レーザー回折・散乱法における入力光学特性値が 粒子径分布測定結果に及ぼす影響

早 川 修*, 安 田 佳 弘**
内 藤 牧 男*, 椿 淳 一 郎***

The Effect of the Refractive Index Input Value on Particle Size Distribution Measured by the Laser Diffraction & Scattering Method

by

Osamu HAYAKAWA[†], Yoshihiro YASUDA^{††},

Makio NAITO[†] and TSUBAKI JunIchiro^{†††}

A method for estimating the optimum refractive index input value was established to decrease the scattering of the measured results that come with different equipment using the laser diffraction and scattering method.

The effect of the imaginary part of the refractive index input value in this estimation method was discussed with copper as the absorbing material and polystyrene, alumina as the non-absorbing material, respectively. For the copper powders which have a large value in the imaginary part, the scattering of the results was decreased with the optimum refractive index input value which is obtained when considering both the real and imaginary parts in this estimation method. For polystyrene and alumina powders which have a small value in their imaginary part, the optimum refractive index input value was obtained when the imaginary part was 0.

On the other hand, the estimation method consists of some problems when measuring a bimodal sample. The validity of this estimation method was discussed for the bimodal sample of mono dispersed silica.

Key Words : Particle Size Analysis, Laser Diffraction & Scattering,
Refractive Index, Imaginary Part, Bimodal Sample

1. 緒 言

ファインセラミックスをはじめとする、サブマイクロン粒子の粒子径分布測定装置の主流となっているレー

ザー回折・散乱法は、測定の際、粒子屈折率を光学特性値として装置に入力する必要がある。そのため本測定法では、これまで粒子屈折率未知の試料では正しい測定ができなかった。また粒子屈折率が既知であって

1995年 3月 14日受付
化学工学会第27回秋季大会(1994年 9月, 春日井)にて発表

* (財)ファインセラミックスセンター試験研究所

(〒456 名古屋市熱田区六野2丁目 4-1)

TEL. 052-871-3500

** 兼房(株)(〒480-01 愛知県丹羽郡大口町中小口1丁目1)

TEL. 0587-95-2821

*** 名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)TEL. 052-789-5030

† Japan Fine Ceramics Center, Res. and Development
Lab.(2-4-1 Mutsuno, Atsuta-ku, Nagoya 456)

†† KANEFUSA Corp.(1-1 Nakakoguchi, Ohguchi-cho,
Niwa-gun, Aichi 480-01)

††† Dept. of Micro-system Eng., Grad. School of Nagoya
Univ.(Furo-cho, Chikusa-ku Nagoya 464-01)

も、妥当な結果が得られないことがあり、しかも複数の機種で得られた分布を比較した場合、必ずしも結果が一致しないという問題点があった。著者らは前報¹⁾にて、このようなレーザー回折・散乱法の問題点を解決する最適入力光学特性値の推定法について報告した。本推定法で得られた最適値を用いると、ファインセラミックス粒子の場合には屈折率未知試料の測定が可能となり、機種間の整合性および測定結果の確度が向上した。

ところでレーザー回折・散乱法で光学特性値として入力する粒子屈折率は、光の屈折を表わす実数部と、消衰を表わす虚数部からなる。屈折率虚数部は物質の電気伝導率に関係し²⁾、一般にバルク体の場合、金属では大きい値を、またファインセラミックスのような非金属物質では 10^{-4} 程度の0に近い非常に小さな値を持つと言われる³⁾。前報¹⁾ではファインセラミックス粒子のみを対象としたため、虚数部に関しては0として扱い、実数部のみを対象として最適入力光学特性値を推定した。しかしながら、レーザー回折・散乱法で測定対象となる粒子の種類は様々である。例えば金属粒子の測定においては、屈折率虚数部の影響が無視できないと思われる。更に実際の粒子では、消衰係数が表面性状の影響等によりバルク体より大きくなるという報告⁴⁾もある。このため非金属物質といえども、虚数部に0.1程度の値の入力を推奨する装置もあるが、虚数部の入力値が定量的に議論された例は見当たらない。屈折率虚数部の値は、文献にも限られたものしか載っておらず、その取扱いには未だ不明な点が多い。そのため現在市販されている装置の半数以上にあたる8機種で、光学特性値の虚数部に値を入力できるようになっているが、実際には入力値を決めかねているのが現状である。

そこで本報では、ファインセラミックス粒子とは光学的特性が異なる金属粒子を用い、前報で提案した最適入力光学特性値の推定法を実数部に加えて虚数部にも適用することにより、機種間の整合性がどの程度向上するか検討を行った。加えて金属とは材質が異なり、屈折率虚数部の値が非常に小さいといわれる樹脂粒子、および前報では実数部だけの検討に留まっていたファインセラミックス粒子に対しても、実数部に加え屈折率虚数部の影響について検討を行った。

更に、レーザー回折・散乱法ではバイモーダル試料を測定した場合、一般にバイモーダル性が現われにくい等といった問題点がある。前報¹⁾では単一分布の試料のみを用いたため、測定に高い分解能が要求される

バイモーダルの分布を持つ試料に対しては、本推定法の有効性は未だ明らかになっていない。そこで本研究では、バイモーダル試料に対しても本推定法が正確なバイモーダル性を得る上で効果があるか若干の検討を行った。

2. 実験試料、装置および試料調製法

試料には、ファインセラミックス粒子と光学的特性の異なる銅粒子に加え、ポリスチレンラテックス粒子およびアルミナ粒子を用いた。またバイモーダル試料に対する本推定法の有効性を検討するため、公称粒子径が0.95と3.20 μm の単分散シリカ粒子を重量比で6対4に混合したものも用いた。**Table 1**に、これら試料の50%径(銅粒子の場合は粒子径範囲)と粒子屈折率を示す。なおここで示した50%径および粒子径範囲は、カタログ値である。以下の報告では、試料名をTable 1の略号にて示す。

実験に用いたレーザー回折・散乱法粒子径分布測定装置は、国内製2機種(以下装置A、装置Bと表示)と、国外製2機種(以下装置C、装置Dと表示)の計4機種である。装置入力光学特性値は、粒子屈折率に対応し実数部と虚数部から成っており、何れの装置も入力光学特性値の実数部は可変である。一方虚数部は、装置B、Dがあらかじめ0に固定されているが、装置A、Cは可変である。また前報と同様に測定結果の確からしさを検証するため、試料の光学的特性の影響を受けず、かつ単分散粒子の測定に対し精度の高い電氣的検知帯法

Table 1 Sample properties

Sample		Particle size* (catalog value) (μm)	Refractive index (wavelength(nm)) (-)
Alumina	AL-1	3.0	1.76(589) ⁵⁾ 1.73(588)**
	AL-2	1.8	
	AL-3	0.6	
Copper	CO-1	4~8	0.27-3.24i(620) ⁵⁾
	CO-2	0.8~1.5	
	CO-3	0.3~0.5	
Polystyrene	PO-1	1.09	1.59(-) ⁶⁾
	PO-2	0.778	
	PO-3	0.605	
Mono dispersed silica	SI-1	0.95	1.45(588)**
	SI-2	3.20	

*: Particle range of coppers and 50% diameter in other samples are shown in the catalog.

** : Measured value by liquid immersion method.

による測定も行った。

粒子径分布測定の際の分散媒には、ヘキサメタリン酸ナトリウム500ppm蒸留水溶液を用いた。但し銅粒子CO-1、CO-2を測定する場合のみ、測定時に粒子の沈降を防止するためエチレングリコールを用いた。そのため光学特性値を装置に入力する際には、粒子の屈折率だけでなく、各々の媒液の屈折率(蒸留水：1.33⁵⁾、エチレングリコール：1.43⁵⁾)も考慮した。試料は、出力300Wの超音波発振子を用いて分散し、最も細かい粒子径分布が得られる時間まで超音波を照射した。濃度が数百ppmの懸濁液を機種ごとに調製した後、これを装置適正濃度になるまで希釈槽に滴下し、粒子径分布を測定した。なお入力光学特性値を変化させ、粒子径分布を求める際には、希釈懸濁液の入れ替えは行わず、同じ懸濁液を用い測定を行った。何れの試料も調製後の懸濁液は安定で、凝集による粒子径分布の経時変化は認められなかった。

3. 実験結果および考察

3.1 入力光学特性値推定結果

3.1.1 金属粒子の場合

粒子屈折率の虚数部が大きい試料の例として、銅粉を測定した結果をFig. 1示す。ここでは銅粉(CO-2)の結果を一例として示す。銅の屈折率(0.27-3.24i)⁵⁾は、実数部、虚数部ともに今回の実験に用いた粒子径分布測定装置において入力可能な光学特性値の範囲外にあるため、ここでは実数部、虚数部ともに銅の屈折率に最も近い値を入力し粒子径分布を得た。Fig. 1より粒子径が約2 μ m以上の領域では、機種間のばらつきは比較的小さいが、これ以下の領域では機種間の整合性が悪いことが分かる。次に前報¹⁾で提案した最適入力光学特性値の推定法により、入力光学特性値の実数

Fig. 1 Comparison of particle size distributions of copper which were measured by using the closest value to the described refractive index on the handbook

部の最適値を求めた結果を示す。その前に本推定法¹⁾を簡単に説明しておく。まず入力光学特性値の虚数部を0に固定し、同一懸濁液に対して実数部を種々変化させて、粒子径分布を算出する。次に積算質量代表径(ここでは10%径)と入力光学特性値との関係をプロットし、10%径が最大となる光学特性値を選ぶ。それが本推定法における最適入力光学特性値となる。ここで10%径を採用した理由は、入力光学特性値の変化に対する粒子径分布の変動が分布の微小粒子径側で現れやすく、変動を検出しやすいためである。Fig. 2は装置Cにおいて、虚数部を0に固定した場合の10%径と入力光学特性値との関係をみたものであるが、入力光学特性値が1.57で10%径が最大となった。Fig. 3は、本推定法に基づき10%径が最大値を示す入力光学特性値で得た粒子径分布を各装置で比較した結果である。装置A、B、Dにおいては、Fig. 1で見られた微小粒子側の出力が消失し、全粒子径範囲にわたり装置間の整合性が向上した。装置Cにおいても本推定法で求めた最

Fig. 2 Changes of 10% diameter by the difference of refractive index input value. The maximum value was indicated at 1.57

Fig. 3 Comparison of particle size distributions which were measured by the optimum input values of refractive index. The optimum values were estimated by fixing the imaginary part at 0

Fig. 4 Improvement of an agreement among four equipments. The optimum input values of refractive index of equipment A and C were estimated by changing both real and imaginary part

適値を用と、分布の微小粒子径側では他の装置との整合性が向上したが、分布の大粒子径側では二峰性を示すようになりFig. 1の結果に比べ装置間のばらつきが増大した。そこで次に屈折率虚数部に関しても本法を適用し、入力可能な光学特性値の実数部および虚数部をすべて変化させ、その中から10%径が最大値を示す光学特性値の組み合わせを選んだ後、粒子径分布を求めた。なおここでは、入力光学特性値虚数部の変更が可能、装置A、Cに関してのみ検討を行った。その結果を**Fig. 4**に示す。装置Cの大粒子径側の二峰性は消え、全粒子径範囲にわたりすべての装置の分布がほぼ一致した。ここで装置A、Cにおいて虚数部を考慮し求めた入力光学特性値の最適値と、Fig. 3の虚数部を0とし求めた最適値では実数部の値が異なっている。このことは入力光学特性値の実数部を、虚数部0として得た最適値に固定して、虚数部だけを変化させるような方法では最適入力光学特性値を推定できず、実数部および虚数部ともに変化させることで最適値が推定できることを示している。次に入力光学特性値の虚数部の影響を検討してみる。実数部の値をFig. 4に示す最適値に固定し、虚数部を変え10%径の変化を見た結果を**Fig. 5**に示す。なお虚数部に設定可能な値は、装置Aでは0, 0.1, 0.2の3種類、また装置Cでは0, 0.001, 0.01, 0.1の4種類である。10%径が最大値を示す虚数部の値は、装置Aでは0.1, また装置Cでは0.001であり、虚数部0では最大値を示さなかった。また虚数部の変化に伴う10%径の変動の仕方は、機種により異なることが分かる。このようにレーザー回折・散乱法では、実数部だけでなく虚数部の入力値によっても分布が変動することが分かる。またここには示さないが今回実験に用いた銅粉(CO-3)においても、虚数部

Fig. 5 The effect of imaginary part on 10% diameter in the case of copper. The maximum value of 10% diameter did not exist at the point of imaginary part 0 for each equipment

を0とした場合の最適入力光学特性値で求めた粒子径分布は、銅の屈折率に最も近い入力値で求めた分布より、微小粒子径側での機種間のばらつきは減少するものの、Fig. 3のように装置Cが分布の大粒子径側で二峰性を示し、ばらつきが大きくなった。しかしながら実数部だけでなく虚数部も考慮し推定を行うと、そのばらつきが消え各機種の整合性は向上するという銅粉(CO-2)と同様の傾向を示した。

ここで、今回実験に用いた3種類の銅粒子につき、虚数部を0と一定にした場合、およびすべての実数部と虚数部を考慮した場合の二通りの推定法で求めた最適入力光学特性値を**Table 2**に示した。前報のセラミックス粒子の結果と同様、銅粉においても本推定法で得た最適入力光学特性値の実数部の値は、同じ材質であっても測定試料および測定機種により異なることが分かる。同様の事実は虚数部においても言える。銅粉(CO-1)では、実数部、虚数部ともに考慮し推定しても、最適入力光学特性値は虚数部0で推定した結果と同じになった。しかしながら、銅粉(CO-2, CO-3)では虚数部を考慮した場合の最適入力光学特性値の虚数部は、文献値に比べ非常に小さいが、0以外の値を持つケースがあることから、金属粉では粒子屈折率虚数部の影響が無視できない場合もあると考えられる。

以上の結果より、銅粉のように屈折率虚数部の大きい試料に関しては、粒子屈折率虚数部が測定結果に及ぼす影響が現われやすくなるが、本推定法において10%径が最大となる実数部と虚数部の組合せを選ぶことで機種間の整合性が向上することが分かった。

Table 2 Comparison of optimum input values of refractive index which were estimated by each method

Sample	Equipment	Input value of refractive index	Estimated value by method I [*]	Estimated value by method II ^{**}
CO-1	A	$1.51-0.2i$	$1.56-0i$	$1.56-0i$
	B	$1.57-0i$	$1.86-0i$	—
	C	$0.72-3i$	$1.57-0i$	$1.57-0i$
Copper	A	$1.51-0.2i$	$2.37-0i$	$1.94-0.1i$
	B	$1.57-0i$	$1.72-0i$	—
	C	$0.72-3i$	$1.57-0i$	$1.79-0.001i$
	D	$1.50-0i$	$1.70-0i$	—
CO-3	A	$1.40-0.2i$	$2.80-0i$	$2.80-0i$
	B	$1.46-0i$	$3.06-0i$	—
	C	$0.67-3i$	$1.80-0i$	$2.00-0.01i$

* Method I : Imaginary part was fixed at 0.

** Method II : Both real and imaginary part were changed

3. 1. 2 樹脂粒子およびセラミックス粒子の場合

次に金属とは材質が異なり、屈折率の虚数部が非常に小さいと言われる粒子に対しても、本推定法における虚数部の影響を検討した。ここでは試料に単分散ポリスチレンラテックス粒子およびアルミナ粒子を用い検討した。**Fig. 6**は、ポリスチレンラテックス粒子(PO-1)を、文献値(1.59)に近い光学特性値で測定した結果である。ポリスチレンラテックスの消光係数は、文献等に値が記載されていないことから、ここでは何れの装置にも設定可能な0とした。文献値による測定では装置間の整合性が悪く、単分散粒子を測定しているにもかかわらず機種によっては分布の幅が広がっている。

Fig. 7は、先の銅粉の結果と同様、屈折率虚数部の影響を考慮するため、装置A、Cにおいては、10%径が最大値を示す光学特性値を、すべての実数部と虚数部の組み合わせの中から選び、その値で求めた結果であ

る。また虚数部が0に固定の装置B、Dでは実数部のみ変化させ検討を行った。なお図中には電気的検知帯法の測定結果も示す。本試料の場合、装置Aでは虚数部が0の場合に、最適光学特性値が得られた。装置Cでは $2.74-0i$ および $2.74-0.001i$ で10%径が最大値を示し、かつ各々の分布は一致した。文献値で求めた**Fig. 6**に比べ、分布両端部で装置間のばらつきが減少し、各機種ともにより単分散性を示すようになった。またこの結果は電気的検知帯法の結果ともよく一致した。

次に入力光学特性値の虚数部と、10%径との関係を考察してみる。一例として、実数部の値を**Fig. 7**に示す最適値に固定し、虚数部を変化させた場合の10%径の変化を**Fig. 8**に示す。装置Aでは、虚数部0で10%径が0.845と最大値を示し、虚数部0.1で0.841とわずかに減少した。また更に虚数部を0.2にすると、10%径は急激に減少した。装置Cでは、虚数部0および0.001

Fig. 6 Comparison of particle size distributions of polystyrene which were measured by using the closest value to the described refractive index on the handbook

Fig. 7 Improvement of an agreement among four equipments. The optimum input values of refractive index of equipment A and C were estimated by changing both real and imaginary part

Fig. 8 The effect of imaginary part on 10% diameter in the case of polystyrene. The maximum value of 10% diameter existed at the point of imaginary part 0 for each equipment

Fig. 9 Comparison of particle size distributions of alumina #10000 which were measured by using the closest value to the measured refractive index

Fig. 10 Improvement of an agreement among four equipments. The optimum values of refractive index of equipment A and C were estimated by changing both real and imaginary part

Fig. 11 The effect of imaginary part on 10% diameter in the case of alumina. The maximum value of 10% diameter existed at the point of imaginary part 0 for each equipment

で最大値を示し、虚数部が増大するに伴い10%径は次第に減小した。各装置とも、虚数部の値が大きくなるにつれ、10%径の変化が大きくなった。また実験に用いた他のポリスチレンラテックス粒子(PO-2, PO-3)においても、同様の傾向を示した。

次にアルミナ粒子の結果について示す。**Fig. 9**は、試料(AL-3)のアルミナ#10000を、この試料の実測屈折率(1.73)に近い光学特性値で測定した結果である。なおアルミナにおいてもポリスチレンラテックスと同様に消衰係数が不明なため、ここでは0とした。図より分布の中心付近では、機種間の整合性は比較的良好だが、分布の両端部ではばらつきが大きくなった。**Fig. 10**は先のポリスチレンラテックスの場合と同様に、入力光学特性値の実数部および虚数部を変えて推定した結果である。アルミナにおいても装置Aでは虚数部が0の時に、また装置Cでは2.26-0iおよび2.26-0.001iの時に最適値が存在し、各分布は一致し

た。これらの最適値を用いると、**Fig. 9**に見られた分布両端部での機種間のばらつきが軽減され、装置間の整合性が向上した。**Fig. 11**は、アルミナにおける虚数部の影響を検討するため、**Fig. 8**と同様の整理を行った結果である。本試料の場合も、先のポリスチレンラテックスの場合と同様、装置Aでは虚数部0で、また装置Cでは虚数部が0および0.001で10%径が最大値を示し、虚数部の増大に伴い10%径が減小した。またこの傾向は、他のアルミナ粒子(AL-2, AL-3)の場合にも同様に認められた。

Table 3は、ポリスチレンラテックスおよびアルミナにつき、本推定法を適用することにより求めた最適入力光学特性値を示したものである。これら粒子の特徴は、すべての装置が虚数部0で最適値を示す点である。また装置Cでは虚数部を考慮した場合、試料によっては虚数部0以外にも最適値を持つ場合があった。この場合の10%径およびその最適値で求めた分布は、

Table 3 Comparison of optimum input values of refractive index which were estimated by each method. The optimum values existed at the point of imaginary part 0 in all samples

Sample	Equipment	Input value of refractive index	Estimated value by method I [*])	Estimated value by method II ^{**})
Polystyrene	PO-1	A	1.60-0 <i>i</i>	1.50-0 <i>i</i>
		B	1.60-0 <i>i</i>	—
		C	1.60-0 <i>i</i>	2.74-0, 0.001 <i>i</i>
		D	1.60-0 <i>i</i>	—
	PO-2	A	1.60-0 <i>i</i>	1.60-0 <i>i</i>
		B	1.60-0 <i>i</i>	—
		C	1.60-0 <i>i</i>	2.74-0, 0.001 <i>i</i>
	PO-3	A	1.60-0 <i>i</i>	1.60-0 <i>i</i>
		B	1.60-0 <i>i</i>	—
		C	1.60-0 <i>i</i>	2.74-0, 0.001, 0.01 <i>i</i>
Alumina	AL-1	A	1.70-0 <i>i</i>	1.80-0 <i>i</i>
		B	1.73-0 <i>i</i>	—
		C	1.80-0 <i>i</i>	1.62-0 <i>i</i>
	AL-2	A	1.70-0 <i>i</i>	1.70-0 <i>i</i>
		B	1.73-0 <i>i</i>	—
		C	1.80-0 <i>i</i>	1.80-0, 0.001 <i>i</i>
	AL-3	A	1.70-0 <i>i</i>	1.90-0 <i>i</i>
		B	1.73-0 <i>i</i>	—
		C	1.80-0 <i>i</i>	2.26-0, 0.001 <i>i</i>
		D	1.80-0 <i>i</i>	—

* Method I : Imaginary part was fixed at 0.
** Method II : Both real and imaginary part were changed.

虚数部0で求めたものに一致した。これらの粒子は屈折率虚数部の値が小さいと考えられるため、入力光学特性値虚数部の影響も、虚数部が0もしくはそれに近い領域では現れにくいと思われる。

以上より限られたサンプルからの結果ではあるが、屈折率の虚数部が非常に小さいと見なせる材質の粒子では、最適入力光学特性値が虚数部0の場合に何れの試料においても存在することから、実用上は入力光学特性値の虚数部を0として実数部のみ推定すればよいことが分かった。

3. 2 バイモーダル試料測定に及ぼす入力光学特性値の影響

次にバイモーダル試料に対する本推定法の有効性につき検討した。本実験では単分散シリカ粒子(SI-1およびSI-2)を用いたので、ここでは入力光学特性値の虚数部を0とした。入力光学特性値の実数部を変化させた場合の粒子径分布の変動を、装置Cにつき**Fig. 12**に一例として示す。シリカの実測屈折率である1.45付近ではバイモーダル分布が現れたが、入力光学特性値が増大するに従いこのバイモーダル性は次第に消失し単一分布を示すようになった。更に大きな値を入力

Fig. 12 The effect of refractive index input value on the result of measured particle size distribution of bimodal sample. The shape of the distribution changed remarkably. The bimodal shape of the distribution disappeared depending on the input value of refractive index

すると、微小粒子径側の分布が若干ではあるが細かい方に再び移行した。このようにバイモーダル試料の測定では、入力光学特性値の変化に伴い分布の形状が大きく変化する。ここでは装置Cの結果についてのみ示したが、装置AやBにおいても入力光学特性値により分布が大きく変化し、バイモーダル性が消えるという同様の傾向を示した。**Fig. 13**は、シリカの実測屈折

Fig. 13 Comparison of particle size distributions of silica bimodal sample which were measured by using the closest value to the measured refractive index

率, またはそれに近い値で求めた粒子径分布を各機種において比較した結果である。また図中の実線は、電気的検知帯法で実測した各々の単分散シリカ粒子の粒子径分布を基に、小さい粒子と大きい粒子の重量比が6対4となるように算出した分布である。いずれの装置においてもバイモーダル分布は認められるものの、分布幅が狭く明瞭なバイモーダル性を示す電気的検知帯法の結果とは一致しなかった。また分布の小粒子径側では機種間の整合性も悪いことが分かる。このようにレーザー回折・散乱法ではバイモーダル試料においても、実測屈折率を用い、精度よく測定することは難しいものと考えられる。次に本推定法を適用し求めた各機種の分布を**Fig. 14**示す。10%径が最大値を示す入力光学特性値にて求めた分布においては、いずれの機種もバイモーダル分布は得られず、単一分布を示す結果となった。

以上のことからバイモーダル試料においては、本推定法を適用しても、測定精度の向上は望めないことが分かった。前報¹⁾で報告したように、単分散粒子や分布に幅を持つ試料に関しては、本法を適用すると機種間のばらつきが減少したが、本試料のようにバイモーダルで、かつ分布幅の狭いサンプルには、本法の適用

Fig. 14 The particle size distributions measured by optimum input values of refractive index. The accurate data was not obtained even applying the estimation method for bimodal sample

は不適切であると思われる。

4. 結 言

(1) 金属粉等の粒子屈折率虚数部の値が大きい物質に対しては、入力光学特性値の実数部に加えて虚数部も考慮し10%径が最大値を示す組合せを選ぶことで、機種間の整合性が向上した。

(2) 樹脂、酸化物のように屈折率の虚数部が非常に小さい(10^{-3} 程度以下)粒子に対しては、入力光学特性値の虚数部を0とし、10%径が最大となる実数部を推定することにより機種間の整合性が向上した。

(3) レーザー回折・散乱法でバイモーダル試料を測定する場合、入力光学特性値の変化に伴い分布の形状が大きく変化した。バイモーダル試料に対しては、本推定法の適用に限界があることが分かった。

〔謝 辞〕 本研究に対し有益なご助言を頂いた航空宇宙技術研究所熱流体工学部反応流体研究室長 林茂氏に謝意を表する。さらに粒子径分布の測定にあたっては、ホソカワミクロン(株)・つくば粉体技術開発センターにご協力を頂いたので、ここに記して謝意を表する。

References

- 1) Hayakawa, O., K. Nakahira and J. Tsubaki : *J. Soc. Powder Tech. Japan*, **30**, 652(1993)
- 2) MILTON KERKER : "The Scattering of Light and other electromagnetic radiation", p.13 Academic Press(1969)
- 3) Craig F. Bohren and Donald R. Huffman : "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", p.279, John Wiley & Sons(1983)
- 4) Malvern Instruments Ltd : "MasterSizer User Manual", Section 4. 14(1988)
- 5) CRC Press : "Handbook of Chemistry and Physics, 68th. ed.", (1987~1988)
- 6) Malvern Instruments Ltd : "INDEX for the Assistance of MasterSizer Users", (1990)