

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04199

研究課題名(和文) 二色蛍光比法による超音速燃焼器内の瞬時噴流モル分率の計測

研究課題名(英文) Two-color PLIF Measurement of Instantaneous Molar Fraction in A Supersonic Combustor

研究代表者

河内 俊憲 (Kouchi, Toshinori)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40415922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の宇宙輸送システムとしてスペースプレーンの研究が行われています。スペースプレーン用のエンジンでは超音速燃焼が行われ、燃料の混合を適切に評価することが重要となります。本研究では、二種類の蛍光トレーサをそれぞれ空気流と燃料噴流に添加し、同時にレーザーで励起して各トレーサからの蛍光発光を測定することで、超音速燃焼器において「瞬時」モル分率を計測できる新しい計測法(二色蛍光比法)の開発を目指しました。その結果、低温環境で蛍光トレーサの蛍光特性を計測する装置や二色蛍光比法計測装置の開発に成功しました。また計測精度をさらに向上するには、流れ場の温度推定が課題であることが分かりました。

研究成果の概要(英文)：Spaceplane is a promising candidate for next generation space transportation system. Supersonic mixing and combustion are keys to realize the spaceplane. We developed a new technique to measure instantaneous injectant molar fraction in a supersonic flow through this project. The measurement technique is based on Planer Laser Induced Fluoresces (PLIF) using tracer molecules which are excited by laser light. To establish the technique, we first investigated photochemical characteristics of toluene under low-temperature and pressure conditions which is observed in a suction-type supersonic wind tunnel. Then, we established the two-color PLIF measurement system. By using this new measurement system, we are able to quantitatively evaluate mixing efficiency of fuel in a supersonic flow.

研究分野：推進工学

キーワード：先端レーザー計測 超音速混合・燃焼 推進工学 圧縮性流体

1. 研究開始当初の背景

アメリカの X-51 計画に代表されるように、超音速旅客機やスペースプレーン用の推進機関としてスクラムジェットの研究が行われている。このエンジンは既存のジェットエンジンより遥かに高いマッハ数域で作動し、燃焼器内の流速でさえ超音速となる。そのため噴射した燃料の滞在時間は極めて短く、燃料の迅速な混合・燃焼が不可欠となる。このような理由からエンジンの実現・性能の向上には、超音速燃焼器内における燃焼可能な混合気の状態を正しく評価し、それを設計に反映することが重要となる。

しかしながら、ガスサンプリングなどの既存の計測手法は、低速流用に開発されたもので、分析に必要なガスを採取するのに数秒の時間を要する。このような場合、例えば全く混合していない空気と燃料が交互に採取管に吸引されても、混合したガスが連続的に吸引されても、その違いを区別することが出来ない。そのため高速流に適用した際には、時間平均的な計測となり、大規模な変動の繰り返しによる見かけの混合と、実際に燃焼が可能な分子レベルの混合を区別できない。そのため、超音速流れでも、瞬時の混合気の状態を正しく評価する計測手法の開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、瞬時の混合気の状態を評価する計測手法として、平面レーザ誘起蛍光法 (PLIF) と呼ばれる、蛍光トレーサを流れに添加し、これをレーザで励起し、蛍光発光させ、その信号強度から蛍光トレーサの濃度 (流れ場の密度と噴流のモル分率の積) を計測する手法を応用する。具体的には 2 種類の蛍光トレーサをそれぞれ空気流と燃料噴流に添加し、同時にレーザで励起して各トレーサからの蛍光発光を測定することで、瞬時モル分率を計測できる新しい計測法 (二色蛍光比法) を開発する。そして得られた瞬時モル分率分布から、スクラムジェット燃焼器内における混合の進展の様子を明らかにし、圧縮性混合場における混合メカニズムの解明を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 4 つの研究を軸に研究を進めた。

(1) 低温における蛍光トレーサの蛍光データ取得とモデル構築: 一般的に低温下におけるデータはペルチェ素子等の冷却装置を用

いて取得されてきた。しかしながら、これら冷却装置では超音速流で気流がさらされる低温環境までガス温度を下げる事ができない。本研究では、風洞実験に用いる超音速ノズルそのものを用いて低温環境を作り、そこでトレーサの蛍光特性を計測する手法を構築する。そしてこの計測装置により、二色蛍光比法に適したトレーサを選定し、その光化学特性をモデル化する。

(2) 低温におけるトレーサの干渉データ取得とモデル構築: トレーサ同士が混合した際、互いに干渉し、消光・光増感が生じる場合がある。そこでこの特性に関しても、(1) で構築するシステムを用いてデータを取得し、これに関してもモデル化を行う。

(3) 二色 PLIF 計測システムの構築: 2 つのトレーサを用いた瞬時モル分率計測システム (二色 PLIF 計測システム) を構築する。

(4) 超音速横風中への垂直噴射への適用と精度検証: (3) で構築した計測システムを超音速流中に垂直に噴射された噴流に適用し、瞬時モル分率の計測を行う。瞬時モル分率の計測値そのものの計測精度は、これを計測する他の手段がないため実験的に立証することは困難である。本研究では、すでに確立されている平均モル分率を計測する単色蛍光比法の結果と、二色蛍光比法で得られた値のアンサンブル平均値と比較することで、計測精度を検証する。

4. 研究成果

(1) 低温における蛍光トレーサの蛍光データ取得とモデル構築: 低温環境下において蛍光特性を取得する超音速風洞を用いた計測装置 (図 1) を開発した。そしてアセトンやトルエンといった蛍光トレーサの低温環境における蛍光特性を取得した。

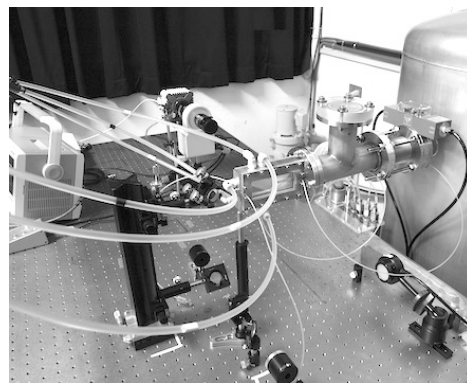


図 1 超音速ノズルを利用した低温環境における蛍光特性計測システム。

図 2 にトルエンの低温環境下における蛍光特性を示す. 図の横軸は温度で, 縦軸はある温度における吸収断面積と蛍光量子収率の積を常温におけるこれらの積で無次元化した値である. 図よりトルエンの蛍光は低温環境では温度の依存性がないことが分かる. またここには示していないが, 別途, 蛍光特性の圧力依存性も調べており, 大気圧より低圧の環境では圧力依存性もないことが分かっている. 加えて, アセトンの蛍光特性も同様の傾向で, アセトン・トルエンは, 大気吸込み式超音速風洞では, 温度・圧力依存性がない理想的 (トレーサの数密度のみに蛍光強度が依存する) 蛍光トレーサであることが分かった.

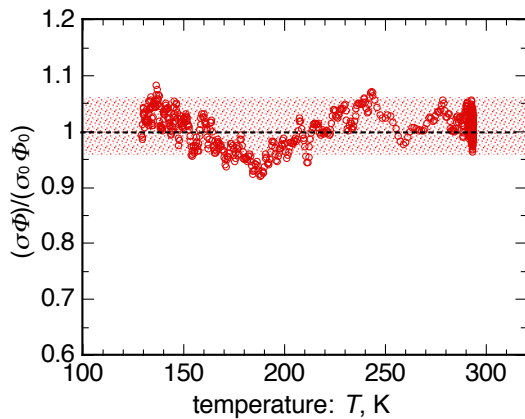


図 2 低温環境下におけるトルエンの蛍光特性 (吸収断面積×蛍光量子収率).

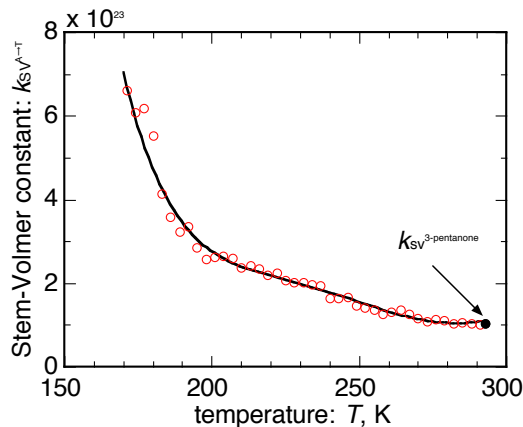


図 3 低温環境下におけるトルエン蛍光のアセトン添加による失活特性 (スタン・ボルマー定数).

(2) 低温におけるトレーサの干渉データ取得とモデル構築: (1)と同様の計測装置を用い, トルエンとアセトンの混合気の風洞内に流し, 蛍光特性のデータ取得を行った. これと蛍光トレーサ単体の特性を比較することで,

トレーサ同士の干渉により, 各蛍光発光が消光するか, あるいは光増感するか調べた. その結果, トルエンはアセトンの添加により励起されたトルエン分子がアセトン分子と衝突することにより消光すること, その一方でアセトンはトルエン添加により光増感することが分かった. 図 3 にその結果の 1 例を示す. 図はトルエンのアセトンによる消光の度合いを示すスタン・ボルマー定数の温度依存性を示している. 図より低温になればなるほどスタン・ボルマー定数が大きくなる (つまりアセトンの影響が強くなり, トルエン蛍光発光が弱まることが分かる).

またこれらトレーサ同士の干渉を考慮して, 噴流の瞬時モル分率 X_j を算出する二色蛍光比法の定式化を行った.

$$X_j = \frac{\left(1 + k_{sv}^{A \rightarrow T}(T) C_A \frac{P_0}{kT_0} \frac{S^A}{S_0^A}\right) \frac{S^T}{S_0^T}}{\frac{S^A}{S_0^A} + \left(1 + k_{sv}^{A \rightarrow T}(T) C_A \frac{P_0}{kT_0} \frac{S^A}{S_0^A}\right) \frac{S^T}{S_0^T}} \quad (1)$$

添字 T はトルエン, A はアセトンを意味し, それぞれトルエンは噴流に, またアセトンは主流に体積分率 C_T, C_A で添加されている. また 0 は参照画像を意味している. なお参照画像は, 風洞内にトレーサ混合気を大気圧・温度で充満して撮影を行った. なお $k_{sv}^{A \rightarrow T}$ はスタン・ボルマー定数 (図 3 の結果) である.

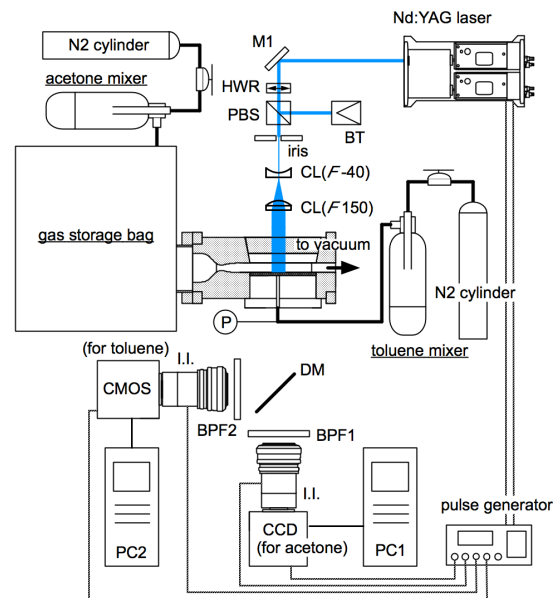


図 4 構築した二色蛍光比法計測システム.

(3) 二色 PLIF 計測システムの構築: 瞬時モル分率計測システム (二色 PLIF 計測システム) を構築した. 図 4 に構築したシステムの

概要を示す。アセトンとトルエンはどちらも YAG レーザの 4 倍波（波長 266 nm）により励起される。レーザ強度は後述するように、トルエンの蛍光発光が飽和しないように、1/2 波長板と偏向スプリッターにより、調整する。それぞれのトレーサ分子からの蛍光発光はダイクロイック・ミラー（分離波長 320 nm）により分離され、2 台のカメラで撮影される。

(4) 超音速横風中への垂直噴射への適用と

精度検証: 式 1 に含まれる k_{sv}^{A-T} は温度の関数である。従って、厳密に噴流瞬時モル分率を計測により算出するには、アセトンとトルエンの蛍光強度のみならず、流れ場の瞬時静温が必要となる。しかしながら、これは例えば上下の静温が等しい自由せん断層や、垂直噴射の下流部では静温の変化はそれほど大きくなく、その影響は小さいと考えられる。そこで本研究では、超音速流中に噴射される垂直噴流に対して、(3) で構築した計測システムを適用し、その有用性や式 1 の妥当性を確認した。現在、瞬時モル分率を計測する方法はほとんどない。そこで精度の検証には、二色蛍光比法で計測された瞬時噴流モル分率のアンサンブル平均値を、すでに確立されている単色蛍光比法で計測された平均モル分率分布と比較した。

図 5 に二色蛍光比法で得られた平均モル分率分布と単色蛍光比法で得られた平均モル分率分布を示す。二色蛍光比法における k_{sv}^{A-T} には主流代表値としては 180 K の値を代入した。上図が二色蛍光比法により瞬時モル分率を求め、平均をとった画像で、下図が単色蛍光比法により求めた平均モル分率分布である。主流マッハ数は計測領域において、およそマッハ 1.8 で主流は、図の左から右に流れている。また噴流は上壁から垂直に音速で噴射されている。瞬時蛍光比法の場合、噴流には 0.22 Vol.% のトルエンが、主流には 3 Vol.% のアセトンが添加されている。また単色蛍光比法には主流、噴流とも 3 Vol.% のアセトンを添加した。

トルエンの飽和レーザ強度は、アセトンに比べてかなり低い。その一方で、蛍光量子収率はトルエンの方がかなり高い。本実験ではトルエンの蛍光が飽和しないようにレーザフルーエンスを 12 mJ/cm² とした。アセトンを用いた単色蛍光比法でもこのレーザ強度で実験を行ったため、単色蛍光比法の S/N 比がかなり悪い。これはレーザ強度を上げるか、単色蛍光比法のトレーサをトルエンに変更すれば改善できる。単色蛍光比法と二色

光比法の結果を比較すると、特に噴流の下流 ($x/D \geq 4$) で結果が一致しており、本研究で提案した二色蛍光比法により、瞬時噴流モル分率が計測しうることが分かった。

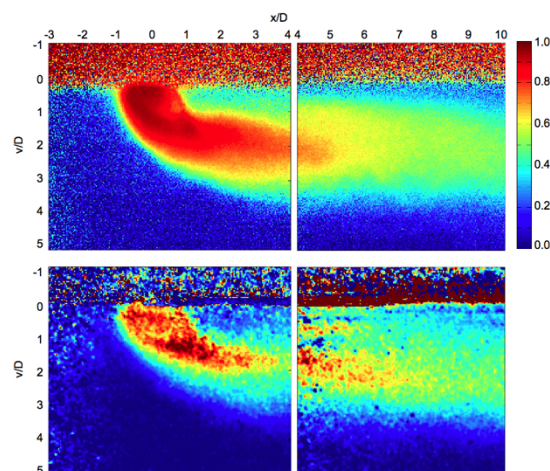


図 5 二色蛍光比法と単色蛍光比法により得られた平均モル分率の比較。

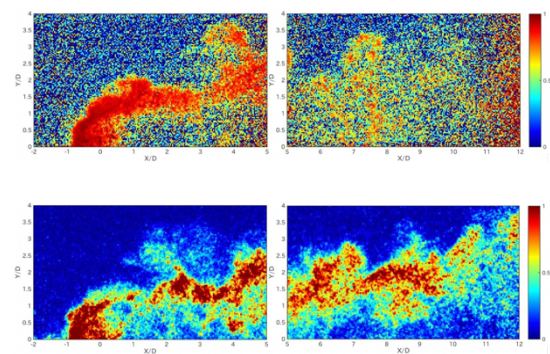


図 6 噴流にトルエンのみを添加した二色蛍光比法（上）とトルエンとアセトンを添加した二色蛍光比法（下）により得られた噴流瞬時モル分率分布。

(5) **計測システムの SN 比の改善:** (4) で見たように、二色 PLIF 計測システムにより、気流静温の変化が小さい領域では、瞬時噴流モル分率を計測できることが分かった。しかしながら、トルエンのレーザ飽和強度とアセトンのレーザ飽和強度の違いが、計測システムの SN 比を悪化させることも分かった。そこで当初計画にはなかったことであるが、計測システムの SN 比の改善に取り組んだ。

具体的には噴流にトルエンのみならず、アセトンも併せて添加を行った。ここには示していないが、アセトンの添加によりトルエンが失活し蛍光発光は暗くはなるが、それに伴いレーザ飽和強度が増加する。そのため、噴流にトルエンとアセトンを添加することで、レーザ飽和強度が増加し、より高エネルギーのレーザを入射できるようになる。結果

として、アセトンとトルエンの蛍光強度が同程度となり、計測システムの SN 比が図 6 のように増加した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. T. Kishi, T. Kouchi, Y. Nagata, S. Yanase, LES Investigation of Supersonic Mixing Layer Using Different Type of Gas, *AJCPP*2018-035, (2018). 査読なし.
2. M. Nakaya, T. Kouchi, Y. Nagata, S. Yanase, Optimization of Focusing Schlieren System for An Axisymmetric Ejector, *PSFVIP*11-055 (2017). 査読あり.
3. M. Mizoguchi, K. Yamauchi, T. Kouchi, Y. Nagata, S. Yanase, Combined Fast-framing Schlieren Imaging and Stereo PIV Measurements in A Supersonic Boundary-Layer, *TFEC*9-1463 (2017). 査読なし.
4. T. Kouchi, G. Masuya, S. Yanase, Extracting Dominant Turbulent Structures in Supersonic Flow Using Two-Dimensional Fourier Transform, *Experiments in Fluids*, **58** (98) (2017), DOI: 10.1007/s00348-017-2377-z. 査読あり
5. T. Lee, T. Kouchi, Y. Oka, G. Masuya, Turbulent Diffusion Flux of Transverse Jet into Pseudo-Shock Wave, *AIAA* 2016-0662 (2016). 査読なし
6. T. Kouchi, S. Yamaguchi, S. Yanase, S. Koike, T. Nakajima, M. Sato, H. Kanda, Wavelet Analysis of Unsteady Shock-wave Motion on Two-dimensional Airfoil with Vortex Generators, *AIAA* 2016-1766 (2016). 査読なし
7. T. Kouchi, S. Yamaguchi, S. Yanase, S. Koike, T. Nakajima, M. Sato, H. Kanda, Wavelet Analysis of Transonic Buffet on A Two-dimensional Airfoil with Vortex Generators, *Experiments in Fluids*, **57** (11), 1-15 (2016), DOI: 10.1007/s00348-016-2261-2. 査読あり
8. 浦本翔平, 河内俊憲, 升谷五郎, 超音速壁面噴射流れ場へ上流擾乱が及ぼす影響, *日本航空宇宙学会論文集*, **64** (4), 244-252 (2016), DOI: 10.2322/jjsass.64.244. 査読あり

[学会発表] (計 19 件)

1. T. Kishi, T. Kouchi, Y. Nagata, S. Yanase, LES Investigation of Supersonic Mixing Layer Using Different Type of Gas, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2018, March 15th 2018, Xiamen, China.
2. M. Nakaya, T. Kouchi, Y. Nagata, S. Yanase, Optimization of Focusing Schlieren System for An Axisymmetric Ejector,

The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Dec. 3rd 2017 Kumamoto, Japan.

3. M. Mizoguchi, K. Yamauchi, T. Kouchi, Y. Nagata, S. Yanase, Combined Fast-framing Schlieren Imaging and Stereo PIV Measurements in A Supersonic Boundary-Layer, The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Oct. 29th 2017, Okinawa, Japan.
4. 溝口真由, 山内一樹, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, ステレオ PIV とシュリーレンを用いた超音速境界層内の同時計測, 第 49 回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017 年 6 月 29 日, 東京.
5. 山下雄輝, 河内俊憲, 小池俊輔, 柳瀬眞一郎, 衝撃波上流域の速度変化がバフエットに及ぼす影響, 第 49 回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017 年 6 月 29 日, 東京.
6. 大元朝斗, 松永明, 佐藤直也, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, PLIF を用いた超音速境界層内の変動密度計測, 第 49 回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017 年 6 月 29 日, 東京.
7. 松永明, 佐藤直也, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 超音速流れへのトルエン PLIF の適用, 第 48 回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016 年 7 月 6 日, 金沢.
8. 河内俊憲, 山口真伍, 小池俊輔, 柳瀬眞一郎, 非定常シュリーレン計測結果に基づいた Lee の遷音速バフエットモデルの修正, 第 48 回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016 年 7 月 6 日, 金沢.
9. 河内俊憲, 超音速流の可視化 -圧縮性混合場における瞬時モル分率計測を中心として-, CREST 数学連携セミナー, 2016 年 6 月 22 日, 岡山.
10. 河内俊憲, 超音速境界層における大規模構造の移流速度, 第 27 回 航空宇宙空力シンポジウム, 2016 年 1 月 22 日, 指宿.
11. T. Lee, T. Kouchi, Y. Oka, G. Masuya, Turbulent Diffusion Flux of Transverse Jet into Pseudo-Shock Wave, *AIAA SciTech* 2016, Jan. 4th 2016, San Diego, California, USA.
12. T. Kouchi, S. Yamaguchi, S. Yanase, S. Koike, T. Nakajima, M. Sato, H. Kanda, Wavelet Analysis of Unsteady Shock-wave Motion on Two-dimensional Airfoil with Vortex Generators, *AIAA SciTech* 2016, Jan. 4th 2016, San Diego, California, USA.
13. 河合辰哉, 山内一樹, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 超音速乱流境界層における移流速度のスケール依存性, 第 16 回日本流体力学会中四国・九州支部 講演

- 会, 2015年11月28日, 鳥取.
14. 阿部浩司, 佐藤直也, 河内俊憲, 浅井圭介, 温度及び周囲ガス組成がトルエン蛍光に及ぼす影響について, 日本機械学会第93期 流体工学部門 講演会, 2015年11月7日, 東京.
 15. 河内俊憲, 二次元遷音速バフエットの非定常シュリーレン撮影を中心とした風洞実験に関する話題, 次世代航空機研究センターEFD講演会, 2015年9月15日, 仙台.
 16. 関谷洸希, 山口真吾, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 断層シュリーレン法による軸対称超音速エジェクタ内の可視化, 第43回可視化情報シンポジウム, 2015年7月21日, 東京.
 17. 河内俊憲, 山口真伍, 柳瀬眞一郎, 小池俊輔, 中島努, 佐藤衛, 神田宏, 二次元遷音速バフエットのウェーブレット解析, 第47回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2015年7月3日, 東京.
 18. 佐藤直也, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 阿部浩司, 超音速風洞を用いた低温域におけるトルエンの蛍光特性取得, 第47回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2015年7月3日, 東京.
 19. 山内一樹, 河合辰哉, 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 超音速境界層内における大規模構造の移流速度計測, 第47回 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2015年7月2日, 東京.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河内 俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)
岡山大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：40415922

(2) 研究分担者

柳瀬 眞一郎 (YANASE SHINICHIRO)
岡山大学・自然科学研究科・教授
研究者番号：20135958

永田 靖典 (NAGATA YASUNORI)
岡山大学・自然科学研究科・助教
研究者番号：20635594