

#### 4.6 マイクロ・ナノ熱流体 (Micro-/nano-scale heat and fluid flow)

1960年代以降発展したシリコン加工技術は、1979年にスタンフォード大学のミニチュア・ガスクロマトグラフィに応用された。このデバイスでは、2インチウェーハ上に全長1.5mのマイクロカラム、マイクロバルブなどが既に作り込まれ、以後のマイクロマシン技術の発展のきっかけの1つとなった。この例でも判るように、もともとマイクロ・ナノ技術と熱流体デバイスは密接な関係にあると言える。本節では、マイクロ・ナノ技術と熱流体工学の古典的アプローチとの接点を中心に解説する。

1995年頃から、シリコンチップ上の化学分析装置、電子デバイスの直接冷却、インクジェットプリンタなど、工業製品への応用の機運とともに、微小スケールの流れについて盛んに研究が行われるようになった。また、振動型マイクロセンサ、圧力センサ、熱式流れセンサ、超小型流体軸受など、マイクロマシン技術で製作されるデバイスの設計においても微小スケールの熱流動現象は重要な設計要因である。

統計力学的観点からは、分子集団の平均値が1%の変動に収まるのに必要なサンプル数は10,000個とされ、大気中では一辺が65nm程度の立方体に相当する。従って、実際のデバイスのスケールでは統計量はマクロスケールと同様に定義されると考えてよい。

通常、流体は連続体と仮定され、流れとそれに伴う熱の輸送は、連続の式(質量保存の式)、ナビエ・ストークス方程式(運動量のバランス式)、エネルギー式(エネルギー保存の式)で記述される。

マクロスケールの流れは乱流である

ことが多いが、サブミリ～マイクロスケールの流れは一般に乱流遷移せず、層流状態を保つことがほとんどである。流れのスケールが小さくなると、まず、単純なスケール効果の影響によって、相対的に摩擦や伝熱が増大する。また、流体力のうち、重力や慣性力のような体積力の影響は小さくなり、表面張力などの表面力が支配的になる。流体中で運動する物体については、相対的に流体反力の影響が増大する。さらに、流体の駆動方法としても、圧力や重力駆動でなく、電気浸透流などの電場駆動流れが用いられるようになる。単相流のマイクロ熱伝達は、流れと同様に単純なスケール効果の影響を受けるが、相変化を伴う気液混相流などではより複雑な現象が生じると考えられている。

さらにスケールが小さくなると、分子スケールの効果が現れる。気体では希薄気体効果、液体では電気二重層の影響が考慮する必要がある。

今までに調べられた最も小さいスケールの流れとしては、カーボンナノチューブの内部に存在する液滴の運動について調べた例がある。しかし、マイクロ流路製作技術による流路のスケールは通常サブミリ～マイクロスケールであり、分子効果の影響は無視できないとしても比較的小さいことが多い。以下、サブミリ～サブマイクロスケールの流路を総称して、マイクロ流路と呼ぶことにする。

マクロスケールの流れの大部分は、流体と伝熱のみの解析で十分であったが、マイクロ流路内の流れでは、流体、伝熱、表面張力、多相流、分子効果、構造変形・振動、電磁場、化学反応などが連成する複雑な場を形成することが多く、連続体近似が成立する領域だけ限っても、必ずしも十分な知識が得られているとは言えない。現在、マ

マイクロ画像計測，連続体と分子レベルを結ぶハイブリッド型の数値シミュレーション，などにより，様々な解析が進められており，今後の研究の成果がまたれる。

## 1. マイクロ流路製作技術（まいくろりゅうろせいさくぎじゅつ，**Fabrication technologies for micro conduits**)

シリコンウェハ上のマイクロ流路は，水酸化カリウム (KOH)，水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH) による結晶異方性ウェットエッチングにより製作されることが多い。ミラー指数(100)のウェハを用いた場合，断面形状は底角 125.26 度の台形となる。流路を形成するには，上部にガラス基板を陽極接合するか，別のシリコンウェハを直接接合する。濃度，温度，添加物について十分に最適化されたエッチング条件では表面粗さを数 nm 以下にすることが可能である。シリコンウェハ上のより複雑な形状の流路は，DRIE (Deep Reactive Ion Etching) で形成される。シリコンは加工技術が発達しているため信頼性が高いが，陽極接合で 350°C 程度，直接接合ではさらに高い接合温度を必要とするので，上壁を接合する前に流路内に形成できる材料は限定される。

シリコン以外の材料としては，光学的なアクセスを可能とするものとして，エポキシ系フォトレジスト (SU-8) の透明厚膜が用いられる。流路高さ数百  $\mu\text{m}$  まで製作が可能である。また，SU-8 で鋳型を作り，そこにシリコンゴム (Polydimethylsiloxane, PDMS) を流し込んで成型する方法も広く用いられる。PDMS は層間の接着が容易であるなど製作プロセスが簡単で，細胞などに対する生体適合性もあるため， $\mu\text{TAS}$  (micro total analysis system) の分野で特に多く用いられている。さら

に，COC (Cyclic Olefin copolymer) などの熱可塑性樹脂の射出成形を用いたマイクロ流路の製作も行われている。COC は PDMS よりも紫外領域での光の透過率が良いため，光学的計測により向いている。

最近では，気相中でコンフォーマルコーティングが可能であるパリレン (poly-para-xylylene) を用いたマイクロ流路製作も行われている。パリレンは，最高使用温度は 100°C 程度と低いが，化学的に安定なポリマーであり，酸素プラズマによるパタニングも容易であることから，マイクロマシン技術と整合性の良い材料である。フォトレジストを犠牲層に用いた流路の作成，様々な用途の電極との組み合わせが可能であり，流路だけでなく，バルブ，流れセンサ，クロマトグラフィのカラムなどが試作されている。

現在までに製作された最も小さい流路は幅・高さともに 10~50nm であり，ナノ・インプリンティングで製作した 55nm 幅の溝に斜め蒸着を行い，溝の内部に生じるボイドを利用したものである。

今後，単に流体を流すための流路でなく，様々な機能を持ったマイクロ流路が重要と考えられ，流路に上壁を低温接合する方法，電極作り込みの容易性，光透過性，耐薬品性や耐熱性，表面エネルギー制御，生体適合性などを含めて，用途に応じた製作方法が確立されていくものと考えられる。

## 2. 乱流遷移（らんりゅうせんい，**turbulence transition**)

単相の流れの形態としては，分子運動による運動量交換が支配的な層流と，渦あるいは流体塊による運動量交換が活発に行われる乱流に分けられる。乱流はレイノルズ数が大きな流れとして特徴づけられ，層流よりも摩擦，伝熱，混合などが極めて大きい。層流か

ら乱流への遷移は、流れの形態にもよるが、一般にレイノルズ数が 2000 以上で生じる。

マイクロ流路内の流れのレイノルズ数は通常小さいので、流れのほとんどは層流状態となる。従って、流れの抵抗、熱伝達などについて第一次近似としては通常スケールと同様の手法を用いて、層流の解析解、あるいは数値解を用いることができる。

一方、マイクロ流路では流路高さに対して相対的に流路壁面の粗さが大きくなり、乱流へ遷移するレイノルズ数が小さくなる可能性がある。表面粗さは製作方法に強く依存するが、レイノルズ数が 700 程度で乱流状態が得られたとする研究例もある。また、 $2\mu\text{m}$  程度の粗い面を持つ流路では、粗さが流路高さの数%オーダーとなって摩擦抵抗が層流の解析解に比べて最大 40% 増大したとの報告もある。しかし、表面粗さがマイクロ流れに与える影響について、系統的なデータは得られていない。

### 1) レイノルズ数 (れいのるずすう, Reynolds number)

流れの流速、流路の代表寸法の積を流体の動粘性係数で除した無次元数であり、慣用的に  $Re$  と書く。物理的には、慣性力と粘性力の比を意味する。定常かつ等温の非圧縮流れでは、流れを支配する唯一のパラメータとなり、レイノルズ数が同じであれば相似な流れとなる。パイプの流れの場合、レイノルズ数は、流速  $U$ 、パイプの直径  $d$ 、流体の動粘度  $\nu$  から、 $Re=Ud/\nu$  で定義される。例えば、流路高さ  $0.1\text{mm}$ 、流速  $10\text{mm/s}$  の場合、レイノルズ数は水ではおよそ 1、空気では 0.07 となる。このように、サブミリ以下の流路でのレイノルズ数は一般に小さい。

### 3. スケール効果 (すけーるこうか,

### scale effect)

単純形状の流路内における層流では、流れの抵抗、熱伝達は解析的に求まり、無次元数の間の関係として与えられる。パイプやダクト内の流れを考えたとき、壁面摩擦応力を動圧で無次元化した摩擦係数  $C_f$  はレイノルズ数  $Re$  に反比例しする。例えばパイプでは、流速としてバルク平均流速を用いると  $C_f=16/Re$  となる。また、パイプの壁と流体で伝熱が生じるとき、熱の伝わりやすさは、壁面熱流束を流体の混合平均温度と壁温との温度差で除した熱伝達率  $h$  で表される。熱伝達率の無次元数としては、ヌセルト数  $Nu=hd/k$  ( $k$  は流体の熱伝導率) が用いられるが、層流ではヌセルト数は一定値となり、例えば、壁での熱流束が一定の条件では  $Nu=4.364$  となる。

従って、流路の寸法が変化したときに、パイプの圧力損失や伝熱量がどのように変化するかについて、容易にスケーリング則が得られる。すなわち、流量は、入口と出口の圧力差  $\Delta P(=P_i-P_o)$  を用いて  $Q=\pi d^4 \Delta P / (128 \mu L)$  で与えられるから、流量が同じであれば圧力損失はパイプの直径  $d$  の  $-4$  乗に比例する。また、熱伝達率は、 $h=Nu k/d$  となることからわかるように、流路寸法に反比例する。

流路寸法が小さくなると、圧力損失、伝熱ともに増大するが、実用的なデバイスでは、一般に伝熱量はなるべく多くし、圧力損失はなるべく小さく抑えたい。従って、問題設定によって流路寸法に最適な値が存在する。

また、マイクロ流路では、流路幅・高さに比べて流路長さが非常に長く、しばしば、流路長さは流路高さの 1000 倍以上となる。マクロスケールでは、このような流れは海底パイプラインやガスクロマトグラフィのカラムなどに限られ、むしろ希である。このようなマイクロ流路では圧力損失が大きいこ

とから流路入口と出口での圧力比が大きく、気体の流れの場合にはパイプ中の流速は入口から出口に向かって加速する。従って、レイノルズ数が低いにも関わらず圧縮性の効果が大きいという特異な影響が現れる。局所的には加速効果が小さいという仮定の下に得られる解析解では、パイプ中の流れ方向圧力分布  $p(x/L)$  は流れ方向に直線とならずに、 $p(x/L) = \{P_i^2 + (P_o^2 - P_i^2)x/L\}^{0.5}$  で与えられる上に凸の曲線となる。ここで、 $L$  はパイプ長さ、 $P_i$ 、 $P_o$  はそれぞれ入口圧力、出口圧力である。また、圧縮性の影響がない場合には、前述のように流量は入口・出口の圧力差の線形関数となるが、圧縮性の影響の大きいマイクロ流路では、流量と圧力の関係も非線形となる。

2つの異なる流体の流れを合流させて流路の中で混合することを考えると、混合の特性時間は分子拡散係数に反比例し、流路寸法（例えば流路直径  $d$ ）の2乗に比例する。例えば、2つの気体を混ぜる場合、流路幅が  $1\text{mm}$  のとき、およそ  $0.1$  秒となる。一方、液体の拡散係数は気体に比べて  $3 \sim 4$  桁小さいので、同様に2つの液体を混ぜる場合、特性時間のオーダーは  $100 \sim 1000$  秒と非常に長くなる。流路幅を  $10\mu\text{m}$  とすれば混合特性時間は  $0.1$  秒以下となるから、迅速に混合が進むが、数  $10\mu\text{m}$  以上の流路幅での**マイクロ混合**では、混合を促進させる技術が必要となる。なお、流れが乱流状態になるほど流路寸法（あるいはレイノルズ数）が大ききときには、乱れにより混合が促進されるから、このような問題は生じない。

マイクロアクチュエータや振動型センサなど、構造体の運動や振動と流体の運動が連成する場合、構造体は**流体反力**を受ける。流体反力は、デバイスの性能や効率に大きな影響を与える可能性があり、設計上重要な要素で

ある。

気体と液体が共存する2相のマイクロ流れでは、**表面張力**の影響が増す。そこで、表面張力を積極的に操作して流体の運動を制御することも行われている。

### 1) マイクロ混合（まいくろこんごう, **micro-scale mixing**)

前述のように、 $10\mu\text{m}$  以下のスケールの液流では、分子拡散によって混合は速やかに進むが、それ以上の大きさの流れでは積極的に混合する必要がある。最も単純な方法は、拡散の時定数が流路寸法の2乗に比例することから、拡散距離を縮めることである。流路形状はやや複雑になるが、 $A$ と $B$ の流体を  $ABAB, \dots, AB$  のように積層できるように2つの流体の合流部分を設計すれば良い。

また、微小スケールの流れでは、流れに擾乱を与えても混合に有効な3次元的な渦が発生しにくいいため、積極的に外力を加えて混ぜる場合には工夫が必要である。単にかき回すだけでは、効果的に混合を進めることができない。

そのために有効と考えられる概念が、カオス混合であり、マイクロ流路中で流体要素の引伸しと折畳みを交互に行うことによりカオス現象を引き起こして混合を促進させる方法である。

通常、カオス現象を発現させるには、最低3つの自由度が必要である。しかし、マイクロ流路の多くは流路高さ方向に薄く、単純形状の流路では垂直方向の流速が極めて小さい。従って、空間的自由度は2となつて、そのままではカオスを引き起こすことは難しい。そこで、3次元的な形状を有する流路、あるいは、時間的自由度を含めて自由度を3にするために時間的に変化する外力を加える方法が用いられる。

例えば、上下の壁面に斜めのリブ状の突起を取り付け、その方向を流れ方

向に周期的に反転させる方法，メインの流路に対して側方に設けたサブ流路から交互に振動する圧力を加える方法などが提案され，試作混合器が試作されている。

また，固体粒子や不溶性液滴を含む流れをもう1つの流体の流れと合流させて混合する場合についても同様の操作が必要である，磁性粒子を含む流体に対しては，外部磁場を用いてカオス混合を引き起こす試みが行われている。

なお，連続的な流れではなく，液滴同士を合体させて混合させることは比較的容易であり，合体後液滴を運動させれば，自由表面があることによって液滴内部に流れが生じ，迅速な混合が可能である。

## 2) 流体反力 (りゅうたいはんりよく, hydrodynamic force)

流体中で運動する物体には，流体から反力を受ける．物体表面に平行方向に働く摩擦抗力，表面に垂直方向に働く圧力抗力，そして，物体と一緒に流体が動くことによって物体のみかけの質量が増加する付加質量力である．概念的には，物体の移動速度に比例する力が摩擦抗力，移動速度の2乗に比例する力が圧力抗力，加速度に比例する力が付加質量力である．摩擦抗力，圧力抗力は，物体の運動を妨げるように働き，アクチュエータやセンサの変位量，効率やQ値を低下させる．

一方，付加質量は，流体中で振動する物体の場合，物体が通過する体積に相当する流体質量の半分程度であり，共振周波数を低下させる．特に液体中を運動する物体に対する影響は大きい．これらの力は物体の形状に依存するため，正確な見積りには流体の数値シミュレーションを行う必要がある．

なお，デバイス周囲の流体が動いている場合には流体の運動エネルギーを物体が受取り，自励振動を起こすこと

もあり得る．

## 3) 表面張力 (ひょうめんちょうりよく, surface tension)

微小スケールでは，表面張力が相対的に大きくなる．そこで，表面張力を積極的に使って，マイクロ流れを制御する試みが行われている．例えば，フッ素系樹脂のスピンコーティングや  $C_4F_8$  のプラズマによる蒸着などは，マイクロマシン技術と整合性の高いぬれ性の制御方法である．

また，壁面に微細構造により粗さを設けて，接触角を変化させることも可能である．表面が粗さを持つときの接触角は，Wenzel の式  $\cos\theta' = r \cos\theta$  と表せる．ここで， $\theta'$  は粗面上の接触角， $\theta$  は同じ材質で平滑面の場合の接触角， $r$  は (真の表面積/見かけの表面積) である．従って，もともと撥水面であれば，粗さをつけることによりさらに撥水性が高くなり，もともと親水面であれば，より親水性が高くなる．シリコンの DRIE を用いたエッチングで剣山状の粗さを形成し，フッ素系のコーティングをした場合に，170度を超えるような超撥水面も得られている．

壁面を部分的に撥水性，親水性をもたせ，機能化する別の方法として，SAM (Self Assembled Monolayer) も用いられる．SAM は，通常ディップコートなどで壁面に一様に塗布する．例えば，OTS (octadecyltrichlorosilane) などを用いれば，表面を水の接触角  $110^\circ$  程度の撥水性にすることが可能である．また，紫外線でパタニング可能な感光性の SAM も製作可能である．このような SAM を用いて，マイクロ流路内の一部にのみ水溶液が流れるように工夫した例もある．

表面張力の制御は，この他にエレクトロ・ウェットティングによる流体駆動，気相と液相の分離流路などにも

用いられている。また、流路の寸法がミクロンオーダー以下になると、圧力損失が大きいため流体を圧力で押し込むことが極めて難しくなる。しかし、壁面が親水性の場合は、いわゆる毛管現象により容易に流体で満たすことが可能であり、ナノスケールでは流体の駆動力として重要な位置を占めると考えられる。

表面張力は、液体の状態、表面の汚れ、経時変化などによって変化し、界面が前進/後退する場合の接触角にヒステリシスが存在するなど、精密に制御することは難しい。表面張力による流体制御の観点からも、分子動力学シミュレーションを用いた界面動態の検討など、今後の研究が待たれる。

#### 4. 電場駆動流れ（でんぱくどうながれ, **electrically-driven flow**)

マイクロスケールでの重力や圧力差による流体駆動は、大きな入口圧力を必要とする、制御性が悪いなどの欠点がある。そこで、電場を用いて、流体を駆動する方法として、**エレクトロ・ウェットティング**、**電気浸透流**、**誘電泳動**などが提案され、特に DNA や細胞などバイオ流体のマイクロ流れで多く用いられている。

##### 1) **エレクトロ・ウェットティング (electrowetting)**

撥水性の薄膜上に電解液の水滴を置き、撥水膜の下の平板電極と水滴中に差し込んだ針金状の電極間に電圧を加えると、水滴と平板電極の間に形成されるキャパシタの静電エネルギー分だけ表面エネルギーが減少し、接触角が低下する。この現象はエレクトロ・ウェットティングと呼ばれるが、これを利用して動的に表面のぬれ性を制御する試みが行われている。実際には、電極の上に絶縁破壊強度の高いパリレン (poly-para-xylylene) の薄膜を蒸着

し、その上にフッ素系の撥水性高分子膜をスピコートしたものが用いられる。電圧を加えることによって、接触角を  $110^\circ$  から  $60^\circ$  程度まで変化させることができる。

現在、この現象を利用して、マトリックス状に配置した電極上で液滴を自由に移動・合体・分離する液滴輸送システムや、水中で油滴や気泡を輸送に適用されている。

##### 2) **電気浸透流（でんきしんとうりゅう, **electroosmotic flow**)**

電気浸透流は、電気二重層が形成されている流路の流れ方向に電場を印可し、拡散層のイオンを電場で引きずって流れを駆動するものである。平行平板間の流れを仮定すれば、ナビエ・ストークス方程式と電位に関するガウスの法則から、容易に流速分布を求めることができる。

ゼータ電位を $\zeta$ 、流れ方向の電界を $E$ 、流体の誘電率を $\epsilon$ 、粘性係数を $\mu$ とすれば、電気浸透流で誘起される流速 $u_{\text{EOF}}$ は流路断面にわたって一様であり、 $u_{\text{EOF}} = \epsilon E \zeta / \mu$ で与えられる。流路全体にわたって流れが駆動されていれば実流速も断面内で一様となり、流体塊を移動させても流れ方向に分散しないので、化学サンプルを輸送するような $\mu\text{TAS}$ では好都合である。ただし、全流路のうち駆動しない部分がある場合には、その部分の圧力損失に見合うだけの放物線分布の逆向きの流れ $u_p$ が生じ、実流速は $u_{\text{EOF}}$ と $u_p$ の重ね合わせとなって、流路中央が凹んだ速度分布となる。

電気浸透流は、可動部分を持たないためにマイクロ流れの駆動に適しており、駆動流体で被駆動流体を押し出すようにすれば、細胞を含む液体のような電場を嫌う流体や気体も駆動することができる。しかし、印可した電場に

よって流れる電流のほとんどは拡散層ではなくバルク流体を流れるので効率は低い。流路は細い方が良いが、直径  $1\mu\text{m}$  の流路を仮定してもポンプとしての効率は 1%程度である。

### 3) 電気二重層 (でんきにじゅうそう, electrical double layer)

一般に、電気二重層は、境界面を境にして正電荷 (イオン) と負電荷 (イオン) が対向している状態をいう。

ガラスや石英などを pH9 以上の電解質水溶液に浸すと、表面の SiOH の水酸基から水素イオンが遊離する。固体表面は負に帯電し、表面近傍の  $\text{H}^+$  は静電力で引きつけられて表面に固定され、Stern 層をなす。一方、Stern 層よりも外側の  $\text{H}^+$  は、熱運動と静電力のバランスで分布が決まり、表面から離れるに従ってイオン濃度が減少する拡散層を形成する。この層では  $\text{H}^+$  は過剰であり、その厚さはデバイ長で特徴づけられる (数~数百 nm)。Stern 層と拡散層の境界の電位をゼータ電位と呼び、電気二重層の特性を表す重要なパラメータである。

液流のマイクロ流れの場合、希薄気体効果は存在しないが、水などの極性流体に対しては電気二重層による影響が現れる可能性がある。すなわち、イオンが壁面に固定される Stern 層により流路の有効幅が狭くなると同時に、拡散層のイオンが流れ方向に移動することによって流れ方向に電場が形成され、イオンが流れと逆方向に静電力を受けるため、見かけの圧力損失が増大する。流路高さが  $20\mu\text{m}$  の流路では、最大 2% 程度摩擦が増大することが報告されているが、その影響は比較的小さい。

また、超撥水面上の液流では、表面で滑り速度が生じることが複数の研究グループで報告され、分子動力学を用いたシミュレーションでも同様の現象

が確認されている。画像計測を用いた計測結果では、 $1\mu\text{m}$  程度の極めて大きな滑り距離が得られたとされたが、その後の検証では数 10nm 程度であると報告されている。

### 4) 誘電泳動 (ゆうでんえいどう, dielectrophoresis)

電気泳動 (EP, electrophoresis) は、電荷を持つ粒子や分子を電場で駆動するために広く用いられる方法であるが、荷電粒子でないと駆動できない。誘電泳動 (DEP) は、不均一交流電場中で誘電体粒子が電場により分極され、電場強度が強い方向や弱い方向へと粒子が移動する現象である。数 kHz ~ 100MHz の高周波数の交流が用いられるため、水の電気分解は生じない。生体分子や細胞などの移動、分離、トラッピングを目的に用いられている。

### 5. 希薄気体効果 (きはくきたいこうか, rarefied gas effect)

クヌッセン数  $\text{Kn}$  は、希薄気体効果の程度を表す無次元数であり、 $\text{Kn}=0.001\sim 0.1$  は、連続体としての仮定は成り立つが固体壁面での流体のスリップを考慮する必要がある領域である。マクロスケールでは、壁面では流体は滑り速度を持たず、また、流体の温度は壁面の温度と同一であるが、スリップ流れの範囲では、壁面で有限の速度が存在し、温度分布は不連続となる。

古典的な取扱いでは、壁面に平行な方向を  $x$ 、法線方向を  $y$  にとり、壁面での速度および温度の境界条件として、

$$U_0 - U_w = \frac{2 - \sigma_V}{\sigma_V} \lambda \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{3}{4} \frac{\mu}{\rho T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$$T_0 - T_w = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\kappa}{\kappa + 1} \frac{\lambda}{\text{Pr}} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2)$$

のようにモデル化される。ここで、 $U_w$ 、 $T_w$  は壁面の速度、温度、 $U_0$ 、 $T_0$  は壁面での流体の速度、温度である。また、

係数 $\sigma_V$ および $\sigma_T$ は、速度、温度の適応係数であり、 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $\kappa$ 、 $Pr$ は、それぞれ、流体の密度、粘性係数、比熱比、プラントル数である。

$\sigma_V$ は、壁面に衝突する分子の $x$ 方向運動量がどの程度保存されるかを表し、 $\sigma_V = 0$ は鏡面反射、 $\sigma_V = 1$ は拡散反射に相当する。一方、 $\sigma_T$ は熱的適応係数であり、本来は、並進、回転、振動温度について異なる値をとると考えられるが、通常は単一の値で代表させる。適応係数の値は気体と固体の種類、表面粗さなどに依存し、特定の組み合わせについては実験値が与えられているが、機械加工した面では $\sigma_V = \sigma_T \sim 1$ である。なお、式(1)の第2項は、熱ほふく流、すなわち、温度勾配に沿って流体が移動する効果を表す。

圧力勾配で駆動させるマイクロ流路内の等温流では、式(1)第2項の影響は小さく、第1項のみが用いられることが多い。このとき、平行平板間のスリップ流れの平均摩擦係数は、入口、出口の圧力比 $P(=P_i/P_o)$ 、出口でのクヌッセン数 $Kn_o$ を用いて、

$$C_f = \frac{12}{Re} \frac{1}{1 + 6\sigma Kn/(1+P)}, \quad \sigma = \frac{2 - \sigma_V}{\sigma_V} \quad (3)$$

と書くことができ、 $Kn$ 数の増加に従って摩擦抵抗は減少する。

流路高さ $1.33\mu\text{m}$  ( $Kn=0.053$ )、表面粗さが $0.65\text{nm}$ 以下と極めて滑らか流路を用いた精密な計測によれば、 $\sigma_V = 0.8$ の解析解と良く一致する実験結果が得られている。大気圧下のマイクロ流路は、ほとんどがスリップ流れに属すると考えられ、より高次の境界条件も提案されている。

## 1) クヌッセン数 (くぬっせんすう, Knudsen number)

気流では、流れの代表寸法 $L$ が分子の自由行程 $\lambda$  (常温常圧の大気で $1 \sim 65\text{nm}$ )に近づくと、希薄気体効果により粘性流れとしての通常の見扱

を修正する必要があるが生じる。クヌッセン数 $Kn (= \lambda/L)$ は、希薄気体効果の程度を表す無次元数であり、 $Kn=0.001 \sim 0.1$ は、連続体としての仮定は成り立つが固体壁面での流体のスリップを考慮する必要がある領域、 $Kn > 10$ は連続体としての性質が完全に失われ、気体分子が個々に運動する自由分子流の領域、 $Kn=0.1 \sim 10$ はその中間の遷移流れの領域である。遷移流れ、自由分子流については、もはや連続体としての取扱いはできず、数値解析ではDSMC (Direct Simulation Monte Carlo)などを用いる必要がある。マイクロスケールでの自由分子流は、クヌッセンポンプなどで応用されている。

なお、それぞれの領域の境界は、研究者によっても多少異なり、 $Kn=0.6$ 程度までスリップ流れの近似で良いとする実験結果も報告されている。

## 2) クヌッセンポンプ (Knudsen pump)

自由分子流れの領域で、異なる温度に保たれた2つの容器が細い管で繋がれているとき、圧力をそれぞれ $P_1$ 、 $P_2$ とすると、 $P_1/P_2 = (T_1/T_2)^{0.5}$ が成り立つ。従って、容器A、B、Cを用意し、A、Cを温度 $T_1$ に、Bを温度 $T_2 (> T_1)$ に保ち、AとBを自由分子流となるような細い流路で接続し、BとCを比較的太い流路で繋ぐ。このとき、 $P_B > P_A$ となるから、BからCに向かって流れが生じる。このような容器をカスケードで接続したデバイスをクヌッセンポンプと呼び、超小型のコンプレッサや真空ポンプなどが提案されている。

## 6. マイクロ熱伝達 (まいくろねつでんたつ, micro-scale heat transfer)

マイクロ流路内の単相流として表面粗さの影響のみを考慮した場合、マクロスケールと同様に、熱伝達よりも摩

擦抵抗の方が相対的には大きくなると予想される。一方、スリップ流れ、電気二重層など、分子の効果が顕在化する条件では、熱伝達の計測例は極めて少ない。コルバーンのアナロジーファクタが顕著に増加したとの測定例もあるが、式(1)、(2)を用いた解析では、壁面摩擦と同様、熱伝達率も低下する結果が得られている。

沸騰を伴うサブミリスケール流路内の流れでは、表面張力の影響が支配的となり、流動様式は無重力下と類似の傾向を示す。数 mm 程度の伝熱管ではクオリティ 0.4 程度で熱伝達率が最大となり、また、管径が小さい方が熱伝達率も高いが、サブミリスケールでは、ドライアウトが比較的小さなクオリティで発生するため、熱伝達率は必ずしも高くない。従って、水の单相流の熱伝達率の方が、フロン系冷媒の沸騰熱伝達よりも高い場合も生じる。さらに、沸騰開始点が沸点を超える過熱現象が生じることも明らかにされており、直径 0.2mm 程度のチューブでの沸騰開始温度が飽和温度より 60℃以上高くなることが報告されている。

单相流では流路の直径が小さい方が熱伝達率も大きいことが理論的に明らかであるが、それは相変化が生じる場合には必ずしも成り立たない。マイクロ流路を用いて熱交換器を設計する場合には、单相流・二相流の選択とともに、その設計には注意が必要である。

## 7. マイクロ画像計測（まいくろがぞうけいそく， image-based microscopic measurement）

マイクロ流れでは、流れの中にセンサを挿入することは不可能であるので、非接触測定できる画像計測法はほとんど唯一の測定手段と言える。そこで、顕微鏡下で流体の速度を計測する画像粒子流速計の開発が行われている。そのために用いられるマイクロ光学

系は、鮮明な粒子画像を取得するために十分注意をして設計される。流体の運動に追従するトレーサ粒子としては直径 400~500nm 程度が用いられる。サブミクロンのトレーサ粒子を用いた場合、ブラウン運動の影響は無視できず、速度ベクトルを算出する際に、平均化してノイズを除去するなどの処理が行われる。

マイクロ流れの画像計測は、1997年頃から始まり、30 $\mu\text{m}$  の円柱周りの流れ、のど部の幅が 19 $\mu\text{m}$  のノズル内の流れ、流路高さ 30 $\mu\text{m}$  のマイクロチャンネル内の流れ、ラットの腸間膜細動脈（径 30 $\mu\text{m}$  程度）の血流などに適用されている。これらの計測で、空間解像度は最小 1 $\mu\text{m}$  程度である。最近、高解像度の高速度カメラや高繰返し周波数のパルスレーザーの入手が可能となり、時系列でマイクロ流れを計測する試みも始まっている。

また、波長 2~6 $\mu\text{m}$  程度の赤外線に対して、シリコンが 55%程度の透過率を持つことを利用して、シリコン基板で製作した不透明流路内の流れを計測した例もある。しかし、赤外線を用いることによって光学系の解像度を犠牲にしていることは否めない。X線はサブミクロン流路の計測を可能とするポテンシャルを持っているが、受光側の解像度が低いためもあって、マクロスケールの不透明流路内の流れに適用されるに留まっている。

一方、流体の濃度や温度は、マクロスケール同様に、ローダミンBやフルオレセインなどの蛍光染料を用いて、レーザー誘起蛍光法（LIF, Laser Induced Fluorescence）により計測される。

マイクロ・ナノスケールの画像計測では近接場光が用いられることも多いが、測定可能な範囲が一般に用いられるマイクロ流路のスケールよりも小さいため、マイクロスケールの熱流動の

計測に応用した例はあまりない。

### 1) 画像粒子流速計 (がぞうりゅうしりゅうそくけい, **particle imaging velocimetry**)

マクロスケールの流体の流速や温度・濃度などの計測は、古くは熱線流速計や温度プローブなどを用いた点計測が用いられてきたが、現在ではデジタル画像処理を用いた2次元あるいは3次元場の計測が広く適用されている。例えば、PTV (Particle Tracking Velocimetry) を用いた流速測定では、流体運動に追従するトレーサ粒子を流体中に懸濁させ、異なる2時刻の粒子画像を CCD カメラで撮影する。そして、1つ1つの粒子の運動を撮影画像から解析し、速度ベクトルを求めるものである。また、PIV (Particle Imaging Velocimetry) では、PTV と同様の撮影画像から、粒子群の運動を画像の相関によって算出するものである。

これらの画像計測法をマクロスケールの流れ計測に用いる場合には、レーザーシート光で照明し、シート光の平面に含まれる2方向の速度情報を抽出することが多い。すなわち、照明光の位置で、測定対象とする領域を3次元空間の中で選択する。

### 2) マイクロ光学系 (**microscopic optics**)

レーザーシートの厚さは光学系で絞ったとしても最小  $200\mu\text{m}$  程度であり、測定対象の流れ場と同じスケールである。従って、マクロスケールとは異なり、マイクロ流れでは照明光の位置で測定領域を定義することができない。そのため、NA (Numerical Aperture) 値の大きな光学系を構成して、焦点深度を薄くし、焦点の合う位置を用いて測定領域を決めなければならない。NA 値の大きな光学系を用いることは、光学的空間解像度を上げることができる

ため、鮮明な粒子画像を得るには好都合であるが、一般に NA 値の大きな対物レンズは、水浸あるいは油浸のレンズであり、ワーキングディスタンスが小さいなどシステム構成上の自由度が少ない。また、マクロスケールで実現されている PTV を用いた3次元空間内の速度計測や、PIV を用いた2次元平面内の3方向速度成分の計測は難しい。

壁面からの反射光や散乱光を排除するため、マイクロ流れでは一般に蛍光粒子が用いられ、YAG レーザーの第2高調波 ( $532\text{nm}$ ) などによって励起する。蛍光は、光学的ローパスフィルタで反射光が取り除かれて CCD カメラで取得する。

### 3) トレーサ粒子 (とれーさりゅうし, **tracer particle**)

流れに対するトレーサ粒子の追従性は、 $\tau = \rho_p / \rho_f (d_p^2 / 18\nu)$  ( $\rho_p$ : トレーサ粒子の密度,  $\rho_f$ : 流体の密度,  $d_p$ : 粒子の直径,  $\nu$ : 流体の動粘度) で決まる粒子の時定数  $\tau$  と流れの変動周期によって決まる。液流のマイクロ流れでは、トレーサ粒子の密度  $\rho_p$  が流体の密度  $\rho_f$  とほぼ等しくなるように選択できるから、直径数  $\mu\text{m}$  以下の粒子は実質的に流体に完全追従すると考えて良い。

粒子の散乱光は直径  $400\text{nm}$  程度を境に大きい粒子は直径の2乗、小さい粒子は4乗に比例するため、粒子像の明るさは直径に大きく依存する。また、散乱光強度は入射光のエネルギーに比例するため、入射光強度を増やして明るい像を得ることは可能である。

一方、蛍光粒子の場合も蛍光強度は粒子直径に依存するが、蛍光はある程度入射光に対して飽和する性質を持つため、入射光のエネルギーを増やしても明るくならない場合も多く、一般に像は暗い。最近では、量子ドットを用いて散乱波長のスペクトルを選択で

きる粒子が開発されており，今後マイクロ流れのトレーサ粒子として利用で

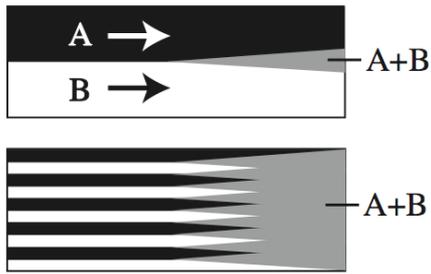


図1 マイクロ混合

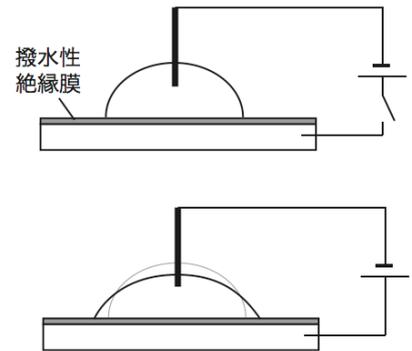


図2 エレクトロ・ウェットティング

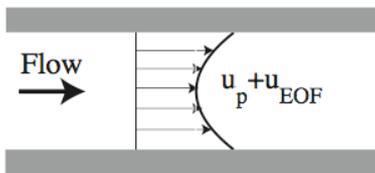


図3 電気浸透流により一部のみ駆動される場合の流速分布

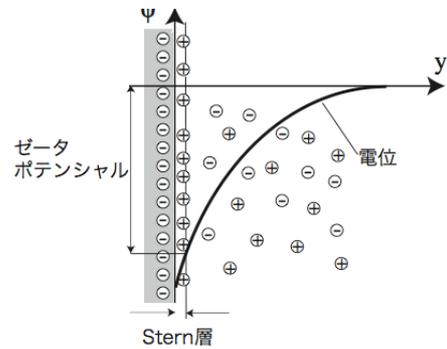


図4 電気2重層

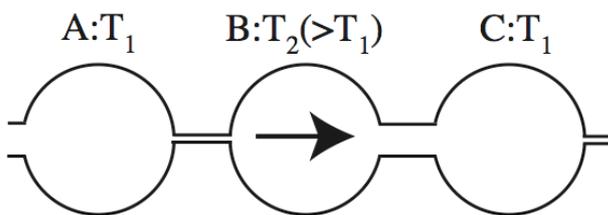


図5 クヌッセンポンプ

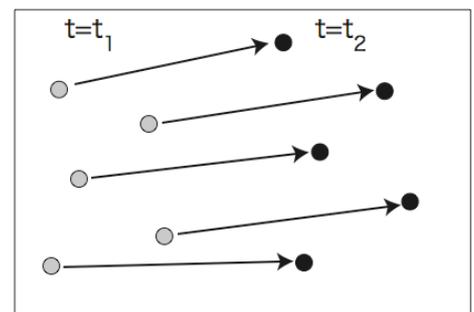


図6 PTVによる流速測定の方法