

流動解析から微小チャネルの機能を抽出

チャネルの屈曲を利用したマイクロミキサーの開発

大阪大学名誉教授

平田 雄志

1. はじめに

MEMS 技術の進展は、化学装置、化学プラントをマイクロ化、ミニチュア化するという新しい化学プロセス技術の道を拓きました。マイクロ化学プラント、ミニチュア化学プラントの構成要素である混合器、反応器、分離器、熱交換器などのデバイス（このような場合、装置よりもデバイスの方がマイクロ、ミニチュアの雰囲気を表していると思います）は、微小なチャネル（流路）を用いて構成され、流体を流しながら連続的な処理が行われます。従って、マイクロ化、ミニチュア化した化学デバイスに用いられる微小チャネルには、流体輸送だけでなく、チャネル内を流体を流通させながら目的とする操作が実施できる機能をもたせる必要があります。本稿では、流体混合に焦点をあてて、微小チャネルの流動解析をもとにその機能を抽出し、装置開発を行った大学での R&D 事例を紹介致します。なお、マイクロ化学プラントの現状と将来展望については、マイクロリアクターを中心に前一廣先生が別の章で詳しく解説されていますので、その章を参照して下さい。また、マイクロ・ナノ熱流体についてはハンドブック¹⁾が参考になります。

一般に、サブミリからミクロンオーダーの大きさのチャネルをマイクロチャネルと呼んでいます。流体がマイクロチャネルを流れるとき、私たちが日常経験するマクロなチャネル、例えば、水道管内の流れと異なった何か特

別な流体现象が現れるのでしょうか？

気体の場合、チャンネルの大きさが気体分子の自由行程と同程度になりますと、分子同士の衝突、分子とチャンネル壁の衝突が流れを支配しますので、流体の壁での速度はゼロではなく有限の値をもつことになります。このような流れをクヌッセン流れといい、その現象解析の多くは古典的な分子運動論に基づいて行われてきました。

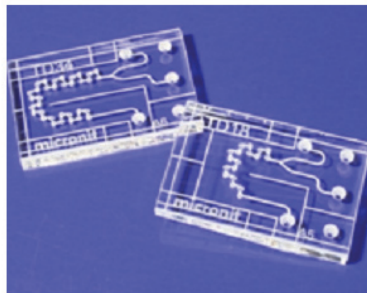
一方、液体の場合には、壁面近くに形成される電気二重層の存在を考える必要があります。電気二重層の厚さは溶液のイオン強度に依存し、純水ではサブミクロン・オーダー、通常の濃度の水溶液ではナノ・オーダーとなります。電気二重層内では、溶液の電気的中性条件は成立せず、壁面の帯電状態に応じて液の分極が生じます。例えば、シリカ・キャピラリーに水溶液を入れますと、 $\text{pH}3 \sim 4$ 以上ではシリカ表面のシラノール基は負に帯電しますので、電気二重層内の水溶液は正に分極します。そこで、キャピラリーの両端に直流電圧をかけて電場を印加しますと、電気二重層内で正に分極して壁面からの静電作用が弱い領域の液は陰極へ向かって動くことになります。この流れを電気浸透流と呼びます。キャピラリー中の溶液イオンは、その大きさと電荷に応じた速度で電場中を泳動するので、電気浸透流で全体の溶液を一様な速度で移動させながら、泳動速度の異なるイオンを分離することができ、混合イオンの分析が可能となります。このような分析法がキャピラリー電気泳動法です。これ以外にも、電気二重層内の動き得る流体が引き起こす現象があり、これらを総称して界面動電現象²⁾と云います。

上に述べたように極小チャンネル内の流体现象として、気体ではクヌッセン流れ、液体では界面動電現象がありますが、マイクロミキサーやマイクロリアクターなど通常のマイクロ化学デバイスでこのような現象を考慮しなければならない操作は、低圧下の気相反応や電気泳動分離などの特別な場合に

限られます。従って、チャンネルの微小化によって、拡散速度が加速され（拡散時間はチャンネル内の濃度斑の空間スケールの二乗に比例）、流体単位体積当りの物質移動・熱移動の界面積が大きく（比表面積＝面積／体積 $\propto 1$ ／チャンネルスケール）になりますが、チャンネルの内部で起る流体现象は何ら特別なものではなく、センチオーダーのチャンネル内の流体现象と本質的に同じであると云ってよいでしょう。

2. マイクロ化学デバイスのチャンネル構造

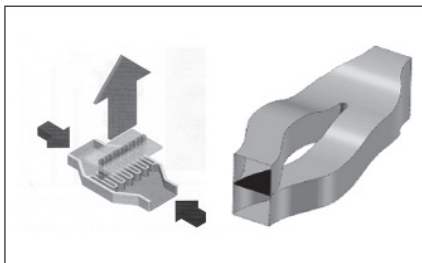
マイクロ化学デバイスに用いられる最も簡単な構造のチャンネルは円形断面のキャピラリーです。分析用キャピラリーに T 字管などの原料供給部をつけただけでマイクロリアクターが出来上がります。MEMS 微細加工技術を用いますと複雑なチャンネルが作製できます。マイクロ化学デバイスのチャンネル



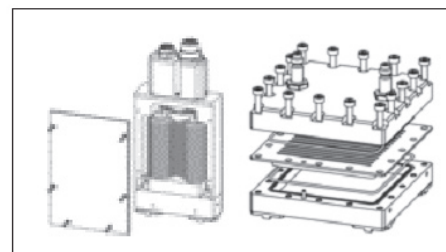
Micro Fluids



Coming



IMM



Ehrfeld

図1 マイクロ化学デバイス（外国製）のチャンネル例

例を図 1 に示しました。いずれもマイクロチャネルや微小孔を組み合わせた構造となっています。流体を流通させながら、混合、反応、分離、伝熱などの操作を行うために、これらのマイクロデバイスは原料を供給するためのチャネル、目的操作を行うチャネル、生成物を取り出すチャネルから構成されます。それらは 2 次元的な構成と 3 次元的な構成に大別されます。

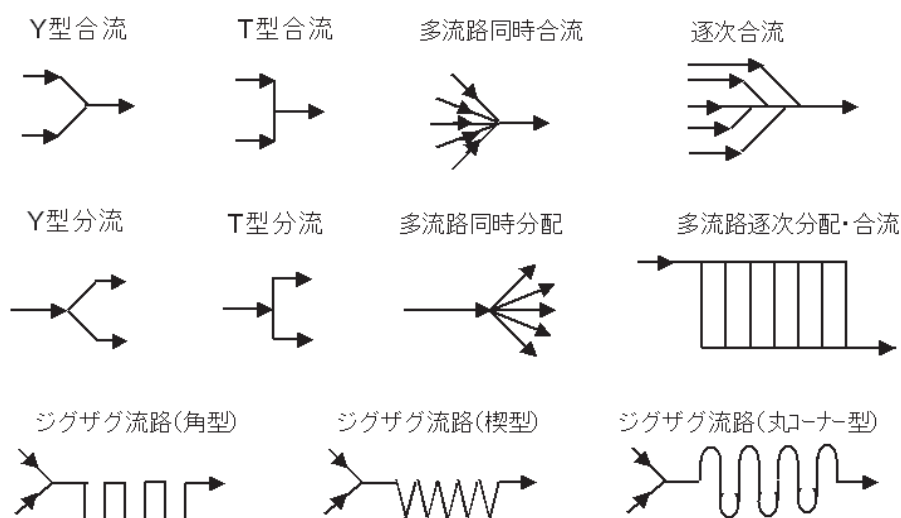


図 2 2次元マイクロチャネルの様式

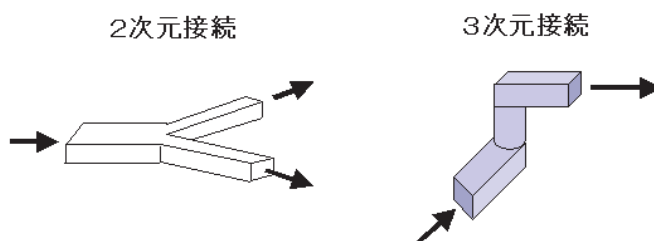


図 3 マイクロチャネルの接続

2次元チャネル構成の代表的な例を図 2 に示しました。複数の流体を供給する Y 型合流、T 型合流、多流路同時合流、逐次合流、処理液を排出する Y 型分流（分岐）、T 型分流、また、多流路同時分配、供給と排出を兼ね備え

た多流路逐次分配合流など色々なチャンネル構成があります。この他、限られた基板面積内で2次元チャンネルの長さを変化させ滞留時間を稼ぎたい場合には、ジグザグチャンネルが用いられます。

これらのチャンネルを同一基板上で連結してデバイスを構成する場合には、チャンネルは2次元的に接続されますが、2枚の基板に作成したチャンネルを連結する場合には図3に示したように3次元的に接続されます。例えば、2つの櫛状の多流路を交互に配置し、供給した2流体を多層化して混合させるIMM社のマイクロミキサー（図1の左下端）では櫛状流路は同一平面上にありますが、多層化した流体はその平面から垂直な方向に流出しますので、3次元構造となっています。

このような構造のマイクロチャンネルに均相流体や異相流体を流して目的操作を行います。相互に溶解しない液液系や気液系の異相流体の流動状態は一般にチャンネル壁に対する液体の濡れ性に左右されます。濡れ状態は壁面に吸着した物質の種類と量によって変わりますので、濡れ性まで考慮した流動状態の定量化はほぼ不可能と云ってよいでしょう。そこで、本稿では、均相液体に限定して、2次元、3次元微小チャンネル内の流動を、特に流体界面の挙動に着目して説明します。

3. マイクロチャンネル内の流体挙動と混合機能

マイクロチャンネル内の流れは本質的に層流です。その流動特性については、チャンネルのスケールを問わず、従来の結果や解析法がそのまま適用できます。断面が円形や長方形の直線状チャンネルの速度分布や圧力損失などの流動特性については理論解があり、便覧等にまとめられています。複雑な流路については、コンピュータで流体運動を記述するNavier-Stokes方程式を数値的に解いて流動特性を求めることができます（CFD：Computational Fluid

Dynamics 数値流体力学)。しかし、マイクロチャネルを用いて流体を輸送しながら混合を行う場合、層流中で迅速な混合を達成するためには、チャネルのもつ機能を明らかにしなくてはなりません。複数の流体を流入させるときに用いられる合流チャネルおよびチャネルの接続部分となる2次元屈曲チャネル、3次元屈曲チャネルを例にとって、チャネル内の流体挙動と混合機能の関係を説明いたします。

3-1 合流型チャネルの流れ

複数の流れを合流させるチャネルに対してどのような機能が必要でしょうか？高速反応を行う場合には、合流後直ちに混合を完了させる機能をもつチャネルが必要とされます。これとは逆に、異なる流体間の境界面を制御しながら反応や物質移動を操作したい場合もあるでしょう。いずれの場合も、合流直後の流体境界面の把握が重要となります。なお、本稿では、互いに溶け合う流体が接触した場合も含め、2流体の境界面を流体界面と呼ぶことにします。

図4に示した中央の主流チャネルとそれを挟む2本の支流チャネルから流体を供給し一本のチャネルに合流させたとき、2流体の境界面はどのような形状になるのでしょうか？直線状の流体の界面が保たれるのでしょうか？

図5の実験装置を用いて測定した結果³⁾を以下に紹介致します。

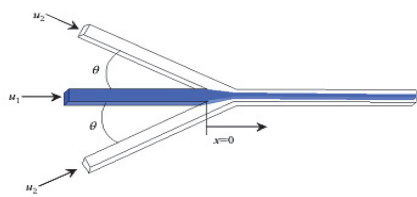


図4 合流型チャネルの形状（全てのチャネル幅1mm、深さ0.5mm）

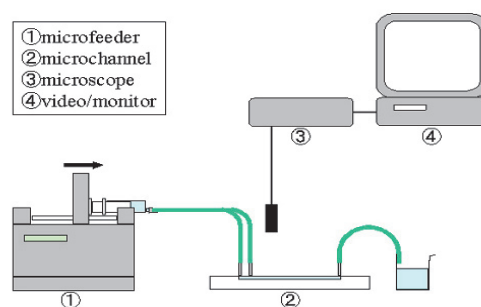


図5 実験装置

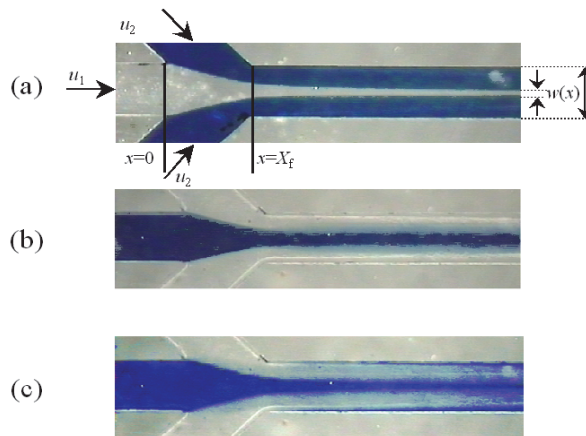


図 6 メチレンブルーを用いた流れの可視化 ((a)、(b) : 主流速 $u_1=0.1\text{m/s}$ 、支流速 $u_2=0.1\text{m/s}$ (c) : $u_1=0.1\text{m/s}$ 、 $u_2=0.1\text{m/s}$)

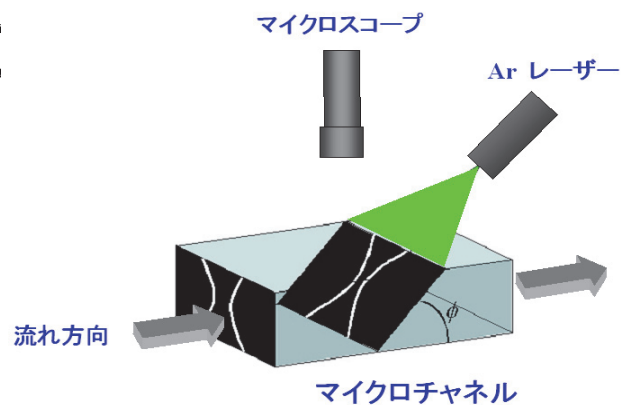


図 7 Ar レーザーシート光によるチャンネルの光切断

合流角度 $\theta = 45^\circ$ のチャンネルを用い、メチレンブルーで主流、支流のいずれかを着色すると、図 6 の写真が得られました。主流と支流が同じ流速 $u_1 = u_2 = 0.1\text{m/s}$ の条件で、支流を着色した(a)と主流を着色した(b)を比べますと、主流の幅は(b)の方が大きくなっています。(a)、(b)ともに同一の流れですが、着色する流体を変えると可視化の様子は異なってしまいます。また、主流速度 $u_1 = 0.1\text{ m/s}$ 、支流速 $u_2 = 0.4\text{ m/s}$ の(c)では、主流から流入したメチレンブルーは、チャンネル中央部だけでなく上下側壁近くにも現れました。

チャンネル上部からの観察だけではチャンネル内部の様子が分かりません。そこで、pH 4 以上で黄緑色の蛍光を発する蛍光フルオレセイン・ナトリウム（商品名ウラニン（和光製薬））を溶解した溶液を用いて流体界面の可視化を行いました。蛍光を発しない pH に調製した液に蛍光試薬を溶解して主流チャンネルに流し、pH 12 の NaOH 水溶液を支流チャンネルに流すと、pH 4 よりも大きな領域に拡散した試薬が蛍光を発します。拡散時間が短い場合には、蛍光発色域は狭い帯状となり 2 流体の界面を表すこととなります。その界面を図 7 に示したようにアルゴンレーザーを流路に対して斜めに照射して可視化し、チャンネルの上部に設置した顕微鏡で撮影しますと図 8 の画像が得られ

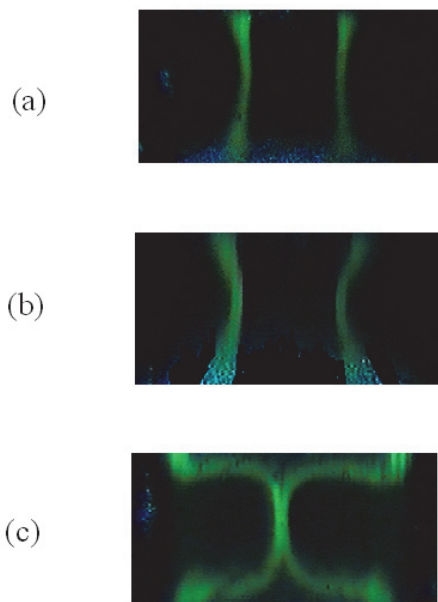


図8 レーザー蛍光法による流体界面の可視化（可視化位置 $x=30\text{mm}$ 、(a) $\theta=15^\circ$, $u_1=0.05\text{m/s}$, $u_2=0.019\text{m/s}$, 合流後の $Re=58.6$, (b) $\theta=45^\circ$, $u_1=0.05\text{m/s}$, $u_2=0.019\text{m/s}$, $Re=58.6$, (c) $\theta=15^\circ$, $u_1=0.2\text{m/s}$, $u_2=0.52\text{m/s}$, $Re=82.7$

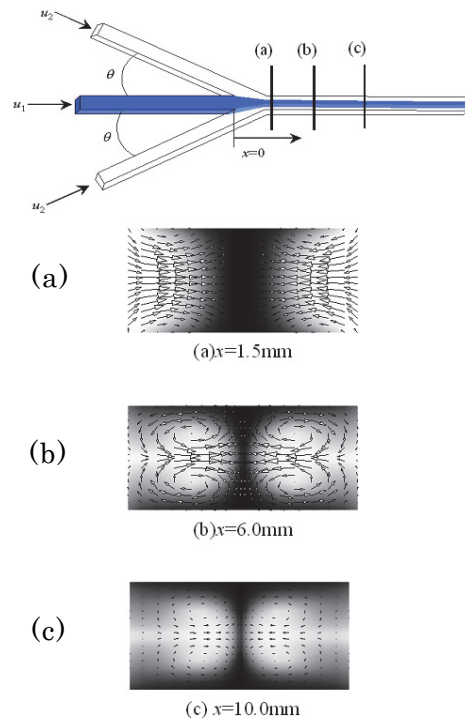


図9 CFD シミュレーション解析から得られた断面内2次流速分布と濃度分布（ $\theta=45^\circ$, $u_1 = u_2 = 0.1 \text{ m/s}$, $Re=200$ ）

ました。可視化位置は合流部から下流 $x=30 \text{ mm}$ です。主流速度が支流速度よりも大きい場合（ $u_1=0.05\text{m/s}$ 、 $u_2=0.019\text{m/s}$ ）で合流角度が異なる (a) ($\theta=15^\circ$) と (b) (45°) を比べますと、合流角度が小さい (a) では、底面に対して垂直で直線性の良い流体界面が形成されていますが、(b) では、上下底面での間隔が大きくなっています。また、合流角度が (a) と同じの (c) ($\theta=15^\circ$) では、支流速度 u_2 が主流速度 u_1 よりも大きいため、支流流体は中央部に流入し、その結果、主流流体は上下底板近くに押しつけられています。

このような流体界面が形成されるのは、チャンネルの断面内で中央に向かう流れと側壁では外側へ向かう流れがあるためと推測できます。それを確かめるために流体解析ソフトウェア RFLOW（株アールフロー）を用いて得られたシミュレーション結果を図9に示しました。チャンネル断面内には、(a) 合流直後（ $x=1.5\text{mm}$ ）に断面中央部で支流域から主流域に向かう流れが生じ、

(b) それを下流に流れるに従って ($x=6.0\text{mm}$) 成長してチャンネル断面内で二次渦流を形成し、(c) さらに下流に流れると ($x=10.0\text{mm}$)、粘性作用によって二次渦流が消散します。また、断面内の濃度分布の変化も同図に示しました。濃度の濃い部分と薄い部分は比較的シャープに分かれていますので、その境界を流体界面と考えることができます。このように合流後の流体界面の形状は合流直後に発生する二次渦流の強さによって決まることとなります。例えば、拡散速度を制御しながら反応を進行させる高度な操作では、流体界面の制御が重要となりますが、そのためには、流量に応じてチャンネル幅を設定し、かつ流れを低い Re 数領域に保つことが必要です。

3-2 ジグザグ型微小チャンネル

ジグザグ状のチャンネルは狭い基板面積を有効に利用するために設けられます。では、その流れは直線状チャンネル内の流れと同じになるのでしょうか？また、断面形状が長方形から歪んだ場合には、流れはどのように変化するのでしょうか？その検討例⁴⁾を以下に紹介します。

検討に用いたジグザグチャンネルは、Y字型合流部と屈曲角度 90° の 20 個の屈曲部をもつチャンネル (図 10) で、アクリル板にフライス加工して作製しました。長方形断面 (横幅 1.00mm 、深さ 0.5mm) と台形断面 (上辺 0.70mm 、下辺 0.98mm 、深さ 0.50mm) の 2 種類のチャンネルを作製し、図 5, 7 と同様の実験装置とレーザー蛍光観察装置を用いて流体界面の挙動を調べました。

流れがジグザグ屈曲部を通過すると、流れの方向が大きく変わるために流体は速度の 2 乗に比例する遠心力を受けます。長方形断面チャンネルの中央部の流体は、壁面近くの流体よりも速い速度で流れるので、受ける遠心力も大きく、流線の曲率中心から外へ向かって押し出されます。そして、外壁で上

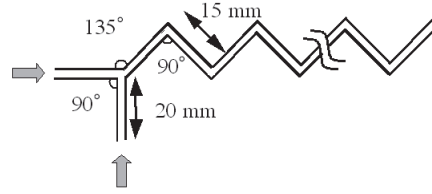
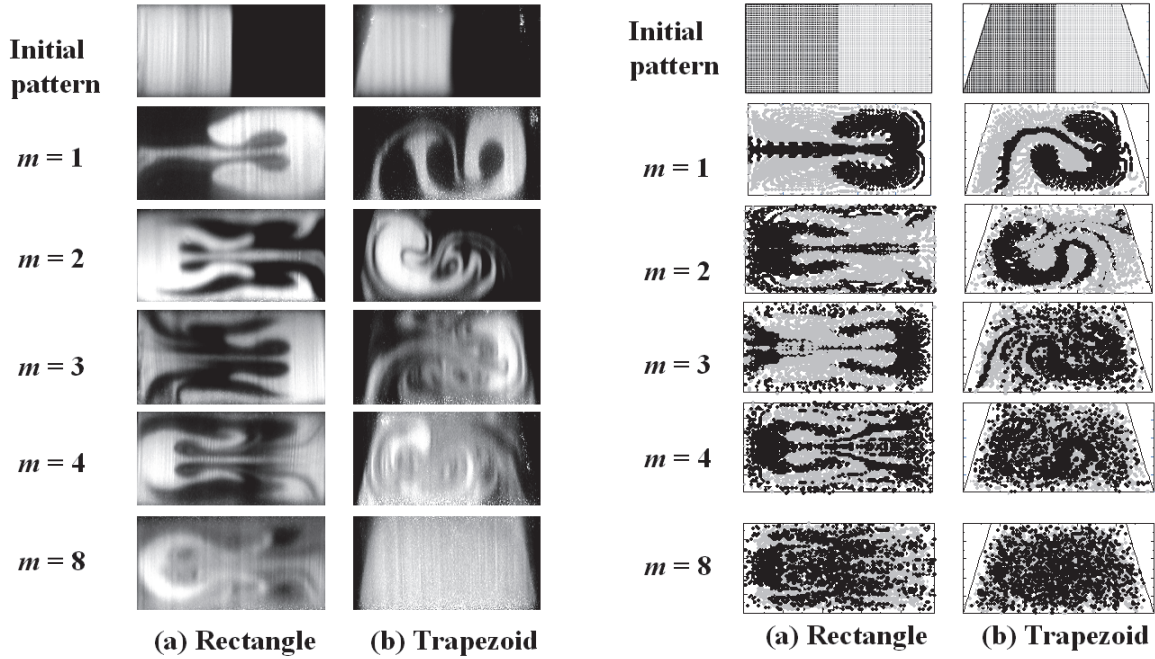


図 10 ジグザグ状の試験チャンネル



(a) CFD シミュレーション解析から求めた流体粒子の断面分布 (左：長方形、右：台形)

(b) レーザー蛍光法を用いて可視化した断面内の混合パターン (左：長方形、右：台形)

図 11 レーザー蛍光法と CFD による長方形ジグザグチャンネルと台形ジグザグチャンネル内の混合パターンの変化とその比較 (m : 入口から数えた屈曲部の数すなわち屈曲回数 ($Re=192$))

下に別れた流体は、上下の側壁に沿いながら内壁へ向かって流れ、内壁付近の中央部に集まった後、外壁へ向かって流れますので、チャンネル断面内の中央部では外側へ向かう流れ、上下側壁付近では内側へ向かう 1 対の渦流が形成されます。このような渦流を **Dien 渦** と呼びます。長方形断面チャンネルでは、流体が屈曲部を通過する毎に回転方向が逆の同じ渦流が発生しますので、流体界面を形成する流体粒子は屈曲部で交互に回転方向が逆転する渦流に

乗りながら下流へ移動していきます。一方、台形チャンネルでは、外壁と内壁が側壁に対して歪んでいるために非対称な渦流が形成されます。その結果、**図 11** に示したように、長方形断面チャンネルではパターンが左右反転しながら混合が進行していきませんが、台形断面チャンネルではパターンが歪みますので、混合が促進されます。しかし、 Re が小さくなると屈曲部で発生する渦流が弱くなり、渦流による混合促進効果は期待できません。長方形断面のチャンネルでは、最初の屈曲部で歪んだ流体界面は、次の屈曲部で逆回転する渦流が発生するため、元の直線状の形状に戻ってしまいます。

3-3 3次元屈曲チャンネルの流れ

異なった複数の平板あるいは1枚の平板の表面、裏面に加工したチャンネルを連結する場合、平板に孔をあけて連結する方法がよく用いられます。そのようなチャンネルの連結部は、**図 12** に示したように、異なった平面上の長方形断面をもつ2本の直線チャンネル（上流・下流チャンネル）が角度 θ で交差し、それらが円形チャンネルで互いに垂直に接続され3次元的に屈曲した基本構造をとります。上流チャンネルの断面を2分するように2流体が流入したとき、直線状の流体界面はこの3次元屈曲チャンネルを通過した後でどのような形状になるのでしょうか？実験とシミュレーション解析の結果⁵⁾を以下に紹介致します。

上流直線チャンネルにY字型の流入チャンネルを取り付け、一方から蛍光試薬を含む液を、他方から含まない液を同流量で流し、アルゴンレーザー光を照射して屈曲部出口から10mm下流の断面で流体界面の可視化を行いました。その可視化像と数値シミュレーション解析で得た流体界面の比較を**図 13** に示します。上流チャンネル入口断面で垂直な流体界面は、 $Re = 0.5, 9.39$ の低レイノルズ数では歪みは少なく傾斜していますが、 $Re = 23.4, 56.4$ では大きく歪んでいます。この大きな歪みは、流体が屈曲部を流れるときに遠心力を受

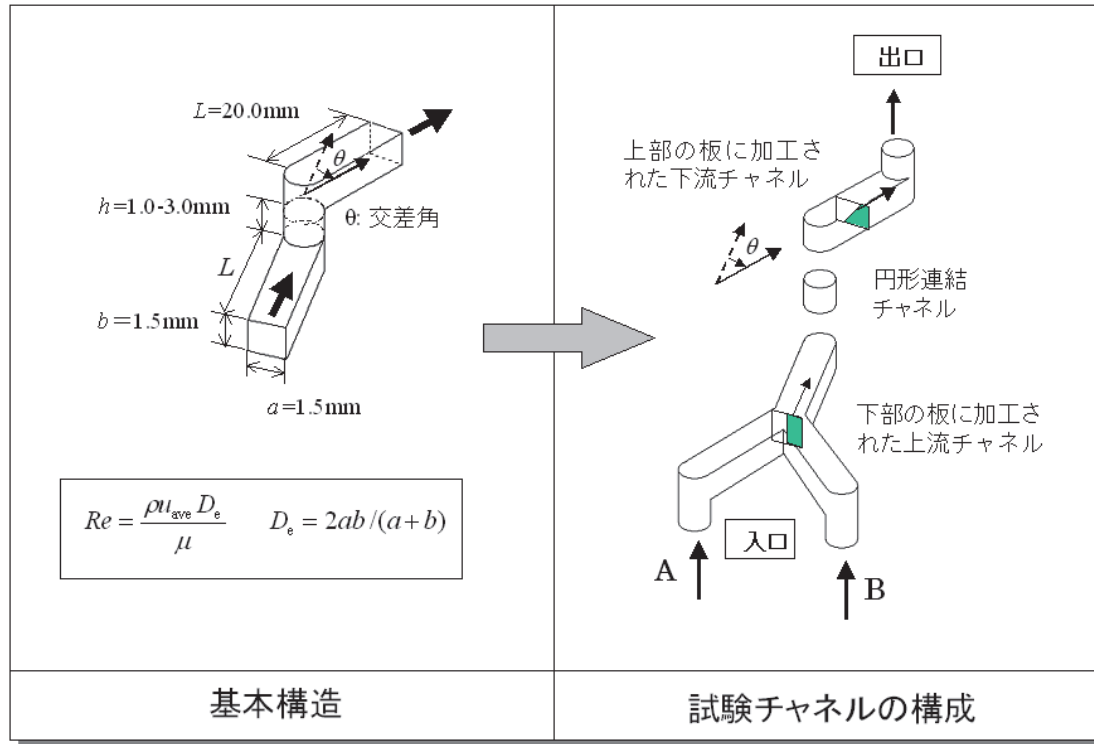


図 12 3次元屈曲チャンネルの構造と寸法

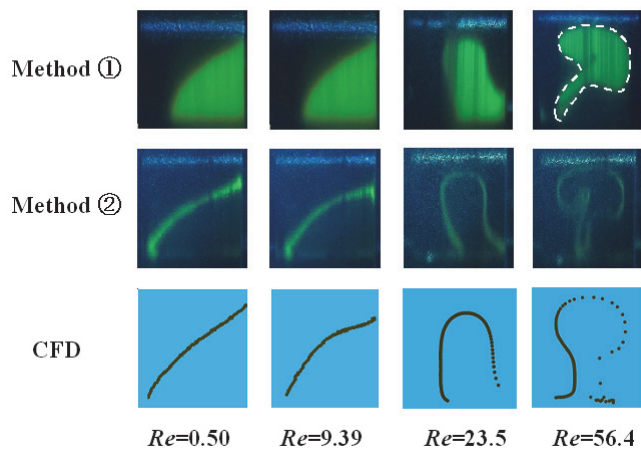


図 13 流体界面の可視化像と CFD シミュレーション解析像 ($\theta=60^\circ$)

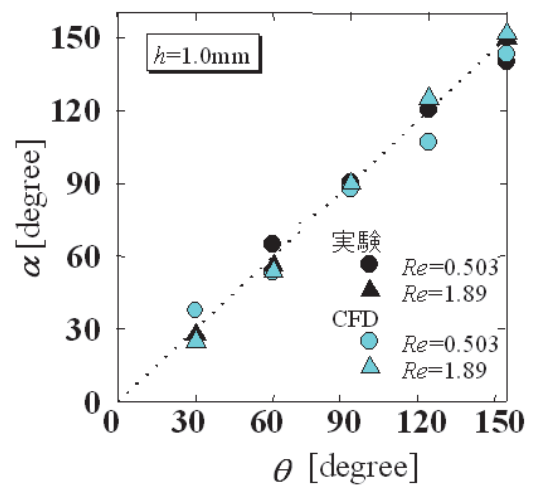


図 14 流体界面の回転角 α とチャンネル交差角 θ の関係

けて発生する 2 次流れによるものです。歪みの少ない低 Re 数領域の流体界面を直線で近似して、それを流出方向に見たときのチャンネル断面座標における回転角度 α とチャンネル交差角度 θ の関係を調べました。その結果、図 14 に示したようにに、流体界面の回転角度 α はチャンネルの交角度 θ に等しくなるこ

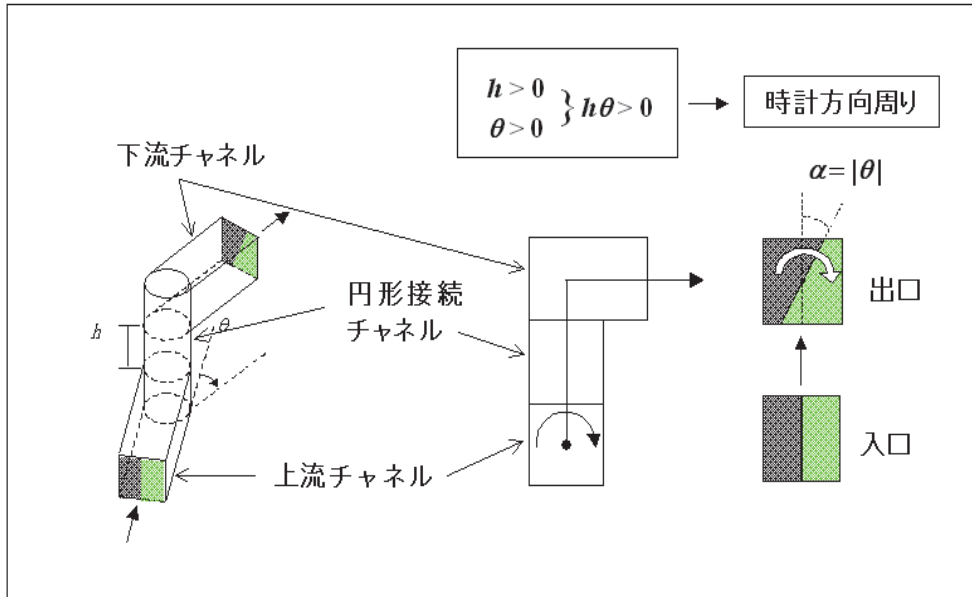


図 15 3次元屈曲チャンネルを流体が流れるときの流体界面の回転則

とが分りました。また、流体界面の回転方向は、図 15 に示すように、上流チャンネル断面に対して垂直に下流方向を見て、円形接続チャンネルを回転アーム、下流チャンネルの流出方向を回転アーム先端の移動方向とみなした時のアームの回転方向に一致します。この関係を 3次元屈曲チャンネルにおける流体界面の回転則と呼ぶことにします。

4. 流体界面の回転を利用した平板静止型混合器の開発^{6,7)}

高速反応系では反応流体供給直後に分子拡散による混合を完了させるために、原料流体を層間隔が出来るだけ狭い多層状にして流入させる必要があります。この要求に対しては、二つの橢状流路を向き合わせて一方の橢状流路の隙間に他方の橢状流路を配置した形式のミキサー（図 1 IMMミキサーの左側）や放射状に配列した多数のチャンネルを中心で 1本のチャンネルに接続して多層流れを集中させる形式のミキサーが開発されています。しかし、これらはチャンネル内部の流れの特性を利用したミキサーではありません。

チャンネル内部で流体混合を進行させるためには、混合エレメントを挿入す

るか、あるいはチャンネルの形状を工夫して流体を流しながら自動的に混合を進行させる必要があります。Kenics や Sulzer のスタティック・ミキサーはマクロチャンネルに混合エレメントを挿入した混合装置ですが、それらをマイクロチャンネルに適用するにはエレメントの形状が複雑すぎて小さく出来ません。マイクロチャンネルには、流路にエレメントを挿入することなく流体混合が進行するような静止混合型のチャンネルが望まれます。

4-1 流体界面の回転則に基づくミキサーチャンネルの設計法

ジグザグチャンネルのように2次元的な屈曲部をもつチャンネルでは、大きなレイノルズ数では Dien 渦による混合が生じますが、低いレイノルズ数では混合は期待できません。そこで3次元的な屈曲の利用を考えます。図 16 に流体界面の回転則に基づいた静止型混合チャンネルの構成概念を示しました。

入口で縦方向に2層を形成した流体を4層に多層化する構造として、例えば(a)のように流体層を横方向に2分割し、縦方向から再合流させるエレメント構造が考えられます。しかしながら、横方向に分割したそれぞれの流体層を縦方向から再合流させるためには、必ず3次元的に曲がったチャンネルが必要となります。流体界面の回転則により流体界面はチャンネルの交差角に応じて回転するため、(a)の構造のチャンネルを構成するためには、チャンネル断面のスケールに比べて流れ方向のスケールを長くして屈曲の度合いを小さくする必要があります。図 17 に示した IMM 社のキャタピラミキサーは(a)の構造をとっておりますので、チャンネルの形状は流れ方向に緩やかに変化しています。エレメントを短くしようとするれば、流体界面はチャンネルの屈曲に応じて回転してしまいます。

一方、(b)で示すように、流体を分割し、180°回転させた後に再合流させるチャンネル構成とすれば、3次元的になりますが、比較的短い長さの混合エレメントを構成することができます。また、(c)のように同一平面上に設けた分

割流路を流しながら流体を 180°回転させた後、再合流させ、異なる平面上に設けた次のエレメントに流入させる形式も考えられます。

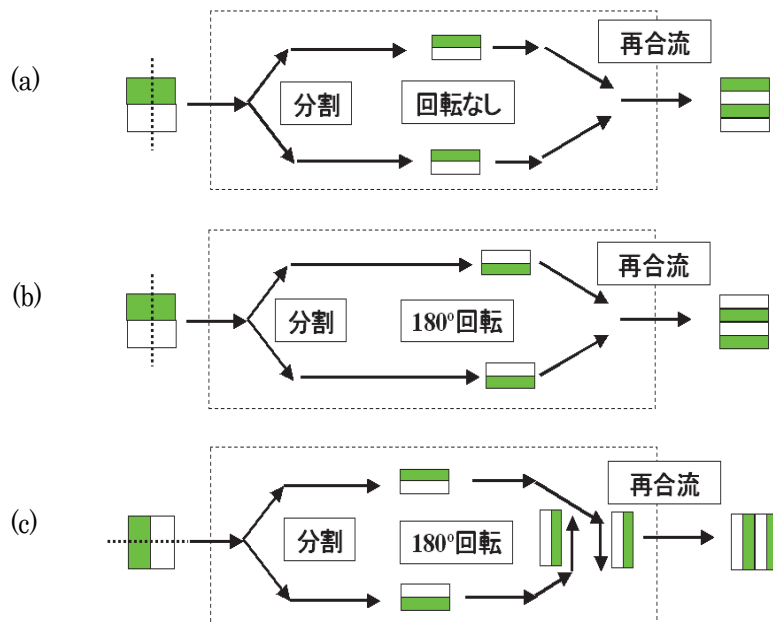


図 16 静止混合型チャンネル構成の基本概念図

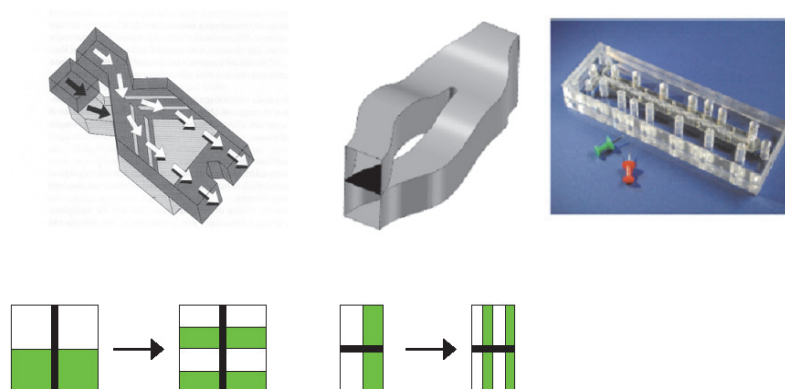


図 17 分割・再合流型のキャタピラ・ミキサー (IMM 社)
プロタイプ (左) と改良品 (中央と右)

4-2 Y型ミキサー

図 16(b)に示したチャンネル構成として、図 18 に示す Y 型ミキサーを開発しました⁹⁾。このミキサーの単位エレメントは、右側の図に示すように、入口

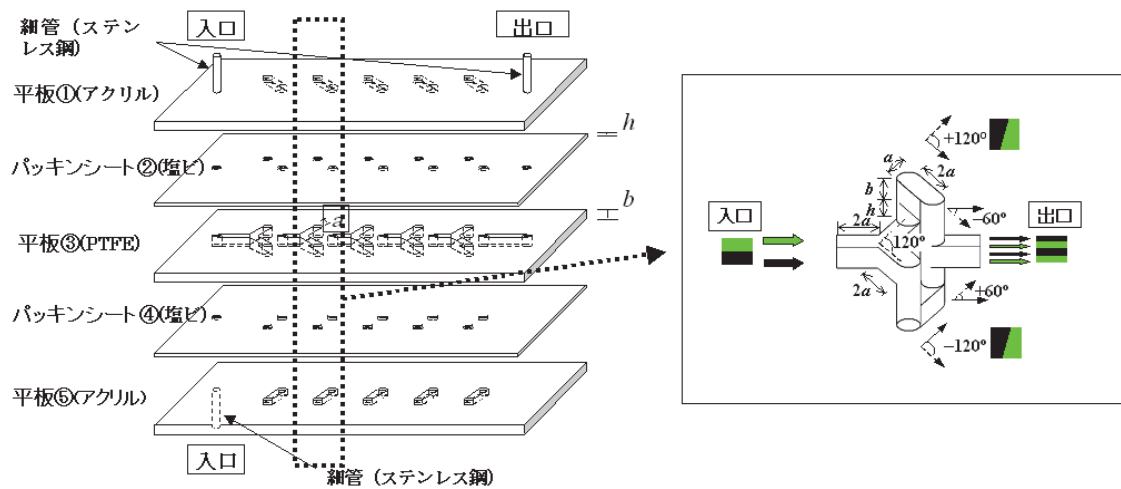


図 18 Y 型ミキサーの単位エレメントと平板を用いたミキサー構成

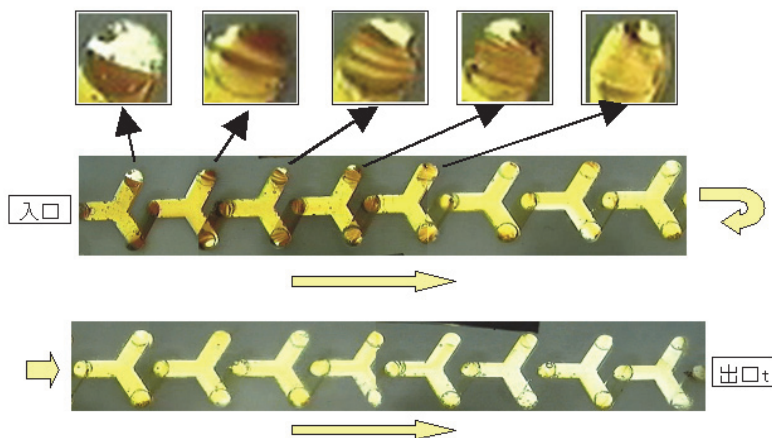


図 19 Y 型ミキサー内の混合過程の可視化（ヨウ素・チオ硫酸ナトリウムの脱色反応を利用）（ $Re=0.5$ ，チャンネル寸法 $a=b=h=3\text{mm}$ ）

の Y 字分岐チャンネル、2 本の 3 次元屈曲チャンネルおよび再合流チャンネルから構成されます。Y 字チャンネルによって流入した流れは横方向左右に分割されます。流れ方向に対して左側を通るチャンネルは 1 段高くなった後、流れ方向に対して 120° 右回りに屈曲し、その後、チャンネルは 1 段低くなって 60° 左回りに屈曲した後、エレメント出口で縦方向から合流します。一方、流れ方向

に対して右側を通るチャンネルは1段低くなって120°左回りに屈曲した後、1段高くなって60°右回りに屈曲してエレメント出口でもう一方のチャンネルと合流します。先に述べました流体界面の回転則に従えば、分割後のそれぞれのチャンネルを流れる流体は、流れに垂直な断面内で右回りに180°ずつ回転した後再合流するため、入口2層の流体層は出口で4層に倍化されることになります。なお、Y字チャンネルで分岐した後、左側を一段低く、右側を一段高くして同様の屈曲チャンネルを構成しても構いません。また、流体層は180°回転しますので、層の縞模様は1エレメント毎に逆転します。

Y型ミキサー ($a=b=h=3\text{mm}$) 内の脱色反応の進行過程を図19に示しました。供給2液はグリセリン水溶液であり、一方にはヨウ素が、他方には反応等量に対して25%過剰のチオ硫酸ナトリウムが含まれていますので、混合が完了すれば溶液は脱色され透明になります。入口近くの円形接続チャンネルの可視化像は系統的に層が倍化していく様子を示しています。また、下流へ向かって混合が進行し脱色されていく様子も分ります。

4-3 σ 型ミキサー

図16(c)の考え方に基づく混合エレメントとして、図20に示す σ 型ミキサーを開発しました⁹⁾。 σ 型ミキサーは、ギリシャ文字の σ に似かよった形状のエレメントの列と入口・出口用の直線チャンネルおよびこれらを連結する円形チャンネルから構成されます。なお、エレメントの形状は、分割された流路の流量が等しくなるようCFD解析を援用して設計しました。

2液の流れを図中に白黒の矢印で示しました。1番目のエレメントでは流体配置の並べ替えが行われ、2層になった流体が2番目のエレメントに流入します。2層流体は2番目エレメントの入口で分割された後、それぞれの分割流体は分岐チャンネルで流れ方向を180°回転して互いに平行に整列した後、2番目の出口に接続された円形チャンネル内で合流し、4層流体となります。

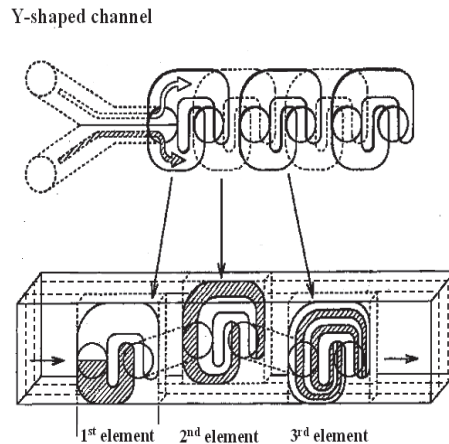
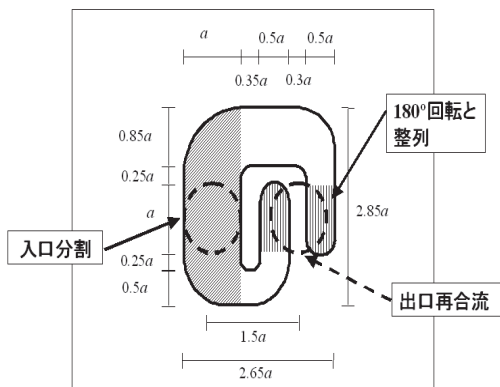


図 20 σ 型ミキサの元素平面図とチャネルの連結構

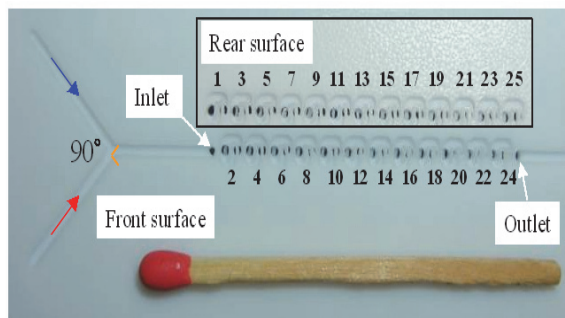


図 21 PTFE 平板両面に加工した σ 型ミキサ ($a=b=h=1\text{mm}$ 、25 エレメント)

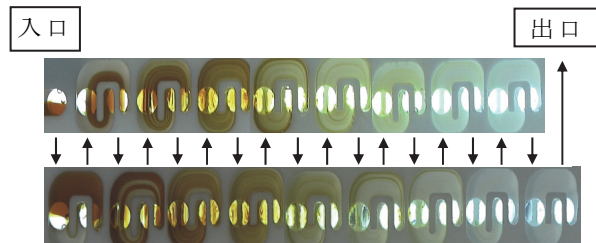


図 22 混合進行過程 ($Re=1.2$ 、 $a=b=h=3\text{mm}$ 、17 エレメント)

このように、1 エレメント通過する毎に流体層数が倍化して静止型混合が進行します。また、この場合も流体層の縞模様は1 エレメント毎に逆転します。

試作した σ 型ミキサの構造を図 21 に、脱色反応の進行過程を図 22 に示しました。なお、 b はチャネル深さ、 h は円形接続チャネルの長さです。入口付近では分割・再合流の静止型混合が設計通りに進行し、下流では脱色が進行していくことが分ります。

4-4 混合完了に必要なエレメント数

ヨウ素が完全脱色する位置までのエレメント数を混合完了に必要なエレメント数とし、Y 型ミキサ (n 対 Re) とシグマ型ミキサ (n' 対 Re 、 $n' = 2$ 番目からのエレメント数) の結果を図 23、24 に示します。エレメント

数はレイノルズ数 ($Re = \rho u_{av} d_{eq} / \mu$, $u_{av} = Q / ab$, $d_{eq} = 2ab / (a+b)$) の増加とともに、 $Re < 10$ の条件では増加しますが、 $Re > 10$ では逆に減少しています。

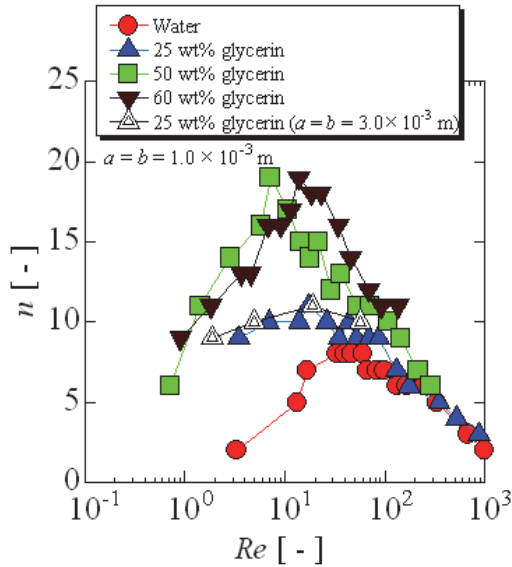


図 23 Y型ミキサーの混合完了に必要なエレメント数

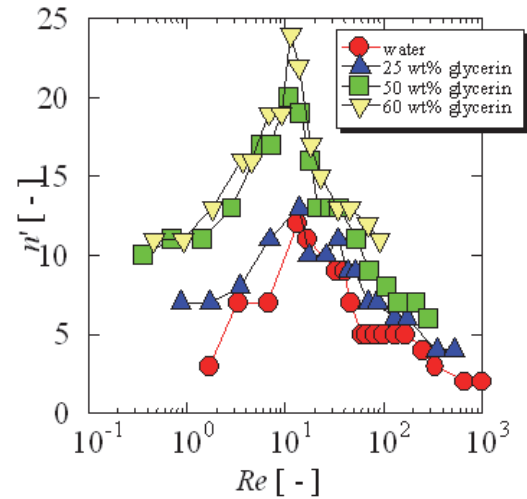


図 24 σ 型ミキサーの混合完了に必要なエレメント数

$Re < 10$ の領域における n , n' の Re に対する依存性についてはつぎのように説明できます。同じ物性値の溶液では、 Re は流速に比例します。流速を増加しますと、エレメント内の滞留時間が減少し、その結果、1個のエレメントを通過するごとに流体層の厚さは半減するのですが、拡散時間も短くなり完全脱色に必要なエレメント数が増加すると考えることができます。一方、 $Re > 10$ では、屈曲部で2次流が発生するために流体界面が歪んで引き伸ばされ、その度合いがレイノルズ数の増加とともに大きくなります。従って、この Re 域では理想的な分割・再合流の静止型混合は行われませんが、流体界面積の増大とそれに伴う流体層の薄層化の効果が勝り、混合完了に必要なエレメント数が減少することになります。この2次流の発生は、可視化実験、CFDシミュレーション解析から確かめています。

5. おわりに

本稿では、チャンネルの合流部と屈曲部における流体现象を実験と数値シミュレーション解析から調べ、 $Re < 10$ の低レイノルズ数の流れでは、3次元屈曲チャンネルを流通する流体の界面は、「回転角 = チャンネルの交差角」の簡単な関係（流体界面の回転則）に従うことを述べました。その関係に基づいて、流体界面を分割、逆転、再合流して静止型混合が可能なチャンネル構造を設計できることも示しました。3次元屈曲チャンネルのもつ機能の一つが、この流体界面の回転則から得られたこととなります。

また、実験とコンピュータを用いた流動解析を適切に組み合わせた設計手法は、マイクロデバイスのような層流中で生じる現象の解析やデバイスの設計には有用であることも示しました。このような方法を採用すると、デバイスの開発期間を短縮し、その設計精度を向上させることが可能となります。

参考文献

- 1) マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック編集委員会編：「マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック」（NTS、2006）
- 2) 北原文雄：界面・コロイド化学の基礎（講談社、1994）
- 3) 国松宏、井上義朗、平田雄志：化学工学論文集、第 28 巻、753-758、(2002)
- 4) 安積高靖、住友千恵、平田雄志、井上義朗：化学工学論文集、第 33 巻、173-180、(2007)
- 5) 大川和男、中元崇、井上義朗、平田雄志：化学工学論文集、第 31 巻、192-199、(2005)
- 6) 大川和男、中元崇、井上義朗、平田雄志、：化学工学論文集、第 31 巻、352-360、(2005)
- 7) 大川和男、中元崇、井上義朗、平田雄志：化学工学論文集、第 31 巻、457-465、(2005)

特 許： 平板静止型混合器：日本、No.3810778