

複雑流体現象の解明とそのモデリング 研究グループ



流体理工学講座 分子流体力学分野

教授 青木 一生, 准教授 高田 滋, 助教 小菅 真吾

1. はじめに

21世紀COEプログラムに関連して平成15–19年度に本分野で行った研究のうち、2件について以下にその概要を述べる。

2. 研究内容

2.1 界面で蒸発・凝縮を伴う流れの研究 自然界における流体现象を理解する上で、境界面で相変化（蒸発、凝縮、昇華）を伴う気体の流れを理解することは、重要な要素の一つである。この流れでは、界面近傍で気体は常に非平衡状態にあるため、分子気体力学（気体分子運動論）による取り扱いが必要となる。本分野では、境界面で蒸発・凝縮を行う気体〔境界を構成する凝縮層（液体・固体）の蒸気、以下では単に蒸気と呼ぶ〕とそれを行わない別種の気体（以下では、非凝縮性気体と呼ぶ）からなる二成分混合気体の挙動の解明を行ってきた。その一例が、蒸気分子の平均自由行程が流れの変化のスケールに比べて無視できる場合（連続流極限）の新しい流体力学の構築である。基礎方程式であるボルツマン方程式とその境界条件をもとに、平均自由行程が小さい場合の系統的漸近解析を行い、このような流体力学の導出を行った。これによると、流体力学の型は、蒸気流中に含まれる非凝縮性気体の量が、(i) 蒸気の量と同程度であるか、(ii) 蒸気の量に比べて非常に小さいか（理論的には無限小量）、によって本質的に異なる。(i) では、蒸発・凝縮の強さが無限小になるにもかかわらず、それが混合気体の温度場や各成分の密度場に有意の影響を与え、それらは初めから蒸発・凝縮を伴わない境界に対するものとは違ったものになる。これは、連続流極限における「幽霊効果」の一例である。(ii) では、非凝縮性気体の平均濃度が無限小であるにもかかわらず、それが凝縮が起こっている界面における厚さ無限小の非平衡領域（クヌードセン層）に集積し、蒸気の大域的流れに大きな影響を与える。ここでは、(ii) の一例を示す。

図1に示すような平面凝縮相（温度 T_{II} ）と正弦波状凝縮相（温度 T_I ）の間の蒸気、非凝縮性気体混合系を考える。 n_I , n_{II} はそれぞれ温度 T_I , T_{II} における蒸気の飽和分子数密度で、平面凝縮相は速さ U_{II} で X_2 方向に動いている。また、 n_{av}^B を非凝縮性気体の平均分子数密度、 Kn を蒸気のクヌードセン数とする。非凝縮性気体の平均濃度がクヌードセン数程度であると、 $n_{av}^B/n_I = \Delta Kn$ と置く。このときの連続流極限（ $Kn \rightarrow 0$ ）における蒸気流の流線を、 $T_{II}/T_I = 1$, $n_{II}/n_I = 2$, $U_{II}/(2kT_I/m^A)^{1/2} = 0.1$ （ m^A は蒸気分子の質量、 k はボルツマン定数）、 $\Delta = 2$ の場合について、図1の実線で示す（ここでは、蒸気分子と非凝縮性気体分子が力学的に同じであるとしている）。破線は初めから非凝縮性気体を含まない純粋蒸気流に対する結果である。連続流極限では、 $n_{av}^B/n_I \rightarrow 0$ 、すなわち非凝縮性気体の平均濃度が無限小になるにもかかわらず、それによって蒸気の流れは大きな影響を受け、純粋蒸気の場合とは異なったものになる。なお、このときの流体力学は、蒸気に対する圧縮性オイラー方程式と凝縮相界面における適切な境界条件からなり、非凝縮性気体の影響は、凝縮が起こっている界面での境界条件にのみ現れる。これらの境界条件は、ボルツマン方程式の緩和型モデルと蒸気分子に対する完全凝縮型境界条件、非凝縮性気体に対する拡散反射型境界条件をもとに数値

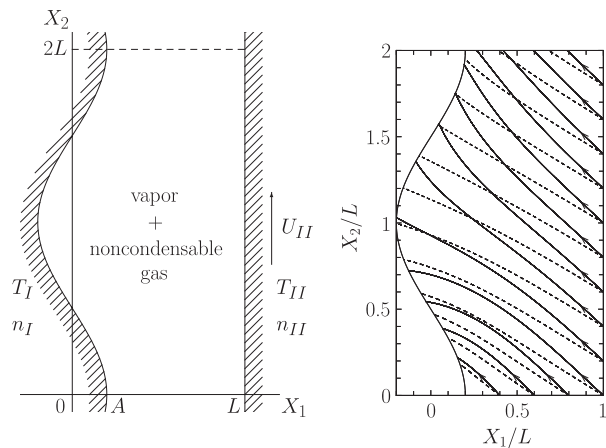


図1: 平面凝縮相から正弦波状凝縮相への蒸気流

的に構築されており、図1はそれらに基づいている。

2.2 ボルツマン方程式による混合気体のすべり流の解析 本分野では、分子気体力学をもとに、低圧気体やマイクロスケールにおける気体などの非平衡気体、とくに混合気体の挙動の解明を行っている。その一つが、気体分子の平均自由行程が流れの変化のスケールに比べて小さい場合（弱希薄気体）の混合気体の振舞を記述する流体力学的方程式とその境界条件の導出である（2.1節の研究もその一環である）。分子気体力学の基礎方程式であるボルツマン方程式とその境界条件をもとに、平均自由行程が小さい場合の系統的漸近解析を行い、このような流体力学的系の導出を行った。流体力学的方程式やその境界条件の型は、考える物理的状況によって異なるが、境界条件を定める問題は、[2.1節の(ii)の場合を除いて]最終的に線形化ボルツマン方程式に対するいくつかの基本的な半無限領域の問題、いわゆるすべり流の問題および温度、圧力の跳びの問題に帰着する。本分野では、二成分混合気体に対する線形化ボルツマン方程式の精密な差分解析法を開発し、上記の境界条件を定める目的で、熱ほふく流、拡散すべり流、せん断すべり流、温度の跳びその他の基礎的な半無限領域問題を解析した。これらの各々は分子気体力学における古典的境界値問題であるが、ボルツマン方程式そのものによる直接的数値解析はこの研究が初めてで、今後の標準となるべき結果を確立した。ここでは、熱ほふく流および拡散すべり流に対する結果の一部を示す。

静止した平板（ $X_1 = 0$ ）に接した半無限領域（ $X_1 > 0$ ）を占める気体Aと気体Bの混合気体を考える。

[問題I]（熱ほふく流）平板の温度はそれに沿って一様な勾配 dT_w/dX_2 をもち、平板から離れた遠方（ $X_1 \rightarrow \infty$ ）では混合気体の圧力と成分濃度は一様である。

[問題II]（拡散すべり流）平板の温度は一様であり、遠方では混合気体の温度、圧力は一様であるが、成分Aの濃度は壁に沿う方向に一様な勾配 dX^A/dX_2 をもつ。

ただし、温度勾配、圧力勾配はともに小さいとする。問題I、IIともに、平板に沿う（ X_2 方向の）混合気体の流れが誘起される。これらの流れは、平板から平均自由行程の数倍程度離れると一様な流れに近づく。この漸近的一様流の速度をそれぞれ v_2^I （問題I）、 v_2^{II} （問題II）とすると、それらは次の形に書ける。

$$v_2^I = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{2kT_0}{m^A} \right)^{1/2} \frac{l_0}{T_0} b_I \frac{dT_w}{dX_2}, \quad v_2^{II} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{2kT_0}{m^A} \right)^{1/2} l_0 b_{II} \frac{dX^A}{dX_2}.$$

ここに、 k はボルツマン定数、 m^A は気体Aの分子質量、 T_0 は各問題の適当に選んだ基準温度（たとえば、問題Iでは $X_2 = 0$ における平板の温度、問題IIでは平板の温度）、 l_0 は温度 T_0 、圧力 p_0 （基準圧力、たとえば遠方における混合気体の圧力）で静止平衡状態にある気体Aの分子の平均自由行程である。剛体球分子気体の場合、 $l_0 = 1/[\sqrt{2}\pi(d^A)^2 n_0] = (2/\sqrt{\pi}\gamma_1)(2kT_0/m^A)^{1/2} p_0^{-1} \mu_0$ 、ここに d^A は気体Aの分子直径、 $n_0 = p_0/kT_0$ 、 $\gamma_1 = 1.270042$ 、 μ_0 は基準状態に対応する粘性係数である。係数 b_I は熱ほふくすべり係数、 b_{II} は拡散すべり係数とよばれ、分子間力のモデル、平板における気体分子の反射則、遠方における気体Aの代表的濃度 X_0^A 、および気体分子の力学的特性（剛体球分子では、質量比 m^B/m^A 、直径比 d^B/d^A 、ここに m^B 、 d^B は気体Bの分子の質量、直径）に依存する。剛体球分子に対する b_I 、 b_{II} を $d^B/d^A = 1$ の場合について図2(a)、(b)に示す。横軸は X_0^A である。問題Iの流れは平板の温度勾配の方向、問題IIの流れは質量の小さい成分の濃度勾配の方向である。 $m^B/m^A = 1$ のとき、 b_I は X_0^A に独立（図の点線）、 b_{II} はゼロとなる。

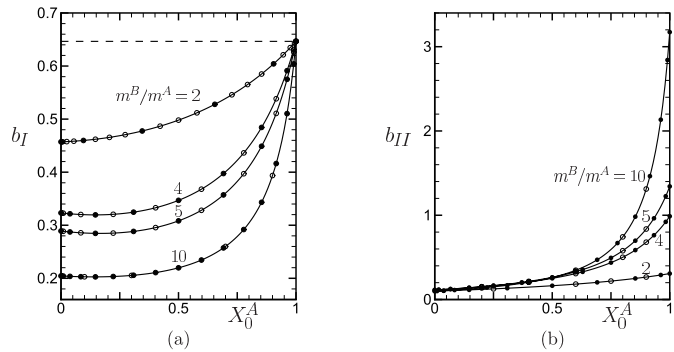


図2: 熱ほふくすべり係数および拡散すべり係数

航空宇宙基礎工学講座 流体力学分野

教授 稲室 隆二, 准教授 大和田 拓, 講師 杉元 宏

1. はじめに

本分野では、宇宙関連技術のマイクロスラスターやマイクロマシン（MEMS）などに見られる微小スケールにおける熱流動や気液二相流，高層大気や真空ポンプのような低圧気体の振る舞い，液晶やコロイドなどの構造的流体の流動現象，あるいは蒸発，凝縮，凝固を伴う地球大気現象などの複雑流に対して，マイクロスケールからのアプローチによりマクロスケールの現象を予測するメゾスケールの複雑混相流体力学の構築を目指して，理論解析，数値シミュレーションならびに小規模実験により研究を行っている。

これまでに実施した研究内容および研究活動の主なものを以下にまとめる。

2. 研究内容

2.1 微小管内を流れる非球形粒子の特異挙動

微小管内を流れる固液二相流は，微小血管内の赤血球の流れや MEMS における粒子輸送などに関連して重要な課題である。本研究では，二相系格子ボルツマン法を用いて，正方形断面のダクト内を流れる流体中に含まれる球形粒子および非球形粒子の挙動の数値解析を行った。本手法では，固体粒子を粘性が大きく界面張力大きい「硬い液滴」で近似して取り扱うのが特徴である。したがって，界面形状の時間変化を陽に追跡する必要がないため，移動境界問題を容易に取り扱うことができる。図 1 に管路幅 D ，長さ L_x のダクト内を流れる両凹円盤粒子の計算結果例を示す。レイノルズ数 $Re = VD/\nu_c = 107$ である。ここで， V はダクト入口における断面平均速度， ν_c は流体の動粘性係数である。両凹円盤粒子が姿勢を変えながらダクト内を流れていることがわかる。さらに，粒子の挙動を調べると，粒子は管軸のまわりをスパイラル軌道を描きながら移動する特異な挙動が明らかになった。なお，球形粒子は管軸中心と管壁の間にある平衡位置に集中して流れる特性（Segré-Silberberg 効果）がある。現在，この球形および非球形粒子の特異な挙動が生じる流体力学的メカニズムの解明を進めている。

2.2 圧縮性流れの気体論的高解像度スキーム これまでに行ってきた分子気体力学の研究成果を基に，圧縮性 Navier-Stokes 方程式の気体論スキームの研究を行った。Boltzmann 方程式の漸近解析が

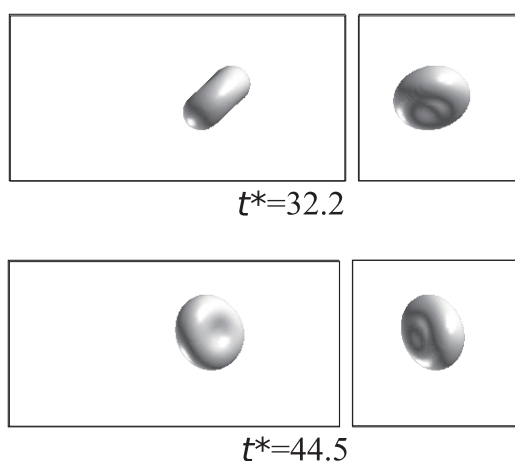


図 1: 正方形ダクト内を流れる両凹円盤粒子の挙動。ダクトの側面から見たもの（左図）およびダクトの軸方向から見たもの（右図）（ $t^* = Vt/L_x$ ）。

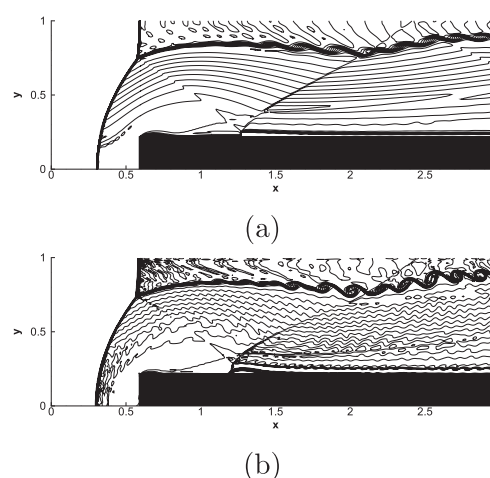


図 2: 高速気流と前面ステップとの干渉問題。(a) 本研究の結果，(b) Colella-Woodward の PPM 法の結果。

ら同流体力学方程式が導かれることが同解法の理論的根拠として認知され、同解法は流体力学を越えた範囲までをカバーする解法と期待され、専門家の間ですら上滑りの議論が行われていたが、本研究によって次のことが明らかになった：i) 同解法は流体力学変数の滑らかな再構成に対しては Lax-Wendroff 的解法と同等である；ii) 気体論を用いる本質的な意義は、衝撃波捕獲の為に流体力学変数の不連続的な再構成に対する数値フラックスの計算に必要な近似 Riemann 解法の複雑な理論が気体論方程式の移流項の線形性によって劇的に簡単化される点（だけ）にある；iii) Navier-Stokes 方程式のレベルまでの同解法の導出には気体論の漸近解析等の専門的な知識は一切必要ない。これより、衝撃波捕獲高解像度スキームという現在の航空宇宙流体の先端的数値解法の理論を流体力学の基礎を学び終えた学部学生にも教育できるようになり、その成果は現在大学院（修士）の教育に還元されている。図 2 は高速気流と前面ステップとの干渉問題における (a) 本研究で開発された気体論スキームの結果と (b) Colella-Woodward の PPM 法の結果（エントロピー分布）である。両者の解法の計算時間はほぼ同じであるが、(a) はより正確な結果を与えている。

2.3 分子気体効果を利用したポンプ・気体濃縮装置の開発

低圧あるいはマイクロ系の気体では、温度場が圧力や流れの場に強い影響を及ぼす。この現象を駆動力とする、運動する部品が不要なポンプの開発を進めた。流路内部の物体の温度差を駆動源とする「熱尖端ポンプ」を考案し、その実証実験および数値解析を行った。このポンプは、従来の Knudsen ポンプにおいて不可欠な流路壁面の温度勾配を必要とせず、エネルギー効率・耐久性の点で有利になる。混合気体に対する数値解析においては、このポンプが気体分離効果を持つこと、例えば、ある気体成分と別の成分がポンプ内部で逆方向に流れること等も明らかになった（図 3）。なお、「熱尖端ポンプ」に関する数値解析の論文に対して、H19 年 11 月に日本真空協会から第 32 回熊谷記念真空科学論文賞が杉元講師に授与された。

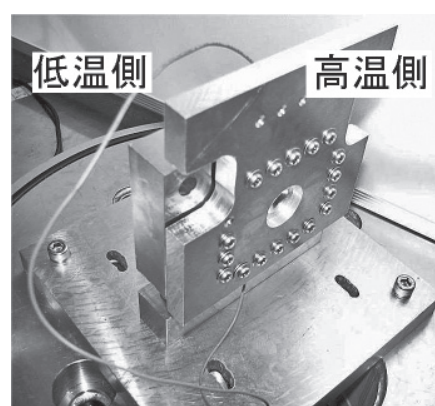


図 3: 熱尖端ポンプの原理確認装置の一つ。高温・低温の金網を並べると、低温側から高温側に気体を通り抜ける。

3. 国際会議

2005 年 8 月 22 日～26 日、京都大学百周年時計台記念館において、「第 14 回流体力学の離散的数値解析に関する国際会議」を COE 主催により開催した。参加者は国内 44 名、国外 48 名（アメリカ 14 名、英国 7 名、スイス 6 名、ドイツ 5 名、オランダ 4 名、イタリア 3 名、カナダ 2 名、ベルギー、中国、香港、フィンランド、イスラエル、シンガポール、ハンガリー各 1 名）で、そのほかに COE 関係の若手研究者や学生十数名が随時講演を聴講した。講演は招待講演 6 件を含む合計 73 件からなり、招待講演者は、土井正男、W. E. 木田重雄、S. Troian、阿部純義、青木一生であった。会議では、マルチスケールモデリング、流体と固体との相互作用、乱流、運動論、二相流、粒子流、血液流、マイクロチャネル、化学反応、複雑流体に対する理論解析および数値解析について活発な討論が行われた。なお、本会議の抜粋論文は、Mathematics and Computers in Simulation **72**, 71–269 (2006) に掲載された。

参考文献

- [1] T. Inamuro, “Lattice Boltzmann methods for viscous fluid flows and for two-phase fluid flows,” Fluid Dynamics Research **38**, 641–659 (2006).
- [2] T. Ohwada and S. Fukata, Simple Derivation of High-Resolution Schemes for Compressible Flows by Kinetic Approach, J. Comp. Phys. **211**, 424–447 (2006).
- [3] H. Sugimoto and Y. Sone, Vacuum pump without a moving part driven by thermal edge flow, in *Rarefied Gas Dynamics*, edited by M. Capitelli (AIP, New York), 168–173 (2005).

航空宇宙基礎工学講座 推進工学分野

教授 斧 高一, 准教授 江利口 浩二, 助教 太田 裕朗

[大阪大学教授 節原 裕一, 京都工芸繊維大学准教授 高橋 和生]

1. はじめに

本研究室は、宇宙機推進の作業媒質である電離気体（プラズマ）および高温気体（反応性気体）に関する基礎研究並びに応用研究を行う分野であり、力学的性質と共に、構成要素である原子分子やイオンの気相中での反応過程、並びに固体表面との相互作用に関する研究にも重点を置いています。実験を主体として数値シミュレーションを併用し、広く先端技術における工学的諸課題も対象としています。具体的には、プラズマ科学、宇宙工学、半導体（MEMSを含む）工学の分野で、研究を展開しています [1]。

21世紀COEプログラム「動的機能機械システムの数理モデルと設計論」では、本研究室の多様な研究内容のうち特に基礎的な部分について、「電離気体（プラズマ）と固体表面が混在する系における“電離気体と固体表面との相互作用に関するモデリングと現象解明”」という課題のもと研究活動を行っています。“相互作用”は力学ならびに物性を含み、対象とする系は気体と固体、場合によっては液体の相を含みます。またその空間スケールは、ナノメートル (10^{-9} m) からメートル (10^1 m) までと極めて広く、時間スケールも、ピコ秒 (10^{-12} s) から時間 (10^4 s) までと極めて広い範囲にわたります。

2. 電離気体と固体表面との相互作用に関するモデリングと現象解明

2.1 プラズマと接した固体表面における“表面・界面の電荷蓄積と、その薄膜表面界面物性への影響に関する研究”

プラズマと固体表面との相互作用による表面・界面の電荷蓄積や変質／損傷は、プラズマを用いる材料プロセス・ナノテクノロジーとともに、宇宙機の航行においても重要です。本研究では、プラズマ微細加工（プラズマエッチング）における潜在的課題“プラズマにより誘起される機能素子（半導体、MEMS）の電気的信頼性劣化（プラズマダメージ）”に着目し、表面・界面の物性と電気特性両面から、欠陥層（表面・界面変質層）形成機構の解明に取り組みました [2]。光学的手法としてエリプソ分光と変調反射率分光（PRS）を活用し、表面・界面における光励起キャリアと熱励起キャリアの輸送過程のモデリングにより、プラズマ加工処理においてシリコン半導体デバイス表面に誘起される欠陥面密度および欠陥生成確率を定量化する手法を確立しました。その結果、プラズマ条件／状態に依存する表面・界面変質層の構造変化（膜厚、ひずみ量）が明らかになり、プラズマによる欠陥生成確率が、基板ステージに印加される実効的自己バイアス電圧に依存することを実験的に見出しました [3]。

2.2 プラズマと接した固体表面における“プラズマと表面微細構造との相互作用に関する研究”

プラズマ材料プロセス（微細加工や薄膜形成）では、プラズマから基板表面に到達した粒子は、さらにマイクロ～ナノメートルサイズの微細パターン内を輸送されて微細構造内の表面に到達し、種々の物理的・化学的表面過程を経てプロセスが進展します。本研究では、シリコンのプラズマエッチング加工について、微細構造内でのプラズマ粒子（イオン、電子、中性ラジカル）の輸送と表面反応・表面電荷蓄積過程、およびプロセスによる微細構造内の表面反応層と形状変化について、モデリングとプロセス実験、およびプラズマ・表面診断／計測によって機構解明を進めました。モデリングでは、ナノメートルサイズの微細構造（トレンチ／溝、ホール／孔）内の粒子輸送をモンテカルロ法で取り扱い、表面過程を基板表面の原子スケールセル内での反応として取り扱う新しい原子スケール加工形状進展シミュレーションモデルを構築し [4-6]、実験と比較することにより、パターン側壁でのイオン散乱の効果などの機構解明とともに、モデルが次世代ナノスケール加工にまで適用できることを示しました（図1）。またプロセス実験では、これまで難しいとされた金属酸化物のエッチング加工を可能にする新しいエッチング反応機構を見出すとともに [7-10]、エッチング中の基板表面状態をフーリエ変換赤

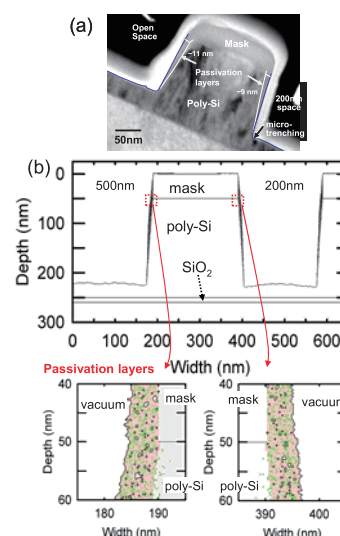


図 1. (a) Cl_2/O_2 プラズマによる多結晶 Si (Poly-Si) のエッチング加工形状と、(b) 加工形状シミュレーション

外 (FTIR)・高感度反射吸収分光法 (RAS) を用いてその場観察する手法を開発しました。

2.3 固体壁に囲まれた微小空間における“微小プラズマの生成・維持機構とプラズマの微視的構造および流れ場に関する研究”

ミリ〜マイクロメートルサイズの微小プラズマは、プラズマと固体壁との相互作用が顕著で、プラズマの物性や力学的挙動は、大口径プラズマと比較して複雑です。本研究では、次世代超小型衛星 (ナノサテライト, <10 kg) の軌道・姿勢制御に不可欠な超小型電気推進機 (マイクロプラズマスラスター) について、表面波励起プラズマを用いたミリメートルサイズの新しい推進機構を提案し、マイクロ波伝播と微小プラズマの生成・維持、微小ノズルによる超音速流形成、およびプラズマと流れ場の微視的構造 (表面波電磁場の微細構造、流れ境界層の発達と粘性散逸) に関し、モデリング [11] と実験 [12,13] によって現象解明を進めました。さらに、振子式とターゲット式を組み合わせた新しい微小推力測定法 (<1 mN) を構築して推力測定を行い、マイクロ波電力 $P_m=6$ W で、推力 $F_t \approx 1.2$ mN, 比推力 $I_{sp} \approx 80$ s, 推進効率 $\eta_t \approx 8.7\%$ を得て (図2), ナノサテライトに適用できることを示しました [13,14]。

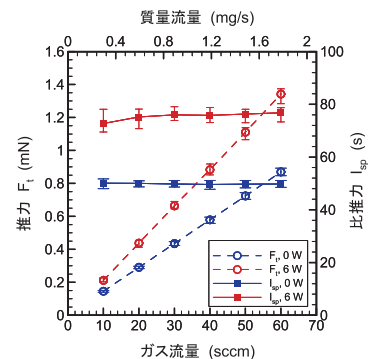


図 2. マイクロプラズマスラスターの推力と比推力の測定結果

3. おわりに

本研究室は、(1)プラズマ・イオン源、(2)プラズマ基礎、(3)プラズマ・ビームプロセス技術、(4)プラズマプロセス基礎、(5)マイクロ・ナノテクノロジーの分野で、複数の基礎的・応用的研究を進めています。応用面のターゲットは、半導体を中心とした薄膜プロセス (微細加工、成膜) [2-10], プロセス用プラズマ源、および宇宙電気推進 [11-14] であり、産官学連携にも積極的に取り組んでいます。また、平成19年3月に、京都大学 (本21世紀COEプログラム) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の共同主催で「航空宇宙マイクロ・ナノ工学ワークショップ」を開催し、最近、特に米国と欧州を中心に進展の著しい航空宇宙とマイクロ・ナノの融合領域の研究に関して議論を深めました [15]。

参考文献

- [1] 21世紀COEプログラム「動的機能機械システムの数理モデルと設計論」平成15年度 年次報告 (2004); 平成16年度 年次報告書 (2005); 平成17年度 年次報告書 (2006); 平成18年度 年次報告書 (2007).
- [2] K. Eriguchi and K. Ono: "Quantitative and comparative characterizations of plasma process-induced damage in advanced metal-oxide-semiconductor devices, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, to be published.
- [3] K. Eriguchi, A. Ohno, D. Hamada, M. Kamei, and K. Ono: "Estimation of defect generation probability in thin Si surface damaged layer during plasma processing", *Thin Solid Films*, to be published.
- [4] Y. Osano and K. Ono: "An Atomic Scale Model of Multilayer Surface Reactions and the Feature Profile Evolution during Plasma Etching", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, Part 1, No. 12 (2005), pp. 8650-8660.
- [5] Y. Osano, M. Mori, N. Itabashi, K. Takahashi, K. Eriguchi, and K. Ono: "A Model Analysis of Feature Profile Evolution and Microscopic Uniformity during Polysilicon Gate Etching in Cl_2/O_2 plasmas", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, No. 10B (2006), pp. 8157-8162.
- [6] H. Fukumoto, K. Eriguchi, and K. Ono: "Geometrical Effects on Etching Profile Evolution", *AVS 54th International Symposium, Seattle, October 2007* (AVS, 2007), Paper PS1-ThM6.
- [7] K. Takahashi and K. Ono: "Selective etching of high- k HfO_2 films over Si in hydrogen-added fluorocarbon ($CF_4/Ar/H_2$ and $C_4F_8/Ar/H_2$) plasmas", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 24, No. 3 (2006), pp. 437-443.
- [8] T. Kitagawa, K. Nakamura, K. Osari, K. Takahashi, K. Ono, M. Oosawa, S. Hasaka, and M. Inoue: "Etching of High- k Dielectric HfO_2 Films in BCl_3 -Containing Plasmas Enhanced with O_2 Addition", *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, Vol. 45, Part 2, No. 10 (2006), pp. L297-L300.
- [9] K. Nakamura, T. Kitagawa, K. Osari, K. Takahashi, and K. Ono: "Plasma etching of high- k and metal gate materials", *Vacuum*, Vol. 80 (2006), pp. 761-767.
- [10] 斧高一, 江利口浩二: "高誘電体/電極材料エッチング技術", 2007 半導体テクノロジー大全, 月刊 *Electronic Journal* 別冊 (電子ジャーナル社, 2007), 第4編, 第4章, 第4節, pp. 296-301.
- [11] Y. Takao and K. Ono: "Miniature electrothermal thruster using microwave-excited plasmas: A numerical design consideration", *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 15, No. 2 (2006), pp. 211-227.
- [12] Y. Takao, K. Ono, K. Takahashi, and K. Eriguchi: "Plasma Diagnostics and Thrust Performance Analysis of a Microwave-Excited Microplasma Thruster", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, Part 1, No. 10B (2006), pp. 8235-8240.
- [13] Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "A miniature electrothermal thruster using microwave-excited microplasmas: Thrust measurement and its comparison with numerical analysis", *J. Appl. Phys.*, Vol. 101, No. 12 (2007), pp. 123307-1~10.
- [14] 斧高一, 鷹尾祥典: "マイクロプラズマスラスター", 応用物理, 第76巻, 第4号 (2007), pp. 394-398.
- [15] *Workshop on Micro- and Nano-Engineering for Aerospace Systems, Kyoto, March, 2007* (organized by K. Ono; sponsored by Kyoto University (21st Century COE Program), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)).

流体理工学講座 流体物理学分野

教授 木田 重雄, 准教授 花崎 秀史, 助教 後藤 晋

乱流や回転, 成層流といった複雑な流れの根本的な理解とその応用を目的として, 理論解析, 数値シミュレーションとその可視解析, さらに室内実験などを進めてきた. 以下は本グループの本21世紀COEプログラムによる援助に基づく研究活動の報告である.

1. 研究内容

乱流混合 [1] 乱流は強い混合を産み出す. この強い混合の起源を理解し, その予測や制御の基礎を確立することが大きな目標である. ところで, 混合は物質塊の引き伸ばしと折り畳みの繰り返しによる. そこで我々は発達した乱流中で流体の二つの部分の境界面がどのように引き伸ばされ折り畳まれるかの詳細を, 大規模数値シミュレーションにより調べた. その結果, 物質塊の引き伸ばしには乱流中の最小スケールの渦からの寄与が支配的であるが, その折り畳みには考えている物質塊の大きさよりも小さいスケールのすべての渦運動が寄与することが明らかとなった. 乱流中には秩序立った渦の階層構造が存在し, しかもレイノルズ数が大きくなるとともにこれらの階層間のスケールの分離が大きくなる. したがって, レイノルズ数の増大とともに物質塊の折り畳みの効率がよくなり, 結果として混合がより促進されるのである.

二重拡散系の成層乱流中の熱・塩分輸送 [2] 海洋は, 基本的に熱と塩分によって安定成層が形成されており, その熱塩循環における熱と塩分の二重拡散の効果は重要である. 近年, 熱や塩分の乱流拡散係数は, 海洋大循環に大きな影響を与えることが知られており, 成層乱流における二重拡散の効果は, 海洋分野でも最重要課題の一つとなっている. 本テーマでは, 二重拡散系の成層乱流中の熱・塩分輸送を数値シミュレーションと理論 (rapid distortion theory) により解析し, 成層流体によって運ばれる媒体が, 流体運動に影響を与えないパッシブスカラーの場合と, 浮力を持つことにより流体運動に影響を与えるアクティブスカラーの場合の違いを解析している. 今年度は, 速度乱れを渦成分と波動成分に分解した時, アクティブスカラーが持つポテンシャルエネルギーと波動成分とのやりとりの重要性を明らかにした.

成層流体中の球の鉛直運動 塩分成層流体中を物体が鉛直移動する時の流れの可視化実験をシャドウグラフィ法により行い, 後流構造のフルード数 (成層の強さ) とレイノルズ数依存性を研究している. こうした系については, 従来殆ど研究例がないが, 海洋観測ブイや海洋プランクトンの鉛直移動に強く関連する現象である. 球に対する可視化実験の結果, 浮力効果により物体後流に鉛直ジェットが現れること, そのパターンは大きく分けて6種類あり, 例えば, ジェットの途中に帽子状の構造が現れたり, ジェットが蛇行して螺旋構造をとったりすることがわかった. また, 可視化実験の結果から軸対称性があると思われる場合について, 数値シミュレーションを行い, その結果, 上記の帽子の成因は成層流体に特有の内部重力波にあることが明らかになった.

歳差球体を用いた乱流実験装置 [3] 歳差運動する容器内には容易に乱流状態が生成されることに注目し, 新しいタイプの乱流実験装置を提案した. 我々は歳差運動する容器としてもっとも単純な球状容器を用いた室内実験を行った. 粒子画像流速測定により球体内の流れを調べた結果, 自転角速度と球体の半径および流体の動粘性係数に基づくレイノルズ数が約3000以上であれば, 歳差角速度が自転角速度のわずか数%であっても十分に発達した乱流が球体内に維持されることが示された. この系は, そのコントロールパラメタの制御が容易でかつ精確であるので, 流れの状態の再現性が極めて高いという特長をもっている. 並行して, 室内実験とまったく同一の条件下での数値シミュレーションも行なっている. 定常流が一般に, さまざまに捩れたトーラス状の流線とカオティックな流線からできていること, その構造がコントロールパラメタに依存して質的に変化すること, 等を発見し, また定常流から非定常流へ変化する安定特性を求めた. さらに, 漸

近解析により振れた流線トーラス構造の解析解を得た。

慣性粒子のクラスタリング [4] 乱流は物質を拡散するだけでなく、物質どうしを凝集させる作用も併せもつ。この性質は乱流の作用により、粒子間の衝突頻度が上昇することを意味し、様々なシステムで無視できない効果をもたらす。我々は発達した乱流中に浮遊する重い微小粒子（慣性粒子）群の挙動を数値シミュレーションにより調べた。その結果（従来よりよく知られる通り）統計的に一様な乱流中であっても粒子群がクラスタを形成することが確かめられた。しかも、発達した乱流中では（従来までの理解とは異なり）乱流中に自己相似に存在する渦の階層構造が同時にクラスタリングに寄与していることを発見した。このことにより、たとえば雲中での雨滴の成長過程のモデルなどにも本質的な変更が必要となることが示唆される。さらに、粒子群のクラスタ構造は流体の加速度が慣性粒子群の収縮方向と直交する点の集合（曲面をなす）によりよく説明されることも示した。

不安定周期流解析 クエット系で乱流の特徴的な時空間構造をよく表す不安定周期流を用いて、パッシブ線素の伸張率や方向分布を統計的に振る舞いを解析している。不安定周期流はその再現性から、パッシブ線素のサンプル数を計算時間に比例して増やし統計精度を高めることができるという特長がある。これまでに、方向が異なる線素を同じ位置から出発させるとその方向が急速にそろってくることを示した。このことから、パッシブ線素の方向場は初期条件によらず流れ場に対応して一意に決まると考えられる。そこで、不安定周期流に対応する方向場を作ることを試みた。流れ場を多数の小立方体に区切り、各立方体に入った多数の線素から方向の時空間場を求めた。その結果、クエット系に特有な渦構造の内部で線素の方向がそろい、その周辺では方向にばらつきがあるなど、流れとパッシブ線素の方向場の強い相関が明らかとなった。このばらつきの大きさの時空間場と乱流混合の関係は興味深い課題である。

2. 国際交流

2.1 海外派遣 本21世紀COEプログラムの援助を得て、花崎は、平成19年6月25日～6月28日にポルトで開催された第11回欧州乱流会議および11月18日～20日にソルトレークシティで開催された第60回米国物理学会流体力学部門年会で研究発表講演を行った。また、後藤は平成17年6月25日～28日までポルトで開催された第11回欧州乱流会議に出席し研究発表講演を行ったのち、7月8日までロンドンのインペリアルカレッジに滞在し Prof. J. C. Vassilicos との共同研究を行った。

2.2 招聘 平成19年12月18日～19日に、フランス高等師範学校の Dr. M. Farge に “Wavelet transformation and their applications to turbulence” と題する集中講義、また同17日に同氏による講演 “Extraction of coherent structures using wavelets: applications to turbulence in fluids and plasmas” をして頂いた。

参考文献

- [1] S. Goto and S. Kida, Reynolds-number dependence of line and surface stretching in turbulence: folding effects, *J. Fluid Mech.* **586** (2007) 59-81.
- [2] H. Hanazaki and K. Konishi, Differential diffusion in double-diffusive stratified turbulence, *Advances in Turbulence XI*, Springer, 615-617.
- [3] S. Goto, N. Ishii, S. Kida and M. Nishioka, Turbulence generator using a precessing sphere, *Phys. Fluids* **19** (2007) 061705; S. Kida, K. Nakayama and N. Honda: Streamline tori in a precessing sphere at small Reynolds numbers. *Fluid Dyn. Res.* (2008) in press.
- [4] H. Yoshimoto and S. Goto, Self-similar clustering of inertial particles in homogeneous turbulence, *J. Fluid Mech.* **577** (2007) 275-286; S. Goto and J.C. Vassilicos, Sweep-stick mechanism of heavy particle clustering in fluid turbulence, *Phys. Rev. Lett.* (2008) in press.

流体理工学講座 環境熱流体工学分野

教授 小森 悟, 准教授 黒瀬 良一, 助教 伊藤 靖仁

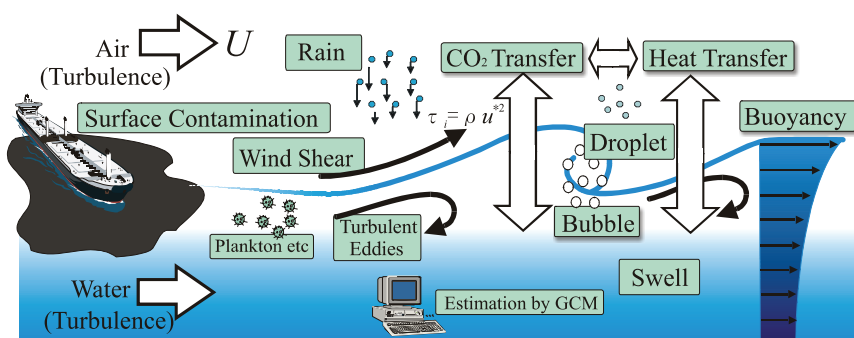
[名古屋大学准教授 長田 孝二]

1. はじめに

大気・海洋間での物質および熱の交換量の正確な評価を行うためには, 大気乱流場や海洋乱流場に現れる種々の輸送現象の一つ一つを基礎実験を通して解明するとともに, それらの乱流輸送現象を実験的知見に基づき忠実に表現する物理モデルを構築していくことが必要である. そこで本研究室では, 大気・海洋間での物質と熱の交換機構の解明とそのモデル化を目的として, 大型の大気・海洋シミュレーション風洞水槽装置や開水路実験装置を用いて, 大気・海洋間の物質および熱の輸送を支配する各種因子の影響を明らかにすることをめざしてきた.

2. 研究の背景

人類による化石燃料の莫大な消費に伴って発生する炭酸ガス(CO₂)等の温暖化物質による地球の温暖化が深刻な問題として取り上げられるようになって以来, 地球の温暖化予測を正確に行うことが緊急の課題とされている. この温暖化予測には, 大気および海洋の乱流中に現れる物質, 熱, 運動量の輸送現象に関連した数多くのサブモデルから構成される大気海洋大循環モデル(GCM: General Circulation Model)が使用されている. ところが, 既往の気候モデルに使用されている個々の物理的サブモデルの妥当性が十分に検討されていないため, 熱および物質循環の予測に大きな誤差が発生することが危惧されている. 大気・海洋間の物質と熱の交換速度は, 図に示すように種々の因子に影響されるものであり, サブモデルがこれらの効果を正確に表していなければ大気海洋間での正確な交換量を見積もることはできない. これらの点を考え, 本研究室では過去5年間おもに以下の研究を行ってきた.



大気海洋間の物質移動に影響を及ぼす諸因子

大気海洋間の物質移動に関連した数多くのサブモデルから構成される大気海洋大循環モデル(GCM: General Circulation Model)が使用されている. ところが, 既往の気候モデルに使用されている個々の物理的サブモデルの妥当性が十分に検討されていないため, 熱および物質循環の予測に大きな誤差が発生することが危惧されている. 大気・海洋間の物質と熱の交換速度は, 図に示すように種々の因子に影響されるものであり, サブモデルがこれらの効果を正確に表していなければ大気海洋間での正確な交換量を見積もることはできない. これらの点を考え, 本研究室では過去5年間おもに以下の研究を行ってきた.

3. おもな研究内容

3.1 風波気液界面を通してのスカラー輸送機構の解明 大気海洋間の物質と熱の輸送に影響を及ぼす重要な因子として, 海面上に働くウインドシアがある. 従来の研究では, 海面上10mの位置における風速で物質移動速度と熱移動速度を相関する方法がとられてきた. しかし, 本研究室での研究により風波気液界面下に発生する表面更新渦が物質および熱移動を支配し, その表面更新渦の発生周波数が一樣流速により相関されることが明らかにされ, その結果, 物質および熱移動速度が吹走距離や風波水槽のサイズにかかわらず一樣流速で良好に相関されることを示すに至った[1, 2, 3].

さらに, 大気海洋間の物質と熱の輸送に影響を及ぼす1つの因子として, うねりが挙げられる. そこで本研究では, 大型の風波水槽において液流側から気流側へと二酸化炭素を放散させる物質移動実験を行い, うねりが風波乱流場での物質移動に及ぼす影響を調べた. その結果, うねりが風波乱流場での物質移動を抑制することが明らかになった[4]. また, この理由は, うねりを伴う場合には気液界面に作用する抗力は増大するものの圧力抗力が増大する, 気液界面を通しての物質輸送を支配する摩擦応力は逆に減少するためであることを, スーパーコンピュータを用いた三次元直接数値シミュレーションにより明らかにした[5]. さらに, 高風速域で見られる砕波に伴う飛散液滴や巻き込み気泡が, 海水面を通しての物質輸送に及ぼす影響を定量的に評

価した結果、これらの気泡や液滴が物質移動に及ぼす影響は、極めて小さなことが明らかになった[6, 7].

また本研究では、蒸発を伴う単一液滴内外部の流れに DNS を適用することにより、液滴(水)と気体(空気)の間の熱と物質の移動に及ぼす相対湿度の影響について検討を行った。その結果、空気温度が液滴温度よりも高い条件下では、液滴内部流の温度は、気体の相対湿度が低い場合には下降するが、高い場合には逆に上昇することがわかった。これは、液滴表面における蒸発熱と対流熱との収支バランスに起因することが示された。また、相対湿度の増加に伴い、液滴表面近傍における水蒸気濃度の増加するため液滴表面近傍気側のシャーウッド数は低下するが、液滴近傍における気流の熱拡散率が上昇するためヌセルト数は増大することを明らかにした。さらに、風波乱流場における気液界面を通しての熱移動に対する飛散液滴の寄与も、無視できるほど小さいことを明らかにした。

3.2 気液界面を通しての物質交換に及ぼす降雨の影響 降雨が気液界面を通しての物質交換速度に及ぼす影響を解明するため、開水路気液界面上に降雨装置を用いて雨を降らせ、気液界面を通しての物質の交換速度を測定する実験を行った。その結果、降雨は気液界面を通しての物質交換を著しく促進させることが明らかになった。また、降雨の衝突に伴う気液界面を通しての物質交換速度を決定づける最適パラメータは、従来用いられてきた降雨の運動エネルギーフラックスではなく、運動量フラックスであることを明らかにした[8]。さらに、実験結果と全球規模での降雨量などのデータベースを用いて、全球規模における大気海洋間での熱物質輸送に及ぼす降雨の影響を評価した。その結果、大気・海洋間における二酸化炭素および熱の交換に及ぼす降雨の影響は、風の影響に比べて、海洋全体または長期的には無視できるほど小さいが、局所的かつ短期的にはかなり大きくなる場合があることが明らかとなった[9]。

4. 国際交流および講演会等

派遣等 研究室スタッフおよび博士後期課程学生が、ケンブリッジ大学、コロンビア大学、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、カリフォルニア大学ロサンゼルス校を訪問し、研究討論を行った。

講演会 スタンフォード大学助教授、カリフォルニア大学サンタバーバラ校教授、中国科学アカデミー教授、中国海洋大学教授による講演会を主催した。

引用文献

- [1] 丹野賢二, 大坪周平, 小森 悟, 風波気液界面を通しての物質移動に及ぼす吹送距離の影響, 日本機械学会論文集(B編), 70 巻 731 号, pp.1510-1517 (2007).
- [2] 大坪周平, 小森 悟, 風波気液界面を通しての熱輸送と界面近傍の乱流構造との関連性, 日本機械学会論文集(B編), 74 巻 737 号, pp.149-155 (2008)
- [3] D. Zhao, Y. Toba, Y. Suzuki and S. Komori, Effect of Wind Waves on Air-Sea Gas Exchange: Proposal of an Overall CO₂ Transfer Velocity Formula as a Function of Breaking-Wave Parameter, *Tellus B*, Vol. 55, pp. 478-487 (2003).
- [4] 丹野賢二, 小森 悟, 風波気液界面近傍の乱流構造と物質移動に及ぼすうねりの影響, 日本機械学会論文集 (B編) 70 巻 691 号 pp.644-649 (2004).
- [5] 今城孝徳, 長田孝二, 小森 悟, 波状壁面上の乱流構造と抗力に及ぼすうねりの影響, 日本機械学会論文集(B編), 70 巻 706 号 pp.1504-1510 (2005).
- [6] K. Sugioka and S. Komori, Drag and lift forces acting on a spherical water droplet in homogeneous linear shear air flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 570, pp.155-175 (2007).
- [7] D. Zhao, Y. Toba, K. Sugioka and S. Komori, New sea spray generation function for spume droplets, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, C02007 (2006).
- [8] N. Takagaki and S. Komori, Effects of rainfall on mass transfer across the air-water interface, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, C06006 (2007).
- [9] S. Komori, N. Takagaki, R. Saiki, N. Suzuki and K. Tanno, The Effects of Raindrops on Interfacial Turbulence and Air-Water Gas Transfer, *Transport at the Air Sea Interface-Measurements, Models and Parameterizations*, Springer Verlag, eds. C. S. Garbe, R. A. Handler & B. Jahne, pp.169-180 (2007).

航空宇宙基礎工学講座 流体数理学分野

教授 永田 雅人, 助教 野口 尚史

[大阪大学教授 河原 源太, 関西大学講師 板野 智昭]

1. はじめに

宇宙・地球環境に占める流体の運動によって引き起こされる諸物質の輸送・混合特性を的確に把握するには、流体自身の回転(惑星の自転によるコリオリ力)や成層の効果を正確に知る必要がある。一般に、層流(基本流)の速度が増加するにともない基本流は安定性を失い、2次流れ、3次流れへと分岐をくり返しながら乱流に遷移して行く。本研究室では層流から乱流への遷移過程を動的機能メカニカル・システムとして捉え、その過程における現象の解明に取り組んでいる。以下に平成15-19年度に行われた代表的な研究を2例挙げる。

2. 研究内容

2.1 回転・非回転平面クエット流

最も基本的な壁面剪断流のひとつである平面クエット流に対して、流れの不安定化と乱流遷移および乱流中の秩序構造の解明を目指す研究を行っている。平面クエット流は最も簡単な速度プロファイルをもつ剪断流であるが、その乱流への遷移については依然として不明な点が多い。それは、線形安定性理論に基づく解析によれば、平面クエット流の基本層流解が任意の有限レイノルズ数において安定であるためである。しかしながら、系をスパン方向の軸まわりに回転させると、流れの線形安定性は大きく変化することが知られている。実際、回転平面クエット流では回転率の増加にともない、流れ方向に依存しない渦列をともなう2次元定常解(縦渦解)が層流解から超臨界分岐し、さらにこの縦渦解から3次元定常解(波状縦渦解)が分岐する。また、この波状縦渦解からのホップ分岐によって周期解が現われることが示されている。この振動不安定で分岐する周期解のひとつを直接数値シミュレーションあるいはニュートン法によって数値的に求め、系の回転率およびレイノルズ数を変化させながら追跡した。その結果、この周期解は波状縦渦解からのホップ分岐によって現れるとともに、他方ではホップ分岐点とは異なる回転率において流れ方向に一樣な縦渦解からのホモクリニック分岐によっても生成されることを明らかにした。さらに、回転率をゼロに近づけながら周期解を追跡することで、この解が非回転状態においても存在することを明らかにした。これらの理論結果の実験観測による裏付けがストックホルム王立工科大学との共同研究によってなされた。以上の成果はIUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition and Finite Amplitude Solutions (9-11 August, 2004) で発表された。また、フランス力学学会(18th Congres Francais de Mecanique, 27-31 August, 2007)においてPlenary Lecture として基調講演された。

参考文献

- [1] Nagata, M., Kawahara, G., Itano, T., Wall, D. P., Mitsumoji, T & Nakamura, R. (2005) 'Nonlinear Solutions of Simple Plane Shear Layers with and without a System Rotation', in *Fluid Mechanics and its Applications*. Proceedings of the IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition and Finite Amplitude Solutions Vol.77, pp.51-69, Springer
- [2] Hiwatashi, K., Alfredsson, P. H., Tillmark, N. & Nagata, M. (2007) 'Experimental observations of instabilities in rotating plane Couette flow', *Physics of Fluids*, Vol.19, 048103-1-3.

2.2 回転平面ポアズイユ流 子午線に沿って赤道を横切る流れの応用として、流れ方向に回転軸をもつ回転平面ポアズイユ流について、流れの分岐解析と解の安定性解析を行った。線形解析の結果、系の回転が遅い場合には回転がない場合と同様 2 次元構造の横渦擾乱に対して流れは不安定になるが、回転の影響が強くなると回転のない場合よりかなり低いレイノルズ数領域で 3 次元構造の擾乱に対して流れが不安定になることをつき止めた。この事実は一般のチャンネル流が有名なスクワイアーの定理によって 2 次元の擾乱に対して不安定になる場合は特異であり、ごくわずかな系の回転を加えるだけでこの定理が成り立たなくなることを示した点が高く評価されている。非線形解析では、基本流から 2 次流れとして分岐する 3 次元の渦構造を持つ流れを

数値的に求めることができた。この流れは、主流方向に位相速度をもつ伝播波であり、回転の影響によりスパン方向に平均流を生成していることがわかった。スパン方向の平均流はこれまで直接数値シミュレーションで確認されているものの、その起源については不明であり、当研究の分岐解析によりはじめて解明された。この研究成果は 欧州乱流学会 (11th European Turbulence Conference, 25-28 June, 2007) で発表された。また、*Journal of Fluid Mechanics* に受理され近々掲載される予定である。

参考文献

[3] Masuda, S., Fukuda, S. & Nagata, M. (2007) ‘Instabilities of plane Poiseuille flow with a streamwise system rotation’, *Journal of Fluid Mechanics*, Accepted.

3. 国際交流

3.1 招聘 COE の経費により、平成15年度に F.H.Busse 名誉教授 (Bayreuth 大学), S.C.Generalis 博士 (Aston 大学), A.Pinelli 博士 (CIEMAT Spanish Centre for Energy,), 平成16年度に W.Koch 博士 (DLR Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Göttingen), 平成17年度に A.Bottaro 教授 (Genova 大学), P.Huerre 教授 (Ecole Polytechnique, Diderot), 平成18年度に T. Mullin 教授 (Manchester 大学), F. Marques 教授 (Universitat Politècnica de Catalunya), 平成19年度に J.Wylie 教授 (香港城市大学), R.R.Kerswell 教授 (Bristol 大学) を招聘し、研究協力を行った。また、平成18年度日本学術振興会外国人研究者(短期)事業により、S. Generalis 博士 (Aston 大学) を招聘し、共同研究を行った。

3.2 派遣 COE の経費により、平成 17 年度と 18 年度の 2 回にわたり博士課程学年の樋渡一晃がスウェーデンのストックホルム王立工科大学を訪れ、回転平面クエット系における流れの遷移に関する実験観測を行い、上記研究内容 2.1 のに貢献した。また、永田雅人は平成18年度に連合王国 EPSRC (Engineering and Physical Research Council) の研究補助金により、連合王国バーミンガム市のアストン大学に招聘され、S. Generalis 博士との共同研究に従事した。永田雅人はさらに平成 18 年度にイタリアのジェノヴァ大学、香港城市大学、平成 19 年度にフランスの Ecole Polytechnique から招聘され、それぞれ、A. Bottaro 教授、J.Wylie 教授、P.Huerre 教授との研究協力、および研究拠点形成のための準備を行った。

国際会議

永田雅人は平成 18 年 9 月 3 日～9 月 5 日にかけ連合王国バーミンガム大学において、The Kyoto - Birmingham University International Symposium on Recent Advances in Fluid Mechanics を、バーミンガム大学数学科の J.R. Blake 教授と共にオーガナイズし、COE とバーミンガム大学の共催により開催した。講演者は、京都大学から 15 名、バーミンガム大学から 9 名、バーミンガム大学以外の連合王国の大学から 6 名、イタリアから 1 名にのぼり、活発な議論が繰り広げられた。シンポジウムの開催中、ポスターセッションも設けられ、バーミンガム大学数学科の Ph.D. コースの学生、および京都大学博士課程の学生の研究テーマが紹介された。

機械材料力学講座 熱材料力学分野

教授 中部 主敬, 助教 巽 和也

1. はじめに

本研究分野では噴流や管内流などの熱流動場を対象に、熱流体の混合と反応を伴う熱・物質移動現象に関する機構分析を行い、それらの現象を制御して機械工学的応用を図るための方策を探る基礎的研究を行っています。また、ポンプ、コンプレッサ、攪拌器などの流体機械や熱機関、燃料改質器、熱交換器などのエネルギー機器における要素技術の高度化・高性能化、あるいは、高度医療技術への展開も指向した超小型熱流体デバイス開発などに関する応用研究も行っています。具体的な研究内容は、(1) マイクロデバイス創製のための熱伝導・熱流動解析と計測、(2) 固体-流体界面における熱移動量の評価と制御技術、(3) 変形を伴う固体-流体間輸送現象の連成解析、(4) 熱流体混合の促進とアクティブ制御、(5) 小型エネルギー機器、多段式改質器の特性評価と最適設計、の5項目に大別できます。本学機械系の21世紀COEプログラム「動的機能機械システムの数理モデルと設計論ー複雑系の科学による機械工学の新たな展開ー」の拠点形成活動として、著者らは、他大学からの異動に伴って一昨度から参入し、主として、項目(4)の研究テーマの1つである「脈動噴流群の混合・燃焼特性」、ならびに、項目(5)の1つである「アルコール系燃料を用いた多段式改質」の複雑系に関する研究活動を行っています。以下ではその2つに関する概略を示します。

2. 脈動噴流群の混合・燃焼特性

2.1 目的 低レイノルズ (Re) 数域の小寸法噴流に対して周期的に層流-乱流間遷移を行う脈動噴流を隣接させる場合について、その噴流群の混合特性、燃焼特性を調べる^[1,2]。

2.2 実験装置 図1に示すように、3本の噴流ノズルを一列に並べ、両側のノズルからは空気噴流を1Hz程度で周期的に脈動させながら噴出させる。脈動噴流速度は Re 数に換算した時間平均値の1,500を中心に、0から乱流域を跨ぐ値まで調整可能である。一方、中央のノズルからは非燃焼時に空気あるいは不活性ガスを、燃焼時にメタンを定常的に両側噴流と同じ Re 数で噴出させる。噴流速度はLDVを用い、噴流に混入した公称粒径 $1\mu\text{m}$ の粒子からの散乱光を利用して2成分同時に測定される。噴流気体の密度が異なる場合についてはシュリーレン法による可視化実験も行い、噴流群の流動パターンを時間的に記録して考察を加えた。

2.3 結果と考察 図2に両側の噴流が脈動する噴流列の場合の主流方向および半径方向の時間平均速度 U および V を規格化して示す。図(a)から U の分布が $x/d = 10 \sim 20$ にかけて、平坦化し始め、それに対応して(b)の V の分布から側方への広がりも確認できる。この結果を定常噴流の場合と比較すると、混合がより上流側で進んでいることが分かった。また、乱れ強さについても脈動を与えた方が上流側でより大きな値を取る。一方、噴流下流部においては層流/乱流の時間帯の比率にも依るが、脈動による明確な違いは見られなかった。

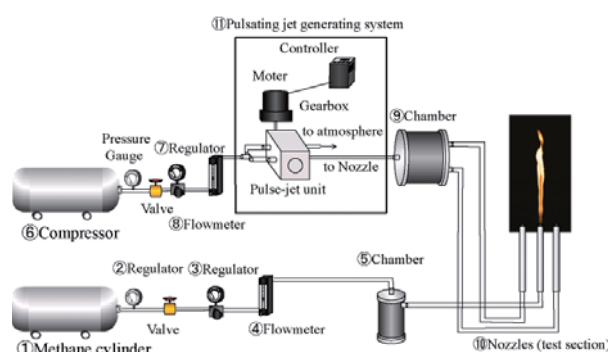


図1 脈動噴流列の実験装置。

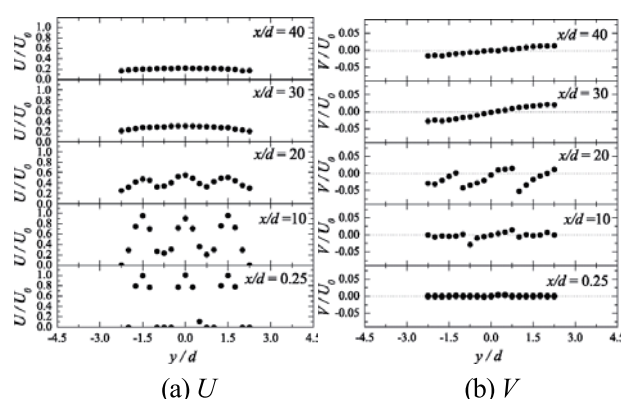


図2 脈動噴流列の時間平均速度分布（脈動噴流，非燃焼時， $Re = 1,500$ ）。

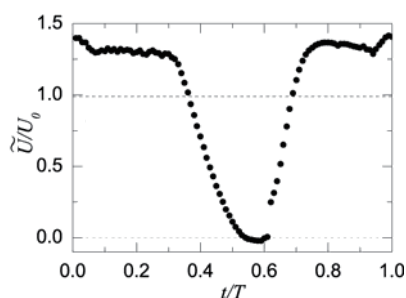
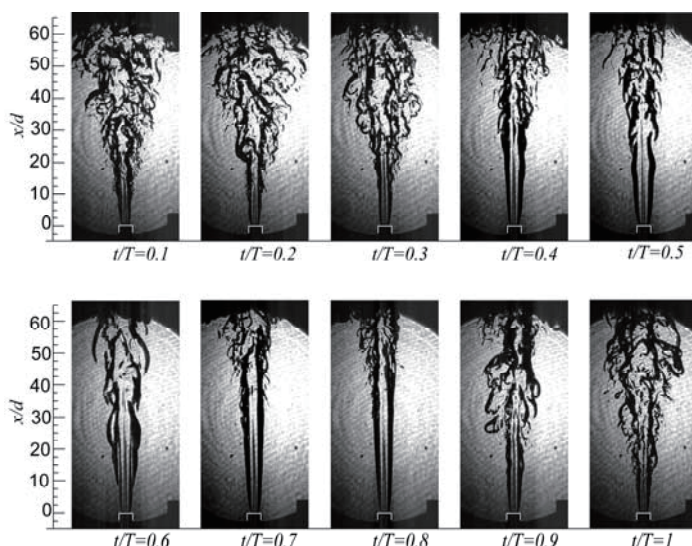


図3 火炎シュリーレン像の連続画像と速度履歴.

2.4 燃焼時の可視化結果 両側の空気噴流の脈動に応じて中心噴流が形成する拡散火炎の挙動をシュリーレン像として図3に示す. この図から空気噴

流が加速する時間帯 ($t/T = 0.7 \sim 0.8$) では減速する場合に比して火炎面が見かけ上, 滑らかであり, また, 空気噴流が乱流状態にある時間帯においては, 火炎面が噴流ノズル出口近傍から既に乱れていることが分かる. 非等密度等温噴流の場合も含め, 現在, 詳細な流速測定を行って流れ場解析を行っている.



3. アルコール系燃料を用いた多段式改質特性

3.1 目的 可搬性に優れ, 再生が可能なアルコール系燃料を, 貴金属触媒を用いず, 高効率, 高応答に水素に改質することを目的に, 発熱を伴う部分酸化改質法を多段化し, その有効性を検証する^[2].

3.2 実験装置 図4に示す多段改質装置は内径 28mm で, 上流側に液体燃料用の気化器を有し, 混合促進と逆火防止のためのバッフル板を介して下流側にある改質器本体内部に熱交換性能向上のための細管束を2箇所を持つ. 燃料にはメタノールを用いた. 今回は改質空気のみを2系統に分割し, 気化した燃料の予混合気形成と2段反応のための細管束間への噴き込みに充てる場合について検討した.

3.3 結果と考察 図5に当量比 ϕ に対する1段改質反応の場合の改質器出口におけるガス組成を示す. この結果を基に水素生成率を求めると, 部分酸化改質反応の量論混合に相当する $\phi = 3$ よりもやや燃料過濃な $\phi \sim 5$ で最大値を取ることが分かった. また, 2段改質反応の場合には1段改質反応の場合に比して, 条件によっては最大 10%程度の水素収率向上が認められ, 水素収率を低下させることなく改質器内部の温度制御が可能であり, 収率向上が見込まれる. 実験の結果については「研究成果報告」に詳述する.

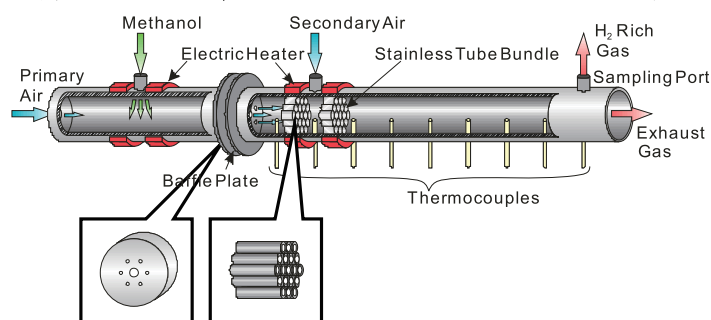


図4 多段改質装置の断面.

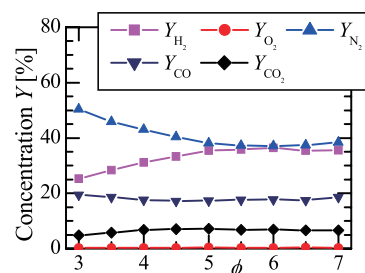


図5 改質ガスの組成(一段改質).

参考文献

- [1] Tatsumi, K., Shinohara, E., Okamoto, F., Kitaoka, Y. and Nakabe, K., Mixing Characteristics of Multi-Jets Modified by Cyclic Perturbation, *JSME International Journal (Ser. B)*, **49** - 4 (2006), pp. 959 – 965. [2] Tatsumi, K., Shinohara, E., Mizuno, M. and Nakabe, K., Phase-Averaged Mixing Characteristics of Multi-Jets Modified by Cyclic Perturbation, *J. Japanese Society for Experimental Mechanics*, **7** (2007), 6-11. [3] Tatsumi, K., Kuwabara, K., Rai, Y. and Nakabe, K., Heat and Reaction Characteristics of Multi-Stage Alcoholic-Fuel Reformer, *Proceedings of The 18th International Symposium on Transport Phenomena*, (2007).

物性工学講座 熱物理工学分野

教授 牧野 俊郎, 准教授 松本 充弘, 助教 若林 英信

1. はじめに

当研究室では、「複雑系」を背景とした熱工学の重要課題として、熱ふく射・固体熱伝導・マイクロ熱流体現象などを対象とした研究を進めてきた。また、当研究室はアジアにおける熱工学の大学間学術交流の拠点として、リーダーシップをとっている。

2. 表面の熱ふく射現象計測

熱工学におけるふく射伝熱の評価のための基礎研究として、広波長域高速ふく射スペクトル測定法を提案し、表面の熱ふく射現象のダイナミックスをとらえる研究を進めた。われわれが開発したスペクトル測定装置の光源部に光学サブシステムを設け、 $0.30\sim 11\ \mu\text{m}$ の93の近紫外～赤外域の波長点の垂直入射半球反射率 R_{NH} と $2.0\sim 11\ \mu\text{m}$ の42の赤外域の波長点の垂直放射率 ε_{N} のスペクトルを同時に4 sごとにくり返し測定できるように機能を拡張した [1]。図1にその光学サブシステムの構造を示す。図2は実験結果の1例であり、高温大気酸化過程にあるニッケル表面の R_{NH} と ε_{N} のスペクトルの時刻変化である。 R_{NH} や ε_{N} のスペクトルに (酸化ニッケル被膜の成長にともなう) 薄膜干渉による振動が明瞭に観測された。ついで、その分光実験と電磁波動論に基づいて、熱ふく射に関する Kirchhoff の法則 $R_{\text{NH}} + \varepsilon_{\text{N}} = 1$ の電磁波レベルでの実験的検証を行った [2]。

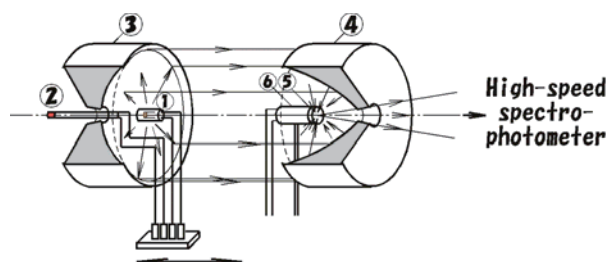


図1 光学サブシステムの構造

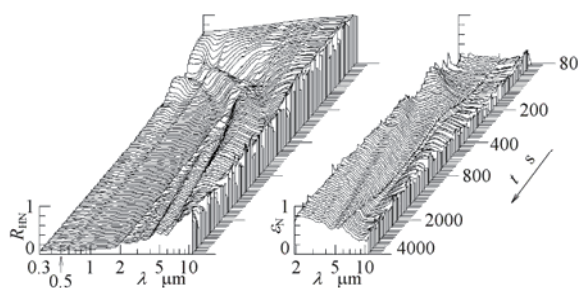


図2 高温大気酸化過程にあるニッケル表面の R_{NH} と ε_{N} のスペクトルの時刻変化

3. 生活空間の熱・ふく射環境の自律制御系

熱工学の立場から人間の生活環境と地球の自然環境のほどよい共生を図ることをめざす萌芽的な研究として、生活空間の熱・ふく射環境を自律制御する壁システムの開発研究を始めた。この研究の要点は、①壁によるふく射冷却と②水蒸気を呼吸する壁であり、壁材料の自律制御機能に依存して人間の快適さを追及することである。図3にわれわれが提案する壁システムの構成を示す。4層構造であり、室内側から、(1) 大鋸屑(おがくず)の粉体を充填し固化した多孔性金属層、

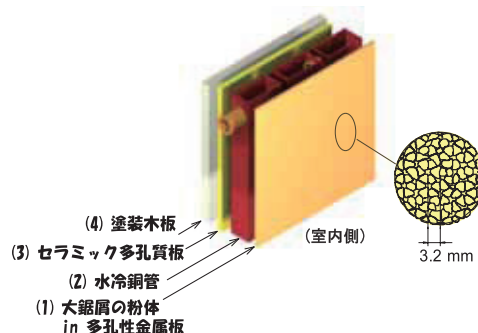


図3 壁システムの構成

(2) 水冷銅管、(3) セラミック多孔質板、(4) 塗装木板 からなる300mm角の取り付け方式のコンパクトなものである。その主要部は第一壁と呼ぶ第(1)層である。これは高熱伝導性・吸湿性の多孔質層であり、望ましい熱物性 (熱伝導率・湿気伝導率・全放射率) を有することを測定により明らかにした[3]。

4. マイクロ／分子スケールの熱流体现象

気液界面での輸送現象、マイクロ気泡のダイナミクス、微小液滴のダイナミクスなどについて実験と分子シミュレーションによる研究を進めている。図4のような微小液滴の固体表面への衝突による変形ダイナミクス[4] やマイクロ気泡・ナノ気泡の物性と制御[5]などについて、成果が得られた。

5. あじあ3大学間の熱工学学術交流

本研究室では、熱工学・流体工学関連の研究室と協力して、あじあ3大学(京都大学・韓国:ソウル国立大学・中国:清華大学)間の学術交流事業を進め、毎年「あじあ3大学熱工学会議」を開催し、会議録 “*Proceedings of Kyoto - Seoul National - Tsinghua University Thermal Engineering Conference*”を刊行してきた。毎回、総勢 30-50 名程度の関連分野研究者が集う研究会として定着し、今後とも継続していくことを望んでいる。本 COE の支援を受けて行われた会議は次の通りである：

第3回：2003年12月16-18日、京都大学

第4回：2004年12月14-16日、京都大学

第5回：2005年9月27-29日、ソウル国立大学

第6回：2006年11月11-13日、京都大学

第7回：2007年10月15-17日、清華大学

参考文献

- [1] H. Wakabayashi and T. Makino, “Development of a wide-spectral-range high-speed spectrophotometer system for measuring hemispherical reflectance and directional emittance of surfaces simultaneously”, Proc. 8th Asian Thermophysical Properties Conference (2007) No. 164.
- [2] H. Wakabayashi and T. Makino, “Experimental verification of Kirchhoff's law on thermal radiation at an electromagnetic wave level”, ASME-JSME Thermal Engineering Conference (Vancouver, 2007) No. 32327.
- [3] T. Makino and H. Wakabayashi, “Development of a new indoor wall unit of high thermal conductivity and high hydroscopicity”, Proc. 7th Kyoto-Seoul National-Tsinghua University Thermal Engineering Conference (2007) p. 13.
- [4] 松本充弘, 中澤伸之, “分子動力学法による微小液滴の固体壁面への衝突シミュレーション”, Thermal Science & Engineering, **15** (2007) 55.
- [5] M. Matsumoto and K. Tanaka, “Nano bubble -Size dependence of surface tension and inside pressure-”, Fluid Dynamics Research (2008) in press.



図4 親水性固体壁面への液滴衝突の分子動力学シミュレーションの例



図3 第4回あじあ3大学熱工学会議での集合写真、ならびに7年間の会議録

航空宇宙システム工学講座 熱工学分野

教授 吉田 英生, 准教授 岩井 裕, 助教 斉藤 元浩

[金丸 一宏]

1. 当研究室における研究の概要

本研究室では、次世代分散型エネルギーの担い手として脚光を浴びるマイクロガスタービン・燃料電池のハイブリッドシステムの解析や各個別要素の性能向上に関する研究を中心に、種々の熱システムを対象として、理論と実験の両面からその諸現象の解明と最適化に取り組んでいる。研究に際しては、既存技術の延長線上にある着実な性能向上のみならず、例えば相変化を利用した軸受の高性能化や新たなエネルギー変換過程の導入によるガスタービンの高性能化など、従来の機械システムに複雑な熱現象を新たな視点で導入することで、飛躍的な性能向上が期待できる技術の開発やその基礎現象の解明にも重点を置いている。

以下では、本拠点活動において我々が研究とした「水蒸発による静圧効果が付加された超微細多孔質金属製ハイブリッド気体軸受」「相変化を伴う細管内流れの研究」「ミニセル連結型平板 SOFC の発電実験」「三角錐状目立て突起を有する性能強化型プライマリサーフェス熱交換器の伝熱特性」「ブラックホールと超音速流とのアナロジーに基づくホーキング輻射理論の実験的検証」「熱再循環を利用した微小流路内での触媒燃焼の実験及び数値解析」のうちから3つの研究についてその概要を述べる。

2. 水蒸発による静圧効果が付加された超微細多孔質金属製ハイブリッド気体軸受

近年注目を集めている分散型発電における発電システムとして、マイクロガスタービンが用いられている。マイクロガスタービンは、高回転、高温かつ頻繁な起動停止という厳しい条件の下で運転される。そのような条件から、マイクロガスタービンの軸受には、抵抗が小さく高温下でも安定な気体軸受を用いることが望ましい。しかしながら、既存のマイクロガスタービンにおいてはまだまだ油を用いた軸受が主流である。その主な理由は、気体軸受は安定性、負荷能力に劣り、また起動停止時における軸と軸受の接触という問題が生じることである。そこで本研究では、マイクロガスタービンにおける最も重要な構成要素の一つである軸受に関し、気体軸受の利点を活かしつつその欠点を克服するべく、水蒸発により静圧作用が付加された超微細多孔質製ハイブリッド気体軸受を提案し、その実現可能性を探った。ハイブリッド気体軸受の概念図を図1に、製作した軸受を図2に、実験装置の概略図を図3に示す。数値解析では伝熱特性と軸受特性を解析し、回転試験においては蒸気潤滑での運転を行った。

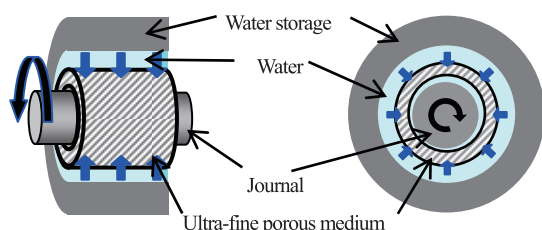


Fig. 1 Constitution of a proposed hybrid bearing.



Fig. 2 Bearing.

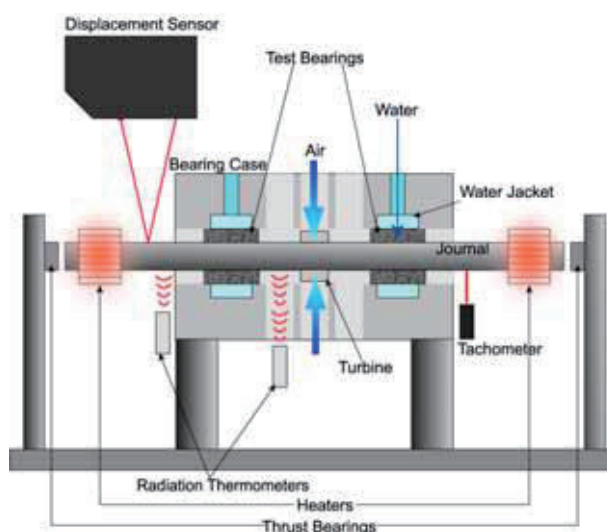


Fig. 3 Schematic view of experimental apparatus.

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) ハイブリッド気体軸受では、軸の温度と水の供給量のバランスによって水蒸発の起こる気液界面の位置が移動する。
- (2) 多孔質体の軸受表面に多数の均一な微小オリフィス絞りが存在するとした数値解析モデルでは、ハイブリッド気体軸受は真円の通常の気体軸受に比べ、非常に安定した蒸気潤滑特性が得られる。
- (3) ハイブリッド気体軸受の実験において、蒸気潤滑での定常的な運転を行うことに成功したが、不均一な蒸気の噴き出しが原因と考えられる不安定性を持つ可能性がある。

3. 相変化を伴う細管内流れの研究

近年の電子機器の小型化に伴い、発熱密度も急激な増大傾向にあり、熱対策は重要な課題となっている。微小領域から効率的に抜熱する方策の一つとして、流体が相変化を伴いながら流れる微細流路を利用する手法が注目されている。相変化を伴う気液二相流は空調機の冷媒の流れなどとしても重要であるため通常スケールでは多くの知見が蓄積されているが、水力直径が1ミリ程度以下となるような微小スケールについては現在でも不明な点が多い。この様なスケールでは面積力である表面張力の影響が顕著となるため通常スケールとは熱流動現象が異なり、これまでに蓄積された知見に沿って機器を設計することには無理がある。このような機器の高性能化のためには微細流路内の気液二相流に関する基本的な知見が必要であり、マイクロ・ミニチャンネルの研究が近年盛んに行われている。特に、熱流動の局所的な情報を得ることを目的として、数値解析による詳細な検討を行うことは、現象の理解とその後の応用に資するものと考えられる。本研究室では、蒸発・凝縮を伴う細管内鉛直上昇単一気泡流について、熱流動数値解析とそれに対応する可視化実験を行い、相変化を伴いつつ細管内を流れる気液二相流の現象の解明を試みた。気泡形状の推移について数値解析と実験結果を比較したところ、両者は定性的に一致した。また気泡が球形の場合と砲弾形の場合では気泡成長速度が大きく異なり、気泡が砲弾形の場合には気液界面と加熱壁面との距離が近づくため気泡側面部の界面で相変化が活発となり、気泡が急速に成長することがわかった。

4. ミニセル連結型平板 SOFC の発電実験

固体酸化物形燃料電池（SOFC）は高効率な発電装置として注目されており、その実現へ向けて実験と数値解析の両面から様々なアプローチが行われている。通常の発電条件では SOFC 単セルの出力電圧は 1V 未満であるため、平板型の場合には複数のセルをその厚さ方向に積層し電氣的には直列接続してスタック化し、出力電圧を高くすることが一般的である。この場合には、積層するセルの数だけ燃料ガスと空気の流路が必要となるが、流路のとり回しが複雑化するだけでなく、燃料流および空気を各セルに一樣に分配することは容易ではないなどの課題が生じる。

本研究では小型発電装置を念頭に、比較的少ない積層枚数で所望の出力電圧を達成する構造としてミニセル連結型平板 SOFC を提案する。これは 1 枚で数 V の電圧を得ることができる擬似的な平板型 SOFC といえるものであり、具体的には 1cm 角程度の小型平板 SOFC（ミニセル）複数枚を同一平面上で電氣的に直列につなぎ、全体をアルミナ板で挟みひとつのユニットを構成する。1 枚（ユニット）で比較的高い出力電圧が得られることが特徴であり、一定出力電圧を得るための積層枚数を減らすことが可能となる。同様のコンセプトは円筒あるいは扁平円筒の横編型セルで見られるが、平板型セルでは見当たらない。またセラミックスである SOFC は大面積になると熱応力や振動による破損の危険が増すが、ミニセルを用いることでその危険を低減できるという利点も併せ持つ。本研究はこのミニセル連結型平板 SOFC の最小ユニットを製作して実際に発電実験を試み、実現性を検討した。その結果、今回試作した最小ユニットでは安定した発電状態が実現され、目標とする出力電圧を達成できることを確認した。今回のセル仕様では電解質が厚いため、電解質抵抗がセル性能を支配していることを確認した。