

# 「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発」

(平成11年度～15年度)

平成13年度予算額 1.7億円

研究代表者：浅井圭介（航空宇宙技術研究所） 他5機関

## 研究の概要・目標

### 1. 何を目標しているのか

熱流体現象を解明するため、機能性分子の薄膜を用いた新しい概念のセンシング技術の開発を行う。特に超高速流、超低温流、超希薄流など極限状態を対象の中心とする。

#### 3年後の目標：

- 機能性分子センサの探索
- 計測ツールの試作・評価
- 機能性分子センサ評価試験

#### 5年後の目標

- 実用計測ツールの開発と実証
- 熱流体現象への適用

### 2. 何を研究しているのか

熱流体現象を解明するため、機能性分子の光化学的機能を利用して、圧力、温度、気体組成などの熱流体変数を光学的に測定する技術の基盤的な研究を行う。

### 3. 何が新しいのか

流れに影響する従来のセンサを用いずに極限状態の熱流体現象を観測することが可能な熱流体センシング技術を開発すること。

熱流体現象…温度、圧力などの状態の変化が伴うときの空気の流れをいう。

機能性分子…光、圧力、温度などの外部刺激を受けることによって発光するなどの機能を有する分子。

## 諸外国の現状等

### 1. 現状

熱流体現象の観測に機能性分子を用いる試みは1990年代初頭から始まり、欧米では常環境を対象とした感圧塗料の研究開発やそれを用いた実証試験が進められている。

### 2. 我が国の水準

我が国でも、航空機やロケットの風洞実験に適用できる感圧塗料を開発しており、機能性分子の研究開発では我が国と欧米とは競い合っている状況である。

## 研究進展・成果がもたらす利点

### 1. 世界との水準の関係

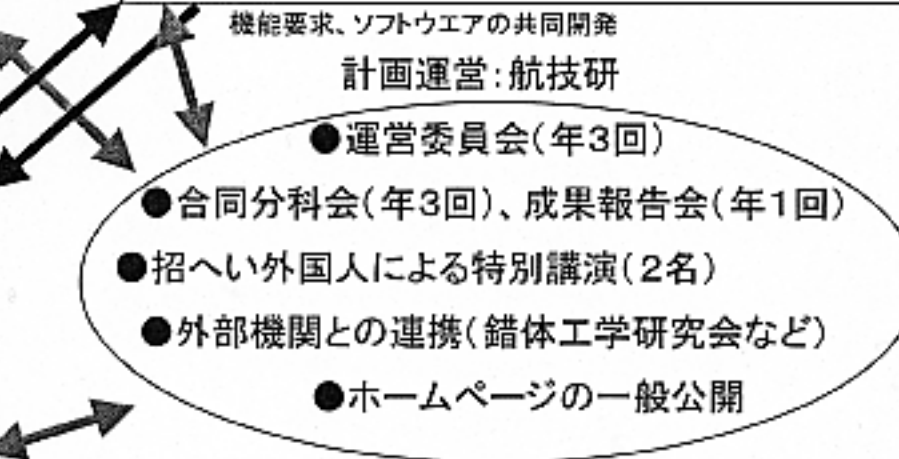
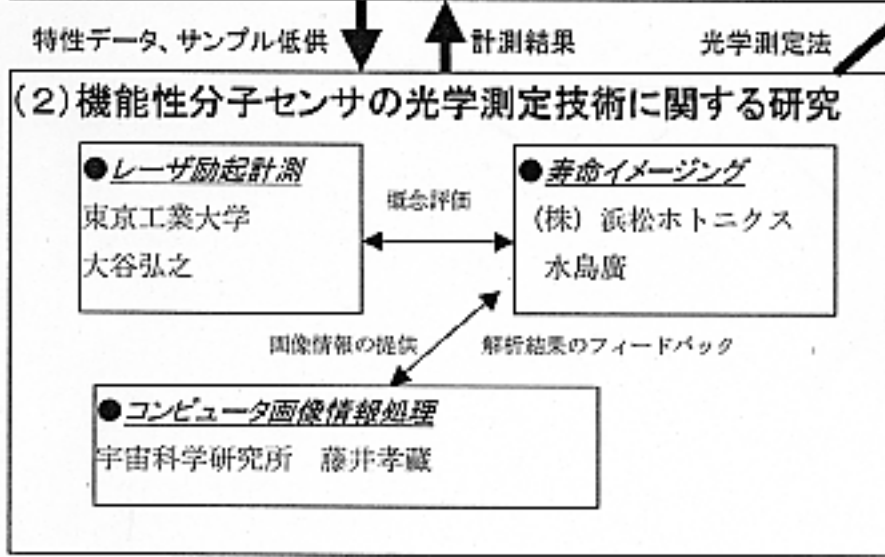
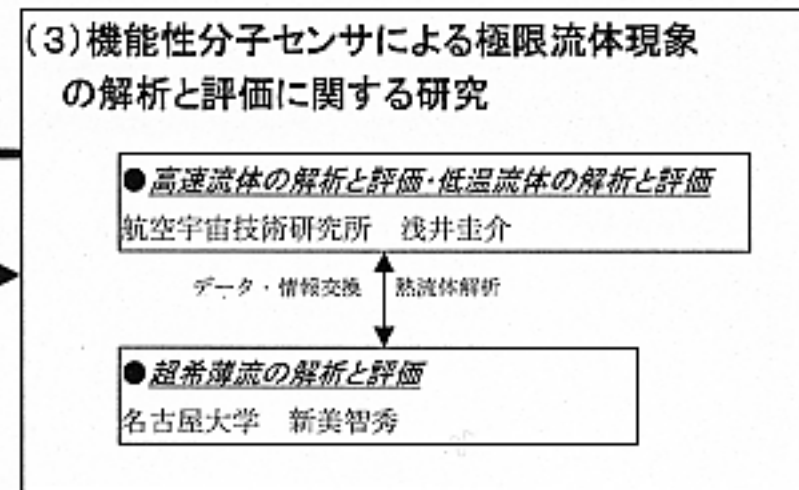
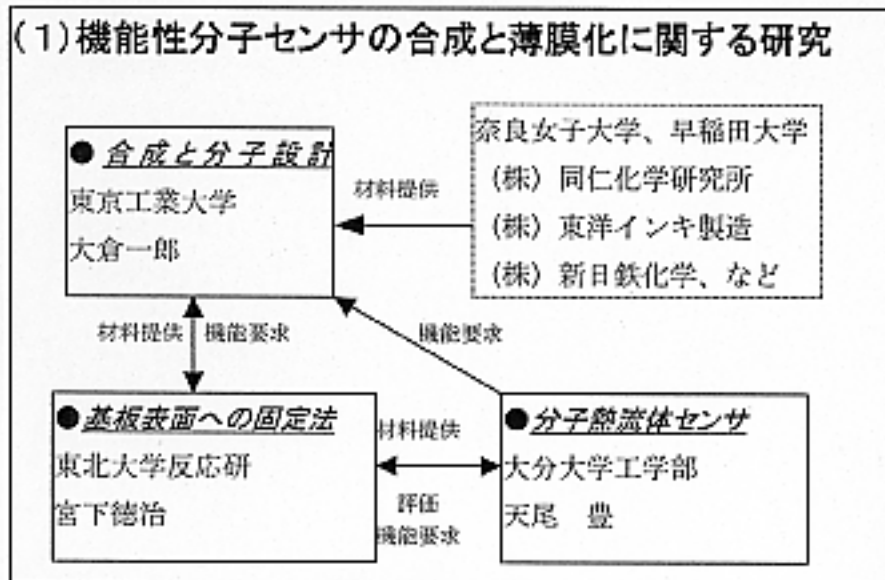
現在のところ、世界的にみても機能性分子を熱流体センシングの研究開発は、常環境が中心で、極限環境ではあまり行われていない。本研究開発のように有機化学、光工学、熱流体、情報処理の専門家を結集して行い、国際競争力を維持することが重要である。

### 2. 波及効果

機能性分子センシング技術の研究成果及びこれから派生して構築された機能性分子センサーのデータベースは、航空宇宙技術以外に、以下の分野への波及が考えられる。

- 高速鉄道、自動車等の高速輸送系
- エンジンや熱交換器等のエネルギー変換
- 真空装置やマイクロメカニズムの研究
- 大気環境等の微量ガス検出

# 「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発」 研究体制



**研究目標**

3年後: 分子センサ探索、装置試作、熱流体実験評価  
 5年後: 実用ツールの開発、熱流体解析へ適用

「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発」所用経費一覧

研究項目	研究担当機関	研究担当者	所用経費			
			平成11年度	平成12年度	平成13年度	合計
1. 機能性分子センサの合成と薄膜化に関する研究開発 (1) 新規機能性分子の合成と分子設計に関する研究 (2) 機能性分子の基盤表面への固定法に関する研究 (3) 複合機能を有する分子熱流体センサの設計に関する研究	東京工業大学生命理工学研究科 東北大学多元物質科学研究所 大分大学工学部	大 倉 一 郎 宮 下 徳 治 天 尾 豊	33,648 12,725 11,089	19,040 14,126 13,891	22,910 14,912 10,445	75,598 41,763 35,425
2. 機能性分子センサの光学測定技術に関する研究開発 (1) レーザー励起による光計測手法の研究 (2) ルミネセンス寿命のイメージング技術の研究 (3) コンピュータ画像処理による熱流体情報の解析技術に関する研究	東京工業大学生命理工学研究科 浜松ホトニクス(株)システム事業部 宇宙科学研究所	大 谷 弘 之 水 島 廣 藤 井 孝 藏	2,268 23,387 14,228	11,078 30,163 14,472	10,757 33,911 12,081	24,103 87,461 40,781
3. 機能性分子センサによる極限流体现象の解析と評価に関する研究 (1) 機能性分子センサによる高速流体・低温流体の解析と評価に関する研究 (2) 機能性分子センサによる超希薄流の解析と評価に関する研究	航空宇宙技術研究所 名古屋大学工学研究科	浅 井 圭 介 新 美 智 秀	33,182 18,701	42,689 14,165	51,817 14,163	127,686 47,029
4. 研究運営	航空宇宙技術研究所		423	1,272	2,830	4,525
		合 計	149,651	160,896	173,826	484,373

## 研究成果の概要

### 1. 総括

超高速流, 超低温流, 超希薄流など, 従来の方法では計測が困難な極限環境における熱流体現象を解明するため, 色素化合物の光化学的機能を利用して, 圧力, 温度, 気体組成などの熱流体変数を可視化する新しい概念の熱流体センシング技術の研究開発を行った。第1期の研究では, 機能性化学, 光計測技術, 熱流体力学を代表する産官学8機関が有機的に連携して, 機能性分子センサの探索, 光学観測装置の開発, 熱流体実験による評価に取り組んだ。その結果, 化学分野においては, 圧力や温度などの外部刺激にตอบสนองする色素化合物とそれを基板上に固定する高分子バイндаの探索を行い, 流体分野が要求する極限流体環境下で使用可能な分子センサを合成することに成功した。これらのセンサのうち特に優秀な性能を示したものについては, 特許出願を行った。また, 高分子LB膜や色素吸着膜等, バィндаを使用しないで色素を基板上に固定する新しい方法の開発し, センサの感度や時間応答性を大幅に改善することができた。次に, 光計測の分野においては, 色素分子の発光寿命の計測を行うレーザー励起分光計測装置を開発し, 基板上に固定した常温リン光励起分子の特性を明らかにした。また, 新たに, 蛍光寿命2次元分布イメージング装置, 高速度・高精度画像計測装置, 及び光画像基本処理モジュール等の試作を行い, 熱流体実験による評価を行う目処を立てた。流体分野では, 化学分野が研究開発した分子センサ薄膜の極限流体環境下における評価試験を, 極超音速風洞, 衝撃波管, 超音速風洞, 低温風洞, 高真空チャンバなどを用いて実施した。その結果, 高速流については, 極超音速気流中の2次元圧力分布の可視化, 移動する衝撃波が誘起する非定常圧力場の観測, 低温風洞については, 液体窒素温度における温度・圧力場の計測などに, 世界で初めて成功した。さらに, 希薄流については, 低真空に適用可能な圧力センサを開発し, 希薄衝突噴流による圧力場を可視化することができた。また, 窒素の共鳴多光子イオン化法により超音速自由分子流の回転温度計測をし, 超希薄気体流内における窒素の温度非平衡に関するデータ取得が可能であることを明らかにした。以上のように, 機能性化学, 光計測技術, 熱流体力学の研究者が有機的に連携することによって, 分子センサの探索, 装置の開発, 熱流体実験評価という初期の目標を達成することができた。

### 2. 各論

#### (1) 新規機能性分子の合成と分子設計に関する研究 (東京工業大学)

センサ素子としての機能を持つ新規化合物 (色素) を設計合成し, これらの化合物で構成されるセンシング膜の光化学的特性を調べることによって, 酸素分圧センサ, 温度センサとして熱流体実験に応用可能な機能性分子センサを探索した。

#### (2) 機能性分子の基板表面への固定法に関する研究 (東北大学多元物質科学研究所)

機能性分子を基板表面へ固定させる方法を開発するため, ポルフィリン, 多環式芳香族化合物, ルテニウム錯体, 希土類金属錯体などの色素を, ラングミュアー・プロジェクト (LB) 法や色素吸着法により基板上に薄膜化する方法について研究を行った。酸素センサ・温度センサとなる色素を含む分子レベルの組織膜を基板上に形成する方法の開発に成功し, 超薄膜色素センサの熱流体実験への適用に目途を立てた。

てた。

(3) 複合機能を持つ分子熱流体センサの設計に関する研究 (大分大学工学部)

金属錯体や機能性高分子を基盤とした複合機能を有する分子を分子設計・合成し、その光物理及び光化学的な性質を光学的手法により調べ、熱流体センサを構築する方法を研究した。その結果、分子熱流体センサとして優れた機能を持つ新しいセンシング膜の開発に成功し、これらを熱流体グループによる実証実験に供与した。

(4) レーザー励起による光計測手法の研究 (東京工業大学)

機能性分子の光物性ならびに酸素・温度との相互作用を探るため、3種の分光装置を製作した。これにより、感圧塗料としての様々な化合物の評価が行えるようになった。また、この装置を使用してレーザーで励起された分子の光化学センサとしての機能を調べた結果、感圧分子の応答と色素の光物性に対する新たな知見を得ることができた。

(5) ルミネセンス寿命のイメージング技術の研究 (浜松ホトニクス(株))

感応分子センサ膜の発光寿命の2次元的な分布をイメージとして可視化する技術の開発するため、パルス励起法と光信号処理技術に関する研究を行った。また、高速光現象を高精度で計測するための高速・高感度 CCD カメラを製作した。これらの装置をサンプル実験に適用し、高精度のルミネセンス寿命のイメージング技術の開発に見通しを得た。

(6) コンピュータ画像処理による熱流体情報の解析技術に関する研究 (宇宙科学研究所)

熱流体情報の解析技術を開発するため、機能性分子センサの光画像をコンピュータ処理することによって、定量的な熱流体情報の抽出や、多次元の複雑な熱流体现象を可視化する方法について研究を行った。これにより、汎用となる画像処理ツールの構築に見通しを立てた。

(7) 機能性分子センサによる高速流体・低温流体の解析と評価に関する研究 (航空宇宙技術研究所)

衝撃風洞等において生じる、超高速または超短時間の熱流体现象を解析するため、機能性分子を用いた光学センシング装置を構築し、その評価実験を行った。また、機能性分子センサの液化温度近傍の低温環境への適用性についても評価実験を行った。その結果、機能性分子センサがこのような極限環境でも機能することが確かめられた。

(8) 機能性分子センサによる超希薄流の解析と評価に関する研究 (名古屋大学)

高層大気やマイクロスケールの流れに代表される連続体と分子流の境目になる希薄領域の流体现象を分子センサーを用いて測定する技術を確立するため、機能性分子センサの超低密度環境における評価実験を行った。その結果、機能性分子センサによって 151Pa (約 1torr) 以下の圧力を計測する可能性を実証できた。

研究成果公表等の状況<課題全体>

課題名（研究代表者）：

機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発（航空宇宙技術研究所，浅井圭介）

【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	4（1）件	18件	74件	96（1）件
国外	56（8）件	5件	31件	92（8）件
合計	60（9）件	23件	105件	188（9）件

（注：既発表論文について記載し，投稿中の論文については括弧書き）

【特許出願等】 5件（国内 5件，国外 0件）

1. 高機能感圧塗料および素子，特願2000-6162，2000年3月7日出願，浅井圭介，大倉一郎，西出宏之
2. 酸素センサー，特願2000-219768 2000年7月19日出願，天尾豊，山下祐彦，木村邦生，水田憲男
3. 感温色素担持超薄膜，特願2000-358946 2000年11月27日出願，天尾豊，宮下徳治
4. 超高速応答機能を有する光学的酸素及び圧力センサー，特願2000-359554 2000年11月27日出願，天尾豊，手塚宣和，亀田正治，浅井圭介
5. 測定感度可変機能を有する光学的酸素分子センサー，特願2000-364640 2000年11月30日出願，天尾豊，大倉一郎，宮下徳治

【受賞等】 5件（国内 5件，国外 0件）

1. 第14回日本化学会若い世代の特別講演会（平成11年9月25日）航技研 天尾豊  
“レーザーフラッシュ法を利用した固体表面の光学的酸素センシング—フラーレン・亜鉛ポルフィリンを利用して—” 日本化学会
2. 平成12年度注目発明（平成12年4月）浅井圭介（航技研），大倉一郎（東工大）
3. 日本化学会欧文誌 Bulletin of Chemical Society of Japan Award（平成12年12月1日）航技研 天尾豊，東工大 大倉一郎，東北大 宮下徳治  
“Optical Oxygen Sensing Based on the Luminescence Quenching of Europium (III) Complex Immobilized in Fluoropolymer Film” 日本化学会
4. 日本機械学会論文賞（平成13年4月5日），REMPIによる超希薄気体流計測に関する研究，名古屋大 新美智秀，森英男，石田敏彦，青木義典，日本機械学会
5. 基礎錯体工学研究会（SPACC）技術賞（平成13年10月）MOSAIC研究グループ

【主要雑誌への研究成果発表】

Journal	Impact Factor	第1分科会 (化学)	第2分科会 (光計測)	第3分科会 (熱流体)	合計
Macromolecules	3. 700	1			1
Bioconjugate Chem.	3. 315	1			1
Langmuir	2. 937	1			1
J. Mater. Chem.	2. 317	1			1
Anal. Commun.	2. 027	2			2
主要雑誌小計		6			6
発表論文合計		46(5)	2	10(2)	58(7)

(注: Impact Factorが2.0以上の雑誌を抽出)

【研究成果の普及方法】

1) 研究発表等による普及活動

原著論文等の研究発表に加えて、以下のような活動を通じて、本技術の一般への浸透を促進した。

- ・機能性分子センサ技術を対象とした学会の企画プログラムや学会誌の特集号の企画
  - 第29回可視化情報シンポジウム(2001年7月) セッション名「感圧・感温材料による表面センシング技術」発表論文13件
  - 可視化情報学会誌2001年10月号「光学的圧力計測技術の新展開」掲載論文7件
  - Journal of Visualization, Vol.4, No.2(2001) "Pressure-Sensitive Paint" 小特集
  - Second International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines(2002年6-7月)セッション名 "Sensors"(準備中)
- ・研究者を対象にした本技術の講習会の開催、可視化情報学会(準備中)
- ・本研究プログラムの成果報告会(2回)と分子センサ研究会(6回)の実施
- ・関連分野で国際的に活動している外国人の招へいと特別講演の実施。
  - ・ John P. Sullivan教授(米国Purdue大学航空宇宙学科)
  - ・ 李 相京 博士(韓国電子通信研究所バイオセンサ部門)
  - ・ Tianshu Liu博士(米国航空宇宙局(NASA)ラングレー研究所)
  - ・ Uwe Beifuss博士(ドイツ・ゲッチンゲン大学化学科)
  - ・ Alan Baron博士(米国 Photosense社(色素センサ・ペンチャー企業)代表)

2) インターネットを通じた普及活動

本研究の成果を公開するため、2000年5月からホームページ(HP)を一般に公開している。本HPには、各テーマ毎の研究成果報告に加え、最新トピックスの紹介、センサ・レシピ、技術資料、用語解説、リンク集などが掲載されている。また、問い合わせ欄を設け、大学、企業、公的研究機関から寄せられた質問や情報提供等の依頼に応じている。2001年9月現在のアクセス数は約5900件である。現在、センサ・レシピの一層の充実を図るべく作業を進めている。

### 3) 技術移転などによる普及活動

本研究で開発した5種類の分子センサの特許を出願した。このうち、色素吸着膜センサについては、海外を含む大学、企業（航空宇宙関係、漏れ検知センサ）等から照会があった。また、ポリトリメチルシリルプロピンをバインダとする低温酸素センサ膜については、欧州4カ国が共同運営する欧州遷音速風洞（European Transonic Windtunnel）から照会があり、ドイツ航空宇宙研究センタを通じて、超高レイノルズ環境における実証実験を行う準備が進められている。他方、国内では、poly(IBM)をバインダとする感圧塗料が国内重工業メーカーが実施した風洞実験に適用された。これ以外にも国内の大学への本技術の移転が、日常的に進められている。

### 4) その他

2001年8月現在、26件の関連記事が新聞と雑誌に掲載されている。また、日本航空宇宙学会誌（2001年3月号）と米航空宇宙学会誌 Aerospace America（1999年12号）にも当研究に関連する記事が掲載された。このように、本研究の研究成果は、国内外において広く認知されている。