

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14904

研究課題名（和文）高熱流束除熱達成に向けた気泡合体が沸騰伝熱に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effect of Bubble Coalescence on Boiling Heat Transfer to Achieve High Heat Flux Heat Removal

研究代表者

諸隈 崇幸（Morokuma, Takayuki）

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：00756059

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、以下の2つの課題を通して、これまで構築してきた薄液膜の測定手法を用いて沸騰伝熱における気泡干渉の影響を明らかにした。沸騰気泡直下に形成される熱伝達の極めて良好な薄液膜の液膜の形成から消失までの過程を把握する。合体過程の気泡間液膜厚さ変化の精密測定を行い、気泡間液膜厚さ分布とその変化特性を明らかにする。その結果、気泡合体を伴う高熱流束条件下における伝熱面上の薄液膜の動的な挙動および蒸発過程の観察が出来た。また、気泡合体過程におけるバルク液温の影響を明らかにすることで、気泡合体時の気泡間液膜厚さの傾向を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、気泡合体を伴う高熱流束条件下における伝熱面上の薄液膜の動的な挙動および蒸発過程の観察が出来た。このことは、伝熱面への液の供給といった核沸騰伝熱の限界を明確にするために非常に重要な情報となる。また、気泡合体過程におけるバルク液温の影響を明らかにすることで、気泡合体時の気泡間液膜厚さの傾向を明らかにした。これは、気泡の合体という素過程の合体条件を明らかにする上で欠かせないデータとなる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we clarified the influence of bubble interference on boiling heat transfer by using the thin liquid film measurement method we have developed so far through the following two tasks. (1) To understand the process from the formation to the disappearance of a thin liquid film with extremely good heat transfer formed just below a boiling bubble. (2) Precise measurement of the thickness change of the liquid film between bubbles during the coalescence process is carried out to clarify the distribution of the thickness between bubbles and its change characteristics. As a result, the dynamic behavior of the thin liquid film on the heat transfer surface and the evaporation process under high heat flux conditions with bubble coalescence were observed. The influence of the bulk liquid temperature on the bubble coalescence process was clarified, and the trend of the liquid film thickness between bubbles during the bubble coalescence was also clarified.

研究分野：熱工学

キーワード：核沸騰 ミクロ液膜 気泡の合体 気泡間液膜厚さ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンピュータの発達に伴い、様々な熱流体現象について理論解析に加えて計算機を用いた数値シミュレーションによる現象の解析が可能になってきた。しかし、未だそれらの手法により解明されていない現象は多々あり、その中の一つに沸騰現象がある。沸騰は電子機器やデータセンタなどの熱機器の冷却をはじめ火力・原子力発電など様々な利用がなされている。沸騰伝熱の理論が確立することで機器の効率化や大幅な省エネルギー効果が期待でき、地球温暖化防止にも大いに貢献できる。沸騰の理論が確立されていない要因の一つとして、発生気泡の合体機構とその特性が明らかでないことが挙げられる。気泡に関する研究は従来多数行われてきたが、未だ普遍的な気泡の合体が生じる条件を明確に提示したものはない。沸騰気泡の合体が起こることで、伝熱面への液の供給を阻害し核沸騰伝熱の限界(限界熱流束, 以下 CHF)を招く一因となる。それゆえ、気泡の合体に及ぼす因子を明らかにし、気泡の合体条件を明確にすることは上記熱機器のみならず化学プラントや浄水槽などの混相流を扱う様々な場面での更なる技術向上や、気泡力学や混相流現象の学術的な発展に寄与するものとする。また、沸騰冷却技術向上のためには CHF の向上が必要となり、そのために高熱流束域での沸騰伝熱機構の詳細な把握が必須である。

2. 研究の目的

本研究では沸騰伝熱における高熱流束除熱の物理を解明することを目的として、これまで構築してきた薄液膜の測定手法を用いることで、①沸騰気泡直下に形成される熱伝達の極めて良好な薄膜の液膜(以下マイクロ液膜)の形成から消失までの詳細を把握し沸騰冷却機構を明確にする。②合体過程の気泡間液膜厚さ変化の精密測定を行い、気泡間液膜厚さ分布とその変化特性を明らかにする。上記 2 つのテーマから単一の気泡成長だけでなく気泡間の相互干渉の影響を明確にする。

3. 研究の方法

上記 2 つの課題を解決するために以下の研究計画に沿って研究を行った。そして、課題 1 を進めるに当たって、沸騰現象で最もよく利用される純水中の沸騰現象を最初の対象として、次に液体の物性が沸騰伝熱に及ぼす影響を明らかにする。また、課題 2 を進めるに当たって、沸騰で発生する蒸気泡を狙って同時に生成することは出来ないため、液中に対向に設置した管から気泡を発生させ、空気を供給し合体を起こして研究を進めた。

- 1-1 **マイクロ液膜厚さ測定：純水** 沸騰冷却限界時のマイクロ液膜消失過程およびその沸騰様相を明確にするため、レーザー干渉法で伝熱面に形成する薄膜の厚さ変化を高速度カメラで観測する。特に CHF に至る時間変化に着目し、どの部分から液膜がなくなって壁温が急上昇するのかを明確にする。
- 1-2 **マイクロ液膜厚さ測定：液体の変化** 上記 1-1 では、バルク液として沸騰で最も使用される純水について行っている。液体が変わっても同様の現象が起こるのか、沸騰伝熱機構の解明のためにバルク液を変化させ各々の液体における CHF 付近のマイクロ液膜の消失過程の観察を行う。ここではエタノール水溶液を使用し、マランゴニ対流が生じる系においてマイクロ液膜の形成の様子について観察を行った。
- 2-1 **気泡間液膜厚さ分布測定：バルク液温の変化** 水を液体試料とする場合には、現在 $0.12\ \mu\text{m}$ の厚さ測定精度で液膜厚さ分布測定を実現しており、基本的な測定装置は既に完成している。同時計測手法を用いて沸騰気泡の合体条件を明らかにすることを目的として、沸騰気泡の合体を模擬するためバルク液温と供給空気流量を上昇させて気泡合体時の液膜厚さ変化を測定し、さらに詳しく物性の影響を明らかにする。

4. 研究成果

課題 1 に使用した実験装置概略図を図 1 に示す。伝熱面に ITO 膜を蒸着させたサファイアガラスを使用した。ITO 膜の両端に電極を設置し、直流電源装置から通電加熱を行うことで沸騰気泡を生成した。伝熱面下部からレーザーを入射させ、沸騰気泡底部に形成されるマイクロ液膜を干渉縞として高速度カメラで撮影した。同時に沸騰容器側面から沸騰気泡の成長の様子を別の高速度カメラで観察した。図 1 中の右側に示している 2 枚の写真がそれぞれの撮影画像である。2 台の高速度カメラは同期して撮影を行い、撮影は $5000\ \text{fps}$ で行った。干渉縞は波長 $532\ \text{nm}$ の可視レーザーを使用し、マイクロ液膜両端の反射光の光路差からレーザー干渉法を用いて観察をした。また、沸騰容器内部は飽和温度で維持するために補助ヒーターで加熱をしている。実験結果の一例として熱流束 $108.5\ \text{kW/m}^2$ におけるマイクロ液膜厚さ分布の時間変化を図 2 に示す。図 2 上部の干渉縞は気泡発生から $2.4\ \text{ms}$ 後のマイクロ液膜の写真である。これら干渉縞の写真から各時刻における液膜厚さ分布を取得し、時間変化として表している。マイクロ液膜厚さ分布は同一の熱流束条件であっても生成される気泡によって大きく異なるものの、いずれの気泡も成長とともにドライアウト領域の増大が確認された。マイクロ液膜の体積変化がすべて蒸発によって気泡体積変化に使われたと仮定して、気泡成長に寄与するマイクロ液膜蒸発の割合を調べた。図 3 に熱

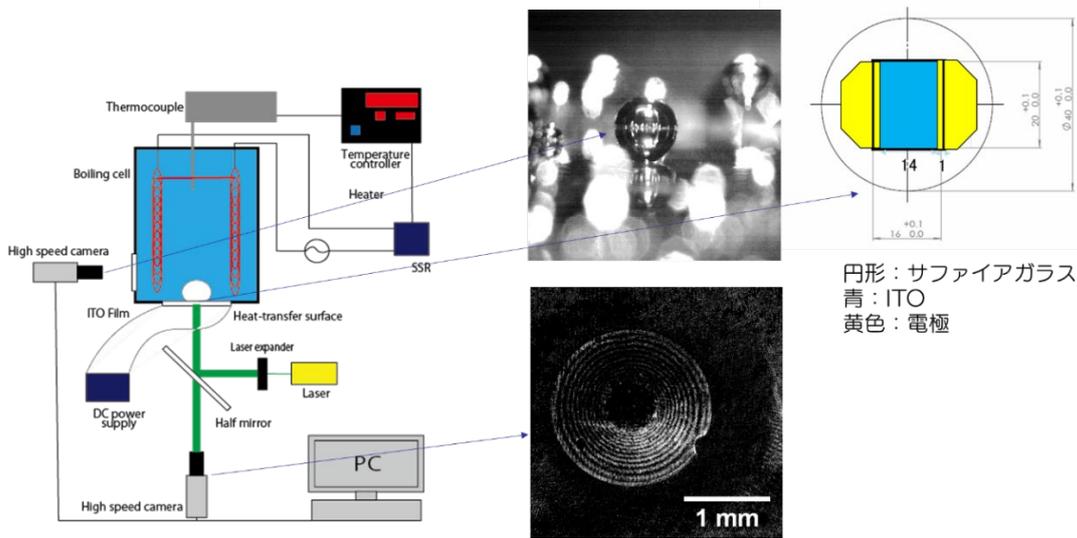


Fig.1 Experimental system for microlayer.

流束 108.5 kW/m^2 の孤立気泡領域におけるマイクロ液膜蒸発が気泡成長に与える影響を示す。図 3 より、気泡によって大きくばらつくものの、平均して約 30 % がマイクロ液膜からの蒸発によって気泡が成長していることがわかる。これは気泡径が異なっても変わらない。

気泡干渉領域になると側部からの気泡の成長と株のマイクロ液膜の同定が出来ないため、マイクロ液膜挙動についてのみ検討を行う。図 4(a)-(d) に気泡干渉域におけるマイクロ液膜の成長の様子を示す。熱流束は約 900 kW/m^2 における観察結果を示している。図 4 中の赤色の破線で囲われた領域がマイクロ液膜領域、緑色の実線で囲われた領域がドライアウト領域を示している。図 4(a) のように気泡が発生したときはほぼ同心円状にマイクロ液膜が形成される。しかし、気泡成長に伴い、図 4(b) のように気泡干渉領域では形成されるマイクロ液膜が同心円状ではなくなる。そして、気泡の成長とともにマイクロ液膜およびドライアウト領域が周囲の気泡の移動に伴い移動していく。また、図 4(c) のように各気泡のドライアウト領域の間にマイクロ液膜が存在している様子も確認出来た。そして、気泡間に存在しているマイクロ液膜が蒸発することで図 4(d) のように大きく合体したドライアウト領域を形成する様子を確認することが出来た。

次に、エタノール水溶液におけるマイクロ液膜の形成について示す。エタノール水溶液中では気泡は小径のものが大量に生成されるため、純水における気泡干渉域同様気泡の同定には至らず、マイクロ液膜の形状変化の観察をした。図 5 にエタノール水溶液におけるマイクロ液膜厚さ分布を示す。エタノール水溶液の濃度は 1 w% である。熱流束が 76.5 kW/m^2 における実験結果である。気泡発生時を 0 ms として、そこからの時間変化を干渉縞の画像とともに表している。エタノール水溶液においても、純水同様に気泡成長に伴いドライアウト領域が拡大していく様子が観察できた。また、純水と異なり、エタノール水溶液ではマイクロ液膜が周方向に波打つように変動している様子が確認された。この波打つ様子は気泡の成長とともに増大していった。図 5 の液膜厚さ分布では波打の極大と極小から平均値を用いてプロットした。課題 2 の気泡間液膜厚さ分布の計測を行った実験装置の概略図を図 6 に示す。試験部の水槽内に設置した対向するパイプに等流量で空気を送り込み、気泡を生成・衝突させることで気泡合体過程における気泡間液膜厚さ分布の測定を行っている。測定は波長 3390 nm の赤外レーザーを用いたレーザー消光法により局所の液膜厚さの平均値を取得する。それと同時に可視レーザーによるレーザー干渉法を用いて気泡間液膜に

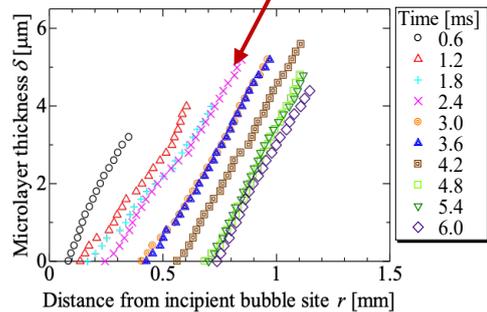
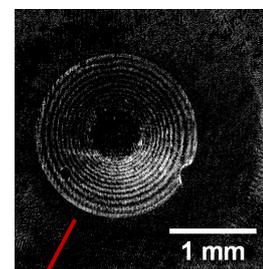


Fig.2 Thickness distribution of microlayer in water.

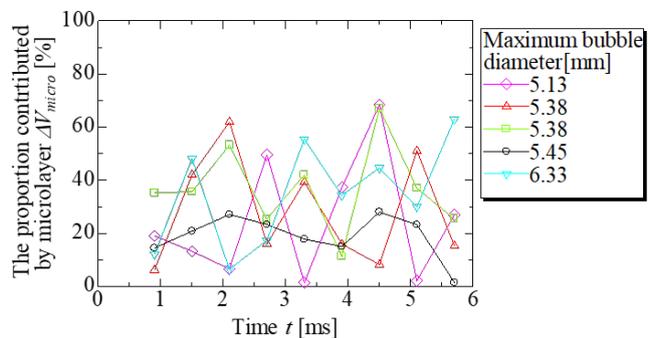


Fig.3 Contribution of microlayer evaporation.

よって生じる光路差から干渉縞を取得し、高速カメラによって撮影を行う。この2つの手法による同時計測を行うことで気泡間液膜厚さ分布の取得を実現した。それと同時に気泡合体の様子を試験部側面の観察窓から別の高速カメラによって撮影を行っている。高速カメラはいずれも 5000 fps、赤外レーザーの受光は 125 kHz で行っている。レーザー干渉法に用いている可視レーザーは波長 488 nm のもので、本申請によって購入した。それにより従来と比べ液膜厚さの分解能が約 15 nm 向上した。

実験は試験液体である純水の温度と供給空気流量を変化させて行った。純水の温度については 30, 50, 70 °C で行った。本来であれば沸騰を模擬するため 90 °C や飽和温度である 100 °C においても行う予定であったが、70 °C を超えて実験を行うと、等流量で空気を送ったとしても左右から同時発泡が起きず、交互発泡となった。そのため、気泡同士の接触を起こすことが出来ず、合体に至らないことから上記の範囲で実験を行った。

図 7(a)-(c) に液膜破断直前の気泡間液膜厚さ分布を示す。いずれも純水温度 50 °C における実験結果で

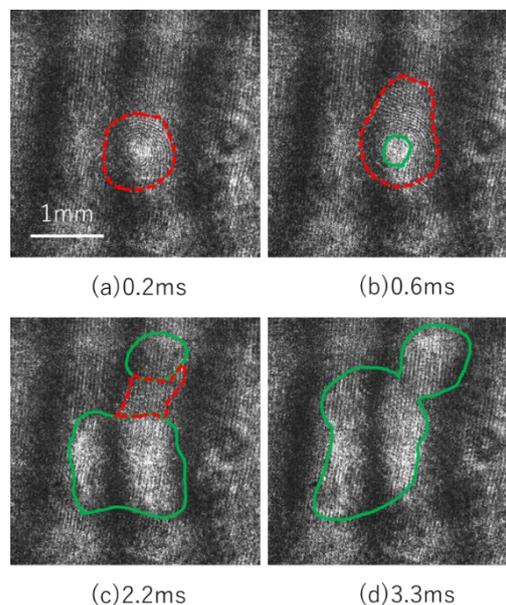


Fig.4 Typical pictures of microlayer in coalescence process.

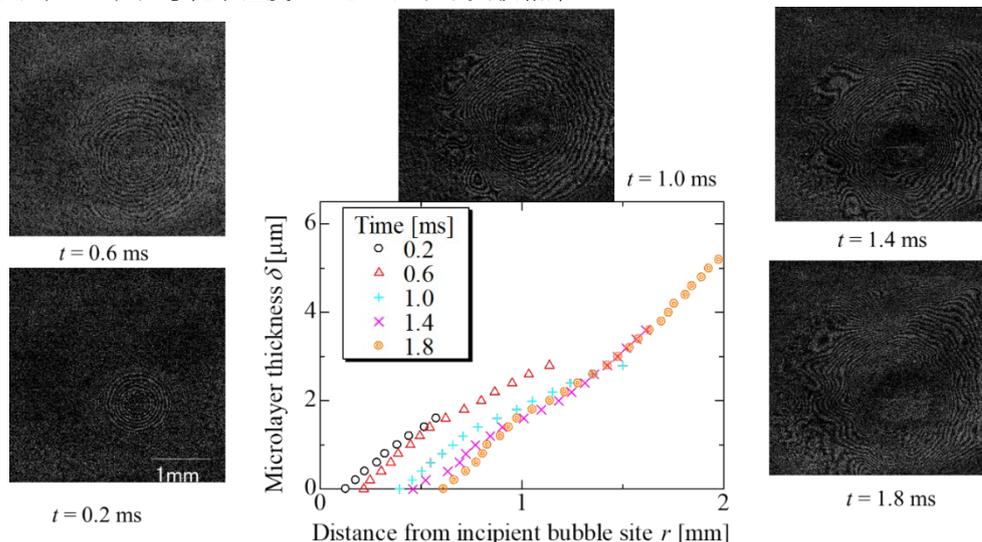


Fig.5 Thickness distribution of microlayer in ethanol aqueous solution.

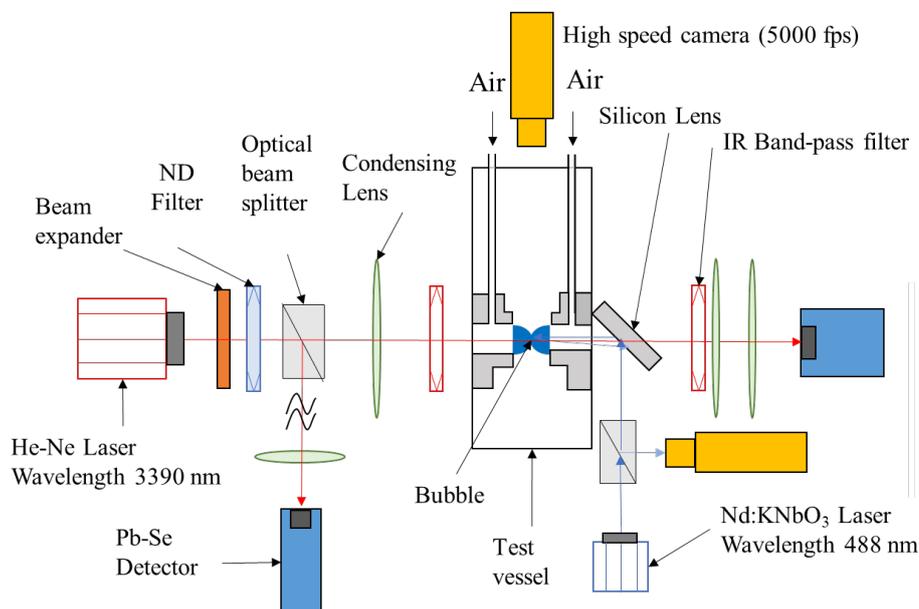


Fig.6 Experimental system for liquid film thickness between bubbles.

あり、供給空気流量が変化している。図7中の黒丸で示されているのがレーザー消光法によって得られた液膜厚さであり、エラーバーで干渉縞の幅を表している。赤三角で示しているのがレーザー消光法による測定結果で、エラーバーで赤外レーザーの透過位置を表している。図7(a)のように供給空気流量、すなわち気泡同士の接近速度が小さい領域では気泡同士の跳ね返りが起きず、液膜中心部が最も薄い形状を維持したまま液膜厚さは単調減少していき、気泡の合体に至る。それに対し、気泡接近速度が上昇する図7(b)や(c)では、気泡同士が接近する際に一度跳ね返りが起こるようになる。これは、気泡間に存在する流体が排出されるよりも先に気泡同士が接近し、液の排出を阻害することで起こるものと考えている。このような接近速度が高い領域では気泡接近時から気泡が変形し、形成する液膜も大きくなる特徴がある。その結果、図7(b)のように外周部に最薄部のくさび形が現れる、あるいは図7(c)のように液膜中心がほぼフラットな厚さ分布を形成するものが出てくると考えられる。このような気泡同士の跳ね返りが起こる場合は主に最薄部の厚さが $0.5 \mu\text{m}$ 以下の時に現れている。また、気泡同士の跳ね返りが起こる場合には、最薄部の厚さが破断直前よりも薄くなった後に厚みが増加している領域で液膜の破断が生じることもある。そのため、液膜厚さのみが液膜の破断のトリガーではない可能性もある。

液膜の破断が最も薄い箇所から起こると考えられるため、破断時の最小鋭気膜厚さについてまとめる。図8(a)、(b)に破断時最小液膜厚さと気泡接近速度の関係を示す。図8(a)、(b)はともに同じデータであり、図8(a)が液膜形状による分類、図8(b)がバルク液温による分類となっている。図8より、気泡の接近速度の上昇に伴って破断時最小液膜厚さは減少していく傾向を示している。図8(a)より、中心くさび形は主に気泡接近速度が低い約 50mm/s 以下の領域で現れ、大まかに液膜厚さが $0.5 \mu\text{m}$ よりも大きな時にみられる。図8(b)より、この中心くさび形の時はバルク液温度が高くなると破断時最小液膜厚さは厚くなるという傾向が見られる。また、図8(a)より、外周くさび形とフラット型は主に気泡接近速度が約 50mm/s 以上の領域で見られる。外周くさび形とフラット型は同様の気泡接近速度域で見られるが、外周くさび形は破断時最小液膜厚さが $0.5 \mu\text{m}$ 以下の時にしか現れていない。一方フラット型は外周くさび形よりは破断時最小液膜厚さが厚くなる傾向がみられる。この気泡同士の跳ね返りが起こる領域ではバルク液温による違いは見られない。

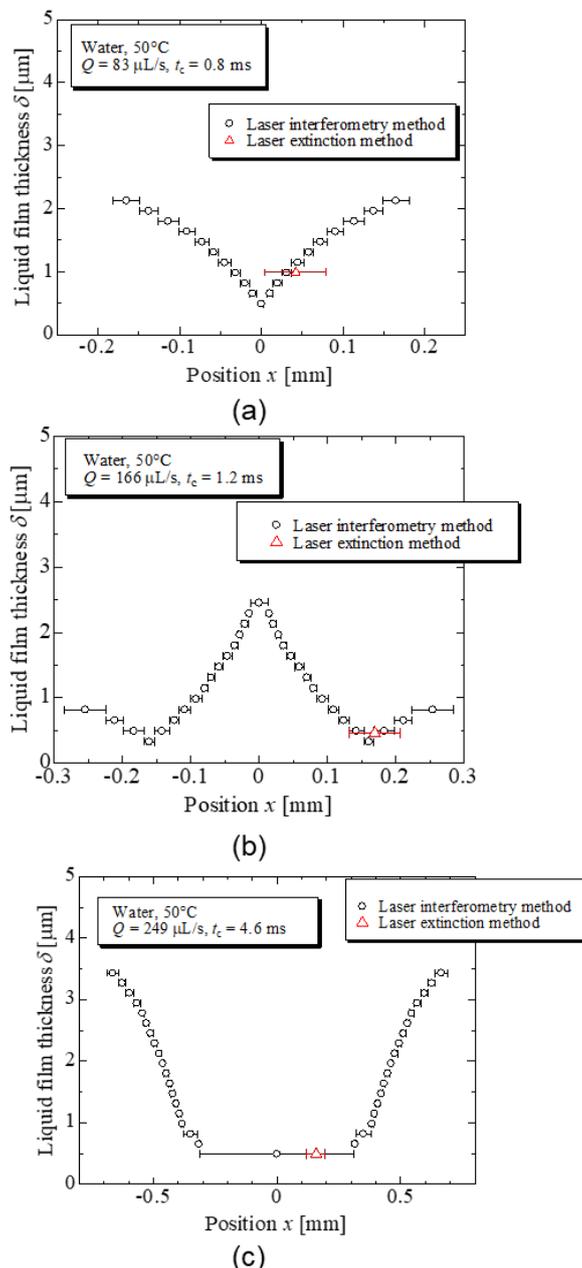


Fig.7 Thickness distribution of liquid film between bubbles.

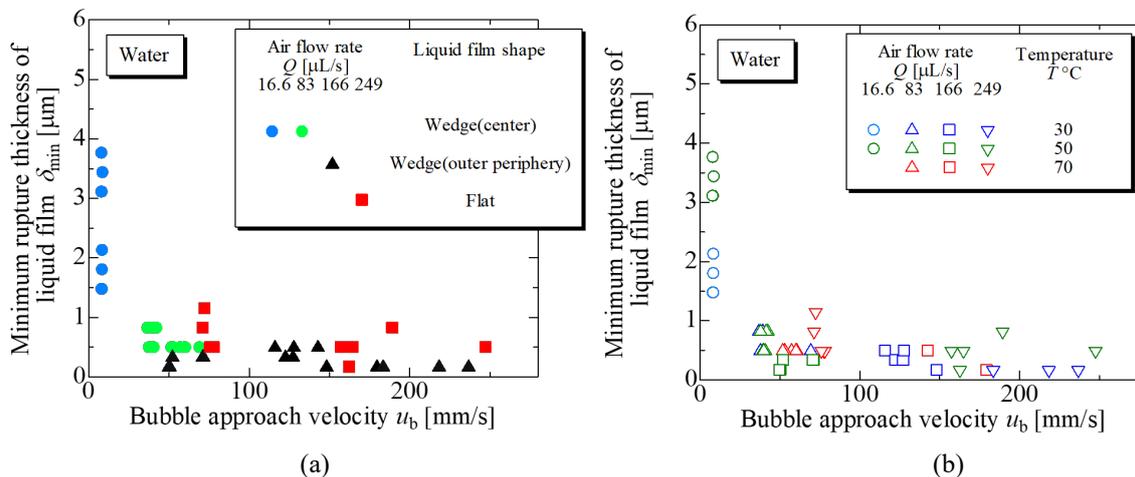


Fig.8 Relationship between minimum rupture thickness of liquid film and bubble approach velocity

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 諸隈崇幸
2. 発表標題 エタノール水溶液のブール沸騰におけるマイクロ液膜厚さの測定
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 諸隈崇幸
2. 発表標題 気泡合体過程における気泡間液膜厚さに及ぼすバルク液温度の影響に関する研究
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 諸隈崇幸
2. 発表標題 気泡合体時における純水温度と気泡間液膜の破断に関する研究
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 MOROKUMA Takayuki
2. 発表標題 MEASUREMENT OF LIQUID FILM THICKNESS BETWEEN BUBBLES AT DIFFERENT WATER TEMPERATURES IN THE BUBBLE COALESCENCE PROCESS
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------