

7.

流体力学

7・1

まえがき

流体力学の工学における守備範囲は広く、原子・分子の挙動が直接流れに影響を及ぼす希薄気体流れから、乱流、混相流など現象の理解が複雑な流れまで多種多様である。工業的应用としては半導体製造過程や μ TAS, NEMS, MEMS からエンジン、環境問題、バイオ医療分野に至るまで多くの応用分野に関連し、それらの問題解決に寄与している。また、解析手法としては、ミクロ・メゾ・マクロのスケールを合理的につなぐマルチスケール解析が多く用いられるようになってきた。実験・計測分野では分子イメージングなどを援用した計測手法の開発など急速な発展が見られる。ここでは、これらのすべての分野を網羅することは不可能であるが、それらの中でも進歩の著しいものを取り上げ、概観する。特に、分子・希薄気体流れ、反応性流れ、乱流、生体流れ、混相流、トンネル換気・火災、流れの可視化と画像計測を取り上げ、2005年の動向を記すことにする。詳しくは各節を参照いただきたい。なお、2005年度の「水力機械」、「空気機械」の主な実績については、ターボ機械協会発行の会誌「ターボ機械」2006年8月号またはターボ機械協会ホームページ (<http://turbo-so.jp>) を参照いただければ幸いである。

〔松本洋一郎 東京大学〕

7・2

分子・希薄気体流れ

分子流および希薄気体流れでは実験計測に多くの困難が伴うことから、しばしば数値シミュレーションが解析に用いられる。特に超音速流れではDSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 法が多用され、不足膨張噴流の解析⁽¹⁾、物体後方流れ⁽²⁾、混合気体の円柱周り流れ解析⁽³⁾などが報告されている。

一方で比較的低速の希薄気体流れでは、線形BGK方程式に基づくキャピティ流れ解析⁽⁴⁾、モーメント方程式によるCouette流れ解析⁽⁵⁾、線形Boltzmann方程式による蒸発凝縮を含む希薄気体流れ解析⁽⁶⁾、格子Boltzmann法を用いたマイクロチャネル内流れ解析⁽⁷⁾など、DSMC法を用いない数値解析例も多い。これは、DSMC法では代表速度が小さくなると、必要な精度を得るための計算量が増加することも一因であろう。なおマイクロチャネル内の希薄流については計測結果⁽⁸⁾や、DSMC法・格子Boltzmann法などさまざまな計算手法と実験結果との比較⁽⁹⁾などの報告もある。さらに、DSMC法を用いたRayleigh-Bernard不安定の解析⁽¹⁰⁾、プラズマエッチング容器内流れの解析⁽¹¹⁾など、広い範囲の希薄流の数値解析が活発に行われている。

一方で、分子の回転運動の非平衡現象や回転運動を含む衝突モデルには不明な点が残されており、これに関連して超音速流中の回転エネルギー分布計測⁽¹²⁾、極超音速流平板流での回転温度の非平衡の計測⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、二原子分子の衝突モデルの提案⁽¹⁵⁾などの基礎的な研究が報告されている。また新しい計測手法として、感圧塗料による圧力計測手法⁽¹⁶⁾が提案されている。

なお希薄気体流れではないが、分子レベルの液体の熱流動とナノスケールの構造との関係が、分子動力学シミュレーションによるCouette流れ⁽¹⁷⁾や構造物からのエネルギー伝達⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾などにおいて明らかにされつつあり、今後の発展が期待される。

〔松井 純 横浜国立大学〕

7・3

反応性流れ

流体力学における反応性流れの研究は、燃焼器や内燃機関の効率、環境促進などの応用に対する目標を見据えた内容が重要な課題となる。このような点をふまえた形で現状の研究を見て

みると、新しいトピック的な研究として、マイクロリアクタ内の反応流の研究があげられる。これは、狭い流路内での反応促進として、振動法を提案している⁽²⁰⁾。また、反応性流れの研究で最も応用性があり、重要な研究の一つである予混合燃焼(火災)の研究発表が多かったが、そのうち乱流について調べた物として、メタン、プロパン、水素の乱流火災の局所的な燃焼速度分布を弱い乱流に対して求め、この乱流強さとMarkstein数に対する関係を述べた研究がある⁽²¹⁾。また、乱流制御の問題として、バックステップに対して吸込み空洞を用いた方法を提案しているものもある⁽²²⁾。非常に注目すべき研究として、当量原理を乱流せん断反応流に対して応用し、それによって得られるスケール法則が熱発生による種々の物理量の変化を決定できるとした研究がある⁽²³⁾。球状に伝ばするプロパン-空気予混合火災の圧力による速度変動とそれによる不安定性について調べた研究では、Markstein数と火災の安定性を結びつけ、低いMarkstein数で、プロパン-空気火災が不安定になることを確認している⁽²⁴⁾。乱流火災の最新の測定技術の一つとして3次元トモグラフィックな方法が紹介されている⁽²⁵⁾が、3次元データが取り込まれた場合、乱流火災のかんりの詳細な機構解明が期待できる。他の予混合火災の研究としては、メタン-空気部分予混合気中での火災の燃えひろがりの研究があり、火災前方に存在する燃料が反応することによる熱量の増加で燃えひろがるとしている⁽²⁶⁾。また、非一様な速度場中を伝ばする予混合火災では、セル状火災の動的挙動とその燃焼速度が火災の乱れと固有不安定性に依存していることを示した⁽²⁷⁾。他の反応性流れの研究としては、管状火災バーナの速度場を測定した研究⁽²⁸⁾や水素の濃度を白金線上での触媒発熱によって測定する方法の提案⁽²⁹⁾などがある。気-液二相反応流の問題は非常にup-to-dateであり、火災中でのノルマルデカン(C₁₀H₂₂)噴霧の燃焼機構の研究では、DNSにより2種類の燃焼形態(予混合的と拡散的)が確認されたとしている⁽³⁰⁾。また、同じように弱い乱流火災中でのヘプタン噴霧の燃焼機構の研究では、DNSにより再現し、部分予混合の形態を含めた噴霧燃焼について明らかにしている⁽³¹⁾。デトネーションの研究もいくつか発表されている。一つは、デトネーションの障害物を通る時に生じる回折現象についてであり⁽³²⁾、もう一つは自走デトネーションの漸近理論による解析である⁽³³⁾。さらに、3次元性の究極の問題を取り扱った円柱状、球状に伝ばするデトネーションの、線形、非線形問題が議論されている⁽³⁴⁾。最後に応用問題として、スクラムジェット模型による水素スクラムジェットの計測と数値シミュレーションについて発表されている⁽³⁵⁾。また、ガスタービンの数値シミュレーションとして、LESを用いた精度良い計算がなされ、実機形状の詳細な計算結果が示されている⁽³⁶⁾。

〔林 光一 青山学院大学〕

7・4

乱流

7・4・1

数値計算

計算機の発達により、高レイノルズ数のDNS (Direct Navier-Stokes Simulation) が可能となり、物質輸送や回転効果を伴う流れ、燃焼流、混相流、電磁流体などさまざまな乱流現象の解明にDNSが盛んに適用されている^{(37)-(40)など}。Yeungら⁽³⁷⁾は約80億点(2048³)の格子を用いて、テーラーマイクロスケールに基づくレイノルズ数Re_λ700の一樣等方性乱流のDNSを実施し、エネルギー散逸率、エンストロフィの時間発展を調べるとともに、Schmidt数1と1/8の二つのケースについて、パッシブスカラーの混合率を計算した。Brethouwerら⁽³⁸⁾はパッシブスカラーを含むRe_λ32の等方乱流のDNSを実施し、

回転効果が物質輸送、乱流統計量、乱流構造の時間発展に与える影響を検討した。また、RDT (Rapid Distortion Theory) と DNS の結果を比較することにより、非線形効果を明らかにした。Morinishi ら⁽³⁹⁾ は壁面摩擦速度に基づくレイノルズ数 $Re_\tau = 100 \sim 300$ のチャンネル乱流の圧縮性 DNS を実施し、非圧縮性流れの DNS の結果と比較することにより、圧縮性乱流では $y^+ 15$ 付近において圧力-速度ひずみ相関が減少することを明らかにした。Sibilla ら⁽⁴⁰⁾ はポリマーを含有した $Re_\tau = 169$ のチャンネル乱流の DNS を実施し、壁近傍の渦構造とポリマーの挙動の関係に着目し、ポリマーによる抵抗低減効果を明らかにした。

LES (Large Eddy Simulation) は実用的な流れや空力音の予測などに適用されている^{(41)~(43)など}。Ciardi ら⁽⁴¹⁾ は、非構造格子を用いた LES に対して、流れ場の非物理的な振動 (wiggle) を感知し、人工的な散逸量を自動的に最適化する離散化方法を提案し、種々の流れ場の LES に対して、解析精度が向上すると主張している。Niklas⁽⁴²⁾ はジェットの詳細音場を圧縮性 LES により計算し、キルヒホッフ法で求めた遠方場の音圧を実験値と比較し、良好な一致が得られることを示すとともに、乱れの積分スケールや渦の対流速度についても実測値と一致することを確認した。このほか、大規模な LES は風車の翼端渦から発生する音の予測などに適用されている⁽⁴³⁾。

一方、従来から広く用いられている RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes Simulation) に関しては、熱伝達率の予測精度の検証や RANS と LES と組み合わせた手法である DES (Detached Eddy Simulation) としての適用が研究されている^{(44)~(46)など}。たとえば、Evans ら⁽⁴⁴⁾ は自然対流と強制対流が同程度に寄与する 3m 四方の平板境界層における熱伝達率を $k-\epsilon$ モデルならびに v_2-f モデルにより計算し、 $k-\epsilon$ モデルにより、5~35%程度の精度で熱伝達率が予測可能であること、 v_2-f モデルを使用することにより、さらに予測精度が向上することなどを示している。また、Deck ら⁽⁴⁶⁾ はスーパークリティカル翼のパフェット現象を DES により解析し、格子の大きさと壁面からの距離により RANS と LES とを切り替える従来の DES では、自立的なパフェット現象は再現されなかったが、壁面近傍の RANS 領域を固定化して扱う Zonal DES 法によれば、自立的なパフェット現象が再現できたと主張している。このほか、渦法⁽⁴⁷⁾ などや格子ボルツマン法⁽⁴⁸⁾ なども乱流現象の解明に適用されている。

7.4.2 実験計測

壁乱流に関しては、Wei ら⁽⁴⁹⁾ は乱流境界層、チャンネル流、パイプ流れの過去の信頼できる実験データの運動量のバランスを解析することにより、従来言われていた、粘性底層、バッファレイヤー、対数領域、後流領域とは異なる、新たな 4 層による分類を提唱し、それらの厚みなどのレイノルズ数依存性を示した。また、Fransson ら⁽⁵⁰⁾ は 1.4% から 6.7% の主流乱れ (Free Stream Turbulence: FST) を伴う境界層の遷移過程を熱線流速計により計測し、遷移レイノルズ数は FST に反比例することや、遷移領域の長さにより無次元化することにより、乱流の間欠率が一つの関数で表されることを示した。

一方、自由せん断流に関しては、Dimotakis⁽⁵¹⁾ が乱流混合層に対する最近の研究動向や今後の展望を詳述している。また、Murzyn ら⁽⁵²⁾ は大型の水槽を用いて、自由表面を有する格子乱流を LDV により計測し、コルモゴロフスケールやテラーマイクロスケールなどの主流方向の変化や速度依存性を明らかにした。Alama ら⁽⁵³⁾ はさまざまな位置関係に配置された 2 つの円柱に働く流体力や表面の圧力変動を計測するとともに、油膜法などを用いた可視化により、円柱のまわりの渦構造を明らかにした。また、Khalil ら⁽⁵⁴⁾ は分岐乱流 (Turbulent Junction Flow) を 5 孔ピトー管により計測し、分岐の上流にリブレットを設けることにより、馬蹄渦の強さが大幅に弱められることを示した。

燃焼流の計測に関しては、Pfadler ら⁽⁵⁵⁾ は Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV) と Planar Laser Rayleigh Scattering (PLRS) を用いて、ブンゼンバーナーの予混合火炎の温度場と速度場の計測を行い、乱流応力や積分スケールに関する詳細なデータを提供した。また、山本ら⁽⁵⁶⁾ は旋回噴流燃焼器流れを対象に、PIV 計測と LDV 計測を比較することにより、PIV により信頼できる計測結果を得るための条件を明らかにした。ま

た、非燃焼場と燃焼場とでは平均速度場や速度変動が大きくこととなることを示した。

最後に、より実用的な流れ場に関する計測としては、船体まわりの乱流境界層の圧力変動計測⁽⁵⁷⁾、ダイナミック PIV を用いた遠心ポンプの失速セルの計測⁽⁵⁸⁾、二重反転型軸流ポンプの圧力変動計測⁽⁵⁹⁾ に関する研究成果などが発表された。

[加藤 千幸 東京大学]

7.5 生体流れ

広範な生体に関連する流れの中から、近年の進展が著しい血流の数値解析と実験的な研究に焦点をあてて概観する。

日本人の死因は 1 位ががん、2 位が脳動脈疾患、3 位が心臓疾患である。この 2 位と 3 位の疾患の代表的なものが、脳梗塞、脳溢血、心筋梗塞などで、いったん発症すると大変死亡率が高い。これらの疾患は、動脈瘤や狭窄が原因となることが多い。さらに動脈瘤の成長と血流との関係が深いと示唆されているほか、狭窄が血栓を誘発し、梗塞を引き起こしていることなど、血流と血管との関係を明らかにすることが、これらの疾患の原因に迫ることにつながると期待されている。一般に梗塞は、血管の内皮が傷つき、血栓が生じ、その血栓がはがれて血流で運ばれ、狭い動脈を塞いで起こると説明される。また、動脈瘤は血流の表面摩擦の大きいところに発生するという高ズリ説が有力だとされている。さらに、狭窄や瘤を手術する場合の手術方法や治療効果の事前検討も期待されていることの一つである。

現在行われている血流に関連した研究には大きく分けて次の三つを対象としたものがあるが、紙数の関係から最初の二つだけここでは取り上げることにする。

- ・心臓と心臓からつながる胸部大動脈を対象としたもの。
- ・脳動脈、脳動脈瘤あるいは頸動脈、心臓の冠状動脈の狭窄を対象としたもの。
- ・微小血管での血球の変形に着目したもの。

7.5.1 心臓・胸部大動脈

心臓は自ら運動し、流れを起こしている。全身の血液循環の要であり、非常に重要な臓器である。これまで実験的には、人工心臓の開発で溶血や血栓と流れとの関係を調べるために、水と透明モデルを使った可視化実験と、血液を使っ運転時を比較した研究が行われてきた。現在この研究は可視化実験から PIV を使って流速分布の測定に移ってきている^{(60)~(61)}。ほかにも各種の人工心臓弁に関して Dynamic PIV を使った測定が行われている⁽⁶²⁾。また、心臓の外科手術で体外循環を行う場合、カニューレと呼ばれる管を大動脈弓に挿入して血液を戻しているが、この噴流により悪影響が起こることが知られており、ガラスモデルを使って PIV 法で流れを調べる研究なども報告されている⁽⁶³⁾。この例のほか、バイパス手術などで接合する血管部分の流れを PIV で調べた例もある⁽⁶⁴⁾。

数値計算では超音波画像などを元に左心室内や大動脈弓の形状変化を求め、あらかじめ形状変化を与えて内部の流れを求めることが行われている^{(65)~(68)}。拡張型心筋症の患者の人工心臓弁への置換を想定し、僧帽弁の開口の仕方によって左心室内の流れがどのように影響を受けるかを解析した山口らのグループの報告⁽⁶⁵⁾ や、心不全時と正常時の流れの違いを解析した劉らのグループの報告⁽⁶⁹⁾ など、心疾患と血流の関係を明らかにしようとする試みが行われるようになった。このような傾向は大動脈弓での解析にも見られ、大動脈弓のひねりと動脈硬化性疾患の関係を解析に挑んでいる松澤らのグループの報告⁽⁷⁰⁾ や、胸部大動脈瘤の発症と進展に関する高ズリ説の検証に挑んでいる山口らのグループの報告⁽⁷¹⁾ など、やはり病変と血流との関係を調べようとする研究が発表されてきている。このように従来、単に血流のようすを見るために CFD を初歩的に応用した時代から、この分野は大きく進展している。

このほか、非常にユニークな試みが久田らによって行われている。これは心臓のマルチスケール・マルチフィジックス・シミュレータ開発^{(72)~(73)} であり、心筋細胞における興奮-収縮連関の分子メカニズムを再現した要素からなる心臓モデルで、心室壁と血流の強連成解析も行っているなど意欲的である。この

他、劉らによる全身の動脈血管 266 本をモデル化した労作は今後の計算が期待される⁽⁷⁴⁾。

7.5.2 脳動脈・頸動脈・冠状動脈

日本では脳動脈瘤の破裂に伴うクモ膜下出血による死亡が多い。近年、脳ドックの普及などで、動脈瘤が発見されることも多くなったが、実際に破裂する確率は低く、どのような場合に手術すべきか、専門家でも意見が一致していない。このため、脳動脈の瘤に関する実験やシミュレーションが多い。一方で、脳動脈瘤の場合、その発生が特定の部位に集中するため、その原因を探る研究も行われている。

いずれの場合も、脳動脈瘤のモデルを作り、その中で壁せん断応力を PIV や LDA で測定している⁽⁷⁵⁾⁽⁷⁶⁾。これまでアクリルやガラスで作られることが多かった血管のモデルであるが、光造形装置を使って実形状に忠実に作った試みもある⁽⁷⁷⁾。数値解析では血管の弾性や非線形性の影響を調べることも行われるようになってきた^{(78)~(80)}。

このほかにも CIP 法を使って計算した例⁽⁸¹⁾ や非ニュートン性の影響を調べた計算例⁽⁸²⁾ も報告されている。また、医療画像がボクセルを使っていることを利用し、計算用のメッシュを作成せず、直接ボクセルを使って計算することも行われている⁽⁸³⁾⁽⁸⁴⁾。

〔姫野龍太郎 (独) 理化学研究所〕

7.6 混相流

他の分野に違わず、混相流の分野においてもマイクロが重要なキーワードとなっている。マイクロ混相流の分野においては、大域的な密度揺らぎなどの効果に比べ、局所的な表面張力の効果などが重要となってくるため、個々の分散相の挙動を詳細に解析した研究が増えている。

特にマイクロ・ナノのさまざまな技術と関連して、微小な液滴・気泡の大きさや数をコントロールして生成する手法の開発が盛んになっている。マイクロチャネルを用いた微細液滴の生成に関する研究⁽⁸⁵⁾ や、超音波を用いた微細気泡の生成法⁽⁸⁶⁾、旋回噴流を用いた方法⁽⁸⁷⁾ などがある。

また、個々の分散相の挙動を詳細に解析したものとして、せん断流中の液滴⁽⁸⁸⁾ や管内ポアズイユ乱流場中の気泡⁽⁸⁹⁾ に働く力の解析、気泡の変形・分裂に関する解析⁽⁹⁰⁾、上昇気泡の複雑な挙動を解析したもの⁽⁹¹⁾⁽⁹²⁾ や、体積振動する気泡挙動の詳細な解析を行ったもの⁽⁹³⁾ などがある。また、多数の微粒子が吸着した気泡では、非球形の形状が安定であることを示した研究⁽⁹⁴⁾ や、マイクロバブルの電気泳動について調べた研究⁽⁹⁵⁾ などは、従来とは違った視点で現象をとらえており興味深い。分散相の複雑な変形挙動を扱う新しい直接数値計算手法としては、Phase-Field 法を用いたものが話題となっている⁽⁹⁶⁾⁽⁹⁷⁾。

なお、ここ数年、直径数ミクロンから数百ミクロン程度の「マイクロバブル」と呼ばれる微細気泡が大きな話題となっている。マイクロバブルにはさまざまな応用が考えられているが、その挙動に関しては未知な点が多い。これらに関しては、例えば、マイクロバブル噴出しによる乱流摩擦抵抗低減⁽⁹⁸⁾⁽⁹⁹⁾ や、水処理⁽¹⁰⁰⁾、医療応用⁽¹⁰¹⁾⁽¹⁰²⁾ などと関連した基礎研究が盛んに行われている。

医療応用は特に新しいテーマである。血管造影剤として用いられるマイクロバブルは、直径が数ミクロン程度と従来扱われてきた気泡とは、サイズが数けた異なるものとなっている。振動圧力場中におけるこのサイズの気泡に関しては未知な点が多いが、非常に興味深い挙動を示し、血管造影だけでなく、腫瘍焼灼⁽¹⁰³⁾ や遺伝子導入、ドラッグデリバリーシステム⁽¹⁰⁴⁾ などさまざまな応用が考えられている。

〔高木 周 東京大学〕

7.7 トンネル換気・火災

1999 年にモンブラントンネルとタウエルトンネルにおいて多数の犠牲者を伴う火災が発生した⁽¹⁰⁵⁾⁽¹⁰⁶⁾。これを受けて、モンブラントンネルでは十分な安全が図れるように換気設備などが更新され⁽¹⁰⁷⁾⁽¹⁰⁸⁾、供用が再開された。その後、トンネル換

気の設備や運用に関して EU 加盟国に強制力のある EU ディレクティブ⁽¹⁰⁹⁾ が批准され、各国で運用が開始されている。我が国でも対応する安全対策の策定が望まれる。トンネル内火災に対する安全を確保するため非常時換気シミュレーションが行われるようになってきている⁽¹¹⁰⁾。

トンネル火災では大型貨物車を模擬した大規模火災実験がノルウェーの Runehamar トンネルにて行われ、天井付近の高温ガス温度のタイムカーブが示され⁽¹¹¹⁾、また、4 種類の積載物のそれぞれの発熱速度が計測された⁽¹¹²⁾。また、縮小模型実験により、排気口と煙の成層性⁽¹¹³⁾、熱気流の遡上を阻止する臨界風速に及ぼすトンネル断面アスペクト比による影響⁽¹¹⁴⁾、煙の温度と伝ば速度⁽¹¹⁵⁾ について調べられている。シミュレーションでは LES が主流を占め、アメリカの国立標準技術研究所 (NIST) で開発された FDS を用いた例として、トンネル内の熱気流の天井に沿う遡上を阻止する縦流換気風について検討した例⁽¹¹⁶⁾、ウォータースクリーンによる遮へい効果および煙の洗落とし効果について調べた例⁽¹¹⁷⁾ がある。日本では独自に LES によるシミュレータが開発され、実大トンネル火災実験との比較により、熱気流遡上特性に対する渋滞車両の存在による影響⁽¹¹⁸⁾、煙の降下現象⁽¹¹⁹⁾、水噴霧⁽¹²⁰⁾ について定量的な予測精度について確認がされている。

鉄道トンネルの空気力学に関する研究について、最近 2、3 年の状況を概観する。まず、道路トンネルと同様、鉄道トンネルにおいても、通常運行時および火災発生時のトンネル内、地下駅構内における換気が重要な検討課題であり、数値計算、模型実験、実測による研究が行われている。これらに関する論文はヨーロッパのものを中心に、2003 年開催の BHR Group 国際シンポジウム論文集⁽¹²¹⁾ に多数掲載されている。また、同国際学会および 2005 年開催の日本機械学会流体工学部門講演会⁽¹²²⁾ では、列車走行に伴うトンネル内・駅構内の圧力変動、列車風、気温制御などに関する発表が行われた。一方、高速鉄道トンネル特有の課題として、トンネル内外で発生する圧力波・低周波音が沿線環境や車内快適性に影響を及ぼす問題がある。特に列車のトンネル突入により反対側の出口から外部へ放射されるトンネル微気圧波の低減法の研究が活発に進められている。新幹線トンネルの主要な微気圧波対策であるトンネル入口フード (緩衝工) に関して、理論解析と模型実験による研究が進展を見せている⁽¹²³⁾⁽¹²⁴⁾。長大トンネルにおける圧縮波の伝ばに関して、非線形性による波面の急峻化と壁面摩擦による波の減衰の状況が 26 km の実トンネルにおける測定と数値解析により調べられている⁽¹²⁵⁾。さらに、トンネル中間の開口部が圧力波の伝ばに及ぼす影響⁽¹²⁶⁾、トンネル出口での圧縮波の反射と透過⁽¹²⁷⁾、アクティブ制御による微気圧波低減法⁽¹²⁸⁾ などが研究されている。また、微気圧波に類似の現象として、ご線橋の直下を高速列車が通過するときに発生する圧力波の現地測定が行われている⁽¹²⁹⁾。

〔水野 明哲 工学院大学〕

7.8 流れの可視化と画像解析

流れの可視化技術は流体計測技術の一分野として確立されている。その中でも、粒子画像流速測定法 (PIV) は 2 次元速度分布を高解像度高空間分解能で計測する標準的な手法となっている。更なる高精度化を目指した研究として、PIV 画像解析において避けられないピークローキングを相関マトリクスを応用することでなくす技術⁽¹³⁰⁾ や、誤ベクトルを高精度で同定する技術⁽¹³¹⁾ などの提案がなされている。また、PIV 解析手法を比較した第 2 回 PIV Challenge⁽¹³²⁾ の報告がある。また、13mJ という高輝度光パルスを用いた光ファイバで伝送する技術が開発⁽¹³³⁾ され、PIV 計測対象がひろがる。PIV に関連するハードウェア進歩という点では、高解像度高速ビデオカメラが広く普及し、1~20kHz といった高速現象を PIV により定量可視化する技術が普及してきた。鼻腔モデルの時系列計測⁽¹³⁴⁾ や、微小血管内血流の赤血球と血漿それぞれの速度計測⁽¹³⁵⁾ などにも応用されている。

さらに高解像度高速ビデオカメラを複数用いて、3 次元流動計測 (3 次元 PTV) に応用し、3 次元空間内 3 成分速度分布の時系列情報 (4 次元 PTV) 計測が試みられている⁽¹³⁶⁾⁽¹³⁷⁾。レーザシートを高速に走査する擬似 4 次元 PTV⁽¹³⁸⁾ も行われて

おり、速度情報の時空間微分量を高精度で計測できる日も近いかもしれない。

一方、マクロスケールの4次元(3次元空間+時系列)計測手法をマイクロPIVに応用する試みも行われている。奥行き方向の位置計測のために粒子像のボケを使う試み⁽¹³⁹⁾、三孔ピンホール絞子を使う試み⁽¹⁴⁰⁾、対物レンズを上下させる試み⁽¹⁴¹⁾、ホログラムを使う試み⁽¹⁴²⁾がなされている。マイクロ流動も多次元計測が必要になってきており、計測手法の確立が望まれる。なお、ステレオPIVをマイクロスケールに応用する試みもなされている⁽¹⁴³⁾。

マイクロスケールよりもさらに小さなナノスケールの流動計測も行われるようになってきている。近接光(エバネッセント光)を用いた、壁近傍の100nm領域の速度場計測⁽¹⁴⁴⁾や、3次元PTV⁽¹⁴⁵⁾が試みられている。トレーサ粒子として、6nm程度のQD(Quantum Dot)を使うことができるという報告もある⁽¹⁴⁶⁾。近接光を使い100nmを照明するといっても、視野は1000nm程度ある。一方、電子顕微鏡を使って、透過画像ではあるが、カーボンナノチューブ内の70nmスケールの流体挙動を可視化した事例⁽¹⁴⁷⁾も行われるようになってきた。ナノ流動は、今後の重要なテーマの一つであろう。

PIV以外の流れの可視化計測としては、炎のLIF計測をダブルパルスで行い、その移動情報を計測した事例⁽¹⁴⁸⁾が報告されている。また、圧力計測手法としての感圧塗料(PSP)も広く使われるようになり、応答性に優れた表面の開発⁽¹⁴⁹⁾や、工業規模の応用事例⁽¹⁵⁰⁾などの報告がある。速度に比例したドップラーシフトをアイオダインの吸収を利用して計測するDGVを1台のカメラで計測する試み⁽¹⁵¹⁾もなされている。高速度カメラの応用としては、スペックルトモグラフィーを使って密度の3次元分布を15kHzで計測した事例の報告もある⁽¹⁵²⁾。なお、流体の直接計測ではないが、モーションキャプチャを用いて、実際の競技場スケールにおける、ラグビーボールの空中軌道や変形、回転を計測した報告⁽¹⁵³⁾もあり、スポーツ分野など異分野への応用も期待される。

[岡本 孝司 東京大学]

文 献

- Wu, J.S., Chou, S.Y., Lee, U.M., Shao, Y.L. and Lian, Y.Y., Parallel DSMC Simulation of a Single Under-Expanded Free Orifice Jet from Transition to Near-Continuum Regime, *J. Fluids Eng.*, 127-6 (2005), 1161-1170.
- Maltsev, R.V. and Rebrov, A.K., Supersonic Transverse Rarefied Gas Flow Past a Strip, *Fluid Dynamics*, 40-1 (2005), 140-147.
- Plotnikov, M.Yu. and Rebrov, A.K., Direct Statistical Simulation of a Supersonic Flow of a Binary Mixture of Rarefied Gases around a Transversely Positioned Cylinder, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 46-5 (2005), 658-663.
- Naris, S. and Valougeorgis, D., The Driven Cavity Flow Over the Whole Range of the Knudsen Number, *Phys. Fluids*, 17-9 (2005), 1-12.
- Struchtrup, H., Failures of the Burnett and Super-Burnett Equations in Steady State Processes, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 17-1 (2005), 43-50.
- Yasuda, S., Takata, S. and Aoki, K., Evaporation and Condensation of a Binary Mixture of Vapors on a Plane Condensed Phase: Numerical Analysis of the Linearized Boltzmann Equation, *Phys. Fluids*, 17-4 (2005), 047105-1-047105-19.
- Zhang, Y., Qin, R. and Emerson, D.R., Lattice Boltzmann Simulation of Rarefied Gas Flows in Microchannels, *Phys. Rev. E*, 71-4 (2005), 1-4.
- Morini, G.L., Lorenzini, M. and Spiga, M., A criterion for Experimental Validation of Slip-Flow Models for Incompressible Rarefied Gases through Microchannels, *Microfluidics and Nanofluidics*, 1-2 (2005), 190-196.
- Shen, C., Use of the Degenerated Reynolds Equation in Solving the Microchannel Flow Problem, *Phys. Fluids*, 17-4 (2005), 046101-1-046101-6.
- Tzeng, P.Y. and Liu, M.H., Direct-simulation Monte Carlo Modeling on Two-dimensional Rayleigh-Bernard Instabilities of Rarefied Gas, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 47-8 (2005), 805-823.
- Heo, J.S. and Hwang, Y. K., Numerical Study on the Low Density Gas Flows in a Plasma Etch Reactor, *J. Mechanical Science and Technology*, 19-1 (2005), 181-188.
- 森 英男・新美智秀・秋山勇雄・都筑 巧, 超音速自由分子流における非ボルツマン回転エネルギー分布の実験的解析, 日本機械学会論文集, 71-702, B (2005), 436-441.
- 坪井伸幸・松本洋一郎, 希薄領域における極超音速非平衡流中の衝撃波と境界層の干渉 (第5報, 平板上の流れ場における回転温度の非平衡), 日本機械学会論文集, 71-702, B (2005), 420-427.
- Tsuboi, N. and Matsumoto, Y., Experimental and Numerical Study of Hypersonic Rarefied Gas Flow over Flat Plates, *AIAA J.*, 43-6 (2005), 1243-1255.
- 松本裕昭, DSMC法における非弾性衝突モデルの輸送係数特性 (第2報, ParkerのRotational Energy Gain Functionの改良), 日本機械学会論文集, 71-706, B (2005), 1588-1595.
- Niimi, T., Yoshida, M., Kondo, M., Oshima, Y., Mori, H., Egami, Y., Asai, K. and Nishide, H., Application of Pressure-sensitive Paints to Low-pressure Range, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 19-1 (2005), 9-16.
- 鳥居大地・小原 拓, 固体壁面管でせん断を受ける極薄液膜の分子動力学的研究 (固液界面におけるエネルギー/運動量伝搬に及ぼす固体結晶面の影響), 日本機械学会論文集, 71-710, B (2005), 2507-2514.
- 芝原正彦・功刀資彰・向 勝己・香月正司, ナノスケールの構造物間隔が界面のエネルギー伝達に与える影響, 日本機械学会論文集, 71-708, B (2005), 2108-2111.
- 芝原正彦・功刀資彰・向 勝己・香月正司, ナノスケールの構造物間隔が固液界面近傍の分子挙動に与える影響, 日本機械学会論文集, 71-708, B (2005), 2112-2116.
- 伊藤靖仁・小森 悟, マイクロ流路内の流体混合反応に与える振動の効果, 日本機械学会論文集, 71-703, B (2005), 862-868.
- Nakahara, M., Kido, H. and Nakashima, K., A Study on the Local Flame Displacement Velocity of Premixed Turbulent Flames, *JSME International Journal*, 48-1, B (2005), 164-171.
- Forliti, D.J. and Strykowski, P.J., Controlling Turbulence in a Rearward-Facing Step Combustor Using Counter-current Shear, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 127-3 (2005), 438-448.
- Dahm, W.J.A., Effects of Heat Release on Turbulent Shear Flows, Part 2. Turbulent Mixing Layers and the Equivalence Principle, *J. Fluid Mech.*, 540 (2005), 1-19.
- Kitagawa, T., Effects of Pressure on Burning Velocity and Instabilities of Propane-Air Premixed Flames, *JSME International Journal*, 48-1, B (2005), 2-8.
- Ishino, Y. and Ohiwa, N., Three-Dimensional Computerized Tomographic Reconstruction of Instantaneous Distribution of Chemiluminescence of a Turbulent Premixed Flame, *JSME International Journal*, 48-1, B (2005), 34-40.
- 山本和弘・東城博之・小沼義昭, 部分予混合雰囲気中に形成された火炎の燃え広がりの実験と解析, 日本燃焼学会誌, 47-140 (2005), 129-136.
- 門脇 敏, 鈴木洋史, 小林秀昭, 非一様速度場を伝播する予混合火炎の数値解析一動的挙動に及ぼす固有不安定性の影響一, 日本燃焼学会誌, 47-141 (2005), 220-226.
- Zhang, Y., Shimokuri, D., Mukae, Y. and Ishizuka, S., Flow Field in Swirl-Type Tubular Flame Burner, *JSME International Journal*, 48-4, B (2005), 830-838.
- Nakamura, D., Nagata, H., Totani, T. and Kudo, I., Research on Dynamic Response of Catalytic Heat Release Rate on Platinum Wire to a Shock Wave in Hydrogen-Air Mixture, *JSME International Journal*, 48-1, B (2005), 144-150.
- Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R. and Katsuki, M., Combustion Mechanism of Liquid Fuel Spray in a Gaseous Flame, *Phys. Fluids*, 17-123301 (2005), 123301-1-123301-14.
- Reveillon, J. and Vervisch, L., Analysis of Weakly Turbulent Dilute-Spray Flames and Spray Combustion Regimes, *J. Fluid Mech.*, 537 (2005), 317-347.
- Arienti, M. and Shepherd, J.E., A Numerical Study of Detonation Diffraction, *J. Fluid Mech.*, 529 (2005), 117-146.
- Kasimov, A.R. and Stewart, D.S., Asymptotic Theory of Evolution and Failure of Self-Sustained Detonations, *J. Fluid Mech.*, 525 (2005), 161-192.
- Watt, S.D. and Sharpe, G.J., Linear and Nonlinear Dynamics of Cylindrically and Spherically Expanding Detonation Waves, *J. Fluid Mech.*, 522 (2005), 329-356.
- 丹野英幸・小寺正敏・伊藤勝宏・佐藤和雄・小室智幸・高橋政浩, 極短時間内での大型スクラムジェット模型の力計測, 日本機械学会論文集, 71-706, B (2005-6), 1596-1602.
- Schluter, J.U., Wu, X., Kim, S., Shankaran, S., Alonso, J.J. and Pitsch, H., A Framework for Coupling Reynolds-Averaged with Large-Eddy Simulations for Gas Turbine Applications, *Trans. ASME*, 127-4 (2005), 806-815.
- Yeung, P.K., Donzis, D.A. and Sreenivasan, K.R., High-Reynolds-number Simulation of Turbulent Mixing, *Phys. Fluids*, 17-8 (2005), 081703.
- Brethouwer, G., The Effect of Rotation on Rapidly Sheared Homogeneous Turbulence and Passive Scalar Transport. Linear Theory and Direct Numerical Simulation, *J. Fluid Mech.*, 542 (2005), 305-342.
- Morinishi, Y. and Tamano, S., Study on Differences in Turbulence Statistics between Compressible and Incompressible Low-Reynolds Number Turbulent Channel Flows Using Semi-local Scaling, *JSME International Journal*, 48-4, B (2005), 743-749.
- Sibilla, S. and Beretta, C.P., Near-wall Coherent Structures in the Turbulent Channel Flow of a Dilute Polymer Solution, *Fluid Dynamic Research*, 37-3 (2005), 183-202.
- Ciardi, M., Sagaut, P., Klein, M. and Dawes, W.N., A Dynamic Finite Volume Scheme for Large-eddy Simulation on Unstructured Grids, *J. Comput. Phys.*, 210-2 (2005), 632-655.
- Niklas, A., Lars-Erik, E. and Lars, D., Large-eddy Simulation of Subsonic Turbulent Jets and Their Radiated Sound, *AIAA J.*, 43-9 (2005), 1899-1912.

- (43) Oliver, F.・飯田 誠・鈴木正巳・荒川忠一, LES大規模計算による風車翼の流れと騒音予測, 日本機械学会論文集, 71-701, B (2005), 177-190.
- (44) Evans, G., Greif, R., Siebers, D. and Tieszen, S., Turbulent Mixed Convection from a Large, High Temperature, Vertical Flat Surface, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26-1 (2005), 1-11.
- (45) Saha, A.K. and Acharya, S., Unsteady Rans Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in Ribbed Coolant Passages of Different Aspect Ratios, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48 (2005), 4704-4725.
- (46) Deck, S., Numerical Simulation of Transonic Buffet over a Supercritical Airfoil, *AIAA J.*, 43-7 (2005), 1556-1566.
- (47) 太田聖子・亀本喬司, 渦法における渦要素導入条件の解析精度に与える影響, 日本機械学会論文集, 71-702, B(2005), 381-388.
- (48) Yu, D. and Girimaji, S.S., DNS of Homogenous Shear Turbulence Revisited with the Lattice Boltzmann Method, *J. Turbulence*, 6 (2005), 1-17.
- (49) Wei, T., Fife, P., Klewicki, J. and McMurtry, P., Properties of the Mean Momentum Balance in Turbulent Boundary Layer, Pipe and Channel Flows, *J. Fluid Mech.*, 522 (2005), 303-327.
- (50) Fransson, J.H.M., Matsubara, M. and Alfredsson P.H., Transition Induced by Free-stream Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 527 (2005), 1-25.
- (51) Dimotakis, P.E., Turbulent Mxing, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 37 (2005), 329-56.
- (52) Murzyn, F. and Belorgey, M., Experimental Investigation of the Grid-generated Turbulence Features in a Free Surface Flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29 (2005), 925-935.
- (53) Md. Mahbub Alam, Sakamoto, H. and Zhou, Y., Determination of Flow Configurations and Fluid Forces Acting on Two Staggered Circular Cylinders of Equal Diameter in Cross-flow, *J. Fluids & Struct.*, 21-4 (2005), 363-394.
- (54) Khalil A. Kairouz, Hamid R. Rahai, Turbulent Junction Flow with an Upstream Ribbed Surface, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26-5 (2005), 771-779.
- (55) Pfadler, S., Loffler, M., Dinkelacker F. and Leipertz A., Measurement of the Conditioned Turbulence and Temperature Field of a Premixed Bunsen Burner by Planar Laser Rayleigh Scattering and Stereo Particle Image Velocimetry, *Experiments in Fluids*, 39-2 (2005), 375-384.
- (56) 山本和弘・井上 聡・山下博史・下栗大右・石塚 悟・小沼善昭, 乱流燃焼場のPIV計測と乱れスケールの算出, 日本機械学会論文集, 71-711, B (2005), 2741-2747.
- (57) Ciappi, E. and Magionesi, F., Characteristics of the Turbulent Boundary Layer Pressure Spectra for High-speed Vessels, *J. Fluids & Struct.*, 21-3 (2005), 321-333.
- (58) Krause, N., Zahringer, K. and Pap, E., Time-resolved Particle Imaging Velocimetry for the Investigation of Rotating Stall in a Radial Pump, *Experiments in Fluids*, 39 (2005), 192-201.
- (59) 古川明徳・高野倫矢・重光 亨・大熊九州男・渡邊 聡, 二重反転軸流ポンプのケラシ壁面静圧計測と翼列間干渉, 日本機械学会論文集, 71-711, B (2005), 2710-2716.
- (60) 八木高伸・William Yang・石川大輔・須川広幸・岩崎清隆・梅津光生, ステレオPIV方を用いたSpiral Vortex型人工心臓内の拍動流の3次元可視化解析, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 309-310.
- (61) 木暮尚登・西田正浩・山根隆志・宮越貴之・山崎健二, オープンベン遠心式人工心臓の流れの可視化解析, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 349-350.
- (62) 阿久津敏乃介・斉藤 淳・福田孝将・今井亮太・森 一将, 各種機械的人工僧帽弁二葉弁デザインが心室三次元流れ場に与える影響, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 129-130.
- (63) 伊南村隆夫・柳岡英樹・山崎純一・福田幾夫・皆川正仁・福井康三, PIV法による大動脈弓内の血流の可視化(カニキュレを挿入した場合), 日本機械学会論文集, 71-710, B (22005) 1-8.
- (64) Bates, C.J., Grand, A. and Bates, J.L., Flow Instabilities in a Graft Anastomosis: Flow Reynolds Number 350, *Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Williamsburg, (2005-6), 759-764.
- (65) 中村匡徳・和田成生・山口隆美, 僧帽弁の開口方式が左心室血流拍手特性に与える影響, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 121-122.
- (66) 谷口 恒・梁夫友・藤本眞一・姫野龍太郎・劉 浩, 左心室の実形態・弁の開閉・収縮拡張機能を考慮した血流ダイナミクスの計算力学解析, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 277-278.
- (67) Iwase, H., Liu Hao, Fujimoto, S. and Himeno, R., Computational Modeling of Left Ventricle Dynamics and Flow Based on Ultrasonographic Data, *JSME International Journal*, 46-4, C (2003), 1321-1329.
- (68) 岡邦 治・ほか, 心臓血管系0次元モデルと大血管3次元モデルのカップリングによる血流動態の解析, 日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集 CD-ROM, No.05-32 (2005-10), 1307.
- (69) 谷口 恒・ほか, 心臓血管系0次元モデルと左室3次元モデルのカップリングによる血流動態予測, 日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集 CD-ROM, No.05-32 (2005-10), 1308.
- (70) 江口和樹・ほか, 胸部大動脈瘤の発症と進展が壁せん断応力分布に及ぼす影響, 日本流体力学会年會2004講演論文集, B114, (2004-8), 54-55.
- (71) 川島康弘・ほか, 高精度医療画像のボクセルデータによる血液-血管連成解析システムの開発, 日本流体力学会年會2004講演論文集, B122, (2004-8), 58-59.
- (72) http://www.sml.k.u-tokyo.ac.jp/menu_bio-sim.html
- (73) 杉浦清之・ほか, 分子メカニズムに基づく心筋細胞, および心臓のシミュレーション, 計測自動制御学会第18回生体・生理工学シンポジウム講演論文集, (2003-10), 153.
- (74) 小山智億・姫野龍太郎・劉 浩, 循環系マルチスケールシミュレーションのための全身動脈血管系の三次元計算力学的モデルの構築, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 279-280.
- (75) 山口隆平・鳥栖晃弘・灰田 彩・中澤伸彦・氏家 弘・谷下一夫, 前交通動脈りゅうの発生・進展および発達に伴う動脈りゅう内の壁せん断応力, 日本機械学会論文集, 71-706, B (2005), 73-78.
- (76) 梅澤賢一・山口隆平・氏家 弘, 動脈瘤発生部位の相違による瘤内壁せん断応力への影響, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 113-114.
- (77) 橋本将志・大場謙吉・田地川勉, 光造形装置を用いたヒト冠狀動脈実形状モデルの作成と生体実験, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66(2006-1), 285-286.
- (78) 大島まり・ほか, IMAGE-BASEDSIMULATIONによる脳血管形状の血行力学に与える影響の検討, 日本機械学会論文集, 70-697, A (2004), 86.
- (79) 鳥居 亮・ほか, Image-Based血流数値シミュレーションにおける壁面弾性の影響, 日本機械学会論文集, 70-697, A (2004), 70.
- (80) 福成 洋・大島まり・鳥居 亮・渡邊浩志・久田俊明, 脳動脈瘤の流体構造連成シミュレーションにおける非線形血管壁モデルの影響, 日本機械学会第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No.05-66 (2006-1), 287-288.
- (81) 横井研介・ほか, 複数の脳動脈瘤を伴う血流の数値シミュレーション, 日本流体力学会第17回数値流体力学シンポジウム講演論文集, F1-1 (2003-12), 220.
- (82) 船崎健一・山田和豊・中村 豪, 動脈瘤を伴う脳動脈分岐部まわりの非ニュートン性流体解析, 日本機械学会論文集, 72-713, B (2006), 1-8.
- (83) 若瀬英仁・ほか, 医用画像を用いたモデリング手法の開発と数値血流解析, 理化学研究所理研シンポジウム生体力学シミュレーション研究終了報告, (2004-3), 3.
- (84) Himeno, R. and Yokota, H., Computational Biomechanical Project and Voxel Human Model at RIKEN, *Proceeding of Fifth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2005) -IFS-JAXA Joint Symposium-*, (2005-12), 34-35.
- (85) 新宅博文・川野聡恭・鈴木孝明・神野伊策・小寺秀俊, マイクロチャネルにおける液体微粒化法とその特性解析, 日本機械学会論文集, 71-708, B (2005), 2007-2012.
- (86) 幕田寿典・竹村文男・飛原英治・松本洋一郎・庄司正弘, 超音波場における均一微細気泡生成過程(第2報, 均一気泡生成現象における安定生成条件), 日本機械学会論文集, 71-710, B (2005), 2465-2470.
- (87) 田部井勝福・春山周夏・山口修市・白井鉦行・高草木文雄, 旋回噴流によるマイクロバブル発生に関する研究(光透過率を用いた気泡分布計測と発生気泡特性), 日本機械学会論文集, 71-703, B (2005), 848-853.
- (88) 杉岡健一・小森 悟, 一様せん断流中の球形液滴に働く抗力と揚力の評価, 日本機械学会論文集, 71-706, B (2005), 1519-1526.
- (89) Merle, A., Legendre, D. and Magnaudet, J., Forces on a High-Reynolds-number Spherical Bubble in a Turbulent Flow, *J. Fluid Mech.*, 532 (2005), 53-62.
- (90) 高比良裕之・高橋光夫, Sanjoy BANERJEE, 微小ならびに通常重浴におけるせん断流れ場中での気泡の成長・分離に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 71-705, B (2005), 1256-1264.
- (91) 宮本悠樹・齋藤隆之, 単一上昇気泡の界面運動とジグザグ上昇運動との相互関係, 日本機械学会論文集, 71-705, B (2005), 1307-1313.
- (92) 渡部正夫・真田俊之, 鉛直線上に配置された2気泡の挙動に関する研究, 日本機械学会論文集, 71-702, B (2005), 389-396.
- (93) 杉山和靖・高木 周・松本洋一郎, 気泡半径運動に対する熱的減衰効果の新たな次元縮約モデル(第2報, 数値シミュレーションによるモデルの検証), 日本機械学会論文集, 71-705, B (2005), 1239-1246.
- (94) Subramniam, A.B., Abkarian, M., Mahadevan, L. and Stone, H.A., Non-spherical Bubbles, *Nature*, 438 (2005), 930.
- (95) Takahashi, M., ζ Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas-Water Interface, *J. Phys. Chem. B*, 109-46 (2005), 21858-21864.
- (96) 高田尚樹・富山明男, PHASE-FIELD MODELに基づく二相流数値計算手法, 日本機械学会論文集, 71-701, B (2005), 117-124.
- (97) Kim, J., A Continuous Surface Tension Force Formulation for Diffuse-interface Models, *J. Comput. Phys.*, 204-2 (2005), 784-807.
- (98) 北川石英・菱田公一・児玉良明, マイクロバブルチャネル流中の乱流変調の粒子画像複合計測, 日本機械学会論文集, 71-701, B (2005), 44-51.

- (99) 大石義彦・村井祐一・福田浩士・児玉良明・山本富士夫, 気泡を含む水平チャネル乱流の壁面摩擦抵抗 (気液界面挙動と局所壁面せん断力の同期計測実験), 日本機械学会論文集, 71-706, B (2005), 1542-1549.
- (100) 山田哲史・天野誉之・南川久人, 微細気泡群の分布と水への酸素供給効果との関係に関する研究, 日本機械学会論文集, 71-705, B (2005), 1301-1306.
- (101) Matsumoto, Y., Allen, J., Yoshizawa, S., Ikeda, T., Kaneko Y.ほか, Medical Ultrasound with Microbubbles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29-3 (2005), 255-265.
- (102) 山野井一郎・玉川雅章, 衝撃波 DDS のための曲率弾性壁近傍での気泡変形挙動解析 (第2報, 気泡内気体と曲率弾性壁の影響), 日本機械学会論文集, 71-707, B (2005), 1762-1767.
- (103) Kaneko, Y., Maruyama, T., Takegami, K., Sawabe, K., Watanabe, T., Mitsui, H., Hanajiri, K., Nagawa, H. and Matsumoto, Y., Use of a Microbubble Agent to Increase the Effects of High Intensity Focused Ultrasound on Liver Tissue, *European Radiology*, 15-7 (2005), 1415-1420.
- (104) Chatterjee, D., Jain, P. and Sarkar, K., Ultrasound-mediated Destruction of Contrast Microbubbles Used for Medical Imaging and Drug Delivery, *Phys. Fluids*, 17-100603 (2005), 100603-1-100603-8.
- (105) Lacrois, D., The Mont Blanc Tunnel Fire: What Happened and What has been Learned, *Safety in Road and Rail Tunnels (Fourth International Conference)*, (2001-4), 3-15.
- (106) Eberl, G., The Tauern Tunnel Incident: What Happened and What has to be Learned, *Safety in Road and Rail Tunnels (Fourth International Conference)*, (2001-4), 17-28.
- (107) Brichet, N., Weatherill, A. and Crausaz, B., The New Ventilation System of the Mont Blanc Tunnel Active Smoke Control: From Simulation to Successful Operation, *Tunnel Fire (Fourth International Conference)*, (2002-12), 95-104.
- (108) Guigas, X., Weatherill, A. and Trotter, Y., The New Ventilation Systems of the Mont Blanc Tunnel Specificities and Performances of the Fore Ventilation, *Tunnel Fire (Fourth International Conference)*, (2002-12), 105-113.
- (109) http://europa.eu.int/comm/transport/road/roadsafety/roadinfra/tunnels/index_en.htm
- (110) Mizuno, A., Iida, A. and Konno, A., Role of Simulation in Safe Tunnel Ventilation Design, *Tunnel Management International*, 7-3 (2004), 31-35.
- (111) Lonnermark, A. and Ingason, H., Gas Temperature in Heavy Goods Vehicle Fires in Tunnels, *Fire Safety Journal*, 40-3 (2005), 506-527.
- (112) Ingason, H. and Lonnermark, A., Heat Release Rate from Heavy Goods Vehicle Trailer Fires in Tunnels, *Fire Safety Journal*, 40-7 (2005), 646-668.
- (113) Vauquelin, O. and Telle, D., Definition and Experimental Evaluation of the Smoke "Confinement Velocity" in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, 40-4 (2005), 320-330.
- (114) Hu, L.H., Huo, R., Li, Y.Z., Wang, H.B. and Chow, W.K., Full-scale Burning Tests on Studying Smoke Temperature and Velocity along a Corridor, *W.K. Tunneling and Underground Space Technology*, 20 (2005), 223-229.
- (115) Lee, S.R. and Ryou, H.S., An Experimental Study of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires, *Journal of Fire Science*, 23-2 (2005), 119-138.
- (116) Hwang, C.C. and Edwards, J.C., The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires—a Computer Simulation, *Fire Safety Journal*, 40-3 (2005), 213-244.
- (117) 佐藤博臣・栗岡均・今関修・田中均, CFDによる散水設備作動時のトンネル空間熱性状予測, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, 9 (2004-1), 69-78.
- (118) Kunikane, Y., Kawabata, N., Okubo, K. and Shimoda, A., Influence of Stationary Vehicles on Backlayering Characteristics of Fire Prume in a Large Cross Section Tunnel, *Proceedings of the 11th Int. Symp. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (2003-7), 78-101.
- (119) Kawabata, N., Kunikane, Y., Yamamoto, M., Takekuni, K. and Tachibana, A., Numerical Simulation Smoke Descent in a Tunnel Fire Accident, *Tunnel Management International*, 6-4 (2003).
- (120) Kawabata, N., Matsuba, S., Ishikawa, T., Ohkubo, K., Shimoda, A. and Kunikane, Y., Simulation of Water Spray for Fire Accident in Large Cross Section Tunnel, *Proceedings of the Fifth International Conference Tunnel Fires*, (2004-10), 69-78.
- (121) BHR Group, *11th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels*, (2003-7).
- (122) 日本機械学会流体工学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集, No.05-32 (2005-10).
- (123) Howe, M.S., Iida, M., Fukuda, T. and Maeda, T., Aeroacoustics of a Tunnel-entrance Hood with a Rectangular Window, *J. Fluid Mech.*, 487 (2003), 211-243.
- (124) 飯田雅宣・菊地勝浩・福田 傑, 列車のトンネル入口緩衝工突入時に発生する圧縮波の解析と実験, 日本機械学会論文集, 70-700, B (2004), 3090-3097.
- (125) 福田 傑・小澤 智・飯田雅宣・鷹崎 徹・若林雄介, 長大スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形, 日本機械学会論文集, 71-709, B (2005), 2248-2255.
- (126) Auvity, B. and Bellenoue, M., Effects of an Opening on Pressure Wave Propagation in a Tube, *J. Fluid Mech.*, 538 (2005), 269-289.
- (127) Howe, M.S. and Cox, E.A., Reflection and Transmission of a Compression Wave at a Tunnel Portal, *J. Fluids & Struct.*, 20-8 (2005), 1043-1056.
- (128) 松林勝志・小坂敏文・北村敏也・山田伸志・Alan Vardy・Jim Brown, トンネル内圧縮進行波アクティブ制御による微気圧波消音, 騒音制御, 29-1 (2005), 53-60.
- (129) 菊地勝浩・田中靖幸・飯田雅宣, 列車が線橋を通過する際に観測される圧力波の現地試験, 日本機械学会論文集, 70-691, B (2004), 672-677.
- (130) Chen, J. and Katz, J., Elimination of Peak-locking Error in PIV Analysis Using the Correlation Mapping Method, *Meas. Sci. Technol.*, 16 (2005), 1605-1618.
- (131) Westerweel, J. and Scarano, F., Universal Outlier Detection for PIV Data, *Exp. Fluids*, 39 (2005), 1096-1100.
- (132) Stanislas, M., Okamoto, K., Kahler, C.J. and Westerweel, J., Main Results of the Second International PIV Challenge, *Exp. Fluids*, 39 (2005), 170-191.
- (133) Stephens, T.J., Haste, M.J., Parry, J.P., Toweres, D.P., Matsura, Y., Shi, Y.W., Miyagi, M. and Hand, D.P., Hollow-core Waveguides for Particle Image Velocimetry, *Meas. Sci. Technol.*, 16 (2005), 1119-1125.
- (134) Triep, M., Brucker, C. and Schroder, W., High-speed PIV Measurements of the Flow Downstream of a Dynamic Mechanical Model of the Human Vocal Folds, *Exp. Fluids*, 39 (2005), 232-245.
- (135) Sugii, Y., Okuda, R., Okamoto, K. and Madarame, H., Velocity Measurement of Both Red Blood Cells and Plasma of *in vitro* Blood Flow Using High-speed Micro PIV Technique, *Meas. Sci. Technol.*, 16 (2005), 1126-1130.
- (136) Hwang, T.G., Doh, D.H. and Okamoto, K., 4D-PTV (Measurement of an Impinged Jet with a Dynamic 3D-PTV), *J. Visualization*, 8-3 (2005), 245-252.
- (137) Ouellette, N.T., Xu, H. and Bodenschatz, E., A Quantitative Study of Three-dimensional Lagrangian Particle Tracking Algorithms, *Exp. Fluids*, 40 (2006), 310-313.
- (138) Hoyer, K., Holzner, M., Luthi, B., Guala, M., Liberzon, A. and Kinzelbach, W., 3D Scanning Particle Tracking Velocimetry, *Exp. Fluids*, 39 (2005), 923-934.
- (139) Park, J.S. and Kihm, K.D., Three-dimensional Micro-PTV Using Deconvolution Microscopy, *Exp. Fluids*, 40 (2006), 491-499.
- (140) Yoon, S.Y. and Kim, K.C., Three Dimensional Particle Tracking and Velocity Measurement in a Microchannel by Using an Aperture with Three Holes, *Proceedings of the 6th PIV*, (2005-9), S10-6.
- (141) Shinohara, K., Sugii, Y., Jeong, J.H. and Okamoto, K., Development of a Three-dimensional Scanning Microparticle Image Velocimetry System Using a Piezo Actuator, *Review Sci. Inst.*, 76 (2005), 106109.
- (142) Satake, S., Kunugi, T., Sato, K., Ito, T., Taniguchi, J. and Kanamori, H., Measurements of 3D Flow in Micro Pipe via Micro Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry, *Proceedings of the 6th PIV*, (2005-9), S07-4.
- (143) Lindken, R., Westerweel, J. and Wieneke, B., Development of a Self-Calibrating Stereo-micro-PIV System and its Application to the Three-Dimensional Flow in a T-Shaped Mixer, *Proceedings of the 6th PIV*, (2005-9), S06-5.
- (144) Sadr, R. Li H. and Yoda, M., Impact of Hindered Brownian Diffusion on the Accuracy of Particle-image Velocimetry Using Evanescent-wave Illumination, *Exp. Fluids*, 38 (2005), 90-98.
- (145) Kihm, K.D., Banerjee, A., Choi, C.K. and Takagi, T., Near-wall Hindered Brownian Diffusion of Nanoparticles Examined by Three-dimensional Ratiometric Total Internal Reflectance Fluorescence Microscopy (3D R-TIRFM), *Exp. Fluids*, 37 (2004), 811-824.
- (146) Pouya, S., Koochesfahani, M., Snee, P., Bawendi, M. and Nocera, D., Single Quantum Dot (QD) Imaging of Luid Flow Near Surfaces, *Exp. Fluids*, 39 (2005), 784-786.
- (147) Yazicioglu, A.G., Megaridis, C.M., Nicholls, A. and Gogotsi, Y., Electron Microscope Visualization of Multiphase Fluids Contained in Closed Carbon Nanotubes, *J. Visualization*, 8 (2005), 137-144.
- (148) Bladh, H., Brackmann, C., Dahlander, P., Denbratt, I. and Bengtsson P.E., Flame Propagation Visualization in a Spark-ignition Engine Using Laser-induced Fluorescence of Cool-flame Species, *Meas. Sci. Technol.*, 16 (2005), 1083-1091.
- (149) Kameda, M., Tabei, T., Nakakita, K., Sakaue, H. and Asai, K., Image Measurements of Unsteady Pressure Fluctuation by a Pressure-sensitive Coating on Porous Anodized Aluminium, *Meas. Sci. Technol.*, 16 (2005), 2517-2524.
- (150) Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K. and Watanabe S., Practical Pressure-sensitive Paint Measurement System for Industrial Wind Tunnels at JAXA, *Meas. Sci. Technol.*, 17 (2006), 359-366.
- (151) Wernert, P. and Martinez, B., Preliminary Application of a DGV System Using a Single Intensified Camera in a Supersonic Wind Tunnel, *J. Visualization*, 8-2 (2005), 161-168.
- (152) Ko, H.S., Ikeda, K., Ishikawa, M., Okamoto, K. and Kim, Y.J., Experimental Analysis of High-speed Helium Jet Flow Using Four-dimensional Digital Speckle Tomography, *Exp. Fluids*, 40 (2006), 442-451.
- (153) Griffiths, I., Evans, C. and Griffiths, N., Tracking the Flight of a Spinning Football in Three Dimensions, *Meas. Sci. Technol.*, 16 (2005), 2056-2065.