2 波長照射法を用いたレーザー散乱光ファイバ粒子径 モニタにおける粒子径分布の影響

北 川 洋 一*・金 谷 典 武*・林 昭 博**・南 茂 夫***

Effects of Size Distribution in Laser-Scattering Fiber-Optic Particle
Size Monitor Using Two Wavelength Illuminations

Yoichi KITAGAWA*, Tsunetake KANATANI*, Akihiro HAYASHI** and Shigeo MINAMI***

The effects of particle size distribution on the output of the laser-scattering fiber-optic particle size monitor are discussed. The relations between the particle size distribution and the error in the particle size decision are evaluated.

Key Words fiber optic particle size monitor, size distribution

1. はじめに

近年、工業的に微小な粒子を扱う機会が増大しており、粒子の大きさを in situ 測定する要望が高まっている。その中には、製造プロセスのように、測定対象の粒子径は本来どの範囲にあるべきかが決められている場合がある。このような場合には、粒子径測定装置としては、測定対象の粒子径があらかじめ設定された範囲内に入っているか、あるいはその範囲より大きいのか小さいかを知ることができれば良い場合が多い。

そこで、われわれは照射光に二つの波長のレーザーを用い、センシングヘッドを光ファイバにより構成したレーザー散乱光ファイバ粒子径モニタを提案し、測定対象の粒子径分布が単分散とみなせる場合について、検出特性と動作を確認するために行った実験結果を報告した¹⁾。本論文では、測定対象に粒子径分布がある場合の検出特性について検討した結果を述べる。

2. 粒子径分布がある場合の散乱光強度比

まず、この光ファイバ粒子径モニタの構成と検出原

理を簡単に述べる。基本構成を **Fig. 1** に示す。波長 λ_1 , λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$) のレーザー光を1本の単一モード光ファイバにより導いて測定対象粒子に照射する。受光プローブではそれぞれ二つの波長の散乱光を受光し、光ファイバにより信号処理装置へ導く。信号処理装置では、導かれた散乱光を各波長ごとに分離して光電変換した後、各波長の散乱光強度の比を求め、その比の値をあらかじめ設定されたしきい値と比較して2値化する。比の値がしきい値以上の場合の受光プローブ出力を1、以下の場合を0と表わすことにすると、異なった角度に置かれた二つの受光プローブの2値化出力により生成される2bitの2進コードから、測定対象の粒子径があらかじめ設定した範囲内に入っているか、あるいはそれより大きいのか小さいかを判別することができる¹⁾。

つぎに測定対象に粒子径分布がある場合の散乱光強度比を考える。測定対象の粒子径分布は粒子径パラメータを用いて表わすことにする。粒子径パラメータは、

Fig. 1 Schematic diagram of laser scattering fiber-optic particle size monitor using two wavelength illuminations OF1: single mode optical fiber, OF2 and OF3: multimode step index optical fiber, RL: rod lens

* 兵庫県立工業技術センター 神戸市須磨区行平町 3-1-12

** 神戸市立工業高等専門学校 神戸市西区学園東町 8-3

*** 大阪大学工学部 吹田市山田丘 2-1

* Hyogo Prefectural Institute of Industrial Research, Kobe

** Kobe City College of Technology, Kobe

*** Faculty of Engineering, Osaka University, Suita (Received August 22, 1990)

(Revised December 17, 1990)

粒子周囲の媒質の屈折率を n 、粒子の半径を a 、照射光の波長を λ としたとき、 $\alpha = 2\pi na/\lambda$ で定義される値であり、波長 λ_1 の照射光に対する粒子径分布を $D(\alpha)$ 、 λ_2 に対する分布を $D'(\alpha')$ と表わすことにすると、 θ_i の方向に置かれた集光角 $\Delta\theta$ の受光プローフにより受光されて信号処理装置へ伝送される波長 λ_1 、 λ_2 の散乱光強度の比 r は次式で表わされる

$$r = \frac{\int_{\theta_1 - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_1 + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_0^\infty (i_1 + i_2) D(\alpha) d\alpha d\theta}{(1 + \Delta F)^2 \int_{\theta_1 - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_1 + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_0^\infty (i_1 + i_2) D'(\alpha') d\alpha' d\theta} \quad (1)$$

ただし、照射光の強度および受光プローフの光の伝送効率は各波長において等しいとしており、 i_1 、 i_2 はそれぞれの偏光成分に対する強度関数³⁾で α 、 θ および粒子とその周囲の媒質の屈折率の関数である。また、 ΔF は照射光の波長差を表わすパラメータで $\Delta F = (\lambda_2 - \lambda_1)/\lambda_1$ により定義される値である。 α と α' の間には $\alpha' = (1 + \Delta F)\alpha$ の関係があるため、(1)式の $D'(\alpha')$ は $D(\alpha)$ から求めることかてきる。このため、粒子径分布としては、 $D(\alpha)$ のみを考えることにする。また、実際の粒子径分布 $D(\alpha)$ を簡単な分布関数で正確に表わすことはできないが、近似値としてはいくつかの簡単な分布関数を用いることかてきる。そこで、ここではその代表的な分布関数である正規分布と対数正規分布の場合について考えることにする²⁾。

(正規分布)

$$D(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\alpha - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

平均粒径 $\alpha_N = \mu$ 、標準偏差 $\sigma_N = \sigma$

(対数正規分布)

$$D(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\alpha} \exp\left[-\frac{(\ln\alpha - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

平均粒径 $\alpha_L = \exp[\mu + \sigma^2/2]$ 、

標準偏差 $\sigma_L = \alpha_L (\exp \sigma^2 - 1)^{1/2}$

Fig. 2 は、 $D(\alpha)$ が対数正規分布、粒子が球形かつ均質であるとして、粒子とその周囲の媒質の屈折率の比 $m=1.2$ 、 $\Delta F=0.4$ の場合に、平均粒径に対する r の値を Mie 散乱の理論³⁾を用いて求めた結果である。ただし、 β_L は $\beta_L = \sigma_L/\alpha_L$ により定義された値であり、対数正規分布における粒子径分布の広かりの程度を表わすパラメータである（正規分布の場合も同様に $\beta_N = \sigma_N/\alpha_N$ により定義することにする）。この図から、粒子径分布の広かりが大きくなるに従い r の最大値が減少し、 r が最大となる粒子径が小さくなることかてわかる。ここには示していないが、 $D(\alpha)$ が正規分布の場合も同様な傾向を示す。

Fig. 2 Scattered light intensity ratio as a function of mean size parameter. A logarithmic normal distribution is assumed for size distribution function.

3. 受光プローフの2値化出力

この粒子径モニタでは、受光プローフにより受光された散乱光強度の比に対してあるしきい値を設定して出力を2値化する。各受光プローフのしきい値はあらかじめ設定された値で測定期間中一定であるとする。Fig. 2に示すように測定対象の粒子径分布に応じて散乱光強度比の値か変化するため、受光プローフの出力か1となる粒子径範囲か変化し、出力コートと粒子径範囲の関係か変化することになる。この関係を求めるため、受光プローフの角度 θ 、しきい値をパラメータとし、粒子径分布の広かりに対し、受光プローフの出力か1となる粒子径の範囲を、 $m=1, 2$ 、 $\Delta F=0.4$ として求めた結果を **Fig. 3** に示す。ここで、しきい値の設定範囲は単分散の場合における散乱光強度比の最大値 $r_{\max}$ と $\alpha \rightarrow 0$ のときの値 $r_{\min}$ の間てあるとしており、Fig. 3におけるしきい値 T_N は、 $r_{\max} \sim r_{\min}$ の間て $1 \sim 0$ となるように規格化した値である（実際のしきい値の値を V_i としたとき、 $T_N = (V_i - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min})$ ）曲線て囲まれた範囲か、受光プローフの出力か1となる粒子径範囲を示している。この図から、粒子径分布の広かりか大きくなるにつれて、出力か1となる粒子径の範囲か狭くなりかつ小さいほうへ移動することかてわかる。測定対象の粒子径分布か既知て一定の場合には、その分布を考慮して受光プローフの角度 θ と出力か1となる粒子径範囲の関係を求め、その関係をもとにしてモニタする粒子径に応じた受光プローフの角度 θ を決定すればよい。しかし、粒子径分布か未知あるいは測定の間て変化する場合、粒子径範囲を判別する上て誤差を生することになる。つきに、この誤差について考える。

Fig. 3 Size parameter range where the intensity ratio of the scattered lights with the wavelength of λ_1 and λ_2 exceeds the threshold. Size distribution function is (a) normal distribution and (b) logarithmic normal distribution

Fig. 4 Relative error in particle size decision as a function of normalized threshold. Size distribution function is (a) normal distribution and (b) logarithmic normal distribution

単分散の場合に受光プローブの出力が1となる粒子径範囲を $\alpha_1 \sim \alpha_2$ とし、この範囲をもとにしてモニターする粒子径範囲を設定するとする。粒子径分布がある場合に出力が1となる粒子径範囲が $\alpha'_1 \sim \alpha'_2$ となったとき、粒子径範囲の判別誤差を $|(\alpha_1 - \alpha'_1)/\alpha_1|$ または $|(\alpha_2 - \alpha'_2)/\alpha_2|$ のうち大きいほうの値と定義する。この値が 0.01, 0.05, 0.1, 0.2 となるときの β_N あるいは β_L としきい値の関係を求めた結果を **Fig. 4** に示す。この図から、粒子径範囲の判別誤差の許容範囲を決めた場合、しきい値とモニター可能な粒子径分布の範囲を知ることができる。たとえば、粒子径分布が対数正規分布で表わされる場合 (**Fig. 4 (b)**)、 $\theta = 90^\circ$ の受光プローブで粒子径範囲の判別誤差を 0.1 以下にするためには、しきい値 T_N が 0.4 のとき、 β_L が約 0.12 以下の測定対象でなければならないというこ

とがわかる。

4. おわりに

粒子径分布を表わす関数として正規分布と対数正規分布を用い、測定対象の粒子径分布が2波長照射法を用いたレーザー散乱光ファイバ粒子径モニタの検出特性に及ぼす影響を検討した。その結果、粒子径分布の広がり程度、受光プローブの設定角度としきい値、および粒子径範囲の判別誤差の関係を明らかにすることができた。

参考文献

- 1) 北川, 金谷, 林, 南: 2波長照射法を用いたレーザー散乱光ファイバ粒子径モニタ, 計測自動制御学会論文集, 26-12, 1349/1355 (1990)
- 2) 三輪茂雄: 粉体工学通論, 11, 日刊工業新聞社 (1981)
- 3) M. Kerker: The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation, 39, Academic (1969)