レーザー吸光法による濃度差マランゴニ凝縮過程 における凝縮液膜厚さの非定常測定* (測定結果とその検討)

宇高 義郎^{*1}, 西川 哲治^{*2}

Unsteady Measurement of Condensate Film Thickness for Solutal Marangoni Condensation by Using Laser Absorption Method (Measurement and Discussion)

Yoshio UTAKA^{*3} and Tetsuji NISHIKAWA^{*3} Department of Systems Design, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

The objective of the study is to investigate the condensate film thickness for water-ethanol solutal Marangoni dropwise condensation. The laser light absorption method for measuring the unsteady behaviors of the condensate thickness was adopted. The relation between the condensate behavior and the measuring position was specified by the observation using the high-speed digital camera. The variations of the film thickness were measured by changing the surface subcooling for various vapor concentrations. The unsteady variations of the thickness of condensate film, which was appeared after the sweeping of the heat transfer surface by the departing drop and existed among the various drops, and also the initial drop distances in Marangoni dropwise condensation cycle were measured. The dependencies of the minimum film thickness and non-dimensional condensate thickness among the drops on the initial drop distance were shown. It was clarified that the thinnest thickness of the condensate film was around 1 μm . The relation among the dominant factors determining the phenomena was discussed.

Key Words: Heat Transfer, Phase Change, Solutal Marangoni Condensation, Water and Ethanol Mixture, Condensate Thickness, Laser Absorption Method

1. はじめに

非共沸混合作動流体の蒸発・凝縮などの気液相変化伝熱過程では、相変化の生じている気液界面における温度と濃度は混合物質固有の気液相平衡関係に従う。そのため、温度と濃度の分布に基づく表面張力差による液面不安定が拡大し、マランゴニ対流が液相内に生じる場合が存在する。低沸点成分液体に比べて高沸点成分液体の表面張力が大きい "positive system" を形成する混合蒸気の凝縮において、Mirkovich-Missen, Ford-Missen^(1,2) に示されるように、凝縮液面上での表面張力分布の生起により凝縮液は滴状などの不規則な形態を示す。その現象は伝熱面表面が疎液性を持つ場合に限って生じる非ぬれ面上の滴状凝縮とは本質的に異なり、非ぬれ性表面を生成の条件としない。したがって、疎液性面上で生起する滴状凝縮と区別するためにここではそのような現象を濃度差マランゴニ凝縮あるいは濃度差マラン

ゴニ滴状凝縮と呼ぶ。本現象は膜状と滴状の間の凝縮液形態遷移を伴う冷却強度に強い依存性を有する現象である。しかし、従来の多くの実験的な研究においては、凝縮液形態を支配する主要な条件として混合蒸気濃度が着目され、その影響について論じられてきたため、凝縮面過冷度の影響は充分には明らかにされてこなかった。著者らの一部^(3,4)は、水-エタノールの混合蒸気濃度を一定に保った条件で、凝縮面過冷度の比較的小さい側から大きな領域にわたる

Fig.1 Condensation characteristic curves

* 原稿受付 2001年12月19日。

^{*1} 正員, 横浜国立大学大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。^{*2} 日本エアリキード(株) (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-9-1)。

E-mail: utaka@ynu.ac.jp

測定を行い、水-エタノール濃度差マランゴニ凝縮熱伝達は凝縮面過冷度に強い依存性を持つことを示した。凝縮面過冷度を変化させるときの熱流束あるいは熱伝達率の変化を表す濃度差マランゴニ凝縮の伝熱特性曲線を図1のようにまとめることができる。それらは凝縮液の伝熱抵抗を決める凝縮液形態と気液界面付近に形成される蒸気相内拡散抵抗の変化に依存しており、過冷度の変化にともなって複雑な挙動を示す。ここで、複数のに分かれている線は伝熱面位置の影響を表している。凝縮特性曲線を特徴づける点Bを熱伝達率の急増開始点、直線的増加を示すB-C間を急増領域、点Dを極大熱伝達率点と呼ぶ。これらの過冷度域を含むより広い範囲で凝縮液形態は滴状を示す。

一般に、凝縮伝熱の促進においては、非定常変化のもとに凝縮液の薄膜化あるいは微小滴化が有効となることが多く存在し、本現象においても同様と考えられる。したがって、極めて良好な熱的特性を有する濃度差マランゴニ凝縮現象を知る上で、比較的小さいスケールを特徴とする非定常現象としての凝縮面上の液滴群挙動に関する詳細かつ系統的な知見を得ることが重要と考えられる。これまで、藤井ら⁽⁵⁾により、水平円管外表面上における実験が行われ、液滴寸法および蒸気濃度と液滴形状の関係などが報告されている。また、土方ら⁽⁶⁾は、薄液膜から液滴への形状変化の生起条件に関する不安定解析を行い、実験との定性的な一致を示している。しかし上述のような、液滴の更新サイクルを決める液滴の離脱、液滴の生成あるいは成長などと凝縮伝熱特性との系統的・定量的な関係およびそれらと密接な関係を持つと考えられる凝縮液薄液膜部の特性に関しては十分な検討は行われてきていない。

本研究では、濃度差マランゴニ滴状凝縮における凝縮サイクルの基礎となる、離脱液滴による掃除後の過渡的な凝縮液挙動を対象としている。測定精度の検討を行った前報⁽⁷⁾で詳述したレーザの凝縮液による消光減衰を利用する方法を用いる。凝縮熱伝達を直接支配する局所凝縮液膜厚さ、および液滴間の薄液膜厚さを測定し、最小液膜厚さと初生液滴間隔などの濃度差マランゴニ凝縮の支配要因との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 前報までの関連結果の概要

既報⁽⁸⁾では、水-エタノール濃度差マランゴニ滴状凝縮における離脱液滴による掃除後に開始される過渡的な凝縮液挙動の特徴を明らかにするため、伝熱測

定と離脱液滴の掃除後に現れる液滴群の形成および成長過程の観察を同時に行った。その結果、液滴の離脱過程においては、離脱液滴による掃除直後の離脱液滴の上流側周縁に現れる狭い帯状部分には液滴は存在せず、その部分は平滑な液膜状であった。上流側においては離脱滴から離れるにしたがって掃除後の時間が経過してゆく。その平滑液膜部の上流側に小液滴の形成が観察されたことから、離脱滴に掃除された後に残る薄液膜から凸状の液滴の形成・成長が生じることを明らかにした。また小液滴群の液滴寸法は凝縮面過冷度に強く依存していた。これらの観測結果から、エタノール濃度あるいは伝熱面過冷度に対する凝縮液の変化特性を表すための因子として初生液滴間隔を採用した。ここで初生液滴間隔は離脱液滴の掃除後の薄液膜から形成される初期小液滴の平均間隔を意味する。熱伝達率の凝縮特性曲線と初生液滴間隔の凝縮面過冷度に対する変化を図2(a)(b)にそれぞれ示した。濃度差マランゴニ滴状凝縮では、過冷度の変化に対して初生液滴間隔は大きく変化し、最小値を有するU字型の曲線形状を示した。エタノール質量分率が7~50%において、初生液滴間隔は概ね30 μm から300 μm 程度であった。

(a) Heat transfer characteristic curves

(b) Variation of initial drop distances

Fig.2 Characteristics of initial drop distance

いずれの濃度条件でも、初生液滴間隔の最小値の現れる過冷度は、図 2 (a) に示した凝縮特性曲線の極大熱伝達率のそれとほぼ一致するが、若干低めの過冷度において現れた。したがって、濃度差マランゴニ滴状凝縮の凝縮液抵抗の減少は、初生液滴間隔の減少と何らかの対応関係を有しているものと考えられた。また、初生液滴間隔はエタノール濃度にも比較的強い依存性を示し、エタノール濃度の低下にともなって減少する傾向を示した。さらに、熱伝達率の極大値付近の過冷度域で、初生液滴間隔および離脱液滴直径が最小となることから、凝縮液の伝熱抵抗は、液滴寸法の減少と液滴の形状がより球形に近づくことに対応していると考えられた。そのことは表面張力による液流駆動力の増大を意味しており、そのような場合に、液滴間の凝縮液の薄膜化が促進されているものと推察された。しかし、以上の結果からは初生液滴間隔と凝縮特性曲線との対応関係が存在することは理解されるが、初生液滴間隔の変化と実際の伝熱量を支配する要因である凝縮液膜厚さとの関係は明らかにされていない。

また、前報⁽⁷⁾では波長 3.39 μm をもつ赤外レーザー光の凝縮液による消光減衰を利用する方法を、濃度差マランゴニ滴状凝縮現象における薄凝縮液膜厚さの非定常測定に適用した。その結果として、(1) 水-エタノール混合液体の赤外光吸収係数の測定、(2) レーザ光の集光による微小な薄液膜部寸法に対応する直径約 30 μm のレーザー光照射寸法の実現、(3) 液膜厚さ測定位置と凝縮液挙動の対応関係の明確化、および (4) 膜厚測定と凝縮様相の同時観測による薄液膜部の凝縮液厚さ情報取得可能性の確認、を行った。さらに、上記(1)~(4)項から得られる薄液膜厚さと作動流体の消光性質により決まる消光割合、薄液膜の平面的寸法とレーザー光のビーム径、および他の誤差要因の検討に基づく薄液膜厚さ測定精度を考慮することにより、液膜厚さ 1 μm 程度の測定への適用が可能であることを示した。

3. 実験装置および方法

図 3 に本研究で用いた実験装置の概略を示す。前報⁽⁷⁾と同様な装置により実験を行ったので、ここでは要点を記す。本実験装置は凝縮装置とレーザー透過割合測定装置から構成される。蒸気ループ内を循環する混合蒸気は凝縮室に入り、伝熱面上で凝縮が生じる。レーザー光透過割合測定装置はヘリウムネオンレーザー(波長 3.39 μm)、セレン化鉛製ディテクタ等を用い、レーザー光が凝縮面上の凝縮液膜を通過する際の透過割合を計測する。赤外線用の集光レンズ等の光学装置を

Fig.3 Experimental apparatus for measuring condensate film thickness

用いて絞られたレーザー光の伝熱面上における照射部直径は約 30 μm である。レーザー光に対して透明性の高い有効面積 9×9 mm^2 、厚さ 0.030 mm の石英ガラス伝熱面を用いた。酸化チタン光触媒の塗布により伝熱面表面のぬれ性を高めた。凝縮室内に設置した露点観測用銅ブロックの温度調節による凝縮開始温度の計測と気液平衡関係から濃度を決定する露点法を用いて蒸気濃度を決定した。測定用レーザーに対して透明な性質を持つ液体窒素の蒸発ガス噴流を伝熱面の冷却媒体に採用した。窒素ガスの流量と温度を変化させることにより冷却強度を調節した。ディテクタで検出した信号を直流アンプにより増幅し、オシロスコープに取り込んだ。また、凝縮液挙動との対応を確認するため液膜厚さ測定と同時に凝縮液の様相の高速撮影を行った。

試料としてエタノール質量分率 $C=0.11\sim0.42$ の条件の水-エタノール混合蒸気を用いた。実験においては凝縮室内蒸気流速を 0.7 m/s の一定条件とした。

液膜厚さの決定には、式 (1) で示される Lambert の法則を用い、レーザー光の透過割合 I/I_0 から液膜厚さ δ を算出した。

$$\delta = -A^{-1} \times \log(I/I_0) \quad (1)$$

ここで、 A : 消光係数 [m^{-1}]、 I_0 : 入射光強度、 I : 透過光強度、 δ : 消光物質光路長 [m] を表している。レーザー光の透過割合の測定値 I/I_0 と前報⁽⁷⁾により既知の消光係数 A から液膜厚さを算出した。なおここで、入射光強度は透過光強度測定と同様の測定系、すなわち実験状態のままで伝熱面を乾燥させた状態における透過光強度を意味している。

4. 結果および考察

4.1 凝縮液滴形成過程と液膜厚さ変化 図 4~7 は、離脱液滴によって掃除された直後の薄液膜の出現・成長および液滴の生成過程における、レーザー光の透過率から求めた液膜の厚さ変化および同時に撮影し

た凝縮液様相の代表的な場合を例示している。蒸気のエタノール質量分率が11%における図4(a)(b)と図5(a)(b)は異なる冷却強度の場合を表しており、初生液滴間隔が異なっている。これらのうち図4, 5の(a)はレーザ光の消光割合測定から求めた凝縮液膜厚さを、(b)はそれぞれに対応する離脱液滴通過直後の凝縮液挙動を捉えた画像である。ここで、時間 $t = 0$ ms は任意に決めたものであり、それぞれの液膜厚さ変化と画像が対応している。図4, 5の(b)においてみられる画像中の黒い部分が液滴を、特に $t = 0$ ms の画像の大きな部分が離脱液滴を表しており、左上から右下方に移動してゆく様子が分かる。また、比較的白く移っている部分が薄液膜部分を表しており、第2章で述べたように、掃除直後に薄液膜が現れ、その後に液滴が形成されてゆく様子がわかる。画像中の○印はレーザ光が透過している測定位置およびその大きさを示している。図4, 5の(a)の曲線から掃除直後の最小液膜厚さ $\delta_{\min}$ を決定した。濃度差マランゴニ滴状凝縮においては、掃除直後にミクロンオーダーの比較的薄い液膜が存在し、伝熱面は常に液でぬれていることが確認される。図4(a)の $t = 6$ ms において液膜厚さが極小値を示していることと、図4(b)の同時刻の画像におけるレーザ測定位置から、離脱液滴移動直後の薄液膜部分の膜厚が測定されていることとの良好な対応が確認される。この場合の測定値は、図4(a)中に記してあるように $\delta_{\min} = 0.92 \mu\text{m}$ であった。図5の(a)(b)は冷却強度のより低い場合を表しており、図5(a)からわかるように、 $t = 8$ ms 前後で液膜厚さの測定値は極小値 $\delta_{\min} = 1.6 \mu\text{m}$ を示し、図4(a)の場合に比較して増大した。これは画像からもわかるように、初生液滴間隔がより大きなことに対応している。

図6, 7はエタノール質量分率が30%の場合における異なる初生液滴間隔の場合を表している。図4, 5の場合と初生液滴間隔はほぼ等しいにもかかわらず、最小液膜厚さの値が増大していることがわかる。なお、図4～7の(a)はレーザ光の透過割合の測定値から Lambert の法則を用いて膜厚を計算したものであるため、本研究の対象としている離脱液滴の掃除直後の薄液膜など、凝縮液状態がほぼ平滑な場合に適用できるものである。液滴など液面が傾斜あるいは曲率をもつ場合に対しては、液膜厚さ測定の正確度は劣るものと考えられるが、その場合でも定性的傾向についての議論は成立するはずである。

(a) Condensate thickness

(b) Aspect of condensate

Fig.4 Variation of condensate thickness and aspect of condensate for $C = 0.11$ and $d_i = 121 \mu\text{m}$

(a) Condensate thickness

(b) Aspect of condensate

Fig.5 Variation of condensate thickness and aspect of condensate for $C = 0.11$ and $d_i = 160 \mu\text{m}$

(a) Condensate thickness

(b) Aspect of condensate

Fig.6 Variation of condensate thickness and aspect of condensate for $C = 0.30$ and $d_i = 120 \mu\text{m}$

(a) Condensate thickness

(b) Aspect of condensate

Fig.7 Variation of condensate thickness and aspect of condensate for $C = 0.30$ and $d_i = 137 \mu\text{m}$

4.2 離脱液滴による掃除直後の凝縮液膜および液滴間薄液膜の厚さ測定結果

図 8(a)~(d) は 4 種類のエタノール濃度条件, すなわち 11 %, 21 %, 30 % および 42 % での濃度差マランゴニ滴状凝縮サイクルにおける離脱液滴通過直後の最小液膜厚さ $\delta_{\min}$ と同期撮影による画像から得られた初生液滴間隔 d_i との関係を示している. なお, 初生液滴間隔には同一条件における数回以上の離脱における平均値を採用している. 全濃度条件において凝縮面過冷度を低過冷度領域から増加させてゆくと初生液滴間隔は減少し, それに伴って最小液膜厚さは減少する傾向を示した. また, 図 8 (c) および (d) のエタノール濃度の比較的高い条件の結果においては, 凝縮面過冷度の小さな側から冷却強度を増大させると, 初生液滴間隔は減少してゆき, その変化にともなって最小液膜厚さは直線的に減少してゆく. その後, 最小液膜厚さは最小値をとる. さらなる冷却強度の増大にともなって, 逆に初生液滴間隔および最小液膜厚さも増大してゆく. 既報⁽⁸⁾から初生液滴間隔の最小値付近において極大熱伝達率が現れることから, 初生液滴および最小液膜厚さの最小値を示す付近, すなわち曲線の折り返し部は凝縮特性曲線の熱伝達率の極大値付近に対応するはずである. 最小液膜厚さは非常に薄く, その最小値はエタノール濃度 30 % で $1.2 \mu\text{m}$, 42 % で $1.5 \mu\text{m}$ 程度であった. また, 初生液滴間隔の最小値は最小液膜厚さの現れるその値よりやや小さく, それぞれ $100 \mu\text{m}$, $130 \mu\text{m}$ 程度であった. 条件が異なるため厳密な比較は難しいながら既報⁽⁸⁾の結果と比較すると, 本測定の初生液滴間隔の最小値はやや大きな値が得られているが, エタノール濃度および凝縮面過冷度に対する変化傾向は類似していることがわかる. また, エタノール濃度の減少に伴い最小液膜厚さは全体的に減少する傾向を示した. エタノール濃度 11 % および 21 % のいずれの場合でも, 本測定範囲では最小液膜厚さは約 $1 \mu\text{m}$ であったが, これは冷却強度の限界によるものであると考えられる. 本研究では赤外レーザー光の透明性を確保する目的で伝熱面に石英ガラス, 冷却に蒸発窒素ガス噴流を用いているため比較的低エタノール濃度が低く極大熱流束の大きい条件においては, 大きな凝縮面過冷度の実現が難しかったことによる. したがって, これらの場合においては初生液滴間隔の最小値付近の測定はできなかった. 各濃度条件における初生液滴間隔に対して直線的变化を示す範

囲の最小自乗法による直線の勾配はそれぞれ、エタノール濃度 $C = 11\%$ にて 0.087、 21% にて 0.011、 30% にて 0.016、 42% にて 0.016 と変化

し、濃度の増加とともに増大した。図 8 (a) (b) の破線は図 8 (c) (d) の変化形状と図 2 に示される既報⁽⁹⁾の初生液滴間隔に関する測定結果をもとに変化を

(a) $C=0.11$, (b) $C=0.21$, (c) $C=0.30$, (d) $C=0.40$

Fig.8 Variation of minimum film thickness against initial drop distances after sweeping by departing drops

(a) $C=0.11$, (b) $C=0.21$, (c) $C=0.30$, (d) $C=0.40$

Fig.9 Variation of non-dimensional condensate thickness against initial drop distances between drops

推測したものである。厳密な定量的議論は難しいが、両図に示されるようにエタノール濃度の減少に伴って最小液膜厚さの最小値は減少してゆき、それらの濃度範囲では $0.5 \mu\text{m}$ 前後の薄さに達するものと予想される。

次に、図 9(a)~(d)は図 8 と同様な条件での濃度差マランゴニ滴状凝縮サイクルにおける初生液滴間隔 d_i と、液滴と液滴の間の薄膜部厚さ δ を図 8 中の実線で示された最小液膜厚さ $\delta_{\min}$ で無次元化した無次元液膜厚さとの関係を示している。ここで液滴間の薄液膜とは、例えば図 5(b) $t = 28 \text{ ms}$ の画像の測定位置におけるような、液滴間に存在する凹凸のみられないときの液膜厚さを意味している。これらの結果により離脱液滴による掃除直後に出現する薄液膜に限らず、凝縮面上の液滴の存在していない液膜部分はほぼ離脱液滴掃除直後に現れる薄液膜厚さの 1~2 倍程度の範囲に存在しており、いずれも非常に薄い液膜が形成されていることが確認された。

以上の本研究と既報⁽⁸⁾の結果から、熱伝達率の極大値付近の過冷度域において、初生液滴間隔、離脱液滴直径および最小液膜厚さとも最小となることなど、凝縮特性曲線における熱伝達率の変化特性とそれらの特性量の変化特性は密接な対応関係を有していることが明らかになった。またそれら特性量のエタノール濃度に対する変化特性に関しても同様であった。したがって、濃度差マランゴニ現象の液膜不規則化の駆動力である表面張力差分布の変化に対応して凝縮特性曲線の熱伝達率は変化してゆくことになる。熱伝達率のピーク付近でその駆動力は最も強まり、凝縮液滴の微小化と凝縮液膜の薄膜化が進むものと推測される。その結果として凝縮液熱抵抗の減少が生じ、それが熱伝達率の向上の主要な要因の一つとなっていると考えられる。

5. 結 論

波長 $339 \mu\text{m}$ をもつ赤外レーザー光の凝縮液の消光による減衰を利用する方法により、エタノール質量分率 11~42 % の水-エタノール混合蒸気の濃度差マランゴニ滴状凝縮現象における薄凝縮液膜厚さの非定常測定を行い、以下の結果を得た。

- (1) 液膜厚さ測定位置における液膜厚さと凝縮液挙動の同時観測により、離脱液滴による掃除後の薄液膜および液滴間薄液膜の厚さ変化の測定を行った。
- (2) レーザ光の通過する位置の液膜厚さの非定常測定から、液滴間にはミクロンオーダーの比較的薄い液

膜が存在し、伝熱面は常に液でぬれていることが確認された。

- (3) 低過冷度領域から初生液滴間隔の減少に伴い最小液膜厚さは減少する傾向を示し、さらに冷却強度を増大させると、初生液滴間隔および最小液膜厚さとも増大した。
- (4) 最小液膜厚さは濃度の減少に伴って減少し、本測定の範囲においては約 $1 \mu\text{m}$ であった。冷却能力の限界から測定できなかった低エタノール濃度の過冷度領域においてはさらに膜厚は減少するものと予測された。
- (5) 本研究と既報⁽⁸⁾の結果から、熱伝達率の極大値付近の過冷度域で、初生液滴間隔、離脱液滴直径および最小液膜厚さとも最小となることなど、凝縮特性曲線における熱伝達率の変化特性とそれらの特性量変化の間には類似の対応関係が存在していることが明らかになった。またそれらの濃度依存性も類似していた。
- (6) 上記(5)から、濃度差マランゴニ現象の液膜不規則化の駆動力である表面張力差分布の変化に対応して凝縮特性曲線における伝熱特性は変化する。熱伝達率のピーク付近で駆動力は最も強まると推測され、凝縮液膜は薄膜化し、その結果としての凝縮液熱抵抗の減少が熱伝達率向上の主要因の一つとなっていることが結論される。

最後に、本実験に協力いただいた元横浜国立大学学生、花田元六君、矢野誠君に謝意を表す。本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号 12650194)および(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。また、ぬれ性面の実現のための表面塗布剤として酸化チタン光触媒を東陶機器(株)に提供いただいた。謝意を表す。

文 献

- (1) Mirkovich, V.V. and Missen, R.W., Non-Filmwise Condensation of Binary Vapors of Miscible Liquids, *Canadian J. chem. Eng.*, (1961) pp.86-87.
- (2) Ford, J.D. and Missen, R.W., On the Conditions for Stability of Falling Films Subject to Surface Tension Disturbances; the Condensation of Binary Vapor, *Canadian J. Chem. Eng.*, Vol.48 (1968) pp.309-312
- (3) 宇高, 寺地, 水-エタノール 2 成分蒸気の凝縮熱伝達特性曲線の測定, *機論(B)*, Vol.61, No.583 (1995) pp.1063-1069.
- (4) 宇高, 寺地, 水-エタノール混合蒸気の凝縮熱伝達に関する研究(凝縮熱伝達特性曲線と凝縮液形態の関係), *機論(B)*, Vol.61, No.588 (1995) pp.3059-3065.

- (5) Fujii, T., Osa, N. and Koyama, S., Free Convective Condensation of Binary Vapor Mixtures on a Smooth Horizontal Tube: Condensing Mode and Heat Transfer Coefficient of Condensate, Proc. US Eng. Foud. Conf., (1993) pp.171-182.
  - (6) 土方, 深作, 中別府, 水・エタノール混合蒸気の凝縮における液滴発生機構の不安定解析, 機論(B), Vol.60, No.572 (1994) pp.1337-1342.
  - (7) 宇高, 西川, レーザ吸光法による濃度差マランゴニ凝縮過程における凝縮液膜厚さの非定常測定 (試料の吸光性質と測定法の検討), 機論(B), Vol.68, No.672 (2002)
  - (8) 宇高, 剣持, 横山, 水・エタノール混合蒸気の凝縮熱伝達に関する研究 (濃度差マランゴニ滴状凝縮における液滴形成および離脱過程の観測), 機論(B), Vol.64, No.626 (1998) pp.3364-3370.
-