充填物板上での液膜流における板表面構造（波板）の影響*

Effect of the Surface Texture Treatment (Wavy Plate) on the Liquid Film Flow on a Plate of Packings

磯 良 行**
ISO Yoshiyuki

池 田 諒 介**
IKEDA Ryosuke

山 本 充 俊**
YAMAMOTO Mitsutoshi

加 藤 健 司***
KATOH Kenji

脇 本 辰 郎***
WAKIMOTO Tatsuro

Abstract Gas-liquid interfacial flows, such as liquid film flows (also known as wetting flows on plates), are encountered in many industrial processes including absorption, distillation and so on. The present study focuses on detailed descriptions of the transition phenomena between the film flow and the rivulet flow, as well as how such phenomena are affected by surface texture treatments on plates. This study uses a numerical simulation of Computational Fluid Dynamics (CFD) with the Volume of Fluid (VOF) model as well as an experimental measurement technique. Through the comparison of two geometry cases (smooth surface and wavy surface) which are the models simplified from typical structured packings, the numerical and experimental results show that surface texture treatments can help to prevent the liquid channeling and can increase the wetted area. The main reason for increasing the wetted area on the wavy surface is that the liquid film break-up is inhibited due to the increasing of liquid film thickness on the plate as well as the spreading of the liquid flow in spanwise direction by the wavy surface geometry.

Keywords: Liquid film flow, Gas-liquid interfacial flow, Packed column, Break-up, Surface texture

1. 緒 言

液膜流のような気液界面流は、吸収塔や蒸留塔などの気液接触を行うプロセスで多く用いられる。これらの機器では、気液接触面積や気液間物質移動速度を増加させる目的で、塔内に充填物を設置して気液界面流を制御することが重要となる。充填物を備えもつ充填塔では一般的に、液体を充填物の上方から供給して充填物表面に沿って液体を流下させるとともに、気体を充填物の下

部から供給して、気体と液体とを接触させる。運転条件として液流量が少ない場合には、充填物上で液膜流が破断や偏流（チャネリング）して液柱流や液滴流が形成され、気液接触面積が著しく減少する場合がある。そこで本研究では、充填物として用いられる規則充填物を模擬し、傾斜板上での気液界面流に着目する。

従来、液膜流に関する理論的な研究が行われており、二次元場での液膜厚さや液流速分布などが

* 2016. 11. 14 受付

** 株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 熱・流体研究部
〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1 番地

TEL: (045)759-2868 FAX: (045)759-2208 E-mail: yoshiyuki_iso@ihi.co.jp

*** 大阪市立大学大学院工学研究科 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 TEL:(06)6605-2665

数式化されている[1-3]。ただし、二次元場での理論解析では、液膜流の破断やチャネリングなどの三次元的な流動に関しては明らかになっていない。一方、実験的な研究では、充填物形状や流動条件を変化させて、気液間物質移動速度の計測や推算式の導出が行われている[4-10]。しかし、これらの研究は固有の装置形状や実験条件に依存しており、気液流動現象と気液間物質移動との関連性を詳細に解明するための基礎的な知見は少ない。近年、数値流体解析（Computational Fluid Dynamics: CFD）を用いて、傾斜板や充填物での気液流れの数値解析が行われており、液膜の形状や厚さ、濡れ面積、液ホールドアップ、気相の圧力損失、液物性の液流れへの影響、などの予測結果が報告されている[2, 11-16]。さらに、単一の液体だけでなく、二つの異なる液体が混在する液膜流に対して、CFD による予測を行った研究例もあり、液膜流のチャネリングが液流れの三次元性に強く依存することが示された[17-19]。

このように理論解析、実験、数値解析によって有益な知見が得られているが、液膜流の破断やチャネリングで重要となる液膜流と液柱流の間の遷移現象を調べた研究は少ない。

そこで本研究では、傾斜板での液膜流を対象に液膜流と液柱流の遷移や濡れ面積などを調べた[20, 21]。本報では、平滑板と波板を対象に界面追跡法（VOF）による数値解析および、可視化による濡れ面積計測やレーザーフォーカス変位計

（Laser Focus Displacement Meter: LFD）による液膜厚さ計測を行い、気液界面形状や濡れ面積に加えて、液膜厚さや液膜内流れを調べることによって、板表面の微細凹凸が液膜破断に及ぼす影響の把握を試みる。

2. 対象流れ

対象流れの概略を Fig. 1 に示す。規則充填物で多く用いられる傾斜板上での気液界面流を対象とする。傾斜板は流下方向に 60mm、流れと直角方向（水平方向）に 50mm の形状とし、両端に側壁を持つ。傾斜板および側壁の板素材はステンレス鋼であり、傾斜板の傾斜角度 α は地面に対して 60 度とする。傾斜板は、板表面が平滑な板（平滑板：2B 材、平均表面粗さ $3.2\mu\text{m}$ ）と、三角波状の波板（深さ $2a=0.6\text{mm}$ 、ピッチ $\lambda=2.8\text{mm}$ 、Fig. 1(b)）の二種類を用いる。なお、傾斜板が平滑と波板の両方の場合において、側壁は平滑な板を用いる。

常温・常圧での流れを対象とする。気液流体は、気相を空気、液相を水とする。空気の物性値は、密度 ρ_g が 1.185 kg/m^3 、粘性係数 μ_g が $1.831 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。水の物性値は、密度 ρ_l が 997 kg/m^3 、粘性係数 μ_l が $8.899 \times 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力 σ_l が 0.0728 N/m である。壁面接触角 θ は市販の接触角計測装置（協和界面科学社製 DMs-400）で計測し、 $\theta=70$ 度（標準偏差 4.5 度）であった。

Fig. 1 Outline of the interfacial flow on an inclined plate.

3. 手 法

3.1 数値解析手法

数値解析には汎用熱流動解析コード FLUENT (ANSYS 社) を用いて、三次元非定常流れの数値解析を行う[20, 21]。気液界面流の解析は、複数相を一つの流体で表現する一流体モデルを用いる。基礎方程式は質量保存式 (連続の式) および運動量保存式 (Navier-Stokes 方程式) である。本報での流動条件における対象流れが層流とみなせるため、乱流モデルは使用していない。界面挙動を高精度かつ実用的な計算時間で予測するため、界面追跡法の一つである Volume of Fluid (VOF) モデルを用いる。

気液界面移動は、気液体積分率の輸送方程式から計算する。気液界面での表面張力の効果は、Brackbill ら[22] が提案した Continuous Surface Force (CSF) モデルを用いて考慮する。表面張力は界面での圧力ジャンプとして考慮し、運動量方程式中のソース項として計算に反映させる。気液界面の壁面付着力 (固気液三相界面での界面張力) については、壁面接触角 θ の値を元に、壁面に隣

接する計算セル内の気液界面の曲率を用いて、気液両相に働く外力として計算に反映させる[22]。

数値解析領域を Fig. 1(a) に示す。数値解析の境界条件は次のように与える。液の流入境界は液膜厚さを一定で規定し、一様流速で流入する条件を与える。流入境界での液流速範囲は、 $0.056\text{m/s} \leq V_{lin} \leq 0.67\text{m/s}$ 、レイノルズ数範囲は、 $25 \leq \text{Re}_{lN} \leq 300$ である。傾斜板および両端側壁は No-slip 条件とし、壁面接触角 θ は一定値 (計測値 70°) で与える。その他の境界面については静圧一定の流出境界とする。

計算格子を Fig. 2 に示す。液膜厚さが数百 μm 程度の薄い液膜流を精度良く計算するために、不等間隔格子を用いて壁面近傍の計算格子数を密にした。計算格子数が収束結果 (非定常解析の準定常解) に与える影響を調べるため、計算格子を増減させた事前計算を行うことによって計算格子数を最適化した。平滑板の計算格子数は 1.7×10^5 セル、波板の計算格子数は 5.5×10^5 セルを用いた。

3.2 実験手法

実験装置の概略を Fig. 3 に示す。傾斜板は横 (水平方向) $50\text{mm} \times$ 縦 (流下方向) 250mm のステンレス鋼を用い、傾斜板の両端に平滑なステンレス鋼の側壁を取り付ける。傾斜板への液供給は、板の横幅方向に液膜厚みが一樣になるように供給するため、堰方式の液分散器を用いる。液には水を用い、常温・常圧で実験する。

実験と数値解析を比較するため、傾斜板への液供給の開始位置から流下方向に 60mm の領域を

Fig. 2 Computational grids.

Fig. 3 Experimental setup.

写真撮影し、液流れの可視化と濡れ面積の画像計測を行う。また、レーザーフォーカス変位計 LFD (KEYENCE 高精度レーザ測定器 LT-9000) を用いて、液膜厚さを計測する。本対象流れでは、気液界面が変形してレーザの散乱反射の受光量が減衰する場合があるが、対象とする気液界面変形の傾斜角度は 30 度以下であり、界面変形が LFD の計測精度に及ぼす影響は無視できる[23]。

液物性値は水温によって変化するため、実験中の水温の計測値から液物性値を換算し、ウェーバー数やレイノルズ数で実験結果を整理する。なお、今回行った実験での水温は 11~14 °C であった。

4. 結果と考察

4.1 板表面構造による濡れ面積の変化

産業用の充填塔では、液膜流のチャネリングの抑制や液膜内流動の混合促進などを目的として、充填物の板表面に凹凸や孔などの微細加工が施されることがある[2, 11-13, 24-26]。そこで本節では、板表面の微細加工が液膜流の流れや濡れ面積に及ぼす影響について調べる。

本研究で用いる微細加工は、傾斜板に波型の凹

凸を施す。波型凹凸形状を Fig. 1 (b) に示す。波型凹凸の高さ a と幅 λ は、市販の産業用充填物の寸法を例にして設定した[2, 12, 13, 25]。本条件では、波型の高さ a は、傾斜板上に形成される液膜厚さとはほぼ同程度の大きさである。

傾斜板に流す液流量を徐々に増加させることによってウェーバー数とレイノルズ数 ($0.04 \leq We_{IN} \leq 1.44$ 、 $25 \leq Re_{IN} \leq 230$) を変化した際の気液界面形状と濡れ面積比 A_w/A_t について、数値解析結果と実験結果の比較を Fig. 4、Fig. 5 にそれぞれ示す (Fig. 4 は傾斜板を正面から見た視野である。数値解析の気液界面は液相体積分率 $f_l=0.5$ の等値面で示し、灰色部分は板表面である)。本流動条件の範囲では、液流入位置から流下方向に 60mm の範囲において、傾斜板全体を濡らす液膜流および、液膜が破断してチャネリングする液柱流の二つの流動様式が生じることがわかった。数値解析と実験を比較すると、 We_{IN} に対する気液界面形状と濡れ面積比の変化が定性的に一致する結果が得られた。ただし、液流量が低い (低 We_{IN}) 条件では、数値解析と実験との差異が大きい (Fig. 5 の低 We_{IN} 条件)。

Fig. 4 Comparison of instantaneous liquid flow patterns between the smooth surface and the wavy surface while the liquid flow rate is increasing.

Fig. 5 Comparison of wetted area ratio A_w/A_t between the smooth surface and the wavy surface while the liquid flow rate is increasing.

実験では外乱や接触角ヒステリシス（前進、後退や動的な変化）などが混在して起こるが、本数値解析ではこれらの現象が考慮されていない。特に低 We_{tN} 条件のような不安定な流れ場では、数値解析と実験との差異が大きくなったと考える。

次に、平滑板と波板の比較として、 $We_{tN}=1.1$ 付近での気液界面形状を例にとると、平滑板では液膜が破断して液流れのチャネリング（濡れ面積比 $A_w/A_t < 1$ ）が生じているが、波板では傾斜板のほぼ全面を覆う液膜流（濡れ面積比 $A_w/A_t \approx 1$ ）が形成されている（Fig. 4）。また、Fig. 5 に示すように、本流動条件の範囲においては、平滑板でチャネリングが起こる全ての条件範囲において、平滑板に比べて波板では濡れ面積が増加することがわかった。

4.2 板表面構造による液膜厚さの変化

平滑板に比べて、波板で濡れ面積が増加した要因を検討する。はじめに、平滑板を例にとり、傾斜板全面を覆う液膜流（濡れ面積比 $A_w/A_t = 1$ ）が形成する流動条件において、液流入位置から 60mm 下流における液膜厚さの水平方向分布について、理論計算、実験、数値解析の結果を Fig. 6 に示す。横軸は流下方向に直交する水平方向位置 x 、縦軸は Nusselt の理論[1]に従う液膜厚さ δ_N で規格化した液膜厚さ δ/δ_N である。本対象流れでは、傾斜板の両端に側壁（壁面接触角 θ が 70 度の親水性板）があるため、固気液三相界面での界面張力によって、液膜が側壁に引き寄せられる現象（メニスカス現象）が生じる。液膜厚さ分布は理論計算、実験、数値解析で定性的に一致してお

り、両端側壁（ $x=\pm 25\text{mm}$ ）で液膜が最も厚くなり、側壁に液が付着した分、側壁から 5mm 程度離れた内側（ $x=\pm 20\text{mm}$ 付近）で液膜が最も薄くなっている。液膜厚さがある臨界値以下になると液膜破断が起こることが報告されており[27]、本対象流れでは、側壁から少し内側で液膜が最も薄くなった部分を起点として液膜破断が起こっている。

次に、平滑板および波板において、液膜破断位置より上流での液膜断面形状および液膜内流れの数値解析結果を Fig. 7 に示す（ $We_{tN}=1.14$ 、 $x=-20\text{mm}$ 、 $y \approx 30\text{mm}$ 付近）。Fig. 7 中の波板では平滑板に比べて、液膜厚さが波板凹部で約 3.5 倍、波板凸部で約 2 倍に厚くなっている。これは、波板では波型の凸部から凹部に向かう急拡大流れ

Fig. 6 Liquid film thickness profile in the spanwise direction on the smooth surface.

Fig. 7 Numerical results of liquid film thickness profile, stream lines and liquid velocity contour on the smooth surface and the wavy surface ($We_{tN}=1.14$, horizontal location $x=-20\text{mm}$, flow direction location $y \approx 30\text{mm}$).

によって、液の再循環領域が発生し、液膜厚さが増加すると考える。

最後に、 $We_{tN}=1.14$ において、側壁から少し内側（側壁から 5mm 内側、 $x=-20\text{mm}$ ）における液膜厚さの流下方向分布の数値解析結果を Fig. 8 に示す。横軸は流下方向位置 y 、縦軸は Nusselt 理論[1]の液膜厚さ δ_N で規格化した液膜厚さ

Fig. 8 Numerical results of liquid film thickness profile along the flow direction on the smooth surface and the wavy surface ($We_{tN}=1.14$, horizontal location $x=-20\text{mm}$).

Fig. 9 Numerical results of static pressure contours and spanwise velocity vectors in the liquid films on the smooth surface and the wavy surface ($We_{tN}=1.14$).

δ/δ_N である。液膜厚さ δ は、板表面から気液界面までの実質の距離から求めており、平滑板と波板で直接的に比較できる。また、Nusselt 理論[1]の液膜厚さ δ_N 、波板凹凸高さ h_p と気液界面高さ h_{gl} (h は液膜厚さ方向の位置 z の変化) も Fig. 8 に重ねて示す。波板では波型凹凸によって、傾斜板上での液膜が全体的に厚くなっており、これによって液膜破断が抑制され、平滑板に比べて濡れ面積が増加したと考える。

さらに、平滑板では液膜厚さが流下方向に沿って徐々に薄くなり破断に至っているが、波板では液膜厚さの減少が見られない。この要因を検討するため、次節では液膜内での二次流れを観察する。

4.3 板表面構造による液膜内二次流れの変化

流下方向に直交する断面での静圧分布と二次流れの速度ベクトルについて、数値解析結果を Fig. 9 に示す。平滑板と波板の両方ともに、傾斜板の両端側壁では、メニスカス内部の負圧によって側壁に引き寄せられる二次流れが形成されている。ただし、波板では、液膜が局所的に薄くなる側壁近傍よりもさらに内側の中央付近から側壁に向かう二次流れが生じており、液膜が局所的に薄くなることが抑制されていることがわかった。これは、Fig. 7(b)に示すように、波板の流下方向に凹部から凸部に向かう上り勾配の箇所では主流（流下方向の流れ）が上向きに曲げられることで、Fig. 9(b)に示すように、上り勾配の箇所では

静圧が高くなることに起因すると考える。液膜内では壁面での粘性による速度勾配があるため、液膜厚さの違いによって主流（流下方向の流れ）の運動量に差ができ、上り勾配の箇所での静圧上昇も液膜厚さによって異なる。数値解析結果から、液膜の厚い領域では薄い領域に比べて、気液界面付近での流下方向流速が速く、上り勾配の箇所での静圧上昇も大きくなっていた。このため、波板の上り勾配の箇所、液膜の厚い領域から薄い領域に向かう二次流れが生じると考える。

5. 結 言

規則充填物で多く用いられる傾斜板を対象に、界面追跡法による数値解析および、可視化による濡れ面積計測やレーザーフォーカス変位計による液膜厚さ計測の実験を行った。気液界面形状や濡れ面積に加えて、液膜厚さや液膜内流れを調べることによって、板表面の微細凹凸が液膜破断に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 傾斜板の板表面に波型の微細凹凸を施すことによって、平滑板に比べて波板では、濡れ面積が増加することがわかった。波板では流下方向に波型凹凸が周期的にあることで、平滑板に比べて液膜厚さが厚くなり、液膜破断が抑制されると考える。
- (2) 波板では平滑板に比べて、液膜厚さが数倍厚くなることがわかった。これは、波板では波型の凸部から凹部に向かう急拡大流れによって、液の再循環領域が発生し、液膜厚さが増加すると考える。
- (3) 波板では、液膜が局所的に薄くなる側壁近傍よりもさらに内側の中央付近から側壁に向かう二次流れが生じ、液膜が局所的に薄くなることが抑制されることがわかった。これは、波板の凹部から凸部に向かう上り勾配の箇所で主流（流下方向の流れ）が上向きに曲げられることで静圧が上昇し、液膜の厚い領域から薄い領域に向かう二次流れが生じると考える。

今後の展開として、本技術を用いて充填物の板表面の微細加工が気液界面流に及ぼす効果を系統的に調べていく。また、吸収塔や蒸留塔などの気液接触を行う実際のプロセスに展開するため、

気液物性、接触角、板傾斜角度などが気液界面流に及ぼす影響を系統的に調べていく[28]。さらに、これらの知見を基に、高効率な充填物の開発に応用していく[29]。

Nomenclature

f : volume fraction [-]
 V : velocity [m/s]

We : Weber number,
 $We_{IN} = (\rho_l \cdot V_{IN}^2 \cdot \delta_N) / \sigma$ [-]

Re : Reynolds number,
 $Re_{IN} = (\rho_l \cdot V_{IN} \cdot \delta_N) / \mu_l$ [-]

A : area [m²]

a : amplitude of the surface texture [m]

h : height of surface [m]

Greek letters

α : inclined angle of the plate [degree]

ρ : density [kg/m³]

μ : viscosity [Pa·s]

σ : surface tension coefficient [N/m]

θ : contact angle of air and water on the plate [degree]

δ : liquid film thickness [m]

λ : length of the surface texture [m]

Subscripts

l : liquid phase

g : gas phase

in : inlet

N : Nusselt theory

w : wetted surface

p : plate surface

t : total surface of the plate

参考文献

- [1] Nusselt, W., Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, Zeitschr. Ver. Deut. Ing., Vol. 60, 541-546 and 569-575 (1916).
- [2] Valluri, P., Matar, O. K., Hewitt, G. F. and Mendes, M. A., Thin Film Flow over Structured Packings at Moderate Reynolds Numbers, Chemical Eng. Science, Vol. 60, 1965-1975 (2005).
- [3] Phan, L. and Narain, A., Nonlinear Stability of the Classical Nusselt Problem of Film Condensation and Wave Effects, Trans. of the ASME, J. of Applied Mechanics, Vol. 74, 279-290 (2007).
- [4] Bravo, J. L., Rocha, J. A. and Fair, J. R., A Comprehensive Model for the Performance of Columns Containing Structured Packings, IChemE, Symposium Series, No. 128,

- A439-A457 (1992).
- [5] Billet, R. and Schultes, M., Prediction of Mass Transfer Columns with Dumped and Arranged Packings, Transactions of IChemE, Vol. 77, Part A, 498-504 (1999).
 - [6] Duss, M., Meierhofer, H. and Nutter, D. E., Effective Interfacial Area and Liquid Holdup of Nutter Rings at High Liquid Loads, Chem. Eng. Technol., Vol. 24, 716-723 (2001).
 - [7] Spiegel, L., and Meier, W., Distillation Columns With Structured Packings in the Next Decade, Transactions of IChemE, Vol. 81, Part A, 39-47 (2003).
 - [8] Murrieta, C. R., Seibert, A. F., Fair, J. R., and Rocha-U, J. A., Liquid-Side Mass-Transfer Resistance of Structured Packings, Int. Eng. and Chemistry Research, Vol. 43, 7113-7120 (2004).
 - [9] Sidi-Boumedine, R., and Raynal, L., Influence of the Viscosity on the Liquid Hold-Up in Trickle-Bed Reactors with Structured Packings, Catalysis Today, Vol. 105, 673-679 (2005).
 - [10] Wang, C., Perry, M., Seibert, F. and Rochelle, G. T., Characterization of Novel Structured Packings for CO₂ Capture, Energy Procedia, Vol. 37, 2145-2153 (2013).
 - [11] Ataki, A., Kolb, P., Buhlman, U. and Bart, H. J., Wetting Performance and Pressure Drop of Structured Packings: CFD and Experiment, IChemE, Symposium Series, No. 152, 534-543 (2006).
 - [12] Raynal, L. and Royon-Lebeaud, A., A Multi-Scale Approach for CFD Calculations of Gas-Liquid Flow within Large Size Column Equipped with Structured Packing, Chemical Eng. Science, Vol. 62, 7196-7204 (2007).
 - [13] Raynal, L., Rayana, F. B. and Royon-Lebeaud, A., 2009, Use of CFD for CO₂ Absorbers Optimum Design: from Local Scale to Large Industrial Scale, Energy Procedia, Vol. 1, 917-924 (2009).
 - [14] Lan, H., Wegener, J. L., Armaly, B. F., and Drallmeier, J. A., Developing Laminar Gravity-Driven Thin Liquid Film Flow Down an Inclined Plane, Trans. of the ASME, J. of Fluids Engineering, Vol. 132 (8), 081301, 1-8 (2010).
 - [15] Haroun, Y., Raynal, L. and Legendre, D., Mass transfer and Liquid Hold-Up Determination in Structured Packing by CFD, Chemical Eng. Science, Vol. 75, 342-348 (2012).
 - [16] Haroun, Y., Raynal, L. and Alix, P., Prediction of Effective Area and Liquid Hold-Up in Structured Packings by CFD, 8th Int. Conf. on Multiphase Flow, ICMF2013-854 (2013).
 - [17] Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J. U., and Wozny, G., Fluid Dynamics in Multiphase Distillation Processes in Packed Towers, Computer and Chem. Eng., Vol. 29, 1433-1437 (2005).
 - [18] Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J. U. and Wozny, G., Detailed Investigation of Multiphase Flow Behaviour on Inclined Plates, Trans. IChemE, Chemical Eng. Research and Design, Vol. 84 (A2), 147-154 (2006).
 - [19] Repke, J. U., Ausner, I., Paschke, S. Hoffmann, A. and Wozny, G., On the Track to Understanding Three Phases in One Tower, Trans. IChemE, Chemical Eng. Research and Design, Vol. 85 (A1), 50-58 (2007).
 - [20] Iso, Y. and Chen, X., Flow Transition Behavior of the Wetting Flow between the Film Flow and Rivulet Flow on an Inclined Wall, Trans. of the ASME, J. of Fluids Engineering, Vol. 133 (9), 091101, 1-7 (2011).
 - [21] Iso, Y., Saga, M., Huang, J. and Matsuno, S., Flow Transition Behavior between the Liquid Film Flow and the Liquid Rivulet Flow on an Inclined Plate, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, 39-46 (2014).
 - [22] Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C., A Continuum Method for Modeling Surface Tension, J. of Comp. Physics, Vol. 100, 335-354 (1992).
 - [23] Hazuku, T., Takamasa, T. and Matsumoto, Y., Measurement of Interfacial Structure on Liquid Film in Annular Flow Using Laser Focus Displacement Meter (1st Report), Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 71, No. 705, 1265-1271 (2005).
 - [24] Zhao, L. and Cerro, R. L., Experimental Characterization of Viscous Film Flows over Complex Surfaces, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 18 (4), 495-516 (1992).
 - [25] Guohua, G., Luhong, Z., Xingang, L. and Hong, S., CFD Simulation of Film Flow and Gas/Liquid Counter-Current Flow on Structured Packing, Trans. Tianjin Univ., Vol. 17, 194-198 (2011).
 - [26] Kohrt, M., Ausner, I., Wozny, G. and Repke, J. U., Texture Influence on Liquid-Side Mass Transfer, Chem. Eng. Research and Design, Vol. 89, 1405-1413 (2011).
 - [27] El-Genk, M. S. and Saber, H. H., Minimum Thickness of a Flowing Down Liquid Film on a Vertical Surface, Int. J. of Heat and Mass Trans., Vol. 44, 2809-2825 (2001).
 - [28] Kato, M., Iso, Y., Huang, J. and Matsuno, S., Effect of Surface Texture and Liquid Property on the Liquid Film Flow on an Inclined Wall, AIP Conference Proceedings, Vol. 1558, 228-231 (2013).
 - [29] Iso, Y., Huang, J., Kato, M., Matsuno, S. and Takano, K., Numerical and Experimental Study on Liquid Film Flows on Packing Elements in Absorbers for Post-Combustion CO₂ Capture, Energy Procedia, Vol. 37, 860-868 (2013).