

革新的な濡れ制御技術

— ミリスケールやマイクロスケールの現象で巨大な製品での流れを制御する —

Innovative Wettability Control Technology

— Control of Liquid Flow in Macro-Scale Equipment by Micro/Milli-Scale Phenomena —

池田 諒介 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
磯 良行 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 担当課長 博士（工学）
山本 充俊 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部

濡れ現象は当社グループの製品に幅広く関わる現象であり、濡れ現象を制御することは製品の性能や価値を大きく向上させる重要なファクタの一つである。濡れは固体と液体の界面が関わる現象であり、非常に小さなスケールの現象に支配される。それゆえ製品が例えばプラント機器のように大きなものであっても、そのうちの極めて局所的な部分で起こる現象が、機器全体の濡れ現象を左右し得る。本研究では、当社グループ製品でよくみられる液膜濡れを制御することを目的として、理論計算、数値解析、実験を駆使し、流れを支配する濡れ現象のメカニズムの解明を試みた。またその知見に基づき、流路にミリスケールあるいはマイクロスケールの僅かな工夫を施すことで巨大な製品での流動現象を変えることができる、革新的な濡れ制御技術を開発した。

The wettability of solid surfaces plays an important role in improving the performance of various industrial equipment and applications. Wetting phenomena occur at a liquid-solid interface and are characterized by millimeter/micrometer scale properties. Therefore, local and small structures in large-scale equipment can significantly affect the entire performance. In this study, numerical analyses and experimental studies are conducted to investigate free falling liquid film characteristics. Based on the results, we developed new innovative technology for controlling film flowing by milli/micro-scale structure design that can greatly improve the performance of macro-scale equipment such as plant components.

1. 緒 言

濡れ現象は、固体と液体との界面が関わる現象である。濡れや界面と聞くと、工業分野では、冷却、乾燥、塗装、防汚やコーティングなどの単語が想起される。もちろん我々の生活にもとても身近な現象であり、自動車の窓ガラスの水膜や、フライパンのふっ素コートも濡れ現象の関わるものである。レインコートに付着した水滴も、固体と液体との界面張力によって作り出されている。

一般に表面張力や濡れ力は小さく、人間サイズの液体をレインコートと同様に水滴として固体面上に保持することはできない。しかしながら mm, μm 以下のスケールの世界では、重力よりも表面張力や濡れ力が重要になってくる。

当社グループの製品はボイラや航空エンジン、プラント機器をはじめとして、とうてい人間の手には収まらない巨大な装置や構造物が多い。しかし機器がどれだけ大きくなろうとも、そこで起きている濡れ現象の支配スケールは変わらない。また、濡れ現象は時として後述（2.1.2項）

のように、濡れ面のある局所的なところで発生した現象が、濡れ面全体へと速やかに波及し得るケースもある。すなわち、mm 以下の局所的で小さな現象が、巨大な機器のパフォーマンスを左右している。

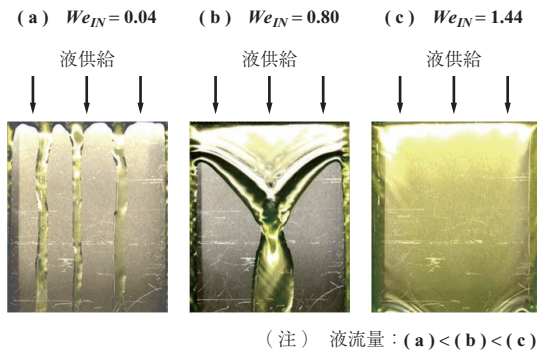
本稿では、当社グループの多くの製品で関わる液膜流れについて、その流れを支配する濡れ現象のメカニズムを解き明かすとともに、流路にミリスケールあるいはマイクロスケールの僅かな工夫を施すことで、巨大な製品で起こる流動現象を変えることができる、革新的な濡れ制御技術を紹介する。

2. ミリスケールの構造による革新的な濡れ制御技術

2.1 側壁形状の小さな工夫による濡れ制御

2.1.1 液膜流とドライアウト

第1図に示すように、壁面に沿って流下する液膜流れは、ガス吸収塔や蒸留装置、熱交換器などの多くの工業機器に現れる現象であり、その流動特性は機器性能を大きく左右する重要なファクタである^{(1),(2)}。液流量が大きい



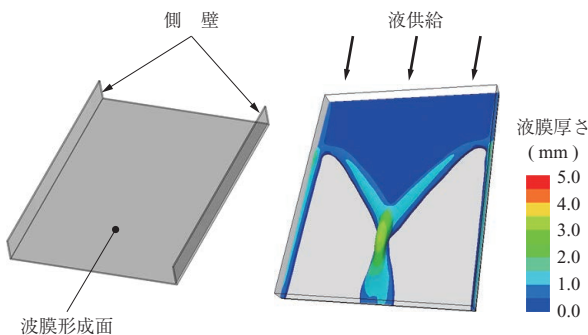
第 1 図 壁面を流下する液膜流れ
Fig. 1 Examples of falling liquid film on the plate

ときは、壁面は全面濡れを形成するが（第 1 図 - (c)）、液流量が小さくなると、全面が濡れずに壁面が露出した部分（ドライアウト領域）が形成される（第 1 図 - (a)、- (b)）。なお第 1 図の We_{IN} は、(1) 式で定義される液膜ウェーバー数である。

$$We_{IN} = \frac{\rho U_N \delta_N}{\sigma} \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ は液相の密度 (kg/m^3)、 σ は表面張力 (N/m)、 U_N および δ_N はそれぞれ液膜平均速度 (m/s) および液膜平均厚さ (m) である。 U_N および δ_N は供給する液体の体積流量から Nusselt の理論⁽³⁾に基づいて計算した。

Nusselt の理論に基づいて実際の工業機器においては、構造部材やスペーサなどの役割として流路壁面に第 2 図のような側壁構造が設けられることが多い。側壁が存在すると、側壁を起点としてドライアウト形成が誘起される（第 1 図 - (b)）。全面濡れに必要な流量が条件によっては数倍に増加することが報告されている^{(4)、(5)}。本稿では、側壁の存在によってドライアウトが誘起されるメカニズムの検討結果および、ドライアウトを抑制して濡れ面を形成させやすい側壁構造について説明する。

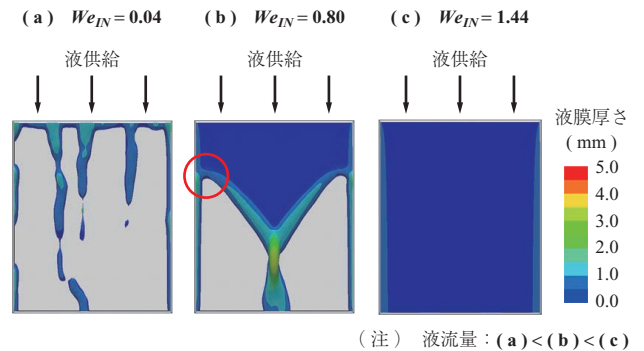


第 2 図 側壁をもつ壁面および、そこに形成される液膜流
Fig. 2 Plate with side walls

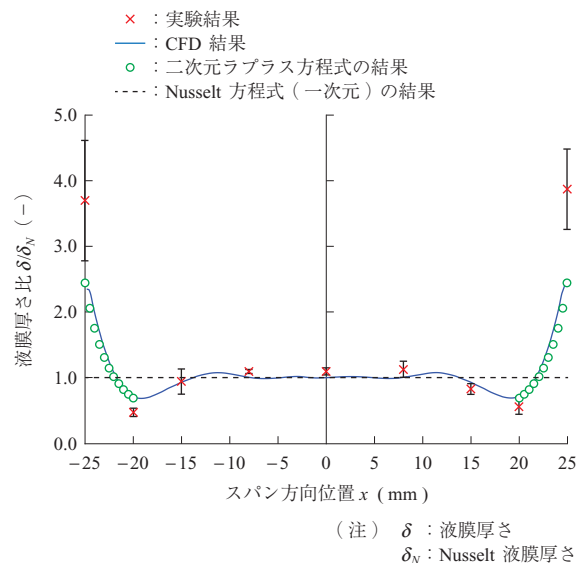
2.1.2 ドライアウト形成のメカニズム

第 3 図は、側壁のある平板上での液膜流れについて数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics : CFD) を行った結果例である。図中の We_{IN} は (1) 式の定義した値である。解析には汎用熱流体解析ソフトウェア Fluent を用い、気液界面の追跡には VOF (Volume Of Fluid) 法を用いた。解析の妥当性については、理論や実験との比較により検証済みである^{(1)、(2)}。なお解析で模擬する流動条件は、当社で開発している CO_2 化学吸収プラントのガス吸収塔内の液膜流れを模擬している。

第 3 図に示すように、液流量が小さい条件では、左右の側壁に沿った筋状の液流れが形成されるとともに、流路には大きなドライアウト領域が形成されている。第 4 図は、第 3 図 - (b) におけるドライアウトよりも上流側での、ある主流方向断面における液膜厚さの例を表している。流路中央では平坦な液膜が形成され、その厚さは



第 3 図 流下液膜流の数値解析結果
Fig. 3 Simulation results of falling liquid film



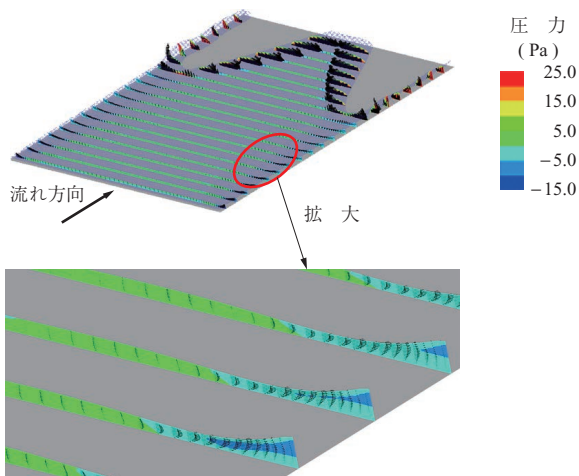
第 4 図 スパン方向の液膜厚さ分布
Fig. 4 Spanwise liquid film thickness

Nusselt の理論から算出される液膜厚さとほぼ等しいが、側壁には、液膜厚さよりも大きな高さをもつメニスカスが付着形成されるとともに、側壁からスパン方向に数 mm 程度離れた位置に最小膜厚をもつ領域が現れる。この最小膜厚の発生は、局所的な流れの運動量の減少を引き起こし、液膜の下流方向への濡れ拡がりを阻害する。第 3 図 - (b) のドライアウト領域の逆 V 字頂点部（赤く丸で囲んだ部分）は、側壁からの距離は 5 mm 程度であり、第 4 図の最小膜厚が現れる位置に対応する。側壁へのメニスカスの形成は、付着濡れによるエネルギー減少のためである。メニスカスが形成されると、側壁から十分に離れかつ液膜厚さの大きい部分での壁面粘性の影響の低下により、液膜内の速度エネルギーは増加するため、濡れによるエネルギー減少分と、速度エネルギー増加分の和が最小となる条件から、実際の付着高さが一つに決定される。

一方で、液膜流れは重力と壁面粘性力との釣り合いを満足させるため、平均的には Nusselt の液膜厚さが現れる。側壁に大きな付着高さが現れる分、膜厚の小さい部分が側壁近傍に形成されると考えられる。また、第 5 図はメニスカス近傍でのスパン方向の流速分布と液膜形状を表したものである。メニスカスの凹形状に起因する負圧（ラプラス圧： $-\sigma/R$ ）により、側壁に向かう流れが形成され、これによって最小膜厚を形成する。

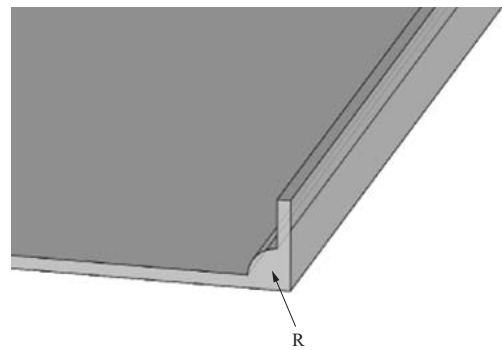
2.1.3 ドライアウトを自在に制御する側壁形状

2.1.2 項で述べたように、壁面でのメニスカス形成が最小膜厚の形成を誘起し、ドライアウト形成の要因となることが分かった。そこで側壁に工夫を施すことで、メニスカス形成を抑えて液膜厚さをスパン方向に一樣にし、極小部の形成を抑制できることが期待される。

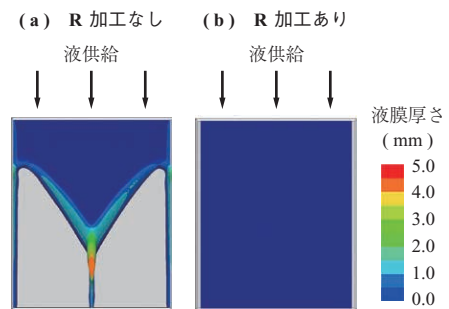


第 5 図 スパン方向の液流速の解析結果
Fig. 5 Simulation result of spanwise velocity

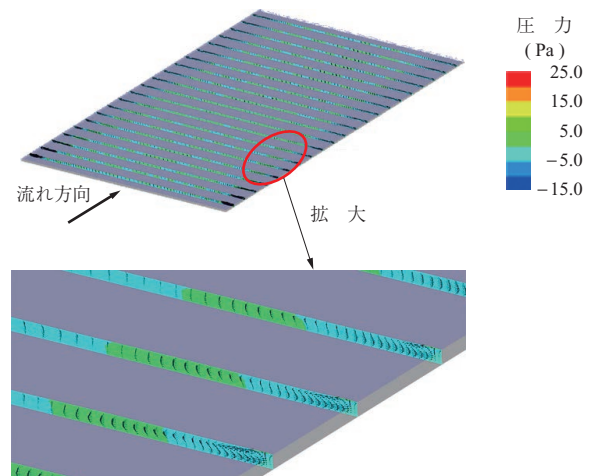
一例として、側壁に第 6 図のような凸 R 加工を施した壁面における液膜流れについて CFD を実施した。比較として、凸 R 加工のない場合についても同様の条件で解析した。第 7 図に解析結果を示す。加工がない条件ではドライアウトが形成されているが、凸 R 加工を施した条件では全面濡れが達成されている。第 8 図は側壁近傍でのスパン方向の流速分布と液膜形状を表したものであるが、メニスカスの付着形成が抑制されているのが確認できる。スパン方向の流れも、側壁から離れて戻る流れが新たに形



第 6 図 R 加工を施した側壁形状の例
Fig. 6 Schematic of an R-structure side wall



第 7 図 流下液膜流の数値解析結果
Fig. 7 Simulation results of falling liquid film



第 8 図 スパン方向の液流速の解析結果（凸 R 加工のある場合）
Fig. 8 Simulation result of spanwise velocity (R-structure side wall)

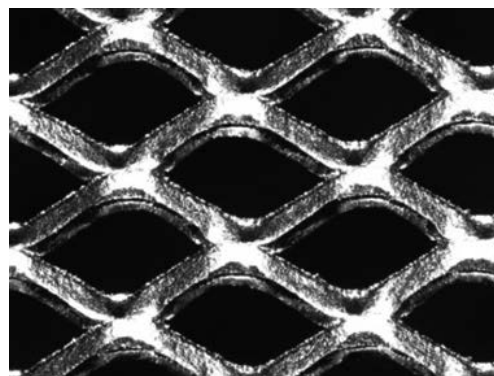
成され、最小膜厚の形成が抑制されている。側壁のごく僅かな形状変更だけで液膜流れを自在に制御し、劇的に濡れ性能を向上させることができる⁽⁶⁾。

なお、原理上は第9図のようなフィレット加工（凹R加工）（-（a））や傾斜側壁形状（-（b））においても同様の効果を得ることができ、設計や加工の制約に応じて、形状を種々選択できる⁽⁷⁾、⁽⁸⁾。最適な加工寸法は液膜厚さおよび接触角から計算でき、また液体の物性、流量条件、壁面性状（濡れ性）の影響も含んで計算することができる。

2.2 板構造の小さな工夫による濡れ制御

2.2.1 エキスパンドメタル

エキスパンドメタルとはメッシュ状の金属板であり（第10図）、専用の機械と金型を用いて、金属薄板に切れ目を入れながら押し広げ、切れ目をひし形や亀甲形に成形して製作されたものである。一般的に「金網」と呼ばれる、金属細線を編んで成形したものに比べると、ワイヤ

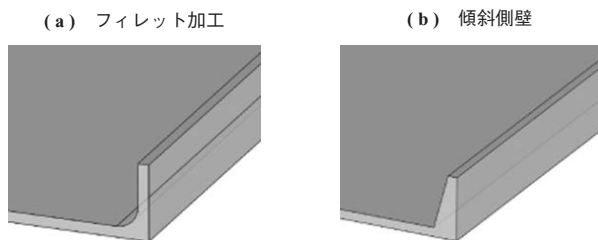


第10図 エキスパンドメタルのメッシュ構造拡大図
Fig. 10 Close-up photograph of expanded metal

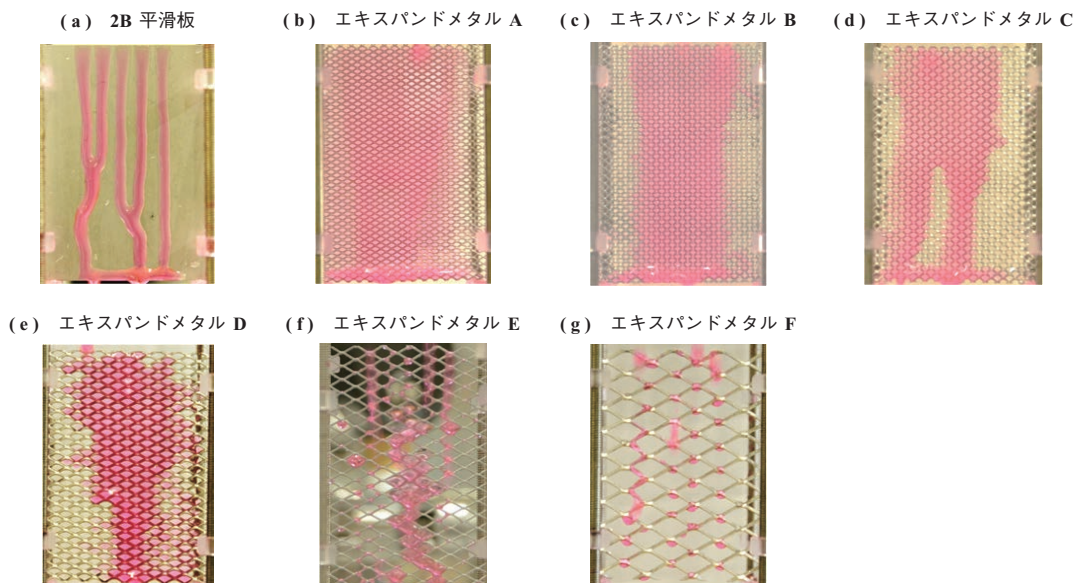
部の線径が太く、部材としての剛性が高いのが特徴である。

エキスパンドメタルはその構造から、スパン方向へ液を濡れ拡がらせる効果が高く、また孔部（ラス目）に液を保持させることができるため、濡れ面形成の母材として大変好適である。また、液膜内部での渦流れ形成による液混合効果があり、物質移動や熱移動の面での優位性が期待できる。本稿では、エキスパンドメタルの濡れ性能の評価と、濡れ性能のメカニズム検討について述べる。

第11図は、鉛直に設置したエキスパンドメタルに対して、板上端部から液を供給し、その濡れ面積を計測したものである。エキスパンドメタルのメッシュ孔サイズは $A < B < C < D < E < F$ である。比較として、SUS304-2B仕上げの平滑板（以下、2B平滑板）も実施した。第12図は

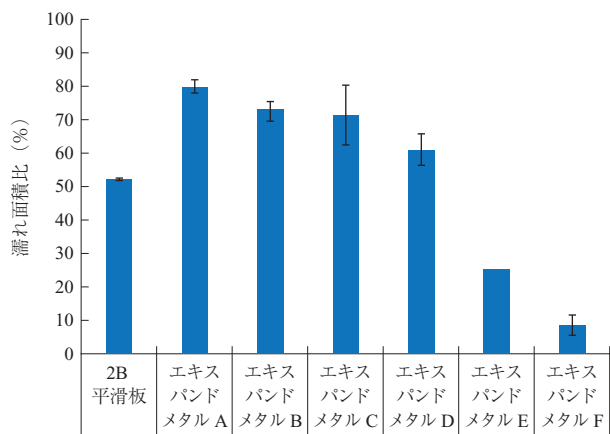


第9図 濡れ性を向上させる側壁形状の例
Fig. 9 Other structure examples that can improve wettability of liquid film flow



（注）エキスパンドメタルのメッシュ孔サイズは $A < B < C < D < E < F$

第11図 濡れ面積計測試験
Fig. 11 Experimental results of wetting area measurement



(注) エキスバンドメタルのメッシュ孔サイズは A<B<C<D<E<F

第12図 濡れ面積計測試験結果
Fig. 12 Experimental results of wetting area measurement

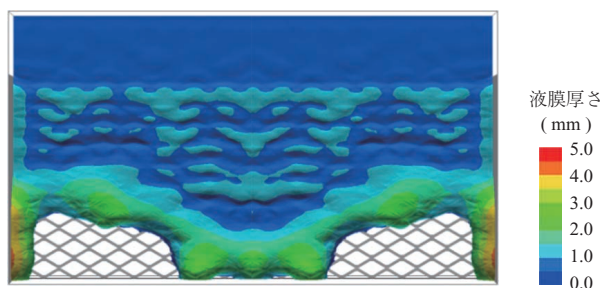
画像解析から濡れ面積を定量化したものである。流量および液供給方法は、実際のCO₂吸収塔内部の液流れを模擬して行った⁽⁹⁾。両面を撮影し、両面の相加平均から濡れ面積を求めた。試験液体は、吸収液の粘度、表面張力、接触角を模擬する目的でエチレングリコール 80 wt%水溶液を用いた。

第11図から、エキスバンドメタルは2B平滑板と比較して濡れ面積が大きく、濡れ面を形成する部材として好適であることが分かる。エキスバンドメタル同士を比較すると、孔寸法が小さいほど濡れ面積が高い傾向にある。一方で、孔寸法が小さいほど単位面積当たりのコストおよび質量は大きくなるため、最適な孔寸法の予測が重要となる。

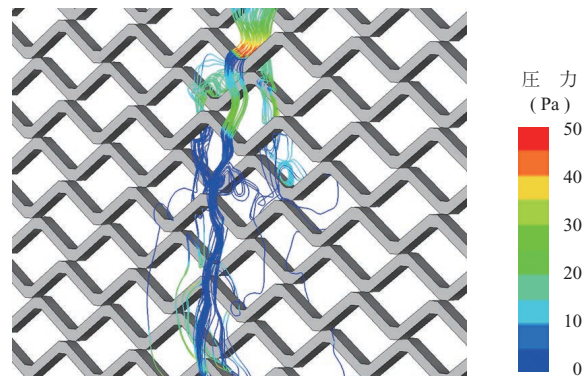
2.2.2 エキスバンドメタル上の濡れ現象のメカニズム

エキスバンドメタルでの濡れ現象のメカニズムを検討するため、CFDを実施した。解析結果の一例を第13図に示す。第14図は一部の流線を抜粋表示している(実際はスパン方向に一樣に液を供給している)。

エキスバンドメタルには主流方向に製造過程で生じる段差部分や、ワイヤ部そのものの厚みがあるが、それらの存



第13図 エキスバンドメタル上に形成される流下液膜の数値解析例
Fig. 13 Simulation result of falling liquid film on expanded metal



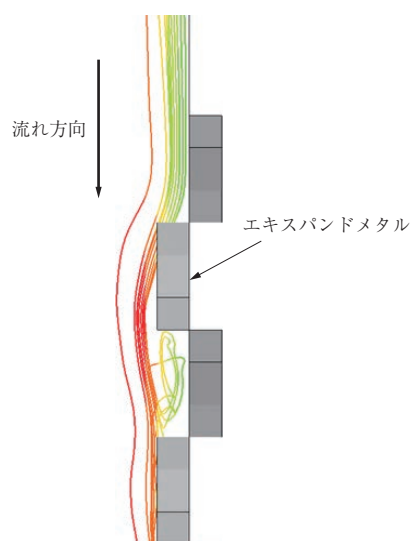
第14図 エキスバンドメタル上に形成される流下液膜の流線
Fig. 14 Stream lines on expanded metal

在により主流方向流れの一部が遮られ、スパン方向に偏向されるため、より濡れ拡がろうとする効果が見られる。第14図の流線の色は静圧を表しているが、段差部分で静圧が上昇しており、濡れ拡がる様子が見て取れる。一度スパン方向に拡がった液は、後述の孔部による液保持効果により濡れ面が維持され、結果的に平滑板よりも濡れ面の形成性能が高くなる。

また、エキスバンドメタルは濡れ性能だけでなく、液膜内部での液混合効果により、気液界面での物質移動・熱移動の促進効果も期待できる。第15図は、主流方向に沿った断面内での流線を示しているが、孔部に侵入した液が渦流れを形成し、液混合効果が高くなる。

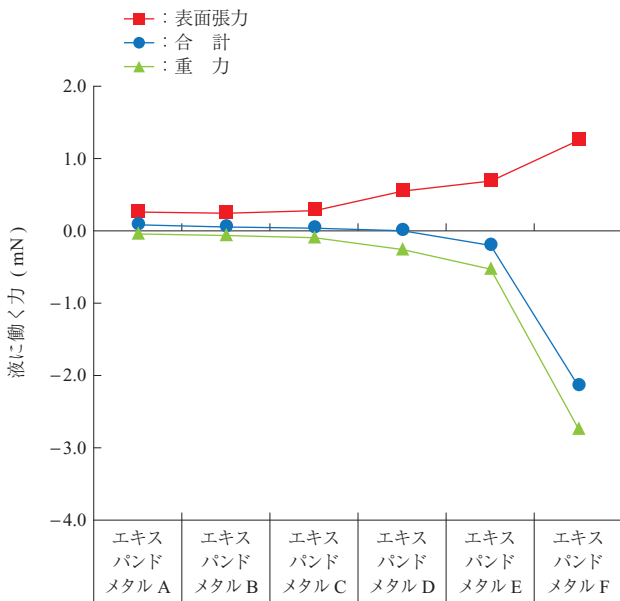
2.2.3 孔部での液保持現象の検討

孔部での液保持現象について、孔部内の液に働く表面張力と重力に着目して、孔寸法の変化による力の釣り合いを検討した。計算結果を第16図に示す。ラス目が大きくな



(注) 板鉛直断面方向から

第15図 エキスバンドメタル上に形成される流下液膜の流線
Fig. 15 Stream lines on expanded metal



(注) ・エキスバンドメタルのメッシュ孔サイズは A<B<C<D<E<F
 ・力の働く方向は、鉛直上方向を正とする

第 16 図 エキスバンドメタルのメッシュ孔に保持される液に働く力

Fig. 16 Forces acting on a liquid drop in an expanded metal lathe

ると、液を保持しようとする表面張力と、液の重力はともに大きくなるが、表面張力はスケールの 2 乗で働くのに対して重力は 3 乗で働くため、いずれは釣り合いが取れなくなり液を保持できなくなる。第 16 図および第 12 図は、各寸法での計算結果および単板濡れ面積試験の結果であるが、ラス目内の液保持が難しくなると、濡れ面積も急激に低下することが分かる。

なおエキスバンドメタルはワイヤ部の線径が太いため、各ラス目に保持された液滴同士が接触・合一することが防がれている。一方で、線径の細い金網では隣り合う液同士が容易に接触してしまうため、液が保持されにくい。このことから、エキスバンドメタルは濡れ面の形成部材としてより好適といえる^{(10), (11)}。

3. マイクロスケールの構造による革新的な濡れ制御技術

3.1 ダルロール加工による安価な濡れ向上技術

濡れ板の表面を粗面化することで、実質の表面積を増加させて濡れ性を制御できることは、Wenzel の式として古くから知られている⁽¹²⁾。

$$\cos\theta_w = r \cos\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

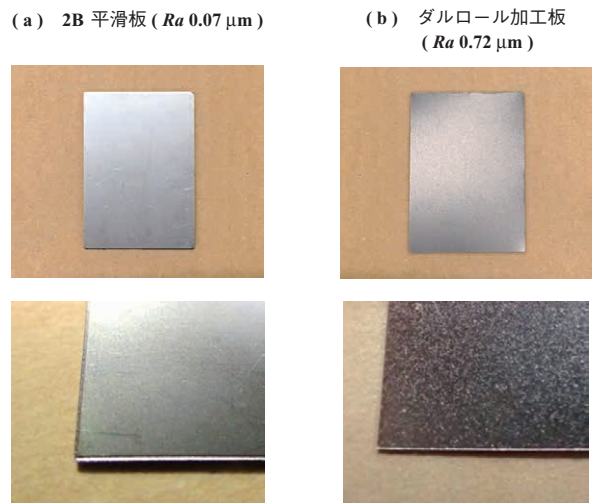
θ_w は粗面での接触角、 θ は平滑面での接触角、 r は平滑面に対する粗面の面積比 ($r \geq 1$) である。しかし工業的側面からみれば、表面積を有意に変化させるような深い粗

面化処理を大面積に施すことは、コストや技術面から容易ではない。一方で、例えば Kubiak ら⁽¹³⁾は、10 μm 以下の比較的浅い表面粗さスケールでも、その粗さ曲線のパラメータ特性によっては、接触角が変化し得ることを実験的に示している。また加藤ら⁽¹⁴⁾は、粗さ曲線の凹凸の角度が接触角履歴に作用することを示している。

金属の薄板表面に凹凸処理を施す手法の一つとして、ダルロール加工が挙げられる⁽¹⁵⁾。ダルロール加工はあらかじめ粗面化加工をした圧延ロールを用いて板を圧延することで、表面に凹凸を付与する加工法であり、工程への影響が少なく、凹凸付与によるコスト負担を抑えることができる。第 17 図にダルロール加工板を示す。

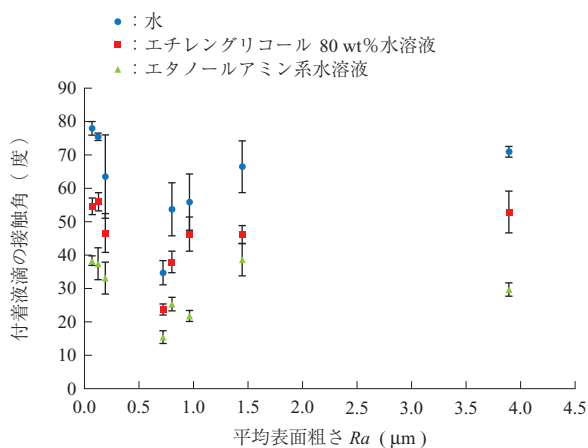
表面粗さの異なるダルロール板を製作し、それぞれの表面粗さおよび接触角の計測を実施した。表面粗さ曲線から試算される、理想的な平滑面からの表面積増加はせいぜい数%程度であったため、前述の Wenzel の式による表面積増大による濡れ向上効果は、本条件では無視できるほど小さい。

第 18 図は、協和界面科学株式会社製の接触角計 (DMs-401) を使い、シリンジ先端に形成させた液滴を静かに固体面に付着させ、その接触線の角度を計測したものである。第 19 図は接触角の計測例である。接触角を平均表面粗さ R_a で整理すると、 R_a に接触角を最小とする最適値があることが示唆された。試験液体は水、エチレングリコール 80 wt% 水溶液、エタノールアミン系水溶液の 3 種類で実施したが、いずれの液体でも同じ傾向を示した。

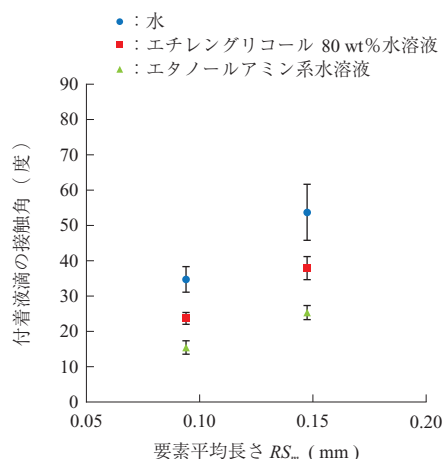


(注) R_a : 平均表面粗さ

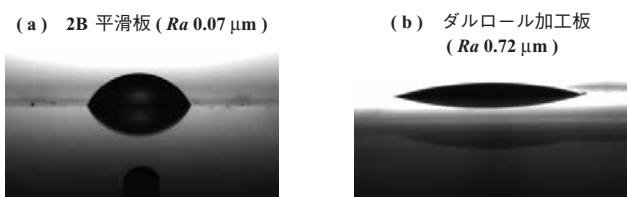
第 17 図 ダルロール加工板の例
 Fig. 17 Examples of textured plates



第 18 図 接触角の計測結果
Fig. 18 Contact angle measurement results



第 21 図 要素平均長さ RS_m による接触角の違い
Fig. 21 RS_m vs. contact angle
(注) $Ra : 0.7 \mu\text{m}$

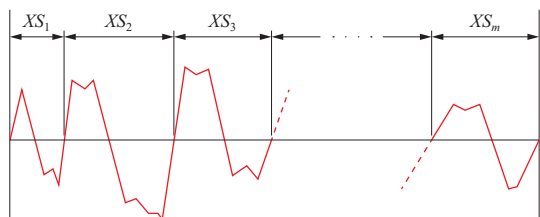


(注) 試験液：エチレングリコール 80 wt% 水溶液

第 19 図 接触角の計測例
Fig. 19 Contact angle measurement of a sessile drop

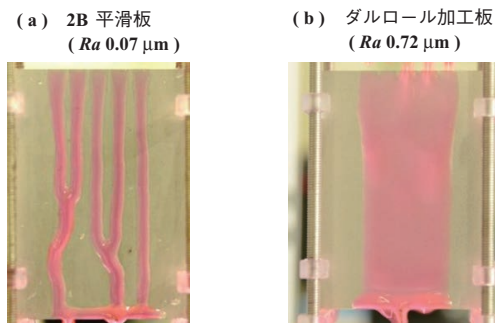
Ra 以外のパラメータの影響についても評価するため、 Ra がほぼ等しく、要素平均長さ RS_m (第 20 図) が異なる試料について接触角計測を行い、比較を試みた (第 21 図)。 RS_m は第 20 図で示すように、凹凸の水平方向の幅広さを表す尺度である。 RS_m が小さい方がより接触角が小さいことから、表面の凹凸の溝部を浸透する効果が接触角を変化させていると予想される。

第 22 図は、第 11 図と同様の体系にて行った濡れ面積計測試験の例を示す。エキスバンドメタルではそのミリスケールのメッシュ構造により濡れ性能が向上したが、ダルロール加工板のように表面のマイクロスケールの構造を工夫することでも、濡れ性能を向上させることができる⁽¹⁶⁾。



$$(注) RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m XS_i$$

第 20 図 要素平均長さの定義
Fig. 20 Mean spacing of profile irregularities (RS_m)



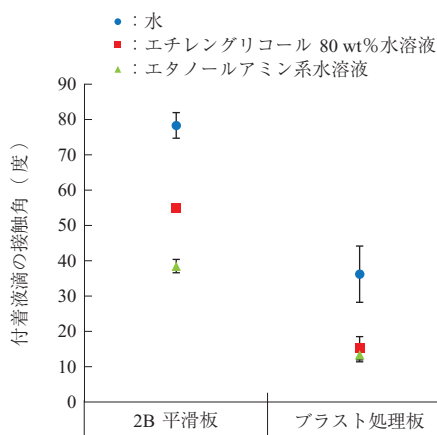
第 22 図 濡れ面積計測試験の例
Fig. 22 Experimental results of wetting area measurement

3.2 ブラスト処理による広範な濡れ向上技術

そのほかの粗面化の手法としては、ブラスト処理が挙げられる。前述のダルロール加工と比較すると、単位面積当たりの加工コストは一般に高くなるが、処理対象は薄板だけでなく、複雑な構造物に対しても粗さの付与が可能である。構造物への粗さ付与手法としては、ほかに薬液処理やプラズマ処理などが挙げられるが、ブラスト処理は前者と比べると乾燥工程や廃液処理工程が不要であり、後者に対してはコスト性および効果寿命の長さが強みとして挙げられる。

ブラスト処理により凹凸の大きな粗面を付与し、実質の表面積を増加させて濡れ性を制御させる事例はすでに挙げられているが⁽¹⁷⁾、⁽¹⁸⁾、ここではダルロール加工と同様に、 Ra が $1 \mu\text{m}$ 程度の微細な凹凸での領域に着目した。

第 23 図は、 $Ra = 0.73 \mu\text{m}$ のブラスト処理板について、第 18 図と同様の手法で接触角を計測した結果を示している。ブラスト処理板は 2B 平滑板に比べて明らかに濡れ性が向上している。また、このブラスト処理板は処理後



第 23 図 接触角の計測結果
Fig. 23 Contact angle measurement results

1 年以上、通常の室内雰囲気下で静置したものでも濡れ性および表面粗さは損なわれない。

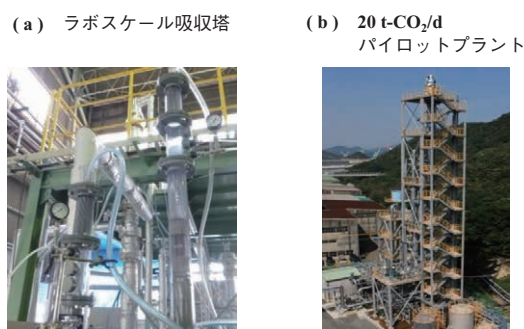
粗面化の手段に関わらず、マイクロスケールの表面粗さを適切に付与することで、濡れ性を制御できることが分かる。プラスト処理は板以外の構造物に適用できるだけでなく、マスキングによる部分処理も可能である。また効果寿命が長いので、長期間の運転が予想される機器類や、外気にさらされる機器類にも好適であり、さまざまな応用が期待される。

4. 濡れ制御技術による製品開発例

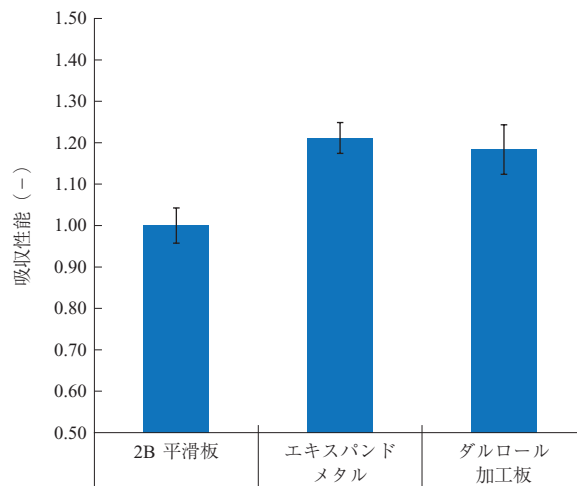
これまで述べた濡れ制御技術の適用実施例として、CO₂ 化学吸収プラントを紹介する。

当社では環境負荷低減技術として、CO₂ 回収技術の開発に取り組んでいる。CO₂ 回収手法の一つに化学吸収法があるが、これはアミンなどのアルカリ性水溶液を用いて、ガス中の CO₂ を化学的な吸収反応を利用して分離・回収する技術である。CO₂ 吸収塔では、塔上部からは吸収液、塔底部からは処理ガスを供給し、塔内で気液接触させることで CO₂ を分離・回収するが、気液接触面積を大きくするために充填物と呼ばれる構造物を塔内に設ける。充填物は板状の部材を多数並べた構造をしており、板部材の濡れ性能は塔全体での吸収性能に直結する。

本技術による吸収性能の向上効果を評価するため、2B 平滑板、エキスパンドメタル、ダルロール加工板それぞれで充填物を製作し、その吸収性能を評価した。充填物の板部材の総面積は、板の種類によらず同じにそろえている。試験は第 24 図 - (a) に示すラボスケール吸収塔装置を用い、実際のアミン吸収液を用いて性能評価した。第 25 図に結果を示す。2B 平滑板に比べて、エキスパンドメタル



第 24 図 CO₂ 吸収試験設備
Fig. 24 CO₂ absorption system



第 25 図 CO₂ 吸収性能試験結果
Fig. 25 Experimental results of absorption performance

およびダルロール加工板による顕著な気液接触性能の向上が確認された。

なお、このラボスケール吸収塔装置は、当社相生事業所（兵庫県）にあるパイロットプラント（第 24 図 - (b)）、処理能力 20 t-CO₂/d）と良い相関があることを検証済みである。いくつかの板部材についてはこのパイロットプラントでも評価しており、市販の充填物と比べて約 2 倍の吸収性能が確認されている⁽¹⁾。

5. 結 言

当社グループの多くの製品に関わる液膜流れについて、その流れを支配する濡れ現象に着目して、界面変形や液内流動などのメカニズムを解き明かした。濡れのメカニズムを利用して、ミリスケールやマイクロスケールの構造や粗面化などの僅かな工夫によって、巨大な製品で起こる流動現象を変えることができる。革新的な濡れ制御技術を紹介した。

この濡れ制御技術を CO₂ 化学吸収プラントの吸収塔に適用し、当社独自の充填物を開発した。今後も、濡れ現象に関わるさまざまな製品へ応用していく。

参 考 文 献

- (1) Y. Iso, J. Huang, M. Kato, S. Matsuno and K. Takano : Numerical and Experimental Study on Liquid Film Flows on Packing Elements in Absorbers for Post-Combustion CO₂ Capture, *Energy Procedia*, Vol. 37, (2013), pp. 860 - 868
- (2) 磯 良行, 佐賀真理子, 黄 健, 松野伸介 : 傾斜板上での液膜流と液柱流の遷移挙動, *混相流*, Vol. 28, (2014), pp. 39 - 46
- (3) W. Nusselt : Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, *Zeitschr. Ver. Deut. Ing.*, Vol. 60, (1916), pp. 541 - 546, 569 - 575
- (4) 加藤健司, 山下達也, 磯 良行, 脇本辰郎 : 平板および円柱外壁を流下する液膜流れのドライアウト消滅機構に関する研究, *混相流*, Vol. 29, (2015), pp. 467 - 476
- (5) 加藤健司, 徐 昌慶, 磯 良行, 池田諒介, 脇本辰郎 : 壁面を流下する液膜流れのドライアウトに及ぼす側壁形状の影響, *混相流*, Vol. 31-2, (2017) pp. 171 - 178
- (6) 株式会社 IHI, 公立大学法人大阪市立大学 : 充填材及びその製造方法, 国際公開番号 WO2018/025757
- (7) 加藤健司, 徐 昌慶, 磯 良行, 池田諒介, 脇本辰郎 : 側壁を有する流路壁面を流下する液膜流れのぬれ特性, *混相流*, Vol. 32-1, (2018), pp. 35 - 42
- (8) 株式会社 IHI, 公立大学法人大阪市立大学 : 充填材及びその製造方法, 特願第 2018-013603 号
- (9) 池田諒介, 磯 良行, 加藤健司, 脇本辰郎 : 充填物上での液膜流に関する実験 (板表面構造の影響), *混相流シンポジウム 2016 講演論文集*, D224, (2016)
- (10) 株式会社 IHI : ガス分離装置及び充填材, 特許第 5704238 号
- (11) 株式会社 IHI : 充填材の製造方法及び充填材, 特許第 6390699 号
- (12) R. N. Wenzel : Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water, *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 28, (1936), pp. 988 - 994
- (13) K. J. Kubiak, T. G. Mathia and M. C. T. Wilson : Wettability versus Roughness of Engineering Surfaces, *Wear*, Vol. 271, (2011), pp. 523 - 528
- (14) K. Katoh, H. Fujita and M. Yamamoto : Effect of Surface Roughness on Contact Angle Hysteresis, *Transactions of the JSME, B*, Vol. 57-544, (1991), pp. 4124 - 4129
- (15) 橋田貴雄, 奥村英典 : 調質圧延工程における板材表面粗度創製, *東洋鋼鉄*, Vol. 36, (2008), pp. 1 - 8
- (16) 株式会社 IHI : ガス分離装置及び充填材, 特開第 2019-022877 号
- (17) 廣田信義 : プラスト処理と塗膜付着性について, *実務表面技術*, Vol. 21-1, (1974), pp. 15 - 21
- (18) プリヂェストン : タイヤ, 国際公開番号 WO2017/039014