

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月10日現在

機関番号：32621

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860015

研究課題名（和文） マイクロ熱流体中の界面輸送現象解明に向けた分子イメージング法の開発

研究課題名（英文） Development of Imaging Technique for Investigation of Interfacial Transport Phenomena in Microscale Thermo-Fluidics

研究代表者

一柳 満久 (ICHIYANAGI MITSUHIKA)

上智大学・理工学部・助教

研究者番号：00584252

研究成果の概要（和文）：

マイクロ流路内の固液・気液界面近傍に形成されるイオンや流体挙動がバルク流れに与える影響を定量的に明らかにすることを主たる目的として研究を展開した。固液界面現象に対しては、分子タギング法およびエバネッセント波照明観察を併用したナノスケール速度計測法を開発し、固相表面の分子構造が電気二重層へ与える影響を評価した。また、気液界面現象に対しては、気泡生成過程を対象とし、高速可視化および速度計測技術を開発し、液相の流れが気泡生成に与える影響を評価した。

研究成果の概要（英文）：

The present work focuses on the effects of ion or fluid motions at solid-liquid or gas-liquid interfaces on flow characteristics. For solid-liquid interfacial phenomena, the novel velocity measurement technique with a depthwise spatial resolution of the order of nanometer was developed by combining the molecular tagging with the evanescent wave illumination. This technique reveals the effect of the molecular structure at a solid surface on the electric double layer. For gas-liquid interfacial phenomena, ultra-high-speed micron-resolution particle tracking velocimetry was advanced, and the relationship between the microbubble generation process and the flow characteristics was quantitatively evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：マイクロ流，混相流，流体計測，熱・物質移動，可視化計測

## 1. 研究開始当初の背景

微細加工技術を応用して大型化学反応器や分析機器を超小型化したマイクロ流体デバイスが近年工業上広く用いられている。このデバイスには幅数 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ の流路が設置されており、微量液体試料の輸送、混合、化学反応および生成物の分離、抽出とい

った操作が連続的に行われている。マイクロ流路内の流れの大きな特徴は、表面積 / 体積比が大となることで、以下に示す二つの利点が挙げられる。一点目は、メートルオーダー以上での流体では埋もれがちな流路壁面の電氣的力（ゼータ電位に起因する力）が顕在化し流れの様相を異に呈する点である。この流

れは一般的に電気浸透流と呼ばれており、流路壁面からわずか数 - 数十 nm に形成される電気二重層（イオンが偏在する領域）に電界を印加するとバルク流体も駆動される流れである。その速度はゼータ電位の大きさに依存し、さらにゼータ電位は流路材質や溶液の性質といった因子に支配されている。これら複数の因子は、ナビエ・ストークス方程式においては境界条件または外力項として与えられるため、これまでも多くの研究者が流路壁面ゼータ電位を計測する手法を提案してきており、研究代表者もその一役を担ってきた（一柳ら、2005）。単純な系での計測は再現性のある結果が得られるものの、実用水準を考慮して流路壁面を化学修飾させた場では再現性の無い現象が観察された（Ichiyanagi et al. 2009）。これはひとえに、電気二重層の形成過程にはゼータ電位との関係だけでなく、流路壁面（固相）と液相の界面（固液界面）のナノスケールでの物理現象がイオン挙動に影響を与えていると考えられ、詳細に関係性を明らかにしていくことが必要である。

マイクロ流れの二つ目の利点は、気液・液液・固液界面反応の効率が大幅に向上する点である。例えば、松本・高木らのグループによる一連の研究（松本、2011）では、マイクロバブル（微小気泡）を医療応用することで、超音波診断や治療、ドラッグデリバリーシステムの構築等に関して従来と比して高精度かつ高効率化を図れることを示唆している。しかしながら、生成された気泡径は数十 $\mu\text{m}$ 程度と比較的大きなものであり、血管に注入しても問題のない5 $\mu\text{m}$ 程度の小さな気泡を生成するためには画期的な改良を図る必要がある。そういった背景のもと、研究代表者もこれまで幾何形状を工夫したマイクロ流路を用いた気泡生成技術に取り組んでおり、T字型流路内に気体と液体を導入し単分散気泡を生成する技術に着手している。生成される気泡径は慣性力と表面張力の比により決定されることがわかりつつあるものの、現在の方法では生成可能な最小気泡径は10 $\mu\text{m}$ 程度であり更なる改良を必要とする。そのためには、非定常な微小気泡生成過程を高時間分解能で観察して気相の特徴的な時間スケールを明らかにすること、液相側は速度分布を取得して流動構造を明らかにすること、加えて両相の相関関係より気液界面現象をマイクロスケールで実験的に明らかにすることが必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ流路内の界面現象を実験的に明らかにすることを主たる目的として、可視化技術および流動計測技術の開発

を行う。対象となる現象は固液界面および気液界面現象であり、以下にそれぞれの研究目的を示す。

- (1) 固液界面現象に関しては、電気二重層を構成するイオン層のみを可視化し、その動的挙動を分子挙動から評価することを目的としている。この研究では、電気二重層、つまり界面から液相側にナノスケールオーダーで偏在するイオン層のみを可視化する技術の開発が要となる。そのため、本研究では、分子タギング法にエバネッセント波照明観察を併用した新たな計測システムを構築する。本手法を用いて、液相の性質を変えた場に適用し、流れの中の分子の速度や拡散係数といった物理量を評価する。次に、固液の相互干渉を評価するため流路壁面の材質を変えたり化学修飾させたりすることで分子構造を変化させた場に適用しイオン挙動を観察する。これらの結果を総括することで、これまで理論や数値シミュレーションのみで考えられてきた固液界面でのナノスケールの分子挙動を実験的に明らかにする。
- (2) 気液界面現象に関しては、マイクロ流路内の気泡生成過程を対象として、気相および液相の流動特性の評価、更には両相の相互干渉を実験的に明らかにしていく。この研究では、気泡生成時に見られる非定常な気泡分裂現象を時系列で観察すると同時に、気泡周りの液相速度分布を実測することが要であり、本研究では計測システムの構築を行う。このシステムを用いて、気泡分裂時の特徴的な時間スケールを明らかにすること、液相速度分布より流動構造を明らかにすること、加えて両相の相関関係より気液界面現象、特に、気泡生成における気相の破断現象を実験的に明らかにしていく。これらの結果を総括することで、気泡生成に影響する力を示唆し、数 $\mu\text{m}$ 程度の気泡生成を実現させる。

## 3. 研究の方法

### (1) 分子タギング法及びエバネッセント波を併用した固液界面イオン層の可視化計測

固液界面近傍ナノスケール空間に偏在するイオン層のみを可視化するため、かご化蛍光染料を用いた分子タギング法とエバネッセント波照明観察を併用した新たな計測法の提案および計測システムの構築する。分子タギング法に用いられるかご化蛍光染料は、化学修飾により保護基を結合させることで非蛍光とした染料であり、紫外光照射によって保護基が外

れ、青色励起光照射により蛍光を発する。その性質を利用して、紫外レーザーのシート光を流路上部から断面方向に照射することで、一部の染料のみ発光するようになる。青色励起光照射に関しては、従来の落射蛍光照明では流路深さ方向の蛍光発光が積算されマイクロスケールの分解能に限定されてしまう。それに対し、本研究で提案する手法は、光の全反射により流路壁面から 100 nm 程度溶液側に染み出す光 (エバネッセント波) を励起光として用いることで、壁面極近傍ナノスケール空間の染料のみを撮像することが可能となる。

この手法を実現するための計測システムは、落射蛍光顕微鏡にエバネッセント波発生用高倍率対物レンズを装着し、複数のレーザー光を導入できるよう改良する。かご化蛍光染料を光分解するための紫外光レーザーは、シャッター操作によってパルス光となり、シリンドリカルレンズによってシート光として流路垂直方向に入射される。一方、保護基が外れたかご化蛍光染料の蛍光励起用青色レーザーをエバネッセント光発生用高倍率対物レンズの辺縁部に入射することで、カバーガラス (固相) と溶液 (液相) の界面において全反射しエバネッセント波が形成される。

上述の計測システムを構築したのは、下記に示す実験条件を変えながら界面近傍のイオン速度および拡散係数などの情報を系統的に取得していく。従来の電気二重層の理論では、液相のイオン濃度や pH によりイオン層の厚さが変化することが提示されているため、本研究でも最初に液相の性質を変えた場に適用する。その後、固液の相互干渉を評価するために流路壁面の材質を変えたり化学修飾させたりすることで分子構造を変化させた場に適用してイオン挙動を観察する。

## (2) 気泡生成過程の超高速可視化および速度計測技術

マイクロ流路内の気泡生成過程を対象として、生成時に見られる非定常な気泡分裂現象を時系列で観察すると同時に、気泡周りの液相速度分布を計測するシステムを構築する。近年の顕微鏡観察では信号対雑音比の高さから蛍光物質を観察する落射蛍光観察が主流であるため、この手法を気液二相流に適用してみたところ、界面が不明瞭になり判別が困難になるという問題が生じた。その上、蛍光発光量が小であるため粒子像を撮像するにはカメラの露光時間を長く設定する必要があり、残念ながら粒子像は流跡線となり速度分布を得ることも困難であった。

試行錯誤の末、明視野顕微鏡観察にて気液界面を観察できる可能性を見出したものの、粒子像の不鮮明さや深さ方向分解能の低下に伴う速度情報の劣化が顕著であった。本研究では、この問題を空間フィルタ導入等の光学系の改良および新たな速度補間アルゴリズムの構築と処理プログラムへの実装により解決することで、気液二相流の非定常高速可視化技術および速度計測技術の確立を目指す。

上述の計測システムを構築したのは、気相圧力や液相速度を変化させながら、気相の特徴的な時間スケールの抽出、液相側では取得した速度分布より流動特性を評価、両相の情報から気相の分裂現象をもたらす力の因果関係を実験的に明らかにしていく。最終的に、気泡生成に影響する力を示唆し、数 $\mu\text{m}$ 程度の気泡生成を実現させる。

## 4. 研究成果

### (1) 分子タギング法及びエバネッセント波を併用した固液界面イオン層の可視化計測

マイクロ流路内の固液界面近傍に形成されるイオン層およびそれと連動したバルク流体挙動を明らかにすることを目的として、分子タギング法およびエバネッセント波照明観察を併用した固液界面極近傍ナノスケール速度計測法を開発した。エバネッセント波を光源とすることで、流路壁面 (固相) 近傍のみの染料を励起可能な点が本手法の大きな特徴である。本手法を電気浸透流場および圧力駆動流動場に適用し、得られた実験結果をマイクロ粒子画像流速計または数値シミュレーションと比較し、以下の知見を得た。

① 電気浸透流動場での結果を、共焦点顕微鏡を用いたマイクロ粒子画像流速計による速度結果と比較したところ、染料の流路壁への吸着が電気浸透移動度および壁面のゼータ電位を著しく変化させたことが明らかとなった。この結果は、化学修飾による固相表面の分子構造の変化が、液相側のイオン層形成過程に影響を及ぼしたことを意味している。これらの結果を直接可視化計測により得られることは本手法の大きな利点として挙げられる。

② 圧力駆動流における流路壁面近傍の染料の速度は、時間発展とともに大となることが本計測手法より明らかとなった。この結果は従来の速度計測では確認されなかった事実である。さらに、壁面近傍の大きな速度勾配は染料の濃度勾配を形成し、この勾配が染料

の流路壁への拡散をもたらすこともわかった。

以上の結果は、固液界面近傍の流動制御技術や界面近傍ナノスケールのイオン挙動の解明に寄与することから、国内外の学会において発表し、日本機械学会論文集 B 編 (一柳ら 2011, 雑誌論文 5) および英文ジャーナルである Journal of Fluid and Science Technology (Senga et al. 2010, 雑誌論文 9) に掲載された。

## (2) 気泡生成過程の超高速可視化および速度計測技術

マイクロ流路内の気泡生成過程を明らかにすることを主たる目的として、気液二相流の超高速可視化および速度計測技術を開発し、以下の知見を得た。

- ① 気泡生成過程を可視化したところ、生成気泡径は流路のサイズや液相成分に関わらず、ウェーバー数 (慣性力と表面張力の比から得られる無次元数) により整理されることが明らかとなった。慣性力が気泡生成に与える影響を評価するため、液相の速度分布および気泡生成過程を同時に計測するシステムを構築した。本システムの実現のためには、気液界面および液相に混入した粒子の挙動を同時に撮像することが必要である。そのため、従来の蛍光観察に加え明視野観察も可能なシステムを構築し、両観察方法に関して比較検討を行った。
- ② 蛍光観察には、深さ方向分解能が高いという利点はあるものの、気相の撮像が困難であったり、蛍光像取得のために時間分解能が低下したりという問題が残された。それに対し明視野観察には、深さ方向分解能の低下という問題は残るものの、気相挙動および液相内の粒子挙動を同時に取得でき、高速撮影も可能という大きな利点があるため、本研究では明視野観察を採用した。
- ③ 本手法を用いて、気泡生成過程における気相の特徴的な時間スケールの抽出および液相速度分布より気相分裂をもたらす力の因果関係に関して実験結果から解析したところ、気相および液相の合流部において、気液界面に対し垂直方向の液相流れが気泡の破断現象に影響していることが示唆された。

以上の結果は国内外の学会において発表され、その一部は可視化情報学会誌 (宮崎ら 2010, 雑誌論文 8) に掲載されたが、査読無しの雑誌であるため、現在、可視化および速度計測法の開発に関して Microfluidics and Nanofluidics へ投稿し、気泡生成過程における破断現象に関し明らかとなった事実を Physical Review E および Physical Review Letters へ投稿する準備を進めている。

## 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 9 件)

1. Hishida K., Ichiyanagi M., Kazoe Y., Sato Y., “Combined laser-based measurements for micro- and nano-scale transport phenomena”, Heat Transfer Engineering, (掲載決定), 査読有り.
2. Ichiyanagi M., Sakai K., Kidani S., Kakinuma Y., Sato Y., Hishida K., “Evaluation methodology of gas permeable characterization in a polymer-based microfluidic device by confocal fluorescence imaging”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.22, pp.065023(8pp) (2012), 査読有り. [10.1088/0960-1317/22/6/065023](https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/6/065023)
3. 重田雄基, 林健太郎, 一柳満久, 菱田公一, “焦点・非焦点画像併用による噴霧流中の液滴の粒径, 速度および質量流束の空間分布測定”, 日本機械学会論文集 B 編, 第 78 巻 788 号, pp.867-880 (2012), 査読有り. [10.1299/kikaib.78.867](https://doi.org/10.1299/kikaib.78.867)
4. Ichiyanagi M., Tsutsui I., Kakinuma Y., Sato Y., Hishida K., “Three-dimensional measurement of gas dissolution process in gas-liquid microchannel flow”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.55, pp.2872-2878 (2012), 査読有り. [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.009](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.009)
5. 一柳満久, 千賀友里子, 中村翼, 福村公基, 佐藤洋平, “エバネッセント波分子タギング法によるマイクロ流路壁面極近傍におけるかご化蛍光染料の分子挙動”, 日本機械学会論文集 B 編, 第 77 巻 783 号, pp.2157-2169 (2011), 査読有り. [10.1299/kikaib.77.2157](https://doi.org/10.1299/kikaib.77.2157)
6. 一柳満久, 佐藤洋平, 菱田公一, “二重音響場によるマイクロ流路内浮遊粒子の連続的分離法”, 日本機械学会論文集 B 編, 第 77 巻 779 号, pp.1557-1566 (2011), 査読有り. [10.1299/kikaib.77.1557](https://doi.org/10.1299/kikaib.77.1557)
7. 一柳満久, “日本伝熱学会奨励賞を受賞して”, 伝熱, Vol.50 No.212, p.8 (2011),

- 査読無し.
8. 宮崎諒司, 榎本和将, 一柳満久, 小笠原紀行, 竹内伸太郎, 高木周, 松本洋一郎, “微小流路内気液二相流の超高速マイクロ PTV 計測”, 可視化情報学会誌, Vol.30 No.1, pp.219-222 (2010), 査読無し.
  9. Senga Y., Nakamura T., Fukumura H., Ichiyanagi M., Sato Y., “Near-wall motion of caged fluorescent dye in microchannel flows obtained from evanescent wave molecular tagging”, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.5 No.2, pp.192-206 (2010), 査読有り .  
[10.1299/jfst.5.192](https://doi.org/10.1299/jfst.5.192)

[学会発表] (計 25 件)

1. Ichiyanagi M., Sato Y., Hishida K., “High spatial resolution measurement of velocity and ion concentration distribution by confocal micro-PIV and LIF”, The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (Incheon, Korea), 2012年3月18日 - 21日.
2. Kaji H., Miyazaki R., Ichiyanagi M., Takagi S., Matsumoto Y., “Development of microbubbles generator using microchannel”, International Workshop on Micro/Nano-Engineering, (Kyoto, Japan), 2011年12月17日 - 18日.
3. Nakatsuka J., Ichiyanagi M., Kinefuchi I., Kitada H., Kim Y., Ohigashi R., Ohba T., Matsumoto Y., “Evaluation of flow characteristics in micro heat pipe manufactured in 3D integration semiconductor chip by high-speed imaging technique”, The 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, (Fukuoka, Japan), 2011年9月4日 - 9日.
4. Kim Y., Kitada H., Ohigashi R., Ichiyanagi M., Nakatsuka J., Kinefuchi I., Matsumoto Y., Ohba T., “Hot spot cooling evaluation using closed-channel cooling system (C3S) for MPU 3DI application”, IEEE Symposium on VLSI Technology, (Kyoto, Japan), 2011年6月14日 - 16日.
5. Hishida K., Ichiyanagi M., Kazoe Y., Sato Y., “Laser based quantitative imaging for micro/nano-scale transport phenomena”, The 11th Asian Symposium on Visualization, (Niigata, Japan), 2011年6月5日 - 9日.
6. 林健太郎, 重田雄基, 一柳満久, 菱田公一, “レーザ干渉および Glare-Points 画像を併用した噴霧流動計測”, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, (岡山, 日本), 2011年6月1日 - 3日.
7. 中塚淳, 一柳満久, 杵淵郁也, 北田秀樹, 金永ソク, 大東良一, 大場隆之, 松本洋一郎, “半導体チップ内マイクロヒートパイプ開発に向けた熱流動解析”, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, (岡山, 日本), 2011年6月1日 - 3日.
8. Ichiyanagi M., Sakai K., Kidani S., Kakinuma Y., Sato Y., Hishida K., “Evaluation of gas permeability in microfluidic device by confocal micro-PIV combined with LIF technique”, ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference, (Honolulu, Hawaii), 2011年3月13日 - 17日.
9. 西原輝幸, 平田祐樹, 一柳満久, 葭仲潔, 佐々木明, 高木周, 松本洋一郎, “集束超音波治療における多媒質中の焦点位置制御手法の開発”, 第 4 回システム疾患生命科学による先端医療技術開発シンポジウム, (東京, 日本), 2011年3月11日.
10. 馬場渉, 中村洋治, 池田貞一郎, 一柳満久, 葭仲潔, 高木周, 松本洋一郎, “高濃度マイクロバブルによる信号を用いた画像化手法の開発”, 第 31 回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム, (東京, 日本), 2010年12月6日 - 8日.
11. Miyazaki R., Ogasawara T., Ichiyanagi M., Takagi S., Matsumoto Y., “High-speed  $\mu$ -PTV study of microbubble generation in microfluidic T-junction”, 63rd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics, (California, USA), 2010年11月21日 - 23日.
12. 葭仲潔, 妹尾直彦, 西原輝幸, 岡本旭生, 一柳満久, 鈴木潤, 宮田哲郎, 高木周, 松本洋一郎, “超音波とマイクロバブルによる非侵襲治療応用”, 日本超音波学会, (東京, 日本), 2010年10月30日.
13. 菱田公一, 一柳満久, 嘉副裕, 佐藤洋平, “マイクロ・ナノ輸送現象のレーザ複合計測”, 第 2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, (島根, 日本), 2010年10月13日 - 15日.
14. Sakai K., Ichiyanagi M., Kakinuma Y., Sato Y., Hishida K., “Evaluation of gas permeability in microfluidic device measured by micro-PIV/LIF”, International Symposium on Micro/Nano Flow Measurement Techniques, (Tokyo, Japan), 2010年9月20日 - 22日.
15. 宮崎諒司, 榎本和将, 小笠原紀行, 一柳満久, 竹内伸太郎, 高木周, 松本洋一郎, “T 字型微小流路におけるマイクロバブル生成過程の解析”, 日本機械学会 2010 年度年次大会, (名古屋, 日本), 2010年9月5日 - 8日.

16. Nishihara T., Utashiro H., **Ichivanagi M.**, Yoshinaka K., Takagi S., Matsumoto Y., “Heating location control of HIFU treatment enhanced with microbubbles contrast agents”, 6th World Congress on Biomechanics, (Suntec, Singapore), 2010年8月1日 - 6日.
17. 宮崎諒司, 榎本和将, **一柳満久**, 小笠原紀行, 竹内伸太郎, 高木周, 松本洋一郎, “微小流路内気液二相流の超高速マイクロPTV計測”, 第38回可視化情報シンポジウム, (東京, 日本), 2010年7月20日 - 21日.
18. Shigeta Y., **Ichivanagi M.**, Hishida K., “Practical improvement of spatial droplet distribution by interferometric laser imaging technique”, 15th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (Lisbon, Portugal), 2010年7月5日 - 8日.
19. Naito M., Yasui R., **Ichivanagi M.**, Ogasawara T., Hishida K., “Development of shadow imaged stereo PTV-SS for micro-milli-scale two phase flow”, 15th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (Lisbon, Portugal), 2010年7月5日 - 8日.
20. 牛嶋裕之, 妹尾直彦, 鈴木潤, **一柳満久**, 葎仲潔, 出口順夫, 高木周, 宮田哲郎, 松本洋一郎, “集束超音波による非侵襲的血管閉塞”, 第49回日本生体医工学会大会, (大阪, 日本), 2010年6月25日 - 27日.
21. 馬場渉, 中村洋治, 池田貞一郎, **一柳満久**, 葎仲潔, 高木周, 松本洋一郎, “超音波照射下における微小気泡造影剤の動態解析”, 第49回日本生体医工学会大会, (大阪, 日本), 2010年6月25日 - 27日.
22. Nishihara T., Utashiro H., **Ichivanagi M.**, Yoshinaka K., Takagi S., Matsumoto Y., “Heating location control of HIFU treatment enhanced with microbubbles”, 10th International Symposium on Therapeutic Ultrasound 2010, (Tokyo, Japan), 2010年6月9日 - 12日.
23. Baba W., Nakamura Y., **Ichivanagi M.**, Ikeda T., Yoshinaka K., Takagi S., Matsumoto Y., “Analysis for acoustic characterization of microbubbles under ultrasound exposure”, 10th International Symposium on Therapeutic Ultrasound 2010, (Tokyo, Japan), 2010年6月9日 - 12日.
24. Ushijima H., Senoo N., Suzuki J., **Ichivanagi M.**, Yoshinaka K., Takagi S., Matsumoto Y., “Measurements of HIFU-induced lesions in BSA gel phantoms

for HIFU treatment of varicose veins of lower extremity”, 10th International Symposium on Therapeutic Ultrasound 2010, (Tokyo, Japan), 2010年6月9日 - 12日.

25. 酒井啓太, 三島耕治, **一柳満久**, 柿沼康弘, 佐藤洋平, 菱田公一, “マイクロ気固界面による気体選択的透過制御デバイスの開発”, 第47回日本伝熱シンポジウム, (札幌, 日本), 2010年5月26日 - 28日.

[図書] (計4件)

1. Nishihara T., **Ichivanagi M.**, *et al.*, AIP Conference Proceedings (Y Matsumoto, LA Crum and GR ter Haar eds.), American Institute of Physics, (2011), pp.235-240.
2. Baba W., **Ichivanagi M.**, *et al.*, AIP Conference Proceedings (Y Matsumoto, LA Crum and GR ter Haar eds.), American Institute of Physics, (2011), pp.103-108.
3. Ushijima H., **Ichivanagi M.**, *et al.*, AIP Conference Proceedings (Y Matsumoto, LA Crum and GR ter Haar eds.), American Institute of Physics, (2011), pp.53-58.
4. Nishihara T., **Ichivanagi M.**, *et al.*, IFMBE Proceedings (CT Lim and JCH Goh eds.), Springer, (2011), pp.1397-1400.

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

一柳 満久 (ICHIYANAGI MITSUHIKA)  
上智大学・理工学部・助教  
研究者番号：00584252

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし