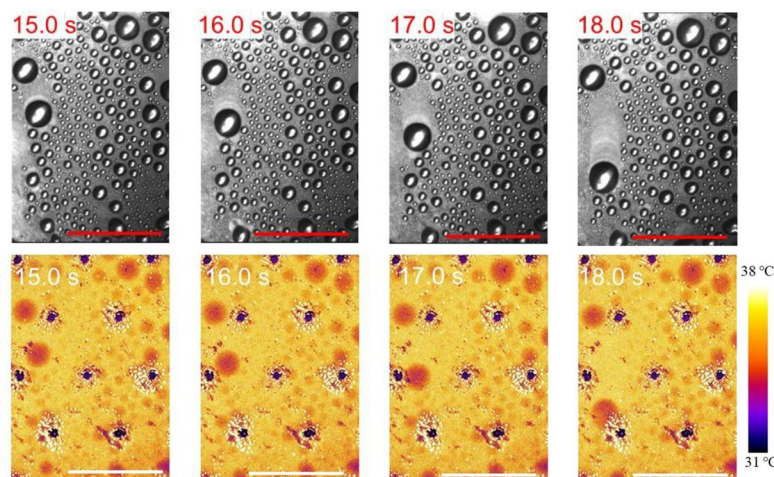


図 2: 凝縮面可視化画像（上面）および温度分布（仮面）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kohei Matsushima, Tomoya Uchimura, Naoya Sakoda, Yutaku Kita
2. 発表標題 Local and Transient Heat Transfer Measurement for Dropwise Condensation Using Temperature Sensitive Paints
3. 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaku Kita, Kohei Matsushima, Taiga Fukuoka
2. 発表標題 Thermal Imaging of Condensation Heat Transfer Using Temperature Sensitive Paints
3. 学会等名 The 11th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------