多段分級式粒度及び濃度自動測定装置の開発

小野 哲夫*, 小谷田 一男*, 牧野 尚夫*, 洪 公 弘**
齊藤 和男**, 渡辺 金之助**, 井伊谷 鋼一***

Development of an On-line Measuring Apparatus of Particle Size Distribution and Concentration with a Three-stage Classifier

by

Tetsuo ONO[†], Kazuo KOYATA[†], Hisao MAKINO[†], G. H. HONG^{††}

Kazuo SAITO^{††}, Kinnosuke WATANABE^{††} and Koichi IINOYA^{†††}

It is very important to measure both the concentration and size distribution of particles in flue gas by an on-line method. In particular, it is required to measure the particle size distribution of pulverized coal to control combustion conditions of pulverized coal and the performance of a coal pulverizer.

In this research, an on-line measuring apparatus of both particle size distribution and concentration has been developed. This apparatus consists of three-stage classifiers and load cells to weigh the classified particles. The particle size distribution is calculated from cut sizes of the classifiers and weight fractions of the classified particles. The overall particle concentration is decided from the total weight of the collected particles and the total volume of induced gas. The particle size distributions calculated from this method are in fairly good agreement with the one measured by a conventional light diffraction method.

Key Words : Particle Size Distribution, On-line Measurement, Three Stage Classification, Isokinetic Sampling, Cyclone, Louver

1. 緒 言

気流中粒子のオンライン粒度計測は、粉碎機器の性能評価、反応装置の運転管理などにおいて極めて重要である。特に、石炭火力発電所における、ボイラー入口部の微粉炭の粒度の測定は、ミルの性能管理および

火炉での燃焼管理の上で重要な操作となっている。

これまで、種々の原理に基づくオンライン粒度測定装置が提案されてきた¹⁾が、実ボイラーで使用されている例はあまり多くない。近年、レーザー回折式の粒度分布測定装置が広く用いられるようになり、それをオンライン計測に利用する方式もあるが、測定試料をサンプリングして少量にする必要があり、縮分操作をも自動で実施しなければならないため、実用化するに

1994年 9月 7日受付

化学工学会米沢大会(1990年7月米沢)にて一部発表

* (財)電力中央研究所横須賀研究所
(〒240-01 横須賀市長坂 2-6-1)
TEL. 0468-56-2121

** 三協バイオテック(株)
(〒164 東京都中野区中央 1-42-51 I・C・Kビル)
TEL. 03-3227-2011

*** (社)日本粉体工業技術協会
(〒606 京都市左京区田中関田町 27 思文閣会館)
TEL. 075-751-0195, 761-7123

† Central Res. Inst. of Electric Power Industry, Yokosuka Res. Lab.,
(2-6-1, Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-01)

†† Sankyo Pio-Tech Co., Ltd. (I・C・K Bldg. 42-5 Chuo 1-chome, Nakano-ku Tokyo, 164)

††† The Assoc. of Powder Process Industry and Eng.,
Japan. (Shibunkaku-Kaikan, 2-7, Tanakasekiden-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606)

はかなりの困難が伴う。

筆者らは、分級径の異なる分級器を直列に複数段設置し、その捕集量を自動的に計量することで粒度分布を求める三段分級式粒度分布測定器を考案し、その性能を基礎実験により評価検討した。さらに、本装置と固気二相流の圧力損失から気体流量と粉体流量の測定を行う差圧式粉体流量計²⁾(商品名：ニューマライン流量計)を組み合せ、濃度と粒度の同時計測が可能となる濃度・粒度自動測定装置を製作し、実ボイラーへの適用を試みた。

本文では、開発した気流中濃度・粒度自動計測装置の構造、および測定精度の検討結果を述べると共に、実際の石炭火力への適用例を報告する。

2. 三段分級式粒度分布測定器の基本概念

本粒度分布測定器は、分級径の異なる3つの分級器を直列に接続している。各分級器の分級径が既知であれば、それらの粗粉収率より各分級径(D_{pc})に対する累積ふるい上重量割合(R)を求めることができる。粗粉収率を求めるにあたっては、各分級器の粗粉採取量と最終段も通過した微粉捕集用サイクロンの採取量とを自動で計量し、その総和から収率を計算する方法を用いた。

本方式は、通常分級式粒度分布測定器に比べ三段と分級段が少ないが、一般に粉碎物の粒度はRosin-Rammler分布に従うと言われているので、3点の分級径に対する累積ふるい上重量割合が測定できれば、それを基に最小自乗法による直線近似を行い、50%径 D_{p50} と分布の勾配(均等数 n)を求めることができる。

なお、分級器の分級効率が余り高くなくても、分級径における真の微粉の粗粉側への混入量と真の粗粉の微粉側への混入量がほぼ同一とみなされれば、粒度分布の推定には差し支えないので、この考え方が本法の基礎となっている。

3. 三段分級式粒度分布測定器の構造と性能

試作した粒度分布測定装置の構成をFig. 1に示す。測定粉体としては石炭火力発電所の微粉炭($D_{p50} \approx 40 \mu\text{m}$)を主な対象とするため、各分級器の分級径を約70, 30および $10 \mu\text{m}$ とした。分級径の大きさの順にルーバ分級器(I)と(II)、およびサイクロン(I)の三つの分級器を用い、 $10 \mu\text{m}$ 以下のサイクロン(I)通過粒子をほぼ全量捕集するためのサイクロン(II)を最終段に設置してある。

各分級器の粗粉粒子は各捕集ホッパー⑦に貯えら

Fig. 1 Measuring apparatus of particle size distribution with three-stage classifiers

れ、サンプリング終了後ホッパー下部ゲートを開口し、捕集粒子は計量カップ⑧に落ち、ロードセルにより重量を測定する。その後カップは反転し、捕集粒子を系外に取り出した後、ゲートおよびカップは元の状態に復帰する。なお、必要なサンプリング周期に応じて上記の一連の操作を正確に行うようマイコンにより制御し、各分級器の分級径と捕集重量から粒度分布が計算される。

さらに、図には示してないが分級器壁および配管壁への粒子付着防止用に、各分級器には空気式自動敲打装置およびパイプレーター(1箇所)が設置してある。粒度分布測定器本体の大きさは試料回収部を含めて高さ1520mm、幅510mm、奥行き660mmである。

3. 1 ルーバ分級器の特性

慣性集じん機として使用されてきたルーバは、分級器³⁾としても使用できる。ルーバの設計手法についてはいまだ十分には確立されていないものの、宇敷ら^{4,5)}はルーバ羽根列の設計基準を得ており、ここではそれらの結果を参考にしてFig. 2のような片側ルーバを設計・試作した。なお、図の表中で N は羽根段数、 L は奥行きである。

Fig. 3は、ルーバ分級器(I)について実験を行い、供試粉および粗粉の粒度分布を測定し、粗粉収率より部分分離効率を求めた結果を示したものである。図中、 Q は吸引風量、 m は微粉炭濃度である。供試粉と粗粉の粒度分布測定にはレーザー回折式粒度分析計(SK-LASER:セイシン企業製)を用い、部分分離効

Fig. 2 Dimensions of louver classifiers

Fig. 3 Partial separation efficiencies of louver (I) and cyclone (I)

率 $\Delta\eta$ は次式より求めた。

$$\Delta\eta(\overline{D}_{pi}) = \frac{\eta_c \{R_c(D_{pi+1}) - R_c(D_{pi})\}}{R_0(D_{pi+1}) - R_0(D_{pi})} \quad (1)$$

ただし

$$\overline{D}_{pi} = \sqrt{D_{pi} D_{pi+1}}$$

ここで、 η_c は粗粉収率、 $R_0(D_{pi})$ と $R_c(D_{pi})$ はそれぞれ供試粉および粗粉の粒径 D_{pi} における累積ふるい上重量割合である。Fig. 3は、粒度分布の異なる三種類の微粉炭についての結果であるが、S.I.(Sharpness Index) = $D_{p75}/D_{p25} \approx 2.9$ となり、分級の精度は高くないが、供試粉の粒度分布が異なっても安定した分級が行われており、粒度分布測定装置として用いるには十

分な性能を持つことがわかる。

一方、ルーバー(II)においては分級径を小さくする必要があるので、入口流速を増加し、羽根間隔の小さい構造となるよう³⁻⁵⁾ Fig. 2に示す形状とした。

3. 2 サイクロン分級器の特性

サイクロン(I)としては、Fig. 4の寸法比のものを試作した。その部分分離効率をルーバーの場合と同様にして求めた結果をFig. 3に示す。分級精度はあまりよくないが、異なる粒度を持つ粉体に対してもほぼ安定した分級が行われることが明らかになった。

また、Fig. 4には、本測定装置の最終段に設置したサイクロン(II)の寸法比をも示すが、捕集率は吸引風量 $175 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ の条件で、微粉炭供給量の99.6%であり、充分実用になると考えられる。

Unit:mm

	L ₁	L ₂	L ₃	φD ₁	φD ₂	φD ₃	B ₁ ×B ₂	Remarks
Cyclone (I)	105	80	110	50	30	15	14×13	for classifier
Cyclone (II)	120	25	30	50	15	18	φ15	for dust collector

Fig. 4 Dimens of cyclone classifier and final dust collector

3. 3 各分級器の分級径

各分級器の分級径を決定するために、まず、小型のテーブルフィーダーから気流中に供給した粒径既知の微粉炭(Coal(1))を回転羽根式の分散器で分散した後、三段分級式粒度分布測定装置に導入し、各分級器で捕集した微粉炭重量を測定した。この時の供給濃度 m は 56.8 g/m_N^3 、吸引風量は $Q=154 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ であった。供試粉と各分級器での捕集粉の粒度分布を測定した結果をFig. 5に示す。各捕集粉の50%径はルーバー(I)より順番に75, 49, 28, $8 \mu\text{m}$ となっており、三

Fig. 5 Particle size distributions of classified pulverized coal(laser diffraction method)

段分級が確実に行われていることがわかる。その際の各分級器の累積重量捕集率(**Table 1**)と供試粉の粒度分布の測定結果とを用いて, **Fig. 6**に示すように各分級器の分級径が求められる。Table 1には求められた

Table 1 Cumulative coarse fraction and cut size of classifiers

Classifier	Cumulative coarse fraction $R(\%)$		Cut size $D_{pc}(\mu m)$
Louver(I)	(1)40.2	average 40.6	50
	(2)40.9		
Louver(II)	(1)53.3	53.8	31
	(2)54.2		
Cyclone(I)	(1)89.7	89.9	6
	(2)90.1		

Table 2 Particle size distribution

Sample	Cumulative coarse fraction			50%particle diameter		Constant of Rosin-Rammler distribution	
	$R(\%)$			$D_{p50}(\mu m)$		$n(-)$	
	Louver(I)	Louver(II)	Cyclone(I)	This method	Laser diff. method	This method	Laser diff. method
Pulverized coal(1)	40.6	53.8	89.9	37	34	1.024	1.133
Pulverized coal(2)	47.8	63.0	92.7	46	45	1.034	1.079
Pulverized coal(3)	38.9	54.4	90.6	36	31	1.081	0.977

Fig. 6 Determination of cut sizes of classifiers

分級径をも示す。

本方式の測定精度を評価するため、粒度分布の異なる2種類の微粉炭(Coal(2), および(3))を供試粉として粒度分布測定を実施した。実験結果を**Table 2**および**Fig. 7**に示す。図示されるように、試作した粒度分布測定装置による結果と、レーザー式粒度分析計による結果とは50%径、分布とも良好に一致し、本装置は粒度分布測定装置として十分、使用可能であることがわかった。

3. 4 分級径に及ぼす吸引風量および微粉炭濃度の影響

分級器は吸引風量や微粉炭濃度によって分級径が異なる。これらの分級径に及ぼす影響の検討結果を**Fig. 8**に示す。図より明らかなように分級径は風量と共に大きくなり、濃度が高ければ小さくなっている。この結果を基に、本実験範囲内における分級径(D_{pc})は次

Fig. 7 Comparison of particle size distributions with this measuring apparatus and a laser diffraction method for pulverized coal(2)

Fig. 8 Effects of air flow rate(white symbols) and particle concentration(black symbols) on cut size of the classifiers

式で整理される。

$$D_{pc} = a \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^b \left(\frac{m}{m_0} \right)^{-c} \quad (2)$$

ただし、分級径 $D_{pc}(\mu\text{m})$ 、吸引風量 $Q = (93 \sim 154) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 、基準吸引風量 $Q_0 = 100 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 、粉塵濃度 $m = 57 \sim 379 \text{ g}/\text{m}^3$ 、基準粉塵濃度 $m_0 = 100 \text{ g}/\text{m}^3$ である。また、 a, b, c は係数であり、Table 3 に各分級器の値を示す。これらの係数を用いて Eq. (2) より分級径を求めた結果と、レーザー回折法による測定値から分級径を求めた結果との比較をすると Fig.

Table 3 Coefficient a, b, c in Eq. (2)

Classifier	Coefficient		
	a	b	c
Louver(I)	39.8	0.396	0.094
Louver(II)	24.6	0.466	0.120
Cyclone(I)	3.56	0.777	0.512

Fig. 9 Comparison of cut sizes of the classifiers by Eq. (2) and a laser diffraction method

9が得られ、ほぼ良好な相関関係が得られている。

4. オンライン濃度・粒度自動測定装置の構成とその性能

上述のように、三段分級式粒度分布測定器の性能を基礎実験で検討してほぼ良好な結果が得られたので、差圧式粉体流量計と組み合わせたオンライン濃度・粒度自動測定装置を試作し、石炭ボイラーの燃料管で微粉炭の測定を行った。試作したオンライン濃度・粒度自動測定装置の構成図を Fig. 10 に示す。主な測定対象である石炭火力の燃料管は直径300mm程度と非常に大きいため、図に示すように濃度・粒度の計測はサンプリング方式で実施した。サンプリング管は静圧平衡型の内径 $\phi 11.4$ の等速吸引ノズルで、静圧測定用の圧力タップは内径 $\phi 2.0$ である。タップ取付け位置はノズル内静圧測定用と燃料管内静圧測定用について、それぞれノズル先端から5mmおよび60mm⁶⁾とした。圧力タップの粒子による閉塞を防止するために、エアバージラインを設けてある。測定装置の前には、等速吸引用のコントロールバルブがあり、ノズル内外の静圧が等しくなるようにマイコンで制御される。また、図には示していないがサンプリングを行わないブロワー停止中に、粒子が吸引ノズル内に飛び込んでくるのを防ぐためのボールバルブが、ノズルのすぐ後に設けて

Fig. 10 Schematic diagram of the on-line measuring unit

ある。測定にあたっては所定の位置にノズルを設置した後、ブロワーを駆動させるとともに、ノズル後のボールバルブを開けてサンプリングを開始する。コントロールバルブにより等速吸引条件に設定した後、ブロワー前のロータメーターで吸引空気量を読み取る。所定時間サンプリングを行った後にバルブを閉めると同時にブロワを停止する。その後、各分級器で捕集された試料重量、分級径、累積ふるい上重量割合および50%平均粒子径がプリントアウトされる。なお、微粉炭濃度 m は濃度検出器により瞬時値および経時変化が得られ、吸引風量、サンプリング時間および各分級器での捕集総重量より測定時間内の濃度平均値が求められる。

また、搬送空気中に含まれる水分の凝縮による配管系への微粉炭付着を防止するため、粒度分布測定装置本体をはじめ、測定装置管路全体をリボンヒータで約60℃前後に加温できる構造とした。この加温の分級径

に及ぼす影響は、実験室の検討で室温から60℃の範囲ではほとんど認められなかったもので、Eq.(2)において温度補正は行わなかった。さらに、測定開始時における吸引ノズルの内外の静圧が等しくなるまでの所要時間は約10秒程度と短く、等速吸引の応答性は極めて良好であった。

本試作装置を、石炭火力発電所のボイラ燃料管を流れる実際の微粉炭の計測に用い、Coal(1), (2), (3)とは性状の異なる微粉炭に対する性能を検証した。

Table 4に、本装置で計測した微粉炭の50%径、およびRosin-Rammler分布における均等数 n の値と、レーザー式粒度分析計で測定したそれらの値を比較した結果の一例を計測条件とともに示し、Fig. 11には、50%径における本装置とレーザー式との測定値の比較を示す。平均粒子径、均等数共に、両者の測定値には若干のばらつきは見られるものの、ほぼ良好な一致が得

Table 4 Particle size distribution obtained by this on-line measuring unit

Air flow rate Q (m^3/min)	Particle concentration m (g/m^3)	50% particle diameter $D_{p50}(\mu\text{m})$		Distribution constant $n(-)$	
		This method	Laser diff. method	This method	Laser diff. method
140×10^{-3}	138.1	22.0	25.2	1.002	1.193
153×10^{-3}	72.3	29.0	23.9	1.045	1.139
134×10^{-3}	81.3	29.4	29.0	1.059	1.121
137×10^{-3}	161.8	30.3	33.2	1.078	1.183
135×10^{-3}	94.6	30.7	28.9	1.088	1.121
150×10^{-3}	136.7	31.3	36.6	1.145	1.159
154×10^{-3}	79.7	33.1	28.7	1.188	1.131
140×10^{-3}	212.9	45.3	39.7	0.898	1.092
122×10^{-3}	541.7	69.1	65.8	0.953	1.077
142×10^{-3}	434.1	73.4	76.4	1.062	1.100

Fig. 11 Comparison of 50% particle diameters by a laser diffraction method and this on-line measuring apparatus

Fig. 12 Relation between powder mass flow rates measured by the Pneumaline and this load cell method

られている。

また、**Fig. 12**に3段の分級器および最終の全量捕集用サイクロンで捕集した微粉炭の総重量から求められた粉体流量と、連続監視用の差圧式粉体流量計で求めた流量との関係を示す。差圧式粉体流量計の差圧から流量への変換のための検定はCoal(1)で行っているため、石炭銘柄が異なる実ボイラでは密度や粒径分布が異なることから、重量法と完全な一致がみられない。しかし、直線関係は良好であり、粉体流量の経時変化監視用としては十分な性能を有しているといえる。

以上の結果より、開発した本測定装置はオンライン用の粒度分布測定装置として十分使用できることが明らかになった。

5. 結 言

三段分級式のオンライン粒度分布測定装置を試作し、微粉炭を対象に性能の検討を行い、粒度分布測定装置として十分な精度を有していることを明らかにすると共に、装置の操作条件が測定結果に及ぼす影響を調べて、幅広い使用条件でも正確な測定が行えることを明らかにした。

さらに、本装置とニューマライン流量計を組み合わせた濃度・粒度自動測定装置を製作し、実際の石炭火力発電所ボイラー入口部の燃料管内の微粉炭のオンライン濃度・粒度測定を行い、実機での測定に十分適用できることを明らかにした。

Nomenclature

a	: coefficient in Eq.(2)	(m)		size distribution	(-)
b	: coefficient in Eq.(2)	(-)	Q	: gas flow rate	($\text{m}_\text{N}^3/\text{s}$)
c	: coefficient in Eq.(2)	(-)	Q_0	: standard gas flow rate	($\text{m}_\text{N}^3/\text{s}$)
D_p	: particle diameter	(m)	R_0	: cumulative oversize fraction of feed particle	(%)
$D_{\text{p}50}$	: mean particle diameter	(m)			
D_pc	: cut size of classifier	(m)	R_c	: cumulative oversize fraction of coarse particle	(%)
m	: particle concentration	($\text{kg}/\text{m}_\text{N}^3$)			
m_0	: standard particle concentration	($\text{kg}/\text{m}_\text{N}^3$)	η_c	: total recovery of coarse particles	(-)
N	: number of louver blades	(-)	$\Delta\eta$	: partial separation efficiency	(-)
n	: distribution constant of the Rosin-Rammler				

References

- 1) Iinoya, K., H. Masuda and K. Watanabe : Powder and Bulk Solid Handling Processes, Instrumentation and Control, p.151, Marcel Dekker, Inc., New York(1988)
- 2) Watanabe, K. and K. Saito : Proc. of Intl. Conf. on Mechanics of Two-phase Flow, p.134, National Taiwan Univ., Taipei(1989)
- 3) Iinoya, K., N. Kimura and Z. Tanaka ; *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 1, 114(1964)
- 4) Ushiki, K., Z. Tanaka and K. Iinoya ; *Kagaku Kogaku*, **38**, 151(1974)
- 5) Ushiki, K., H. Sawada and K. Iinoya ; *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **5**, 424(1974)
- 6) Chiba, T. and K. Hoshizawa ; *The Thermal Power*, **12**, 49(1961)