

**(1) 特筆すべき教育活動の取組と成果（大学教育改革の支援プログラム（GP等）の採択状況と取組、グローバルCOE等の大型プロジェクトの採択・実施状況などを含む。）**

本研究所は、流体科学の国際研究拠点として、教育活動において以下のような特徴的な取組みを行っている。

**工学部・工学研究科との連携による大学院・学部の教育活動**

工学研究科と協力して、平成17年度～平成19年度に採択された文部科学省「魅力ある大学院教育」イニシアティブ「フライト実践による航空宇宙フロンティア」を引き継ぎ、平成20年度から新たに「機械工学フロンティア創成プログラム」を実施し、平成22年度は本研究所から9人の教員が担当した。また、国際高等研究教育機構における指定授業科目を本研究所の教員9名が担当している。さらに、融合領域研究合同講義を1名が担当した。

全学教育の取組みでは、「学びの転換」を育む研究大学型少人数教育(基礎ゼミ)を、平成22年度は5名の教員が担当した。また、「自然界の構造（流れの科学）」を開講して平成22年度は5名の教員を派遣している。

また、本研究所は東北大学のダブルディグリー制度に積極的に協力しており、本研究所教員が指導教員を務める学生1名がリエゾンオフィスを通じて本制度を活用し、平成23-24年度にダブルディグリー取得に向けた研究活動を展開していくこととなった。

**国際宇宙大学ならびに HOPE ミーティングへの派遣**

流体科学研究所では、毎年6月から8月にかけて海外で開催され、国際人および将来の研究者を育てる観点からも評価が高い国際宇宙大学に、平成2年より大学院学生を毎年派遣している。平成22年度は1名の大学院生を派遣した。このプログラムにより平成22年までに派遣された計23名のうち、13名が大学教員やポスドク、研究機関の研究員になっており、その他でも3名が航空宇宙関連企業に就職するなど、教育的効果が著しい。また、アジア・太平洋地域から選抜された優秀な大学院生を対象として、ノーベル賞受賞者などの世界の知のフロンティアを開拓した人々との対話や同世代の研究者との交流を図る機会を提供する「HOPE ミーティング」に、平成22年度は大学院生を1名派遣した。

**国際会議研究発表を通じての大学院学生の国際教育**

本研究所主催による国際会議、すなわち、高度流体情報および横断的流体研究融合化に関する国際シンポジウム (International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration、AFI/TFI)、流動ダイナミクスに関する国際シンポジウム (International Conference on Flow Dynamics、ICFD)は学生の英語力および国際性向上にとって極めて有効であり教育活動として果たす役割も大きい。本研究所では毎年継続してこれらの会議への学生の積極的参加を促して発表する場を提供し、特にICFDには学生が主体的に企画運営する学生セッションを設けて英語力の向上、国際性の向上を図っている。平成22年度は11月にグローバルCOEプログラム「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」による国際会議および研究所主催による国際会議(AFI/TFI)の合同会議を開催し、大学院生の英語による研究発表、国内・国際雑誌への論文執筆指導を積極的に行い、204名(うち外国人75名)の学生が発表を行った。また平成23年2月に、リヨンー東北理工学ジョイントラボラトリー (ELyT ジョイントラボラトリー) 事業推進の一環として仙台で開催された「2011 Annual

ELyT Workshop」で大学院生が研究発表を行い、多数の外国人研究者との研究交流を行った。

#### 博士前期課程（修士課程）学生海外発表促進プログラムの実施

本研究所の教員が指導教員を務める博士前期課程（修士課程）学生に国際会議での発表の機会を与えるための旅費支援制度を設けている。これは研究室単位ではなく、本研究所の教育活動として所内大学院生の国際会議参加を促しているものであり、上限額を設定して多くの学生に支援しているプログラムである。平成22年度は本制度を利用して6名の学生が国際会議に参加し、研究発表を行った。派遣学生は報告書を作成し、本研究所のホームページに公開することで、研究所内外に成果を発信するとともに、本支援プログラムの周知を行っている。

#### 流体研独自の大学院生向け研究発表会の開催

大学院学生への研究指導の取り組みは、分野横断セミナー、グローバルCOEプログラム研究交流会における大学院学生の研究発表など流体科学研究所独自の機会を設け、通常のカリキュラムを超えた対応を行っている。また、平成22年11月に開催されたグローバルCOEプログラム「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」による国際会議では、学生主導のセミナーを開催し、英語による研究発表および討論を行う場を設け、学生109名が参加した。さらに、平成22年度は、このような学生が主体となって運営する国際会議を4件（グローバルCOE航空宇宙流体科学サマースクール、The 5th Tohoku University – Seoul National University Joint Workshop on Next Generation Aero Vehicle、The 6th International Students / Young Birds Seminar on Multi-scale Flow Dynamics、The 11th Japan-Korea Students' symposium - Fast Ion Transport in Solids and Through Interfaces - The Related Materials and Phenomena）開催し、学生の発表や研究討論の場を提供しながら、研究組織運営とリーダーシップの訓練を行っている。さらに、平成22年8月には「第3回流動ダイナミクス国際若手研究発表会」を開催し、学生同士が発表に対するピアレビューを行い、上位3名の優秀発表者を表彰して研究費を配分している。

#### 国際高等研究教育院への講師派遣

国際高等研究教育院へ講師を派遣して、流体科学一般の教育および異分野との融合研究に関する講義を行っている。平成22年度には、国際高等研究教育機構における指定授業科目を本研究所の教員9名が担当し、さらに、融合領域研究合同講義を1名が担当した。また、本研究所の教員が指導教員を務める学生2名が平成20年度に博士課程へ、1名が平成22年度に修士課程へ進学し、国際高等研究教育院の博士教育院生、修士教育院生として在籍している。

## (2) 特筆すべき研究・診療活動の取組と成果

#### 特筆すべき研究活動

流体科学研究所は「流動に関する学理およびその応用研究」を設置目的とする、特色ある研究所として国内外で高く評価されている。一例として、平成23年度には本研究所の嶋章名誉教授が「キャビテーション現象に関する研究」によって瑞宝中綬章を受章した。また、平成20年度には本研究所の南部健一名誉教授が「流体工学研究」によって紫綬褒章を受章した。紫綬褒章は本研究所としては歴代で2人目の受章である。さらに、過去にも日本学士院賞受

賞者を2名、文化功労者を2名輩出している。流体研の教員に対する国際的な評価は、国際会議における招待講演（平成22年度22件）や著名な国際学術雑誌のエディターや編集委員（平成22年度15件）などの実績によっても知ることができ、これらは流体科学研究所研究活動報告書によって毎年公表されている。

本研究所は、低乱熱伝達風洞、衝撃波実験設備など大学の設備として稀な大型実験設備を活用し、実験の分野での先端的研究成果を創出している。さらに、流体科学研究の強力なツールであるスーパーコンピュータを平成2年に国立大学附置研究所として初めて導入し、数値流体力学の分野で先進的な研究を推進すると共に、スーパーコンピュータと実験装置を融合させた新しい流体融合研究手法を提唱し、平成23年度には新システムに更新するなど、「流体融合研究センター」を中心として生体・医療、航空、ナノ・マイクロシステム、原子炉プラントなどへの応用を進めている。

また、エアロスペース、エネルギー、ライフサイエンス、ナノ・マイクロの所内研究クラスターを設置して分野横断型の応用研究を推進すると共に、特色ある産学連携研究、国内研究機関との連携事業、リエゾンオフィスを活用した国際共同研究プロジェクトを積極的に推進している。また、平成21年6月に共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」として文部科学省に認定された。これに伴い、従来の研究活動に加え、さらに流体科学拠点として公募共同研究を開始した。研究課題は、先行して始めた平成21年度には52件（内国際20件）、22年度には63件（内国際28件）、23年度には77件（内国際30件）を数え、22年度には分野横断型公募共同研究プロジェクト「次世代反応流体科学の創成」を立ち上げるなど、精力的に共同研究拠点としての役割を担っている。

これらの研究を支える平成22年度の競争的資金は、平成22年度単年度獲得額として、科研費84百万円（29件）、GCOE流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点（文科省）251百万円、次世代環境適合技術流体実験共用促進事業（文科省）23百万円、頭脳循環を活性化する若手研究者海外派遣プログラム（日本学術振興会）7百万円、超音波計測連成解析による超高精度生体機能計測システム（科学技術振興機構）53百万円、バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現(CREST)（科学技術振興機構）111百万円等、合計88件、746百万円になる。

国際交流では、平成23年8月現在で本学のリエゾンオフィス6件について本研究所が中心的な役割を果たし、全学の学術交流協定30件（うち10機関については本研究所が筆頭世話部局）、部局間学術交流協定は18件について本研究所が世話部局となっており、本学の国際交流に貢献している。また毎年、リエゾンオフィス代表者会議を行い、海外拠点活動を積極的に進めている。さらには、本学の国際交流戦略室、国際共同教育小委員会、学術交流協定調査委員会に委員や委員長として積極的に参加し、国際交流の推進を担っている。

本研究所における高水準の研究活動は、平成20年度に実施された大学評価・学位授与機構による第一期中期目標期間(平成16～21年度)における評価、すなわち「I. 研究水準」1. 研究活動の状況および2. 研究成果の状況、のいずれも最高評価S「期待される水準を大きく上回る」を得ている。また、「II. 質の向上度」1. 質の向上度についても最高評価S「大きく改善、向上している、または、高い質（水準）を維持している」を得ている。

以下に代表的な研究活動について述べる。

#### 次世代融合研究システム（スーパーコンピュータ）による流体融合研究

本研究所は平成2年12月にCRAY YMP8を導入して以来およそ20年間にわたるスーパーコンピュータ運用の経験を通じて計算機の運用やネットワーク構築・運用において極めて高度な技術を蓄積しており、広範な形態の利用ニーズに対応できる。これまで、重点研究課題に対する国際研究プロジェクトの実施など、乱流、分子流、プラズマ流、衝撃波などの様々な流体科学の分野で優れた成果を挙げてきた。さらに、実験と計算を一体化した新しい研究手法（次世代融合研究手法）を用いて流体科学の諸問題を解決するために流体融合研究センターを設立し、航空力学や原子炉プラントなどへの応用を進めている。スーパーコンピュータを利用した研究は年度ごとに審査され、その評価実績によりその後の計算時間が割り当てられる。平成22年度中に下記に示す37件の研究プロジェクトが終了し、成果を上げた。また、22年度末現在で36件のプロジェクトが進行中である。

- 1) MISORA 最適設計
- 2) バルク金属ガラスおよびガラス形成物質のガラス転移近傍でのスローダイナミクスの解明
- 3) 多分野融合数値シミュレーションによる知識イノベーション
- 4) マイクロスラッシュ利用型超高熱流束熱伝達に関する融合計算
- 5) 渦構造の非線形ダイナミクスの直接数値シミュレーション研究
- 6) 燃料電池白金触媒表面の水素・酸素解離挙動に関する研究
- 7) 燃料電池高分子電解質膜内部のプロトン輸送挙動の解析
- 8) Automobile Aerodynamic Optimization
- 9) ナノスケール空間内の水の物性・輸送特性に関する分子論的解析
- 10) 流体膜の分子スケール構造と輸送特性
- 11) 不均質系における非平衡エネルギー状態とその伝搬特性
- 12) 高クヌッセン数流れにおいて現れる諸現象の解明
- 13) 心臓血管系の流体構造連成解析
- 14) 高圧・高速下の気液二相流体システムの安全性評価解析技術の開発
- 15) 極低温スラッシュ流体の流動・伝熱特性に関する研究
- 16) キャビティ保炎器後流せん断層と衝撃波の干渉現象に関する研究
- 17) 超音波計測融合シミュレーションによるリアルタイム血流解析システムの開発
- 18) 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた PRF の燃焼特性に関する研究
- 19) 加熱微小円管内で伝ばする着火核に関する研究
- 20) 乱流を伴ったマルチスケール・マルチステージシナリオに対する異分野融合予測科学の探究
- 21) キャビテーション不安定現象に及ぼす液体ロケットフライト時の加速度の影響
- 22) 高機能修飾界面における輸送特性に関するミクロスケール解析
- 23) Development of Kinetic Force Method for Two-/Three-Dimensional Numerical Modeling  
Relaxation of Rarefied Gas flows
- 24) 大規模環境におけるエネルギー移動評価とその解析
- 25) 鋭敏化した Alloy 600 の Cr 欠乏領域での局所磁化過程
- 26) 液体水素の熱・輸送物性に関する分子論的研究
- 27) 直接数値計算による中立・安定・不安定境界層乱流の構造に及ぼす境界層外乱れの影響の解明

- 28) 二段式軽ガス銃を用いたソニックブームの実験的、数値解析的研究
- 29) ふく射・乱流複合熱輸送シミュレーションモデルの開発
- 30) 高温予混合火炎の不安定性：エンタルピー一定条件下における未燃ガス温度の影響
- 31) 3次元ナノ構造作製のためのプラズマ・ビームエッチング形状予測シミュレーション技術の開発
- 32) 過冷却液体状態についての代替モード結合理論による大規模数値解析
- 33) Predictability and Data Assimilation in Fluid Dynamic Problems
- 34) Building-Cube 法による大規模並列計算法に関する研究
- 35) ダウンスケーリングによる気象予測の研究
- 36) 循環器系疾患の診断・治療のための計算バイオメカニクス
- 37) 粒子法を用いたプラズマ誘起流れの数値解析

**超断熱二流体ノズル方式による極低温マイクロ固体窒素粒子連続生成法の開発と異分野融合領域への応用**

次世代新エネルギー開発に直結した、高密度・高機能性を有するエネルギー媒体としての利用が期待される極低温マイクロ固体窒素粒子の生成に関し、高精度レーザー計測結果の取り込みによる新型融合数値解析法を開発するとともに、超断熱二流体ノズルを用いた微細固体窒素粒子連続生成技術に関する基礎実験を世界に先駆けて成功させている。本研究は、マイクロ・ナノオーダーの極低温高密度エネルギー媒体を異分野融合型の技術領域に適用することにより、機械工学、低温工学、半導体デバイス工学、医用工学の複数分野にまたがるサステナブル低炭素・環境調和型・低エミッションエネルギー循環システムを創成し、グリーン・イノベーションの推進に貢献することを目指したものである。マイクロ固体窒素粒子の噴霧流は高発熱密度を有する次世代大型コンピュータプロセッサ用超高温熱流束冷却、アッシング・グレス・ドライ型半導体ウェハー洗浄としての応用が期待され、また、固液混相型スラッシュ流体として適用することにより高温超伝導（HTS）ケーブルの新型冷却法の開発が期待されている。本研究に関しては国内外8件の招待講演が実施され、研究成果に対して **Cryogenics Best Paper Award 2009**（平成22年7月）が日本人としては初めて授与されている。本賞は低温工学における最も権威ある国際誌“Cryogenics”（Elsevier B.V.）において1年間に掲載された論文の中から最も優れた論文1編に対し贈られる賞であり、低温工学分野の学術的進展に格段の貢献をなした業績が評価されたものであり、低温工学をはじめとして異分野融合による機械工学分野のパラダイムシフトへ直結する成果を得たと言える。

**高効率水素エネルギーシステム開発のための極低温スラッシュ流体技術の開発**

温室効果ガスの排出による地球温暖化、燃料電池の飛躍的な普及、情報技術による電力需要増加に鑑み、極低温スラッシュ水素（液体水素中に固体水素粒子が混在する固液二相流体）と高温超伝導機器を組み合わせた先進的で高効率な水素エネルギーシステムを提案して、実験および数値解析の両面から研究・開発を行っている。スラッシュ流体は高密度流体、融解熱を利用する機能性熱流体として優れた性質を持っている。水素をスラッシュ水素の形態で長距離（パイプライン）輸送する際、スラッシュ水素を冷媒とする超伝導送電を組み合わせ、輸送先においては液体水素を冷媒とする超伝導電力貯蔵を組み合わせると、水素燃料と電力の効率的な同時輸送・貯蔵が可能となる。所謂シナジー効果が期待できる。これまで、高効率

なシステム実現のため、低コスト水素液化を可能とする磁気冷凍法による水素液化技術、スラッシュ水素製造技術、スラッシュ水素用高精度密度計・質量流量計の開発等を実施してきた。現在、高温超伝導送電を組み合わせたスラッシュ水素のパイプライン輸送を想定して、スラッシュ流体の管内流動・伝熱特性について研究を行っており、液体と比較して流動・伝熱時に圧力損失低減、伝熱劣化が発生すること、および低減・劣化メカニズムを世界に先駆けて報告している。圧力損失低減、伝熱劣化はポンプ所要動力の低減、超伝導線のクエンチ伝播を未然に防止する設計データとして非常に重要である。本成果により、平成 22 年 5 月に低温工学・超電導学会より「優良発表賞」および平成 23 年 5 月に「論文賞」を受賞している。

#### コンピュータ融合生体計測による医療の高度化

コンピュータシミュレーションと計測を融合した高度生体情報計測手法を確立し、循環器疾患機序の解明と新規治療法を開発することにより、循環器疾患における医療水準を画期的に高度化することを目指している。心臓循環器系、癌研究、リンパの流れなど生体内の流れの先端研究の飛躍的な進展のため、生体内血流を非侵襲リアルタイムに評価する超音波画像装置と大規模流動解析・構造解析を行うスーパーコンピュータを融合した計測連成シミュレーション手法を構築し、血流の 3 次元構造や壁せん断応力を明らかにして循環器系疾患の機序の解明や新しい治療法の確立を実現するための研究を、流体力学、情報科学、医学の研究者が連携して推進している。超音波可視化装置とスパコンを一体化した超音波計測融合血流解析システムのプロトタイプを世界に先駆けて開発することにより、コンピュータ融合生体計測の臨床応用に向けた研究を推進している。

本研究は、科学技術振興機構の「先端計測分析技術・機器開発事業」として実施され、平成 18 年度 78,000 千円、平成 19 年度 76,700 千円、平成 20 年度 83,200 千円、平成 21 年度 50,700 千円、平成 22 年度 53,300 千円を受託している。

#### 深部地下岩体に作用する応力の原位置計測法の開発

水圧破砕法は、キロメートル級の深度における地殻応力の原位置計測を可能とする唯一の実用的手段として従来から広く用いられてきた。ところが、この方法によって孔井直交面内における最大応力を評価する要領に致命的な欠陥のあることを世界で初めて指摘した。また、この問題を解決するには、加圧システムのコンプライアンスを例えば  $1 \text{ cm}^3/\text{MPa}$  程度に十分小さくしたシステムでき裂開口圧を測定し、かつ、その測定値と残留き裂開口幅の存在を考慮した観測方程式から最大応力を評価すれば良いことを理論的に明らかにした。しかしながら、特にキロメートル級の孔井に適用する場合には、孔井の直径が大きく、加圧システムも大型になるために問題のコンプライアンスを十分小さくすることが原理的に難しい。このジレンマを解決し、さらには大深度計測につきまとう抑留の問題を回避できる新方式として **BABHY (Baby Borehole Hydro-fracturing)** 法を提案した。同方式の実用化を図るため、小・中規模な実フィールド実験を通して要素技術の開発と検証を行った。さらには、深度約 800 m の既存の孔井にて **BABHY** 方式の水圧破砕試験を実施することに成功した。この成果により、岩の力学連合会論文賞（平成 19 年度）および米国岩石力学協会（ARMA）論文賞（平成 22 年 7 月）などを受賞し、複数の学会で招待講演を実施するなど、当該分野における高い評価を受けている。また、海洋研究開発機構（JAMSTEC）と協力して海底面下数 km までの使用に耐える装置の開発を進めている。二酸化炭素地中貯留および核廃棄物地層処分などの大深

度地下利用ならびに地震メカニズム解明などへの応用が期待される。

#### ガリウムヒ素を用いたサブ 10 nm 量子ドット構造の形成

バイオテンプレートと無損傷・中性粒子ビームエッチング技術を組み合わせて無欠陥・高密度・均一配置量子ドットの形成技術を用いて次世代高効率太陽電池や高効率レーザー素子の検討を科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究事業（CREST）行っている。既にシリコン酸化膜上に鉄含有蛋白質（フェリチン）を細密充填した2次元配置技術を確立し、中性粒子ビームエッチングにより2次元シリコン量子ナノディスクアレイ構造は実現されていた。一方、GaAsでは通常安定した酸化膜を形成することは難しく、蛋白質の細密充填配置は難しかった。そこで、酸素・中性粒子ビームによる低温・高品質酸化を行うことで、世界で初めて安定した酸化物を形成でき、フェリチンの細密充填配置を実現した。この鉄コアをマスクに、塩素中性粒子ビームを用いて GaAs 量子ナノディスク構造の無損傷加工に成功した。この時、直径 10 nm、間隔 2 nm、密度  $10^{12} \text{cm}^{-2}$  以上の量子ドット構造の実現に成功した。この時、中性粒子ビームによる GaAs エッチング面のフォトルミネッセンスはプラズマエッチングによるフォトルミネッセンスより数十倍強度が高く、損傷は圧倒的に小さいことも実証した。更に、フェリチン配置の間隔制御にも挑戦し、フェリチンに分子量 2000 程度の高分子（PEG）を付与することで、間隔を 10 nm 程度に制御することが可能であることが分かった。これらのナノ構造形成技術は、次世代高効率量子ドット太陽電池や高効率量子ドットレーザー開発に不可欠である。本研究成果に対して、応用物理学会優秀論文賞（平成 22 年 7 月）を受賞した。

#### 次世代 4 端子構造縦型金属酸化膜半導体（MOS）トランジスターの開発

現在、45 nm レベルのシリコン MOS トランジスタが量産化されているが、32 nm レベル以降の MOS トランジスタでは短チャネル効果のため、微細化により消費電力が大きくなり、トランジスタの物理的限界が迫っているといわれている。そこで、この短チャネル効果を抑制するために3次元トランジスタ（縦型トランジスタ）が精力的に研究されている。3次元トランジスタを実用化するためのキーポイントは、シリコンの縦型 Fin 構造を損傷無く原子層レベルで平坦に加工する技術と低温で界面準位の少ないゲート絶縁膜の形成である。既に損傷が無く原子層レベルで平坦な加工は中性粒子ビームエッチングで世界で初めて実現できたが、今回はその Fin 構造表面への低温酸化を酸素中性粒子ビームで検討し、界面準位が低く、Fin 構造の左右で酸化膜の膜厚を制御できる酸化を実現できることを世界で初めて実現した。この技術を基に、4端子縦型 MOS トランジスタを試作し、次世代トランジスタとして理想的な特性を実現した。この研究成果に対して、米国真空学会より Plasma Prize（平成 22 年 8 月）を受賞した。本研究は科学技術振興機構（JST）の先端融合研究拠点形成プロジェクトにて行われている。

#### オンウエハモニタリング技術の開発

プラズマプロセスにおける最大の問題は荷電粒子や紫外線による基板表面への損傷である。そこで従来からそのモニタリングセンサー技術およびダメージ予測システムの構築を進

めてきた。センサーにおいて検出される電荷蓄積量、紫外線有機電流量という簡単な測定データを基に長年蓄積されてきた膨大なデータによるデータベースにより実際の基板表面での損傷を高精度に予測するシステムを確立した。更に、モニタリングシステムとしてはワイアレスモニタリングシステムの可能性を実証することに成功した。これらオンウエハーモニタリングシステムを用いて、みずほ情報総研㈱を介して世界で初めて、プラズマ解析サービスを事業化した。これらの成果により、応用物理学会プラズマエレクトロニクス賞（平成 22 年 3 月）を受賞した。本研究は、科学技術振興機構（JST）の研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）の支援により行われた。

#### 電磁非破壊評価法に基づく鋳鉄材質評価の研究

鋳鉄の強度は黒鉛片の形状と基地組織によってほぼ定まる。黒鉛形状は、超音波伝播速度評価により非破壊的に推定することができ、その評価法は日本鋳造工学会基準としてまとめられている。後者の基地組織についてはこれまでに有効な非破壊評価手法がなく、その確立が求められていた。本研究では、鋳鉄の基地組織の要素であるフェライト、パーライトおよびセメンタイトがそれぞれ異なる電磁的性質を有していることに着目し、電磁的手法を利用して基地組織およびその強度を非破壊、非接触で評価することを発案し、研究グループを組織してその手法の確立に取り組んだ。特に、黒鉛組織及び基地組織と電磁特性との関係を、膨大な実験データの整理考察によって明らかにするとともに、渦電流試験法によって球状黒鉛鋳鉄の硬さが直接推定可能であることを示して、その評価法を提案した。これを超音波試験法と組み合わせることによって、片状黒鉛鋳鉄から球状黒鉛鋳鉄までの全域で、鋳鉄の機械的特性を非破壊的に推定する手法と、その理論的根拠が確立された。本研究では、この手法をさらに発展させ、電磁特性による急冷欠陥組織（チル組織）の探査、片状黒鉛鋳鉄における黒鉛組織の評価についても取り組み、複雑な混合組織である鋳鉄組織の電磁特性のモデル化、ならびにその材質評価への応用の理論体系化を現在行っている。本研究成果は、鋳鉄品の全数検査の実現に寄与し、鋳造業の振興に寄与するものと期待される。以上の業績により、平成 22 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞（平成 22 年 4 月）を受賞した。

#### 遠心型送風機の多目的ロバスト最適設計技術

遠心型送風機の極限性能を大量生産による製品のばらつきのもとでも安定して実現するための設計技術として、新たなコンピュータ支援設計技術を開発した。研究の特徴としては、単に性能の最適化を行うのではなく、形状のばらつきを考慮して性能のばらつきを抑えること、計算結果のデータベースから設計指針を得るためにデータマイニング技術を適用していることである。研究成果を利用して設計された洗濯乾燥機は日立から商品名ビッグドラムとして販売され、ヒット商品となっている。その技術開発に対して平成 20 年度日本機械学会東北支部技術研究賞が贈賞され、研究内容をまとめた論文は日本機械学会賞（論文）（平成 22 年 4 月）を受賞した。また、平成 23 年日経トレンディ 7 月号インサイド・ストーリーで開発の経緯が紹介されている。本研究は、東北大学と日立製作所の組織的連携協定に基づく共同研究として実施された。

#### 高圧下の変動速度場における液滴火炎の蒸発速度の解明



高圧下の乱流噴霧燃焼の現象解明は、航空用ガスタービンエンジンやディーゼルエンジンなど高負荷燃焼装置の開発と高効率化にとって不可欠であるが、微視的液滴燃焼の観点に立った乱流噴霧燃焼の研究はこれまで十分に行われていなかった。乱流噴霧燃焼の要素過程として液滴燃焼特性を考える上で、乱流を構成する微細渦管と液滴火炎には何らかの相互作用が存在すると考えるべきであり、変動する強制対流場における液滴燃焼の現象解明は重要である。本研究では、高圧下の変動速度場における液滴火炎に対し、微小重力環境を利用した燃焼実験および化学反応を含む数値計算を行い、速度変動が液滴蒸発速度に及ぼす影響について明らかにした。

本研究は、微視的観点から乱流噴霧燃焼の現象解明に寄与するという極めて独自性の高い研究であり、得られた知見を用いた燃焼モデルは、数値計算による実用燃焼器の設計・開発に大きく貢献するものである。また、その研究成果に対し、平成 22 年度日本機械学会熱工学会部門講演論文表彰（平成 22 年 11 月）が授与されている。

#### 可変減衰特性を有するパッシブ式 MR ダンパの開発とその振動制御への展開

磁場によって粘性が可変な MR 流体を作動流体とする MR ダンパは、一般に、電磁石を用いて電氣的に減衰力や減衰特性が変化できるセミアクティブ方式の可変減衰ダンパとして用いられる。本研究では、永久磁石とダンパ変位によって開閉する磁気回路とピストンヘッドに設けたチェック弁を効果的に活用することによって、センサや電源及び制御系を不要とするパッシブ方式でありながら、ダンパ変位とダンパ変位×速度の符号とに依存して自律的に減衰力が変化する 2 種類の新規で独創的なパッシブ方式の MR ダンパを提案・開発している。提案した 2 種類のパッシブ式 MR ダンパは、それぞれ設計どおりにダンパ変位およびダンパ変位×速度の符号に応じて減衰力の強弱が変化し、優れた振動制御特性を発揮することを実験的に検証し、導出した発生減衰力の解析式によってその減衰力および振動制御特性を予測可能としている。変位依存型のパッシブ式 MR ダンパは、大変位で減衰力が強く小変位で減衰力が弱くなる減衰力を自律的に発生する。また、変位×速度依存型のパッシブ式 MR ダンパは、変位×速度が正のとき減衰力が小さく、変位×速度が負のとき減衰力が大きくなる特性を有し、1 自由度系の振動試験では、本ダンパを用いることによって共振域の応答増幅を抑制しつつ高い周波数帯域の応答も低く抑えることが可能となり、卓越した振動制御性能を発揮できることを立証している。開発したパッシブ式 MR ダンパは、地震時の停電の際にも高い信頼性をもって作動し、顕著な振動抑制性能を両立できることから、今後、特に超耐震構造を目指した建築構造物の免震・制振装置などへの適用が期待される。

これらの研究に対し、日本機械学会流体工学部門賞（平成 22 年 11 月）を受賞した。また、日本機械学会論文集 B 編に掲載された変位依存型パッシブ式 MR ダンパに関する研究論文に対して、財団法人油空圧機器技術振興財団から平成 21 年度「学術論文顕彰」（平成 22 年 5 月）を受け、さらに、The 14<sup>th</sup> International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM'2009)、Xi'an China（平成 21 年 9 月）で発表した変位×速度依存型パッシブ式 MR ダンパに関する研究に対して、ISEM Best Poster Presentation Award を授与されており、本研究は国際的にも高い評価を受けている。

#### 薄膜に閉じ込められた希薄磁性コロイド分散系における磁場下のコロイド鎖とコロイド粒子の面内拡散と相図の解明

磁性コロイド分散系については、高濃度領域はすでに MR 流体や磁性流体として様々な分

野で応用されているが、希薄な系についての応用や基礎研究は進んでいない。そこで、磁性コロイド一層膜と薄膜に閉じ込められたコロイド分散系において、コロイドの濃度が数%の希薄な場合に、膜面に垂直に磁場を印加した際にみられる磁性コロイド鎖とコロイド粒子の面内拡散について、モデル化し、計算機実験を行った。その結果、磁性コロイド鎖と磁性コロイド粒子の面内拡散の磁場強度依存性やコロイド鎖の長時間自己拡散係数の鎖長依存性を明らかにした。さらに、粒度分布を変化させると、コロイドの液体相から結晶相への転移や、液体相からガラス状態への遷移が生じるが、コロイドの鎖長、粒度分布、濃度によらず、流動相での長時間自己拡散係数の平均コロイド間磁気相互作用依存性は、特異点でスケールすることにより、一つのマスターカーブで記述できることを示した。また、2成分磁性コロイド分散系については、計算機実験の結果とコロイド一層膜の実験との比較を行い、モデルの適用範囲についても議論した。本研究の成果をもとに、コロイドの粒度分布や薄膜の膜厚を調整すれば、将来的には、面内拡散の大きさのコントロールが可能となることが期待される。なお、本研究は、The 12th International Conference on Magnetic Fluids において Best Poster Award (平成 22 年 9 月) を受賞している。

#### 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との連携事業の推進

東北大学・JAXA 連携協力協定のもとで共同研究を推進している。流体科学研究所では、平成 22 年度は客員教授として青山剛史氏 (4～9 月) を招聘し、引き続き下記に示す共同研究を行った。

- 1) 後方乱気流の航空機におよぼす影響の研究
- 2) ソニックブーム長距離非線形伝播音響解析ツール開発およびソニックブーム波形に対する大気乱流効果に関する研究
- 3) 局所気象シミュレーションを利用した乱気流検知システムの高性能化
- 4) 極低温混相流制御技術の研究
- 5) ブレード設計変数の自由度を高めたヘリコプタ用最適化コードの構築
- 6) DLC 被膜の真空中における耐摩耗性向上の研究
- 7) オレフィン系及びアルコール系炭化水素系燃料の着火燃焼特性に関する実験研究
- 8) マイクロキャビテーションを伴う噴霧微粒化現象に関する超並列融合計算

これまでに、テーマごとの研究連絡会議をそれぞれ実施し、また学術講演会でのオーガナイズド・セッション企画や研究発表を行っている。平成 23 年 6 月に共同研究報告会を実施、昨年度の成果を確認し、今年度の取り組みについて協議した。また、グローバル COE プログラム「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」の一環として学生がサマースクールを企画、JAXA の若手研究者にも参加を依頼し、研究交流を行っている。

#### 高経年化対策強化基盤のための安全研究の総合的推進に関する共同研究

高経年化が進行しつつあるプラントの寿命予測精度を向上させ、その科学的合理性を担保するための劣化現象の解明を行うことを目的として、(株)インテリジェント・コスモス研究機構と原子力安全・保安院との間で締結された委託研究の再委託研究に参加した。本研究は東北大学を含め 9 大学と 1 民間企業によって推進された。この中で流体科学研究所は、流動誘起損傷のメカニズム解明とその評価に関する取り組みを行った。

原子力発電設備の管理において、冷却材の流れによって加速される損傷を制御することは

重要な課題である。配管減肉現象は、流動と材料との相互作用により生ずるものであり、そのメカニズムを解明するためには、流動研究と材料劣化研究との融合が必要である。さらに、材料と流体とのミクロな界面現象から配管システムの流動に至るまでの様々なスケールで議論を行う必要がある。本研究においては、様々な分野の研究者が参加し、以下に示す要素研究とその統合に関する取り組みを行った。「FAC（流動加速腐食）対応研究」および「LDI（液滴衝撃エロージョン）対応研究」として、複雑流動下での物質輸送の計測融合解析・評価や液滴－固体相互作用に基づく液滴衝突局所応力場の高時間解像度解析を実施し、流動誘起損傷事象について流体の観点からの解析や評価を行った。

平成 22 年度は、機械的減肉の従来モデルに対し、実験および数値解析の結果に基づいて検証・修正を行い、よりの確なモデルを提案した。また「減肉の定点監視及び広域監視による評価技術に関する研究」については電磁超音波－渦電流マルチセンサ配管減肉評価手法の開発に関する研究およびリモートフィールド渦電流探傷法による配管減肉評価手法の開発に関する研究を実施するとともに、FAC、LDI の検査、モニタリングに適用する場合に期待される特長と課題を明らかにした。さらに、電磁超音波共鳴法により実機相当の配管の減肉モニタリングを実施し、高い精度と安定性で減肉傾向を把握できることを示した。また、先進的渦電流探傷法を Ni 基合金溶接部の SCC 検査に適用し、SCC の電磁応答に関するモデルを検討し、ならびに、これまでの検討に基づき、閾値による深さ弁別法の提案を行った。

#### 原子力発電所における配管内液滴衝撃エロージョン予測システムの開発

福島第一原子力発電所の事故に代表されるように、日本における原子力発電所の事故は国家の安全を脅かす重大な問題として浮上している。

原子力技術の安全性確保に関する対策を講じることは国家の安全にとって最重要課題であり、産学官連携の観点から考えても大学が原子力産業の安全面・危機管理に対し果たす役割は非常に大きいと言える。現在、事故原因と国内の原子力発電所の再稼働に関する議論が活発となっているが、福島第一原子力発電所が水素爆発を誘起した直接の原因は、配管系の故障により冷却水が正常に循環しなかったことが主要因である点に注目すべきである。原子力技術に関しては原子炉本体の安全性のみに重点が置かれるあまり、冷却システムを構成する配管系の安全性に関しては非常に重要であるにもかかわらず見逃されがちであった。

特に、原子力発電所において最も多くトラブルが頻発し大事故に直結する事象となりうるのが、配管系における減肉現象である。減肉とは高速流動・腐食（エロージョン・コロージョン）その他の要因により配管内部の材料組織が浸食され、配管に穴が開き、ついには破断に至る現象である。これは原子炉内配管が非常に複雑な形状を有し、なおかつ高温・高速という非常にシビアな条件で配管内流動が行われているからであり、現在のところ減肉現象を事前に予測あるいは未然に防止することは非常に困難である。

本研究は、(株)東北電力との共同研究により配管内液滴衝撃エロージョン予測システムの開発を行ったものであり、スーパーコンピューテーションの活用による超並列融合計算により、原子力発電所の配管系と高速熱流動をスーパーコンピュータ上に再現し、経年劣化による配管内脆弱箇所・減肉エロージョンの発生箇所・原因を事前に計算予測することが可能となっており、事故を未然に防ぐだけでなく丈夫な配管の設計にも貢献している。今後の実用化により、原子炉保守・点検に要する時間的・人的コストは大幅に軽減化し、極めて安全性の高い原子力発電の運用が可能になると言える。本システムは原発配管の設計データを入力

すれば全国の原子力発電所の液滴衝撃エロージョン予測が可能であり、原子力配管系のみならず発電所プラントの安全性を改善する上で非常に重要なシステムとなり得る。

平成 22 年度は、配管内凝縮液滴の生成に関する融合型コンピューテーションを行い、既存研究では困難とされていた凝縮液滴の発生位置特定と過冷却度ならびに液滴成長率に関する数値予測が可能となった。なお、本研究成果の紹介記事が、平成 23 年 6 月 21 日 日経産業新聞に掲載された。

### 国際リエゾンオフィスを活用した国際研究協力活動

東北大学が推進している 11 件の国際リエゾンオフィスのうち 6 件のリエゾンオフィスの交流活動の展開については、本研究所が中心となる役割を担っており、国際交流と国際共同研究を戦略的かつ多角的に推進している。平成 22 年度は、グローバル COE プログラム「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」、CNRS（フランス国立科学研究センター、フランス）の LIA（Associated International Laboratory）事業に基づく国立中央理工学校リヨン校／国立応用科学院リヨン校／CNRS／東北大学間の協力によるリヨン－東北理工学ジョイントラボラトリー（ELyT ジョイントラボラトリー）といった大型国際交流事業を展開する上でリエゾンオフィスは重要な役割を担うとともに、これらの事業により交流活動に加えて活発な国際研究協力を行った。また、平成 22 年 11 月に「第 7 回流動ダイナミクスに関する国際会議」におけるリエゾンオフィスセッション開催、平成 22 年 11 月に仙台で ELyT オータムスクールの開催、平成 23 年 2 月に ELyT ジョイントラボラトリーの Annual ELyT Workshop を仙台で開催する等の活動を行った。主な研究協力活動は以下のように行われた。

#### (1) ジョイントラボラトリー活動

流体科学研究所で進めている流動ダイナミクス国際融合ジョイントラボラトリー（FLOWJOY）は、平成 19 年 2 月にリヨンで行われた日仏ジョイントフォーラム（東北大学 100 周年、ECL150 周年、INSA-Lyon50 周年記念事業）で構想された。本研究所では流体科学に関する国際拠点研究機関として、流動ダイナミクスに関する融合的な世界人材のため相互補完的かつ国際研究・教育プログラムの企画・運営を行うことを目的として、平成 19 年 5 月に設置要項が制定された。平成 22 年度は 3 件のジョイントラボラトリー（大林教授：Development of Design Exploration Method for Real-World Design Problem、圓山教授：Measurement of Radiative Properties in Micro-Nano Structure、高木教授：Functionality Design of the Contact Dynamics: DECO Laboratory）が認定されて、積極的な国際共同研究が実施された。

これらの活動の結果、ECL、INSA-Lyon および東北大学と共同で提案した CNRS の LIA 事業が平成 20 年度に採択され、東北大学のジョイントラボラトリーとして、ELyT（Engineering and Science Lyon Tohoku）ラボラトリーが開設された。平成 22 年度については、5 分野の 24 研究グループのうち、本研究所は 7 グループに参加し、5 分野のうち 2 分野でリーダーを輩出している。ELyT ラボラトリーの運営委員会を毎年リヨンまたは仙台で開催して共同研究及び将来計画について確認するとともに、Annual ELyT Workshop（次回は平成 24 年 3 月開催）及び学生のためのオータムスクール（次回は平成 24 年秋開催）のあり方について議論した。

#### (2) グローバル COE「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」

グローバル COE「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」では平成 22 年度主として以下の様な国際研究協力活動を行った。

- ① 平成 22 年 11 月仙台において、第 7 回流動ダイナミクスに関する国際会議: 7<sup>th</sup> International

Conference on Flow Dynamics を開催し、国内外より 749 名が参加した（うち海外からは 22 カ国 241 名）。

- ② GCOE 国際インターンシップによる留学生を 7 名（米国、韓国、フランス×2、スウェーデン、中国、ドイツ）派遣し、8 名（インド、韓国、フランス、中国、オーストラリア、イラン、ポーランド、イタリア）を受け入れた。
- ③ 若手研究者（講師、助教、ポスドク、博士課程後期大学院生）16 名を国際会議に派遣した。
- ④ 上記の活動を含めて平成 22 年度は、国際協同教育・研究の推進のために、国際会議・研究会・セミナー等を合わせて 15 回開催し、延合計 1,421 名が参加した。

**(3) 最先端研究開発戦略的強化費補助金（頭脳循環を活性化する若手研究者海外派遣プログラム）「次世代流体科学の展開に向けた戦略的国際共同研究プロジェクト」**

国際共同研究に携わる若手研究者を海外機関に長期派遣し、若手研究者の国際的な研鑽機会を拡大するとともに、海外機関との協力関係の強化を図ることを目的とした本プロジェクトに、平成 22 年度より採択された。今後、異分野の研究を同時並行的に推進することによって、共同研究の成果を当該分野に留めることなく、他分野の重要問題の解決と研究の飛躍的な推進に繋げる横断的共同研究体制を構築することを目指している。

初年度である平成 22 年度は、マサチューセッツ工科大学に若手教員 1 名を長期派遣し、高度医療に係る国際共同研究を開始した。また、平成 23 年度以降の共同研究実施に向け、その他の各派遣先との研究交流を進め、延べ 4 名を短期派遣した。

**(3) 特筆すべき社会貢献、国際化等の活動の取組と成果**

**流体研の研究成果を社会に公開する活動**

研究成果ならびに学術交流成果についての最新情報を、本研究所主催による国際会議を毎年実施することによって常に発信し続けている。同様に、本研究所の研究成果をまとめた「流体科学データベース」を平成12年度からホームページ上で一般に公開し、検索・閲覧できるようにしている。

「東北大学イノベーションフェア in 仙台」（平成22年10月：仙台国際センター）等の研究展示会に本研究所の 4 クラスターを中心に 6 研究室が参加し、研究活動の公開を毎年行っている。

国際会議 Supercomputing 2010 (SC10)（平成22年11月：Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, LA, USA）にて東北大ブースを出展し、研究所から 4 名が参加して研究者および企業等一般向けに広報活動を行った。

日経産業新聞や河北新報等のメディアに技術記事が掲載され、東日本放送の「東北大学の新世紀」で研究活動を紹介する(平成22年度は 1 回放映)などメディアを通じた技術公開を行っている。

また、インターネットテレビ (CAT-V NET TV コロンブスチャンネル) に 8 研究分野 1 実験施設の紹介ビデオが掲載されており、最先端の研究活動を社会へ公開すべく発信活動を行っている。紹介ビデオは主として英語で作成されており、国内だけでなく全世界に視野を置いた活動を行っている。

流体科学研究所報告（邦文）、及びRIFS（英文）を毎年作成し、国内・外の関係研究機関 500か所以上に配付している。

#### 流体科学に関する一般市民向けの教育活動

一般市民を対象とした公開講座「みやぎ県民大学大学開放講座」を平成 17 年度から開講しており、平成 22 年度は、8 月 27 日、9 月 3 日、10 日、17 日、24 日の計 5 回にわたり「なぐれ」をテーマに 5 人の講師が講演を行った。平成 23 年度は 9 月に実施することが決まっている。

大学の出前授業による宮城県立仙台南高校での出張講演会（平成22年7月9日）や、工学研究科と共同しての社会人のリカレント教育を目的とした公開講座（一般対象、有料）の実施など市民向けの教育活動に積極的に取り組んでいる。

仙台市科学館で毎年開催される「科学講演会」において、ペットボトルロケットの製作・講習会を実施した（平成22年9月5日、参加者277名）。この企画は16年間継続中である。また、ペットボトルロケット出前授業を小学校において毎年行い、平成22年度は仙台市立福岡小学校（参加者25名）、同八木山南小学校（参加者52名）で行った。

#### 環境技術に関する社会貢献

本学全体で取り組んでいる教育・研究活動における地球温暖化問題の解決に向けた取り組みとして、環境関連分野の研究テーマに積極的に取り組んでいる。本所教員が実施している環境関連研究テーマは、地球温暖化、エネルギー、燃料・燃焼、廃棄物処理、大気環境浄化、水環境浄化、新プロセス・技術、計測技術、運輸・交通、環境哲学の幅広い分野で実施され、東北大学環境報告書 2010 版にはそのうちの 14 件のテーマが示されている。

#### (4) その他、特筆すべき活動等の取組と成果

##### 安全衛生環境整備

研究所内の環境を研究・教育面において充実させるとともに、そのインフラの維持のため、安全衛生委員会を中心に安全衛生管理の観点から各インフラの使用者と相互安全確認を定期的に行っている。併せて研究所独自の「安全マニュアル」を作成し、研究所に特化な項目（特殊装置の使用、特殊環境）については、充実したマニュアルの作成を徹底させるとともに、一般的な事項については「安全衛生管理指針」「安全マニュアル」に従ったマニュアルの作成を行うことで、マニュアルの簡易化、一元化を図っている。

##### 女性教員への支援

本研究所は女性教員の「支援要員派遣制度」を積極的に活用し、技術補佐員を雇用している。平成 22 年度は 1 名の雇用を行い、これにより当該女性教員は研究・教育面の運営が円滑かつ効率よく行えるようになり、大きな成果を上げることができたと言える。

##### 構想力講座の実施

研究所の教職員および学生を対象とした「構想力講座」を平成 22 年度に 3 回実施した。これは研究・教育の質を向上するための構想力を養成するためのものであり、所内教員が講師の招へいから講演の実施までを行った。平成 23 年 3 月にはこれらの講座を総括する形で参加者による報告会が実施され、平成 23 年度も引き続き実施している。

**研究所現役構成員および退所者との交流**

定年、異動または卒業により研究所を退所した教職員・学生と現役の研究所教職員の交流を図るために「流友会」を組織している。会員のデータベースを充実化することで、親睦的な目的だけでなく研究面から教育面に至るまで多くの情報交換をできる場となっている。また、現役の教職員同士で研究所の様々な面の充実化を図るために「流研会」を組織している。業務を超えた多くの面でのつながりを大切にすべく組織されたもので、教職員同士の親睦交流はもちろんのこと、職場環境が健康的なものとなるよう、多くの企画（スポーツ大会、旅行など）を行っている。