

蒸氣吸收時 界面活性劑液滴間에 發生하는 마랑고니對流舉動의 可視化

Visualization of Marangoni Convection Behavior between Two Surfactant Dropwises in the Process of Steam Absorption

李 東 浩,* 崔 國 光,** 柏木孝夫,*** 徐 正 閔****
D. H. Rie K. K. Choi T. Kashiwagi J. Y. Seo

Key Words : Marangoni Convection(마랑고니대류), Laser Holography Interferometry(레이저 간섭법), Vapor Absorption Enhancement(증기흡수 촉진), Tracer Method(트레이서법), Absorption type Heat Pump(흡수식 열펌프)

ABSTRACT

In most absorption machines, absorption enhancement has been achieved by adding small amount of surfactant additive, which introduced the surface tension difference between absorbent and surfactant droplets in the vapor absorption. The aim of this study is to understand a basic mechanism of Marangoni convection and its effectiveness in the vapor absorption enhancement. In this study, nonflowing aqueous solution of LiBr 60 mass% was exposed to saturated water vapor under the condition that two dropwises surfactant were fixed on the absorbent surface. Our experiments achieved to visualize the enhanced heat and mass transfer phenomena by the effect of Marangoni convection through the laser holographic interferometry. Also, Marangoni convection behavior was obtained by using tracer method.

기호설명

W : 계면활성제 첨가농도

\bar{t} : 증기흡수시간

σ_1 : 흡수용액의 표면장력(증기吸收前)

σ_1' : 흡수용액의 표면장력(증기吸收後)

σ_2 : 氣·液 界面張力

σ_3 : 液·液 界面張力

1. 緒 論

액체의 表面張力은 일반적으로 溶液溫度 및

* 正會員, 仁川大學校 産業安全工學科

** 正會員, 仁川大學校 機械工學科

*** 東京農工大學 機械시스템工學科

**** 正會員, 仁荷大學校 機械工學科

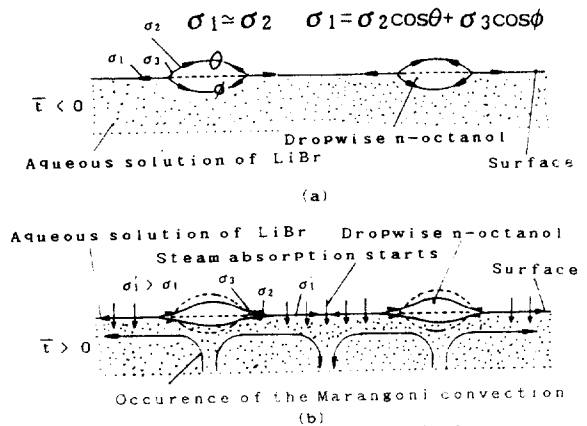
溶解되어 있는 物質의 濃度에 의존한다. 따라서, 氣·液界面의 溫度 및 濃度가 일정하지 않을 경우에는 表面張力의 勾配에 起因하는 流動¹⁾이 발생하게 된다. 이러한 表面張力의 不均衡에 의하여 발생하는 流動을 마랑고니對流(Marangoni Convection)라고 한다. 이러한 마랑고니對流의 중요한 現狀중에서도 宇宙공간의 微小 重力場에서의 單結晶生成(GaAs, GaP)의 일환으로 溫度, 濃度가 共存하는 場에서의 마랑고니對流의 거동을 解析함으로서 高品質單結晶제조에 대한 研究를 비롯하여 合金제조, 新素材 제조와 관련된 활발한 研究²⁾가 행해지고 있다. 또한, H₂O/LiBr系 吸收式熱펌프의 吸收器内の 蒸氣吸收促進方法^{3,4)}으로 널리 이용되고 있는 界面活性劑첨가에 의한 마랑고니對流의 이용을 들 수 있다. 吸收器内の 蒸氣吸收과정은 吸收溶液表面에서의 熱 및 物質移動이 동시에 발생하며 物質擴散係數값이 熱擴散係數에 비하여 현저히 작은값(Le=D/α=0.01)을 나타내기 때문에 吸收表面에서의 冷媒蒸氣(H₂O) 吸收로 인한 濃度低下 및 吸收熱의 放出로 인한 表面溫度相乘에 따른 飽和蒸氣壓의 上昇으로 蒸氣吸收能力이 低下된다. 이러한 短點을 개선하기 위하여 吸收溶液에 界面活性劑를 첨가시켜 蒸氣吸收시 吸收溶液과 界面活性劑간의 表面張力차에 의한 界面攪亂效果(The effect of interfacial disturbance)가 吸收促進方法으로 이용되고 있으며 이때 발생하는 마랑고니對流은 吸收器内の 吸收表面을 攪亂⁵⁾시킴으로써 吸收溶液내부로 熱 및 物質이동을 促進시킨다.

本 研究에서는 吸收式熱펌프의 性能 개선의 일환으로서 일반적으로 유효한 수단으로 이용되고 있는, 界面活性劑(Surfactant)첨가에 의한 마랑고니對流(Marangoni Convection)效果로서 吸收溶液內部的 熱 및 物質傳達促進현상을 과약하기 위한 方法으로 레이저 計測應用的 한 분야인 레이저 홀로그래피 간섭法(LHI: Laser Holography Interferometry)을 이용하여 可視化를 시도하였다. 또한, 트레이서法(Tracer method)을 이용하여 冷媒蒸氣(H₂O) 吸收時의 마랑고니對流 거동을 관찰하고 界面活性劑첨가에 의한 蒸氣吸收促進方法의 有效性 및 마랑고니對流 발생

거구에 대한 지표제시를 목적으로 한다.

2. 마랑고니對流

吸收溶液에 界面活性劑를 飽和溶解濃度(W) 0.01mass%) 이상으로 첨가할 경우, 界面活性劑는 液滴의 상태로 吸收表面에 존재하게 된다. 이 상태하에서 冷媒蒸氣는 界面活性劑液滴을 제외한 溶液表面에서 吸收가 일어나게 된다. 이로 인하여 吸收溶液表面濃度の 低下에 따라 表面張力은 增大하게 된다. 결과적으로 증기가 흡수되기 전($\bar{t} < 0$)의 평형상태에서는 Fig. 1(a)와 같이 吸收溶液의 表面張力 σ_1 과 界面活性劑의 界面張力 σ_2, σ_3 와의 관계는 $\sigma_1 = \sigma_2 \cos\theta + \sigma_3 \cos\phi$ 로 나타낼 수 있다. 蒸氣吸收가 개시되면 ($\bar{t} > 0$) 吸收溶液 表面濃度の 低下에 따른 表面張力의 증가에 起因한 吸收溶液의 表面張力 σ_1' 는 σ_1 보다 큰값을 갖게됨에 따라 Fig. 1(b)와 같은 界面活性劑液滴의 주변에서 마랑고니對流가 발



(a) Before vapor absorption beginning.
(b) After vapor absorption beginning.

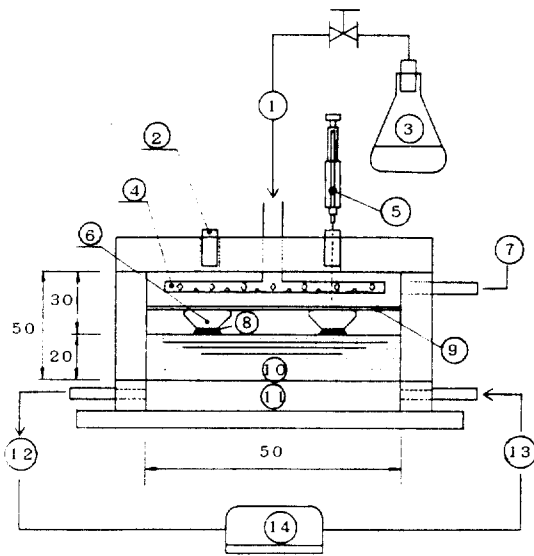
σ_1 : Surface tension of the aqueous solution of LiBr with the molecular layer of n-octanol
 σ_1' : σ_1 just after the steam absorption starts
 σ_2' : Surface tension of n-octanol
 σ_3' : Surface tension between n-octanol and the aqueous solution of LiBr

Fig. 1 Model of the mechanism generating Marangoni convection:

생가능케 된다.^{7,8)} 한편, 吸收溶液表面의 界面活性劑液滴은 表面張力의 不均一에 起因한 界面流動이 발생하기 때문에 界面活性劑液滴間에 발생하는 마랑고니對流의 可視化는 어려우며 表面에 分散된 液滴間의 종합적인 攪亂으로 吸收溶液表面에서 복잡한 界面攪亂이 발생하게 된다.

本 研究에서는 界面活性劑容器를 吸收溶液表面에 설치하여 界面活性劑가 항상 吸收溶液表面의 일정 장소에서 지속적으로 마랑고니對流를 발생가능하도록 하였다.

Fig. 2는 本 實驗의 吸收實驗部를 나타낸 장치도이다. 蒸氣吸收面積 $1.25 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ($0.025 \times 0.05 \text{m}^2$), 높이 $20 \times 10^{-3} \text{m}$ 의 溶液内部에서 발생하는 對流의 可視化가 가능하도록 외벽은 진공



- ① Vapor from evaporator
- ② Surfactant injection hole (cylicon rubber)
- ③ Evaporator
- ④ Vapor distributor
- ⑤ Micro-cylinge
- ⑥ Surfactant container
- ⑦ Evacuate from vacuum pump
- ⑧ n-Octanol
- ⑨ Support beam
- ⑩ LiBr Aqueous solution
- ⑪ Cooling chamber
- ⑫ Cooling water outlet
- ⑬ Cooling water inlet
- ⑭ Circulation pump

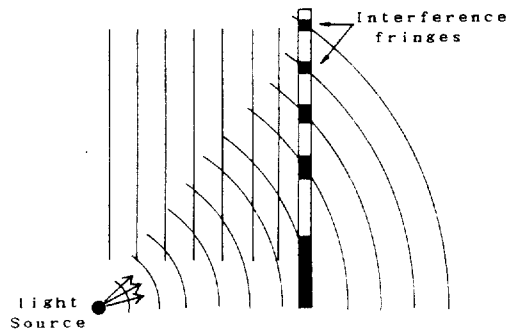
Fig. 2 Test section of Marangoni convection visualization.

(절대압력 2mmHg)에 충분히 전달 수 있는 두께 $10 \times 10^{-3} \text{m}$ 의 光學用석영 유리를 사용하였다. 또한, 마랑고니對流가 지속적으로 발생하도록 吸收溶液밀면에 냉각실을 설치하였다. 實驗에 사용된 吸收溶液으로는 吸收式熱펌프에 사용되는 리튬브로 마이드水溶液($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, 60mass%)을, 界面活性劑로서는 실용적으로 많이 쓰이고 있는 노말옥탄올(n-Octanol)을, 冷媒로는 蒸溜水를 사용하였다.

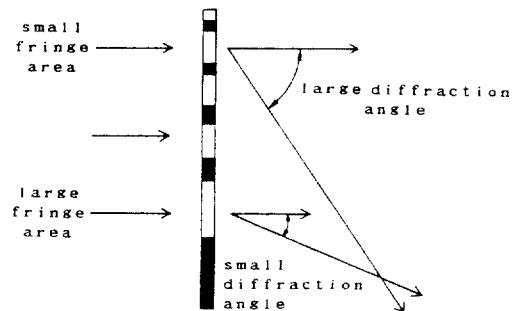
3. 레이저 홀로그래피法을 이용한 熱 및 物質이동의 可視化

3.1 홀로그래피法

本 研究에 이용한 레이저 홀로그래피法(Laser Holographic Interferometry)의 원리를 Fig. 3(a)



(a) The recording of interference fringes



(b) The reappearance of light Source.

Fig. 3 Principles of holography

및 (b)에 나타내었다. 点光源으로부터 간섭성을 갖는 레이저光(위상에 따라 于涉縞를 발생시킬 수 있는 光)과 다른 방향으로 부터의 레이저光을 홀로그람용의 미립자건판상(기록재)에 중복시켜 기록하게 되면 Fig. 3의 (a)와 같은 于涉縞(Interference Fringe)가 기록되게 된다. 이 건판을 현상하면 일종의 廻析格子(Diffraction Grating), 즉 홀로그람(Hologram)이 된다. 이것에 于涉縞가 기록된 방향으로 부터 간섭光(Coherent Light, 여기서는 레이저光)을 조사하게 되면 參照光은 현상된 건판(廻析格子)에서 廻析하게 된다. 廻析光은 Fig. 3 (b)로 부터 알 수 있는 바와 같이 廻析格子의 간격이 좁은 곳은 큰 廻析角으로, 간격이 넓은 곳은 작은 廻析角으로 廻析하게 된다. 결과적으로 전체의 廻析光은 원래의 点光源을 재현하게 된다. 같은 方式으로 2곳의 点光源으로부터 于涉縞를 건판에 기록할 경우, 2개의 서로 다른 정보를 갖는 于涉縞가 겹쳐져 기록되게 된다. 또한, 각각의 于涉縞는 点光源의 강도에 비례하여 2곳의 点光源으로부터 빛이 진행해 오고 있는 것과 같이 廻析格子에서 廻析되게 된다. 실제의 경우와 같이 정보를 얻고자 하는 물체의 点光源이 무수히 많은 경우에 도 같은 方式으로 설명이 가능하다. 이상과 같이 간섭성을 갖는 光(Coherent Light)으로 물체를 照射시켜 물체의 位相變調와 强度變調를 받은 物體光(Object Beam)과 變調되지 않은 다른 간섭성의 參照光(Reference Beam)을 동시에 건판상에 겹쳐서 于涉光을 만들고, 于涉縞의 형태로 공간정보를 기록한 것이 홀로그래피의 원리이다. 이러한 홀로그래피법은 고체의 形狀, 비틀림, 유체의 屈折率分布, 速度分布 등의 計測에 널리 사용되고 있다. 本實驗에서는 吸收溶液을 통과하는 物體光과 초기상태를 기록한 홀로그람의 재현에 사용된 參照光과의 于涉縞를 얻음으로서 蒸氣吸收에 따른 溶液内部의 변화에 따른 정보를 시간의 경과에 따라 파악할 수 있는 실시간 홀로그래피法⁹⁾을 이용하였으며 레이저光源으로는 출력 30mW, 발진파장 $\lambda=632.8\text{nm}$ 의 He-Ne 가스레이저(He-Ne Gas Laser)를 사용했다. 홀로그람용건판은 Agfa사의 Gevaert Scientia의 Glass Plate 8E75(分解能 2000 本/mm) 및 寫眞記錄用 필름으로는 Kodak사의 TRI-X Pan

Film(ASA400)을 사용하였다.

3.2 實驗裝置 및 方法

Fig. 4는 실시간 홀로그래피의 光學計測部를 나타내며 다음순서에 따라 可視化實驗을 실시하였다.

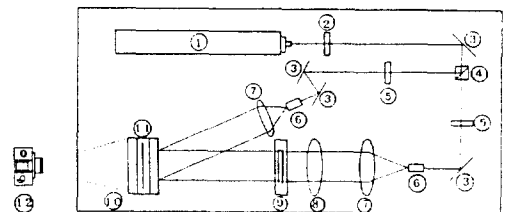
(1) 吸收溶液을 界面活性劑容器에 부착이 되지 않도록 $20 \times 10^{-3}\text{m}$ 의 높이까지 可視化容器内에 注入시킨다.

(2) 吸收容器내부에 존재하는 不凝縮性가스(Noncondensable Gas)의 영향을 최소한도로 줄이기 위하여 진공펌프를 사용하여 吸收容器와 冷媒증발기의 압력을 吸收溶液溫度(293K)에 상당하는 포화압력(2mmHg)까지 충분히 내린다.

(3) 약 10분~20분 경과후, 吸收溶液내부가 안정상태에 도달하면 레이저를 이용하여 홀로그람을 작성한다.

(4) 마이크로셀린지(Micro-cylinge, 최대용량 $30\mu\ell$)를 이용하여 界面活性劑를 吸收器内에 설치된 界面活性劑容器内에 注入(n-octanol, $15\mu\ell$)시킨다.

(5) 界面活性劑가 吸收面과 부착된 상태를 확인한 후 증발기로부터 冷媒蒸氣를 吸收器内로 주입함과 동시에 자동현상장치(Auto Processing Machine)로부터 현상된 홀로그람에 參照光과 物體光을 동시에 照射시킴으로서 나타나는 마랑고니對流의 간섭무늬를 사진에 기록한다.



① He-Ne laser ($\lambda=632.8\text{nm}$) ② Beam shutter ③ Mirror ④ Beam splitter ⑤ N. D. Filter ⑥ Pinhole ⑦ Lens ⑧ Diffusion screen ⑨ Test section ⑩ Liquid gate ⑪ Hologram ⑫ Camera

Fig. 4 Optical setup for holographic interferometry and explanation of symbols.

3.3 홀로그래피법에 의한 可視化 結果

실시간 홀로그래피법으로 얻은 마랑고니對流에 의한 熱 및 物質이동의 可視化寫眞 및 마랑고니대류의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 吸收表面의 冷媒蒸氣(H₂O)의 濃度는 界面活性劑液滴을 제외한 吸收界面에서 上昇하게되며 이로 인하여 表面張력이 급속히 증가됨(Fig. 1(b) 참조. $\Delta\sigma = \sigma_1' - \sigma_1 = 20 \times 10^{-3} \text{N/m}$)에 따라 界面活性劑와 吸收溶液사이의 表面張力の 不均一로 마랑고니對流가 발생하게 된다. 실시간 홀로그래피법으로 부터 관찰된 干涉縞는 蒸氣吸收에 수반된 熱 및 物質이동의 종합적인 정보로서 溶液내부의 국부적 密度차에 의한 屈折率의 變化를 나타낸다. 따라서 Fig. 5는 吸收表面에서 발생된 吸收현상이 마랑고니對流效果에 의하여 吸收溶液깊이방향으로 效率적으로 이동시킨 결과에 起因된 溫度 및 密度의 종합적인 干涉縞라는 것을 알 수 있다. 또한, 干涉縞의 분포 및

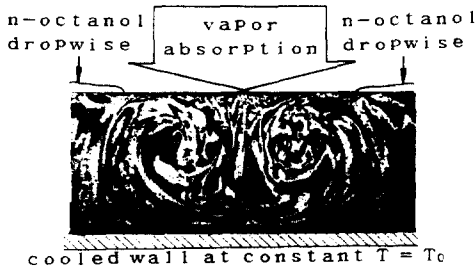


Fig. 5 Visualization of heat and mass transport by using holographic interferometry

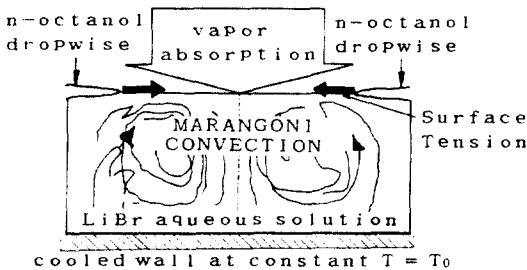


Fig. 6 Schematic of heat and mass transport by the effect of Marangoni convection between two surfactant droplets.

界面活性劑 액적간에 발생하는 마랑고니對流의 메카니즘(Fig. 1)을 종합적으로 고려하면 마랑고니對流의 발생은 Fig. 6에 나타낸것과 같이 界面活性劑液滴간의 中間부분에서 溶液깊이 방향으로 이동되는 효율적인 對流현상을 관찰할 수 있으므로 界面活性劑液滴사이의 마랑고니對流발생에 의한 熱 및 物質移動의 妥當性이 입증되었다.

4. 트레이서법에 의한 마랑고니對流의 可視化

4.1 트레이서法

界面活性劑液滴간의 마랑고니對流의 흐름상태를 보다 면밀히 把握하기 위한 方法으로 트레이서(Tracer)의 첨가에 의한 可視化를 시도하였다. 트레이서法은 流體粒子의 운동을 직접 가시화할 수 있도록 유체와 함께 움직이는 트레이서를 注入시키므로서 정상류 또는 비정상류의 흐름상태를 把握할 수 있는 장점이 있다. 본 可視化에서 사용된 트레이서는 알루미늄粉末(5 μm 입자)을 사용 하였으며, 알루미늄粉末의 특성은 빛을 잘 반사하고 사진감도가 뛰어나기 때문에 저속류로부터 고속류까지 폭넓게 사용되고 있는 점을 들 수 있다.

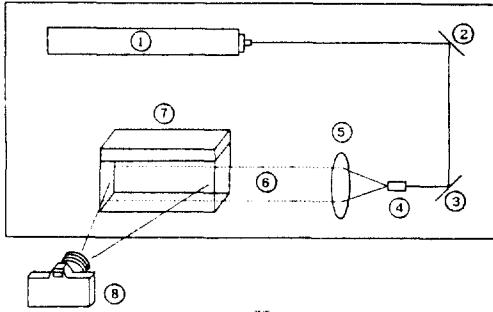
4.2 實驗裝置 및 方法

Fig. 7에 트레이서法의 光學計測部를 나타내며 다음 순서에 따라 가시화 實驗을 실시하였다.

(1) 알루미늄粉末을 혼합한 吸收溶液을 界面活性劑容器에 부착이 되지 않도록 $20 \times 10^{-3} \text{m}$ 의 높이까지 注入한다.

(2) 吸收容器내부에 존재하는 不凝縮性가스(Noncondensable Gas)의 영향을 최소한도로 줄이기 위해서 진공펌프를 이용하여 각각의 吸收容器와 冷媒증발기의 압력을 溶液溫度에 상응하는 飽和壓力까지 충분히 내린다.

(3) 圓筒形렌즈(Cylindrical Lens)를 통과하여 平面光(Slit Beam)으로 조정된 Ar⁺ 레이저光(Ar Ion Laser光)을 吸收容器 밀면과 垂直으로 入射시킨다.



① Ar laser ② Mirror ③ Mirror 2 ④ Pin hole
⑤ Cylindrical lens ⑥ Fan-beam of laser ⑦ Test section ⑧ Camera

Fig. 7 Optical setup for observation of Marangoni convection and explanation of symbols.

(4) 마이크로셀린지(Micro-cylinge)를 이용하여 계면활성제를 흡수器內에 설치된 계면활성劑容器內에 注入시킨다.

(5) 계면활성劑가 吸收面과 부착된 상태를 확인한 후 증발기로부터 冷媒蒸氣를 吸收容器內에 주입시킴과 동시에 마랑고니對流에 따라 움직이는 알루미늄입자로부터 산란된 빛을 사진기의 필름(Fuji NEOPANSS, ISO100)에 기록한다.

4.3 트레이서法에 의한 마랑고니對流의 可視化 結果

트레이서法에 얻은 마랑고니對流의 可視化 寫眞을 Fig. 8에 나타냈다. 트레이서法으로 부터 관찰된 계면활성劑間의 마랑고니效果에 의한 對流의 가시화결과는 홀로그래피法으로 예상된 마랑고니對流과 잘 일치함을 알 수 있으며 마랑고니對流의 발생은 계면활성劑液滴과의 중간 부분에서 溶液깊이 방향으로 이동되는 對流의 발생으로 나타남을 확인하였다.

5. 結 論

吸收式熱펌프의 성능향상을 꾀하기 위한 수단으로 이용되고 있는 계면활성劑(n-Octanol)첨

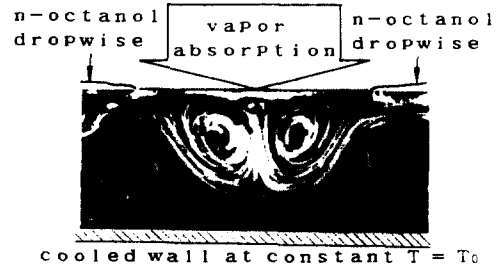


Fig. 8 Marangoni convection behavior between two surfactant dropwises by using tracer method.

가에 의한 界面攪亂의 발생요인을 규명하기 위하여 吸收溶液表面의 2곳에 설치된 계면활성劑液滴에서 冷媒蒸氣吸收시 발생하는 마랑고니對流에 의한 熱 및 物質이동 및 對流에 대하여 홀로그래피法과 트레이서法을 이용하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 마랑고니對流效果는 吸收表面으로 부터 냉각면으로 效率的으로 吸收熱을 이동시킴과 동시에 吸收溶液의 溫度를 低下시켜 蒸氣吸收 促進에 效果의임이 확인되었다.

(2) 계면활성劑에 의한 界面攪亂의 발생은 계면활성劑液滴과 液滴사이에서 볼 수 있는 마랑고니對流발생에 起因함을 證明하였다.

參 考 文 獻

1. Kurogaki, V., 1989, "Effect of Marangoni convection on the temperature profiles of a free surface subject to nonuniform radiative heating", *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp.365-373.
2. Morioka, M., 1984, "Two-dimensional natural convection driven by surface tension and buoyancy generated in liquid layer", *Proceeding of the 14th international symposium on space technology and science*, pp.1591-1597.
3. 柏木孝夫, 1988, "Basic knowledge for the inducement of the Marangoni convection by the addition of higher alcohol in the process of vapor absorption into the absorbent solu-

- tion, Proc. of 3rd, International meeting of absorption exports, Dallas Texas.
4. Hozawa, M., 1989, "Interfacial turbulence during the absorption of steam by LiBr aqueous solutions", F. V. S. J., Vol. 9, No. 34, pp.99-102.
 5. Kashiwagi, T., 1988, "Basic mechanism of absorption heat and mass transfer enhancement by the Marangoni effect", IEA, Vol. 6, No. 4, pp.2-6.
 6. Kashiwagi, T., 1988, "Marangoni effect in the process of steam absorption into the falling film of the aqueous-solution of LiBr", the 1st KSME-JSME Thermal and Fluids engineering conference, Seoul, Korea, Vol. 1, pp.205-210.
 7. Zawaki, T., 1973, "The effect of additives on the level of instability of gas/liquid interface", 75th National meeting of A. I. Ch. E., Detroit, Michigan.
 8. 李東浩, 1989, "マラソコニ効果による溶液中への蒸氣吸収促進課程に関する數値解析", 日本冷凍學會學術論文集, pp.29-32.
 9. Kashiwagi, T., 1983, "A study of steam absorption into the aqueous solution of LiBr using Holographic interferometry", XVIth International Congress of Refrigeration, pp.111-117.
 10. 柏木孝夫, 1983, "LiBr水溶液中の水蒸氣吸収機構に関する研究", 日本冷凍學會學術論文集, pp.25-28.