

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820066

研究課題名(和文)エバネッセント波と分子タギング法を併用した気液界面ナノスケール熱流動計測法の開発

研究課題名(英文)Development of measuring technique of thermal fluid flow for nano-scale gas-liquid interfacial phenomena by using molecular tagging velocimetry with evanescent wave illumination

研究代表者

一柳 満久 (ICHIYANAGI, Mitsuhsa)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：00584252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ流路内の気液界面現象の解明および相変化を伴う熱輸送現象の伝熱特性を明らかにすることを目的とした。気液界面現象としては、T字型マイクロ流路内の気泡生成過程における超高速流れの可視化計測技術の開発および5マイクロメートル径の気泡生成に成功した。一方、相変化を伴う熱輸送現象としては、次世代半導体デバイスを対象とし、1平方ミリメートルあたり数ワットの高熱流束の除熱技術開発のための伝熱特性評価およびデバイス設計指針の提案を行った。その結果、除熱に必要なポンプ流量を定量的に評価できた。

研究成果の概要(英文)：The objectives of the present study were to investigate the gas-liquid interfacial phenomena in the T-shaped microchannel for generating micro-meter diameter bubbles, and examine the heat transfer characteristics of the microscale phase-change phenomena in next generation semiconductor devices. For the investigation of the gas-liquid phenomena, we developed the visualizing technique for the microbubble generation process and the measuring technique for the velocity fields of ultra-high speed microchannel flows. The results indicated that the inertia force was important factor though the Reynolds number was small, and 5 micro-meter diameter bubbles were produced by using the T-shaped microchannel with ultra-high speed flows. For the examination of the microscale phase-change phenomena, we evaluated the relationship between the heat transfer characterization and the pump flow rate, and quantitatively obtained the pump flow rate required for the removal of the high heat flux.

研究分野：マイクロ伝熱工学

キーワード：マイクロ流れ 気泡 熱移動 流体計測 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 Lab-on-a-chip や Micro Total Analysis System と称されるマイクロ熱流体デバイスが工業上広く用いられている。このデバイスには幅数 μm から数百 μm 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(北森ら 2004)。一点目は、気液・液液・固液界面反応の効率が大幅に向上する点であり、研究代表者を含めた多くの研究者がこれまで固液界面に着目して研究を行ってきた(Kirby and Hasselbrink 2004; 一柳ら 2005; Ichiyangi et al. 2009)。その中で明らかとなったことは、流路壁面である固相および液相との界面に形成されるナノスケールのイオン層が流動に大きな影響を与えていることであり、この現象は比較的単純な系では理論とも良く合致する結果が得られている。しかし、マイクロ流路内の気液界面現象に関しては、応用例は多く報告されているものの(Günther and Jensen (2006) のレビュー論文参照)、界面現象を詳細に解明した研究は未だ数少ないということが着想の基にある。代表的な例としては、化学合成や化学分析などの単位操作の中で気体中に存在する化学分子を選択的に溶媒中に溶解させる操作があり、この操作をマイクロ流路と微小気泡で代用することで従来の煩雑な操作の簡便化に成功したとの報告がある(北森ら 2004)。しかしながら、生成された気泡径はばらつきが大きいこと、デバイス性能の安定性に欠けているのみならず、平均気泡径も 40 μm 程度と比較的大きなものであり所望の数 μm 径の気泡生成には至っていない。そのような背景のもと、研究代表者はこれまで T 字型マイクロ流路を用いた単分散の気泡生成技術に着手している。これまでの研究で達成した最小気泡径は 20 μm 程度であり、より小径な気泡生成を目指すためには詳細なメカニズム解明が必要である。そのためには、非正常な微小気泡生成過程を高時間分解能で観察し、気相の特徴的な時間スケールを明らかにすること、および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が必要不可欠である。

マイクロ流れの二つ目の利点は、単位面積あたりの熱伝達が大幅に増加する点であり、研究代表者はこの利点を利用した新たなデバイス開発と評価を考えている。この研究の着想に至った経緯は、近年の微細化に伴う半導体デバイスの発熱密度増加により、2020 年には数 cm^2 角のデバイス内において数 W/mm^2 の発熱をすると予想されているが(2009 年度版国際半導体ロードマップ)、現状でこの熱量を除熱できるデバイスの開発は進んでいないことである。その解決策として

研究代表者が着目したことは、発熱密度が不均一であるという点であり(Mahajan et al. 2006)、発熱密度の高い箇所のピーク温度を下げ、デバイス内の温度分布を均一化できれば、動作周波数・回路の密度をさらに増加させて性能向上を実現できる可能性があるということが研究のオリジナルな点である。これを実現する方法として、マイクロヒートパイプをデバイス内に実装し、作動流体をデバイス全域に渡って循環させて連続的に熱を輸送することで均熱化を図ることを考えている。この研究の技術的な側面としては数 W/mm^2 の高熱流束の除熱デバイスの開発であるが、物理現象としては相変化による蒸発・凝縮過程を高時間分解能で観察し特徴的な時間スケールを抽出すること、および界面熱抵抗を実験により評価することで伝熱特性を定量化することにある。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロ流路内の気液界面現象の解明および相変化を伴う熱輸送現象における伝熱特性の評価を主たる目的として、以下にそれぞれの研究目的を示す。

- (1) 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正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るという問題が生じた。研究代表者は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、この問題を光学機器の改良および新たな速度補間アルゴリズムの構築により解決することで、気液二相流の非正常高速可視化技術および速度計測技術を確立し、この手法を用いて気泡分裂時の特徴的な時間スケールおよび液相速度分布より流動構造を実験的に明らかにしていく。
- (2) 相変化を伴う熱輸送現象に関しては、次世代半導体デバイスの予想発熱量である数 W/mm^2 の除熱デバイスの開発および伝熱特性を評価する。この研究では、高熱流束を除熱するためにマイクロヒートパイプを実装することを考えており、その作製方法として三次元積層構造化を提案する。この手法の長所は、半導

体素子の基板とマイクロヒートパイプを形成する基板を独立に設けられる点に加え、今まで以上の高集積化、省電力、高速情報伝送が可能となる点にある。デバイスの最適設計を行うためには、マイクロヒートパイプの性能（熱抵抗、最大熱輸送量など）を定量的に評価することが必要であるが、特に作動流体の蒸発・凝縮による相変化が流動現象に与える影響に関して明らかにしていくことが重要である。研究代表者は、先の研究で開発した気液二相流の非定常高速可視化技術を利用して、高時間分解能で蒸発および凝縮現象を観察し特徴的な時間スケールを抽出していく。また、界面熱抵抗を評価することで伝熱特性を定量化していく。

3. 研究の方法

(1) マイクロ流路内の気泡生成過程の可視化計測

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。このシステムの要となるのは、気泡分裂現象を観察できる解像度（ 1000×1000 pixels 以上）とフレームレート（1 kfps - 100 kfps）を有する高速度カメラを落射蛍光顕微鏡に装着した後、光学系の改良を施す点にある。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すると、界面が不明瞭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は困難であった。一方、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ちは、気相圧力や液相速度を変化させて、気相の特徴的な時間スケールの抽出、液相速度分布より流動特性の評価、両相の情報から気相の分裂をもたらす力の因果関係を実験的に明らかにしていく。

気泡生成時に形成されるナノスケールの液膜内流動を可視化するため、分子タギング法とエバネッセント波照明観

察を併用した計測法を気液二相流動場に適用する。本手法は、これまで固液界面近傍のイオン層可視化実験で一定の成果を上げてきてはいるものの、以下に気液二相流動場適用での問題点を挙げる。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のに対し、エバネッセント波照明（光の全反射により流路壁面から 100 nm 程度液相側に染み出す光）を励起光として用いることで、ナノスケール空間の染料のみの流動を撮像することが可能となる点が大きな特徴であるが、現状ではレーザー光源の強度むらにより信号対雑音比が小であることが問題点として挙げられる。解決方法としては、面内の強度むらを除去するための空間フィルタの導入が考えられる。装置構成としては、 Ar^+ レーザ、空間フィルタの導入、および現有する高開口比の対物レンズを顕微鏡に装着することで実現される。本計測システムを構築したのちは、気相および液相圧力を変化させながら、ナノスケールの液膜内流動と生成気泡径との関係を定量的に示していく。

(2) 相変化を伴う熱輸送現象の伝熱特性評価

相変化を伴う熱輸送現象に関しては、数 W/mm^2 の熱量を除熱可能なデバイスの開発および伝熱特性の評価を行う。赤外線カメラにより、デバイスの発熱密度が不均一である (Mahajan et al. 2006) ということが明らかとなっているため、発熱密度の高い領域のピーク温度を下げて均熱化が図れれば動作周波数等の性能が向上すると予想される。均熱化の方法としては、マイクロヒートパイプを形成した基板を三次元積層構造によりデバイスに実装することで、高集積かつ効率的な熱輸送が実現されると考えている。基礎実験として、マイクロ流路に高熱流束を与えて液相（蒸発により一部は気相に変化）流量を増加させ、加熱部の温度低下（熱輸送の促進）を定量的に評価し、比表面積に対する伝熱特性を明らかにする。また、相変化を伴う熱輸送の最適設計のためには、ヒートパイプ内の作動流体の相変化が熱伝達やポンプ性能に与える影響を評価することが重要であり、本研究では先に開発した気液二相流の非定常高速可視化技術により、蒸発および凝縮の特徴的な時間スケールの抽出およびポンプ性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) マイクロ流路内の気泡生成過程の可視化計測

T字型マイクロ流路内の気泡生成過程を解明することを目的として、可視化計測技術の開発および流動解析を行った結果、以下の知見を得た。

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可視化でき、かつ気泡周りの液相速度分布を同時に計測可能な手法を開発した。本計測手法より得られた気泡径および流速データを整理した結果、従来用いられてきたキャピラリー数(粘性力と表面張力の比)では整理できず、ウェーバー数(慣性力と表面張力の比)により整理ができることが明らかとなった。

流路の幾何形状を変化させて実験を行って見たところ、アスペクト比が高い流路(流路幅と比して深さが小の流路)において小径気泡が得られること、さらには流路壁面が親水性か疎水性かにより生成される気泡径が大幅に異なることを実験的に明らかにした。

上述の示した結果は、マイクロスケールの流動(レイノルズ数が小さいため、慣性力よりも粘性力が支配的である流れ)であったとしても、気泡径を決定するファクターとして慣性力が起因していることを示唆している。そのため、液相流速をできる限り速く流した結果、5 m/s ほどの流速下で、最小気泡径 5 μm 程度の気泡径生成に成功した。

以上の結果は国内外の学会において発表済み(学会発表 4, 5, 7, 11)であるが、現在、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。

(2) 相変化を伴う熱輸送現象の伝熱特性評価

相変化を伴う熱デバイスにおける伝熱特性の評価を主たる目的として、数 W/mm^2 の除熱が必要な次世代半導体デバイスを対象とし、可視化計測および CFD による流動解析を行った。次世代半導体デバイスは、省電力化を図るため、高熱流束除熱にはマイクロヒートパイプの実装を、またヒートパイプ内の流体の圧送には電気浸透ポンプの実装を想定した。本研究では、実装のための設計指針の提案をし、以下の知見を得た。

電気浸透ポンプ流量および除熱量の関係を数値解析により明らかにしたところ、3 mm/s の代表流速にて、2 W/mm^2 の除熱の可能性が示唆された。

電気浸透ポンプにて、3 mm/s の代表流速を実現するためには、高電圧を印加する必要があるが、省電力化が図れない。そこで、消費電力を低減し、かつ高速流れを実現するため、ポンプの幾何形状と流量、ならびにポンプの幾何形状と除熱量の関係を、それぞれ数値解析により明らかにした。なお、ポンプ性能に関しては実測でも確認したため、今後は除熱量も実測により検証していく予定である。

以上の結果のうち、電気浸透ポンプの最適設計に関して、日本設計工学会の英文ジャーナルである Journal of Japan Society for Design Engineering (Ichivanagi et al. 2014, 雑誌論文 7, 8) に掲載された。

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 11 件)

- [1] Ichivanagi M., Suzuki T, “Experimental Optimization for Thermal Efficiency of Short-Stroke Small Engine with Supercharger by Using Lean Mixture Combustion”, *Journal of Japan Society for Design Engineering*, (掲載決定), 査読有り。
- [2] 一柳清久, 鈴木隆, “ガソリンエンジン気筒内の残留ガス割合推定法を用いた燃焼変動の改善”, *Thermal Science and Engineering (日本伝熱学会論文集)*, Vol.24, No.1, (2016), pp. 11–22, 査読有り。DOI: 10.11368/tse.24.11
- [3] Chaoran D, Fujita Y, Ichivanagi M., Suzuki T, “Adaptation of Turbocharger to Small Displacement Single Cylinder SI Engine”, *SAE Technical Papers (SAE International)*, (2015), Paper No. 2015-32-0823, 査読有り。
- [4] 鈴木隆, 一柳清久, “ガソリンエンジンの空燃比変動に対するロバスト制御設計(第2報: 吸気系伝熱モデルを用いたフィードフォワード制御器の多気筒エンジンへの適用)”, *設計工学(日本設計工学会論文集)*, Vol.50, No.10, (2015), pp. 541–547, 査読有り。
- [5] 鈴木隆, 一柳清久, “ガソリンエンジンの空燃比変動に対するロバスト制御設計(第1報: 吸気系伝熱モデルを用いた

- フィードフォワード制御器の開発)”, 設計工学 (日本設計工学会論文集), Vol.50, No.10, (2015), pp. 533–540, 査読有り .
- [6] **Ichiyanagi M.**, Suzuki T, “Implementation of Air-Fuel Ratio Feed-Forward Controller Considering Heat Transfer at Intake System to SI Engine”, *SAE Technical Papers (SAE International)*, (2015), Paper No. 2015-01-1982, 査読有り . DOI: 10.4271/2015-01-1982
- [7] **Ichiyanagi M.**, Suzuki K, Suzuki T, “Evaluations of Volumetric Flow Rate and Zeta-Potential for Optimal Design of Electroosmotic Pumps (2nd Report: Application of Improved Micro-PIV Measurements to Electroosmotic Pumps)”, *Journal of Japan Society for Design Engineering*, Vol.49, No.4, (2014), pp.195–200, 査読有り .
- [8] **Ichiyanagi M.**, Suzuki K, Suzuki T, “Evaluations of Volumetric Flow Rate and Zeta-Potential for Optimal Design of Electroosmotic Pumps (1st Report: Improvements of Measurement Techniques Using Micro-PIV System)”, *Journal of Japan Society for Design Engineering*, Vol.49, No.4, (2014), pp.188–194, 査読有り .
- [9] Hishida K, **Ichiyanagi M.**, Kazoe Y, Sato Y, “Combined Laser-Based Measurements for Micro- and Nano-Scale Transport Phenomena”, *Heat Transfer Engineering*, Vol.35, No.2, (2014), pp. 125–141, 査読有り . DOI: 10.1080/01457632.2013.812481
- [10] **Ichiyanagi M.**, Koyama Y, Sato Y, Hishida K, “Velocity Measurement of Sub-Millimeter-Scale Gas Flow by Spark Tracing Method”, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.8, No.3, (2013), pp.517–532, 査読有り . DOI: 10.1299/jtst.8.517
- [11] **Ichiyanagi M.**, Miyazaki R, Ogasawara T, Kinefuchi I, Matsumoto Y, Takagi S, “Measurements of Microbubble Generation Process in Microchannel Using Ultra High-Speed Micro-PTV System”, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol.14, (2013), pp.1011–1020, 査読有り . DOI: 10.1007/s10404-012-1108-2
- 【学会発表】(計 11 件)**
- [1] Chaoron D, Fujita Y, **Ichiyanagi M.**, Suzuki T, “Adaptation of Turbocharger to Small Displacement Single Cylinder SI Engine”, Proceedings of the 21st Small Engine Technology Conference, Osaka (Japan), (2015), 6pages .
- [2] **Ichiyanagi M.**, Suzuki T, “Implementation of Air-Fuel Ratio Feed-Forward Controller Considering Heat Transfer at Intake System to SI Engine”, Proceedings of 2015 JSAE/SAE Powertrains, Fuels and Lubricants International Meeting, Kyoto (Japan), (2015), 11pages .
- [3] **一柳 潤久**, 鈴木 隆, “ガソリンエンジン気筒内の残留ガス割合推定法を用いた燃焼変動の改善”, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 福岡国際会議場 (福岡県・福岡市), (2015) .
- [4] 高木周, 尾崎太一, 東隆, **一柳 潤久**, “超音波によるマイクロバブルのマニピュレーションに関する実験的研究”, 日本機械学会流体工学部門講演会, 東京理科大学 (東京都・葛飾区), (2015) .
- [5] 尾崎太一, 井上和仁, 東隆, **一柳 潤久**, 高木周, 松本洋一郎, “超音波によるマイクロバブルのマニピュレーション手法に関する研究”, 日本超音波医学会第 87 回学術集会, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市), (2014) .
- [6] **Ichiyanagi M.**, Suzuki K, Suzuki K, “Evaluations of Volumetric Flow Rate and Zeta-Potential in Electroosmotic Pumps Using Micro-PIV System”, Proceedings of the 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Nara (Japan), (2013), 10pages .
- [7] Inoue K, Kaji H, Masuda R, Ushijima H, Azuma T, Yoshinaka K, **Ichiyanagi M.**, Takagi S, Matsumoto Y, “Two-Dimensional Manipulation of Microbubbles Using Primary Bjerknes Force”, Proceedings of 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, Praha (Czech), (2013), 4pages .
- [8] **Ichiyanagi M.**, Sato Y, Hishida K, “Application of the Spark Tracing Method to Velocity Measurements in a Sub-Millimeter Scale Gas Flow”, Proceedings of the 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Delft (Netherlands), (2013), 13pages .
- [9] Hishida K, **Ichiyanagi M.**, Kazoe Y, Sato Y, “Laser-Based Measurement Techniques for Interfacial Transport Phenomena”, Proceedings of the 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Sapporo (Japan), (2013), 6pages .
- [10] 小栗吉晴, 中塚淳, 杵淵郁也, **一柳 潤久**, 金永ソク, 工藤寛, 大場隆之, 高木周, 松本洋一郎, “三次元積層チップ内マイクロヒートパイプの開発に向けた電気浸透流ポンプの検討”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学 (岡山県・岡山市), (2013) .
- [11] 増田礼, 加治大伸, 井上和仁, 木田暁, **一柳 潤久**, 高木周, 松本洋一郎, “マイクロ流路を用いた表面修飾マイクロバブル生成方法の開発”, 日本流体力学会年

会 2013, 東京農工大学 (東京都・府中市),
(2013) .

【図書】(計1件)

- [1] 石原直 [ほか] 編, 一柳満久 [ほか] 著,
“ナノ・マイクロスケール機械工学”, 東
京大学出版会, (2014), 266 (86-92) .

【産業財産権】

出願状況(計0件)

なし

取得状況(計0件)

なし

【その他】

ホームページ

[http://rscdb.cc.sophia.ac.jp/Profiles/72/0007132/p
rofile.html](http://rscdb.cc.sophia.ac.jp/Profiles/72/0007132/profile.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

一柳 満久 (ICHIYANAGI, Mitsuhsa)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 00584252

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし