光ファイバを用いた粒径測定装置による 粒子密度・湿り度の測定

正員 辰野 恭市 (東芝)
非会員 梅田 利也 (東芝)
非会員 長尾 進一郎 (東芝)

1. 序 論

微小粒子(二相流中の粒子・液滴, セラミック微粉体, 大気中のエアロゾル, クリーンルーム中のダストなど)の径の測定は, いろいろな工業分野で必要とされている⁽¹⁾。著者らは, これらの粒子の粒径分布を測定することを目的として光ファイバ粒径測定装置を開発してきた^{(2)~(4)}。この装置は, 前方散乱法(すなわち, 粒子によるレーザ光の散乱光強度分布(散乱角方向の散乱光強度の分布)を測定したのち, ミニコンピュータなどを用いて粒径分布へ変換する方法)に光ファイバを導入し, いろいろな環境下の粒子(例えば, タービン中の水滴(0.1~2 μm ³))の粒径分布を求めるものである。これまでは, 散乱光強度分布のパターン, 例えば最大値を1とした相対値で表された散乱光強度分布を測定することにより, 全粒子に対する粒径 D の粒子の割合で表された粒径分布(相対値)を求めていた。しかしながら二相流体のエンタルピを求めたり, 大気汚染の定量的な評価などのためには, 粒子密度(数密度)を測定する必要がある場合も多い。著者らは, これらのうち試験用蒸気タービン中の水滴(二相流中の液滴)の粒子密度・湿り度(単位体積中の全蒸気の重さに対する水滴の重さの比)を測定することを検討してきた。

粒子密度を測定する方法としては, 透過率を測定する方法が広く用いられている⁽⁵⁾。しかしながら, この方法では, 測定する量すなわち透過率の対数に粒子密度が比例するので, 測定精度が低いという欠点があった(〈3・1〉節参照)。特に粒子密度が小さい場合には,

透過率はほとんど 100% 近くになり, 粒子密度の測定誤差が非常に大きくなる。

本論文では, 粒子密度の測定法として, 散乱光強度分布の測定系を絶対較正し, 光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法を採用することにより, 従来, 広く用いられてきた透過率を測定する方法に比して大幅に測定精度を向上できることを示し, この方法を用いて, 粒径分布・粒子密度が既知であるポリスチレン粒子を測定することにより, 粒子密度・湿り度を測定できることを検証する。また, この装置を用いて実際の試験用タービン中の水滴の粒径分布・湿り度分布を測定することができたので, その結果を示す。

2. 光ファイバを用いた粒径測定装置

ここで光ファイバを用いた粒径測定装置を紹介しておく⁽⁴⁾。図1がそのブロック図である。Ar⁺ レーザ光を, 光ファイバを通して, タービン中に挿入された測定プローブ先端まで導き, コリメータレンズで平行ビームに成形したのち, 散乱領域に存在する被測定粒子に照射する。被測定粒子は, この光を散乱するので, この散乱光を, 0° から 4° まで 2° ごとに, 4° から 30° まで 1° ごとに配置した大口径光ファイバで受光し, それぞれの角度で受光した光をフォトダイオード・アンプを通して電気信号に変換したのち, ミニコンピュータに入力する。こうすることにより, 散乱光強度の角度分布(散乱光強度分布) $I(\theta)$ ($\theta=2^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, \dots, 29^\circ, 30^\circ$) が得られる。 $\theta=0^\circ$ に配置した光ファイバは透過光をモニタするためのものである。一方, 1個の粒子による散乱光強度分布 $i(D, \theta)$ (ここで, D は粒径, θ は散乱角である。)を, いろいろな粒径についてあらかじめ Mie 散乱理論⁽⁶⁾に基づいて計算し, ミニコンピュータ内に格納しておく。粒径分布が $n_r(D)$ である多数の被測定粒子による散乱光強度分布(測定値) $I_r(\theta)$ は, 1個の粒子による散乱光強度分布

Particle Number Density and Wetness Fraction Measurement Using an Optical Fiber Droplet Sizer. By Kyoichi Tatsuno, Member, Toshiya Umeda, Non-member & Shinichiro Nogao, Non-member (Research & Development Center, Toshiba Corporation).

辰野 恭市: 正員, 東芝総合研究所
梅田 利也: 非会員, 東芝総合研究所
長尾進一郎: 非会員, 東芝京浜事業所

図 1 光ファイバを用いた粒径測定装置のブロック図

Fig. 1. Schematic diagram of an optical fiber particle sizer.

の重ね合わせとして、

$$I_r(\theta) = \int i(D, \theta) n_r(D) dD \quad (1)$$

と表せる。ただし、(1)式は多重散乱（散乱された光が再度散乱されること）の影響が無視できる場合に成立する。(1)式を $n_r(D)$ について解けば、粒径分布が得られる。

この装置の特長は、従来の装置では Fraunhofer 回折理論に基づいて、コヒーレント光を照射した場合の散乱光を無限遠で測定していたところを、Mie 散乱理論に基づいて、インコヒーレント光を照射した場合の散乱光をある散乱角に配置した光ファイバを用いて測定するようにしたことである。すなわち、測定原理として Mie 散乱理論を用いることにより光ファイバを導入したことである⁽³⁾。光ファイバの導入により、粒径測定装置の使用環境が大幅に拡大した。

3. 粒子密度の測定法

〈3・1〉 透過率を測定する従来の方法 従来、粒径分布 $n_r(D)$ が既知である場合には透過率を測定する方法が広く用いられている。この方法は、次のように粒子密度 N を求める。

まず、粒子密度 N を定義しておく。単位体積中に存在する粒径 D の粒子数で表した粒径分布を $n_p(D)$ とすると、

$$n_p(D) = N n_r(D) \quad (2)$$

で定義したものである。ここで、 $n_r(D)$ は確率密度関数として表した粒径分布のことで、

$$\int n_r(D) dD = 1 \quad (3)$$

で規格化したものである。そうすると、図2に示すよ

図 2 透過率の算出

Fig. 2. Calculation of transmission ratio.

うに、透過率 $T (= I_{out}/I_{in})$ は

$$T = \exp \left[-L \int C(D) n_p(D) dD \right] \quad (4)$$

であたえられる。ここで $C(D)$ は散乱断面積、 L は散乱光路長である。また、水による可視光の吸収は小さいので、散乱による光の減衰のみを考慮している。

(2)式を(4)式に代入して N について解くと、

$$N = - \frac{1}{L \int C(D) n_r(D) dD} \ln T \quad (5)$$

が得られる。

この方法では、(5)式をみるとわかるように、測定する量 T の対数に、粒子密度が比例するので、粒子密度の変化の割には透過率 T が変化せず、感度が低いという欠点がある。例えば、被測定粒子が少ない場合には透過率は 95% 以上になり、レーザー光の変動を 1% とすると、透過率の測定誤差は少なくとも 1% はあることになり、粒子密度の測定誤差が非常に大きくなる。

〈3・2〉 光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法 これまでは、散乱光強度分布のバターン、例えば最大値を 1 とした相対値で表示された

散乱光強度分布を測定することにより、単位体積中に存在する粒子数に対する粒径 D の粒子数の割合として表示した粒径分布を求めていた。ここでは、散乱光強度分布の測定系の校正を行い、光のエネルギーに換算した散乱光強度分布 $I_{opt}(\theta)$ を測定することにより、単位体積中に存在する粒径 D の粒子数で表した粒径分布 $n_p(D)$ を求める。 $I_{opt}(\theta)$ の大きさは、ほぼ粒子密度 $n_p(D)$ に比例するので、エネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法は粒子数が小さい場合にも精度良く粒径分布 $n_p(D)$ を求めることができる。以下、この方法について説明する。

光のエネルギーに換算された散乱光強度分布は、図3に示すように入射光の散乱による減衰を考慮して

$$I_{opt}(\theta) = \int_0^L dI dl \\ = \int_0^L \left\{ I_{in}(l) \int i(D, \theta) \pi B^2 n_p(D) dD \right\} dl \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表せる。ここで dI は散乱位置が l と $l+dI$ の領域に含まれる粒子による θ 方向への散乱光強度、 $I_{in}(l)$ は散乱位置が l の点での照射光強度で、 l が0から l までの領域に含まれる粒子による散乱減衰を考慮して

$$I_{in}(l) = I_0 \exp \left[-l \int C(D) n_p(D) dD \right] \quad \dots (7)$$

である。また、 π は円周率、 B は照射ビームの半径、 L は散乱光路長、 I_0 は $l=0$ における照射レーザービームの強度である。

図3 粒子による照射ビームの減衰を考慮した場合の散乱光強度

Fig. 3. Scattered light intensity in consideration of irradiation beam attenuation by scattering.

(7)式を(6)式に代入したのち(2)式を代入すると

$$I_{opt}(\theta) = \int_0^L \left\{ I_0 \exp \left[-l \int C(D) N n_r(D) dD \right] \right. \\ \left. \times \int i(D, \theta) \pi B^2 N n_r(D) dD \right\} dl \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。(8)式で、散乱角 θ は粒子位置 l によらず一定であると近似し、 l の関数でないものを積分の外に出して l による積分を実行すると

$$I_{opt}(\theta) = I_0 \pi B^2 N \\ \times \left\{ \frac{1 - \exp \left[-LN \int C(D) n_r(D) dD \right]}{N \int C(D) n_r(D) dD} \right\} \\ \times \int i(D, \theta) n_r(D) dD \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここで、

$$X(D) \triangleq \int C(D) n_r(D) dD \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$A \triangleq I_0 \pi B^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

と置くと

$$I_{opt}(\theta) = \frac{A \{1 - \exp[-LN X(D)]\}}{X(D)} \\ \times \int i(D, \theta) n_r(D) dD \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。ここで

$$C_s \triangleq \frac{A \{1 - \exp[-LN X(D)]\}}{X(D)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

と置くと次式となる。

$$I_{opt}(\theta) = C_s \int i(D, \theta) n_r(D) dD \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $I_r(\theta) = I_{opt}(\theta)$ とおいて、 $n_r(D)$ を(1)式を用いて求め、(3)式により規格化しておけば

$$C_s = \frac{I_{opt}(\theta)}{\int i(D, \theta) n_r(D) dD} \quad \dots\dots\dots (15)$$

により C_s が求まる。 C_s が求まると(13)式に代入して N について解くと

$$N = \frac{-1}{LX(D)} \ln \left(1 - \frac{C_s X(D)}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

と粒子密度 N が求まる。 N が求まれば(2)式により単位体積中に存在する粒子数として表示された粒径分布 $n_p(D)$ が求まる。

図4に透過率を測定する方法と、光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法により粒子密度を測定した場合の誤差を推定した結果を示す。図中破線は透過率 T の測定誤差が $\pm 1\%$ の場合、実線は

図4 透過光を測定する方法による粒子密度の測定誤差(破線)と光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法による粒子密度の測定誤差(実線)の推定

Fig. 4. Error estimation of the two particle number density measuring methods; one is transmission ratio method (the broken line) and the other is the scattering light intensity method (the solid line).

C_s (15式) の測定誤差が $\pm 1\%$ の場合の粒子密度の測定誤差を示したものである。図より明らかに、光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法のほうが、測定精度が高いことがわかる。

4. 湿り度の算出

単位体積中に存在する粒子数として表示された粒径分布 $n_p(D)$ が求まると、単位体積内に含まれる全水滴(液相)の体積 V_l は、

$$V_l = \int \frac{\pi D^3}{6} n_p(D) dD \quad (17)$$

である。一方、蒸気(気相)の体積 V_g は

$$V_g = 1 - V_l \quad (18)$$

である。水と蒸気の重量密度をそれぞれ ρ_l 、 ρ_g とすると、単位体積あたりの全蒸気(液相+気相)の重量 W_t は

$$W_t = \rho_l V_l + (1 - V_l) \rho_g \quad (19)$$

で水の重量 W_l は

$$W_l = \rho_l V_l \quad (20)$$

である。従って、湿り度 Y は

$$Y = \frac{W_l}{W_t} = \frac{\rho_l V_l}{\rho_l V_l + (1 - V_l) \rho_g} \quad (21)$$

と求まる。ここで、 ρ_g 、 ρ_l は蒸気の圧力(あるいは温度)を測定すれば飽和蒸気表よりその値を知ることができる。

5. ポリスチレン粒子による検証

粒径分布・粒子密度が既知であるポリスチレン粒子

(ダウケミカル社製、商品名ユニフォームラテックスパーティクル)を用いて上記の方法を検証した。

ポリスチレン粒子は水に懸濁させ、ガラスセルに入れて測定した。また、真の粒子密度はポリスチレンと水の重さを天秤で測定することにより求めた。

光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法では、測定した散乱光強度分布を光のエネルギーに換算する必要がある。ここで照射ビームの強度 I は 1 W/m^2 と仮定する。換算は次のようにして行う。粒径 $0.62 \mu\text{m}$ 、粒子密度 10^{14} 個/m^3 のポリスチレン粒子を光路長 5 mm の試料セルに入れて、分布 $I_s(\theta)$ を測定し、一方、(8)式において $I_0 = 1 \text{ W/m}^2$ としたときの $I_{\text{opt}}(\theta)$ を計算し、これを $I_s(\theta)$ と置くと、換算係数 $T(\theta)$ は

$$T(\theta) = \frac{I_c(\theta)}{I_s(\theta)} \quad (22)$$

と求めることができるので、測定した散乱光強度分布 $I(\theta)$ に $T(\theta)$ を乗ずることにより光のエネルギーに換算できる。

図5に光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法と透過光を測定する方法による粒子密度の測定誤差の比較を示す。図5は粒径 $0.620 \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子密度を測定したときのもので、○は光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法、●は透過率を測定する方法である。図より明らかに粒子密度が小さい場合は光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法のほうが誤差が小さい。

図6にいろいろな粒径の場合の粒子密度の測定結果を示す。これらの粒子密度は、圧力が 0.05 at ($4.9 \times$

図5 透過率を測定する方法による粒子密度の測定誤差(●)と光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法による粒子密度の測定誤差(○)の比較

Fig. 5. Comparison of the two particle number density measuring methods; one is the transmission ratio method (●) and the other is the scattered light intensity method (○).

図 6 ポリスチレン粒子の粒子密度の測定結果と真の値の比較

Fig. 6. Comparison of particle number densities; the measured value and the real one.

10³ Pa) の飽和蒸気の湿り度が 0~15% の場合に相当する。0.2 μm 以下の場合には、湿り度 15% 以下の粒子密度では散乱光強度が小さいため、散乱光強度分布を測定できなかった。従って粒径分布も粒子密度も測定できなかった。図 6 に示したように、0.33 μm の場合は、測定した粒子密度と真の粒子密度との一致は良くないが、0.399 μm 以上の場合には両者よく一致している。図 6 より粒子密度の測定誤差を評価すると、0.399 μm 以上の場合には 65% 以下であった。図 7 に測定した粒子密度(図 6) から計算した湿り度を示す。湿り度を求める際は、ポリスチレン粒子を、圧力が 0.05 at (4.9×10³ Pa) の飽和蒸気中の水滴とみなし、 ρ_r は 0.0348, ρ_l は 994.9 (kg/m³) とした。粒子密度の場合と同様、湿り度の場合についても、0.399 μm 以上の場合には、真の湿り度と測定した湿り度の一致は良く、0.399 μm 以上の場合の測定誤差は湿り度で 1.2% 以下である。また、粒子密度・湿り度の誤差要因を調べた結果、それは相対粒径分布 $n_r(D)$ の測定誤差であることがわかった。すなわち、平均粒径の測定誤差や、分散を実際より大きく測定したことが原因であった。

以上の検証実験の結果、粒径が 0.4 μm 以上の場合については、光のエネルギーに換算した散乱光強度分

図 7 測定した粒子密度から計算した湿り度と真の値の比較

Fig. 7. Comparison of wetness fractions; the measured value and the real one.

布を測定する方法を用いることにより、粒子密度・湿り度の測定が可能であることがわかった。

6. 試験用蒸気タービン中の水滴の粒径分布・粒子密度・湿り度の測定

開発した装置により、10 MW 試験用蒸気タービンの最終段動翼出口において、蒸気中に含まれる水滴の

(1) $h=1.0$ (2) $h=0.68$ (3) $h=0.46$

Y_d : タービン出力より算出した平均湿り度
 h : 翼根からの距離

--- $Y_d = 5.4\%$, ---- $Y_d = 6.0\%$, — $Y_d = 10.2\%$

図 8 試験用蒸気タービン中の水滴の粒径分布

Fig. 8. Water droplet size distribution in an experimental steam turbine.

(Y_d : タービン出力より算出した平均湿度)
* $Y_d=10.2\%$, $h=1.0$ のときの湿度を 1.0 として表示した。

図 9 翼半径方向の湿度分布

Fig. 9. Wetness fraction distribution along blade height.

粒径分布・湿度分布の測定をすることができた。特に動翼半径方向の湿度分布を測定でき、タービン設計上非常に有意義なデータが得られた。

図 8, 図 9 に測定結果を示す。図中にパラメータとして示した湿度 Y_d は、動力計を用いて測定したタービン出力からエンタルピーをもとめ、そのエンタルピーから算出した平均湿度である。測定結果は次のことを示している。

- ① 粒子の大部分は $1\mu\text{m}$ 以下で、平均粒径は $0.4\sim 0.6\mu\text{m}$ であった。
- ② 粒径分布は対数正規分布に近い型をしており、粒子の径の成長速度が粒径に比例していることを示していると考えられる。
- ③ 平均湿度が大きくなるにつれて、翼先端部の湿度が著しく増加する。
- ④ 湿度が大きい翼先端部では、大きい粒子の含まれる割合が大きい。

この測定の結果、平均湿度がある程度大きくなるとタービンの最終段では、翼先端部での湿度が非常に大きくなり、翼先端部に浸食防止策をほどこしたり、水滴（ドレイン）を排除したりする必要があること、一方、翼中央より翼根部にかけては、湿度は小さいことなどがわかった。

7. 結 論

本論文の結論を以下に箇条書きにする。

I. 粒子密度・湿度の測定方法について検討した。

1. 測定方法として、光のエネルギーに換算した散乱光強度分布を測定する方法を採用することにより、

従来広く用いられてきた透過光を測定する方法に比して大幅に測定精度を向上することができた。

2. ポリスチレン粒子により蒸気の湿度 $0\sim 15\%$ の場合に相当する粒子密度・湿度の測定精度を評価した結果、粒径が $0.4\mu\text{m}$ 以上の場合には粒子密度測定誤差は 65% 以下、湿度の測定誤差は湿度で 1.2% 以下であった。粒径が $0.4\mu\text{m}$ 未満の場合は測定精度が大幅に低下した。

II. これまでに開発してきた装置を用いて試験用蒸気（低圧）タービン中の水滴の粒径分布・湿度分布を測定することができた。その結果、次のことがわかった。

1. 平均湿度が大きくなるにつれて、翼先端部の湿度が著しく増加する。
2. 湿度が大きい翼先端部では、大きい粒子の含まれる割合が大きい。
3. 粒子の大部分は $1\mu\text{m}$ 以下で、平均粒径は $0.4\sim 0.6\mu\text{m}$ であった。
4. 粒径分布は対数正規分布に近い型をしており、粒子の径の成長速度が粒径に比例していることを示していると考えられる。

以上のタービン中の水滴の測定結果より、翼先端部のみに浸食防止策やドレイン除去の対策を講じれば良いことなどがわかった。

最後に、本研究にあたり御指導・御支援をいただいた(株)東芝小向工場・四宮康雄氏、(株)東芝総合研究所・浅野都司氏、重政隆氏、(株)東芝京浜事業所・松佐彰一氏、ならびに関係各位に深く感謝の意を表します。

(昭和 62 年 11 月 27 日受付)

文 献

- (1) 辰野:「微小粒径測定技術」電学誌 107, 10, 1015 (昭 62-10)
- (2) K. Tatsuno & S. Nagao: "Water Droplet Size Measurements in an Experimental Steam Turbine Using an Optical Fiber Droplet Sizer", *Trans. ASME, J. Heat Transfer* 108, 937 (1986-11)
- (3) 辰野:「光ファイバを用いた粒径測定装置の開発」計測自動制御学会論文集 21, 4, 389 (1985)
- (4) 辰野:「Ar レーザを用いた光ファイバ粒径測定装置」電気学会生産設備管理研究会資料 PFC-87-9 (1987)
- (5) P. T. Walters: "Wetness and Efficiency Measurements in L. P. Turbines with an Optical Probe as an Aid to Improving Performance" *Trans. ASME, J. Eng. Turbine and Power* 109, 1, 85 (1987)
- (6) H. C. Van de Hulst: "Light Scattering by Small Particles" Dover Publications, New York, 114 (1983)
- (7) 辰野:「レーザを用いた粒径測定装置における散乱光強度分布から粒径分布への変換法」計測自動制御学会論文集 19, 10, 53 (1983)