

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4774517号  
(P4774517)

(45) 発行日 平成23年9月14日(2011.9.14)

(24) 登録日 平成23年7月8日(2011.7.8)

(51) Int.Cl.		F I			
GO 1 B	11/08	(2006.01)	GO 1 B	11/08	G
GO 1 B	11/00	(2006.01)	GO 1 B	11/00	H
GO 1 P	3/36	(2006.01)	GO 1 P	3/36	C

請求項の数 11 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2006-125149 (P2006-125149)	(73) 特許権者	504190548
(22) 出願日	平成18年4月28日(2006.4.28)		国立大学法人埼玉大学
(65) 公開番号	特開2007-298327 (P2007-298327A)		埼玉県さいたま市桜区下大久保255
(43) 公開日	平成19年11月15日(2007.11.15)	(74) 代理人	100076967
審査請求日	平成21年2月1日(2009.2.1)		弁理士 杉信 興
特許法第30条第1項適用	平成17年10月30日~31日 社団法人 可視化情報学会主催の「可視化情報全国講演会(新潟2005)」において文書をもって発表	(72) 発明者	上 杉 知 弘
			埼玉県さいたま市桜区下大久保255 国立大学法人 埼玉大学内
		(72) 発明者	川 橋 正 昭
			埼玉県さいたま市桜区下大久保255 国立大学法人 埼玉大学内
		(72) 発明者	平 原 裕 行
			埼玉県さいたま市桜区下大久保255 国立大学法人 埼玉大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 粒子計測装置および方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザービームを出射するレーザー光源；  
前記レーザービームを、第1ビーム，第2ビームおよび第3ビームに分岐するビームスプリッタ；  
第1ビームを計測対象領域に照射する第1光学手段；  
計測対象領域を照射する第1ビームに対して、第1ビームが当たった粒子の0次反射光と1次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角で計測対象領域を撮影する第1電子カメラ；  
第2ビームを第1参照光として第1電子カメラに投射する第2光学手段；  
第1電子カメラの光軸に対してステレオ角 をなし、かつ第3ビームが第2参照光として投射される第2電子カメラ；  
を備える粒子計測装置。

10

【請求項2】

第2光学手段は、第2ビームを計測対象領域を通して第1電子カメラに投射し；第3ビームも計測対象領域を通して第2電子カメラに投射される；請求項1に記載の粒子計測装置。

【請求項3】

レーザービームを出射するレーザー光源；  
前記レーザービームを、第1ビーム，第2ビームおよび第3ビームに分岐するビームスプ

20

リッタ；

第 1 ビームを計測対象領域に照射する第 1 光学手段；

計測対象領域を照射する第 1 ビームに対して、第 1 ビームが当たった粒子の 0 次反射光と 1 次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角で計測対象領域を撮影する電子カメラ；

第 2 ビームを、第 1 参照光として前記電子カメラに投射する第 2 光学手段；

前記電子カメラで撮影される前記散乱角 のレーザ光に対してステレオ角 をなす反射レーザ光を前記電子カメラに投射する第 3 光学手段；および、

第 3 ビームを、第 2 参照光として前記電子カメラに投射する第 4 光学手段；  
を備える粒子計測装置。

10

【請求項 4】

第 2 光学手段は、第 2 ビームを計測対象領域を通して前記電子カメラに投射し；第 4 光学手段も、第 3 ビームを計測対象領域を通して前記電子カメラに投射する；請求項 3 に記載の粒子計測装置。

【請求項 5】

レーザビームを出射するレーザ光源；

前記レーザビームを、第 1 ビームおよび第 2 ビームに分岐するビームスプリッタ；

第 1 ビームを計測対象領域に照射する第 1 光学手段；

計測対象領域を照射する第 1 ビームに対して、第 1 ビームが当たった粒子の 0 次反射光と 1 次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角で計測対象領域を撮影する電子カメラ；

20

第 2 ビームを、計測対象領域を外れた光路を経る参照光として前記電子カメラに投射する第 2 光学手段；および、

前記電子カメラで撮影される前記散乱角 のレーザ光に対してステレオ角 をなす反射レーザ光を前記電子カメラに投射する第 3 光学手段；

を備える粒子計測装置。

【請求項 6】

前記電子カメラに投射される、ステレオ角 をなす 2 方向のレーザ光の、計測対象領域から前記電子カメラに至る像再生距離は、同一画面上の、2 方向のレーザ光による同一粒子の画像のサイズを異にするために、異なった値である、請求項 3、4 又は 5 に記載の粒子計測装置。

30

【請求項 7】

前記電子カメラの結像面は、粒子像内に干涉縞を生ずる焦点外れ位置である；請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 つに記載の粒子計測装置。

【請求項 8】

前記電子カメラが撮影した画面上の、粒子像内の干涉縞の数に基づいて粒子径を算出する、請求項 7 に記載の粒子計測装置を用いる粒子計測方法。

【請求項 9】

前記電子カメラで短時間  $d t$  間隔で 2 回粒子像を撮影して、第 1 回の撮影像に基づいて粒子の 3 次元位置を算出し、第 2 回の撮影像に基づいて粒子の 3 次元位置を算出し、両算出値に基づいて粒子の 3 次元速度を算出する、請求項 1 乃至 7 に記載の粒子計測装置を用いる粒子計測方法。

40

【請求項 10】

前記電子カメラで短時間  $d t$  間隔で 2 回粒子像を撮影して、第 1 回又は第 2 回の撮影画面上の、粒子像内の干涉縞の数に基づいて粒子径を算出し、第 1 回の撮影像に基づいて粒子の 3 次元位置を算出し、第 2 回の撮影像に基づいて粒子の 3 次元位置を算出し、両算出値に基づいて粒子の 3 次元速度を算出する、請求項 7 に記載の粒子計測装置を用いる粒子計測方法。

【請求項 11】

前記計測対象領域の位置に校正板を置いて撮影し、撮影画面上の校正板の画像から、3

50

次元位置算出のパラメータを校正し、校正したパラメータを前記3次元位置の算出に用いる、請求項9又は10に記載の粒子計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮影画像を表すデジタル電気信号すなわち画像データを生成する電子カメラに計測対象粒子を照射したレーザ光像を投影し、該画像データを処理して、画像データが表す画像に基づいて粒子の3次元速度、粒径等を計測する粒子計測装置及びそれを用いる粒子計測方法に関する。該粒子計測装置は、これに限定する意図ではないが、デジタルホログラフィによる、粒子の3次元速度の計測および粒子径の計測に用いることができる。

10

【背景技術】

【0002】

【特許文献1】特開2002-181515号公報

【特許文献2】特開2004-361291号公報。

【0003】

特許文献1には、シート状の平行なレーザビームが当たった液滴からの反射及び屈折光を、レーザビームの側方からCCDカメラで、干涉縞が現れる焦点外れで撮影し、液滴像領域内の干涉縞の本数Nに基づいて液滴の直径を算出する粒径測定において、レンズとCCD素子の間に、干涉縞の分布方向と直行する方向yに液滴像を偏平化して線状とするシリンドリカルレンズを介挿して、複数の液滴像のy方向の重なりを解消する粒径測定が記載されている。短時間差で液滴を撮影して粒径測定すると共に、該時間差内の2次元方向の液滴移動量を計測して速度に換算する二次元速度の算出も記載されている。

20

【0004】

特許文献2には、放射シート状のレーザ光を照射した計測対象領域を、ステレオ角で配置した2台のカメラで各焦点位置(合焦点)に同時に撮影して、各カメラで撮影した1粒子につき1対として現れる輝点对を、同一粒子のものを同定して該粒子の3次元位置を求める計測装置及び方法が記載されている。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

引用文献1の計測装置によれば、粒径を計測することはできるが、3次元位置を求めることはできない。引用文献2の計測装置は、粒子の3次元位置を求めることはできるが、合焦点撮影によって輝点对像を得るので、それによれば粒径を計測することはできない。

30

【0006】

本発明は、粒径および3次元位置を計測し得る粒子計測装置を提供することを第1の目的とし、3次元位置演算に用いるパラメータの校正(カメラ校正)のための作業が簡易な粒子計測装置を提供することを第2の目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

(1)レーザビーム(L)を出射するレーザ光源(10);  
前記レーザビーム(L)を、第1ビーム(L1)、第2ビーム(L2)および第3ビーム(L3)に分岐するビームスプリッタ(BS1,BS2);  
第1ビーム(L1s)を計測対象領域に照射する第1光学手段(M1,M2,SL);  
計測対象領域を照射する第1ビーム(L1s)に対して、第1ビームが当たった粒子の0次反射光と1次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角で計測対象領域を撮影する第1電子カメラ(20);  
第2ビーム(L2)を、第1参照光として第1電子カメラ(20)に投射する第2光学手段(M3,M4);および、  
第1電子カメラ(20)の光軸に対してステレオ角 をなし、かつ第3ビーム(L3)が第2参

40

50

照光として投射される第 2 電子カメラ(21) ;  
を備える粒子計測装置(図 1)。

【 0 0 0 8 】

なお、理解を容易にするために括弧内には、図面に示し後述する実施例の対応要素又は対応事項の符号を、例示として参考までに付記した。以下も同様である。

【 発明の効果 】

【 0 0 0 9 】

第 1 ビーム(L1s)が当たった粒子の 0 次反射光と 1 次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角で計測対象領域を撮影するので、第 1 電子カメラ(20)の撮影画面上に現れる 1 粒子の輝点对(2 像)の輝度が同等であり、輝点对の識別抽出の精度が向上する。第 1 電子カメラ(20)の結像面を、粒子像内に干渉縞を生ずる焦点外れ位置とすることにより、第 1 電子カメラ(20)の撮影画面上の粒子像内に現れる干渉縞が明瞭になり、粒径計測の精度を高くすることができる。

10

【 0 0 1 0 】

第 1 および第 2 電子カメラ(20,21)の撮影画面上の同一の粒子像に 3 次元 P T V を適用して粒子の 3 次元位置を算出することができる。短時間 d t 間隔で 2 度撮影して、各回撮影画面に基づいて粒子の d t 前、後の 3 次元位置を算出し両位置差と d t に基づいて 3 次元速度を算出できる。計測対象領域にカメラ校正板をおいて第 1 および第 2 電子カメラ(20,21)で撮影して、像再生した校正板の画像に基づいて、カメラ校正(3 次元位置算出のパラメータの校正)を行うことができ、校正を比較的容易に実施できる。

20

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 1 】

( 2 ) 第 2 光学手段(M3,M4)は、第 2 ビーム(L2)を計測対象領域を通して第 1 電子カメラ(20)に投射し;第 3 ビーム(L3)も計測対象領域を通して第 2 電子カメラ(21)に投射される;上記( 1 )に記載の粒子計測装置(図 1)。

【 0 0 1 2 】

すなわちインライン光学系を用いるインラインホログラフィ撮影システムである。従来は物体光(粒子像光)に対する立体視用の参照光の入射角の範囲が非常に狭く、光学系の設定が非常に難しいが、本実施態様によれば、インライン光学系なのでその複雑さが無い。電子カメラの撮像素子たとえば CCD 素子などは、ホログラムの空間解像度が非常に低く、奥行き方向の像再生が非常に粗い。したがって、粒子の奥行き方向(第 3 軸)位置の検出精度が悪い。しかし本実施態様によれば、第 3 軸方向の粒子の位置は、幾何学的な関係から得られるため、高精度である。

30

【 0 0 1 3 】

( 3 ) レーザビーム(L)を出射するレーザ光源(10) ;

前記レーザビーム(L)を、第 1 ビーム(L1) , 第 2 ビーム(L2)および第 3 ビーム(L3)に分岐するビームスプリッタ(BS1,BS2) ;

第 1 ビーム(L1s)を計測対象領域に照射する第 1 光学手段(M1,SL) ;

計測対象領域を照射する第 1 ビーム(L1s)に対して、第 1 ビームが当たった粒子の 0 次反射光と 1 次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角で計測対象領域を撮影する電子カメラ(M4,20) ;

40

第 2 ビーム(L2)を、第 1 参照光として前記電子カメラ(20)に投射する第 2 光学手段(M3, M4) ;

前記電子カメラで撮影される前記散乱角 のレーザ光に対してステレオ角 をなすレーザ光(L3)を前記電子カメラ(20)に投射する第 3 光学手段(M6,BS3) ; および、

第 3 ビーム(L3)を、第 2 参照光として前記電子カメラ(20)に投射する第 4 光学手段(M5, M6,BS3) ;

を備える粒子計測装置(図 5)

上記( 1 )に記述した作用効果が同様に得られる。加えて、カメラが一台でよいので、計測システムの構造が簡単になり、カメラの設定、調整の作業量も少ない。

50

## 【 0 0 1 4 】

( 4 ) 第 2 光学手段 (M3, M4) は、第 2 ビーム (L2) を計測対象領域を通して前記電子カメラ (20) に投射し；第 4 光学手段 (M5, M6, BS3) も、第 3 ビーム (L3) を計測対象領域を通して前記電子カメラ (20) に投射する；請求項 3 に記載の粒子計測装置 ( 図 5 ) 。

## 【 0 0 1 5 】

上記 ( 2 ) に記述した作用効果が同様に得られる。

## 【 0 0 1 6 】

( 5 ) レーザビーム (L) を出射するレーザ光源 (10) ；

前記レーザビーム (L) を、第 1 ビーム (L1) および第 2 ビーム (L2) に分岐するビームスプリッタ (BS1, BS2) ；

第 1 ビーム (L1s) を計測対象領域に照射する第 1 光学手段 (M1, SL) ；

計測対象領域を照射する第 1 ビーム (L1s) に対して、第 1 ビームが当たった粒子の 0 次反射光と 1 次屈折光の光強度が同等となる散乱角 となる受光角 (L2m) で計測対象領域を撮影する電子カメラ (M4, 20) ；

第 2 ビーム (L2) を、計測対象領域を外れた光路を経る参照光として前記電子カメラ (20) に投射する第 2 光学手段 (M5, M7, BS4) ；および、

前記電子カメラで撮影される前記散乱角 のレーザ光に対してステレオ角 をなすレーザ光 (L3m) を前記電子カメラ (20) に投射する第 3 光学手段 (M6, BS3) ；  
を備える粒子計測装置 ( 図 8 ) 。

## 【 0 0 1 7 】

すなわちオフアクシス (off axis) 型のホログラフィ撮影システムである。上記 ( 1 ) に記述した作用効果が同様に得られ、また、カメラが一台でよいので、計測システムの構造が簡単になり、カメラの設定、調整の作業量も少ない。インライン型の場合、参照光も計測対象領域を透過するので液滴そのもののホログラムが干渉縞像ホログラム画面にかさなって撮影されるので、干渉縞像ホログラムに対して光学的ノイズとなる。しかし、本実施態様によれば、参照光は計測対象領域を透過しないので、該光学的ノイズを生じない。干渉縞像ホログラムに基づく 3 次元位置計測の精度を向上させることが可能となる。

## 【 0 0 1 8 】

( 6 ) 前記電子カメラ (20) に投射される、ステレオ角 をなす 2 方向のレーザ光の、計測対象領域から前記電子カメラ (20) に至る像再生距離は、同一画面上の、2 方向のレーザ光による同一粒子の画像のサイズを異にするために、異なった値である、上記 ( 3 ) ， ( 4 ) 又は ( 5 ) に記載の粒子計測装置 ( 図 5 ， 図 8 ) 。

## 【 0 0 1 9 】

相関判定により 2 方向のレーザ光による同一粒子の同一サイズの画像を抽出することもできるが、本実施態様によれば、サイズにしたがって 2 方向のレーザ光による同一粒子の画像を分離抽出できるので、同一画面上の 2 方向のレーザ光による同一粒子画像を分離する精度を高くすることができる。画像処理技術 (ソフトウェア = プログラム) により自動的に分離する実施態様では、まずサイズによって粒子画像を 2 グループに分離して 2 画面とし、像再生距離の差によるサイズ比にしたがって一方の画面を拡大又は縮小して同一サイズの 2 画面を生成してから、相関判定処理によって、同一粒子像を抽出 (同定) する。コンピュータ (例えばパソコンのアプリケーションプログラム) とオペレータとの対話により同一粒子像を抽出する実施態様では、ディスプレイ上の表示画像に対するオペレータの目視判定により同一粒子をマーキングする。これに基づいてコンピュータが 2 方向のレーザ光による同一粒子像を各方向のレーザ光による各粒子像を表わす 2 画面を生成し、像再生距離の差によるサイズ比にしたがって一方の画面を拡大又は縮小して同一サイズの 2 画面を生成してから、相関判定処理によって、同一粒子像を抽出 (同定) する。この対話形式の処理においても、2 方向のレーザ光による同一粒子像にサイズ差があるので、同一粒子像を抽出するための目視判定が容易である。

## 【 0 0 2 0 】

( 7 ) 前記電子カメラ (20, 21) の結像面は、粒子像内に干渉縞を生ずる焦点外れ位置で

ある；上記（１）乃至（６）のいずれか１つに記載の粒子計測装置。

【００２１】

（８）前記電子カメラ(20,21)が撮影した画面上の、粒子像内の干渉縞の数に基づいて粒子径を算出する、上記（７）に記載の粒子計測装置を用いる粒子計測方法。

【００２２】

（９）前記電子カメラ(20,21)で短時間  $d t$  間隔で２回粒子像を撮影して、第１回の撮影像に基づいて粒子の３次元位置を算出し、第２回の撮影像に基づいて粒子の３次元位置を算出し、両算出値に基づいて粒子の３次元速度を算出する、上記（１）乃至（７）に記載の粒子計測装置を用いる粒子計測方法。

【００２３】

（１０）前記電子カメラ(20,21)で短時間  $d t$  間隔で２回粒子像を撮影して、第１回又は第２回の撮影画面上の、粒子像内の干渉縞の数に基づいて粒子径を算出し、第１回の撮影像に基づいて粒子の３次元位置を算出し、第２回の撮影像に基づいて粒子の３次元位置を算出し、両算出値に基づいて粒子の３次元速度を算出する、上記（７）に記載の粒子計測装置を用いる粒子計測方法。

【００２４】

（１１）前記計測対象領域の位置に校正板を置いて撮影し、撮影画面上の校正板の画像から、３次元位置算出のパラメータを校正し、校正したパラメータを前記３次元位置の算出に用いる、上記（９）又は（１０）に記載の粒子計測方法。

【００２５】

これによれば、計測対象領域の位置に校正板を置いて撮影すれば、校正用の画像が得られるので、パラメータの校正のための作業が簡易である。

【００２６】

本発明の他の目的及び特徴は、図面を参照した以下の実施例の説明より明らかになる。

【実施例１】

【００２７】

図１に、本発明の第１実施例の構成を示す。レーザー装置１０は、ダブルパルス発振のNd:YAGレーザー（波長：532nm，出力：50mJ/pulse，閃光時間：5ns）であり、２台のCCDカメラ２０，２１（有効画素数：1360(H)×1036(V)pixels）でインラインホログラムを撮影する。まず、レーザー装置１０から出力されたボリューム光Lから一つ目のビームスプリッタBS1により粒子計測光L1を分離し、該粒子計測光L1を、ミラーM1，M2およびシート状光への変換レンズユニットSLで、シート状光L1sとして、本実施例では、ノズルNZによって水滴が噴霧される計測対象領域に照射する。二つ目のビームスプリッタBS1により第１参照光L2をボリューム光Lから分離し、残ったボリューム光を第２参照光L3としている。第２参照光L2は、ミラーM3，M4で反射して計測対象領域に照射する。

【００２８】

計測対象領域において、上記シート状光L1sの光軸，第１参照光L2および第３参照光L3が交叉し、しかも第１参照光L2の、計測対象領域を通過する光路に第１カメラ２０の光軸があり、第２参照光L3の、計測対象領域を通過する光路に第２カメラ２１の光軸がある。

【００２９】

第１実施例では、カメラ２０，２１のそれぞれに入射するレーザー光L2，L3の光路は立体（３次元）配置である。シート状光L1sの光軸と、それに対しての角度をなす第１カメラ２０の光軸とを含む第１平面と、同様にシート状光L1sの光軸と、それに対しての角度をなす第２カメラ２１の光軸とを含む第２平面とは、非平行の異なる面であって、シート状光L1sの光軸の位置で交叉する。

【００３０】

図２に、計測対象領域においてシート状光L1sが当たった水滴Dropletによる０次反

10

20

30

40

50

射光および1次屈折光の、カメラ20の撮像面への投影光路を、模式的に示す。光透過性球形粒子にレーザのようなコヒーレント光を照射すると、粒子表面で反射する0次反射光と、粒子内部で屈折を繰り返し散乱する1次からn次までの屈折光が生じる。このうち、散乱角が小さい前方散乱では、0次反射光と粒子内部で2度屈折する1次屈折光が支配的になる。

#### 【0031】

カメラ20, 21間のステレオ角  $\theta$  は、デジタル再構築の便宜性を考慮して90°としている。計測対象粒子が水滴の場合、水の相対屈折率  $n$  が1.33であるので、図3に示すように、表面反射光(0次反射光)と1次屈折光の光強度が散乱角70°において等しくなるので、2台のカメラ20, 21の受光角  $\alpha$  はそれぞれ70°とした。カメラ20の撮像素子であるCCD素子の受光面にカメラレンズ20Lの焦点があると、0次反射光による投影像(輝点)と1次屈折光による投影像(輝点)が受光面に現れる。これらの輝点を一般にGlare Points(輝点对)とよぶ。図2に輝点对20Gfを示す。しかし、CCD素子の受光面に対してカメラレンズ20Lの焦点がずれていると、干渉縞が内部に現れた粒子像20Sfとなる。輝点对20Gfおよび干渉縞粒子像20Sfのいずれも、受光角  $\alpha$  を0次反射光と1次屈折光の強度が同等となる角度(水の場合で70°)に設定することにより、最も明確になる。

10

#### 【0032】

なお、本第1実施例ならびに後述の第2, 第3実施例のいずれにおいても、測定対象領域には、粒子計測光としてシート状光L1sを照射している。これにより、撮影粒子が少なく、ノイズとなる多数の粒子像が少ない。したがって粒子像の選別あるいは抽出の精度を高くすることができる。しかし、必ずしもシート状光を用いる必要はない。シート状光L1sに代えて、1粒以上の少数の粒子群を同時照射し得る横断面の粒子計測光L1を用いることもできる。また、画像データ処理においてノイズ分離機能又は粒子像抽出機能が高ければ、さらに横断面面積の大きい非シート状の粒子計測光を用いることもできる。

20

#### 【0033】

干渉縞粒子像20Sf内の縞数  $N$  を観測することにより、次のように粒子直径  $d_p$  を算出することができる。

#### 【0034】

##### 【数1】

$$d_p = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left( \cos(\theta/2) + \frac{n \sin(\theta/2)}{\sqrt{n^2 - 2n \cos(\theta/2) + 1}} \right)^{-1} \dots(1)$$

30

#### 【0035】

ここで、 $d_p$  は粒径、 $N$  は干渉縞の縞次数、 $\lambda$  は波長、 $\alpha$  はカメラの受光角、 $\theta$  は集光角、 $n$  は粒子と周囲媒体との相対屈折率である。カメラの受光角  $\alpha$  とはレーザ進行方向とカメラの光軸とがなす角をさす。

#### 【0036】

波長  $\lambda$  や角度  $\theta$  は光学系により決定されるパラメータであるので、屈折率  $n$  が既知ならば、粒径  $d_p$  は干渉縞像の縞数  $N$  により求められ、粒径の絶対計測が可能である。0次反射光と1次屈折光の強度が等しいとき、干渉縞の振幅が最大となり良好な干渉像となる。図3で示すように0次反射光と1次屈折光の強度比は散乱角  $\theta$  によって変化し、光強度の等しくなる角度  $\theta$  は、光源の偏光や対象とする粒子の屈折率  $n$  などによっても変化する。

40

#### 【0037】

3次元速度計測では、2台のカメラ20, 21で計測対象領域をステレオ視することにより撮影されたホログラムパターンの像再構築に、3次元PTVを適用する。PTV(粒子追跡法)とは、連続する2時刻間の流体画像上で同一粒子の対応付けを行うことにより、物体空間上の個々の粒子の移動量を求める手法である。

#### 【0038】

50

再度図1を参照する。レーザ装置10およびCCDカメラ20, 21には、シーケンサ23が、レーザ発射指示信号および撮影指示信号を、パソコン(PC)22からのスタート指示にตอบสนองして送信する。

【0039】

パソコン22には、粒子計測アプリケーションプログラム(「粒子計測」という)がインストールされており、オペレータが該「粒子計測」を起動することにより、メインメニューが、パソコン22に接続されたディスプレイに表示される。メインメニューには、サブメニュー項目「カメラ校正」、「パラメータ調整」および「計測」が表示されている。オペレータが「カメラ校正」をクリックすると、「カメラ校正」の入力画面がディスプレイに表示される。図1に示すノズルNZ直下の計測対象領域に校正板を配置して、「2次元校正」を指定して実行入力を行うことにより、パソコン22は、1回の撮影を行ない、各カメラ20, 21の撮影画面(の画像データ)が、パソコン22に送り込まれると、ディスプレイにサムネイル表示する。その後、パソコン22(の「粒子計測」と対話形式で、各撮影画面をディスプレイに表示して、2次元画像処理で用いる幾何学的パラメータの設定を行う。「3次元校正」を指定して実行を入力したときには、パソコン22は、短時間dt間隔の2回の撮影を行ない、後述する3次元速度の算出3DVM(図4)の輝点对象の再構築S31~3次元位置の算出S36を順次に、パラメータ参照の演算となるステージでは対話形式でオペレータの介入による、パラメータの調整を行う。このようにして確定したパラメータ値が、次回校正まで、粒子計測で使用される。

【0040】

メインメニュー上の「パラメータ調整」を指定したときには、パソコン22は、「2次元校正」と「3次元校正」で設定されているパラメータ値をディスプレイに表示し、この表示画面からオペレータは、パラメータ値を調整又は変更することができる。

【0041】

メインメニュー上の「計測」をオペレータが指定したときには、「計測」の手順説明が表示され、実行を指示すると、パソコン22(の「粒子計測」アプリケーション)が、粒子計測を実行する。

【0042】

図4に、該粒子計測の概要を示す。本実施例では、三次元PTVアルゴリズムは画像からの粒子検出、2時刻間での粒子追跡、そして幾何学カメラモデルによる三次元再構築の3ステップで構成するので、「計測」の実行が入力されるとパソコン22は、短時間dt間隔の2回の撮影を、シーケンサ23に指示し、これにตอบสนองしてシーケンサ23が、第1の撮影をレーザ装置10とカメラ20, 21に指示し、そしてdt経過後に第2回の撮影を指示する。そしてカメラ20, 21に順次に、画像転送を指示する。カメラ20, 21は、第1回撮影画像と第2回撮影画像を記憶媒体に記憶しており、画像転送指示にตอบสนองして第1回撮影画像と第2回撮影画像をパソコン22に転送する。パソコン22はそれらを内部メモリに格納する(ステップS1)。以下では、括弧内には、ステップという語を省略してステップNo.符号のみを記す。

【0043】

ここで、第1カメラ20の第1回撮影画像(画面)にP11と、第2回撮影画像(画面)にP12と識別符号を与え、第2カメラ21の第1回撮影画像(画面)にP21と、第2回撮影画像(画面)にP22と識別符号を与える。

【0044】

パソコン22は、画像処理(S2)によってコントラストの補正及びノイズ除去を行ってから、粒子像を抽出する(S3)。そして「粒径算出」(PDM)において、画面P11上の1つの粒子像の干渉縞数Nを算出して、(1)式に基づいて粒子直径Dpを算出して、P11画面をディスプレイに表示して該粒子像を4角枠で示して、算出した干渉縞数N, 粒子直径Dpおよび(1)式のパラメータ値をディスプレイに表示する。ここでオペレータが表示画面上の「確認」ボタンをクリックすると、パソコン22は、内部メモリに設定した計測データテーブル(1メモリ領域)に、干渉縞数N, 粒子直径Dpおよび(1



) 式のパラメータ値を格納する。オペレータが「確認」ではなく、P 1 1 上の特定領域を枠指定し、その中の粒子像内の縞数  $N_p$  を入力し、又は、表示中の干渉縞数  $N$  を  $N_p$  に変更し、および / 又は表示中のパラメータ値を変更して、「再実行ボタン」をクリックするとパソコン 2 2 は、入力値と ( 1 ) 式に基づいて粒子直径  $D_p$  を再度算出してパラメータ値とともにディスプレイに表示する。そして「3次元速度の算出」( 3 D V M ) を実行する。

【 0 0 4 5 】

「3次元速度の算出」( 3 D V M ) では、まず始めに、デジタルホログラフィによって干渉縞像から輝点对像を再構築し ( S 3 1 )、再構築した画面に対して粒子マスク相関法を適用し輝点对像を検出する ( S 3 2 )。これを、撮影画面 P 1 1 , P 1 2 , P 2 1 および P 2 2 に対して行う。次に、第 1 時刻 ( 第 1 回撮影 ) の画面 P 1 1 , P 1 2 上で検出した各粒子に対して、第 2 時刻 ( 第 2 回撮影 ) の画面 P 2 1 , P 2 2 上に設定した探查領域から輝点对像間隔などの粒子情報を基に対応粒子を決定する ( S 3 3 , S 3 4 )。

10

【 0 0 4 6 】

次に、3次元位置算出のパラメータを用いて、第 1 回撮影の粒子の 3 次元位置 ( 始点位置 ) と第 2 回撮影の粒子の 3 次元位置 ( 終点位置 ) を算出する ( S 3 5 , S 3 6 )。これにおいては、カメラ校正データ ( 校正により設定したパラメータ ) から、像平面と物体空間との投影関数を算出し、それによって得られたカメラの視点と画像上の粒子の位置により、画像上の各粒子から物体空間中に 1 本の視線を決定する。もし、ステレオ画像上で同一粒子ならば、左右の視線が交わるはずであるので、それぞれの視線の間隔が最小となる 2 視線の各粒子を同一粒子とし、該粒子の 3 次元位置を算出する。

20

【 0 0 4 7 】

次に、算出した 3 次元位置 ( 始点位置 , 終点位置 ) と時間間隔  $d t$  を 3 次元速度算出式に与えて 3 次元速度を算出してディスプレイに表示し、計測データテーブルに加える ( S 3 7 )。そして、計測値処置用の入力画面をディスプレイに表示し、登録指示があれば指定された登録先に登録し、印刷指示があると図示を省略したプリンタでプリントアウトする ( S 4 )。

【 実施例 2 】

【 0 0 4 8 】

図 5 に、本発明の第 2 実施例の構成を示す。この第 2 実施例は、一台の CCD カメラ 2 0 で、デジタルホログラフィ画像を得るものである。レーザ装置 1 0 が出射するレーザビームがビームスプリッタ B S 1 により、粒子測定光 L 1 と参照光に別けられ、該参照光が更にビームスプリッタ B S 2 により、第 1 参照光 L 2 と第 2 参照光 L 3 に別けられる。第 1 , 第 2 参照光 L 2 , L 3 が、測定対象領域で互いに直交すると共に、粒子測定光 L 1 のシート状変換光 L 1 s の光軸と交叉する。測定対象領域を通過した第 1 , 第 2 参照光 L 2 , L 3 はビームスプリッタ B S 3 で合成され、CCD カメラ 2 0 に入射する。CCD カメラ 2 0 は、二方向からの光を同時に撮影する。

30

【 0 0 4 9 】

第 2 実施例では、シート状光 L 1 s の光軸とカメラ 2 0 に入射するレーザ光 L 2 , L 3 の光路とは同一平面 ( 2 次元 ) 状の配置である。すなわち、シート状光 L 1 s の光軸と、それに対して の角度をなしてミラー M 4 に入射するレーザ光 L 2 と、ミラー M 6 に入射するレーザ光 L 3 とは、同一平面上にある。

40

【 0 0 5 0 】

ビームスプリッタ B S 2 で分けられた第 1 参照光 L 2 は、シート光 L 1 s の光軸に対して の角度である。粒子計測光であるシート光 L 1 s は測定対象粒子を照明し、該粒子表面に二つの輝点を生じさせる。それらの輝点の明るさは散乱角度 に依存し、水滴 ( 入射光の波長 : 5 3 2 m m , 相対屈折率 : 1 . 3 3 ) の場合、約 7 0 ° でそれらの輝点の明るさが等しくなる。そこで = 7 0 ° に設定している。ステレオ角 は、9 0 ° である。シート状光 L 1 s の光軸とレーザ光 L 2 および L 3 の光路とが同一平面上の配置であり、ステレオ角 が 9 0 ° であるので、測定対象領域を通過する第 2 参照光 L 3 の光軸は 2 0 °

50

となっている。したがってこの第2参照光L3の方向の撮影では、1次屈折光が優勢であり、一点の輝点すなわち1次屈折光の輝点が観察される。

【0051】

第1,第2参照光L2,L3は、インラインホログラフィ光学系のオブジェクト光に相当する。それらの光は、粒子にシート状光が当たることによって生じた輝点または輝点对および粒子に平行光として入射し、ホログラムを生じさせる。L2は輝点对および粒子からのホログラム、L3は輝点および液滴のホログラムを発生させる効果をもつ。一般的なデジタルホログラフィでは、被写体を拡大または縮小させるためのレンズを介さずにホログラムが直接記録されるため、観察領域は使用したCCD素子のサイズによって決定される。第2実施例では、CCDカメラ20に、被写体を拡大または縮小させるためのレンズを装備し、局所的なホログラムを観察する機構を備えているので、観察領域をそのレンズで容易に変えることができる。

10

【0052】

また、第2実施例では、二方向に生じるホログラムを一台のカメラ20によって記録するので、図6に示すように、二方向のホログラムが同一画面に撮影される。二方向に生じるホログラムの分離を容易にするために、第1,第2参照光L2,L3の、計測対象領域からカメラ20に至る光路距離に差をつけている。該距離差が像の再生距離に反映し、得られたホログラムに、図6に示すように、サイズ差を生ずるので、各方向の粒子像の分離が容易である。

【0053】

20

輝点对から生じる干渉縞像の縞次数が粒径と比例する。本手法により得られるホログラムでは、拡大または縮小するためのレンズを用いているため光学的な性質から輝点对から生じる干渉縞が同時に撮影される。ゆえに既存の方法と同様に縞像の解析から粒径を得る。もしくは、ホログラムから得られた輝点对の再生像を適当な画像処理で抽出し、その像をさらにデフォーカス面に再生することで干渉縞像が得られる。したがって、上記の方法より径を評価することも可能である。

【0054】

3次元速度計測は3D-PTVに基づく処理を行い、物体の3次元位置を特定する。そこで物体と像面との幾何学的な関係を導く必要がある。一般的には校正板と呼ばれる間隔や位置が知られたドットまたはグリッドの描かれた板を測定領域に配置し、その校正板の画像から幾何学的な関係を導く方法が採られる。第2実施例の粒子計測装置でも同様な手順でカメラ校正を行うが、得られる校正板の画像は校正板のホログラムである。そこで第2実施例の粒子計測装置でも、同様なカメラ校正を実現させるため、オブジェクト光を透過させるガラス製の校正板を利用する。グリッドを描かれたガラス板をL2およびL3に対して45°に傾けた位置に配置し、そのガラス板を精密ステージにより奥行き方向に移動させ、適当な断面でホログラムを記録する。記録されたホログラムから像再生を行い、得られた校正板画像からカメラ校正を行う。

30

【0055】

図7に、第2実施例による粒子計測の概要を示す。これは、CCDカメラ20のCCD素子の撮像面に対して焦点をずらして、第1参照光L2経路の粒子撮影像に干渉縞20sf(図2)を表わすものである。「計測」の実行が入力されるとパソコン22は、短時間dt間隔の2回の撮影を、シーケンサ23に指示し、これに回答してシーケンサ23が、第1の撮影をレーザー装置10とカメラ20に指示し、そしてdt経過後に第2回の撮影を指示する。そしてカメラ20に、画像転送を指示する。カメラ20は、第1回撮影画像と第2回撮影画像を記憶媒体に記憶しており、画像転送指示に回答して第1回撮影画像と第2回撮影画像をパソコン22に転送する。パソコン22はそれらを内部メモリに格納する(ステップS1a)。

40

【0056】

ここで、カメラ20の第1回撮影画像(画面)にP1と、第2回撮影画像(画面)にP2と識別符号を与える。パソコン22は、画像処理(S2)によってコントラストの補正

50

及びノイズ除去を行ってから、粒子像を抽出する（S3）。そして、画面P1より第1参照光L2経路の粒子像と、第2参照光L3経路の粒子像とを分離してそれぞれを同一サイズに修正して別画面P11、P12として、同様に、画面P2より第1参照光L2経路の粒子像と、第2参照光L3経路の粒子像とを分離してそれぞれを同一サイズに修正して別画面P21、P22とする（S1b）。

【0057】

そして「粒径算出」（PDM）において、画面P11上の1つの粒子像の干渉縞数Nを算出して、（1）式に基づいて粒子直径Dpを算出して、P11画面をディスプレイに表示して該粒子像を4角枠で示して、算出した干渉縞数N、粒子直径Dpおよび（1）式のパラメータ値をディスプレイに表示する。ここでオペレータが表示画面上の「確認」ボタンをクリックすると、パソコン22は、内部メモリに設定した計測データテーブル（1メモリ領域）に、干渉縞数N、粒子直径Dpおよび（1）式のパラメータ値を格納する。オペレータが「確認」ではなく、P11上の特定領域を枠指定し、その中の粒子像内の縞数Npを入力し、又は、表示中の干渉縞数NをNpに変更し、および/又は表示中のパラメータ値を変更して、「再実行ボタン」をクリックするとパソコン22は、入力値と（1）式に基づいて粒子直径Dpを再度算出してパラメータ値とともにディスプレイに表示する。そして「3次元速度の算出」（3DVM）を実行する。

【0058】

「3次元速度の算出」（3DVM）では、まず始めに、デジタルホログラフィによってP11、P12画面上の干渉縞像から1次屈折光の輝点像を再構築し（S31a）、再構築した画面に対して粒子マスク相関法を適用し1次屈折光の輝点像を検出する（S32a）。撮影画面P21およびP22には、L3の受光角が70°ではなく、20度であるので、もともと1次屈折光の輝点像がある。次に、第1時刻（第1回撮影）の画面P11、P12上で検出した各粒子に対して、第2時刻（第2回撮影）の画面P21、P22上に設定した探查領域から輝点像の粒子情報を基に対応粒子を決定する（S33、S34）。以後の処理は、図4に示した第1実施例の処理と同様である。

【実施例3】

【0059】

図8に、本発明の第3実施例の構成を示す。この第3実施例は、第2実施例のインラインの第1、第2参照光L2、L3を省略して、オフ軸シスの参照光L2を、ビームスプリッタM7で、2方向の粒子計測光L2mおよびL3mに合成してカメラ20に入射するようにしたものである。第2実施例と同様に、粒子計測光L2mは、シート状光L1sの光軸に対して $\theta = 70^\circ$ であるので、干渉縞情報（20sf：図2）を含む。第3実施例でも、第2実施例と同様に、シート状光L1sの光軸と、それに対して $\theta$ の角度をなしてミラーM4に入射するレーザ光L2と、ミラーM6に入射するレーザ光L3とは、同一平面上にある。ステレオ角 $\phi$ は、 $90^\circ$ である。粒子計測光L3mは、シート状光L1sの光軸に対して $20^\circ$ の角度であるので、粒子の1次屈折光が優勢であり、干渉縞情報は少ない。ステレオ角 $\phi$ は、 $90^\circ$ である。

【0060】

第3実施例による粒子計測の内容は、図7に示す第2実施例のものと同様である。この第3実施例では、参照光L2が測定対象領域を通過しないので粒子情報（カメラ20に対してはノイズ）を含まない。これにより、第1、第2実施例よりもノイズが少ない粒子画像が得られ、粒子抽出を容易に行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【0061】

【図1】本発明の第1実施例の装置構成を示すブロック図である。

【図2】図1に示すノズルNZ直下の計測対象領域の粒子Dropletとカメラ20の撮像面との間のレーザ光路を模式的に示す縦断面図である。

【図3】水滴粒子を撮影する散乱角 $\theta$ と水滴粒子の0次反射光輝度および1次屈折光輝度との関係を示すグラフである。

10

20

30

40

50

【図4】図1に示すパソコン22の、それにインストールされた粒子計測アプリケーションにより実行する粒子計測の処理概要を示すフローチャートである。

【図5】本発明の第2実施例の装置構成を示すブロック図である。

【図6】図5に示すCCDカメラ20で撮影した粒子画像の一例を示す写真の複製である。

【図7】図5に示すパソコン22の、それにインストールされた粒子計測アプリケーションにより実行する粒子計測の処理概要を示すフローチャートである。

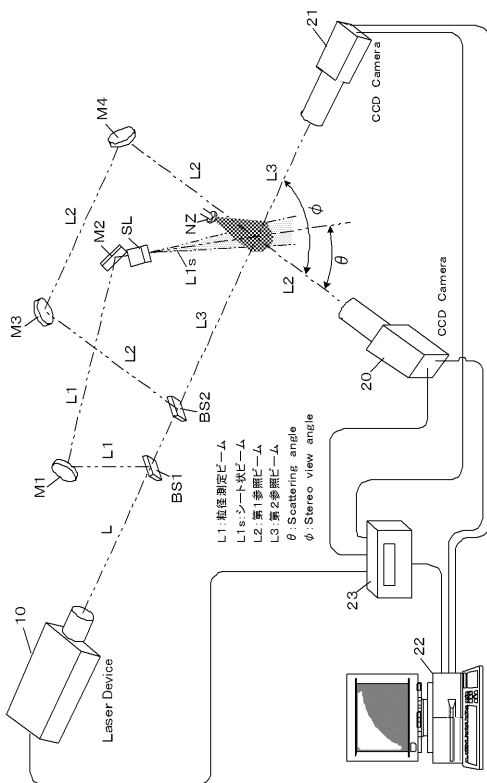
【図8】本発明の第3実施例の装置構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

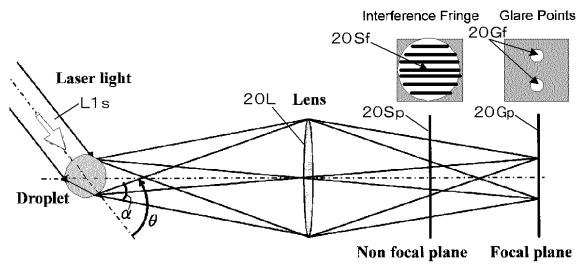
【0062】

- 10：レーザ装置
- 20, 21：CCDカメラ
- 22：パソコン
- 23：シーケンサ
- B1～B4：ビームスプリッタ
- M1～M7：ミラー
- SL：シート状光への変換レンズ
- NZ：水滴粒子噴霧ノズル

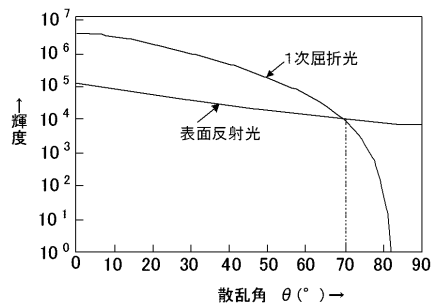
【図1】



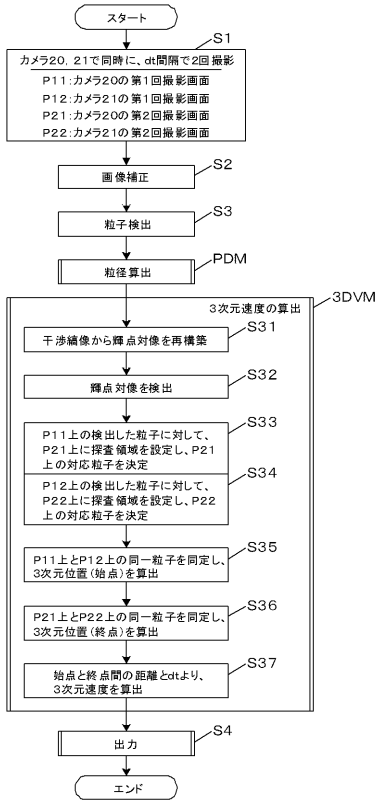
【図2】



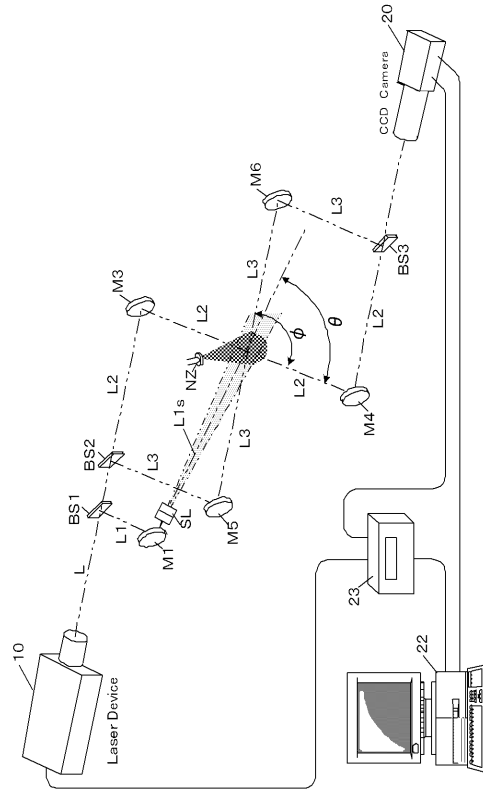
【図3】



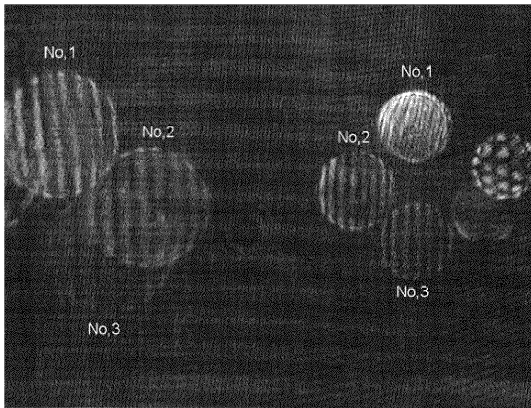
【図4】



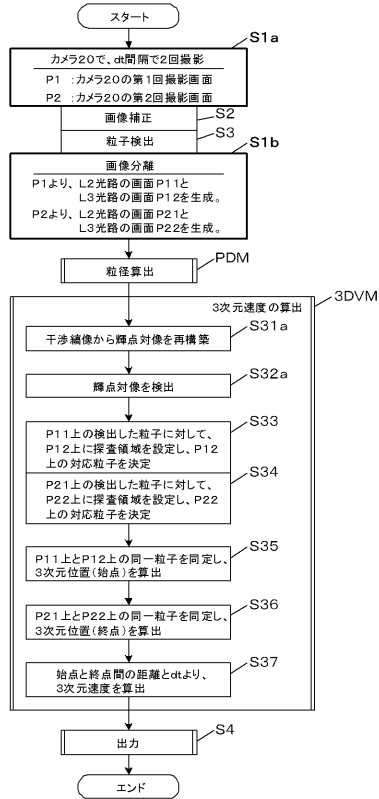
【図5】



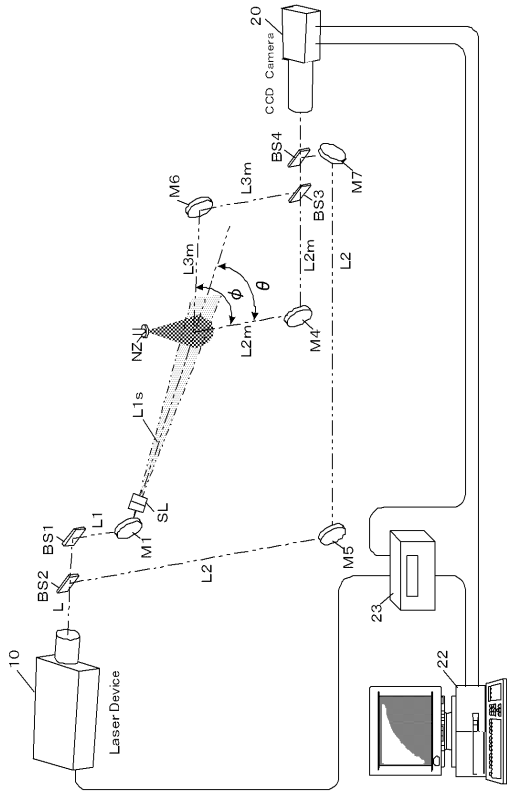
【図6】



【図7】



【 8 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 座間 淑夫

埼玉県さいたま市桜区下大久保255 国立大学法人 埼玉大学内

審査官 清藤 弘晃

(56)参考文献 特開2004-361291(JP,A)

特開2000-162119(JP,A)

特開2003-307484(JP,A)

特開昭61-112946(JP,A)

川橋 正昭 外3名, 旋回噴霧における液滴径及び速度三成分の同時計測, 埼玉大学地域共同研究センター紀要, 埼玉大学地域共同研究センター, 2004年, vol.4(2003.), p.32-37

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B11/00-11/30

G01P 3/36