

吸収塔内充てん物における液膜挙動の数値予測技術の開発

Development of Numerical Prediction of Liquid Film Flows on Packing Elements in Absorbers

磯 良行 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士(工学)

CHEN Xi Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University 教授 Ph. D.

本研究開発は、IHI INC.での技術アタッシェ活動の一つとして、海外産学連携先の新規開拓および地の利を活かした最先端の研究開発を目的に、コロンビア大学(アメリカ)との共同研究で実施した。本稿ではこの研究開発の成果を紹介する。液膜流のような気液界面流は吸収塔、蒸留塔など多くの化学プロセス機器で活用される。これらの機器では気液間での物質移動を促進させるため、充てん物によって液膜流を制御して気体と液体を効率良く接触させることが重要になる。本稿では、界面追跡法(Volume of Fluid:VOF)を用いた三次元の数値予測技術を開発し、液相流量の変化や壁面の微細加工が液膜流と液柱流の間の遷移現象に与える影響について調べた。この結果、液膜流と液柱流の遷移領域でのヒステリシス現象、および壁面微細加工による気液界面流の制御効果、などについて明らかにした。

Gas-liquid interfacial flows, such as liquid film flows, are encountered in many industrial processes including absorption and distillation. The present study focuses on the characteristics of the transition between film flow and rivulet flow as the liquid flow rate and the wall surface texture treatments are varied. A three-dimensional gas-liquid interfacial flow simulation based on the volume of fluid (VOF) model has been developed. A hysteresis of the transition between the film flow and rivulet flow as the liquid flow rate changes has been discovered, which implies that the transition phenomenon depends primarily on the history of the change of the interfacial surface shape. Further study on the texture geometry shows that surface texture treatments can impede liquid channeling and increase the wetted area.

1. 緒 言

液膜流のような気液界面流は、吸収塔・蒸留塔・冷却塔・蒸発塔など多くの化学プロセス機器で用いられる重要な流れである。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、塔内に充てん物を設置して液膜流を制御することが重要になる。充てん物を備えもつ充てん塔では一般的に、液体を充てん物の上方から供給して充てん物表面に沿って流下させるとともに、気体を充てん物の下部から供給して、気体と液体とを接触させる。充てん物には不規則充てん物と規則充てん物の大きく分けて二種類があり、不規則充てん物に比べて規則充てん物の方が気液の接触効率や処理量を増加させることができる。このように、充てん物によって液膜流を制御することは、充てん塔の重要な設計要素の一つである。特に、液膜流の偏流(チャネリング)は気液接触面積を著しく減少させる原因となるため、充てん物の設計や新規開発を行うためには、液膜挙動の詳細な予測技術が必要になる。そこで本稿では、規則充てん物で多く用いられる傾斜板上での気液界面流に着目する。

従来、典型的な液膜流に対する理論的・実験的な研究が

行われている^{(1)~(3)}。ただし、平滑な壁面上での液膜流を対象とした研究がほとんどであり、壁面の微細加工が液膜流に及ぼす影響などは明らかになっていない。一方、充てん物を備えもつ充てん塔を対象とし、気液間物質移動速度の計測や予測式を導出する実験的な研究が行われている^{(4)~(12)}。しかし、これらの多くの研究結果は固有の装置形状や実験条件に強く依存しており、汎用的に利用できる知見は少ない。

近年、数値流体解析(Computational Fluid Dynamics:CFD)が実験を代替する有効な予測技術になっている。特に、実機を模擬した複雑形状での大規模な実験では、塔内充てん物表面での液膜流の計測が困難になり、実験の費用も膨大になるため、CFDでの予測技術がますます重要になってきている。塔内充てん物における液膜流に対してCFDを用いた研究例も最近になって行われるようになり、液膜の形状や厚さ、液ホールドアップ(充てん物に保持される液の量)、気相流れの圧力損失、CFDの検証などの有益な結果が得られている^{(6),(9)~(17)}。また、単一液体だけでなく、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流れの三次元性に強く依存することが示された^{(18)~(20)}。

このように理論解析、実験、数値解析などによって有益な知見がいくつか得られているが、チャネリング現象を説明するために重要となる液膜流と液柱流の間の遷移現象や、この遷移に壁面の微細加工が与える影響などを調べた研究はこれまで行われていない。そこで本稿では、界面追跡法 (Volume of Fluid : VOF) を用いた三次元の数値予測技術を開発し、液相流量の変化や壁面の微細加工が液膜流と液柱流の間の遷移現象に与える影響について調べる。

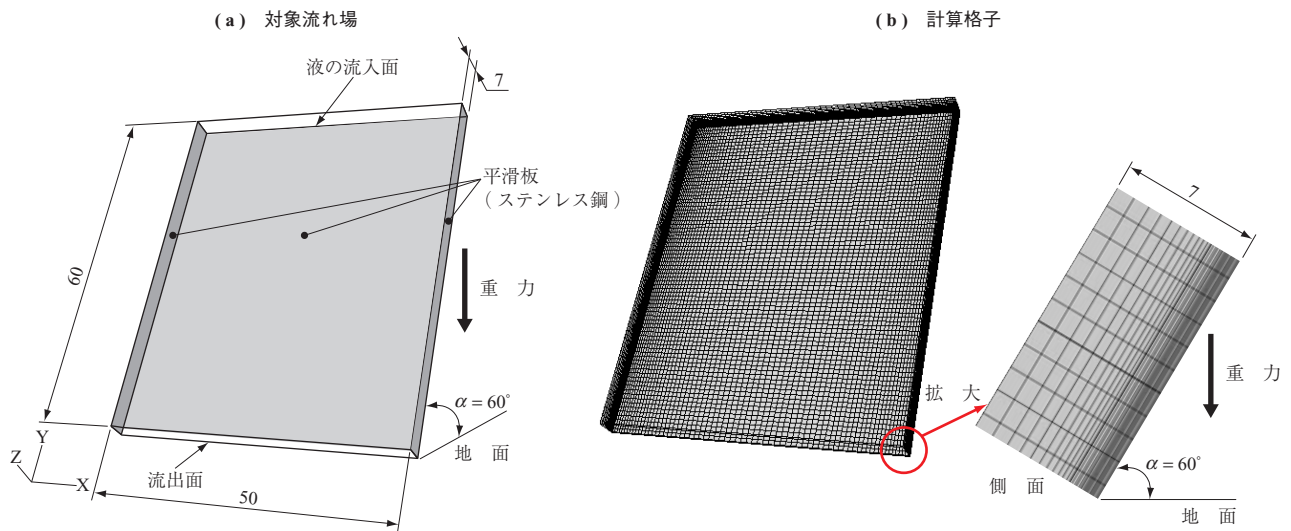
2. 数値予測技術の開発

2.1 流れ場の対象と条件

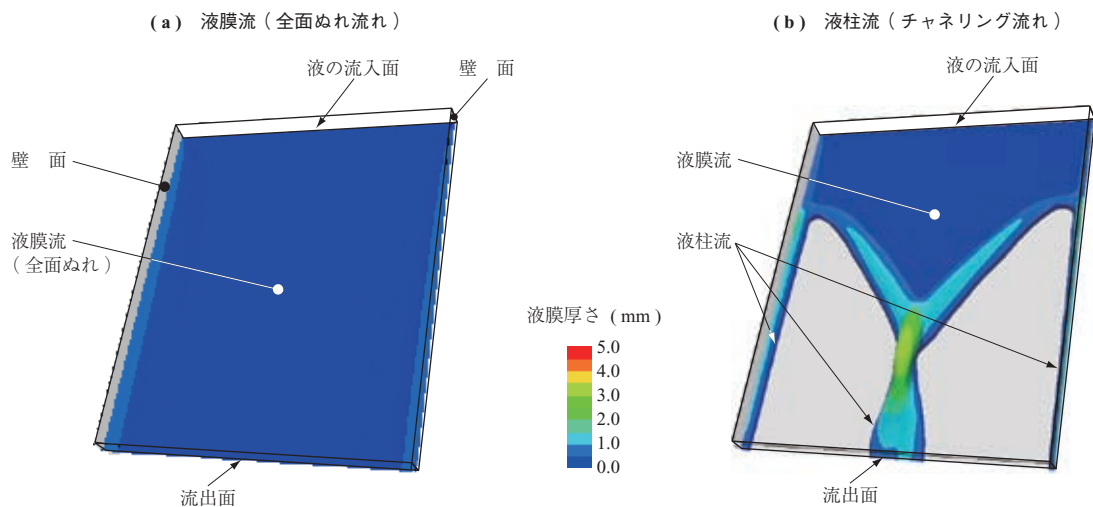
本稿で対象とした平滑傾斜板における流れ場と計算格子の一例を第1図に示す。また、本対象場で生じる流れの典型的な流動様式として、傾斜壁面全体を満たす液膜流およびチャネリング発生時の液柱流の二つの例を第2図に示す。図中の灰色部分は壁面を示す。

本数値解析結果の妥当性を検証する目的で、対象形状や条件などは既存の研究結果を基に選定した^{(18)~(20)}。第1図-(a)に示すように、傾斜板は流れ方向に60 mm、流れと直角方向に50 mmの形状とし、両端に側壁をもつ。板の素材はステンレス鋼であり、第1図は平滑な壁面を対象とした場合を示す。傾斜板の傾斜角度 α は地面に対して60度とした。

気液二相流は、気相を空気、液相を水とした。空気の物性値は、密度 ρ_g が 1.185 kg/m^3 、粘性係数 μ_g が $1.831 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ とした。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 とした。また、壁面接触角 θ は既存の実



第1図 平滑傾斜板での対象流れ場と計算格子 (単位: mm)
Fig. 1 Computational region and a sample grid for wetting flows (unit: mm)



第2図 本条件で形成される典型的な二種類の流れ (鳥かんと図)
Fig. 2 Two images of typical flow features in the present case (Bird's eye view)

験結果から 70 度とした^{(18), (19)}。

液相の流入境界は、傾斜板上に一定の液膜厚さで規定し、流入面全体に一樣流入する条件を与えた。傾斜壁面および両端の側壁は滑りなし条件とし、壁面接触角 θ は一定値 (70 度) で与えた。そのほかの境界面については静圧規定の流出境界とした。

計算格子については、数百 μm 程度の非常に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。計算格子数と収束結果 (準定常解) との関連を調べるため、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。

2.2 気液界面流のモデリング

数値解析には汎用熱流動解析コードである FLUENT (Version6.3, ANSYS 社) を用いた。既存の研究例において、理論解析や二次元数値解析では本稿で対象とするような気液界面流の遷移現象を再現できないことが示されていたため、本稿では三次元非定常流れの数値解析を行った。また、気液界面挙動を高精度かつ現実的な計算時間で予測するため、気液界面追跡法の一つである Volume of Fluid (VOF) モデルを用いた。

計算方法は、一般的な有限体積法による輸送方程式の解析手法を基礎とする。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) であり、以下ようになる。(1) ~ (3) 式の記号の詳細説明を第 1 表に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad \dots \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \cdot v) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + S_m \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 v は流体の速度ベクトル、 p は静圧である。 S_m はソース項であり、表面張力や外力などの運動量ソースを表現する。本稿で対象とする流れのレイノルズ数範囲から、流れ場は層流とみなせるため、乱流モデルは使用していない。

本稿では、気液二相流を一つの流体で表現し、計算セル内の各相の物性値を体積分率 f で加重平均することによって単一流体として扱い、上記の二つの基礎方程式を解く (オイラー型一流体モデル)。気液界面を追跡するため、VOF モデルでは時々刻々と変化する気液界面位置を求める必要がある。気液界面位置は各相の体積分率を基に

区分	量記号	単位	説明	
記号	v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	速度	
	t	s	時間	
	p	Pa	静圧	
	g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	重力加速度	
	S	S_m	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$	ソース項
		S_f	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$	
	f	-	体積分率	
	F	N	力	
	V	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	代表速度	
	L	m	代表長さ	
	Re	-	レイノルズ数	
	Fr	-	フルード数	
	We	-	ウェーバー数	
	Q	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	体積流量	
	w	m	幅	
A	m^2	面積		
a	m	壁面微細加工の高さ		
ギリシャ文字	α	度	傾斜板の傾斜角	
	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	密度	
	μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	粘性係数	
	σ	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	表面張力	
	θ	度	壁面接触角	
	δ	m	液膜厚さ	
	λ	m	壁面微細加工の幅	
添え字	l		液層	
	g		気相	
	m		運動量	
	k		k 相	
	f		体積分率	
	i		慣性	
	v		粘性	
	gr		重力	
	st		表面張力	
	N		Nusselt 理論	
	w		ぬれ界面	
t		総面積		

して計算する。体積分率の輸送は対流のみで考慮することで以下ようになる。

$$\frac{\partial (\rho_k f_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k f_k \cdot v_k) = S_{f_k} \quad \dots \quad (3)$$

ここで、 f_k は各相 k の体積分率、 v_k は各相 k の速度ベクトルである。 S_{f_k} はソース項であり、相間での物質移動量や外部からの供給量などの質量ソースを表現する。本計算では、気液両相間での物質移動が気液界面流動に与える影響は無視できるほど小さいと仮定して、 S_{f_k} をゼロとした。

VOF モデルでは、各相の体積分率は空間的・時間的に連続すると仮定し、各計算セル内での体積分率の総和はつ

ねに 1 で一定である。 $f_k = 0$ の場合は計算セル内に k 相が存在しないことを示し、 $f_k = 1$ の場合は計算セル内が k 相で満たされていることを示す。 $0 < f_k < 1$ の場合は、計算セル内に k 相と他の相との界面が存在することを示す。

気液界面での表面張力の効果は、Brackbill らが提案した Continuous Surface Force (CSF) モデルを用いて考慮する⁽²¹⁾。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 S_m として計算に反映させる。また、気液界面の壁面付着力については、規定した壁面接触角 θ の値を基に、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。

3. 液流れの支配因子

本章では本稿で対象とする液流れの支配因子を定義する。液流れに働く主な力は慣性力 F_{li} 、粘性力 F_{lv} 、重力 F_{lgr} 、表面張力 F_{lst} の四つであると考え、対象場を代表する速度と長さをそれぞれ V_l と L_l とおき、これら四つの力に対して慣性力を基準として無次元化すると、以下のように三つの無次元量が得られる。(4)～(11)式の記号の詳細説明を第1表に示す。

$$\frac{F_{lv}}{F_{li}} = \frac{\mu_l V_l L_l}{\rho_l V_l^2 L_l^2} = \frac{\mu_l}{\rho_l V_l L_l} = \frac{1}{\text{Re}_l} \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{F_{lgr}}{F_{li}} = \frac{(\rho_l - \rho_g) g L_l^3}{\rho_l V_l^2 L_l^2} \approx \frac{g L_l}{V_l^2} = \frac{1}{\text{Fr}_l} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{F_{lst}}{F_{li}} = \frac{\sigma L_l}{\rho_l V_l^2 L_l^2} = \frac{\sigma}{\rho_l V_l^2 L_l} = \frac{1}{\text{We}_l} \dots \dots \dots (6)$$

本稿では、上記で得た三つの無次元量であるレイノルズ数 Re_l 、フルード数 Fr_l 、ウェーバー数 We_l を液流れ挙動を考察する指標として用いる。

次に、液流れの一つの流動様式である液膜流を対象にした Nusselt の理論式⁽¹⁾を用いることによって、代表速度 V_l と代表長さ L_l を具体的な値(液膜速度と液膜厚さ)で代替して上記三つの指標を再定義する。傾斜平板上で完全発達した液膜流の液膜厚さを δ_N とし、Nusselt の理論式を用いると δ_N は以下のように表せる。

$$\delta_N = \left[\frac{3\mu_l \cdot Q_l}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g \sin \alpha \cdot w} \right]^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 Q_l は液相の体積流量である。 w は液膜流の幅(流れと直角方向の幅)であり、液膜流が傾斜平板全面を満たして流れる条件を仮定すると、 w は傾斜平板の幅で置

き換えられる。以上から、液膜速度 V_{IN} と液膜厚さ δ_N を用い、上記三つの指標を再定義すると以下ようになる。

$$\text{Re}_{IN} = \frac{\rho_l V_{IN} \cdot \delta_N}{\mu_l} \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{Fr}_{IN} = \frac{V_{IN}^2}{g \cdot \delta_N} \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{We}_{IN} = \frac{\rho_l V_{IN}^2 \cdot \delta_N}{\sigma} \dots \dots \dots (10)$$

ここで V_{IN} は液膜の空間平均速度であり、以下の式で求められる。

$$V_{IN} = \frac{Q_l}{\delta_N \cdot w} \dots \dots \dots (11)$$

上記の三つの指標のなかで特にウェーバー数 We_{IN} は慣性力と表面張力の作用割合を示すことから、液膜流と液柱流の間の遷移現象を評価する際に重要な値となる。これらの指標を利用して、本稿での数値解析結果を以降に記す。

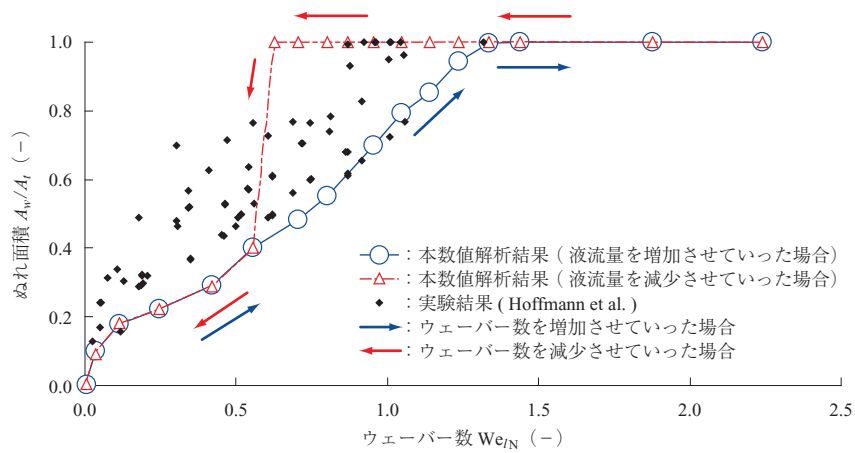
4. 結果と考察

4.1 平滑な傾斜板における液膜流と液柱流の遷移

本節では、平滑な傾斜板での気液界面流を対象にし、液相流量の変化が液膜流と液柱流の間の遷移現象に与える影響を調べる。ウェーバー数 We_{IN} に対するぬれ面積 A_w/A_t (傾斜板上でぬれている面積と傾斜板の全面積との比)の変化について、本数値解析で得た結果および既存の実験結果を第3図に示す。また、ウェーバー数に対する気液界面の流動挙動の変化について本数値解析で得た結果を第4図に示す(傾斜板の鉛直方向から見た視野であり、気液界面は液相体積分率 $f_l = 0.5$ の等値面で示す。灰色部分は壁面を示す)。

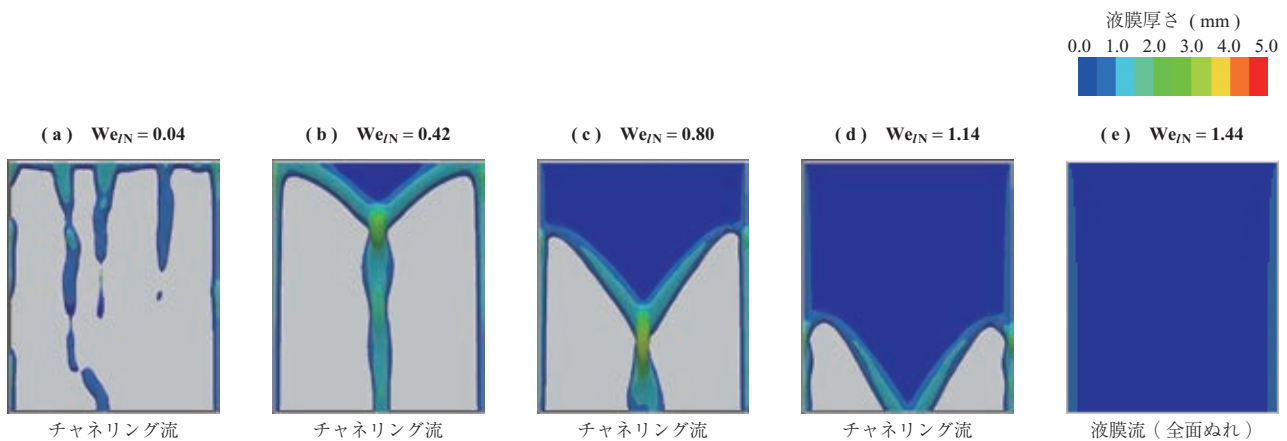
第4図に示すように、本流動条件の範囲においては、傾斜板全面を満たす液膜流およびチャネリングによる液柱流の二つの流動様式が生じることが分かった。ウェーバー数が小さい領域では、チャネリングが生じ、ぬれ面積が著しく減少することが分かる。このように、ウェーバー数が小さい場合、気液界面に働く表面張力が慣性力に勝つてくるため、気液界面積を最小化する方向に流動様式が遷移してチャネリングが起こる。

本稿で得た新たな知見の一つとして、第3図に示すようにウェーバー数をいったん増加させ、その後減少させることによって、傾斜板全面を満たす液膜流(ぬれ面積 $A_w/A_t = 1$)とチャネリングによる液柱流(ぬれ面積 $A_w/A_t < 1$)の間の遷移点が両者で大きく異なることが分



(注) A_w : 傾斜板上でぬれている面積
 A_t : 傾斜板の全面積

第 3 図 ウェーバー数 We_{IN} に対するぬれ面積 A_w/A_t の変化
 Fig. 3 Wetted areas A_w/A_t as a function of the Weber number We_{IN}



第 4 図 瞬時の気液界面の流動パターン (平滑板での数値解析結果, 液流量を増加させていった場合)

Fig. 4 Instantaneous liquid flow patterns visualized using interfacial surfaces between gas and liquid (Results on the smooth wall while the liquid flow rate is increasing)

かった。この結果は、液膜流と液柱流との遷移領域において、液相流量（ウェーバー数）の増減に対してヒステリシスが生じることを示唆している。液相流量を増加させていった場合には、液柱流から液膜流に遷移する過程でぬれ面積が連続的に増加する。一方、液相流量を減少させていった場合には、液相流量の増加時に比べて小さいウェーバー数のポイントにおいて、液柱流から液膜流への遷移が不連続的に生じ、ぬれ面積が急激に減少する。このように流動様式の遷移領域でヒステリシスが生じる原因として、液相流量の増減に対して液膜流と液柱流の間の遷移プロセスが異なるため、流動様式が液流れの履歴（気液界面形状の変化の履歴）の影響を受けるためであると推測する。

液柱流から液膜流への遷移過程では、液相流量の増加に伴い、流れと直角方向に液柱が拡張し、壁面のぬれ領域を

増加させていくことで最終的に壁面全体を満たす液膜流が形成される。一方、液膜流から液柱流への遷移過程では、液相流量の減少に伴い、液膜厚さが薄くなり、液膜が部分的に破れることをきっかけにして、液柱流が形成される。このように、液相流量の増減に対して液膜流と液柱流の間の遷移プロセスが異なり、遷移に必要なエネルギー障壁も状態変化の方向によって異なるため、ヒステリシスが生じると考える。ここで、本数値解析では考慮していないが、実現象では外乱（空間的・時間的な流れ変動）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ため、遷移過程で起こる現象はさらに複雑になる。

次に本数値解析結果の妥当性を検討した。第 3 図に示すように、ウェーバー数の変化に対して液膜流と液柱流の間の遷移が生じる領域が、本数値解析と既存実験を比較してほぼ一致することが分かった。また、本稿では割愛する

が、第4図に示した気液界面の流動挙動について、本数値解析と既存実験⁽¹⁹⁾とを比較した結果、液膜が破断する位置や液柱幅などの気液界面形状が両者で良く一致することが分かった。このように、VOFモデルを用いた本数値解析手法によって、平滑な傾斜板における気液界面流を精度良く、一ケース当たり数日程度の現実的な計算時間で予測できることが分かった。

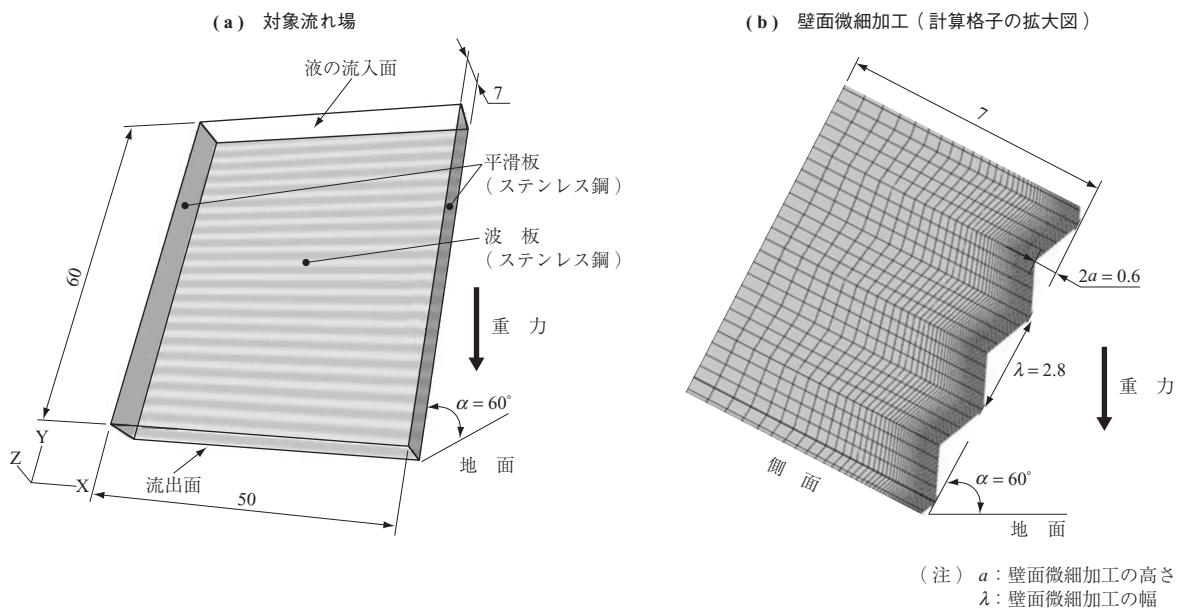
4.2 壁面微細加工が気液界面流に与える効果

産業用の充てん塔では、液膜流のチャネリング防止や液膜内流動の混合促進などを目的として、充てん物壁面上に小さな凹凸や穴などの微細加工を施す工夫が活用されることがある^{(9), (10), (12)~(14)}。そこで本節では、壁面微細

加工が気液界面流に与える効果について調べる。

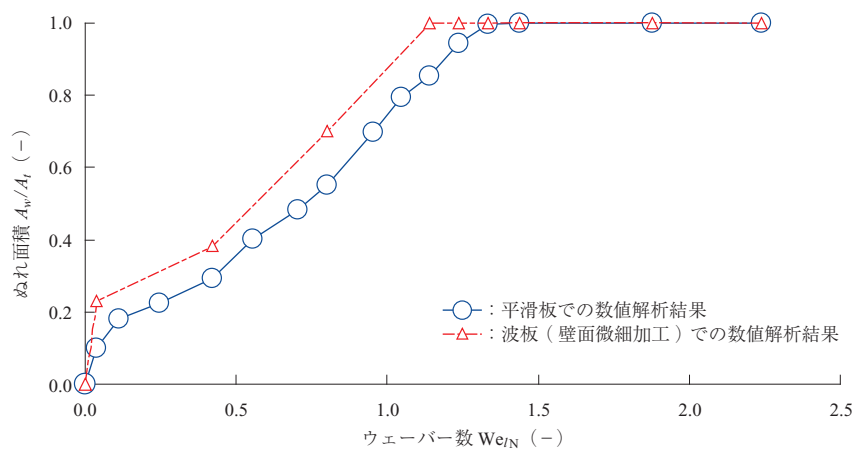
本稿で用いた壁面微細加工として、波型の凹凸を施した傾斜板の概略と壁面微細加工の形状を第5図に示す。壁面微細加工の波型の高さ a と幅 λ は、市販の産業用充てん物の寸法を例にして設定した^{(12), (14)}。本条件では、波型の高さ a は、壁面上に形成される液膜厚さと同程度の大きさである。

ウェーバー数 We_{IN} に対するぬれ面積 A_w/A_t の変化について、本数値解析で得た結果を第6図に示す。第6図の結果から、本流動条件の範囲においては壁面微細加工を施すことによって、平滑板に比べてぬれ面積を増加できることが定量的に分かった。



第5図 壁面微細加工を施した傾斜板での対象流れ場と計算格子 (単位: mm)

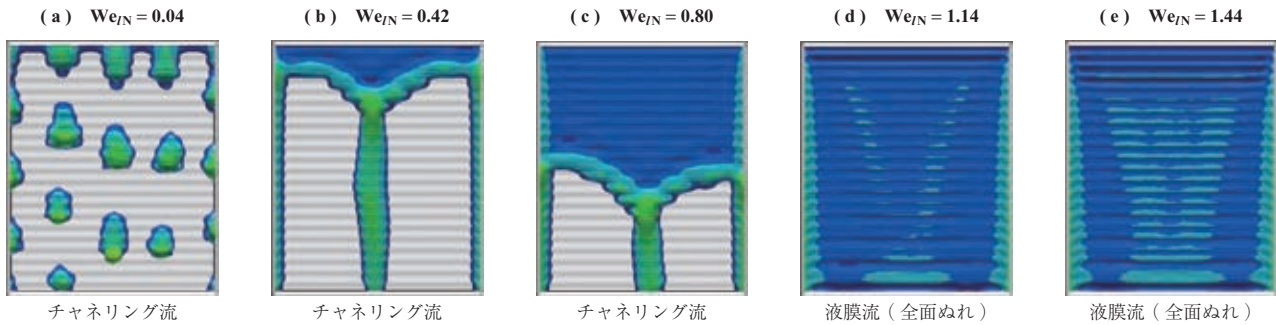
Fig. 5 Computational region and a sample grid for wetting flows with wall surface texture treatments (unit: mm)



(注) A_w : 傾斜板上でぬれている面積
 A_t : 傾斜板の全面積

第6図 ウェーバー数 We_{IN} に対するぬれ面積 A_w/A_t の変化 (液流量を増加させていった場合)
Fig. 6 Wetted areas A_w/A_t as a function of the Weber number We_{IN} (While the liquid flow rate is increasing)

基準面からの気液
界面高さ (mm)
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0



第 7 図 瞬時の気液界面の流動パターン (壁面微細加工を施した波板での数値解析結果, 液流量を増加させていった場合)

Fig. 7 Instantaneous liquid flow patterns visualized using interfacial surfaces between gas and liquid (Results on the wall surface texture while the liquid flow rate is increasing)

また, ウェーバー数に対する気液界面の流動挙動の変化について, 本数値解析で得た結果を第 7 図に示す (傾斜板の鉛直方向から見た視野であり, 気液界面は液相体積分率 $f_l = 0.5$ の等値面で示す. 灰色部分は壁面を示す). 第 7 図と第 4 図についてウェーバー数が同じ条件で比較すると, 壁面微細加工が気液界面の流動挙動に及ぼす効果が分かる. たとえば, 第 4 図中の $We_{fN} = 1.14$ での平滑板では液流れのチャネリングが生じているが, 第 7 図の $We_{fN} = 1.14$ での波板では傾斜板全面を満たす液膜流が形成できていることが分かる. 以上の結果, 壁面微細加工を施すことによって, 液膜流のチャネリングを抑制でき, ぬれ面積を増加させることができることが明らかになった.

5. 結 言

充てん塔内では液膜流の偏流 (チャネリング) が気液接触面積を著しく減少させる原因となるため, 本稿では規則充てん物で多く用いられる傾斜板を対象に, 液膜流と液柱流との間の遷移現象に着目した. 界面追跡法 (VOF) を用いた三次元の数値予測技術を開発し, 液相流量の変化と壁面の微細加工が液膜流と液柱流の間の遷移現象に与える影響について調べ, 以下の新たな知見が得られた.

- (1) 傾斜板での液膜流と液柱流との遷移領域において, 液相流量 (ウェーバー数) の増減に対してヒステリシスが生じることを明らかにした. ヒステリシスが生じる原因として, 液相流量の増減に対して液膜流と液柱流の間の遷移プロセスが異なるため, 流動様式が液流れの履歴 (気液界面形状の変化の履歴) の影響を受けるためであると推測した. このような流動様式の遷移現象に関する知見は, 遷移過程

の詳細を把握するとともに, 気液接触を効率良く行うための液相流量制御や充てん物開発に応用することができる.

- (2) 本数値解析と既存実験とを比較し, 液膜流と液柱流の遷移が生じる臨界ウェーバー数や気液界面形状について良い一致が得られた. VOF モデルを用いた本数値解析手法によって, 平滑な傾斜板における気液界面流を精度良くかつ現実的な計算時間で予測できることが分かった.
- (3) 壁面微細加工を施すことによって, 平滑板に比べて液膜流のチャネリングを抑制でき, ぬれ面積を増加させることができることを明らかにした.

今後の展開として, 本技術を用いて充てん物の壁面微細加工が気液界面流に及ぼす効果を系統的に調べることによって, 機器性能を向上できる充てん物の開発に応用していく. また, 各種化学プロセスに対応した流動条件や, より複雑な充てん物構造での数値予測を行うことによって, 機器全体の設計開発に発展させていく.

— 謝 辞 —

本稿は, 著者がアメリカのコロンビア大学に客員研究員として在籍した間に実施した研究であり, 共同研究先の Chen 教授の研究室一同に深く感謝の意を表します.

参 考 文 献

- (1) W. Nusselt : Die oberflächenkondensation des wasserdampfes Zeitschr. Ver. Deut. Ing. 60 (1916) pp. 541 - 546 and pp. 569 - 575
- (2) L. Phan and A. Narain : Nonlinear stability of the

- classical Nusselt problem of film condensation and wave effects Transaction of the ASME Journal of Applied Mechanics Vol. 74 (2007. 3) pp. 279 – 290
- (3) X. Wang, M. He, H. Fan and Y. Zhang : Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using laser-induced fluorescence technique Journal of Physics Conference Series 147 (2009) 012039
- (4) J. L. Bravo, J. A. Rocha and J. R. Fair : Mass transfer in gauze packings Hydrocarbon Processing 64 (1985) pp. 91 – 95
- (5) J. L. Bravo, J. A. Rocha and J. R. Fair : A comprehensive model for the performance of columns containing structured packings Inst. Chem. Eng. Symp. Series 128 (1992) pp. A439 – A457
- (6) L. Spiegel and W. Meier : Distillation columns with structured packings in the next decade Trans. IChemE Vol. 81 Issue 1 Part A (2003. 1) pp. 39 – 47
- (7) C. R. Murrieta, A. F. Seibert, J. R. Fair and J. A. Rocha-U : Liquid-side mass-transfer resistance of structured packings Ind. Eng. Chem. Res. 43 (22) (2004. 9) pp. 7113 – 7120
- (8) R. Sidi-Boumedine and L. Raynal : Influence of the viscosity on the liquid hold-up in trickle-bed reactors with structured packings Catalysis Today Vol. 105 Issue 3 – 4 (2005. 8) pp. 673 – 679
- (9) A. Ataki, P. Kolb, U. Buhlman and H. J. Bart : Wetting performance and pressure drop of structured packings : CFD and experiment IChemE Symposium Series 152 (2006) pp. 534 – 543
- (10) A. Ataki and H. J. Bart : Experimental and CFD simulation study for the wetting of structured packing element with liquid Chemical Eng. and Tech. Vol. 29 Issue 3 (2006. 3) pp. 336 – 347
- (11) J. Chen, C. Liu, Y. Li, Y. Huang, X. Yuan and G. Yu : Experimental investigation of single-phase flow in structured packing by LDV Chin. J. Chem. Eng. Vol. 15 Issue 6 (2007. 12) pp. 821 – 827
- (12) L. Raynal, F. B. Rayana and A. Royon-Lebeaud : Use of CFD for CO₂ absorbers optimum design : from local scale to large industrial scale Energy Procedia Vol. 1 Issue 1 (2009. 2) pp. 917 – 924
- (13) P. Valluri, O. K. Matar, G. F. Hewitt and M. A. Mendes : Thin film flow over structured packings at moderate Reynolds numbers Chemical Eng. Science Vol. 60 Issue 7 (2005. 4) pp. 1965 – 1975
- (14) L. Raynal and A. Royon-Lebeaud : A multi-scale approach for CFD calculations of gas-liquid flow within large size column equipped with structured packing Chemical Eng. Science Vol. 62 Issue 24 (2007) pp. 7196 – 7204
- (15) E. Y. Kenig : Complementary modeling of fluid separation processes Chemical Engineering Research and Design Vol. 86 Issue 9 (2008. 9) pp. 1059 – 1072
- (16) W. Ludwig and J. Dziak : CFD modelling of a laminar film flow Chemical and Process Eng. 30 (2009) pp. 417 – 430
- (17) H. Lan, J. L. Wegener, B. F. Armaly and J. A. Drallmeier : Developing laminar gravity-driven thin liquid film flow down an inclined plane Trans. ASME J. Fluids Engineering Vol. 132 Issue 8 081301 (2010. 8) pp. 1 – 8
- (18) A. Hoffmann, I. Ausner, J. U. Repke and G. Wozny : Fluid dynamics in multiphase distillation processes in packed towers Computers and Chemical Eng. Vol. 29 Issue 6 (2005. 5) pp. 1433 – 1437
- (19) A. Hoffmann, I. Ausner, J. U. Repke and G. Wozny : Detailed investigation of multiphase flow behaviour on inclined plates Trans. IChemE, Chemical Eng. Research and Design Vol. 84 Issue 2 (2006) pp. 147 – 154
- (20) J. U. Repke, I. Ausner, S. Paschke, A. Hoffmann and G. Wozny : On the track to understanding three phases in one tower Trans. IChemE, Chemical Eng. Research and Design Vol. 85 Issue 1 (2007) pp. 50 – 58
- (21) J. U. Brackbill, D. B. Kothe and C. Zemach : A continuum method for modeling surface tension J. of Comp. Physics Vol. 100 No. 2 (1992. 6) pp. 335 – 354