

7.

## 流体工学

## 7.1.

## まえがき

従来機械工学年鑑では流体工学および流体機械が取り扱われてきたが、機械工学年鑑の日本機械学会論文集掲載から日本機械学会誌掲載への移行に伴い2002年度は水力機械の動向と生産実績はターボ機械協会誌10月号に掲載された。2002年はターボ機械協会との連携をさらに推進し流体工学部門とターボ機械協会のホームページをお互いにリンクするとともに、流体機械に関するすべての年鑑記事はターボ機械協会誌8月号、およびターボ機械協会のホームページ<http://turbo-so.jp>に掲載されることとなった。流体機械に関してはこれらを参照いただきたい。本章では流体工学のトピックスとして“乱流輸送現象”、“離散的数値解法”ならびに“自由表面を持つ流れの安定性”を取り上げ、これらの分野の最近の研究動向を解説する。

〔辻本 良信 大阪大学〕

## 7.2.

## 乱流輸送現象

乱流輸送現象として、ここでは密度成層乱流場での熱と物質の輸送現象、風波乱流場の乱流構造と気液界面を通しての物質輸送、および化学反応を伴う流れに関する最近の研究の動向について概説したい。

## 7.2.1.

## 密度成層乱流場での輸送現象

鉛直上向きに負の密度こう配をもつ乱流場を安定成層乱流場、正の密度こう配をもつ乱流場を不安定成層乱流場と呼ぶ。成層乱流場では、密度こう配によって生じる浮力が乱流輸送現象に大きな影響を及ぼす。特に、安定成層の場合、成層効果が強まると熱や物質がそれぞれの時間平均こう配に逆らって時間平均温度、濃度の低い領域から高い領域に輸送される、いわゆる逆こう配拡散と呼ばれる現象が起こる。従来、プラントル数  $Pr (= \nu / \kappa)$  ;  $\kappa$  : 熱拡散係数,  $\nu$  : 動粘性係数) が小さく運動量の分子拡散に比べて熱の分子拡散が大きな気相の安定成層乱流場 ( $Pr = 0.7$ ) では明確な逆こう配拡散が起こりにくいことが指摘されてきた<sup>(1)(2)</sup>。これに対してIinoら<sup>(3)</sup>は、鉛直方向に縮流し、スパン方向には同じ比率で拡大する水平方向ダクトを乱流格子下流に設置することによって強い安定成層状態をつ

りだし、気相の安定成層乱流場においても明確な逆こう配拡散が起こることを示した。ひずみダクト (Distorting Duct) と呼ばれるこのダクトは、流れを鉛直方向に縮流することによって強安定成層状態をつくりだすとともにスパン方向に同じ比率で拡大させることによって断面平均流速を一定とし、長い浮力時間  $Nt$  ( $N$ : Brunt-Väisälä周波数,  $t$ : 乱流格子からの経過時間) を得るものである。その結果、鉛直方向の乱流熱フラックスに関して二周期にわたる振動現象が観察された。また、ひずみダクトを用いない従来の気相の安定成層乱流場では大スケールの乱流渦のみが熱の逆こう配拡散に寄与する<sup>(1)(2)</sup>のに対して、ひずみダクトを用いた場合には全スケールの乱流渦が熱の逆こう配拡散に寄与することが示された。一方、蔭田と大庭<sup>(4)</sup>は強い安定成層を形成する気相の格子乱流場で実験を行い、内部重力波が熱の逆こう配拡散に及ぼす影響を明らかにした。

成層乱流場に対してRapid Distortion Theory (RDT) を適用した研究も報告された。RDTの概念は古くから示されており、基本的には非線形項を省略したNavier-Stokes方程式と密度の輸送方程式を連立させて解く線形近似によるものである。Hanazaki<sup>(5)</sup>は回転を伴う安定および不安定成層乱流場に対して、また、GalmicheとHunt<sup>(6)</sup>は平均シア (速度こう配) を伴う安定成層乱流場に対してRDTを適用し、乱流強度や逆こう配拡散を含む密度フラックスなどの乱流統計量が過去の実験および直接数値計算 (DNS) とよく一致することを示した。これらの結果は、言い換えると、成層乱流中で起こる逆こう配拡散などの現象が基本的には線形過程で説明できることを示している<sup>(2)(5)(6)</sup>。さらに、シアを伴う安定成層乱流場に対するRDT<sup>(6)</sup>では運動量の逆こう配拡散<sup>(1)</sup>が示されるとともに、逆こう配拡散が時間平均流速および密度分布に及ぼす影響について考察がなされた。

DNSやLarge-Eddy Simulation (LES) による成層流の研究も近年数多く報告されている。シアと安定成層を伴う一様減衰乱流場に対するDNS<sup>(7)</sup>では、熱と運動量の逆こう配拡散が示されるとともに、GalmicheとHunt<sup>(6)</sup>によるRDTと同じく、逆こう配拡散が時間平均流速分布と密度分布に及ぼす影響について詳細な調査が行われた。また、チャンネル内の安定成層流に対するLES<sup>(8)</sup>では、成層効果が強まるとチャンネル中心付近で熱の逆こう配拡散が起こるとともに、内部重力波の発生も示された。

逆こう配拡散に関連した上述の研究のほかにも、安定大気境界層中でのFlux Richardson数  $Rf (= -w / (-u_i u_j dU_i / dx_j))$ ;  $-w$ : 鉛直方向のスカラ (浮力) フラックス,  $u_i$ : 速度変動,  $U_i$ : 時間平均速度) の観測結果<sup>(9)</sup>や、回転を伴う安定または不安定成層乱流に関する実験<sup>(10)</sup>、RDT<sup>(11)</sup>およびDNS<sup>(12)</sup>などが報告された。

## 7.2.2.

風波乱流場の乱流構造と  
気液界面を通しての物質交換

風波乱流場の乱流構造を明らかにし、その気液界面を通しての熱・物質交換機構を明らかにすることは、近年問題となっている地球の温暖化の予測を正確に行ううえで重要である。もちろん、気液界面を含む流れは工業装置内の流れの中にも数多く見られるので、装置設計などの問題とも関連して非常に重要である。熱線風速計やLDV (Laser Doppler Velocimetry) を用いる従来の計測法では、移動と変形を繰り返す風波気液界面のごく近傍における乱流構造を調べることが非常に困難であった。これに対して、Melvilleら<sup>(13)</sup>は造波装置により碎波させた乱流場でPIV (Particle Image Velocimetry) を用いた計測を行い、碎波時における気液界面極近傍での乱流強度や渦度、レイノルズ応力などを測定することに成功した。PIVによる計測はハードウェア、ソフトウェアの発達に伴い年々研究例が増加してきており、今後ますます重要になってくるものと思われる。一方、DNSによる風波乱流場の乱流構造の解明も試みられている<sup>(14)</sup>。DNSでは瞬間の速度場、圧力場が評価できるので、風波乱流場の乱流構造を解明するうえで非常に有効な手段となる。しかし、コンピュータの容量と計算時間の制約から、現状では風速が2m/s程度の低風速の風波乱流場にその適用が限定される。今後、コンピュータの発達とともに、碎波を伴うような高風速域の風波乱流場に対するDNSが可能になるものと期待される。風波の上に形成される乱流場をDNSにより明らかにすることは上述のように現状では困難であるが、波の位相速度が風速に比べて十分小さいことを利用して風波界面を波状壁面で近似して解く試みがなされている。SullivanとMcWilliams<sup>(15)</sup>は一定の位相速度で移動する波状壁面上に形成される安定、中立および不安定成層乱流場に対してDNSを実行し、成層状態によって壁面に作用する抗力が変化することを明らかにした。

また、風波乱流場のモデリングに関する研究としては、HaraとBelcher<sup>(16)</sup>によって風波スペクトルの平衡領域における新しいモデルが提案された。従来のモデルでは高風速域で運動量が保存されていなかったのに対して、提案されたモデルでは“Wind forcing”の概念を組込むことによって運動量の保存が満たされた。その結果、提案されたモデルに基づいて計算されたスペクトルは海洋での実測値とよい一致を示した。さらに、k-モデルで数値計算を行う際の気液界面の境界条件として、気液界面の碎波に伴う気泡の混入と液滴の飛散の効果を取り入れた新しい境界条件がBrocchini<sup>(17)</sup>により提案された。

船舶事故などによる海洋の重油汚染と関連して、気液界面上に存在する重油膜が気液界面を通しての物質交換にいかに関与を及ぼすかが実験的に調べられた<sup>(18)</sup>。その結果、気液界面の崩れがなく安定な場合（海洋では無風～低風速の場合）には重油膜が気液界面を通しての物質交換を著しく阻害するが、気液界面が激しく崩壊する場合（海洋では碎波を伴う高風速の場合）には重油膜の影響がほとんどなくなることが示された。

## 7.2.3.

## 化学反応を伴う流れ

化学反応を伴う乱流（反応乱流）は反応器内の流れや環境中の流れの中に見られ、その乱流拡散・混合反応機構を明らかに

することは工学上非常に重要である。Livescuら<sup>(19)</sup>はシアアを伴う圧縮性一様乱流場でアレニウス型の反応速度をもつ化学反応が起こる系に対してDNSを行い、反応による発熱が運動エネルギーと内部エネルギーの交換に及ぼす影響を調べた。また、中谷ら<sup>(20)</sup>はレーザ蛍光法（LIF: Laser Induced Fluorescence）を用いて、NO希釈ガス噴流中におけるNO-O<sub>3</sub>反応の測定を行った。反応乱流の実験的研究においては、反応成分または反応生成物の瞬間濃度をいかに精度良く同時測定するかが重要課題であり、上記のLIFによる測定や吸光度による測定<sup>(21)</sup>など、新たな測定手法の開発が期待される。一方、筆者らは乱流場での二次の不可逆瞬間反応を促進させる方法として、約1MHzの高周波超音波を用いる方法を提案した<sup>(22)</sup>。この方法は、浮力対流を用いる促進方法<sup>(23)</sup>と同様、乱流混合反応促進に対して非常に有効であることが確認された。

〔小森 悟, 長田 孝二 京都大学〕

## 7.3.

離散的数値解法1  
(渦法)

渦法は渦度輸送方程式を基礎にした数値計算手法であり、その数理的な基礎研究は既に発表され、整合性、収束性や安定性は解明されている。渦法の特徴は、渦度輸送方程式をEuler方程式と粘性拡散方程式にスプリットして解くことにある。渦度場と速度場はBiot-Savartの式によって関係付けられ、Euler方程式における対流項はLagrange的に取り扱う。したがって、対流項に関する数値的不安定や数値粘性の問題はない。また、渦法は、渦度場の集中する流れを自動的に追跡し、外部境界条件は自然に満たすので、噴流やはく離を伴う工学的問題への適用が有用である。不連続面をもつ気流中に含まれる粒子の混合問題<sup>(24)</sup>、船橋甲板の空力弾性問題<sup>(25)</sup>、ディーゼルエンジン内への燃料噴霧蒸発のシミュレート<sup>(26)</sup>、振動円柱まわりの流れ<sup>(27)</sup>など、広い範囲の工学の問題に用いられるようになっている。

しかしながら渦法では、離散化した渦要素の体積は連続の式で保存されることとして取り扱っているため、音場などの圧縮性流れへの適用が課題である。また、渦法は本質的には対流項からの数値粘性を含まない弱形式の解であるので、乱流の素過程の解明、乱流やはく離を伴う流れ場に適用され、今後の発展が期待される。

## 7.3.1.

## 圧縮性流れへの拡張

渦法の圧縮性流れへの拡張に関しては、Eldredgeら<sup>(28)</sup>によるものが重要な報告であろう。彼らは渦度以外にエンタルピー、エントロピーと密度を表現する一つの離散粒子をLagrange的に取り扱う方法を提案している。それによると、速度場をソレノイダルな成分と渦なしの成分から構成している：

$$u = u_s + u_{ir} \quad u_s \times A \quad u_{ir}$$

ここで、Aにソレノイダルを課すと、速度は次のようになる。

$$u = (K \times)^* - K^*$$

ただし、 $\cdot u, K, G$ である。Gはラプラス方程式のGreen関数である。ここでカットオフ関数を導入すると、粒子の位置に関する微分方程式は次のようになる。

$$\frac{dx_p}{dt} = \frac{1}{q} K(x_p - x_q) \times q(t) - \frac{1}{q} Q_q(t) K(x_p - x_q)$$

ここで、 $K = K^*$  であり、 $(x) = (x'/\delta)^d$  である。 $d$  は物理次元であり、 $\delta$  はカットオフ関数である。また、 $\rho = V_p(x_p)$ 、 $Q_p = V_p(x_p)$  である。つまり、密度変化が粒子速度に加味されている。Nitsche & Strickland<sup>(29)</sup> は、この手法を等エントロピー変化する理想気体の二次元非粘性のモデル流れに適用し、風上差分の数値結果と比較し、この手法の有用性を示すとともに問題点として、微分値の導出方法と境界条件の取扱いであることを指摘している。Eldredgeら<sup>(28)</sup> は空間微分にPSE (Particle Strength Exchange) 法<sup>(30)</sup> を用いて二次元音場を解析しているが、Nitsche & Strickland<sup>(29)</sup> は差分法を用いている。この粒子法概念は燃焼の問題にも適用されている<sup>(31)</sup>。

### 7.3.2. 高精度化と乱流への適用

渦法は対流項に関する数値粘性を含まないため、数値安定性はよい。Cottet ら<sup>(32)</sup> はVortex-in-Cell 法を併用する渦法を用いて、周期境界条件のもとで一様等方乱流について計算し、スペクトル法による数値結果と比較検討している。この結果、エンストロフィに関し、そのピーク値からのテイル部が渦法では小さめに計算されるが、確率密度関数やエネルギースペクトルなどはよい一致を示すことを明らかにしている。Cottet<sup>(33)</sup> は、渦法では小さな渦が合体し大規模の渦構造に移行していくプロセスが表現できないことがあり、その原因は、カットオフ関数による打ち切り誤差に起因することを明らかにしている。そこで、その誤差が理論的に評価できることを利用し、non-negativeのカットオフ関数を用い、渦粘性モデルを提案し、二次元乱流に関する数値計算結果から、このモデルの有用性を示している。渦法に関する乱流モデルはMansfieldら<sup>(34)</sup> によって提案され、この手法をベースに渦再分配法 (Vortex Redistribution Method) を用いて渦輪の計算がなされている<sup>(35)</sup>。一方、Ploumhansら<sup>(36)</sup> は、渦度の再配置法を用いて球まわりの流れを詳細に解析している。この論文ではレイノルズ数が300, 500, 1000の各場合について計算している。Re = 300では、無次元時間が75のときの離散渦点の数は616 000にもなり、速度場の計算の効率化のために並列計算に適したツリーコード<sup>(37)</sup> を用いている。ここでは、渦度場や離散渦の渦構造などが詳細に示され、渦法が高精度の数値解法であることを示している。また、Vortex-in-Cell法との併用による三次元円柱まわりの流れ<sup>(38)</sup> や三次元鈍体まわりの流れ<sup>(39)</sup> が計算されており、渦法が直接解法 (DNS) として利用できることを示している。

【木田 輝彦 大阪府立大学】

## 7.4. 離散的数値解法2 (格子気体法および格子ボルツマン法)

格子気体法および格子ボルツマン法は、格子点を粒子が運動するということから、一般の粒子法や分子動力学法あるいはモンテカルロ直接法などと異なり、また離散的な粒子を対象とすることから、偏微分方程式を離散化するこれまでのCFDの手法とも異なっている。基本的には連続体としてのナビエ・スト

ークス方程式を解く手法であるが、こういった格子気体、格子ボルツマン法におけるモデルの性質から、これまでの偏微分方程式を基礎とする数値解析手法と異なった特徴を持っている。格子気体法は粒子の衝突並進をモデル化し、マクロな流れは、粒子の運動を粗視化することにより得られる。一方、格子ボルツマン法は、粒子の分布関数の時間発展を解くもので、ノイズのないなめらかな解を得ることができる。

これまで、非圧縮性流体および圧縮性流体に対するモデルもいくつか提案されている。特にモデルの特性を利用して、気液二相流を含む複雑流体への応用が試みられてきたが、この手法によると、気液界面を特別に考慮することなく二相流のモデル化が可能であり、最近も多くの研究が試みられている<sup>(40)</sup>。

最近この手法の適用範囲として注目されるのは、MEMS (microelectro-mechanical systems) への応用である。気体の場合、考える系が小さくなると、希薄な気体と同様、流れはナビエ・ストークス方程式で支配されるものと異なったものになる。マイクロチャンネル内の流れは壁面での滑りが無視できず、圧力により駆動される流れにおいては、圧力分布は非線形となり、質量流量がクヌッセン数の関数となる。この流れに格子ボルツマン法を適用し、定性的に満足いく結果が得られている<sup>(41)</sup>。これは格子ボルツマン法においても、境界条件により固体壁面から格子幅程度の領域で、粒子の分布関数の非平衡性が無視できなくなり、ナビエ・ストークス方程式では出てこない流れも生じる。この現象は本来格子ボルツマン法がもつ離散的な誤差によるが、その原因と希薄気体における現象との間にはアナロジーが存在する。その他マイクロキャピティ流れに応用した例もあり、渦の位置がナビエ・ストークス解からずれることも示されている<sup>(42)</sup>。

ただこのアナロジーにより、この手法がそのままMEMSに使用できるとか、希薄気体の計算ができるというものではなく、計算結果の解釈には慎重であるべきであり、格子ボルツマン法で生じる固体壁面での滑りや、その他ナビエ・ストークス方程式からは出てこない流れが得られたとしても、この手法の有効性を確認したことはない。ただ格子ボルツマン法をナビエ・ストークスソルバーにとどまらず、粒子の運動をベースにおいた本手法の特徴を生かした新たな応用として、この分野は非常に魅力的であることは確かである。

ナビエ・ストークスソルバーとしての新たな応用分野として、空力音の直接計算もなされている。計算手法として、離散ボルツマン (BGK) 方程式

$$f_i(t, r) + c_i \frac{f_i(t, r)}{r} = -\frac{1}{r} \left( f_i(t, r) - f_i^{(0)}(t, r) \right) \quad (1)$$

を、安定な差分スキームで計算を行う手法で、差分格子ボルツマン法と呼ばれる。式(1)中の $f_i$ は粒子の分布関数であり、添え字 $i$ は粒子の進む方向に対応した整数、また $r$ は直角座標を表している。 $f_i^{(0)}$ は局所平衡分布関数、 $c_i$ は粒子の速度、 $\tau$ は緩和係数である。空間微分に3次精度の風上差分、時間に2次精度ルンゲクッタ法を適用し、円柱から放射されるエオルス音<sup>(43)</sup>およびエッジ音<sup>(44)</sup>のシミュレーションが行われた。従来空力音の直接計算では空間5~6次精度、時間4次精度のスキームが用いられるが、差分格子ボルツマン法による、より簡単なスキームで計算が可能であることが示された。

2000年にアメリカ サンタフェで行われた、第9回 "Discrete

Simulation of Fluid Dynamics” 国際会議の論文が文献(45)にあり, 2001年のフランス, カルギーズでの第10回会議での論文のいくつかは文献(46)にある. 最近の動向を知るのに有用である.

[ 薦原 道久 神戸大学 ]

## 7.5. 自由表面を持つ流れの安定性

固体壁に沿う液膜流れは冷却, 乾燥, コーティングなどの工業プロセスに古くから応用されてきた. このような液膜流れでは線形波の増幅, 非線形孤立波の形成および孤立波のスパン方向不安定性を経て乱雑化に至る過程の観察が容易であり, また, 非線形波動現象を簡素化した方程式で表現できるため数多くの研究がなされてきた. とく近年のナノテクノロジー, たとえばマイクロエレクトロニクスやオプティクス分野における絶縁膜やデバイスコーティングでは厚さ10~100nmの薄膜が生成されている. しかし, 薄膜には厚さ不均一, 穿孔, 孔内部の微粒子の点在などの欠陥がしばしば認められ, 均一な薄膜あるいは形状的にパターン化された薄膜を歩留まりよく生成するための技術が強く望まれている. 上述の欠陥の原因はコーティング過程における液体薄膜のフィンガリング (fingering) あるいはディウェッティング (dewetting) 現象にあるが, これらはいずれも液体薄膜の不安定性に起因している. ここでは, 液体薄膜(以下, たんに薄膜という)の不安定性に関する最近の研究のいくつかを紹介する.

傾斜平板に沿う液膜流れでは十分小さなレイノルズ数においても長波長かく乱に対し不安定であることが知られている<sup>(47)</sup>. また, 中間レイノルズ数流れで現れる孤立波の非線形不安定性解析には潤滑理論近似と長波長近似に基づいた液膜厚さに関する非線形時間発展方程式 (Benny方程式) がよく用いられる<sup>(48)</sup>. 薄膜の不安定性も, 長波長近似およびナヴェー・ストークス方程式の対流項を省略して得られる液膜厚さに関する非線形時間発展方程式を用いて調べられるが, 方程式には表面張力こう配に基づくMarangoni応力, van der Waals力, Born斥力などが重要な因子として組み込まれる. また, 基板の凹凸あるいはぬれ性不均一なども考慮される.

### 7.5.1. フィンガリング不安定

液体が垂直に置かれた均質な基板上をぬらしながら流下するとき, 液膜の先頭には液体・固体・気体の接触線が存在し, 表面張力の作用により液膜の先頭部は後続の液膜に比べて隆起する. このような隆起 (ridge) はスパン方向のかく乱に対して不安定であり, やがて手のひらから指が突き出るような筋状の(時には三角形の)流れを生じる. この不安定性はフィンガリング不安定と呼ばれており, 隆起部の不安定性は液柱のRayleigh不安定と同様な性質をもち, キャピラリー数  $Ca = \mu U / \sigma$  ( $U$ : 液膜の速度,  $\mu$ : 粘度,  $\sigma$ : 表面張力) を用いて, もっとも不安定なスパン方向の波長は  $\lambda_m = 14h_0(3Ca)^{-1/3}$ , 安定限界は  $\lambda_c = 8h_0(3Ca)^{-1/3}$  で与えられている<sup>(49)</sup>.

de Bruynら<sup>(50)</sup>は降伏応力を有する非ニュートン流体を対象

に傾斜平板を用いて実験ならびに理論的考察を行い, フィンガリングの波長  $\lambda$  は  $(\sin \theta)^{-1/3}$  ( $\theta$ : 平板の水平面に対する傾斜角) に比例し, また,  $\lambda$  は降伏応力に強く依存することを示している.

液膜先頭の接触線近傍にはごく薄い薄膜 (precursor film) が存在することが知られている. Precursor filmの長さが短いほどエネルギー消散は減少し, スパン方向のかく乱に対する不安定性が増大することが予測される. Kondicら<sup>(51)</sup>は基板上にスパン方向に等間隔な流れ方向の細いチャンネルを想定し, これによりprecursor filmにスパン方向の周期かく乱を与えて重力と表面張力を外力とする液膜厚さの非線形時間発展方程式の数値解析を行い,  $\lambda < \lambda_c$  であってもフィンガリング不安定が発生することを示している.

### 7.5.2. ディウェッティング

水平に置いた均質な基板上で水やアルコールなどの有極性液体膜を乾燥させていくとドライスポットが発生し拡大する. ドライスポットの内側には非常に薄い残留薄膜が存在する. 薄膜の厚さ  $h$  が100nm以下になると, 化学ポテンシャルはvan der Waals力と極性分子間力(またはBorn斥力)の作用を受け,  $h_1$  ( $\sim 10$ nm) と  $h_2$  ( $\sim$  数十nm) の厚さで安定平衡となる. したがって, 2成分混合液体の2相分離と同様な, 液膜厚さのスピンダル分解を起こす. Lyushninら<sup>(52)</sup>は拡大するドライスポットの挙動ならびに不安定性を表面張力と化学ポテンシャルを考慮し, 蒸発速度をパラメータとする液膜厚さの非線形時間発展方程式を用いてドライスポットの拡大過程と液膜隆起部の生成ならびにフィンガリング不安定の出現を明らかにしている.

水平基板上の100nm以下の静止薄膜は微小かく乱に対して不安定であり, スピンダル分解に起因するディウェッティングが発生する. 表面性状の均一な基板に対してディウェッティングが生じる間隔  $\lambda_d$  は線形化した液膜厚さの時間発展方程式の固有値より

$$\lambda_d = -8 \sigma^2 / (G \rho h^2)^{-1}$$

で与えられる<sup>(53)</sup>. ここに,  $G$  は化学ポテンシャル. しかし, 基板上の一方所でディウェッティングが発生すると, 周囲の薄膜はその影響を受けるため後続ディウェッティングの発生間隔や発生時間は変化する. また, 基板に物理的な凹凸や化学的なぬれ性の不均一があると, 線形理論を用いてディウェッティング間隔を予測することはできない. Karguptaら<sup>(54)</sup>はパターン化された形状の薄膜を作ることを目的に, 基板の物理的, 化学的不均一の取扱いモデルを提案し, 液膜厚さの非線形時間発展方程式を数値解析して, 時間経過とともに規則正しく配列したディウェッティングが形成されていく過程を提示している.

### 7.5.3. 界面活性剤の影響

液面において表面張力が不均一なとき, 表面張力こう配に比例したMarangoni応力が働いて流れが誘起される. 非溶解性界面活性剤の一樣均一濃度分散は微小かく乱に対して薄膜を安定化させることが知られている<sup>(55)</sup>. Warnerら<sup>(56)</sup>は非溶解性界面活性剤を液面の一部に均一分散させた場合について液膜厚さの非線形時間発展方程式と界面活性剤濃度に関する拡散方程式を用い

て、van der Waals力に基づく局所的薄膜化の速度はクリーンな場合に比べて増大することを明らかにするとともに、界面活性剤がディウエットング領域から排除されるために生じるMarangoni応力はディウエットング領域の拡大速度にはほとんど影響を及ぼさないことを示している。Warnerら<sup>(57)</sup>は、van der Waals力のHamaker係数およびBorn斥力のBornパラメータの値が界面活性剤濃度に依存する場合には、非溶解性界面活性剤が一樣均一濃度で分散する場合であっても薄膜は不安定化することを明らかにしている。

〔東 恒雄 大阪市立大学〕

## 文 献

- (1) Komori, S. and Nagata, K., Effects of Molecular Diffusivities on Counter-Gradient Scalar and Momentum Transfer in Strongly Stable Stratification, *J. Fluid Mech.*, 324 (1996), 205-237.
- (2) Hanazaki, H. and Hunt, J. C. R., Linear Processes in Unsteady Stably Stratified Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 318 (1996), 303-337.
- (3) Iino, J., Van Atta, C. W. and Keller, K. H., Energy Exchange in a Stably Stratified Flow with Laterally Distorting Duct, *Phys. Fluids*, 14-1 (2002), 323-332.
- (4) 蒔田秀治・大庭勝久, 温度成層中の内部重力波が逆勾配熱拡散に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, 68-674, B (2002), 2764-2771.
- (5) Hanazaki, H., Linear Processes in Stably and Unstably Stratified Rotating Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 465 (2002), 157-190.
- (6) Galmiche, M. and Hunt, J. C. R., The Formation of Shear and Density Layers in Stably Stratified Turbulent Flows: Linear Processes, *J. Fluid Mech.*, 455 (2002), 243-262.
- (7) Galmiche, M., Thual, O. and Bonneton P., Direct Numerical Simulation of Turbulence-Mean Field Interactions in a Stably Stratified Fluid, *J. Fluid Mech.*, 455 (2002), 213-242.
- (8) Armenio, V. and Sarkar, S., An Investigation of Stably Stratified Turbulent Channel Flow Using Large-Eddy Simulation, *J. Fluid Mech.*, 459 (2002), 1-42.
- (9) Pardyjak, E. R., Monti, P. and Fernando, H. J. S., Flux Richardson Number Measurements in Stable Atmospheric Shear Flows, *J. Fluid Mech.*, 459 (2002), 307-316.
- (10) Levy, M.A. and Fernando, H.J.S., Turbulent Thermal Convection in a Rotating Stratified Fluid, *J. Fluid Mech.*, 467 (2002), 19-40.
- (11) Salhi, A., Similarities Between Rotation and Stratification Effects on Homogeneous Shear Flow, *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, 15 (2002), 339-358.
- (12) Smith, L. M. and Waleffe, F., Generation of Slow Large Scales in Forced Rotating Stratified Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 451 (2002), 145-168.
- (13) Melville, W. K., Veron, F. and White, C. J., The Velocity Field under Breaking Waves: Coherent Structures and Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 454 (2002), 203-233.
- (14) 山本義暢・功刀資彰・芹澤昭示, 風波乱流場の直接数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 68-665, B (2002), 63-71.
- (15) Sullivan, P. P. and McWilliams, J. C., Turbulent Flow over Water Waves in the Presence of Stratification, *Phys. Fluids*, 14-3 (2002), 1182-1195.
- (16) Hara, T. and Belcher, S. E., Wind Forcing in the Equilibrium Range of Wind-Wave Spectra, *J. Fluid Mech.*, 470 (2002), 223-245.
- (17) Brocchini, M., Free Surface Boundary Conditions at a Bubbly/Weakly Splashing Air-Water Interface, *Phys. Fluids*, 14-6 (2002), 1834-1840.
- (18) 長田孝二・白尾龍太郎・小森 悟, 気液界面を通しての炭酸ガス輸送に及ぼす界面重油汚れの影響, 日本機械学会論文集, 68-671, B (2002), 1871-1877.
- (19) Livescu, D., Jaber, F. A. and Madnia, C. K., The Effects of Heat Release on the Energy Exchange in Reacting Turbulent Shear Flow, *J. Fluid Mech.*, 450 (2002), 35-66.
- (20) 中谷辰爾・芝 世武・荒木幹也・尾下充利・津江光洋・河野通方, LIF法を使用した模擬オゾン層におけるNO希釈ガス噴流中におけるNO-O<sub>3</sub>反応の測定, 日本機械学会論文集, 68-672, B (2002), 2006-2013.
- (21) 久保 貴・酒井康彦・太田 功・中村育雄・連続競争反応を伴う乱流噴流拡散の研究(第1報, 3成分変動濃度同時測定の有効性), 日本機械学会論文集, 66-648, B (2000), 2006-2013.
- (22) Ito, Y., Nagata, K. and Komori, S., The Effects of High-Frequency Ultrasound on Turbulent Liquid Mixing with a Rapid Chemical Reaction, *Phys. Fluids*, 14-12 (2002), 4362-4371.
- (23) Nagata, K. and Komori, S., The Effects of Unstable Stratification and Mean Shear on the Chemical Reaction in Grid Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 408 (2000), 39-52.
- (24) Uchiyama, T. and Naruse, M., Numerical Simulation of Gas-Particle Two-Phase Mixing Layer by Vortex Method, *Power Technology*, 125 (2002), 111-121.
- (25) Taylor, I. and Vezza, M., Aeroelastic Stability Analysis of a Bridge Deck with Added Vanes Using a Discrete Vortex Method, *Wind and Structure*, 5-2-4 (2002), 277-290.
- (26) Yeom, J-K. ほか, A Proposal for Diesel Spray Model Using a Tab Breakup Model and Discrete Vortex Method, *KSME International J.*, 16-4 (2002), 532-548.
- (27) Zhu, B. and Kamemoto, K., Numerical Simulation of Flows Over a Moving Circular Cylinder Using a Lagrangian Vortex Methods, 第16回数値流体力学シンポジウム, D26-2 (2002-12).
- (28) Eldredge, J., Colonius, T. and Leonard, A., A Vortex Particle Method for Two-Dimensional Compressible Flow, *J. Comput. Phys.*, 179 (2002), 371-399.
- (29) Nitsche, M. and Strickland, H., Extension of the Gridless Vortex Method into the Compressible Flow Regime, *J. Turbulence*, 3-050 (2002). <http://www.EMATH.FR/PROC/VOL/>
- (30) Eldredge, J., Leonard, A. and Colonius, T., A General Deterministic Treatment of Derivatives in Particle Methods, *J. Comput. Phys.*, 180 (2002), 686-709.
- (31) Thirifay, F. and Winckelmans, G.S., Development of a Lagrangian Method for Combustion and Application to the Planar Methane-Air Jet Diffusion Flame, *J. Turbulence*, 3-059 (2002). <http://jot.iop.org/>
- (32) Cottet, G-H., Michaux, B., Ossia, S. and Vanderlinden, G., Comparison of Spectral and Vortex Methods in Three-Dimensional Incompressible Flows, *J. Comput. Phys.*, 175 (2002), 1-11.
- (33) Cottet, G-H., Artificial Viscosity Models for Vortex and Particle Methods, *J. Comput. Phys.*, 127 (1996), 199-308.
- (34) Mansfield, J. R., Knio, O.M. and Meneveau, C., A Dynamic LES Scheme for the Vorticity Transport Equation: Formulation and a Prior Tests, *J. Comput. Phys.*, 145 (1998), 693-730.
- (35) Gharakhani, A., A Grid-Free Method for LES of Incompressible Flow, *Proceedings of the ASME FEDSM 2002-31370*, (2002).
- (36) Ploumhans, P., Winckelmans, G.S., Salmon, J.K., Leonard, A. and Warren, M.S., Vortex Methods for Direct Numerical Simulation of Three-Dimensional Bluff Body Flows: Application to the Sphere at Re = 300, 500, and 1000, *J. Comput. Physics*, 178 (2002), 427-463.
- (37) Winckelmans, G.S., Salmon, J.K., Warren, M.S. and Leonard, A., Application of Fast Parallel and Sequential Tree Codes to Computing Three-Dimensional Flows with the Vortex Element and Boundary Element Methods, *ESAIM, Proc.*, 1 (1996), 225-240.
- (38) Cottet, G-H. and Poncet, P., Particle Methods for Direct Numerical Simulations of Three-Dimensional Wakes, *J. Turbulence*, 3-038 (2002). <http://jot.iop.org/>
- (39) Ploumhans, P., Daeninck, G. and Winckelmans, G.S., Simulation of 3-D Bluff Body Flows Using Vortex Methods: from DNS Towards LES Modelling, *ESAIM, Proc.*, (2002), <http://www.EMATH.FR/PROC/VOL/>
- (40) 稲室隆二, 格子ボルツマン法 - 新しい流体シミュレーション法, 物性研究, 77-2(2001), 197-232.
- (41) Lim, C. Y., Shu, C., Niu, X. D. and Chew, Y. T., Application of Lattice Boltzmann Method to Simulate Microchannel Flows, *Phys. Fluids*, 14-7(2002), 2229-2308.
- (42) Nie, X., Doolen, G.D. and Chen, S., Lattice-Boltzmann Simulations of Fluid Flows in Memes, *J. Stat. Phys.*, 107 (1-2) (2002), 279-289.
- (43) 篤原道久・栗田 誠・片岡 武, 差分格子boltzmann法による流体音の数値計算, 第15回数値流体力学シンポジウム, CD-ROM, B10-1 (2001-12).
- (44) 篤原道久, 四方憲治, 片岡 武, 差分格子ボルツマン法によるエッジトーンの直接計算, 第16回数値流体力学シンポジウム, CD-ROM, A13-2 (2002-12).
- (45) *Journal of Statistical Physics*, 107 (2002).
- (46) *Philosophical Transactions*, Mathematical, Physical and Engineering Science, *Royal Society*, 360-1792 (2002).

- (47) Benjamin, T. B., Wave Formation in Laminar Flow Down an Inclined Plane, *J. Fluid Mech.*, 2 (1957), 554 - 574.
- (48) Benny, D. J., Long Waves on Liquid Films, *J. Maths. Phys.*, 45 (1966), 150 - 155.
- (49) Troian, S. M., Herbolzheimer, E., Safran, S. A. and Joanny, J. F., Fingering Instabilities of Driven Spreading Films, *Europhys. Lett.*, 10 (1989), 25 - 30.
- (50) de Bruyn, J. R., Habdas, P. and Kim, S., Fingering Instability of a Yield-Stress Fluid, *Phys. Rev. E*, 66 (2002), 031504/1 - 5.
- (51) Kondic, L. and Diez, J., Flow of Thin Films on Patterned Surfaces: Controlling the Instability, *Phys. Rev. E*, 65 (2002), 045301/1 - 4.
- (52) Lyushnin, A. V., Golovin, A. A. and Pismen, L. M., Fingering Instability of Thin Evaporating Liquid Film, *Phys. Rev. E*, 65 (2002), 021602/1 - 7.
- (53) Sharma, A. and Ruckenstein, E., J. An Analytical Nonlinear Theory of Thin Film Rupture and Its Application to Wetting Film, *Colloid Interface Sci.*, 113 (1986), 456 - 479.
- (54) Kargupta, K. and Sharma, A., Creation of Ordered Patterns by Dewetting of Thin Films on Homogeneous and Heterogeneous Substrates, *J. Colloid Interface Sci.*, 245 (2002), 99 - 115.
- (55) Ruckenstein, E. and Jain, R. K., Spontaneous Rupture Of Thin Liquid Film, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 70 (1974), 132 - 147.
- (56) Warner, M. R. E., Craster, R. V. and Mater, O. K., Unstable van der Waals Driven Line Rupture in Marangoni Driven Thin Viscous Films, *Phys. Fluids*, 14 - 5 (2002), 1642 - 1654.
- (57) Warner, M. R. E., Craster, R. V. and Mater, O. K., Dewetting of Ultrathin Surfactant-Covered Films, *Phys. Fluids*, 14 - 11 (2002), 4040 - 4054.
-