

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560190

研究課題名(和文) 粒子の非球形性が光学粒子計測に及ぼす影響の計算電磁気学からの検討

研究課題名(英文) Examination based on computational electromagnetics about the effect of particle deformation to non-spherical shape on the optical particle measurements

研究代表者

岡本 達幸 (OKAMOTO TATSUYUKI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：40127204

研究成果の概要(和文)：粒子形状が真球形から回転楕円体形状になったことが光学粒子計測に及ぼす影響を計算電磁気学的手法を用いて検討した。位相ドップラー法については、アスペクト比と計測誤差範囲との関係や、計測誤差が小さくなるセンサー設置位置を検討した。フラウンホーファー回折法については、同一サイズの粒子が種々の姿勢をとることによって現れる見かけ上の粒度分布が、対数正規分布に近いことと、光学等価径は平均投影面積等価径に近いことを見出した。また、計算電磁気学手法の利点を利用して多重散乱の問題についても検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Examination about the effect of particle deformation from a true sphere to an ellipsoid on the optical particle measurement technique was carried out based on the method of computational electromagnetics. In case of the phase-Doppler technique, relation between the posture of an ellipsoidal transparent droplet and the measurement error and the optimal position of sensor for suppressing measurement error was examined. In case of Fraunhofer diffraction method, imaginary size dispersion which appears even if the particles are mono-disperse resembles log-normal distribution. And, it was revealed that so-called optical equivalent diameter is near to the diameter corresponding to averaged area of orthogonal projection. Furthermore, problems in relation to multiple scattering were examined using the merit of computational electromagnetics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 熱工学

キーワード：熱工学、計測工学、光学粒子計測、非球形粒子、計算電磁気学

## 1. 研究開始当初の背景

1980年代には液滴の大きさと飛行速度を

同時に光学計測できるという位相ドップラー法の概念が提唱された。今日では位相ドッ

プレー粒子解析システム(PDPA)としてかなりの普及を見ており、噴霧流研究のための有力なツールとなっている。

この計測手法は、真球液滴によって受光窓面上に形成される干涉縞の間隔が液滴径に反比例することを利用している。しかし、液滴が真球形でない場合には、既存の散乱理論は役に立たず、干涉縞の様相を理論予測することはできなかった。そのため、PDPAでは液滴の真球形からの変形がどの程度まで許容されるのか、また、非球形液滴に対して信号処理が滴径を出力するとしても、滴の姿勢によって評価径がどの程度ばらつくのかというような疑問については、PDPAが世に出ておよそ20年も未解明のままとなっていた。

光学粒子計測機器としてPDPA以上に普及しているものに、フラウンホーファー回折を利用して、粒子群の粒度分布を短時間で計測できるシステムがある。このシステムでは、1個の真球粒子大きさと回折強度パターンとの関係は既知であることを利用して、どのような粒度分布であれば観測された回折強度パターンになるかという逆問題を解く。

固体である粉体粒子は球形であることのほうが稀であるが、この手法では、粒子が著しく非球形であろうとも、球形粒子の集団として何らかの粒度分布が算出される。この場合の球形粒子としての径のことを光学等価径と呼ぶ。また、形状・サイズが完全に揃った粒子群であっても、非球形粒子の場合には光路上で様々な姿勢をとるため、フラウンホーファー回折法では粒度分布に広がりがあるように判定されるはずである。光学等価径の意味や見かけ上現れる粒度分布の広がりについては、本研究の開始当初においても未解明なままであった。

## 2. 研究の目的

本研究では、代表的な光学粒子計測手法であるPDPAとフラウンホーファー回折法を採り上げ、粒子の非球形性が測定結果に及ぼす影響の一端を明らかにすることを目的とする。

(1) PDPAは液滴の径と飛行速度を同時に測定できることが特徴となっている光学計測手法であるが、本研究では滴径の測定に及ぼす影響に絞って研究を進める。非球形で不規則な形状といえ、その形状の種類にはキリがないが、ここでは、液滴が自転したときに現れる回転楕円体形状と、真球形の表面に帯状の波打ちが現れた場合について検討を行う。

(2) フラウンホーファー回折法に関しては、本来は種々の粒度の粒子が混在する粒子群の粒度分布を計測するための方法であるが、本研究では、まずは全く同一サイズ、同一形状の粒子が色々な姿勢で光路上にあるとし

て検討を行う。姿勢によってセンサー上の回折パターンが異なるので粒度分布があるように見なされるはずである。サイズや形状が見かけ上の粒度分布の広がりや光学等価径にどのように影響するか検討する。

## 3. 研究の方法

位相ドップラー法とフラウンホーファー回折法は代表的な光学粒子計測手法でありながら、粒子が非球形になると何を測っているのか分からないという状況が続いてきたのは、ミー散乱理論が真球か無限円柱しか取り扱えず、非球形粒子による光の散乱について、理論的検討の手段がなかったからである。

それに対して、電波領域ではMaxwellの電磁方程式を数値解析で解いて電磁場の様子を求める計算電磁気学の手法が近年盛んに利用されるようになってきた。中でもFDTDと呼ばれる手法は、電磁方程式に何らの変換も加えずにそのまま差分化するため、散乱体の形状に関して原理上の制約がないという利点がある。

この計算電磁気学を従来の定容範囲から見れば異分野である粒子による光散乱へ適用し、粒子の非球形性が光学粒子計測に及ぼす影響を検討するための手段にするというのが、本課題における研究方法であり、国内外ともに他では全く見られない研究方法である。

## 4. 研究成果

### (1) 回転楕円体への変形のPDPAへの影響

PDPAを構成するレーザービームと受光窓の位置関係ならびに使用する座標系を図1に示す。2本のレーザービームは鉛直面であるX-Z面内で交差し、水平軸であるX軸がビーム進行方向の角二等分線になっているとする。すなわち、X軸はPDPAシステム全体の光軸である。図1にはPDPAに最低限必要な2つの受光窓(受光窓IとII)を窓間距離Sにおいて、ビーム交差点を通る水平面であるX-Y面を挟んで対称に配置した状況を示している。図中で、原点から2つの受光窓の中心を結ぶ線分がX-Y面と交わる点に向かって直線が引いてあるが、この直線がX軸の正方向

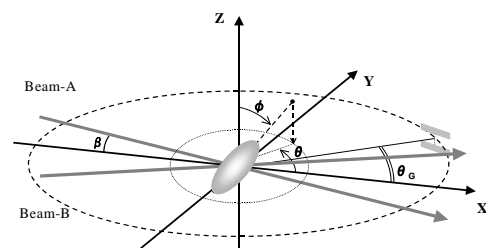


図1 PDPAにおける各種設定

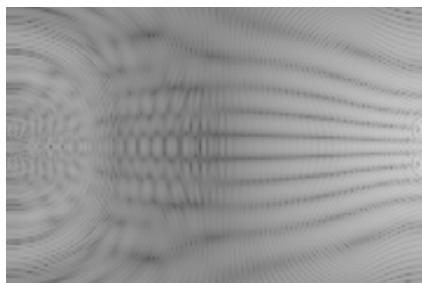
となす角  $\theta_G$  を睨み角と呼ぶ。

光源は波長 632.8 nm の He-Ne レーザー、ビーム交差半角  $\beta$  は  $7.59^\circ$  (ビーム間隔 80 mm, 焦点距離 300 mm に対応) で、偏光面 (電場の振動面) は 2 本のビームを含む平面 (X-Z 面) に垂直であるとした。ビーム交差域から受光窓面までの距離は 300 mm, 受光窓のサイズは 4 mm (H)  $\times$  20 mm (W), 2 個の受光窓の中心点間隔は  $S=8$  mm とした。また、測定対象液滴は空気中の水滴であり、空気に対する相対屈折率は  $m=1.332$  であるとした。さらに、水滴は一樣強度のレーザービームを照射を受けていると仮定し、かつ、飛行中に姿勢を変えないと仮定した。

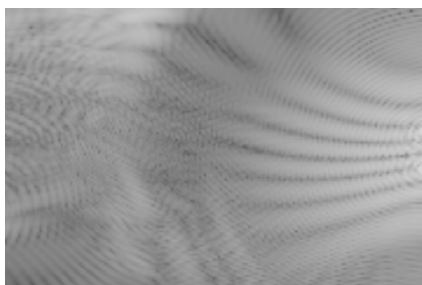
① 回転楕円体形水滴での測定可能性の検討

2 本のレーザービームの交差領域 (図 1 参照) 中に真球形の水滴がある場合と、ラグビーボール状の回転楕円体形水滴が z 軸に対して傾いている場合について、周囲の空間に形成される干涉縞 FDTD 法で数値予測した結果をそれぞれ図 2 (a), (b) に示す。尚、回転楕円体形水滴の姿勢については、長径と z 軸となす角  $\phi$  (天頂角) と、長軸を X-Y 面に正射影した線と X 軸となす角  $\theta$  (方位角) で定義する。

水滴が真球形である場合には、右半部には上下対称でほぼ直線状の干涉縞が形成されている。一方、水滴が回転楕円体形である場合には、右半部の干涉縞が反り曲がり、上下



(a) 真球形水滴の場合  
(直径 26.65 $\mu$ m)



(b) 回転楕円体形水滴の場合  
(長径 26.65 $\mu$ m, 短径 17.1 $\mu$ m)  
[  $\theta=37.38^\circ$   $\phi=36.0^\circ$  ]

図 2 PDPA 周囲空間の干涉縞

方向の中央部でも水平線に対して傾いていることが見て取れるが、干涉縞は明瞭で整っている。PDPA に関しては、はっきりした根拠なしに、非球形粒子になると粒径の測定はできないといわれているが、表面が滑らかであれば、PDPA の信号処理器は位相差を検出できるものと考えられる。

② 水滴の姿勢が滴径測定に及ぼす影響

受光窓の睨み角  $\theta_G$  を  $30^\circ$  に保ち、かつ、水滴に姿勢のうち天頂角を  $37.38^\circ$  で一定に保って、方位角を変化させたときに、図 1 の受光窓間で検出されるドップラー信号の位相がどのように変わるかを示したのが図 3 である。水滴のアスペクト比も変化させているが長半径は一定に保っている。右側の軸は真球形水滴であることを前提にして、位相差を滴直径に換算したものである。この場合、水滴の方位角は PDPA での評価径に著しい影響は及ぼしていない。また、滴のアスペクト比に関わらず、評価径はほぼ長直径に近く、アスペクト比が大きいと方位角の違いで評価径のばらつきが大きくなるという傾向は認められない。

次に、水滴のアスペクト比を 2.0 とし、長直径を 26.65 $\mu$ m で一定に保ち、方位角を  $36^\circ$

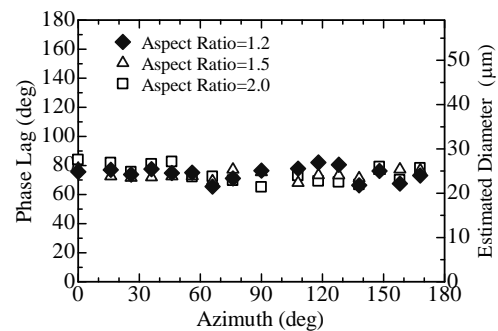


図 3 水滴の姿勢 (方位角) の影響  
(長径 26.65 $\mu$ m,  $\theta=37.38^\circ$ ,  $\theta_G=30^\circ$ )

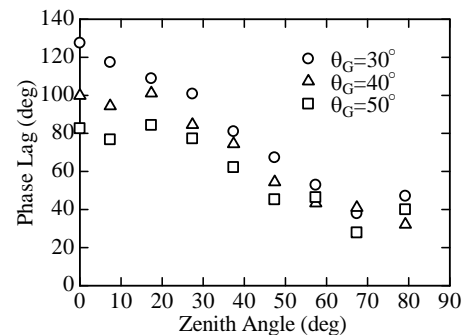


図 4 水滴の姿勢 (天頂角) の影響  
(長径 26.65mm, 短径 13.33mm,  $\phi=36^\circ$ )

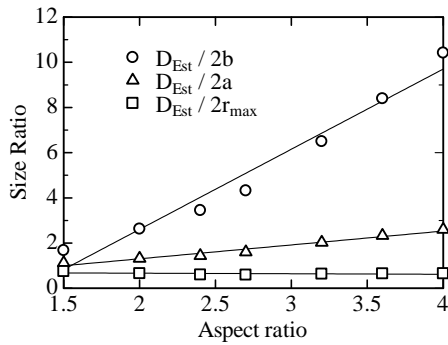


図5 評価径と水滴代表径の比率

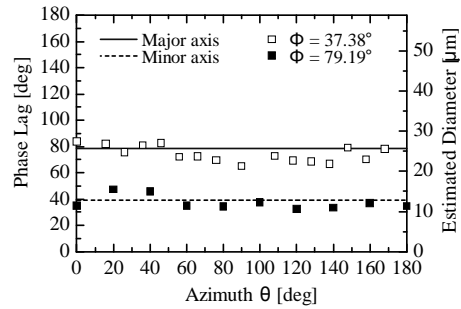
で一定に保ったまま、天頂角を変えて評価した結果を図4に示す。睨み角も3種類にわたって変化させた。どの睨み角においても、天頂角が $0^\circ$ から $80^\circ$ に向かって大きくなるにつれて、ドップラー信号の位相差が小さくなる傾向を示している。このことは、水滴が天頂角 $0^\circ$ の姿勢をとるときに、即ち、図1でいえば直立姿勢をとるときにPDPAによる滴径評価は最も大きくなり、寝転んだ姿勢に近づくほど評価径は小さくなる。

図5はその天頂角 $0^\circ$ の姿勢を保ったまま、回転楕円体である水滴のアスペクト比を変えた場合に、観測径と3種の代表寸法（長径 $=2a$ 、短径 $=2b$ 、最大曲率半径の2倍 $=2r_{\max}$ ）との比がどのように変化するかを示したものである。アスペクト比が大きくなっても観測径と最大曲率半径との比の変化は小さく、この姿勢での観測径は最大曲率半径と強い関係を有することが分かる。このことは水滴の大きさに関わらずいえるはずである。

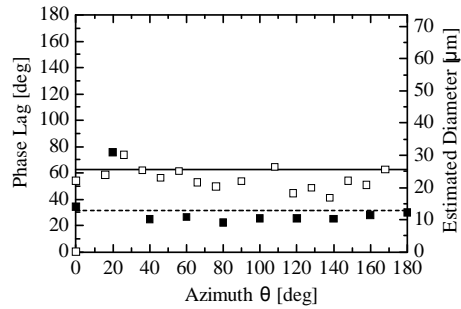
(2) 評価径の揺らぎとPDPA睨み角の関係  
方位角の変化が評価径に及ぼす影響は比較的小さいという図2での知見は、特定の睨み角に対する結果である。そこで、睨み角6方向、回転楕円体のアスペクト比3段階の組み合わせにおいて、2段階の天頂角で、方位角を小刻みに変化させて、受光窓間での位相差を調べた。その内、アスペクト比を.20とした場合の結果の一部を図6に示す。図中の2本の水平線のうち、実線は楕円体の長直径、破線は短直径を表している。

図6のうち、睨み角 $\theta_G=30^\circ$ の場合の位相差の揺らぎを見ると、天頂角 $\phi=37.38^\circ$ の時には長直径近辺で、 $\phi=89.19^\circ$ の時には短直径近辺で揺らいでいるが、揺らぎの程度は比較的小さく、両天頂角での揺らぎの範囲ははっきり分かれている。しかし、いずれの天頂角においても、 $\theta_G$ が大きいくほど揺らぎは大きくなり、 $\theta_G=70^\circ$ の場合には両天頂角での揺らぎはほとんどオーバーラップしてしまう。

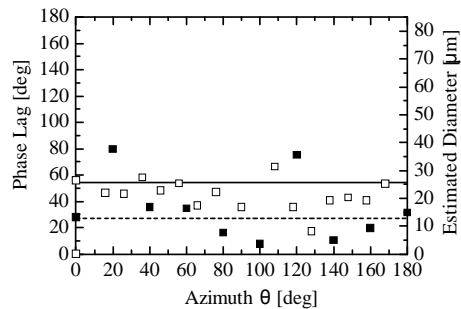
図6に示さなかった条件も含めて、方位角を



(a)  $\theta_G = 30^\circ$



(b)  $\theta_G = 50^\circ$



(c)  $\theta_G = 70^\circ$

図6 睨み角が評価径揺らぎに及ぼす影響

変えたことによる評価径の揺らぎの標準偏差を調べると、同一アスペクト比で睨み角を変化させた場合には、天頂角に係わらず、 $\theta_G=20^\circ \sim 30^\circ$ の場合の標準偏差が $\theta_G=50^\circ \sim 70^\circ$ の場合の標準偏差を上回ることはない。従って、水滴の姿勢のうち方位角の違いによる評価径の揺らぎを抑制するという観点では、睨み角は小さめにする方が良いといえる。

### (3) PDPA 評価径の最大・最小値

図7はアスペクト比1.2の回転楕円体形水滴のPDPAでの評価径と長径、短径、最大・最小曲率半径の2倍の値との関係を示している。アスペクト比が1.5、2.0の場合にも、最大曲率半径の2倍を上回る、あるいは、最小曲率半径の2倍を下回る評価径が現れたことはなく、中間のアスペクト比でもこの範囲をはみ出すことはないものと推測される。

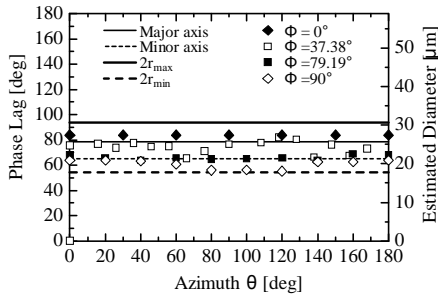


図7 PDPA 評価径の揺らぎの範囲

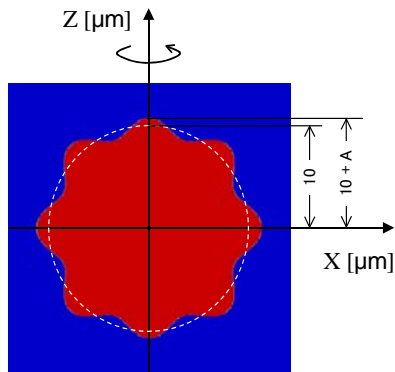
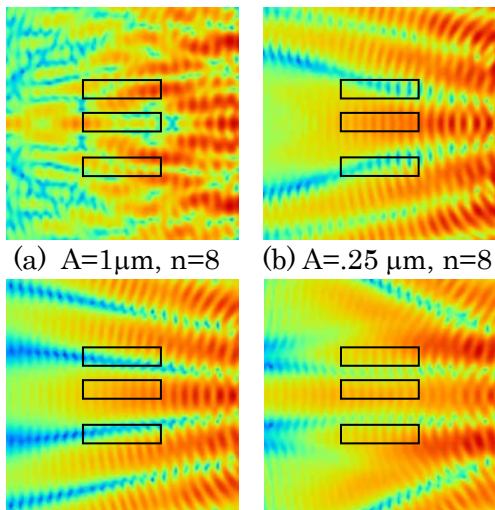


図8 表面に波打ちを有する水滴の断面形状



(c)  $A=0.06 \mu\text{m}$ ,  $n=8$  (d)  $A=0.125 \mu\text{m}$ ,  $n=10$

図9 受光窓近傍の干渉縞

(4) 水滴表面の波打ちのPDPAへの影響

図8は半径  $10\mu\text{m}$  の真球形を基本にして、その表面に帯状の凹凸がある回転体をした水滴の断面形状を示している。波打ちの振幅を  $A$ 、波打ちの回数を  $n$  とする。

図9は受光窓近傍の干渉縞の様子を FDTD 法で数値予測した結果である。波打ちの回数

を 8 回に固定した(a)から(c)のうち、(a)と(b)の場合は位相差比のチェックを通過できず適径は測定不能と判定された。  $n=8$  で適径測定可能と判定されたのは、波打ちの振幅  $A=0.2\mu\text{m}$  以下の時だけであった。また、波打ちの振幅は  $0.125\mu\text{m}$  でも、  $n=10$  である(d)の場合には測定不能と判定された。

表1は  $n=8$  に固定し、波打ちの振幅を変えた場合の評価径を示したものである。表からは、波打ちの振幅が大きいほど評価径が小さくなる傾向がみられる。睨み角はどちらが好ましいとはいえない。ただ、一応、評価径は得られるのではあるが、  $A$  がベースの真球の半径の1%にすぎない場合でも、評価径の球径に対する相対誤差は20%にも達しており、PDPAは液滴表面の波打ちには極めて弱いといえる。

表1 表面に波打ちを有する水滴の評価径

$A$ [ $\mu\text{m}$ ]	$D_{\text{est}}$ [ $\mu\text{m}$ ] ( $\theta_G=20^\circ$ )	$D_{\text{est}}$ [ $\mu\text{m}$ ] ( $\theta_G=30^\circ$ )
0.0	19.78	19.51
0.05	17.86	17.55
0.1	15.97	16.16
0.2	11.81	13.79

(5) フラウンホーファー回折法への影響

図10は回転楕円体形的水滴による回折像を FDTD 法で数値予測した結果である。左はある特性の姿勢の場合、右は同じ水滴が種々の姿勢をとった場合を平均したものである。

右の回折像を粒度分布に変換してみると、同一形状の適しかなのに、分布に広がりが見られる。回転楕円体形水滴のアスペクト比が大きいほど、予想通りに分布の広がり大きい。また、見かけの粒度分布はほぼ対数正規分布となることが分かった。

図11は元々対数正規形の粒度分布を持

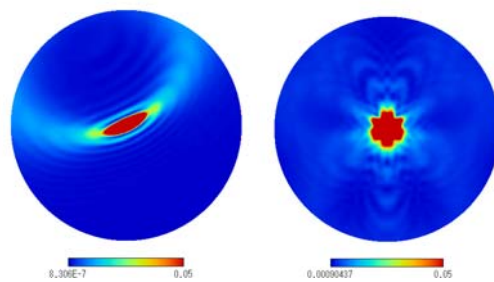


図10 回転楕円体形水滴による回折像

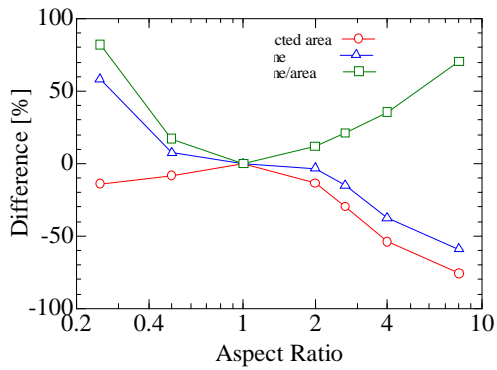


図 1 1 回帰粒度分布から求めた各種平均径と真値との比

つ回転楕円体形の水滴群の各適が種々の姿勢をとることを考慮して、FDTD 法で回折像を数値予測し、そこからフ라운ホーファー回折法の手法で回帰粒度分布を求め、さらにそこから求めた各種平均径（光学等価径）とその真値との比を示したものである。

青は体積平均径、赤は投影面積平均径、緑はザウター平均径である。

#### (6) 高数密度粒子群の実効散乱係数

FDTD 法は激しい多重散乱がある場合も取り扱える特長を利用して、高数密度散乱体群の実効散乱係数の評価を行い、横軸に散乱幅と数密度の積をとって整理すれば、図 1 2 のようにほぼ一本の曲線で表現できることを見いだした。

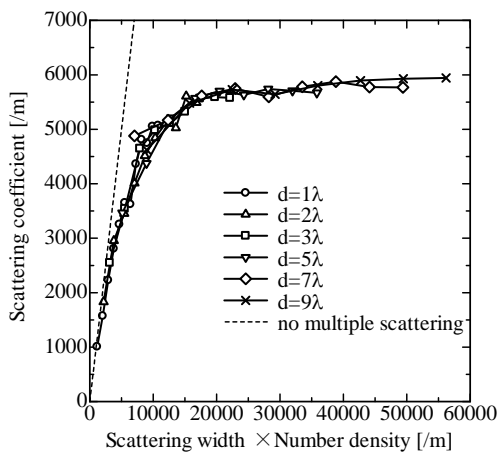


図 1 2 種々の散乱体径における実効散乱係数

#### 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)

[学会発表] (計 7 件)

① 岡本達幸, 米山慎吾, 齋藤大介, 液滴表面の波打ちが PDPA での滴径計測の可能性に及ぼす影響の計算電磁気学による検討, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 3 日, 福岡市.

② 小西健也, 岡本達幸, 強い多重散乱効果を伴う高数密度散乱体群による輻射エネルギーの散乱特性に関する研究, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 3 日, 福岡市.

③ 齋藤大介, 岡本達幸, 非球形液滴の姿勢による PDPA 粒径測定揺らぎと睨み角の関係, 第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 4 日, 札幌市.

④ 岡本達幸, 名塩博史, 計算電磁気学から求めた粒子群中の電磁場から輻射強度を求める方法と多重散乱を伴う輻射伝熱問題への応用, 第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 2 日, 札幌市.

⑤ 浦田裕介, 岡本達幸, 齋藤大介, 多重散乱がフ라운ホーファー回折法による光学粒度分布計測に及ぼす影響の計算電磁気学による検討, 第 46 回日本伝熱シンポジウム, 2009 年 6 月 4 日, 京都市.

⑥ 岡本達幸, 名塩博史, 強い多重散乱効果を伴う粒子群中の輻射伝熱問題への計算電磁気学からのアプローチ, 第 46 回日本年熱シンポジウム, 2009 年 6 月 3 日, 京都市.

⑦ 岡本達幸, 山口明大, 齋藤大介, 噴霧液滴の変形が PDPA による滴径計測に及ぼす影響の計算電磁気学による検討, 第 46 回燃焼シンポジウム, 2008 年 12 月 3 日, 京都市.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岡本 達幸 (OKAMOTO TATSUYUKI)  
京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授  
研究者番号: 40127204

##### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号: