混相流体の諸現象と界面の物理*

日本機械学会論文集(B編)
68巻671号(2002-7)

藤川 重雄^{*1}, 深野 徹^{*2}

Interfacial Phenomena and Physics in Multiphase Fluids

Shigeo FUJIKAWA^{*3} and Thoru FUKANO

^{*3} Division of Mechanical Science, Hokkaido University,
N13 W8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

Key Words: Multiphase Fluids, Multiphase Flows, Macroscopic Interface Phenomena, Microscopic Interface Phenomena, Interfacial Physics

1. はじめに

流体力学における「界面」はマクロに見れば、固体と流体(気体あるいは液体)の界面および気体と液体の界面に大別できる。界面での流体力学的境界条件の最も身近な例として、「固体壁表面でのニュートン流体の速度は固体壁表面の速度に等しい」という条件がある。日常、当然のこととして使っているこの境界条件は物理的にどの程度の根拠があり、どのような条件下で成り立つのであろうか。また、成り立たないとすればどのような条件下で破綻するのだろうか。従来、界面での滑りが問題とされたのは希薄気体や高分子溶液の流れ等においてであったが、最近、固体壁表面が超はっ水性を有する場合にはニュートン流体でも滑りが存在することが見出されている⁽¹⁾。この滑りの存在により管摩擦抵抗が減少することも知られており、今後、滑り機構の解明と流体機器等への応用の新たな可能性が期待される。

一方、「界面」のミクロな面は、マクロ熱流体現象の初期・境界条件の設定とかかわっている⁽²⁾。その例として、過飽和蒸気からのクラスタ生成、過熱液体からの気泡生成、気液界面での相変化等を挙げることができる。これらは分子レベルでの現象であるため、流体を連続体として扱う流体力学では理論の枠組みのなかに入っていない。これらの現象は、最近、分子シミュレーションにより研究されており、多くの新しい知見が得られている⁽³⁾。今後、分子シミュレーションの成

果に基づく現象のモデル化等を通して、界面のミクロ情報がマクロ熱流体現象に対する初期・境界条件のなかに組み込まれることが期待される。

多くの場合、界面現象はマクロ・ミクロを問わず、単相流体におけるよりも混相流体において問題となることはいうまでもない。本稿では、混相流体の界面現象に関する最近の研究に関して、特に物理的な面に光をあてて展望を試みる。可能な限り、研究の背景、現状、さらに今後の課題について述べてみたい。もとより著者らの能力不足のため、すべての問題を扱うことはできなかったことをお断りしておく。

2. 分子スケールの現象

2・1 物質の生成 二酸化炭素やメタンは、水と物の一種であるクラスレート・ハイドレートを形成することが知られている。クラスレート・ハイドレートは、白い固体結晶で、低温・高圧であるほど安定で、常温・常圧では分解して水とガスになる。このため、ガスをクラスレート・ハイドレート化することによって体積を100分の1以下にできるので、冷熱源(0°C付近)やメタンを主成分とする天然ガスの貯蔵に利用することができる。

太田ら⁽⁴⁾は、クラスレート・ハイドレートの生成温度、生成圧力、生成時間等を調べるため、そのミクロな生成過程および構造について分子シミュレーションを行った。その結果、以下のことを明らかにしている。

(1) 最高温度 274 K まではハイドレート生成が可能である。

(2) 温度 0 K では、水分子はすべて水素結合で結合しており、ほぼ十四面体と十二面体のケージを形成していて、各ケージの中心にメタン分子が均一に分散

* 原稿受付 2002年2月12日。

^{*1} 正員, フェロー, 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8)。

^{*2} 正員, フェロー, 九州大学大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。

E-mail: fujikawa@eng.hokudai.ac.jp

して結晶構造を形成している。

(3) 温度の上昇とともに、分子の移動範囲が広がっている。

今後、分子間ポテンシャルの影響、アンサンブル法の検討を行い、定量的な安定条件を明らかにすることが課題である。

2・2 核生成過程 流体の相変化現象において、核生成はその初期の相変化速度を決める重要な過程である。過飽和蒸気からのクラスタ生成、過熱液体からの気泡生成、過飽和溶液あるいは過冷却融体からの結晶生成などはすべて核生成過程の一種である。これらのなかで、クラスタ生成はあらゆる核生成過程のモデルであり、その研究には1世紀にもわたる長い蓄積がある。

Yasuoka ら⁽⁵⁾ は、クラスタ生成に関する分子シミュレーションを行い、多くの新たな知見を得ている。図1は分子数15からなる水クラスタの例を示したものである。水クラスタは水素結合のために古典理論⁽⁶⁾で仮定しているような球形ではないことがわかる。また、核生成速度は古典理論の予測値と比べて、3桁程度小さいことが明らかにされている。

Kinjo ら⁽⁷⁾ は、負圧下にある液体中でのキャビテーション気泡核の核生成過程について分子シミュレーションを行い、核生成速度が古典理論⁽⁸⁾の予測値と比べて8桁程度大きいことを明らかにしている。キャビテーション気泡核の生成過程は、流体力学における未解決問題の一つであるが、今後、分子シミュレーションの面からの一層の発展が期待される。また、分子シミュレーションの結果の実験による検証も今後の課題である。

Fig. 1 A typical example of water molecules forming a cluster⁽⁵⁾

2・3 気液界面での相変化 気液界面における相変化は、近年、熱・物質物質輸送現象のマイクロ機構解明の要請と相まって、分子レベルでの相変化機構の解明や相変化速度の決定が重要な課題として注目されている。相変化速度式は、古くには自由分子流の仮定の下に導かれていたが、今日では Boltzmann 方程式からかなり厳密に導かれている。いずれの場合にも、速度式のなかに凝縮係数という、液面に衝突する蒸気分子の流速に対する実際に凝縮する分子の流速の比が未知パラメータとして導入され、これは蒸気の種類、蒸気の熱力学的状態、液面の物理化学的状态等に依存している物性値と考えられている。これまでにさまざまな蒸気に対して凝縮係数を測定する試みが1世紀近くにもわたってなされてきたが、ある程度の精度で測定できるようになり、理論的にも扱えるようになったのは比較的最近のことである。

Maerefat ら^{(9),(10)} は、衝撃波音を用いた実験方法により、メタノール蒸気、水蒸気、四塩化炭素蒸気等の凝縮係数を測定し、メタノール蒸気や水蒸気のような有極性分子の蒸気は、四塩化炭素蒸気のような球形に近い分子と比べて凝縮係数がかなり小さいことを明らかにしている。Kotani ら⁽¹¹⁾ は、広範囲な温度・数密度条件下でメタノール蒸気の凝縮係数を測定し、図2に示すように、凝縮係数 α が、液面の温度 (T_l) およびそこでの蒸気温度 (T) や、液面温度での飽和蒸気の数密度 (n^*) および液面での蒸気の数密度 (n) に強く依存していることを明らかにしている。水⁽¹²⁾ およびヘリウム II⁽¹³⁾ の凝縮係数が温度の上昇により低下するという実験結果も最近報告されている。しかし、凝縮係数の温度および数密度依存性についての物理的理由は

Fig. 2 Condensation coefficient in thermodynamic nonequilibrium conditions⁽¹¹⁾

まだわかっていない。

気液界面での相変化は分子シミュレーションの格好の研究対象としても取り上げられている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。その結果、相変化には図3に示すように、(a)蒸発、(b)凝縮、(c)自己反射、(d)分子交換の四つの素過程が存在することが見い出されている。また、アルゴン、水、メタノール、酢酸の平衡状態での凝縮係数は温度の上昇とともに小さくなることが明らかにされている。

長山ら⁽¹⁶⁾も、最近、平衡状態下での水の蒸発・凝縮について分子シミュレーションを行い、さらにその結果を遷移状態説に基づく凝縮係数の理論に取り入れた研究を行っている。Chekmarev⁽¹⁷⁾は、Matsumoto⁽¹⁴⁾らの分子シミュレーションの結果を基に相変化機構のモデル化を行い、凝縮係数の半経験的理論を提案している。このモデルでは二つの未知パラメータが導入され、凝縮係数の測定値を用いて決定されている。

気液界面でのマクロな現象が、分子レベルで解明されなければならない実際の例として、高速の蒸気流に伴われるドライアウト寸前の液膜表面での熱的境界条件を上げることができる。通常、大気圧下で100°Cを超える高温の伝熱面上に液膜がある場合においても、すなわち、気液非平衡の状態においても液膜表面の温度を飽和温度とする平衡モデルが用いられている。気液非平衡状態での分子シミュレーションは、今日に至ってもいまだ行われていないが、今後の重要な課題といえる。また、通常用いられている分子気体力学境界条件⁽¹⁸⁾の分子シミュレーションによる検討も今後なされなければならない。

2.4 気固界面での分子干渉 半導体デバイス製

Fig. 3 Typical dynamic behavior of molecules near liquid surface⁽¹⁵⁾

造装置内の流れやハードディスク-ディスクヘッド間の流れなど微小領域における分子流れでは、固体表面近傍における気体分子の散乱方向、エネルギー、吸着確率などが重要となる。

山西ら⁽¹⁹⁾は、固体表面近傍における分子スケールの流動構造を把握することを目的として、分子シミュレーションを行い、Lennard-Jones 流体分子の空間分布、動径分布、圧力分布、吸着係数、自己拡散係数、速度分布、温度分布等を解析している。彼らは、固体表面(Pt)に入射した流体分子(Xe)の動的挙動を評価するため、Yasuoka ら⁽²⁰⁾が気液界面での分子の蒸発・凝縮において定義した凝縮係数を、固体表面への吸着に適用し、吸着係数 α と分子交換率 α_{exc} を計算した。今後、この方法の実際問題への適用が期待される。

3. 気液界面と MEMS

気液界面現象は MEMS (Microelectromechanical Systems) とも関係が深い。身近な例として、バブルジェットプリンタを挙げることができる。これは、マイクロヒータにより発生させた微細な蒸気泡をアクチュエータとして利用したものである⁽²¹⁾。気泡のサイズが減少するにつれて、表面張力により液体圧が高くなるために、気泡生成に過熱度が必要となること、気

Fig. 4 Microbubble motor⁽²³⁾

泡崩壊時の衝撃圧発生、熱拡散による効率低下等克服すべき課題はあるが、今後の発展が期待されるテーマである。

表面張力の温度および濃度依存性はマランゴニ効果として知られており、表面張力を駆動力とするエンジンが提案されている⁽²²⁾。高橋⁽²³⁾は、表面張力の温度依存性を利用したマイクロ気泡モータを考案し、基礎的な実験を試みている。図4にその概略を示す。中心軸のまわりに自由に回転するロータの同心円上のくぼみに複数個の微小蒸気泡をトラップさせ、下側に取り付けた複数のマイクロヒータを順に加熱することにより蒸気泡を高温側へ移動させてロータを回転させるという原理に基づいている。このような蒸気泡の移動はTakahashiら⁽²⁴⁾により発見された現象である。液体の温度分布と表面張力分布、表面張力作用時の流体抵抗、気泡の運動等の解明が今後の課題である。

4. 界面の力学的・熱的条件

4.1 超はっ水性壁面 通常の流れの解析では、「粘性流体はその接する固体壁面では滑らない」という境界条件が用いられている。そして、この境界条件はニュートン流体の場合、実験結果とよく一致する。現在のところ、粘性流体において滑りが問題とされるのは、希薄な気体や非ニュートン流体の高分子溶液などの流れ等においてであり、ニュートン流体の滑りに関連する現象の報告はなかった。

Watanabeら⁽¹⁾は、流体とそれに接する固体壁の分子の相互作用が通常の固体壁よりも極端に弱いと考えられる超はっ水壁に着目して、抵抗減少効果が現れることを通して滑りの存在を発見した。はっ水性を評価するには固体壁面上の水滴の接触角が用いられるが、接触角が140°以上の壁は超はっ水壁と言われている。このため固体壁面に何らかの処理を施す必要があり、塗料やメッキなどによって超はっ水性壁が作られている。

超はっ水性壁面の場合、管摩擦係数は

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{4\mu}{a\beta}\right)\right]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる⁽¹⁾。ここに、 Re はレイノルズ数、 a は管半径、 μ は粘性係数および β は滑り係数と呼ばれるもので管壁での摩擦応力が滑り速度に比例すると仮定した場合の係数である。滑りなし流れの場合、 $\beta \rightarrow \infty$ である。

図5は円管内の水の流れに対する管摩擦係数である⁽¹⁾。■印はアクリル樹脂の管の場合、□印は接触角

Fig. 5 Friction factor⁽¹⁾

150°の超はっ水性管の場合で、後者の場合明らかに滑りの効果により λ が小さくなっていることがわかる(図中の式(6)は上に示した式(1))。

現在のところ、滑りのメカニズム、滑りと乱流現象との関連等についてはまだ明らかになっていない。また、超はっ水性壁の耐久性、簡便性、コスト、さらに環境への影響等の評価も今後の課題である。

4.2 超親水性壁面 酸化チタンをコーティングした表面に紫外線を照射すると、時間の経過とともに水との接触角が減少し、ほぼ零になる。この超親水性を利用して、防汚、ガラスなどの曇り止め、といったさまざまな効果が得られる。

超親水性コーティング面を沸騰・蒸発・凝縮などの液膜の濡れ性が影響を及ぼす相変化伝熱系に応用することで、伝熱特性の向上と紫外線の有無による伝熱制御が期待できる⁽²⁵⁾。さらに、コーティングやプラズマ処理した金属面等の超親水性壁の利用により非常に薄い液膜の形成が可能となり、液膜の厚さが熱伝達を支配する系において、熱伝達の促進が期待される。

4.3 界面熱輸送 微細加工技術の進歩により、電子デバイスのマイクロ化が急速に進行しつつある。デバイスの線幅を例にとると、現在0.18 mm程度であるが、数年後にはさらにその半分程度になると予想されている。このようなデバイスのマイクロ化が進む一方で、発熱密度が増大する傾向にあり、デバイスの寿命、信頼性に関して問題が生じている。デバイス設計においては、薄膜から基板への熱輸送の高精度な予測が重要であり、特に薄膜-基板界面での熱抵抗(境界熱抵抗)の解明が待たれている。

井上⁽²⁶⁾は、境界熱抵抗を測定する方法を開発し、金または白金薄膜と数種類の基板に対して熱抵抗の測定に成功している。測定データを基に熱抵抗のメカニズムを提案しており、今後の発展が期待される。

5. 気流と液面の干涉

5.1 液膜の不安定・破断 静止気体中を流れる薄い液膜が破断し、微細な液滴に分裂する現象は液体微粒化技術に応用されており、自由液膜の不安定性、崩壊、液滴形成などに関して多くの研究がなされている。脇本ら⁽²⁷⁾は、薄い自由液膜流れにおいて層流から乱流への激変的な遷移により強い渦運動を利用して、液体の微粒化を図る研究を行っている。この場合、乱流遷移は、液膜内部の変曲点型速度分布の不安定性により変曲点近傍で同心円状のかく乱が増幅するために生じたものである。流出ノイノルズ数の増加に伴い、液膜に穿孔が生じ、液膜が微粒化していくことが明らかにされている。今後、実験結果の一層の集積とともに微粒化過程の最終段階における表面張力の影響の解明等が必要とされる。

一方、気流に伴われる薄い液膜上に形成される波のなかで、粘性波と呼ばれる波が存在する。この波は、液流量が少なく約 20°C の水の場合液膜厚さが約 0.25 mm 以下のときに観察され、波の伝ば速度が液体界面の流速よりも遅い波として定義されている。この波が生じている状態から液流量がわずかに減少すると液膜が破断するという実験結果より、熱交換器や化学装置等の安全運転や効率などに重大な影響を与えることが考えられる。これまで粘性波に関する理論的研究では、線形安定理論解析による波の発生条件についての検討だけであったが、深野ら⁽²⁸⁾は波の成長過程の詳細な数値解析を行った。計算結果は、おおむね実験結果を説明することはできたが、境界条件の与え方等に関する検討課題が残っている。

5.2 崩壊液面での熱・物質移動 気液界面での熱・物質の輸送機構を解明することは、化学工業装置の設計や海面での熱・物質交換の予測に関連して重要である。

嶋田ら⁽²⁹⁾は、風波水槽を用いた実験により、界面近傍の乱流渦構造と熱・物質移動の関連性について詳細に調べ以下のことを明らかにした。

(1) 風波乱流場では、液側界面近傍に出現する表面更新乱流渦の発生周波数は液体の動粘性係数には依存せず、液体の物質移動係数 k_L と液体のシュミット数 Sc の間には $k_L \propto Sc^{-1/2}$ が成り立たない。

(2) 風速の増加に伴い液側熱伝達係数は増加する

Fig. 6 Trichloroethylene concentration versus circulation time⁽³⁰⁾

が、バルク法で用いられている「熱フラックスと風速との比例関係」は成立しない。

(3) 風波が激しく崩壊する高風速の場合には、界面において、 $h_L/k_L = (\alpha_L/D_L)^{1/2}$ が成立する。ここに、 h_L は液体の熱伝達係数、 α_L は液体の温度伝導率、 D_L は液体中の物質の相互拡散係数である。

これらの結果は、従来のこの分野で通説とされてきた説を否定するものであり、今後他研究者による追試が望まれるとともに、これらの結果を用いた大気・海洋間での炭酸ガス交換量を再評価等が期待される。

5.3 高速水噴流 水噴流のもつエネルギーを利用した各種の加工技術の研究は 1960 年代に入って活発化して以来、現在、各種材料の切断、穴あけ、ばり取り、材料表面の改質、有害物質の分解等に応用されている。

佐藤ら⁽³⁰⁾は、有害物質の一例として、有機化合物のトリクロロエチレン TCE の水中ウォータージェットによる分解を試みている。図 6 は TCE 濃度の経時変化を示す。TCE の分解は高速水噴流により発生したキャピテーション気泡の崩壊の際の局所的高温・高圧によるものである。噴流の噴射圧が 35 MPa ときわめて高く、今後、安全性・経済性の面からさらに低い噴射圧での実用化が望まれている。

6. 分散化を含む流れ

6.1 気泡流 液体中に多数の気泡が分散してい

る流れである気泡流は、多くの工業プロセスにおいて観察され、その流動機構の解明は工学的に重要である。

杉山ら⁽³¹⁾は、流体の保存式と個々の気泡の運動を記述した式とを整合性のとれるように結びつけ、円柱周りの気泡流について数値シミュレーションを行った。図7は円柱背後のボイド率分布の気泡径および重力依存性を示したものである (Case III; レイノルズ数 $Re=2000$, フルード数 $Fr=\infty$, 無次元気泡径 $\Gamma=3.0 \times 10^{-2}$: Case IV; $Re=2000$, $Fr=0$, $\Gamma=1.0 \times 10^{-2}$: Case V; $Re=2000$, $Fr=1.0$, $\Gamma=3.0 \times 10^{-2}$). 気泡径が大きいと (Case III, IV), 放出渦に気泡が集積すること, 重力の有無により (Case III, V) 気泡の慣性運動の違いがボイド率の違いとして現れてくることがわかる。また, Tamura ら⁽³²⁾は二次元翼周

りの二次元気泡流のシミュレーションを行い, 揚力係数および抗力係数の計算結果は実験結果と定性的に一致することを示した。しかし, 計算結果と実験結果の間にはまだ大きな隔たりがあり, 今後の進展が期待される。

6.2 移動界面捕獲法 固体粒子や液滴などの分散相と相互作用は, 混相流研究の重要なテーマの一つでもある。近年, 直接シミュレーションや画像処理の技術の発達により, 乱流中での粒子の運動や粒子による乱流変調の機構解明に対する期待が高まっている。

瀧口ら⁽³³⁾および梶島ら⁽³⁴⁾は, 流れ解析用の固定メッシュで, 任意形状の粒子まわりの流れを解析し, 流体応力の表面積分を求めて粒子の運動をシミュレートする方法を提案した。一様流中に固定された球まわりの流れのシミュレーションにより, 粒子系に対して数メッシュの格子解像度があれば, 非定常渦放出を伴う高レイノルズ数領域まで精度良く計算できることが確認されている。この方法は, 複雑な形状の物体まわりの流れや複数の物体をすぎる流れ等を精度良くシミュレートするのに適用できる可能性がある。

実験の面では, 齋藤ら⁽³⁵⁾により, 光ファイバプローブを用いて単一気泡の界面速度と気泡径を同時測定する方法が開発されている。今後, 気泡乱流計測への応用が期待されている。

6.3 不溶性液滴を含む流れ 不溶性液滴を含む乱流水流は, 直接接触熱交換器, 分離抽出プロセス装置, 含油排水処理装置等に見られる。しかしながら, 液滴径が乱れの最小長さスケールに比較して大きいために, 界面の変形や液滴と周囲流れの相互作用がどの乱れのスケールや構造に支配されるのかが不明であるため, これらの装置の設計, 製作, 運転上必要な流動の解明や予測は立ち遅れている。

萩原ら⁽³⁶⁾は, 1個の不溶性液滴とその近傍の乱れ構造の相互作用に焦点を絞り, 可視化実験や数値シミュレーションを行った。乱れ構造は, テーラー渦乱流, 平面クェット乱流, 変形グクト内乱流, 渦・せん断・平面ひずみのすべての乱れ構造を含むチャンネル乱流を研究対象としている。基本的には, いずれの乱れ構造においても, 液滴の粘性の増加に伴い, 周囲流の平均速度と乱れ強さが低下することが示されている。液滴の密度の影響, 液滴の衝突・合体・分裂, 界面での相変化等の研究が今後の課題である。

6.4 環状噴霧流 環状噴霧流はボイラー, 原子炉, 空調機等の伝熱機器や流体機器において現れる重要な流動様式である。この流れでは, 液滴の挙動が熱, 物質, 運動量の伝達に大きな影響を及ぼす。このため,

(a) Contour plots on the xy -plane

(b) Void fraction distribution behind a cylinder

Fig. 7 Time averaged void fraction distribution⁽³¹⁾

液滴の挙動の正確な把握が環状噴霧流を解析する上で重要となる。

Matsuura⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾ は、気相(連続相)に対しては連続の式、運動方程式、乱流エネルギーの式、乱流消散の式を、波状液膜に対しては壁速度と粗壁面に対する壁関数により境界条件を与えてモデル化し、液滴の挙動については個々の液滴と気相との相互作用を考慮することにより数値シミュレーションを行った。その結果、液膜速度が小さい場合、液膜界面上のかく乱は、気相乱流場および液滴挙動に大きな影響を与えること、液膜速度の増加とともに、かく乱波の影響が小さくなること等が明らかにされた。今後、解析モデルの精密化と実験データの一層の集積が必要とされる。

7. おわりに

混相流体における界面での諸現象について、主として物理的側面に光をあてて述べた。これらの現象は機械工学のみならず、材料工学、化学工学、大気科学、さらには物性物理学にいたる広い分野で重要な基礎プロセスとして位置付けられる。今後、現象の認識と研究方法の枠組みの拡大がさらに進み、正しい認識に基づく現象のモデル化、理論化、精度のよい実験データが出て来ることを期待したい。

文 献

- (1) Watanabe, K., Yanuar and Udagawa, H., *J. Fluid Mech.*, **381** (1999), 225-238.
- (2) 丸山茂夫, 機論, **65**-630, B (1999), 419-425.
- (3) 大口晃司・松本充弘, 粉体工学誌, **37** (2000), 523-531.
- (4) 太田正廣・祁影霞・坂本守義, 機論, **66**-649, B (2000), 2305-2312.
- (5) Yasuoka, K. and Matsumoto, M., *J. Chem. Phys.*, **109** (1998), 8463-8470.
- (6) Viisanen, Y., Strey, R. and Reiss, H., *J. Chem. Phys.*, **99** (1993), 4680-4692.
- (7) Kinjo, T. and Matsumoto, M., *Fluid Phase Equilibria*, **144** (1998), 343-350.
- (8) Blander, M. and Katz, J. L., *AIChE J.*, **21** (1975), 833-848.
- (9) Maerefat, M., Fujikawa, S., Akamatsu, T., Goto, T. and Mizutani, T., *Exp. in Fluids*, **7** (1989), 513-520.
- (10) Maerefat, M., Akamatsu, T. and Fujikawa, S., *Exp. in Fluids*, **9** (1990), 345-351.
- (11) Kotani, M., Tsuzuyama, T., Fujii, Y. and Fujikawa, S., *JSME Int. J., Ser. B*, **41** (1998), 436-446.
- (12) Haynes, D. R., Tro, N. J. and George, S. M., *J. Phys. Chem.*, **96** (1992), 8502-8509.
- (13) 古川徹・村上正秀・飯田光人, ながれ, **19** (2000), 247-252.
- (14) Matsumoto, M. and Yasuoka, K., *J. Chem. Phys.*, **101** (1994), 7912-7917.
- (15) Matsumoto, M., *Fluid Phase Equilibria*, **144** (1998), 307-314.
- (16) 長山暁子・鶴田隆治, 機論, **67**-656, B (2000), 1041-1048.
- (17) Chekmarev, S. F., *AIChE J.*, **42** (1996), 2467-2475.
- (18) 曾根良夫・青木一生, 分子気体力学, (1994), 219-222, 朝倉書店.
- (19) 山西伸宏・ほか3名, 機論, **66**-647, B (2000), 1652-1659.
- (20) Yasuoka, K., Matsumoto, M. and Kataoka, Y., *J. Chem. Phys.*, **101** (1994), 7904-7911.
- (21) Asai, A., Hara, T. and Endo, I., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987), 1794-1801.
- (22) Scriven, L. E. and Sternling, C. V., *Nature*, **187** (1960), 186-188.
- (23) 高橋厚史, ながれ, **20** (2001), 92-98.
- (24) Takahashi, K., Nagayama, K. and Asano, T., *Therm. Sci. and Eng.*, **7** (1999), 139-142.
- (25) 高田保之, 日本機械学会 P-SC 297 研究分科会「界面現象の物理」成果報告書(主査 深野徹), (2000), 51-56.
- (26) 井上剛良, 日本機械学会 P-SC 297 研究分科「界面現象の物理」成果報告書(主査 深野徹), (2000), 39-44.
- (27) 脇本辰郎・東恒雄, 機論, **67**-654, B (2001), 412-420.
- (28) 深野徹・稲富晋也, 日本機械学会 P-SC 297 研究分科「界面現象の物理」成果報告書(主査 深野徹), (2000), 79-86.
- (29) 嶋田隆司・小森悟, 機論, **65**-634, B (1999), 2092-2098.
- (30) 佐藤一教・ほか4名, 噴流工学, **17**-1 (2000), 19-28.
- (31) 杉山和靖・高木周・松本洋一郎, 機論, **65**-638, B (1999), 3260-3267.
- (32) Tamura, Y., Sugiyama, K. and Matsumoto, Y., *Proc. of CAV 2001*, (2001), Ses. B 5, 1-8.
- (33) 瀧口智志・梶島岳夫・三宅裕, 機論, **64**-625, B (1998), 2804-2810.
- (34) 梶島岳夫・ほか3名, 機論, **66**-647, B (2000), 1734-1741.
- (35) 齋藤隆之・ほか3名, 機論, **65**-636, B (1999), 2619-2626.
- (36) 荻原良道, 日本機械学会 P-SC 297 研究分科会「界面現象の物理」成果報告書(主査 深野徹), (2000), 103-107.
- (37) Matsuura, K., Kataoka, I. and Serizawa, A., *Proc. of 7th Int. Conf. on Nucl. Eng.*, Tokyo, (1999), 19-23.
- (38) Matsuura, K., Ohtake, H., Kataoka, I. and Serizawa, A., *Proc. of 2nd Japan-Korea Symp. on Nucl. Therm. Hydraulics and Safety*, Fukuoka, (2000), 462-468.