

7.

流体工学

7・1

まえがき

科学技術の発展とともに、流体工学の学術分野でも従来の基盤的研究課題のさらなる深化と、流体现象の複雑性と多様性に富む工学的研究課題への挑戦が展開されている。とくに、最近の重点研究分野とされるエネルギー、ナノ、バイオなどに関連して、時空間の多重スケールの諸問題に関心が注がれ、それらの解析手法やメカニズムの解明、応用への展開、短時間微小スケールの計測技術などに大きな進展が見られる。したがって、流体工学のこれからの動向として、流体融合領域での基礎と応用の研究が重要性を増すものと思われる。

ここでは、あらゆる流れに内在する根本的課題の「乱流」、産業や人間環境の拡大に関係する「圧縮性流れ」に加えて、流れの機能性を追求する「機能性流体」、流体融合分野の「生体内の流れ」、流れの本質を抽出するための「可視化情報」の各分野に焦点をあてて、2006年の研究動向を記している。なお、2006年度の「水力機械」、「空気機械」のおもな実績については、ターボ機械協会発行の会誌「ターボ機械」2007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。

[井小萩利明 東北大学]

7・2

乱流

7・2・1

一様等方性乱流

近年の計算機の高度な発達により高レイノルズ数のDNS (Direct Numerical Simulation, 直接数値計算) が可能となり、その恩恵に浴して理論的研究の検証が可能となった。乱流現象は本質的に複雑過ぎて捉えどころがない現象であったが、1941年にKolmogorov⁽¹⁾が局所等方性などいくつかの簡単な仮定を置くことで乱流のエネルギースペクトルの性質が説明できることを示したことで道が開けた。その後、間欠性を考慮した補正⁽²⁾、マルチフラクタル性⁽³⁾の発見など長い年月を経て乱流を理解しようとする理論的研究は発展してきている。しかしながら理論の検証が難しいという大問題があった。乱流の本質を研究しようとする場合、現象を単純化して取扱うことが多く、しばしば一様かつ等方的な場が仮定される。しかし、そもそも自然界においてそのような乱流はほとんど存在しないし、実験室において作り出すのも難しい⁽⁴⁾。これは、乱流現象のほとんどがせん断流において発生し、それは一様でも等方的でもないからである。また乱流理論の普遍性は、外部からのエネルギー供給を受け取る大きなスケールの運動と粘性の効果が顕著になる小さなスケールの運動とのスケール差、すなわちレイノルズ数が十分に大きいことが前提となるが、実験室において十分に大きなレイノルズ数の流れを作り出すのは困難で、特殊な工夫⁽⁵⁾が必要となる。自然界を見渡せば十分に大きなレイノルズ数の流れは容易に見つかるものの、実験条件をコントロールすることが難しいだけではなく、測定自体が困難を極める。また、得られるデータも少数の観測点における速度変動のスペクトルなどに限定されてしまう⁽⁶⁾。

これに対して数値計算では、周期境界条件を用いることで一様等方的な場を容易に設定でき、流れ場のあらゆる場所で速度、圧力等の解析に必要なすべてのデータが得られるという利点がある。数理モデルに頼ることなくナビエ-ストークス方程式を直接解くDNSにおいては、十分に高いレイノルズ数が得られな

いという問題を長年かかえてきたが、地球シミュレータ⁽⁷⁾など世界最高速のスーパーコンピュータを駆使することで、理論検証に用いることができるレベルのレイノルズ数計算が実現できている⁽⁸⁾。このため従来できなかった乱流理論の検証が可能となりつつあり、CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) という極めて強力な道具を獲得したことで、今後の乱流の理論的研究に大きな発展が期待されている。たとえば、数値計算⁽⁹⁾により明らかとなった「乱流は細かい繊維状の渦構造(要素渦)の集合体」という乱流像は、従来の乱流の概念をくつがえすものである。2006年9月には名古屋大学において“Computational Physics and New Perspective in Turbulence”のテーマでIUTAMシンポジウムが開かれ⁽¹⁰⁾、最新の乱流研究の成果が披露された。

7・2・2

乱流境界層

摩擦抵抗低減は常に重要な問題であるため乱流境界層に対する関心は高い。Klineら⁽¹¹⁾に始まる組織的構造に関する研究は、初期の風洞実験一辺倒からLES, DNSによる数値計算に重心が移動したが、目標とされた大幅な摩擦抵抗低減はいまだに実現していない。乱流境界層中には流下してくる大規模渦構造⁽¹²⁾と壁面近傍のストリーク構造という2つの注目すべき構造があるが、両者の関係についてはまだ議論が続いている。ストリーク構造とは壁面近傍において速度の速い/遅い領域が主流方向に細長く伸びて存在する構造を指す。乱流境界層におけるストリーク構造の役割が従来考えられてきた以上に大きい可能性もあり、風洞実験において人工的にストリーク構造を作り出しその安定性を調べた研究⁽¹³⁾などが注目される。

制御に関しては、先行したアメリカに対抗する形で日本においてもMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を活用することで乱流の構造を制御し摩擦抵抗低減を図る意欲的なプロジェクト⁽¹⁴⁾が推進された。制御システムに関わる一連のデバイスの開発を通して、数値計算による制御方法のシミュレーション技術の向上やマイクロセンサ類の応答特性の改善など大きな成果が得られ、大きくはないものの摩擦抵抗の低減効果も得られている。今後は、制御システムの高度集積化や高レイノルズ数における効率の良い制御アルゴリズムの開発、効率的なアクチュエータの開発などが課題である。

数値計算によって乱流境界層を研究しようとする場合、計算機能力の限界に起因するレイノルズ数不足の問題、計算領域が十分に大きく取れないといった問題をかかえる。しかしそれを逆手に取って、乱流が維持されるぎりぎりの大きさの小さな領域だけを対象とした計算を行い、その箱庭的計算領域 (Minimal channel)⁽¹⁵⁾で起こる現象を調べる試みも盛んに行われている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。自由度に制限があるものの乱流は維持されているため、本質的に重要な現象が明瞭な形で出現することが期待できる。問題はMinimal channelで観察される現象が、より自由度の大きい実際の乱流境界層中でも存在しているか否かである。河原ら⁽¹⁸⁾はこのMinimal channel内の流れに見られる周期性に関して理論的な解明を試みている。これは組織的構造が準周期的に出現する理由を説明する答えとなる可能性を有しており、この研究の今後の発展が期待される。2005年京都において“Symposium on Elementary Vortices and Coherent Structures: Significance in Turbulence Dynamics”のテーマで開かれたIUTAMのシンポジウム⁽¹⁹⁾において、注目すべき研究成果の発表が数多くあった。

[福西 祐 東北大学]

7・3

機能性流体

7・3・1

プラズマ流体

産業用プラズマ流体は、雰囲気圧が大気圧近傍から 10^{-5} 気圧程度の圧力に応じて熱プラズマ流と低温プラズマに大別され、高エネルギー密度、変物性、化学的高活性、電磁場制御性等、多くの機能性を有する流体である。近年では、マイクロプラズマの基礎研究や大気圧非平衡プラズマ流の環境・医療への応用研究が活発に展開している。(社)日本機械学会(以下、本会)流体工学部門においても、特にプラズマ流体の機能性に特化して、本会英文誌特集号⁽²⁰⁾と機能性流体工学の先端融合化に関する研究分科会成果報告書⁽²¹⁾を発行した。

最近のトピックスであるコロナ放電、グロー放電、誘電体バリア放電で発生する大気圧非平衡プラズマ流は、低温で化学反応性を有することから環境・エネルギー問題、医療・バイオ、材料プロセスなどへの応用が進められている。環境・エネルギー問題では、排気ガス中の NO_x の分解⁽²²⁾や粒子状浮遊物質の浄化⁽²³⁾、シックハウス症候群の要因とされている VOC の分解⁽²⁴⁾、空気清浄器の C_2H_4 の分解⁽²⁵⁾、燃料改質・水素製造⁽²⁶⁾などが、また医療応用では滅菌法の開発⁽²⁷⁾や滅菌機構の解明⁽²⁸⁾、材料プロセスでは表面処理による接合強度向上⁽²⁹⁾、クリーニング⁽³⁰⁾などが、航空分野ではプラズマアクチュエータによる流体制御⁽³¹⁾が行われている。これらの放電現象、化学反応場、流動場の物理現象の解明に向けた計測方法の開発や数値解析も報告されている⁽³²⁾。

[西山 秀哉・佐藤 岳彦 東北大学]

7・3・2

MR 流体, ER 流体

MR 流体 (Magneto-Rheological Suspensions, 磁気粘性流体) や ER 流体 (Electro-Rheological Fluids, 電気粘性流体) も含めた機能性流体の現状と今後についての展望がなされている⁽³³⁾。

MR 流体は、磁場下で磁気分極する強磁性体の数 μm サイズの微粒子を分散させた液体で、50~100kPa と非常に大きい降伏せん断応力を発生するのが特徴である。現在、アメリカ Lord 社から年間数 100t のオーダーの MR 流体が生産・販売されている。新規な MR 流体素材として、ナノ粒子とマイクロオーダーの粒子を混合した MR 流体⁽³⁴⁾、超分子 MR ポリマー⁽³⁵⁾、ゴム中に強磁性体粒子を分散させたエラストマー⁽³⁶⁾などが開発され、それらの磁気レオロジー特性が検討された。また、高せん断速度下⁽³⁷⁾や平行回転円盤間⁽³⁸⁾での MR 流体のレオロジー特性や流動形態が明らかにされた。MR 流体の応用機器としては、すでに MR ショックアブソーバが実際に乗用車 (GM 社 Cadillac, Audi 社 TT Coupe など) に搭載され実用化に至っている⁽³³⁾。また、すでに MR 流体を活用した研磨装置も実用化・商品化されている⁽³⁹⁾、MR 流体ジェットを活用したスポット研磨⁽⁴⁰⁾や管内面研磨のための MR 流体ベーススラリー⁽⁴¹⁾の開発も試みられている。

電場下で電気分極する数 μm サイズの微粒子を分散した粒子分散系 ER 流体については、各種流れ場での流動形態と関連づけてその ER 特性が論じられ⁽⁴²⁾、ER 流体のレオロジー特性を表す機械モデル⁽⁴³⁾についても検討された。また、液晶の均一系 ER 流体については、低分子混合液晶を用いた円管電極マイクロバルブの特性⁽⁴⁴⁾や低分子液晶の振動スクイーズ流れでの ER 特性⁽⁴⁵⁾などが明らかされた。

[中野 政身 山形大学]

7・3・3

磁性流体

3年ごとに国際会議が開催されており、2007年7月にも第11回会議が開催されている。本稿では、会議の報告は間に合っていない。国内では、毎年磁性流体連合講演会が開催され、第21回目の講演会が開催された⁽⁴⁶⁾。日本の研究は活発であり、高い水準にある。したがって、その論文集で研究動向がわかる。新しい粒子合成法、粒子径計測法、非一様磁場中での粒子の挙動解析、粒子凝集状態の経時変化、振動磁場中でのレオロジー特性などの研究が報告されている。さらに、磁性流体を用いた気泡速度計測、ダンパ、血液ポンプ、研磨技術などの応用研究も報告されている。雑誌論文では、棒状粒子の挙動をシミュレ-

ションによって明らかにした一連の研究が報告され⁽⁴⁷⁾、異方性を有する粒子でできた磁性流体の磁気粘性が報告され⁽⁴⁸⁾、磁性流体振り子が交流磁場によってねじり振動することも理論的に予測されている⁽⁴⁹⁾。また、磁性流体の界面現象⁽⁵⁰⁾は観る者に不思議な感情を抱かせ、それを芸術にまで昇華した研究⁽⁵¹⁾もある。

[須藤 誠一 秋田県立大学]

7・3・4

機能性混相流体

近年、超高温、極低温、強電磁場、ナノ・マイクロスケール等の特殊環境下における混相流応用機器の開発が進み、このような特殊な条件下に適用しうる高性能の機能性混相流体の効果的活用が要請されるようになってきた。

機能性混相流体分野で著しい発展を顕示している研究テーマはマイクロ・ナノバブルとバイオ混相流関連である。本領域で盛んに研究が行われる理由としては、産業界におけるマイクロバブル利用技術の要請が急激に高まったこと、マイクロ混相流体関連のデバイスの精密加工法が確立されてきたこと、マイクロ混相流に関する新たな数値計算手法と計測手法⁽⁵²⁾が開発されていること等によると考えられる。

とくに、マイクロバブルを用いた抵抗軽減に関する研究に関しては従来、層流域に関する研究が主であったが、最近では乱流域における抵抗軽減効果に関する研究に進展が見られ^{(53)~(55)}、高速船舶輸送分野における波及効果が期待される。さらに、新型のマイクロ・ナノバブル生成法として新素材である SPG 膜を用いたマイクロバブル生成法⁽⁵⁶⁾が開発され、メカニカルな要素を有しないシンプルな新気泡生成方式として注目を集めている。

[石本 淳 東北大学]

7・4

圧縮性流れ

7・4・1

流体実験・計測技術

高速気流の実験設備として、東京大学柏キャンパスに「極超音速熱風洞」が整備された⁽⁵⁷⁾。この風洞は、燃焼風洞 (最高温度 1800K) と極超音速風洞 (最高マッハ数 9) の2つのモードでの運転が可能であり、今後、スクラムジェットや再突入飛行体などの研究に威力を発揮すると思われる。風洞以外の実験手法として、近年、飛翔体やエンジンの実証機が開発が大学の手で行われるようになってきた。たとえば、筑波大学ほかによって、推力 700N 級バルスデトネーションエンジン (PDE) の実証機「TODOROKI」が製作され、水平滑走実験により PDE 作動時の推進効率等のデータが取得された実験⁽⁵⁸⁾などが注目される。いっぽう、新しい流れの制御手法として、プラズマを利用した流体駆動技術の研究が国内外で盛んになってきた。とくに、誘電体バリア放電を利用したプラズマアクチュエータ⁽⁵⁹⁾やプラズマシラセティックアクチュエータ⁽⁶⁰⁾は、理論検証のための基礎実験とともに、火星大気環境などのさまざまな環境下での作動特性が調べられている⁽⁶⁰⁾。計測技術としては、2005年度に引き続き、光学的な画像計測技術の進歩が著しい。色素薄膜を利用した面圧力計測法である感圧塗料 (PSP) については、これまでの定常計測に加えて、カルマン渦によって生じる円柱非定常圧力場⁽⁶¹⁾、自励振動するデルタ翼面上の非定常圧力場の測定⁽⁶²⁾などが試みられている。また、マイクロ流れについても、さまざまな診断技術が気体流に適用されるようになり、高クヌッセン数における圧力計測に適した感圧分子膜⁽⁶³⁾、LDA によるマイクロショックチューブ内の流速測定⁽⁶⁴⁾などの研究が行われている。マイクロ気体流の研究はデバイスの微小化に伴いその重要性を増しており、MEMS 技術やナノテクノロジーの発展とともに、今後ますます進展すると思われる。

[浅井 圭介 東北大学]

7・4・2

タービン流れ

ガスタービンならびに蒸気タービンの高効率化、軽量化、高負荷化、そして高信頼化の研究開発は、現在国内外で精力的に行われている^{(65)~(69)}。とくに、翼列干渉に伴う流れの剥離、翼列の失速、そして衝撃波干渉などをより正確に評価するためには、タービン静動翼干渉を完全に考慮した三次元非定常解析な

らびに計測が必要不可欠であると認識されている⁽⁶⁹⁾。たとえば、航空エンジンは高高度巡航時において、相対的に低レイノルズ数流れとなるため、翼負圧面での大規模剥離が起こるが、RANSに基づく新たな乱流モデルの提案⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾、LESに基づくWake/境界層干渉の数値計算⁽⁷²⁾、DNSに基づく境界層遷移の数値計算⁽⁷³⁾などにより、前置静翼列からのWakeとの干渉により生じる後置動翼翼負圧面の剥離や境界層の遷移に関する研究が報告されている。また、タービン単段内における低レイノルズ数非定常流れの詳細な計測⁽⁷⁴⁾、粗さを考慮した遷移モデル⁽⁷⁵⁾、下流の変動圧が低圧タービン翼境界層の遷移に与える影響の計測⁽⁷⁶⁾、タービン単段内のWake通過が性能に与える影響の非定常計算⁽⁷⁷⁾、RANSに基づく構造-非構造格子Hybrid法による多段非定常解析コード⁽⁷⁸⁾、タービン多段内のClockingが流れ場に与える非定常性の実験と計算の比較⁽⁷⁹⁾、高圧タービン3段分の非定常解析と実験との比較⁽⁸⁰⁾、冷却・シール・翼端漏れなどを考慮したDentonコードによるタービン全段流動解析⁽⁸¹⁾なども報告されている。

[山本 悟 東北大学]

7.4.3 CFDと極超音速流れ

非構造格子法の発達に伴って複雑な形状周りの流れ場解析が容易に実現されるようになり⁽⁸²⁾、設計現場でのCFDの活用が進んだ⁽⁸³⁾。いっぽう、乱流解析や音場解析ではより高い空間精度が要求されるようになった⁽⁸⁴⁾⁽⁸⁵⁾。衝撃波を含む圧縮性流れ場の高次精度解法として、Dengの提案した5次精度WCNS(Weighted Compact Nonlinear Scheme)⁽⁸⁶⁾⁽⁸⁷⁾が良く知られているが、コンパクト法に基づいたさらに高次精度スキームも提案されており⁽⁸⁸⁾⁽⁸⁹⁾、構造格子法の高次精度化の研究が大きく進展している。

形状適合性の高い非構造格子法は、複雑形状まわりの流れ場解析で威力を発揮する一方⁽⁸³⁾⁽⁹⁰⁾、流れ場の精密な解析では空間精度が不足している。一般的な有限体積法に基づく非構造格子法に対して、計算セル内に内部自由度を導入してセル内物理量の再構築を行うDiscontinuous Galerkin(DG)法⁽⁹¹⁾⁽⁹²⁾やSpectral Volume(SV)法⁽⁹³⁾⁽⁹⁴⁾が注目されている。DG法やSV法は非構造格子上でも所定の空間精度を達成できるが、いずれも計算負荷が高い。この欠点を陰解法⁽⁹⁵⁾⁽⁹⁶⁾やマルチグリッド法⁽⁹⁷⁾⁽⁹⁸⁾による収束率の改善、あるいは高効率並列計算の実現などで解決する努力が続けられている⁽⁹⁹⁾。

極超音速流れ場のCFD解析特有の問題として、化学反応流れ場やふく射流れ場の解析手法の確立が重要である。二温度熱化学反応モデル⁽¹⁰⁰⁾に代わる詳細な物理モデルの検討では、分子の回転準位や振動準位間の遷移を考慮するマスタ方程式を解き、強い非平衡域での混合気体の化学反応定数を求める研究や⁽¹⁰¹⁾⁽¹⁰²⁾、実際にマスタ方程式を解きながら流れ場を直接求める研究例が報告されている⁽¹⁰³⁾⁽¹⁰⁴⁾。いっぽう、大気圏突入のような極超音速流れで生じる衝撃層からのふく射は、波長依存的性が強く光学的厚みも大幅に変化するため、流れ場とふく射の連成が求められる。木星大気圏に突入したガリレオ探査衛星の解析例⁽¹⁰⁵⁾では、水素を主成分とする混合気体からのふく射と熱防御材のアブレーションの結果生じる炭素化合物によるふく射の吸収を記述するマルチバンドふく射モデルが導入された⁽¹⁰⁶⁾。また土星の衛星であるタイタンの大気圏に突入したホイヘンス探査プローブ突入飛行解析の例⁽¹⁰⁷⁾⁽¹⁰⁸⁾では、光線追跡法に基づくふく射強度導出と立体角積分の評価や、ふく射と流体の結合計算によるふく射冷却効果の考慮が、機体表面加熱率の算出に不可欠であることが示されている。

[澤田 恵介 東北大学]

7.5

生体内の流れ

7.5.1

マクロスケールの流れ

本節では、主に心臓血管系のマクロスケール流れを対象とし、近年の計算生体力学の進捗状況を解説する。心臓血管系の流れは、循環器系疾患の診断や治療の目的から盛んに研究されてきたが、①血液が流動する場の幾何学的形状の複雑性、②すべての流路の変形性、③心臓の拍動から全身的なレベルの血流調節までを含む非定常性、④血液を含む生体内の流動体の多相性に

もとづく非線形な構成則など、さまざまな困難が存在するため、現在でも多くの問題が未解決のままである。

①の幾何学的形状の複雑性は、超音波ドップラー流速計、MRIなどの計測技術の進歩や、digital subtraction angiographyなどの解析技術の進歩、コンピュータ能力の向上などにより、近年急速に研究が進んでいる。そして、特定の患者や疾患を対象にした医療画像をもとに解析を行う、イメージベースト計算流体力学が盛んに行われている。こうした解析結果は、実際の臨床データと比較することにより、血管障害に影響を及ぼす流体力学的因子を特定できるため興味深い。Shahcheraghiら⁽¹⁰⁹⁾は大動脈弓のイメージベースト計算流体力学を用い、動脈硬化症の初期病変が、非常に強いせん断応力と圧力が局所的に作用する部位と一致することを示した。また、Moriら⁽¹¹⁰⁾は胸部大動脈のイメージベースト計算流体力学を用い、動脈瘤の好発部位が強いせん断応力が局所的に作用する部位と一致することを示した。Moore⁽¹¹¹⁾らは脳動脈のイメージベースト計算流体力学を用い、2種類の病変を伴う形状と正常血管とで流量配分の比較を行っている。こうした研究は、今後の臨床への応用が期待される。

②と③の流路の変形性および流れの非定常性を考慮するためには、心臓や血管の変形と流れを連成して解く必要がある。通常、流れはEuler座標系で、壁の変形はLagrangian座標系で取扱い、Immersed Boundary(IB)法やArbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE)法などを用いて解析されている。Peskinらは1970年代よりIB法を用いた心臓の流体構造連成解析を行っているが、近年Adaptive Mesh Refinement(AMR)を導入し、心臓弁近傍の境界層解像度を上げることに成功している⁽¹¹²⁾。また国内では、久田らによってALE有限要素法に基づく流体-構造強連成解析手法を用いた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の開発が進められている⁽¹¹³⁾⁽¹¹⁴⁾。一方血管系ではイメージベーストの流体構造連成解析が始められており、deforming-spatial-domain/stabilized space-time(DSD/SST)法を用いたToriiらによる脳動脈瘤を対象とした解析⁽¹¹⁵⁾⁽¹¹⁶⁾や、ALE法とIB法の一種であるFictitious Domain(FD)法を併用したWoltersらの腹部大動脈の解析⁽¹¹⁷⁾などがある。このように、実際の複雑な血管形状の変形と流れの連成解析を可能にする数値解析手法が盛んに開発されている。また、内部の流動場だけでなく、脈派の伝播速度に着目した研究としてはFukuiら⁽¹¹⁸⁾のものがある。Fukuiらは狭さくや瘤を伴う3次元の血管を対象として固体-流体連成解析を行い、複雑な脈波の伝播現象を調べている。

④の血液の構成則に関する研究は、連続体モデル(Cassonモデルなど)を用いた非ニュートン流体の流れ解析が行われている⁽¹¹⁹⁾⁻⁽¹²¹⁾。近年、血液中の血球成分の運動を解析するミクロスケールの血流解析が盛んに行われているため、そこで得られた血流の微細構造の知見が、今後のマクロスケールの流れ解析に反映されることが期待される。

[山口 隆美 東北大学]

7.5.2

ミクロスケールの流れ

生体内のミクロスケールの流れ計測に関して、いくつかの新しい計測法が提案された。マイクロPIV計測では、壁に吸着した細胞周囲の流れ場と細胞変形を側面から捉える計測法が提案され⁽¹²²⁾、また、共焦点マイクロPIVによりキャピラリー内の微小液滴内の流動計測が行われた⁽¹²³⁾。また、大場らにより局所血流測定用の光ファイバLDVセンサの開発に関する研究が行われた⁽¹²⁴⁾。

ミクロスケールの流れの数値シミュレーションでは、粒子法に関する研究が多く見られた。血小板凝集による血栓の形成と崩壊に関するシミュレーションが粒子法により行われ⁽¹²⁵⁾、また、坪田らは、粒子法シミュレーションによって赤血球の変形能が血流に及ぼす影響について検討した⁽¹²⁶⁾。マイクロ流路内の細胞付着流れのシミュレーションが粒子法の一つであるMPS法によって行われた⁽¹²⁷⁾。海外では、数値シミュレーションを移植用医療デバイスの設計に応用する研究が行われ、冠動脈ステント周囲の流れ場の解析による溶血の予測⁽¹²⁸⁾や、大静脈に設置するフィルタ周囲の流れ解析⁽¹²⁹⁾などの研究が行われた。

マイクロ流路内の流れは、 μ -TASなどへの応用に関連して多くの研究が行われている。実験的研究としては、2色レーザ誘起蛍光法を用いたマイクロ流路内の温度分布の画像計測⁽¹³⁰⁾

や、デジタルホログラフィを用いたマイクロ流れの3次元計測に関する研究⁽¹³¹⁾が行われた。また、キャピラリー電気泳動に用いられるマイクロ流路内の電気浸透流に関する研究⁽¹³²⁾⁽¹³³⁾や、マイクロ流路内のDNAサスペンションの流動に関する研究⁽¹³⁴⁾などが行われた。

そのほか、微生物の高密度懸濁液内に電場を印加した場合の生物対流の制御⁽¹³⁵⁾や、ドラッグデリバリーの基礎研究として弾性壁近くに置かれたマイクロバブルに衝撃波を作用させた場合の気泡の変形挙動に関する研究⁽¹³⁶⁾などが行われた。

〔早瀬 敏幸 東北大学〕

7・6

可視化情報

計測や数値シミュレーションから得られるデータに潜在する対象の特徴的な構造や挙動に関する情報を効果的に捉えようとする可視化は、流体工学においても必要不可欠な方法論として定着している。この可視化技術がもつ社会的インパクトの大きさを産官学界に広く周知したのは、1987年に米国の支援を受けACM SIGGRAPHから発刊されたViSCレポートである。そのフォローアップとして、2006年1月に、NIH/NSF VRC (Visualization Research Challenge) レポート⁽¹³⁷⁾が発刊された。そこでは、『人間の空間的な推論・決定能力を比喩的に (metaphorically) 増強する (bootstrapping) すること』により、『パタンの検出や状況の的確な把握、タスクの優先順位付け』を可能にする、知識増幅技術としての可視化の性格を明らかにしている。しかし、測定装置や高性能計算環境、インターネット等の技術革新が進むにつれて、生成されるデータのサイズは加速度的に増大し、しかも多次元・多変量であり、時系列を扱い、多義性を有する点で、問題を本質的により困難なものにしている。VRCレポートでは、このような状況を情報ビッグバン (information big bang) とよび、過剰に複雑なデータを効果的に理解・利用するための可視化技術の開発は、今世紀に挑戦すべき最も価値ある課題であると位置づけている。

このレポートに示された可視化発見プロセスは、データと可視化、ユーザが三位一体となっている点で、ユーザの役割が明示されていなかった旧来のデータフローパラダイムから大きく前進した。可視化を通じて画像化されることで、知覚・認知されたデータはユーザの知識となり、その拡充を求めて、ユーザはさらに進んだ可視化のためのハードウェアやアルゴリズム、特定のパラメータ値等を仕様化し、改良された可視化に向けてフィードバックする仕組みが明確にモデル化されている。この新たな枠組みは、今後の可視化研究開発に対する多くの示唆を含む。まず、本質的にユーザの介入を許していることから、可視化技術のレベル向上は、半導体デバイスの性能向上を支配すると言われるムーアの法則には従わない。代わりに、人間の知覚、認識の本質や制約、効果に関する知覚心理学の研究成果の積極的な採用を勧めている。また、4KディスプレイやHDRビデオに代表される高解像度・高精細化技術、聴覚や力覚等の多感覚情報提示、ユビキタスデバイスによってもたらされる可搬性、高速ネットワーク利用等の急速な進展を常に迎入れることによって、可視化技術の継続的な向上が図れる。さらに、旧来の技法を系統化し、その適用可能性や効果を評価するために、可視化設計空間の工夫や専用ソフトウェアの導入が不可欠である。

VRCレポートは、望ましい可視化研究開発サイクルも提唱している。明確な問題と豊富なデータが際立ったソフトウェア開発を示唆する意味で、可視化研究者と専門分野の研究者の協同は、よりいっそう重要性を帯びてくる。可視化技法の効果の定性的/定量的評価を行ううえで、実世界のデータとタスクを蓄積するレポジトリを積極的に公開し、基礎的原理から出発した可視化研究を、過渡的な技法開発に止めず、実世界の応用問題に適用可能なレベルまで向上させることが肝要である。逆に下流の成果が上流の研究開発を促進させ、技法の深化や確固たる原理の確立に結実すると述べている。

このような状況のなか、統計、数学、知識表現、管理・発見技術、知覚・認知科学、決定科学等の知見を集約し、高度な対話的視覚インタフェースを用いた解析的推論を築く科学として、Visual Analytics (VA)⁽¹³⁸⁾が登場してきた。巨大で動的、時に自己矛盾を起こしているような複雑なデータから、予期さ

れることを検出するだけでなく、予期できないことも同時に発見し (To detect the expected, and to discover the unexpected)、時機を得た評価を効果的に共有して行動に移すことがVAの使命である。9.11(米国で起きた同時多発テロ事件)以来、国家安全のための有効な科学的方法論が渴望されている現在、VAはその最有力候補と目され、世界各地で活発な研究開発が巻き起こっている。

〔藤代 一成 東北大学〕

文 献

- (1) Kolmogorov, A. N., The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluids at Very Large Reynolds Numbers. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 30, (1941), 301-305. Reprinted in *Proc. R. Soc. Lond. A*, 434 (1991), 9-13.
- (2) Kolmogorov, A. N., A Refinement of Previous Hypotheses Concerning the Local Structure of Turbulence in a Viscous Incompressible Fluid at High Reynolds Number, *J. Fluid Mech.*, 13 (1962), 82-85.
- (3) Sreenivasan, K. R. and Meneveau, C., The Fractal Facets of Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 173 (1986) 357-386.
- (4) Hwang, W. and Eaton, J. K., Creating Homogeneous and Isotropic Turbulence Without a Mean Flow, *Experiments in Fluids*, 36-3 (2004), 444-454.
- (5) Makita, H., Realization of a Large-scale Turbulence Field in a Small Wind Tunnel, *Fluid Dynamics Research*, 8 (1991), 53-64.
- (6) Grant, H. L., Stewart, R. W. and Moilliet, A., Turbulence Spectra from a Tidal Channel, *J. Fluid Mech.*, 12 (1962), 241-268.
- (7) <http://www.es.jamstec.go.jp>
- (8) Kaneda, Y. and Ishihara, T., High-resolution Direct Numerical Simulation of Turbulence, *Journal of Turbulence*, 7-20 (2006), 1-17.
- (9) Tanahashi, M., Miyauchi, T. and Ikeda, J., Identification of Coherent Fine Scale Structure in Turbulence, *IUTAM Symp. Simulation and Identification of Organized Structures in Flows*, (1997), 131-140.
- (10) <http://www.fluid.cse.nagoya-u.ac.jp/iutam2006/>
- (11) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Runstadler, P. W., The Structure of Turbulent Boundary Layers. *J. Fluid Mech.*, 30 (1967), 741-773.
- (12) Fukunishi, Y. and Sato, H., Formation of Intermittent Region by Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer, *Fluid Dynamics Research*, 2 (1986), 113-124.
- (13) Konishi, Y. and Asai, M., Experimental Investigation of the Instability of Spanwise-periodic Low-speed Streaks, *Fluid Dynamics Research*, 34 (2004), 299-314.
- (14) http://www.turbulence-control.gr.jp/index_e.html
- (15) Jiménez, J. and Moin, P., The Minimal Flow Unit in Near-wall Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 225 (1991), 213-240.
- (16) Jiménez, J. and Pinelli A., The Autonomous Cycle of Near Wall Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 389 (1999), 335-359.
- (17) Toh, S. and Itano, A., Periodic-like Solution in Channel Flow, *J. Fluid Mech.*, 481 (2003), 67-76.
- (18) 河原源太・木田重雄・Lennaert, V. V., 乱流に埋め込まれた不安定周期運動, 日本機械学会論文集, 72-724, B (2006), 2870-2877.
- (19) Kida, S. (Editor), IUTAM Symposium on Elementary Vortices and Coherent Structures: Significance in Turbulence Dynamics, Proc. of the IUTAM Symposium held at Kyoto International Community House, Kyoto, Japan, 26-28 October 2004, *Fluid Mechanics and Its Applications*, 79 (2006), Springer.
- (20) Nishiyama, H. (Editor), Special Issue on Advanced Fusion of Functional Fluids Engineering, *JSME International Journal*, 48-3, B (2005), 366-455.
- (21) 西山秀哉・ほか, 日本機械学会流体工学部門, 機能性流体工学の先端融合化に関する研究分科会 (P-SCD345) 成果報告書, (2006), 3-60.
- (22) Okubo, M., Kuroki, T., Kitaura, K. and Yamamoto, T., Diesel Engine Emission Control Using Pulsed Corona Plasma-Wet Chemical Hybrid Process, *Journal of Environment and Engineering, JSME Electric Journal*, 1-1 (2006), 29-38.
- (23) Okubo, M., Arita, N., Kuroki, T. and Yamamoto, T., Carbon Particulate Matter Incineration in Diesel Engine Emissions Using Indirect Nonthermal Plasma Processing, *Thin Solid Films*, 515-9 (2007), 4289-4295.
- (24) Kim, H.-H., Ogata, A. and Futamura, S., Effect of Different Catalysts on the Decomposition of VOCs Using Flow-Type Plasma-Driven Catalysis, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34-3 (2006), 984-995.
- (25) Kang, H., Choi, B., Son, G. and Foster, D., C₂H₄ Decomposition Behavior of a Non-Thermal Plasma Discharge-Photocatalyst System for an Air Purifying Device, *JSME International Journal*, 49-2, B (2006), 419-425.
- (26) Nozaki, T., Tsukijihara, H. and Okazaki, K., Hydrogen Enrichment of Low-Calorific Fuels Using Barrier Discharge Enhanced Ni/ γ -Al₂O₃ Bed Reactor: Thermal and Nonthermal Effect of Nonequilibrium Plasma, *Energy and Fuels*, 20-1 (2006), 339-

- 345.
- (27) Goree, J., Liu, B., Drake, D. and Stoffels, E., Killing of *S. mutans* Bacteria Using a Plasma Needle at Atmospheric Pressure, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34-4 (2006), 1317-1324.
- (28) Sato, T., Miyahara, T., Doi, A., Ochiai, S., Urayama, T. and Nakatani, T., Sterilization Mechanism for Escherichia Coli by Plasma Flow at Atmospheric Pressure, *Applied Physics Letters*, 89-7 (2006), 073902-1-073902-2.
- (29) Kusano, Y., Mortensen, H., Stenuma, B., Goutianos, S., Mitrac, S., Ghanbari-Siahkalic, A., Kingshott, P., Sorensen, B. F. and Bindslev, H., Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Glassy Carbon for Adhesion Improvement, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27-5 (2007), 402-408.
- (30) Teschke, M., Korzec, D., Finantu-Dinu, E. G. and Engemann, J., Plasma Cleaning of Endless Substrates by Use of a Tandem Dielectric Barrier Discharge, *Surface and Coatings Technology*, 200-1-4 (2005), 690-694.
- (31) 小河原加久治・中川貴裕, 流路内のプラズマシミュレーションジェットアクチュエータの流体制御特性, 日本機械学会論文集, 73-717, B (2006), 1214-1220.
- (32) Becker, K. H., Kogelschatz, U., Schoenbach, K. H. and Barker, R. J., *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure*, (2005), IOP Publishing Ltd.
- (33) 中野政身, 機能性流体の現状と今後の展望, 精密工学会誌, 72-7 (2006), 813-816.
- (34) Weryle, N.W. ほか, Bidisperse Magnetorheological Fluids Using Fe Particles at Nanometer and Micron Scale, *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 17-5 (2006), 393-401.
- (35) Hu, B. ほか, Supramolecular Magnetorheological Polymer Gels, *J. of Applied Polymer Science*, 100-3 (2006), 2464-2479.
- (36) Deng, H. X., Gong, X. L. and Wang, L. H., Development of an Adaptive Tuned Vibration Absorber with Magnetorheological Elastomer, *Smart Materials & Structures*, 15-5 (2006), 111-116.
- (37) Wang, X. J. and Gordaninejad, F., Study of Magnetorheological Fluids at High Shear Rates, *Rheologica Acta*, 45-6 (2006), 899-908.
- (38) Nakano, M., Satou, A., Sugamata, Y. and Nishiyama, H., Dynamic Shear Flow Behavior of Magneto-Rheological Fluid between Two Rotating Parallel Disks under Relatively Weak Magnetic Field, *JSME International Journal*, 48-3, B (2005), 494-500.
- (39) 久米 保, 磁気粘性 (MR) 流体を用いた研磨装置, 精密工学会誌, 72-7 (2006), 830-833.
- (40) Kordonski, W. I., Shorey, A. B. and Tricard, M., Magnetorheological Jet (MR Jet) Finishing Technology, *J. of Fluid Engineering, Trans. of The ASME*, 128-1 (2006), 20-26.
- (41) 山口ひとみ・ほか, 磁気粘性流体を利用した精密加工技術の開発研究: 磁気粘性流体ベーススラリ-の開発とその加工性能, 精密工学会誌論文集, 100-105 (2006), 100-105.
- (42) 中野政身, ER/MR 流体のレオロジー及び流動特性, 可視化情報, 27-105 (2007), 19-26.
- (43) Liang, Z. Y. ほか, A Phenomenological Study on Establishing a Mechanical Model of an Electro-rheological Fluid, *Smart Materials & Structures*, 15-6 (2006), 1719-1724.
- (44) Tsukiji, T., Koyabu, E., Tsuji, T. and Chono, S., Influence of Electric Fields on a Liquid Crystal Mixture in Circular-Pipe Electrodes, *JSME International Journal*, 48-3, B (2005), 517-523.
- (45) Narumi, T., See, H., Yamaguchi, Y. and Hasegawa, T., Electro-rheological Response of Liquid Crystals under Oscillatory Squeeze Flow, *JSME International Journal*, 48-3, B (2005), 524-531.
- (46) 磁性流体研究連絡会 磁性流体連合講演会講演論文集, (2006-12), 1-90.
- (47) Aoshima, M. and Satoh, A., Two-dimensional Monte Carlo Simulations of a Colloidal Dispersion composed of Rod-like Ferromagnetic Particles in the Absence of an Applied Magnetic Field, *J. Colloid Interface Sci.*, 293 (2006), 77-87.
- (48) Morozov, K., Shliomis, M.I. and Zahn, M., Magnetoviscosity in Suspensions of Grains with Finite Magnetic Anisotropy, *Physical Review, E*, 73 (2006), 066312-1-6.
- (49) Shliomis, M.I. and Zaks, M.I., Ferrofluidic Torsional Pendulum driven by Oscillating Magnetic Field, *Physical Review, E*, 73 (2006), 066208-1-8.
- (50) Gollwitzer, C., Matthies, G., Richter, R., Rehberg, I. and Tobiska, L., The Surface Topography of a Magnetic Fluid, *J. Fluid Mech.*, 571 (2007), 455-474.
- (51) 児玉幸子, 脈動する磁性流体アート, 日経サイエンス, 3 (2006), 30-41.
- (52) Ortiz-Villafuerte, J. and Hassan Y. A., Investigation of Microbubble Boundary Layer Using Particle Tracking Velocimetry, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 128 (2006), 507.
- (53) Deutsch, S., Fontaine, A. A., Money, M. J. and Petrie, H. L., Combined Polymer and Microbubble Drag Reduction on a Large Flat Plate, *Journal of Fluid Mechanics*, 556 (2006), 309-327.
- (54) Ferrante, A. and Elghobashi, S., Reynolds Number Effect on Drag Reduction in a Microbubble-laden Spatially Developing Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 543 (2005), 93-106.
- (55) Kunz, R. F., Gibeling, H. J., Maxey, M. R., Tryggvason, G., Fontaine, A. A., Petrie, H. L. and Ceccio, S. L., Validation of Two-Fluid Eulerian CFD Modeling for Microbubble Drag Reduction Across a Wide Range of Reynolds Numbers, *J. Fluids Eng.*, 129 (2007), 66-79.
- (56) 微細気泡の最新技術, (2006), エヌ・ティー・エス.
- (57) http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt_index.htm
- (58) 笠原次郎・長谷川 輝・根本豊至・山口敬之・矢島 卓・田中博法・山本文孝・小島孝之, パルスデトネーションロケット [TODOROKI] の研究開発, 日本航空宇宙学会北部支部 20 周年記念講演会ならびに第 8 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, (2007-3), 173-178.
- (59) 佐宗章弘, 可動部のない流体制御装置: プラズマアクチュエータ, 日本機械学会誌, 110-1061 (2007), 58.
- (60) Abe, T., Takizawa, Y., Sato, S. and Kimura, N., A Parametric Experimental Study for Momentum Transfer by Plasma Actuator, *AIAA 2007-187, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (2007-1).
- (61) 中北和之, 周波数解析を用いた非定常圧力場の感圧塗料計測, 第 38 回流体力学講演会講演集, (2006-9), 117-120.
- (62) Hirose, Y., Nagai, H., and Asai, K., Unsteady Flow Measurements of a Slender Delta Wing in Wing Rock Motion, *AIAA-2007-0124, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (2007-1).
- (63) 松田 佑・森 英男・新美智秀・上西裕之・平光 円, 高クヌッセン数流れでの圧力計測に適した感圧分子膜の開発, 日本機械学会論文集, 72-718, B (2006), 1475-1482.
- (64) 荒木幹也・新井正明・岡本光司・石間経章・小保方富夫, マイクロショックチューブ内の間欠高速流れの流速測定, 日本機械学会論文集, 72-713, B (2006) 61-68.
- (65) *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2006*, (2006-5).
- (66) Special Section: Turbine Science and Technology, *Journal of Propulsion and Power*, 22-2 (2006).
- (67) Special Issue on International Conference on Power and Energy, *JSME International Journal*, 49-2, B (2006).
- (68) 蒸気タービンの性能設計技術, ターボ機械, 4 月号, (2006).
- (69) 非定常流動特性を考慮したターボ機械性能向上技術, ターボ機械, 9 月号, (2006).
- (70) Lardeau, S. and Leschziner, M. A., Modeling of Wake-Induced Transition in Linear Low-Pressure Turbine Cascades, *AIAA Journal*, 44-8 (2006), 1854.
- (71) Menter, F. R. ほか, A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables-Part I: Model Formulation, *Journal of Turbomachinery*, 128 (2006), 413.
- (72) Sarkar, S. and Voke, P. R., Large Eddy Simulation of Unsteady Surface Pressure Over a Low-Pressure Turbine Blade due to Interactions of Passing Wakes and Inflexional Boundary Layer, *Journal of Turbomachinery*, 128 (2006), 221.
- (73) Wissink, J. G. and Rodi, W., Direct Numerical Simulations of Transitional Flow in Turbomachinery, *Journal of Turbomachinery*, 128 (2006), 668.
- (74) Matsumoto, T., Unsteady Flow Field of an Axial-Flow Turbine Rotor at a Low Reynolds Number, *ASME Paper*, GT-2006-90013 (2006).
- (75) Stripf, M., Schulz, A. and Bauer, H.-J., Moderating of Rough Wall Boundary Layer Transition and Heat Transfer on Turbine Airfoils, *ASME Paper*, GT-2006-90316 (2006).
- (76) Opoka, M. M., Thomas R. L. and Hodson, H. P., Boundary Layer Transition on the High Lift T106A LP Turbine Blade with an Oscillating Downstream Pressure Field, *ASME Paper*, GT-2006-91038 (2006).
- (77) Yamada, K. ほか, Effect of Wake Passing on Unsteady Aerodynamics Performance in a Turbine Stage, *ASME Paper*, GT-2006-90783 (2006).
- (78) Yang, H., Nuernberger, D. and Kersken, Hans-Peter., Toward Excellence in Turbomachinery Computational Fluid Dynamics: A Hybrid Structured-Unstructured Reynolds-Averaged Navier-Stokes Solver, *Journal of Turbomachinery*, 128 (2006), 390.
- (79) Behr, T. ほか, Multistage Aspects and Unsteady Effects of Stator and Rotor Clocking in an Axial Turbine With Low Aspect Ratio Blading, *Journal of Turbomachinery*, 128 (2006), 11.
- (80) Kachel, C. E. and Denton, J. D., Experimental and Numerical Investigation of the Unsteady Surface Pressure in a Three-Stage Model of an Axial High Pressure Turbine, *Journal of Turbomachinery*, 128 (2006), 261.
- (81) Ito, E. ほか, Advanced Turbine Aerodynamic Design Utilizing A Full Stage CFD, *ASME Paper*, GT-2006-90646 (2006).
- (82) Luo, H., Baum, J. D. and Lohner, R., An Accurate, Fast, Matrix-Free Implicit Method for Computing Unsteady Flows on Unstructured Grids, *Computers & Fluids*, 30 (2001), 137-159.
- (83) Johnson, F. T., Tinoco, E. N. and Yu, N. J., Thirty Years of Development and Application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle, *Computers & Fluids*, 34 (2005), 1115-1151.
- (84) Kobayashi, T., Large Eddy Simulation for Engineering Applications, *Fluid Dynamics Research*, 38 (2006), 84-107.
- (85) Tam, C. K. W., Recent Advances in Computational Aeroacoustics, *Fluid Dynamics Research*, 38 (2006), 591-615.
- (86) Deng, X. and Zhang, H., Developing High-Order Weighted Com-

- compact Nonlinear Schemes, *Journal of Computational Physics*, 165 (2000), 22-44.
- (87) Deng, X. and Liu X., High-Order Dissipative Weighted Compact Nonlinear Schemes for Euler and Navier-Stokes Equations, *AIAA Paper*, 2001-2626 (2001).
- (88) Shukla, R. K. and Zhong, X., Derivation of High-Order Compact Finite Difference Schemes for Non-Uniform Grid Using Polynomial Interpolation, *Journal of Computational Physics*, 204 (2005), 404-429.
- (89) Shukla, R. K., Tatineni, M. and Zhong, X., Very High-Order Compact Finite Difference Schemes on Non-Uniform Grids for Incompressible Navier-Stokes Equations, *Journal of Computational Physics*, 224 (2007), 1064-1094.
- (90) Togashi, F., Nakahashi, K., Ito, Y., Iwamiya, T. and Shimbo, Y., Flow Simulation of NAL Experimental Supersonic Airplane/Booster Separation Using Overset Unstructured Grids, *Computers & Fluids*, 30 (2001), 673-688.
- (91) Cockburn, B. and Shu, C. W., The Runge-Kutta Discontinuous Galerkin Method for Conservation Laws V: Multidimensional Systems, *Journal of Computational Physics*, 141 (1998), 199-224.
- (92) Bassi, F., Crivellini, A., Rebay, S. and Savini, M., Discontinuous Galerkin Solution of the Reynolds-Averaged Navier-Stokes and $k-\omega$ Turbulence Model Equations, *Computers & Fluids*, 34 (2005), 507-540.
- (93) Wang, Z. J., Spectral (Finite) Volume Method for Conservation Laws on Unstructured Grids: Basic Formulation, *Journal of Computational Physics*, 178 (2002), 210-251.
- (94) Wang, Z. J. and Liu, Y., Extension of the Spectral Volume Method to High-Order Boundary Representation, *Journal of Computational Physics*, 211 (2006), 154-178.
- (95) Wang, L. and Mavriplis, D. J., Implicit Solution of the Unsteady Euler Equations for High-Order Accurate Discontinuous Galerkin Discretizations, *Journal of Computational Physics*, in press.
- (96) Yasue, K., Ohnishi, N. and Sawada, K., A Pointwise Relaxation Computation of Viscous Compressible Flowfield Using Discontinuous Galerkin Method, *AIAA Paper*, 2006-3893, (2006).
- (97) Fidkowski, K. J., Oliver, T. A., Lu, J. and Darmofal, D. L., p-Multigrid Solution of High-Order Discontinuous Galerkin Discretizations of the Compressible Navier-Stokes Equations, *Journal of Computational Physics*, 207 (2005), 92-113.
- (98) Nastase, C. R. and Mavriplis, D. J., High-Order Discontinuous Galerkin Methods Using an hp-Multigrid Approach, *Journal of Computational Physics*, 213 (2006), 330-357.
- (99) Haga, T., Ohnishi, N., Sawada, K. and Masunaga, A., Spectral Volume Computation of Flowfield in Aerospace Application Using Earth Simulator, *AIAA Paper*, 2006-2823, (2006).
- (100) Park, C., Assessment of Two-Temperature Kinetic Model for Ionizing Air, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 3 (1989), 233-244.
- (101) Fujita, K. and Abe, T., Coupled Rotation-Vibration-Dissociation Kinetics of Nitrogen Using QCT Models, *AIAA Paper*, 2003-3779, (2003).
- (102) Furudate, M., Fujita, K. and Abe T., Coupled Rotational-Vibrational Relaxation of Molecular Hydrogen at High Temperatures, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 20 (2006), 457-464.
- (103) Josyula, E. and Gudimetla, V., Modeling of Thermal Dissociation in Nonequilibrium Hypersonic Flows, *AIAA Paper*, 2006-3421, (2006).
- (104) Park, C., Thermochemical Relaxation in Shock Tunnels, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 20 (2006), 689-698.
- (105) Matsuyama, S., Ohnishi, N., Sasoh, A. and Sawada, K., Numerical Simulation of Galileo Probe Entry Flowfield with Radiation and Ablation, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 19 (2005), 28-35.
- (106) Matsuyama, S., Shimogonya, Y., Ohnishi, N., Sasoh, A. and Sawada, K., Multiband Radiation Model for Simulation of Galileo Probe Entry Flowfield, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 20 (2006), 611-614.
- (107) Wright, M. J., Bose, D. and Olejniczak, J., The Impact of Flowfield-Radiation Coupling on Aeroheating for Titan Aerocapture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 19 (2005), 17-27.
- (108) Osawa, H., Matsuyama, S., Ohnishi, N. and Sawada, K., Comparative Computation of Radiative Heating Environment for Huygens Probe Entry Flight, *AIAA Paper*, 2006-3772, (2006).
- (109) Shahcheraghi, N., Dwyer, H. A., Cheer, A. Y., Barakat, A. I. and Rutaganira, T., Unsteady and Three-dimensional Simulation of Blood Flow in the Human Aortic Arch, *Journal of Biomechanical Engineering*, 124 (2002), 378-387.
- (110) Mori, D. and Yamaguchi, T., Computational Fluid Dynamics Analysis of the Blood Flow in the Thoracic Aorta on the development of aneurysm, *Journal of the Japanese College of Angiology*, 43 (2003), 94-97.
- (111) Moore, S., Davida, T., Chasea, J. G., Arnolda, J. and Fink, J., 3D Models of Blood Flow in the Cerebral Vasculature, *Journal of Biomechanics*, 39 (2006), 1454-1463.
- (112) Griffith, B. E. ほか, An Adaptive, Formally Second Order Accurate Version of the Immersed Boundary Method, *Journal of Computational Physics*, in press.
- (113) Zhang, Q. and Hisada, H., Analysis of Fluid-structure Interaction Problems with Structural Buckling and Large Domain Changes by ALE Finite Element Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190 (2001), 6341-6357.
- (114) Watanabe, H. ほか, Multiphysics Simulation of Left Ventricular Filling Dynamics Using Fluid-structure Interaction Finite Element Method, *Biophysical Journal*, 87 (2004), 2074-2085.
- (115) Torii, R., ほか, Influence of Wall Elasticity in Patient-specific Hemodynamic Simulations, *Computers & Fluids*, 36 (2007), 160-168.
- (116) Torii, R. ほか, Fluid-structure Interaction Modeling of Aneurysmal Conditions with High and Normal Blood Pressures, *Computational Mechanics*, 38 (2006), 482-490.
- (117) Wolters, B. J. B. M. ほか, A Patient-specific Computational Model of Fluid-structure Interaction in Abdominal Aortic Aneurysms, *Medical Engineering and Physics*, 27 (2005), 871-883.
- (118) Fukui, T. ほか, Differentiation of Stenosed and Aneurysmal Arteries by Pulse Wave Propagation Analysis Based on a Fluid-solid Interaction Computational Method, *Technology and Health Care*, 13 (2006), 1-12.
- (119) Chen, J. and Lu, X. Y., Numerical Investigation of the Non-Newtonian Pulsatile Blood Flow in a Bifurcation Model with a Non-planar Branch, *Journal of Biomechanics*, 39 (2006), 818-832.
- (120) Chen, J., Lu, X. Y. and Wang, W., Non-Newtonian Effects of Blood Flow on Hemodynamics in Distal Vascular Graft Anastomoses, *Journal of Biomechanics*, 39 (2006), 1983-1995.
- (121) Johnstona, B. M., Johnstona, P. R., Corneyb, S. and Kilpatrick, D., Non-Newtonian Blood Flow in Human Right Coronary Arteries: Transient Simulations, *Journal of Biomechanics*, 39 (2006), 1116-1128.
- (122) Leyton-Mange, J., Yang, S., Hoskins, M. H., Kunz, R. F., Zahn, J. D. and Dong, C., Design of a Side-View Particle Imaging Velocimetry Flow System for Cell-Substrate Adhesion Studies, *Trans. ASME J. Biomech. Eng.*, 128-2 (2006), 271-278.
- (123) 大島まり・木下晴之・坂東佳憲, in vitro モデル内におけるマクロ・マイクロ流れの可視化計測, ながれ, 25-1 (2006), 5-12.
- (124) 大場謙吉・田地川 勉・石原 渉・郡 慎平, 局所流速測定用光ファイバー LDV センサーの開発 (光ファイバーセンサーによる模擬血管内のヒト血液の流速測定), 日本機械学会論文集, 72-719, B (2006), 1702-1709.
- (125) 鎌田裕基・坪田健一・和田成生・山口隆美, 血小板の凝集による一次血栓の形成・崩壊の粒子法シミュレーション, 日本機械学会論文集, 72-717, B (2006), 1109-1115.
- (126) 坪田健一・和田成生・山口隆美, 赤血球の変形能が血流に及ぼす影響 (粒子法シミュレーションによる検討), 日本機械学会論文集, 72-718, B (2006), 1483-1489.
- (127) 鈴木幸人・小石川雅紀・越塚誠一・岡本拓土・金子直嗣・高松敦子・藤井輝夫, MPS 法によるマイクロ流路内細胞付着流れのシミュレーション, 日本機械学会論文集, 72-721, B (2006), 2109-2116.
- (128) Rajamohan, D., Banerjee, R. K., Back, J. H., Ibrahim, A. A. and Jog, M. I., Developing Pulsatile Flow in a Deployed Coronary Stent, *Trans. ASME J. Biomech. Eng.*, 128-3 (2006), 347-359.
- (129) Swaminathan, T. N., Hu, H. H. and Patel, A. A., Numerical Analysis of the Hemodynamics and Embolus Capture of a Greenfield Vena Cava Filter, *Trans. ASME J. Biomech. Eng.*, 128-3 (2006), 360-370.
- (130) 秋元宏之・佐伯壮一・齊藤 俊・西田輝夫・中村和行, 2色レーザー誘起蛍光法を用いたマイクロ流路内温度分布の画像計測, 日本機械学会論文集, 72-713, B (2006), 90-95.
- (131) 佐竹信一・功刀賢彰・佐藤一穂・伊藤智義・金森宏之・谷口 淳, デジタルホログラフィを用いたマイクロ流れの高時間分解三次元計測に関する研究, 日本機械学会論文集, 72-721, B (2006), 2211-2218.
- (132) 嘉副 裕・佐藤洋平, ナノ・レーザー誘起蛍光法によるマイクロチャンネル壁面ゼータ電位計測, 日本機械学会論文集, 72-722, B (2006), 2457-2464.
- (133) Mirbozorgi, S. A., Niazmand, H. and Renksizbulut, M., Electro-Osmotic Flow in Reservoir-Connected Flat Microchannels With Non-Uniform Zeta Potential, *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, 128-6 (2006), 1133-1143.
- (134) Fan, X., Phan-Tien, N., Chen, S., Wu, X. and Yong Ng, T., Simulating Flow of DNA Suspension Using Dissipative Particle Dynamics, *Physics of Fluids*, 18-063102 (2006), 1-10.
- (135) 伊東明俊・樋田英紀・早乙女康典, 生物対流の制御とその機械への応用 (第2報. 電極ピッチの最適化と, 対流による機械システムの駆動), 日本機械学会論文集, 72-716, B (2006), 972-978.
- (136) Yamanoi, I. and Tamagawa, M., Deformation Analysis of Bubble near Curved Elastic Wall for Developing Shock Wave DDS, *JSME International Journal*, 49-3, B (2006), 755-760.
- (137) Johnson, C. R. ほか, NIH/NSF Visualization Research Challenges January 2006, (2006), IEEE Computer Society Press. [<http://tab.computer.org/vgtc/vrc/index.html>]
- (138) Thomas, J. J. and Cook, K. (Eds.), *Illuminating the Path: Research and Development Agenda for Visual Analytics*, (2006), IEEE Computer Society Press. [<http://nvac.pnl.gov/agenda.stm>]