

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420116

研究課題名(和文)画像センサーを利用した安価で簡便な分散系二相流の粒径計測システムの開発と公開

研究課題名(英文)Development and publicizing of the simple and low-priced drop-sizing system for dispersive two-phase flows utilizing an image sensor

研究代表者

鈴木 孝司 (SUZUKI, Takashi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10235963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：噴霧流・気泡流など分散系二相流の研究では、それらの粒径計測が必要である。気軽に利用できるツールを提供しようとの意図から、著者らは汎用部品で構成した低価格の簡易粒径計測システムを開発し、大学・高専の研究者向けに公開してきた。このシステムはレーザー回折法の原理に基づき、粒子からの散乱光を画像センサーで評価する。しかし、このシステムには様々な問題があった。本研究では、光学系の工夫によりそれらの解消を図るなどして計測システムを一新した。改良された新しいシステムをレチクルや液体中に懸濁した固体粒子、加圧ノズルからの水噴霧など幾つかの例に適用して有用性を確認した上で、旧システム同様にHPで公開した。

研究成果の概要(英文)：Size evaluation of spray droplets, suspended particles or bubbles is indispensable for the research of dispersive two-phase flows. Low-priced particle-sizing devices will be welcomed by the academic researches. From this point of view, the author developed a simple particle-sizing system based on laser-diffraction method utilizing an image sensor to evaluate the intensity distribution of scattered-light from particles. The optical setup was composed of general optical parts. The system had been opened for the academic researchers, but it had several imperfections. In this study, the system was improved much by the innovation of the optical setup. Several trial measurements were performed, and it was shown that the improved system is of use for the diameter measurement of suspended particles and spray droplets. The improved system, the introduction manual with parts list and the PC code for measurement, is publicized for the academic researches through the home-page.

研究分野：熱流体工学

キーワード：粒径計測 レーザー回折 画像センサー 分散系二相流 噴霧 簡易計測 計測システム開発

### 1. 研究開始当初の背景

噴霧流や気泡流など分散系二相流の研究では、それらの粒径計測が重要である。これまで様々な計測機器が開発・市販されてきているが、それらは一般に極めて高価である。高性能化・低価格化が進んでいる画像センサーを利用すれば、安価に計測システムを構築できる可能性もある。また、気軽に利用できるツールが存在することも有益であろう。

このような観点から著者らは、画像センサーを用いたレーザー回折の原理に基づく簡易粒径計測システムを開発し、大学・高専等の研究者向けに公開してきた(引用文献①)。このシステムは一般に入手可能な部品のみで構成され、極めて安価である。しかし現状では、計測上の制約が強いうえ、測定値のあばれや誤差を生じやすいなど、画像センサーを利用しているがゆえの問題もある。

### 2. 研究の目的

このような画像センサーを利用した簡易粒径計測システムについて、その特徴を損なうことなく光学系の工夫などにより諸問題を克服して汎用性を高め、評価のうえで公開することによって関連する学術分野の発展に寄与することが、本研究の最終目的である。

### 3. 研究の方法

本計測システムは以下のような着想に基づく。レーザー光束を粒子に照射すると、その直径に応じた強度分布の散乱光が得られる。市販の粒径計測では、これを図1のようにレンズで集め、スクリーンに設置した同心円状の光センサーによって測定し、それを基に光束上に存在する粒子の粒径分布を逆演算している(レーザー回折の原理)。この光センサーは専用品で高価であるため、本システムでは代わりに産業用小型カメラの画像センサーを置き、散乱光の画像を記録する。このままではセンサーの輝度のダイナミックレンジが不足で、測定用レーザー光束が集光する点の近傍は出力が飽和、周辺部は露光不足となるので、露光時間の異なる4種類の画像を取得、これらを合成して諧調数の大きな画像とし、この画像から粒径の評価に必要な散乱光強度分布を得ている。

しかし、集光する光が強すぎるため、このような工夫でもまだ輝度のダイナミックレンジが不足で集光点の光強度すなわちレーザー光束の透過率を厳密に評価できず、また強い光がセンサー内で乱反射して光学的ノイズとなり、これらが測定誤差などの原因となっている(図2(i)参照; 図中央の黒抜けた領域でセンサー出力が飽和、周囲の輝点が乱反射による光学的ノイズ)。さらに、4種類の画像の取得に比較的長い時間(10秒以上; この間に粒子の数密度や粒径分布が変化しないことが前提)を要することなど、画像センサーを利用しているがゆえの問題がある。

以上のことから本研究の要点は、有限のダ

イナミックレンジの画像センサーで必要となる散乱光の強度分布を速やかに取得し、それをもとに粒径分布を評価する技術を確認することにある。但し、開発の目標から特殊な部品や高価な部品の使用は望ましくない。予備実験の結果、集光するレーザー光を遮ることにより問題の改善が見込まれたので、本研究では、この考えに基づいて光学系の改良を進め、併せて計測用のPCコードも改良する。改良された簡易粒径計測システムを様々な例に適用して、その有効性を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 遮光体設置による光学系の改良

予備実験の結果を踏まえ、新たに汎用光学部品からなる光学系を試作し、図3に示すように測定用レーザー光束が画像センサーに集光する点を覆うようにセンサーのカバーガラスの上に遮光体を設置した。画像センサーとしては産業用の小型CMOSカメラ(Epix社製SV9M001, モノクロ10bit階調,  $5.2\mu\text{m}/\text{pixel}$ ,  $1024 \times 1280\text{pixel}$ )を用い、PCで制御して画像を取得した。遮光体として中実円がプリントされた透明フィルムを用いた。このフィルムはマイクロフィルム化技術でネガ原稿を1/30に縮小して製作した。これにより、図2(ii)に示すように、集光点近傍での出力の飽和が防止され、光の乱反射による輝点が見られなくなった。また、必要な輝度のダイナミックレンジが小さくなったため、3種類の画像で済むようになって、画像取得に要する時間が大幅に短縮された。

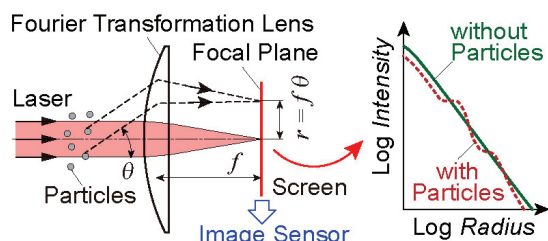


図1 レーザー回折の原理(現行システム)

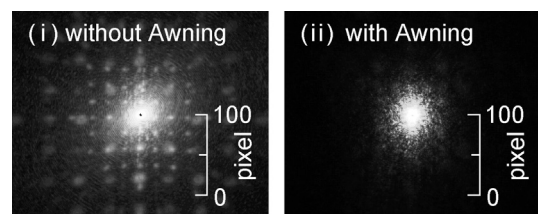


図2 画像センサーで取得の背景光の画像

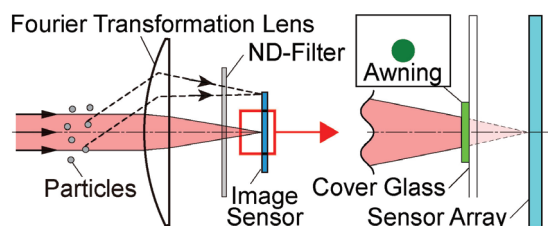


図3 遮光体設置による光学系の改良

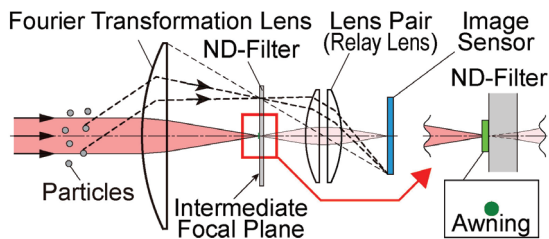


図4 光学系のさらなる改良のアイデア

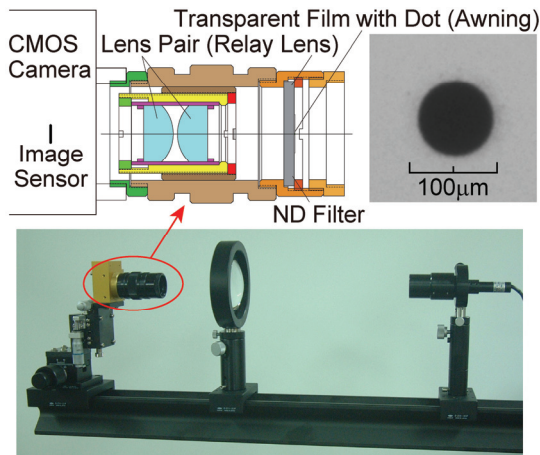


図5 さらに改良された光学系の外観

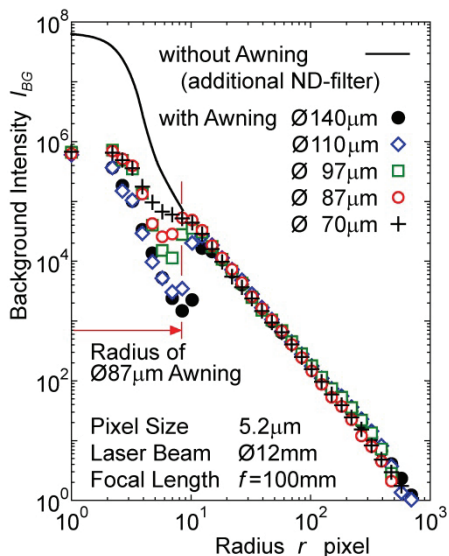


図6 背景光の光強度分布(遮光体の効果)

センサーの構造上、遮光体の設置位置が集光点よりやや前方となるため、遮光体の直径はセンサー出力が飽和する領域の径よりも若干大きい  $140\mu\text{m}$  とする必要があり、これにより測定可能な粒径の上限が制限されるなどの新たな問題を生じたものの、種々の問題に適用してみたところ従来システムより良好な結果が得られたので、導入説明書を整備して簡易粒径計測システム Ver. 3.1 としてホームページで公開した(詳細は雑誌論文①を参照のこと)。

### (2) 光学系のさらなる改良

上述のように改良したシステムを公開したが、システムの試用の過程で、遮光体を画像センサーの上面に直接張り付ける作業が

煩雑で、このことがシステム導入の障害となることが判明してきた。試行錯誤の結果、図4に示すように一般的なレーザー回折の光学系にリレーレンズを追加して中間焦点面を新たに設け、そこに一旦集光したレーザー光束を遮るように遮光体を置けば図3と同様の効果が期待できることが判明した。また、このようにすれば光学系の組み立ての際に画像センサーに直接触れずに済むうえ、遮光体の径を小さくできて粒径の測定レンジを拡大できる可能性もある。

この考えに基づいてシステムの光学系をさらに改良した。新しい光学系の外観を図5に示す。従来システムと同様に光源はコリメーター付きの半導体レーザーで、他の部分も汎用光学部品で構成した。レーザー光束の軸上に置かれた焦点距離  $f=100\text{mm}$  のフーリエ変換レンズの後方に、これと焦点面が一致するように焦点距離  $25\text{mm}$  の凸レンズのペア(1:1リレーレンズ)を設置し、その後ろ側の焦点面に画像センサーを置いた。周囲からの邪魔な光を除外するためのNDフィルターを中間焦点面に置き、その表面に遮光体として中実円をプリントした透明フィルム(上述と同じ方法で製作)を貼付する形式とした。画像センサーは微動装置に取り付けられ、遮光体の中央にレーザー光の集光点を合わせることができるようになっている。なお、レンズペアは中間焦点面に集まった散乱光を漏れなく中継できるように開口数の十分に大きいものを採用した。これによる中間焦点面から画像センサー面への画像伝達では中心から離れた部分で像に若干のにじみを生じたが、周辺部では後述するように光強度を求める領域のピッチが粗いため、光強度分布に目立った影響は見られなかった。

直径の異なる幾つかの遮光体について背景光(光束上に粒子が無いとき)の光強度の半径方向分布を調べてみた結果を図6に示す。図中に実線で示すように遮光体を置かないときの光強度(追加のNDフィルターで減光して測定)はレーザー集光点で最大で、半径方向距離の増加とともに急激に減少していた。遮光体を置くとその影の部分では光強度が  $1/100$  程度に減光された。しかし、遮光体の径を小さくするとその縁の近くでの減光の程度が少なくなる傾向があり、直径  $70\mu\text{m}$  では遮光体の縁の位置が不明瞭になった。また、遮光体の径が小さいと光学レールの歪みなどの影響で集光点の位置がわずかにずれたのみで強い光が漏れて画像センサー出力が飽和してしまうなどの問題があった。これらのことから本システムでは直径  $87\mu\text{m}$  ( $=16.7\text{pixel}$ ) の遮光体を用いることとした。図3のシステムよりも遮光体の径を小さくすることができたため、粒径の測定レンジを1.5倍に拡大できた。

### (3) 計測用のPCコードの改良

以上のような光学系の改良に加えて、画像センサーを制御して画像を取得し、画像から

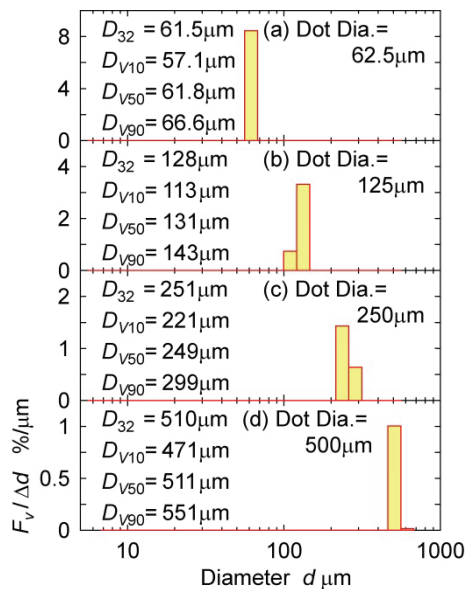
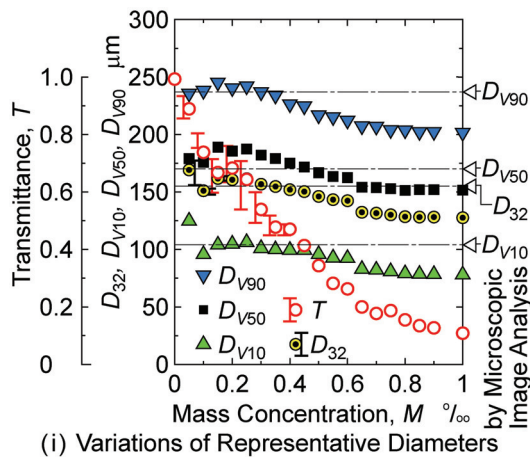
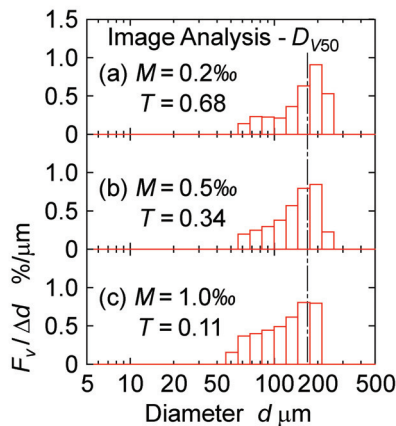


図7 ガラス基板上的の均一中実円の測定



(i) Variations of Representative Diameters



(ii) Representative Drop-size Distributions

図8 液体に懸濁した球状固体粒子の測定

得た散乱光強度分布を逆演算して粒径分布を求め、これより粒子群の平均粒径や代表粒径を計算する計測用 PC コードも併せて改良した。処理の概要を以下に述べる。

まず、レーザー光の集光点が遮光体の中央になるよう事前に調整した状態で露光時間が 0.061ms、1.98ms、64ms の画像をそれぞれ 10 枚ずつ画像センサーで取得し、これらを合成して疑似的に 19.8bit 階調の画像とする。

この画像を輝度値の重心を中心として多数の円環に分割し、領域毎に平均輝度値を算出して光強度の半径方向分布を求める。ここで最内周の円環領域#1 の半径は遮光体の陰に入らないよう 10pixel に、より外側の円環領域(#2~#24)の半径はそれらが公比  $10^{1/12}$  の等比級数となるように定めた。なお、レーザー光の強度は、遮光体の影の中心に設けた半径 2.5pixel の領域#0 での輝度値で評価した。

このような手順により、事前に光束上に粒子が存在しない場合(背景光)の光強度分布を把握した上で、光束上に粒子を置いて光強度分布を求める。この光強度分布は背景光と複数の代表的粒径の粒子からの散乱光強度分布を重ね合わせたものに相当するので、これを何らかの方法で逆演算すれば、レーザー光束の透過率と粒子の粒径頻度分布がわかる。ここで、領域#0 は遮光体の陰の中にあつて測定される光強度は遮光体によって減光された値であるから、減光率で除して元の値に戻す必要がある。しかし、減光率を事前に正確に把握することは必ずしも容易ではないので、本システムでは透過率は粒径頻度分布とは別に、測定時と背景光の領域#0 の光強度の比より算定した。体表面積平均粒径や体積基準の累積頻度分布の 10%径、50%径、90%径などの値は得られた粒径分布から求めた。

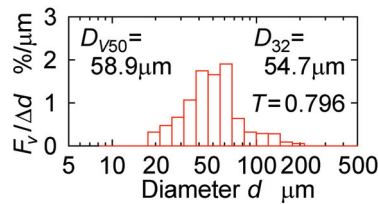
#### (4) 改良された計測システムの評価

以下、改良された新しい計測システムによる測定例を幾つか挙げ、その有効性を示す。

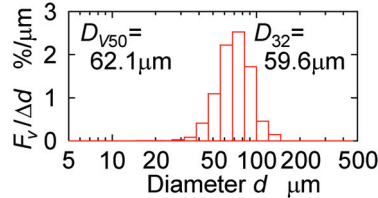
透明ガラス基板にプリントされた大きさの揃った中実円群を測定してみた。中実円の直径が 62.5、125、250、500  $\mu\text{m}$  の 4 種類のレチクルを用いた。得られた粒径分布と各種の粒径を図 7 に示す。図より、どの場合も中実円の径と対応した単一ピークが粒径分布に表れ、体表面積平均粒径  $D_{32}$  や体積 50%径  $D_{50}$  の測定値は中実円の径と良く一致していた。これらの結果から、本システムで単分散粒子の粒径が測定できることがわかる。

つぎに、対面するガラス窓を有する容器に入れたシリコン油#10 に樹脂製球状固体粒子(住友精化(株)製 CL2507)を懸濁し、攪拌しながらその粒径を測定してみた。図 8 (i) は粒子を少しずつ加えて粒子の質量濃度  $M$  の増加に伴う透過率  $T$  ならびに体表面積平均粒径  $D_{32}$  や体積 10%径  $D_{10}$ 、50%径  $D_{50}$ 、90%径  $D_{90}$  の変化を調べた結果である。図中のプロットは 10 回の測定の平均値を、プロットに付随する縦棒は測定値のばらつきを示している。図 8 (ii) はこの過程で得られた代表的な粒径分布である。図 8 (i) より、粒子濃度の増加に伴って透過率は単調に減少した。また、粒子濃度が低く透過率が 0.9 程度以上となる範囲では各種粒径の測定値に若干の暴れが見られたが、透過率が 0.8 から 0.6 程度となる粒子濃度の範囲では各種粒径の測定値は概ね一定で、図の右端に記入した粒子の顕微鏡画像を画像解析ソフトで解析して求めた値と、それぞれほぼ一致していた。一方、透過率が

Nozzle TeeJet #650017 (Spraying Sys.)  
 Injection Pressure  $\Delta p = 0.4\text{MPa}$   
 Water Spray  $z = 100\text{mm}$



(a) Newly Improved System



(b) Immersion Liquid Method

図9 扇形ノズルからの水噴霧の測定

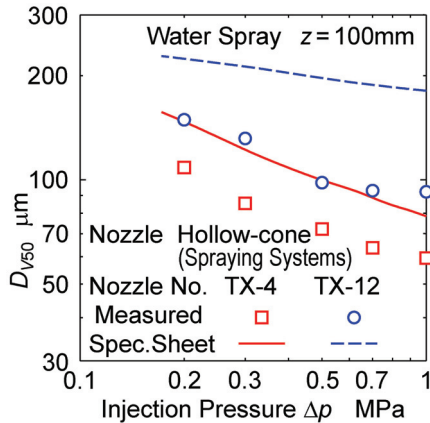


図10 中空円錐ノズルからの水噴霧の測定

0.6 程度以下になる粒子濃度の範囲では、透過率の低下と連動して各種粒径の測定値が減少する傾向が見られた。図8(ii)の粒径分布では、これに伴って大きい粒子の頻度が低下すると共に小さな径の範囲の頻度が増加していた。また、このような傾向が見られ始める条件(透過率 $\sim 0.6$ )は、一度粒子で散乱した光が他の粒子で再び散乱する多重散乱現象の影響を散乱光強度分布が受けるようになることとされる条件(20  $\mu\text{m}$  以上の粒子に対して吸光度 35%; 引用文献②参照)とほぼ一致していた。以上のことから、ここで見られた透過率の低下に伴う各種粒径の測定値の減少は多重散乱の影響と理解される。

次に、実際に扇形ノズルからの水噴霧の粒径を測定してみた。図9の(a)は本システムにより測定した粒径分布であり、(b)は噴霧液滴をシリコン油の層で捕獲して大きさを調べる液浸法により測定した結果である。原理上、本システムはレーザー光束上の全ての粒子の空間平均値を測定するのに対して液浸法の測定値は粒子を捕獲した間の時間平均値であるから、大きな粒子と微細な粒子とで飛行速度が大きく異なる加圧ノズルからの噴霧などでは両者の結果を直接比較する

ことはできないが、本システムで測定した体表面積平均粒径  $D_{32}$  および体積 50% 径  $D_{v50}$  の値は液浸法による測定値と概ね対応している。本システムで得られた粒径分布の 20 $\sim$ 40  $\mu\text{m}$  の頻度が液浸法よりも明らかに高いのは、液浸法による測定の際に微細な粒子の捕獲率が低かったことに起因すると考えられる。

次に、中空円錐ノズルからの水噴霧を本システムで測定してみた。結果を図10に示す。図は口径の異なる2つのノズルについて噴射差圧  $\Delta p$  を変えて体積 50% 径  $D_{v50}$  を調べた結果であり、図中には体積 50% 径のメーカー公表値も記入した。メーカー公表値は噴霧の最も濃い部分について位相ドップラー法で測定した結果であると思われるのに対し、本システムでは中空円錐状の噴霧の内部の細かな噴霧液滴を含めて測定しているから、本システムで測定した 50% 径がメーカー公表値よりも小さいのは当然のことである。しかし、噴射差圧の増加に伴う 50% 径の変化の傾向はメーカー公表値のそれとよく対応している。また、ノズル口径による 50% 径の違いも適切に捉えられている。

以上のように本システムは、測定用レーザー光束の透過率が適切な範囲(0.9 $\sim$ 0.6程度)であれば、噴霧液滴等の体表面積平均粒径や体積 50% 径などをほぼ妥当に評価することができ、噴霧条件などの変更がそれらに及ぼす影響を定量的に捉えることが可能である。高額な計測設備を用いずに噴霧装置やそれらを伴う機器に関する研究を進めようとする際などに本システムは極めて有用であろうと考えられる。なお、本研究では産業用小型 CMOS カメラを利用したが、図4の光学系を用いれば他の画像センサーでもレーザー回折の原理に基づく安価な粒径計測装置を構成することが可能である。

以上の結果を踏まえ、改良されたシステムを簡易粒径計測システム Ver. 4.0 として公開した。部品リスト付きの導入説明書や計測用 PC コードなどの必要なファイルはホームページより入手できる。光学系は一般に入手可能な汎用光学部品で構成され(遮光体のフィルムは著者より提供可能)、部品代は約 50 万円(PC・カメラ・光源を含む)である。なお、このシステムの計測対象は気体中あるいは屈折率の大きく異なる液体中に分散した球状の粒子群で、測定中(画像取得中の約 3 秒間)に粒子の数密度や粒径分布が変化しないことを前提としている。粒径分布の測定レンジは 5.6 $\sim$ 560  $\mu\text{m}$  である。

#### <引用文献>

- ① 鈴木孝司・斉藤 朗・藤松孝裕・林田和宏, 簡易粒径計測システムの開発(第1報: 開発の経緯とシステムの概要), 微粒化, Vol. 16, No. 54 (2007), pp. 34-46.
- ② 日本工業規格, JIS Z 8825-1: 2001, 粒子径解析—レーザー回折法—第1部: 測定原理, (2001), 日本規格協会.

## 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2件)

- ① SUZUKI, T. and HARASE, K., Laser-diffraction Based Drop-sizing System Using Image Sensor、Proceedings of SPIE, Vol. 9232, 2014, pp. 923209-1 - 923209-6. (査読あり)
- ② 鈴木孝司, 画像センサーを利用したレーザー回折法による噴霧液滴径計測システム, 実験力学, Vol. 13, No. 4(2013), pp. 401-404 (解説記事・編集委員会による審査)  
※ 上記の他に投稿中1件あり

[学会発表] (計5件)

- ① 鈴木孝司, レーザー回折の原理に基づく画像センサー利用の簡易粒径計測システムの開発・改良・公開, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016, 2016. 08. 08-10、同志社大学・京都府.
- ② 鈴木孝司・鳥居奏哉, 画像センサー利用のレーザー回折法による簡易粒径計測システムの改良(中間像面に小円形遮光板を置いた望遠鏡型の光学系の採用), 日本機械学会東海支部第65期総会・講演会(TEC16), 2016. 3. 17-18, 愛知工業大学・豊田市.
- ③ Takashi SUZUKI, Development of laser-diffraction based drop-sizing system using image sensor and its improvement, 9th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow, 2015. 09. 23-25, Hokkaido Univ., Sapporo.
- ④ 鈴木孝司・原瀬聖史, 画像センサーを利用したレーザー回折法による簡易粒径計測システムの改良について, 日本機械学会東海支部第64期総会・講演会(TEC15), 2015. 03. 13-14, 中部大学・春日井市.
- ⑤ SUZUKI, T. and HARASE, K., Laser-diffraction Based Drop-sizing System using Image sensor, International Conference on Optical Particle Characterization, 2014. 03. 10-14, Odaiba, Tokyo.

[その他]

- ① 簡易粒径計測システム Ver. 3.1 公開ページ [http://www.me.tut.ac.jp/~takashi/Simple\\_Drop-Sizing\\_System\\_Ver.3.1/](http://www.me.tut.ac.jp/~takashi/Simple_Drop-Sizing_System_Ver.3.1/)
- ② 簡易粒径計測システム Ver. 4.0 公開ページ [http://www.me.tut.ac.jp/~takashi/Simple\\_Drop-Sizing\\_System\\_Ver.4.0/](http://www.me.tut.ac.jp/~takashi/Simple_Drop-Sizing_System_Ver.4.0/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 孝司(SUZUKI Takashi)  
豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 10235963