

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246033

研究課題名(和文) 極短パルスレーザー加工による多層屈折率光ファイバプローブの創製

研究課題名(英文) Creation of a multi-refraction optical fiber probe through micro-fabrication with ultra-short laser pulses

研究代表者

齋藤 隆之 (SAITO, Takayuki)

静岡大学・グリーン科学技術研究所・教授

研究者番号：10324328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：先端光学、光マイクロ加工技術およびCFDの異分野融合による新たな体系の流体計測技術の基盤を創成、確立した。石英や超純水とフェムト秒レーザーパルス(FLP)との非線形相互作用を時間分解計測した知見に基づいて石英光ファイバーをFLPにより精密に微細加工する技術を開発し、光ファイバーの特性を最大限に引き出した多機能光ファイバプローブを創生した。加えて、これらの成果をGTLによる液体燃料製造プロセスや除染時に発生するフォーム計測などに応用した。

研究成果の概要(英文)：We have established the basis of innovative measurement technologies for fluid mechanics by integrating interdisciplinary sciences of advanced optical science, optical micro fabrication and CFD. On the basis of experimental results of nonlinear interaction between femto-second laser pulses and transparent materials (quartz and ultra-pure water) by using femto-second-order time-resolved measurement, we developed novel technologies of micro-fabricating quartz optical fiber. Furthermore, we developed a new method to three-dimensionally simulate propagation of laser beams in the optics and a measurement target, in consideration of gas-liquid interfaces, reflection, refraction, polarization and ray energy. Integrating the above, we have created multifunctional optical fiber probes. In addition, we applied the new OFP to measurement of droplets/bubbles in a GTL process, and to measurement of foams generated in a decontamination process.

研究分野：混相流，光応用流体計測

キーワード：流体工学 光応用計測工学 極短パルスレーザー 光ファイバー 混相流 気泡・液滴 数値解析 光線追跡

1. 研究開始当初の背景

- (1)光ファイバーは未知の優れた特性を有すると考えられることから、ドイツや英国では、極短パルスレーザーの開発と相まって、新たな特性を有する光ファイバーの開発や利用に関する研究が戦略的に行われている。
- (2)この世界的潮流を受けて、日本学術会議は「光ファイバーの高度な利用の促進」を提言し、革新的な光ファイバーの開発とその利用を強く促している。
- (3)光ファイバーを流体計測用センサーとして利用する試みは 1970 年代から行われてきたが、機能が低いこと、計測の信頼性が低いことなどから、実験室での使用に限定され、工業用の高い信頼性と高い精度を有する実用的センサーはなかった。
- (4)光信号を数値的に解析する手法がなく、複雑な光信号を理論的にかつ厳密に解析・評価することができず、光ファイバーの高度な利用の隘路となっている。

2. 研究の目的

研究代表者らのこれまでの研究成果，すなわち

- ・フェムト秒レーザーパルス (FLP) と透明物質との相互作用 (多光子吸収による物質の分解過程，非線形屈折率変化)
- ・FLP による石英ファイバーの光マイクロ加工
- ・フェムト秒時間分解計測
- ・気泡・液滴用高精度光ファイバースコープ (OFP)
- ・三次元光線追跡シミュレーションによる OFP 光学系内と気泡・液滴を含めた全光学系のレーザー導波メカニズム
- ・気泡や液滴の混相流動
- ・気泡や液滴運動の CFD

を飛躍的に発展させて、

(1)先端光科学，光ファイバー，光マイクロ加工技術ならびに CFD という異分野を融合することにより新たな体系の流体計測分野を創成・確立すること

(2)さらに，光ファイバーの特性を最大限に引き出した多機能 OFP を創製し，その成果を次世代エネルギー技術，次世代省エネ技術等の合理的な開発を促進する計測技術として実用化すること

を目的とした。

上記を完遂するために，達成すべき具体的な目標を以下とした。

これまでにない単一 OFP により液滴 / 気泡の 3 次元速度を検出すること

光の照射方向を波長ごとに制御できるような OFP 先端の楔状センサー部のコアならびにクラッドの屈折率が徐々に変化するような内部加工 (多層屈折率化) を行うこと

先端径 10 $\mu$ m の OFP にサブマイクロオーダーの精度で加工する方法を開発すること

正確な液滴 / 気泡径と速度を計測するために，OFP の通過位置を検出できること

100m/s 以上の高速液滴 / 気泡に対して，十分な強度を有すること

OFP と液滴 / 気泡との接触による界面変形の大きさ・形状・経時変化を明らかにすること (実験と CFD との融合)

OFP から出力される光信号の伝播特性と変調 (分光特性，反射特性) を明らかにすること (光線追跡シミュレーションと CFD との融合)

3. 研究の方法

研究代表者の実験ノウハウ (フェムト秒レーザーの多光子吸収過程の時間分解計測と分光計測)，光ファイバースコープの信号解析と研究分担者の数値解析ノウハウ (高精度流体数値解析，界面物理等) を各々高度に発展させるとともに，融合して，研究目標を達成した。具体的には、

極短時間の物理現象の実験による解明，FLP による透明物質のプラズマ化の時間領域における特性解明

上記の成果に基づく新たな原理の光ファイバースコープと光マイクロ加工法の開発

光線追跡シミュレーションと流体数値解析とをカップリングさせた高度な数値解析による目標性能を達成するための光ファイバースコープ設計

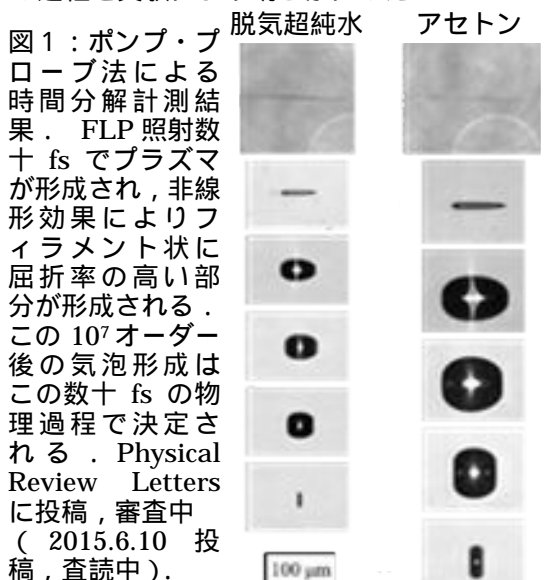
これらの融合の結果として，多層屈折率光ファイバースコープを創製

さらに，これら成果と混相流に関する知見を複合的に利用して，次世代エネルギー技術ならびに次世代省エネ技術等の合理的な開発を促進する計測技術に活用する

というプロセスを採った。

4. 研究成果

(1)FLP による石英ファイバーの多光子吸収過程，屈折率変化過程をフェムト秒の時間分解能で明らかにした。石英の代わりに一様・均質で精密な可視化を行える水とアセトンを使用して，屈折率変化の過程と分子の分解の過程を実験により明らかにした。



これにより、具体的な研究目標 2 - , 2 - , 2 - を達成した。

(2)上記(1)の結果を基に、石英のバンドギャップを考慮して、FLP の照射強度、照射タイミング、照射インターバルならびに照射回数と屈折率変化・定着と石英分解との関係を明らかにした。これらの結果を基に、先端径 10 $\mu$ m の OFP にサブマイクロオーダーの精度で加工する方法(対物レンズの選定、対物レンズの集光径、焦点位置、焦点の OFP 光軸方向ならびに垂直方向への送り速度、同送り間隔)を開発した。研究目標 2 - を達成した。

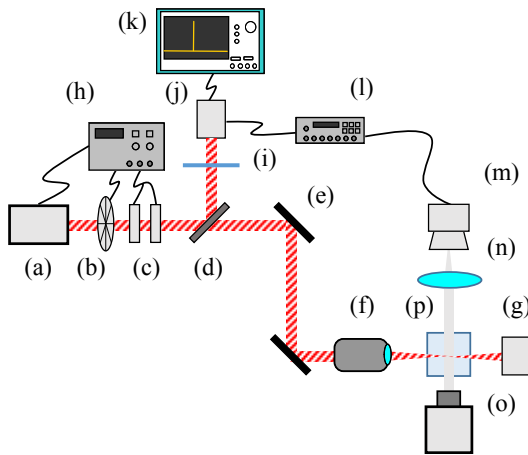


図 2 : fs レーザーマイクロ加工装置の概略。(a)fs レーザーシステム、(b)オプティカルチョッパー、(c)メカニカルシャッター、(d)ハーフミラー、(e)fs レーザー用ミラー、(f)fs レーザー用対物レンズ、(g)光検出器、(h)ファンクションジェネレーター、(i)ND フィルター、(j)光検出器、(k)オシロスコープ、(l)遅延発生器、(m)フラッシュランプ、(n)集光レンズ、(o)加工状態観測用カメラ

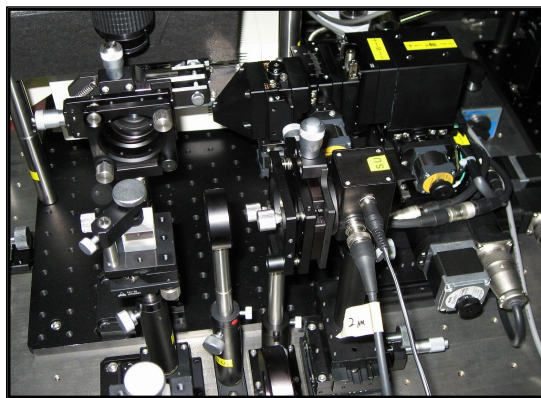


図 3 : 開発した fs レーザーマイクロ加工装置

この装置を用いて製作した OFP を発電プラント製造メーカーの協力を得て、試験用蒸気タービン内における液滴計測に供して、製作した多層屈折率 OFP が 100m/s 以上の高速液滴に対して十分な強度を有すること(目標 2 - )を実証した。

(3)1mm ~ 3mm の種々の径で単一気を発射する装置を独自に製作し、OFP と気泡との接触挙動と OFP 出力信号との関係を把握した。OFP が気泡に接触する直前にピーク信号が発生(プレシグナル)すること、このピーク信号は OFP の気泡接触位置が中心部に近いほど大きくなることを見出した。この特性を利用して、気泡径、気泡速度、気泡数密度を高精度に測定する手法、プレシグナル閾値法を開発した。これにより、研究目標 2 - を達成した。

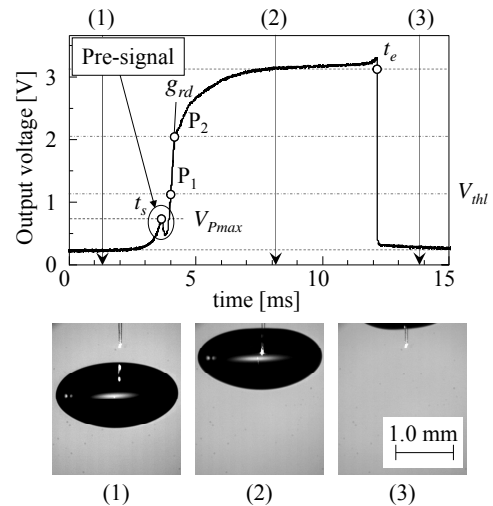


図 4 : OFP と気泡との接触挙動とプレシグナル

(4)50 $\mu$ m から 1mm の径で液滴を発射する装置を独自に製作し、OFP と液滴との接触挙動と OFP 出力信号との関係を把握した。OFP が液滴に接触後、液滴から離脱する直前にピーク信号が発生(ポストシグナル)すること、このピーク信号は OFP の液滴接触位置が中心部に近いほど大きくなることを見出した。この特性を利用して、液滴径、液滴速度、液滴数密度を高精度に測定する手法、ポストシグナル閾値法を開発した。これにより、研究目標 2 - を達成した。

(5)OFP 計測は気泡や液滴との接触による計測手法である。ピコ秒パルスレーザーを用いた時間分解可視化計測により、高速液滴や気泡と OFP との接触過程を実計測した。界面の 3 次元の変形を実験だけで解明することが困難なことから OFP と高速気泡・液滴の接触時における重心運動と界面運動の変化を、内部エネルギーの保存を実現する CFD により考察した。気液界面の高精度追跡に関しては、物質移動をともなう気泡の挙動解析法、壁近傍で大変形する気泡に適用可能な方法など、さまざまな視点で要素技術が開発され、その知見や技法が分担研究者から研究代表者のグループに順次提供された。これにより、光線追跡による光信号の解析が飛躍的に進んだ。研究目標 2 - を達成した。

なお、界面運動と界面を通しての熱および物質の移動に関しては、緩慢な時間変化の現

象においては検証できた。急激な変化に対する適用性の検証は部分的に留まったものの、質量・運動量に加えて内部エネルギーならびに物質成分に関して、気液界面の変形や運動をともしう場合に対する保存性の高い解析法が得られた。

光線追跡シミュレーションに関しては、気液界面をポリゴンではなく、光学系、気泡・液滴、上記 CFD と実験結果を反映させた数理モデルにより表現する手法を開発した。また、P 偏光と S 偏光を考慮して、光線の反射と透過におけるエネルギーの保存を厳密に組み込むモデルを開発した。加えて、OFP クラッドの層厚が波長程度の場合にはエバネッセント光を考慮するモデルを開発した。研究目標 2 - を達成した。

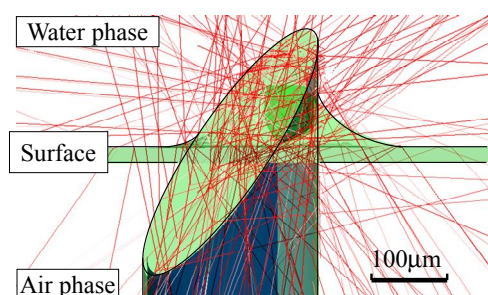


図5：光線追跡シミュレーションの結果例。気相から液相に向かって気液界面を貫通する場合（液滴計測時に相当）

ポストシグナルは、OFP から液相中に照射された光線が液滴の内界面で反射されることにより発生することを明らかにした。一方、プレシグナルは気泡の外界面で反射されることにより発生することを明らかにした。なお、ポストシグナルとプレシグナルは OFP の検出面を楔状に加工することで、OFP から照射されるレーザー光の異方性が生じることによって効果的に発生することを突き止めた。

(6)光線追跡シミュレーションと CFD とをカップリングさせて、OFP 出力信号を数値解析することにより、プレシグナルとポストシグナルの発生メカニズムを明らかにした。気泡・液滴運動と OFP 出力光信号との関係を数値解析することにより、高速微小液滴・気泡の径、速度と数密度の同時計測するに最適な多層屈折率 OFP を設計した。

GTL ( Gas-to-Liquid ) による液体燃料製造、廃水処理などの工業プロセスに実用的に使用できる OFP を設計、開発し、鉄鋼メーカー等との実用化開発に着手した。

さらに、気泡界面の実験を通して得た現象を利用して、オゾンと乳脂肪とが反応して生成されるオゾンド気泡に放射性セシウムと化合した粘土鉱物を吸着させる除染技術に着想し、オゾンドフォームの効率的な生成条件を把握するために、オゾンドフォーム計測用の OFP を開発した。

このように研究室レベルに留まることな

く、成果を広く社会に還元している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件)

- (1) Yasuyuki Nagami and Takayuki Saito, An experimental study of the bubble motion by gas-liquid-phase interaction in oscillation-grid decaying turbulence, *Flow, Turbulence and Combustion*, 査読有り, Vol. 92, 2014, 147 - 174, DOI:10.1007/s10494-013-9510-8
- (2) Takaaki Tsutsumi, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Heat transfer and particle behaviours in dispersed two-phase flow with different heat conductivities for liquid and solid, *Flow, Turbulence and Combustion*, 査読有り, Vol. 92, 2014, 103-119, DOI:org/10.1007/s10494-013-9498-0
- (3) Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Effects of curvature and vorticity in rotating flows on hydrodynamic forces acting on a sphere, *International Journal of Multiphase Flow*, 査読有り Vol.58, 2014, 292-300, org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.006
- (4) Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi, Simulation of fluid-structure interaction based on an immersed-solid method, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 査読有り, Vol. 5, 2013, 555-561, DOI:org/10.15282/jmes.5.2013.1.555-561
- (5) Shintaro Takeuchi, Takaaki Tsutsumi, Takeo Kajishima, Effect of temperature gradient within a solid particle on the rotation and oscillation modes in solid dispersed two-phase flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 査読有り, Vol.43, 2013, 15-25, DOI:org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.05.013
- (6) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Improving practical performance of single-tip-optical-fibre probing for measurement of bubble-swarm motion and properties in a large diameter bubble column, *Chemical Engineering Transactions*, The Italian Association of Chemical Engineering, 査読有り, Vol. 32, 2013, 1513 - 1518
- (7) Yuki Mizushima, Akihiro Sakamoto and Takayuki Saito, Measurement technique of bubble velocity and diameter in a bubble column via Single-Tip Optical-fiber Probing with judgment of the pierced position and angle, *Chemical Engineering Science*, 査読有り, Vol. 100, 2013, 98-104, DOI:org/10.1016/j.ces.2013.01.046
- (8) Yuki Mizushima, Yasuyuki Nagami, Yuta Nakamura and Takayuki Saito, Interaction between acoustic cavitation bubbles and dispersed particles in a kHz-order-ultrasound-irradiated water, *Chemical Engineering Science*, 査読有り, Vol. 93, 2013, 395-400, DOI: org/10.1016/j.ces.2013.02.028
- (9) Akihiro Sakamoto and Takayuki Saito,



Numerical Analysis of Optical Fiber Probing based on Ray Tracing Method, Review of Scientific Instruments, 査読有り, Vol. 83、2012, 075107, DOI: 10.1063/1.4732819

- (10) Yasuyuki Nagami and Takayuki Saito, Measurement of modulation induced by the interaction between bubble motion and liquid-phase motion in decaying turbulence formed by an oscillating-grid, Particuology, 査読有り, Vol. 11, 2013, 158 - 169, DOI: 10.1016/j.partic.2012.06.012
- (11) Tetsuo Ohshima and Takeo Kajishima, Numerical simulation of flow with phase change using phase boundary conditions based on the kinetic theory of gases, Heat Transfer - Asian Research, 査読有り, Vol. 7, 2012, 421 - 433
- (12) Masahiro Yamada and Takayuki Saito, A newly developed photoelectric optical fiber probe for simultaneous measurements of a CO<sub>2</sub> bubble chord length, velocity, and void fraction and the local CO<sub>2</sub> concentration in the surrounding liquid, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有り, Vol. 27, 2012, 8-19, DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2012.04.004
- (13) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Detection method of a position pierced by a single-tip optical fibre probe in bubble measurement, Measurement Science and Technology, 査読有り, Vol. 23, 2012, paper No.0853, DOI:10.1088/0957-0233/23/8/085308
- (14) Takeo Kajishima, Direct numerical simulation of multiphase flows involving dispersed components with deformable interfaces, Heat Transfer - Asian Research, 査読有り, Vol. 40, 2011, 387 - 403
- (15) Akihiro Sakamoto and Takayuki Saito, Robust algorithms for quantifying noisy signals of optical fiber probes employed in industrial-scale practical bubbly flows, International Journal of Multiphase Flow, 査読有り, Vol. 41, 2012, 77 - 90, DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.12.004

ほか 6 編 .

〔国際会議発表〕(計 58 件)

- (1) Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, The modeling of the effect of the streamline curvature for the fluid force on a sphere, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics, No.1229, December 12, 2013, Singapore
- (2) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Novel flocculation technique through acoustic cavitation bubbles driven by 20.3-kHz ultrasound in water, 66th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics, November 25, 2013, Pittsburgh, PA
- (3) Hajime Furuichi and Takayuki Saito,

Measurement of a wavy and thin liquid film in a small two-fluid nozzle via a single-tip optical fibre probe, 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS 2013), September 2, 2013, Chania, Greece

- (4) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Detection of a position touched by a single-tip optical fibre probe in a micro-droplet measurement, 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS 2013), September 2, 2013, Chania, Greece
- (5) Takeo Kajishima, Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, The effect of streamline curvature on the fluid force acting on a solid particle, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF), ICJWSF2013-IL07, August 30, 2013, Nagoya
- (6) Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi, Simulation of fluid-structure interaction based on an immersed-solid method, 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research, Keynote-2, July 24, 2013, Kuantan, Malaysia
- (7) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Improving practical performance of single-tip-optical-fibre probing for measurement of bubble-swarm motion and properties in a large Diameter bubble column, 11th International Conference on Chemical & Process Engineering, June 11, 2013, Milan Italy
- (8) Shogo Kawamoto, Takeshi Omori, Takeo Kajishima, Development of interface capturing method for dissolving bubbly flow", International Conference on Multiphase Flow 2013, ICMF2013-688, May 27, 2013, Jeju, Korea
- (9) Yuki Mizushima, Akihiro Sakamoto, Takayuki Saito, Pre-/post-signal method for detection of a position pierced by a single-tip optical fiber probe in bubble/droplet measurement based on optical signals obtained through 3D ray-tracing simulation, The International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2013)), May 26, 2013, Jeju Korea
- (10) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Highly time-resolved measurement for bubble nucleation induced by femtosecond laser pulses, American Physical Society 65th Annual DFD Meeting, November 24, 2012, San Diego
- (11) Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi and Toru Tsutsumi, Direct numerical simulation of heat transfer in fluid-particle two-phase flow by coupled immersed-boundary and discrete-element methods, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, September 29, 2012, Palermo, Italy
- (12) Takayuki Saito, Yuki Mizushima and Akihiro Sakamoto, Pre-signal method for detection of a position pierced by a single-Tip Optical Fiber Probe in bubble Measurement,

and analysis of the optical signal by 3D ray-tracing simulation, 6th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, September 24, 2012, Kumamoto, Invited

(13) Hajime Furuichi, Akihiro Sakamoto, Yuki Mizushima and Takayuki Saito, Laser-based optical fiber probing improved via 3D ray tracing numerical simulation, 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, July 5, 2012, Lisbon

(14) Yuki Mizushima and Takayuki Saito, A newly developed method for detecting a pierced position/angle by using a pre-signal in bubble measurement via a Single-Tip Optical-fiber Probe, September 19, 2011, Tianjin University, Tianjin, China ほか44件

〔国内学会発表〕(計60件)

- (1) 大塩哲哉, 梶島岳夫, 1方程式型ダイナミックSGSモデルを用いた翼周りのキャビテーション乱流に対するLES, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集, No.0435, 2013/11/10, 九州大学, 福岡市
- (2) 竹内伸太郎, 堤貴昭, 梶島岳夫, 分散混相流中における流体粒子相互作用および熱伝達の数値シミュレーション, 関西伝熱セミナー, 先の先の伝熱技術 in 六甲神戸, 2013/9/7, 瑞宝園, 神戸市
- (3) 古市肇, 坂本明洋, 水嶋祐基, 齋藤隆之, 光線追跡シミュレーションに基づく光ファイバプローブを用いた気泡流計測, 化学工学会第78年会, 2013/3/17, 阪大豊中キャンパス, 大阪府豊中市
- (4) 水嶋祐基, 齋藤隆之, フェムト秒パルスレーザーを用いた気泡生成過程の高時間分解計測, 化学工学会第78年会, 2013/3/17, 阪大豊中キャンパス, 大阪府豊中市
- (5) 藤田卓也, 大森健史, 梶島岳夫, 濡れ性を有する固体壁面に対する衝突液滴の数値解析, 第26回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2012/12/18, 中央大学, 東京都
- (6) 古市肇, 水嶋祐基, 坂本明洋, 齋藤隆之, フェムト秒レーザー加工光ファイバプローブによる微小気泡・液滴の計測, レーザー加工学会第78回講演会, 2012/12/14, アクイトコンgresセンター, 浜松市
- (7) 水嶋祐基, 齋藤隆之, フェムト秒パルスレーザーを用いた水分解時の高時間分解計測, レーザー加工学会第78回講演会, 2012/12/14, アクイトコンgresセンター, 浜松市
- (8) 古市肇, 水嶋祐基, 坂本明洋, 齋藤隆之, 光ファイバプローブによる気泡・液滴計測時における3D光線追跡シミュレーション, 第90期流体工学部門講演会, 2012/10/18, 同志社大学, 京都市
- (9) 古市肇, 坂本明洋, 水嶋祐基, 梶島岳夫, 齋藤隆之, 単一光ファイバプローブによる気泡・液滴計測における光線追跡法を用

いた数値解析, 第25回計算力学講演会, 2012/10/8, ポートアイランド南地区, 神戸市

(10) 水嶋祐基, 齋藤隆之, 光線追跡シミュレーションに基づく単一光ファイバプローブを用いた気泡流計測, 2012年度冷凍空調学会年次大会, 2012/9/13, 北大, 札幌市 ほか50件

〔図書〕(計0件)  
なし

〔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〕

(1)受賞  
齋藤隆之, 高柳記念賞, 公益財団法人・浜松電子工学奨励会, 最先端レーザーと光ファイバーを利用した複雑流体計測技術の開発とその環境技術への展開, 2014.12

齋藤隆之, 坂本明洋, 松田桂輔, 水嶋祐基, 古市肇, 化学工学会・技術賞, 光ファイバプローブによる気泡・液滴計測の高度化と計測システムの製品化, 2014.3

齋藤隆之, 坂本明洋, 松田桂輔, 水嶋祐基, 古市肇, 化学工学会・粒子流体プロセス技術賞, 光ファイバプローブによる気泡・液滴計測の高度化と計測システムの製品化, 2013.3

(2)ホームページ等

URL: <http://flow.eng.shizuoka.ac.jp/>

URL: <http://www-fluid.mech.eng.osaka-u.ac.jp/index-jp.html/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤隆之 (SAITO Takayuki)

静岡大学・グリーン科学技術研究所・教授  
研究者番号: 10324328

(2)研究分担者

梶島岳夫 (Kajishima Takeo)

大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30185772

(3)連携研究者

居波 涉 (INAMI Wataru)

静岡大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 30542815

(4) 連携研究者

川田 善正 (KAWATA Yoshimasa)

静岡大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70221900