

(解説)

吸収式伝熱管「エンドクロス[®]ECT26」の臭化リチウム水溶液における液膜流動の可視化

Visualization of Lithium-bromide Solution Liquid Flow on Falling Film Type Enhanced Heat Transfer Tube "Endcross[®] ECT26" for Absorber of Absorption Chiller



高橋宏行*¹(工博)

Dr. Hiroyuki TAKAHASHI

A study was conducted to visualize the liquid film flow of a lithium-bromide (LiBr) solution in an enhanced heat transfer tube, "Endcross ECT26". This tube has been newly developed for falling-film absorbers of absorption chillers. A high-speed video camera with a frame rate of 500 frames per second was used for observation. The luminance of the captured image was converted using image processing software based on displacement concentration. The outer surface of the enhanced tube is provided with pyramidal projections formed with a pitch of 26 projections per inch (ppi). A tube with a smooth outer surface was also tested for reference. The conditions of the liquid film flow in an absorption process include an absorption pressure of 0.8kPa, LiBr concentration at the solution inlet of 63wt%, inlet cooling water temperature of 32°C and film Reynolds number of 19. The enhanced tube was found to exhibit a luminance motion different from that of the tube with a smooth surface.

まえがき＝吸収式冷凍機のなかでも、吸収液に臭化リチウム (LiBr)、冷媒に水が用いられる (以下、臭化リチウム/水系という) 空調用冷凍機は、駆動源としてガス、高圧蒸気、排熱などのほかに太陽熱エネルギーを使用しており、近年の省エネルギーニーズの高まりから、冷凍機メーカーで高性能機種種の開発ならびに量産が進んでいる。

吸収式冷凍機の主要熱交換器は吸収器、蒸発器、凝縮器および再生器で構成されている。主要熱交換器のなかで、吸収器は伝熱面積および容積が最も大きく、冷凍機全体の効率に大きな影響を及ぼすとともに、材料の使用量が多い。そのため、とくに吸収器に使用する伝熱管では、高性能化とともに使用材料低減の要望が非常に高くなっている。

臭化リチウム/水系吸収熱伝達における高性能伝熱管形状に関する研究が各種進められており、伝熱管外表面の溶液においてマランゴニ対流が発生することにより液膜が変動することが報告されている。しかしながら、高性能伝熱管外表面上での液膜流動を時系列的に観察した事例は少なく、流動状態の詳細が依然明らかにされていない部分が多い。今後、さらに伝熱管の高性能化を図るには、液膜の流動状態を把握することが極めて重要である。

(株)コベルコマテリアル銅管では、'85年頃より吸収式冷凍機用伝熱管の開発を進めている。最近では流下液膜式蒸発器用伝熱管として独立突起形状を有するエンドクロス管を開発し、水冷媒での流下液膜蒸発の伝熱特性を評価し、さらに液膜の流動性ならびに液膜蒸発の機構を考

察してきた¹⁾。また、流下液膜式吸収器用への適用を目的にこのエンドクロス管の流下液膜吸収性能を評価し²⁾、吸収熱伝達の向上ならびに使用材料の低減を提案してきた。しかしながら、エンドクロス管での蒸気吸収機構は未解明のままであった。

そこで、液膜流動の高速ビデオ撮影による可視化画像をもとに画像処理を行い、エンドクロス管における蒸気吸収時の臭化リチウム水溶液の液膜流動を観察し、吸収機構の考察を行ったので本稿でその概要を紹介する。

1. エンドクロス管の構造

流動観察および評価の対象としたエンドクロス管の形状概略図を図1に示す²⁾。この伝熱管は、管端部の外径

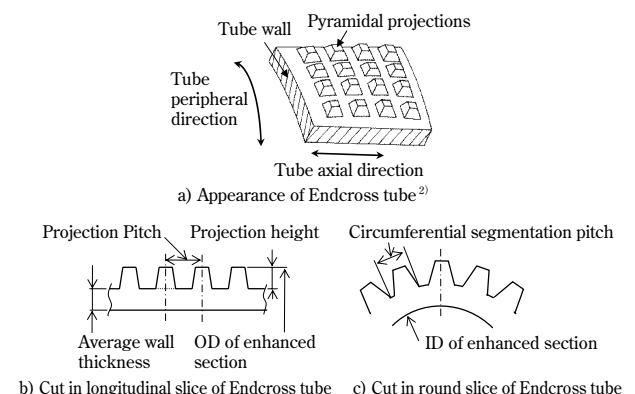


図1 エンドクロス管の形状概略図
Fig. 1 Schematic view of Endcross tube

*¹(株)コベルコマテリアル銅管 秦野工場 技術部

表1 エンドクロス管の形状仕様
Table 1 Specification of Endcross tube

Tested tube name	Endcross tube
OD of unenhanced section	16mm
Wall thickness of unenhanced section	0.60mm
OD of enhanced section D_o	15.73mm
Projection height	0.25mm
Circumferential segmentation pitch	0.625mm
Average wall thickness	0.55mm
ID of enhanced section D_i	14.13mm
Projection pitch	0.925mm

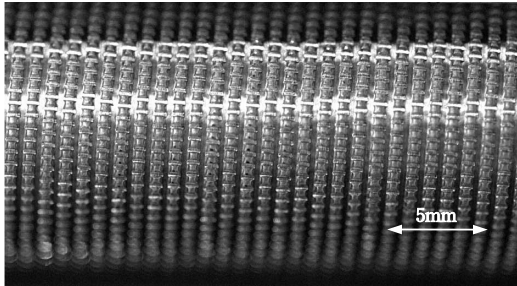


図2 エンドクロス管の外観写真²⁾
Fig. 2 Outside photograph of Endcross tube²⁾

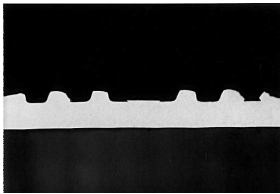


図3 エンドクロス管の断面写真 (管軸平行断面)²⁾
Fig. 3 Cross sectional view of Endcross tube (Cut in longitudinal slice)²⁾

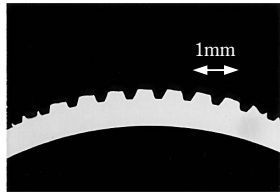


図4 エンドクロス管の断面写真 (管軸直角断面)²⁾
Fig. 4 Cross sectional view of Endcross tube (Cut in round slice)²⁾

が16mm、肉厚0.60mmの低りん脱酸銅管 (JIS H3300 C1201TS-1/2H) を素材として使用している。伝熱管の両端部にはOリングによりシールするための平滑部を設けている。また、伝熱管中央部の外表面には、四角錐台形の独立突起がらせん状に多数配置されている。この独立突起は、転造加工によってらせん状のローフィンを成形した後、それらのフィンを歯車状のディスクによってフィンの根元まで分断して形成している³⁾。

本稿で評価したエンドクロス管は、1インチあたり26フィンをベースにして製作した。また、管内表面は平滑面である。

表1に供試管として用いたエンドクロス管の形状仕様を示す。さらに参考までに、図2～図4にエンドクロス管の外表面、管軸平行ならびに管軸直角断面の写真を示す²⁾。なお、図3ならびに図4の断面写真において突起の形状が異なっているのは、突起をらせん状に成形しているためである。

2. 吸収液膜観察装置および観察条件

本稿にて使用した試験装置は、伝熱性能試験装置ならびに画像撮影装置で構成されている。図5に伝熱性能試験装置の概略図を示す。伝熱性能試験装置は、一重効用サイクルを構成しており、連続運転が可能になっている。吸収器本体は、幅360mm、長さ1,050mm、高さ860mmのSUS製シェルアンドチューブ熱交換器である。伝熱管は水平に設置する構造で、管端固定部はOリングにてシールしている。また、吸収器内には6本の伝熱管が垂直方向に1列6段配置されており、最上段の伝熱管上方には臭化リチウム水溶液を伝熱管に滴下するためのヘッダ管および滴下トレーが設置されている。さらに、吸収器の前面には、吸収液の流動が伝熱管の全域に渡って観察できるように厚さ50mmの亚克力製の観察用窓を設けている。その他伝熱性能試験装置の詳細は既報²⁾の論文を参照いただきたい。

図6に溶液の流下液膜流動の撮影装置を示す。溶液の流下液膜流動状況は、試験装置の観察窓から最上段の伝熱管の上部を撮影した。撮影機器は高速度ビデオカメラ (Photron, FASTCAM-PCI500) を用いた。レンズは一般の一眼レフ用レンズ (Nikon製ニッコールレンズ) を使用し、照明装置はメタルハライド光源にリング状のライトガイドをレンズに接続し、撮影部分に照射した。表2に伝熱性能評価ならびに撮影時の試験条件を示す。液膜

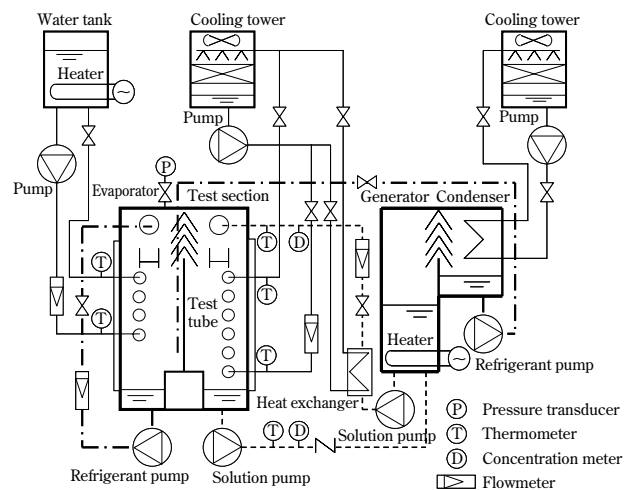


図5 性能試験装置の概略図²⁾
Fig. 5 Schematic diagram of experimental set-up²⁾

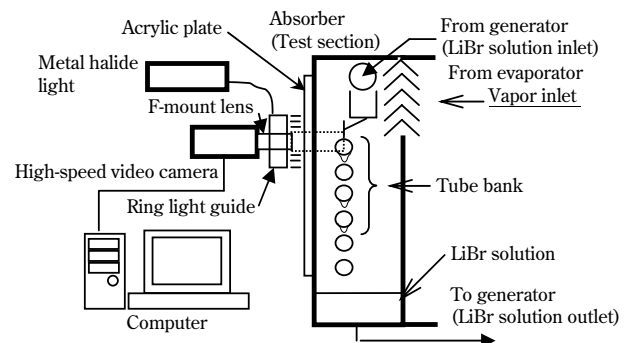


図6 流下液膜流動の撮影装置
Fig. 6 Appearance of photograph equipment

表2 試験条件
Table 2 Test conditions

Pressure in test chamber	0.8kPa
Concentration of solution inlet	63wt%
Cooling water velocity	1.5m/s
Inlet temp. of cooling water	32°C
Film Reynolds number	10 to 20
Surfactant	2-Ethylhexanol added
Frame rate	500 frames per sec.
Frame size	512×240 pixels

流動の撮影は、伝熱性能の試験条件にて定常となったことを確認した後に行った。撮影画像は、高速度ビデオ装置の制御用コンピュータに内蔵しているハードディスクに保存した。また、画像処理には濃度変位計測用のソフト（ライブラリ社 Gray-val）⁴⁾ を使用した。なお、臭化リチウム水溶液には、界面活性剤として2-Ethylhexanolを添加している。

3. 平滑管ならびにエンドクロス管の吸収熱伝達性能

エンドクロス管における膜レイノルズ数 R_{ef} に対する管外吸収熱伝達率 h_o 影響を図7に示す²⁾。同図には比較のため、平滑管（φ16mm×t0.6mm）での結果をも合わせて示した。なお、膜レイノルズ数 R_{ef} は、管片側を流れる溶液量を用いて算出した。

エンドクロス管の膜レイノルズ数による吸収熱伝達率

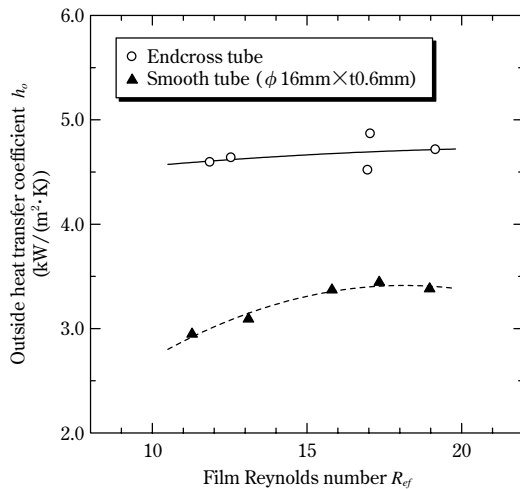


図7 膜レイノルズ数 R_{ef} に対する管外吸収熱伝達率 h_o の影響²⁾
Fig. 7 Variation of outside heat transfer coefficient h_o with film Reynolds number R_{ef} ²⁾

への影響は明確な依存性を示していないものの、膜レイノルズ数 R_{ef} が大きくなると吸収熱伝達率が高くなる傾向を示した。エンドクロス管の吸収熱伝達率は、平滑管と比較して約1.4~1.5倍に向上する。その他伝熱性能評価結果の詳細は、既報²⁾ の論文を参照いただきたい。

4. 平滑管ならびにエンドクロス管の液膜流動の観察

図8~図11は、最上段での伝熱管上部における臭化リチウム水溶液の液膜流動の様子を示す。高速度ビデオで撮影した画像の一部分から、0.02秒ごとに抽出した写真である。図8および図9は、平滑管を用いた場合における膜レイノルズ数 R_{ef} が12ならびに19での溶液液膜状態を、また図10および図11にはエンドクロス管における膜レイノルズ数 R_{ef} が12ならびに19での供試管最上段の上部での液膜形成状態を示す。

撮影した写真には溶液が隆起した部分が観察された。これは、Hozawaら⁵⁾ が報告している塩析効果により、溶液に蒸気が吸収された際に表面張力が増大し、溶液が引寄せられた部分と考えられる。平滑管とエンドクロス管での隆起部の幅を比較した結果、エンドクロス管の方が小さく、また周囲の液膜が薄膜化する傾向が観察された。これは、エンドクロス管は管下部における溶液の流下性が向上したためと考えられる。また、液膜が薄膜化する部分は、臭化リチウム水溶液の物質拡散速度を考えた場合、液膜が広い方が冷媒蒸気の吸収を促進させやすいと考えられる。

膜レイノルズ数の影響を比較した結果、平滑管は、 R_{ef} が大きくなるほど隆起部の幅が若干広がる傾向が見られるものの、隆起部は円周方向にほぼ真っすぐ流下する。しかし、 R_{ef} が小さくなると溶液の落下が滴下状態になり、管外表面が液膜で覆われる傾向が観察された。これは、低 R_{ef} では管下部での溶液が離脱し難くなり、管表面で溶液が保持されるためと考えられる。

一方、エンドクロス管は、 R_{ef} が大きくなると平滑管と同様に隆起部が形成されるものの、隆起部の幅が平滑管よりも狭い傾向が観察された。これは、突起上部に形成される隆起部の内部から、突起間溝部の液膜内での溶液の濃度勾配による表面張力の不均一性により発生する対流、すなわちマランゴニ対流が発生し、突起間溝部に溶液が流動するとともに、管下部に流下したためと考えら

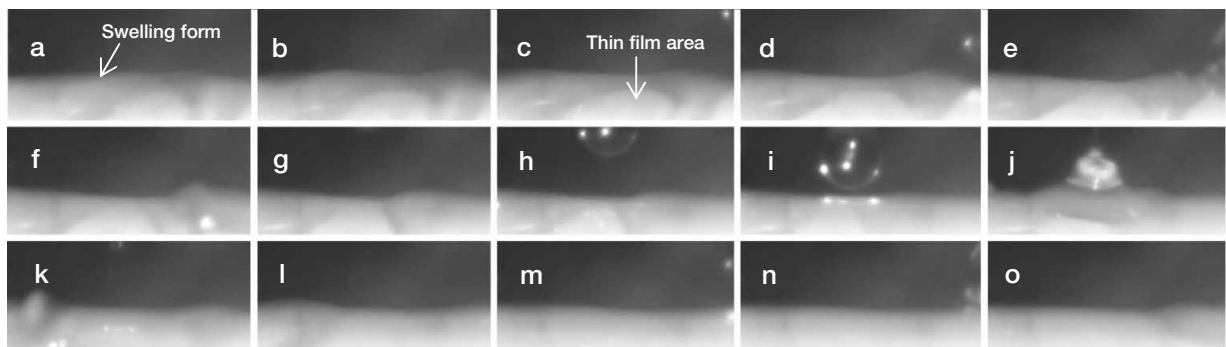


図8 平滑管の液膜流動写真（膜レイノルズ数 R_{ef} =12, 時間間隔=0.02秒）²⁾
Fig. 8 Solution flow of smooth tube (R_{ef} =12, Time interval=0.02s)²⁾

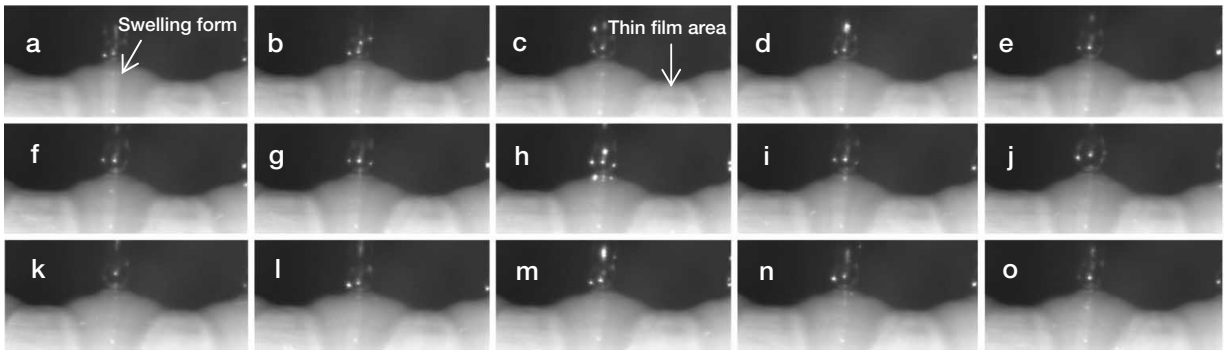


図9 平滑管の液膜流動写真 (膜レイノルズ数 $R_{ef}=19$, 時間間隔=0.02秒)²⁾
 Fig. 9 Solution flow of smooth tube ($R_{ef}=19$, Time interval=0.02s)²⁾

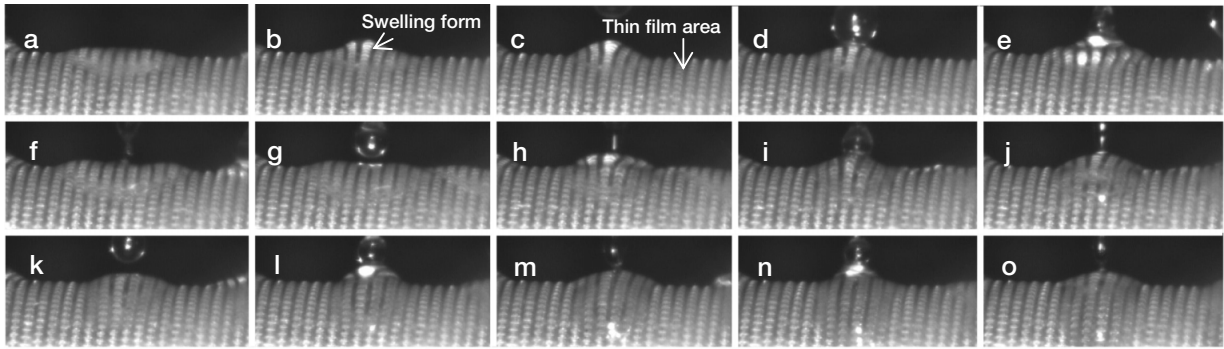


図10 エンドクロス管の液膜流動写真 (膜レイノルズ数 $R_{ef}=12$, 時間間隔=0.02秒)²⁾
 Fig.10 Solution flow of Endcross tube ($R_{ef}=12$, Time interval=0.02s)²⁾

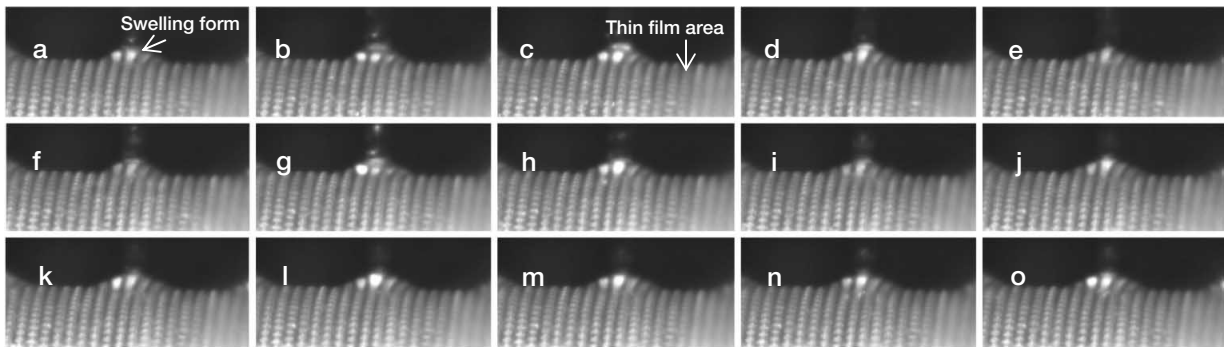


図11 エンドクロス管の液膜流動写真 (膜レイノルズ数 $R_{ef}=19$, 時間間隔=0.02秒)²⁾
 Fig.11 Solution flow of enhanced tube ($R_{ef}=19$, Time interval=0.02s)²⁾

れる。また、エンドクロス管は、 R_{ef} が小さくなって溶液が滴下状態になった場合でも隆起部が形成されているとともに、その周囲に薄膜化した部分が形成される傾向が観察された。これも、 R_{ef} が大きいときと同様に、突起上部に形成される隆起部の内部から突起間溝部の液膜に向かってマランゴニ対流が発生していたことによるものと考えられる。

5. 平滑管ならびにエンドクロス管の液膜流動画像の画像処理結果

管表面の液膜に隆起する部分の管軸方向への移動量を測定することを目的に画像処理を実施した。図12に画像処理部位の概略図を示す。撮影した画像の大きさは 512×240 pixelsである。画像内の管軸方向をX軸、下部方向をY軸とし、画像の左上を原点(0, 0)とした。このとき、画像の右下が(511, 239)となる。また、画像処理対象部位は、溶液流下部の中心部 (Area-1, 処理サイズ: 60×150 pixels) ならびに溶液流下右側部 (Area-2,

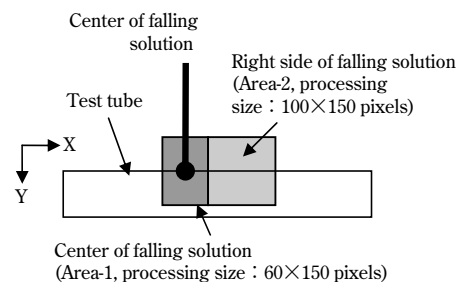


図12 画像処理部位の概略図
 Fig.12 Schematic of image processing areas

処理サイズ: 100×150 pixels) とした。

この画像処理に使用した濃度変位計測用ソフトは、処理対象部位をいったん8ビットで輝度変換しており、溶液の液膜が厚い場合は輝度が低くなり、薄い場合は輝度が高くなる。本稿での画像処理では、処理対象部位中の最低輝度座標を算出し、時間変化に対する最低輝度部分におけるX軸方向の移動を計測した。

図13 および図14 はそれぞれ、膜レイノルズ数 $R_{ef}=19$

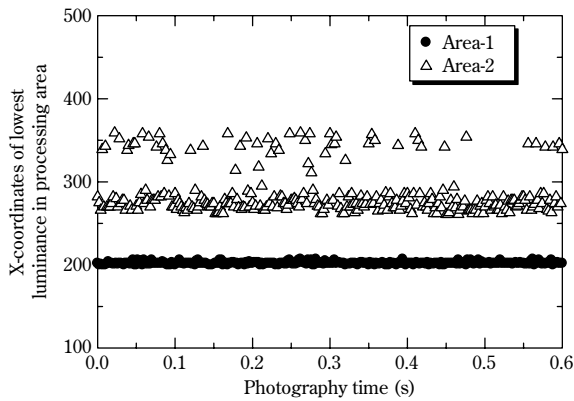


図13 平滑管の画像処理結果 (膜レイノルズ数 $R_{ef}=19$)
Fig.13 Results of image processing for smooth tube ($R_{ef}=19$)

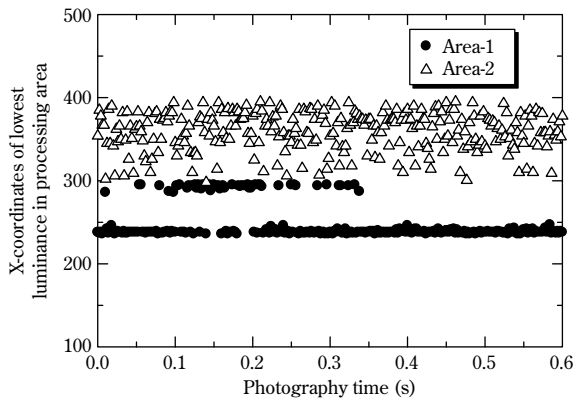


図14 エンドクロス管の画像処理結果 (膜レイノルズ数 $R_{ef}=19$)
Fig.14 Results of image processing for Endcross tube ($R_{ef}=19$)

における平滑管およびエンドクロス管の画像処理結果を示す。

平滑管の画像処理結果を見ると、溶液流下部の中心部 Area-1 では最低輝度部分の X 軸方向の移動が小さい。しかし溶液流下右部 Area-2 では、時間変化とともに最低輝度部分が X 軸方向へ移動する傾向を示している。つまり、Area-1 の溶液流下部では溶液の X 軸方向への移動変化がなく安定的に流下し、Area-2 の溶液流下側部では溶液が X 軸方向へ揺らぎながら流下している。これは、マランゴニ対流による溶液の流動によるものと考えられる。

一方、図14に示したエンドクロス管での結果から、溶液流下右部 Area-2 は、平滑管と同様に最低輝度部分の X 軸方向へ移動する傾向を示し、その移動頻度が平滑管よりも多い傾向を示している。また、溶液流下部の中心部 Area-1 においては、ほぼ一定位置にあった平滑管の傾向と異なり、時間変化とともに最低輝度部分が X 軸方向へ移動する傾向を示している。エンドクロス管においては、溶液流下側部 (溶液流下右部, Area-2) では突起先端部と突起間溝部での濃度差が生じやすいことにより、マランゴニ対流が発生しやすいうえに、溶液流下部にて観察された隆起部の溶液が溶液流下側部にも流動していると考えられる。

むすび=エンドクロス管での蒸気吸収時の臭化リチウム水溶液の液膜流動について、高速度ビデオによる撮影画像をもとに画像処理を実施した。その結果、管外表面での溶液の管軸方向へ移動量が平滑管と比較して大きいことが分かった。引き続き、より詳細な画像処理による流動特性に関する解析を行い、吸収式用伝熱管の形状開発ならびに使用材料低減への取組に反映させていく予定である。

参考文献

- 1) H. Takahashi et al. Falling Film Evaporation Heat Transfer of Water On Pyramidal Projection Type Enhanced Heat Transfer Tubes. Proceedings of the 3rd Asian Conference on Refrigeration and Air conditioning, Korea. May 21-23, 2006, Vol.2, p.825-828.
- 2) H. Takahashi et al. Experimental Study of Falling Film Absorption Heat and Mass Transfer On Pyramidal Projection Type Enhanced Tube With LiBr Solution. Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference 2008. Korea. Sep. 23-26, 2008. AB-113.
- 3) 神戸製鋼所アルミ・銅事業部門販売網機関誌「アイル」、新やさしい技術—加工管。2003-3, http://www.kobelco.co.jp/alcu/technical/copper/1174613_12414.html, (参照 2012-4-11)。
- 4) 株式会社ライブラリ。Gray-val users manual Ver.2.1. 2004.
- 5) M. Hozawa et al. J. Chem. Eng. Jap. 1991, Vol.24, No.2, p.209-214.