

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 25 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420110

研究課題名(和文) デジタルホログラフィによる高性能3次元空間粒子計測法の研究

研究課題名(英文) Study of High Performance Method for Particle Measurement in 3D-space Based on Digital Holography

研究代表者

村田 滋 (MURATA, Shigeru)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：50174298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、デジタルホログラフィ粒子計測法の精度向上を図るため、3つの改善手法を開発した。デジタルホログラフィは、3次元空間の対象物情報をデジタル画像に干渉縞として記録し、その画像をPC上で波動光学解析して対象物情報を得る光学手法である。対象物体は、燃料噴霧や大気中粒子状物質のように約1-100ミクロン径の微小な粒子、液滴、気泡である。主に対象物の大きさと3次元空間位置の計測精度を3つの後処理法で改善しており、その性能を実験及び数値解析で評価した。その結果、各改善手法は測定誤差抑制と測定結果の信頼性向上に効果があり、さらに、水噴霧計測に応用することで、多相流計測における実用性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, some techniques have been developed for improving the performance of digital holographic particle measurement method in precision and accuracy. Digital holography is an optical method in which objects in 3D space are recorded as interference fringes on a digital image and the information is measured by analyzing the image on a PC based on wave optics. Target objects are small particles, droplets and bubbles of 1-100micron in diameter, for example fuel spray and particulate matter in atmosphere. Three post-processing techniques are presented mainly for improving the measurement accuracy of object size and 3D position and the performance of the techniques is evaluated in numerical simulation and in experiment. The test results show that each technique is effective for increasing the accuracy and reliability of measurement results on target objects. Application to water spray shows the feasibility of the present techniques in real measurement of multiphase flows.

研究分野：流体工学

キーワード：流体計測 混相流 デジタルホログラフィ 3次元計測 波動光学 マイクロ粒子 噴霧計測

## 1. 研究開始当初の背景

### (1)研究動機

船体の抵抗低減や養殖魚介類の品質向上などで近年盛んに話題となっているマイクロバブルを含む流れは分散性混相流と呼ばれ、エンジンの燃料噴霧やPM2.5のような環境に関わる浮遊微粒子などを含めて、この種の流れは工業的にも様々な分野で極めて重要な役割を果たしている。例えば、燃料噴霧では、その特性はエンジン性能に直接関わるため重要であるが、燃料噴霧の粒径・空間分布や燃焼不良に繋がる異状燃料液滴の生成プロセスなど3次元空間における様々な噴霧情報を短時間に手間を掛けることなく同時計測する手法がないのが現状である。

### (2)技術背景

こうした状況の解決手法としてデジタルホログラフィが挙げることができる。ホログラフィは通常の写真技術と異なり、2次元記録面に2次元情報を記録するのではなく、その2次元記録面の後方に広がる3次元空間情報を記録する技術で、高額紙幣の隅に付いた楕円形プリントのように見る方向によって異なる3次元位置にあった像を観察することが出来る。これは記録対象物体から届くレーザー散乱反射光とそれには関わらないレーザー参照光を干渉させて得られる干渉縞(ホログラムパターン)を記録することで実現している。

### (3)先端技術

そして、デジタルホログラフィは、3次元空間情報をもつホログラムパターンを撮像電子デバイスでデジタル記録し、その画像を波動光学に基づき計算機で解析することによって、記録された3次元空間情報を数値的に再生することのできる技術である。デジタルホログラフィではこれを撮像素子や計算機で電子的に処理するため、オンラインでホログラフィ計測に適しており、粒径・数密度・移動速度など様々な計測対象物の量が同時計測できるという特長を持つ。

### (4)現状と問題点

デジタルホログラフィは次の4点を目標として技術開発されてきた。

記録現象の高速化

記録空間の広域化

再生像の画質改善

再生像の高速計算

とりわけ、「再生像の画質改善」は計測精度に大きく関わるため噴霧計測や3D-PTVへの応用では重要であり、非定常現象観測に対応できる瞬時位相シフト法や、特殊な透明トレーサ粒子と位相情報を利用した流速測定法などの開発が進められてきた。しかし、噴霧など粒径や形状が決まっていない一般的な粒子計測に対して、実用的な高性能デジタルホログラフィ粒子計測システムは実現さ

れておらず、奥行き位置計測精度は20 $\mu\text{m}$ 程度にとどまり、実用レベルの性能に達しておらず、その性能向上が強く望まれているのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、単眼で3次元空間に高密度分布する数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ の微小粒子・液滴群に関する様々な量を時系列同時計測できるデジタルホログラフィ粒子計測システムの高性能化を目的としている。数値再生された再生像空間の後処理によって粒子計測精度を向上させる手法を開発し、数値シミュレーションおよび光学実験によってその性能を評価するとともに、高速運動する粒子群を測定できる応用範囲の広い高性能粒子計測システムをレーザー短パルス照明を使用して実現する。このシステムの高性能化は、「記録現象の高速化」と「計測情報の高精度化」によって達成する。研究期間内に達成すべき目標性能は、時間分解能500Hz、最大運動速度100m/s、空間位置検出精度2 $\mu\text{m}$ 、粒径計測精度2 $\mu\text{m}$ とし、空間位置計測精度は従来の10倍の性能向上を図る。

## 3. 研究の方法

### (1)デコンボリューション法による高精度化

数値像再生処理は、カメラにより一旦記録された観測ホログラム(干渉縞パターン)から元の微小粒子群の空間分布を3次元的に再現する処理で、如何に元の分布状態に近い空間分布を再現できるかがそこに記録された粒子群の計測精度に影響する。粒子の空間位置測定精度劣化させる原因は、計測される粒子がホログラムから再生された時点で奥行き方向に伸びた粒子像に変化することにある。この伸びを抑制し、本来の点状の粒子像に変換する処理がデコンボリューション法である。この手法では、3次元空間における単粒子像の伸びを数値シミュレーションにより求め、これを基に粒子像伸びを表す関数を表現し、これを用いて逆に粒子像の伸びを排除し、より現実に近い数値再生像空間の再現を図った。

### (2)仮想粒子法による高精度化

上述の(1)と同じく、数値再生像空間から検出された粒子計測結果の信頼性の向上を目的として、一旦得られた粒子情報を基に仮想的にホログラムパターンを作成し、そのホログラムパターンが観測されたものと一致するように粒子情報を反復修正する仮想粒子法を提案した。粒子位置の修正、粒子の付加・削除を行うことで、計測精度を改善するもので、数値シミュレーションによってその性能評価を行った。

### (3)粒子-スペckル判別による高精度化

デジタルホログラフィにおける数値像再生では、測定対象の粒子像が再生像空間に

その影として生じるが、干渉性の高いレーザー光を用いるためスペックルノイズが発生し、これを粒子像と誤解することで計測精度を低下させてきた。(1),(2)で提案・性能評価した2つの粒子測定精度改善手法をさらに発展させ、より信頼性の高い計測結果を得るために、一旦検出した粒子情報を元に再度再生像を構成して粒子像とスペックルノイズを見分ける方法を開発し、粒子計測結果の信頼性の向上を図った。この方法は検出粒子固有の回折パターンを利用した回折像指標を新たに導入し、誤検出を排除する後処理手法である。数値シミュレーションと基本性能実験を通して、開発手法の性能を評価した。

#### (4)高速現象の観測光学系構築

瞬時位相シフト法が適用可能な観測光学系を図1のように構成し、上述の基本性能試験に使用した。また、高速現象として観測対象に水噴霧を取り上げたが、通常のカメラで噴霧液滴のホログラムを観測することは難しい。そのため、超短時間照明が可能なレーザー光源による観測光学系を利用して、実際の水噴霧を計測し、その実用性を実証的に検証した。観測に用いた光学系はリレーレンズを用いたインライン型に配置し、2台のファンクションジェネレータからの信号を取り回すことで、シャッター、噴霧インジェクタ、レーザーの駆動タイミングを操作した。噴霧タイミングを基準とした噴霧液滴の空間分布・粒径正規化ヒストグラムを時間を追って計測した。

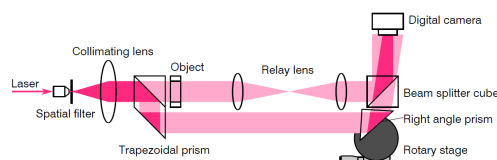


図1 チルト式位相シフト光学系

#### (5)多波長ホログラムを用いた高精度化

デジタルホログラフィ粒子計測システムの性能改善を継続的に進めるため、次の研究ステップへの基礎を固めとして、多波長レーザー照明と3板式カラーカメラを利用した多波長デジタルホログラフィの可能性を確認した。測定精度改善のための計測原理の理論的展開を踏まえ、異なる波長によるホログラムパターンを、奥行き位置の異なる単波長照明ホログラムと見なし、差分法及び加算法と呼ぶ2つの粒子計測処理法を提案した。性能評価は数値シミュレーションを中心に行った。

### 4. 研究成果

#### (1)デコンボリューション法による高精度化

数値再生粒子像の奥行き方向伸長の影響を抑制することで粒子計測法を高精度化するデコンボリューション法では、正規化処理

により安定化させた方法を試み、奥行き位置検出精度に影響する粒子像伸びを数値シミュレーションで評価するとともに、実験的に手法の有用性を確認した。数値シミュレーションでは、観測方法として位相シフト法によることが有用なことで、再生像空間を表す量は複素振幅情報または規準化複素振幅情報が良好な結果を与え、粒子密度500(個/立方mm)以下では深さ位置計測誤差が低く維持できることなどを示した。また、実証実験では、水中に浮遊させた粒径が明らかな標準粒子を観測し、図2に示すように、最も効果の高い場合には再生粒子像の伸び(FWHM)を0.17倍にまで低減できることを示した。

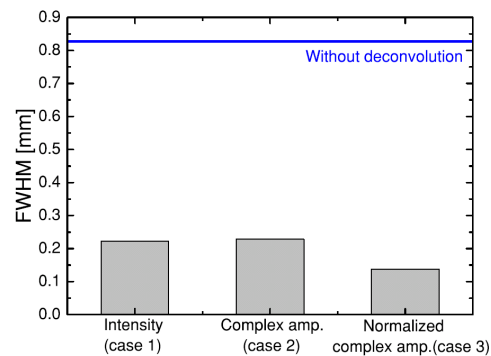


図2 粒子像の奥行き方向伸びの低減

#### (2)仮想粒子法による高精度化

粒子計測結果の信頼性の向上を目指した仮想粒子法では、従来法で得た粒子情報に基づき仮想粒子を設定し、その仮想粒子が生じさせるホログラムパターンと観測ホログラムパターンが合致するように、割線法に基づく反復計算によって誤検出粒子の除去と未検出粒子の追加検出する手法を提案した。数値シミュレーションで性能を評価したところ、粒子数密度100(個/立方mm)までは検出率1.0の適正な結果を得ているが、計算量の大幅な低減と反復計算の収束性の検討が必要であることが確認された。

#### (3)粒子-スペックル判別による高精度化

粒子とスペックルを見分けるために導入した回折像指標を用いる提案手法の性能を数値シミュレーションで評価した。その結果、粒子像特定のための閾値の影響を受けず、信頼性の高い計測結果が得られ、粒径10, 20, 30μmの3つの異径粒子が混在する計測において、図3の度数分布が得られ、誤差率はそれぞれ3.0, 2.5, 2.0%であることが示された。また、基礎実験では標準粒子を用いた誤差評価を行い、公称粒径10, 20, 30ミクロンの3つのピークを持つ粒径分布に対して、計測結果は与えられた粒径分布とよく一致しており、標準粒子の公称値の平均値との誤差率はそれぞれ11.2, 6.2, 4.3%であることを確認した。

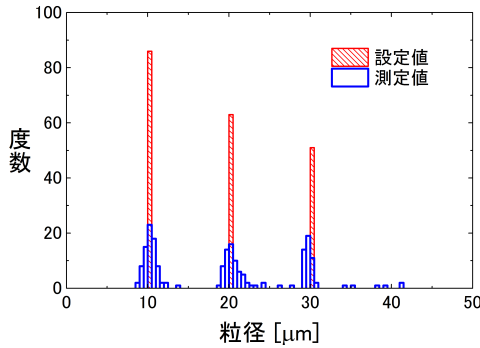


図3 粒径分布の計測性能評価結果

#### (4) 高速現象の観測光学系構築

前年度に超短時間照明が可能なレーザー光源を導入し、これを高速噴霧現象の観測に利用するため、同期信号系統を整備すると共に、実際の水噴霧の計測に適用した。噴霧の高速現象をフリーズさせるため、レーザー照明時間を250nsとし、ファンクションジェネレータの信号駆動により、噴霧タイミングからの経過時間によって測定結果を整理した。そして、噴霧圧力を10MPaとした条件下で得た結果をバックライト観測による噴霧の巨視的構造と比較しながら、その信頼性を確認した。噴霧液滴は噴射ノズル直下で密集しており、時間経過に伴い液滴径ピークは小さくなるとともに、その液滴が幅方向に広がる傾向が計測できることを示した。また、噴霧圧力を変化させ、液滴数、粒径、空間分布の変化を確認し、噴霧圧力を大きくすると噴霧液滴は微細で数密度が高くなり、噴霧現象の一般的な傾向とよく一致する計測結果が得られた。

#### (5) 多波長ホログラムを用いた高精度化

数値シミュレーションによる性能改善評価を行い、単波長による計測及び位相シフトによる計測との比較を行ったところ、図4の印で示す多波長使用時の結果のように、誤検出数及びRMS誤差は良好に低減できることを示した。実証研究では、He-Neレーザー(633nm)と固体レーザー(波長532nm)に加え、本研究課題で購入した固体レーザー(波長488nm)によって3波長によるカラーレーザー照明と、昨年度末に導入したプログレッシブ3板式カラーカメラによる多波長ホログラム観測装置を構築した。基本性能試験として、1mm厚の薄い水槽中を自由落下する標準粒子の運動を2波長照明でホログラフィ計測するとともに、同様の観測対象について数値シミュレーションで計測精度を評価しており、いずれも単波長照明の場合に比べ高精度に粒子運動計測可能なことを示している。なお、開発手法の実用性を実証するため、応用計測として流体-構造体連成同時計測を計画していたが、実験実施中のため、今後の継続課題としていく予定である。

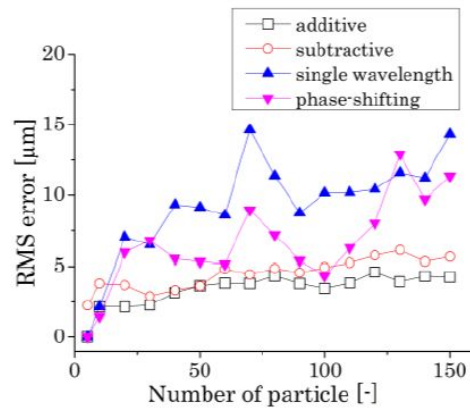


図4 カラー情報利用による誤差低減

#### 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 1件)

浅井裕斗, 村田 滋, 田中 洋介, 正規化デコンボリューションに基づくデジタルホログラフィ粒子計測法, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 81, No. 823, 2015  
DOI: 10.1299/transjsme.14-00348

〔学会発表〕(計 9件)

村田滋, デジタルホログラフィ粒子計測における高解像度数値像再生の性能限界, 日本機械学会第94期流体工学部門講演会 2016年11月12日-13日, 山口大学(山口県・宇部市)

林尚宏, 多波長ホログラムを用いたデジタルホログラフィ粒子計測法に関する一考察, 日本機械学会第94期流体工学部門講演会 2016年11月12日-13日, 山口大学(山口県・宇部市)

林尚宏, 多波長デジタルホログラムを用いた粒子検出の改善, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016, 2016年10月30日-11月2日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎(東京都・文京区)

村田滋, デジタルホログラフィ粒子計測法の信頼性的実験的評価, 可視化情報全国講演会(日立2016), 2016年10月8日-9日, 茨城大学(茨城県・日立市)

浅井裕斗, デジタルホログラフィを用いた水噴霧の実験計測, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2015, 2015年10月28日-30日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎(東京都・文京区)

ASAI Yuto, Reliability improvement in digital holographic particle measurement, Proceedings of Digital Holography & 3-D Imaging Meeting (OSA), 2015年5月25日-28日, 上海(中華人民共和国)

<https://doi.org/10.1364/DH.2015.DTh3A.6>

浅井裕斗, デコンボリューションを用いたデジタルホログラフィ粒子計測とその応用, 日本機械学会第92期流体工学部門講演会, 2014年10月25日-26日, 富山大学(富山県・富山市)

村田滋, 仮想粒子デジタルホログラムを用いた高精度粒子検出反復法, 日本機械学会第92期流体工学部門講演会, 2014年10月25日-26日, 富山大学(富山県・富山市)

ASAI Yuto, Influence of deconvolution PSF on particle image reconstruction in digital holography, Proceedings of Imaging and Applied Optics 2014 (OSA), 2014年7月13日-17日, シアトル(アメリカ合衆国)

<https://doi.org/10.1364/AIO.2014.JTu4A.17>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村田 滋 (MURATA, Shigeru)  
京都工芸繊維大学・機械工学系・教授  
研究者番号: 50174298

### (2) 連携研究者

田中 洋介 (TANAKA, Yohsuke)  
京都工芸繊維大学・機械工学系・助教  
研究者番号: 80509521