パルスジェット用ろ布における圧力損失特性の 経時変化に及ぼすろ布表面状態の影響

Effect of Surface Condition of Fabric Filter on Pressure Drop Evolution in Repeated Pulse-jet Cleaning

姚 宇平,^{a*} 和田 匡司,^b 毛 寧,^c 神谷 秀博,^a 金岡 千嘉男^b

Yuping Yao, Masashi Wada, Ning Mao, Hidehiro Kamiya, Chikao Kanaoka

Received 11 April 2007 ; Accepted 5 November 2007

A standard testing method was applied to measure the evolutions of pressure drop during the dust collection by five fabric filters with different surface treatments on a base filtration material. The measurement was repeated until the number of pulse-jet cleaning reaches to 100. In general, the filtration cycle of a pulse jet cleaning filter consists of three stages, i.e., inner filtration, uniform dust layer formation and surface filtration. However, it was found that the inner filtration stage does not appear when the base filter is laminated with a membrane and entangled fiber layer. The present paper analyzed and discussed the effects of filter surface characteristics and base material structure on the pressure drop evolution during a filtration cycle in terms of the duration of three stages.

Keywords : Fabric filter, Surface treatment, Pressure drop characteristic, Pulse-jet cleaning

1. 緒 言

バグフィルターは、排ガス中からの粒子除去性能に優れ、集塵装置として電気集塵装置とともに広く使用されている。長期間使用されるろ布は、粉塵の捕集と払い落としが繰り返されるので、払い落とし特性及び圧力損失特性の時間変化が特に重要であり、多くの因子の影響を受ける。

中井ら¹⁾はガラス繊維ろ布の捕集特性、Silvaら²⁾はろ過速度が粉塵層の形成及び払い落としに及ぼす影響、金岡ら³⁾は平板型ろ布の払い落としプロセス、

Calleら⁴⁾は粉塵堆積とサイクル時間について報告している。さらに、ろ布の払い落としに対して、残留粉塵の量や堆積状態^{5~9)}、逆洗空気噴出ノズルの穴径及びその設置位置^{6~12)}、パルス用圧縮空気の貯蔵タンクの容量および圧力^{8~16)}、パルス持続時間^{12, 15)}、ろ過速度^{15~18)}が及ぼす影響等に関する報告がある。さらに著者らは、毛焼き処理のPPS製ろ布を用いて、集塵・払い落とし操作を繰り返して行い、ある払い落とし操作から次の払い落とし操作までの1集塵サイクル中における圧力損失の時間変化を詳細に検討し、粒子の捕集が、ろ布の内部ろ過、内部ろ過から表面ろ過への遷移、表面ろ過の3段階に分けられることを報告した¹⁹⁾。

ろ布は、払い落としと性能・粒子捕集性能の向上や長寿命化を目的に表面処理が施されることが多い。表面処理には、複層加工、毛焼き処理、鏡面処理などがあるが、表面状態は処理法により異なるので圧力損失特性の時間変化や払い落とし特性が異なると予想される。しかし、圧力損失特性を表面状態と結びつけた報告は見当たらない。

そこで本研究では、表面処理および基材の異なる5種類のろ布を用い、集塵と払い落としの繰り返し実験

a 東京農工大学 生物システム応用科学府
(〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16) TEL 042-388-7068
BASE, Tokyo, University of Agriculture and Technology
(2-24-16, Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan)

b 石川工業高等専門学校
(〒929-0392 石川県河北郡津幡町字北中条) TEL 076-288-8161
Ishikawa National College of Technology
(Kitacujo, Tsubata, Kahokugun, Ishikawa 929-0392, Japan)

c 金沢大学 自然科学研究科
(〒920-1192 石川県金沢市角間町) TEL 076-234-6823
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University
(Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan)

*現 中国浙江菲達環境工程有限公司
(〒311800 中国浙江省諸暨市望雲路88号)

Table 1 Physical properties of filter medium

Medium		A	B	C	D	E
Base	Material	PPS				PI
	Fiber diameter (μm)	14				14
	Thickness (mm)	—	—	—	1.6	2.0
Surface	Surface treatment	membrane	entangled fiber layer	singed	calendered	singed
	Material	PTFE	PTFE	—	—	—
	Fiber diameter (μm)	0.1	1 - 4	—	—	—
	Thickness (mm)	10	100	—	—	—
Weight (kg/m^2)		0.50	0.70	0.53	0.51	0.50
Porosity (—)		—	—	0.78	0.76	0.85
Permeability ($(\text{cm}^3/\text{s})/\text{cm}^2$)		7	4	21	18	18

を行い、ろ布の表面状態が圧力損失特性の経時変化等へ及ぼす影響について検討した。

2. 実 験

2.1 試験用ろ布

圧力損失特性には、表面状態として表面の平滑性や表面繊維構造等が影響する可能性が考えられる。本研究では、表面状態に特徴的な違いがあるろ布として、基材の上に粒子剥離性・粒子捕集性の優れた表層を設けた複層加工ろ布から2種類、単層であるが表面が平滑になるよう処理した平滑処理ろ布から2種類のろ布を選定し、また、比較のため表面処理が同じで基材の種類が異なるろ布の計5種類のろ布を用いた。各ろ布の物性を **Table 1** に、ろ布表面の走査型電子顕微鏡写真を **Fig. 1** に示す。

ろ布Aは厚み $10\mu\text{m}$ 程度の PTFE 膜による複層加工ろ布で、ろ布表面には PTFE 膜を延伸して得られた微細繊維が均一に形成され分布しており、ろ布表面は平滑で表面繊維構造は密である。ろ布Bは、PTFE 膜を細裂して作った $1\sim4\mu\text{m}$ 程度の分枝繊維を水流により約 $100\mu\text{m}$ 程度の厚さで基材に包絡した複層加工ろ布である。ろ布表面には分枝繊維の主幹と思われる大きい繊維も含め、表面繊維の繊維径に幅広い分布が見られる。そのため、ろ布表面は平滑で多少の凹凸は見られるが表面繊維構造は密である。ろ布Cは平滑化処理ろ布で、表面のケバを焼く毛焼き処理を施したろ布である。表面には所々、融着繊維が見られ、ろ布全体に比較的均一に分布している。また、単層ろ布であるので繊維径は大きく表面繊維構造は粗である。ろ布Dも平滑化処理ろ布で、加熱ローラーで鏡面処理を施したものである。表面には融着繊維が多く、開口面積が狭くなっている。また、開口部は不均一に分布している。表面繊維構造はCと同様に粗である。ろ布Eは、Cと同じ毛焼き処理ろ布だが、他のろ布と違いPI基材のろ布である。PPS製ろ布と平均繊維径はほぼ同じであるが、断面形状が円形ではなく非円形であり

Fig. 1 Image of filter surface

Fig. 2 Schematic of VDI type test equipment

Table 2 Experimental conditions

Dust type	JIS # 10
Dust mean diameter (μm)	5.2
Dust standard deviation (μm)	1.2
Filtration velocity (cm/s)	5
Dust concentration (g/m^3)	5
Tank pressure (kPa)	500
Pulse duration (s)	0.25
Pressure drop before cleaning (Pa)	1000

ろ布の空隙率はやや大きい。ろ布表面についてはCと同様である。

表面に PTFE 繊維層のあるろ布 B の目付けは高いが、他のろ布の目付けはほぼ同じである。ガス通気度は、複層ろ布が小さく単層ろ布は大きく、同じ基材、目付けでも処理により差がある。

2.2 実験方法

実験では、Fig. 2 に示す VDI3926 に準拠した標準ろ布評価装置²⁰⁾に新品の試験用ろ布を装着し、試験用粉体 JIS#10 (フライアッシュ、平均粒子径 $5.2\mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 1.2) を 5g/m^3 の一定濃度で供給し、ろ過速度 5cm/s で、ろ布の圧力損失が 1kPa に到達するまで粉塵を捕集した。その後、ろ過気流は止めずにろ布後方に設置した噴射ノズルより 500kPa の加圧空気を 250ms 噴射し、堆積粉塵の逆洗、払い落としを行う。以上の集塵と払い落としのサイクルを 100 回繰り返し行った。実験時間中、ろ布の圧力損失は 1Hz で測定した。また、供給粉塵濃度の安定性はろ布上流に設置した光散乱濃度計で常時監視した。実験の主な条件を Table 2 に示す。

3. 実験結果及び考察

ろ布 A, C, D について、集塵時の圧力損失 Δp の時間変化を払い落とし回数 N をパラメータとして Figs. 3~5 に示す。

ろ布 A, C, D の圧力損失変化は、 $N=1$ の場合、集塵開始直後は緩やかで、ある程度時間が経過した後に増加する傾向がある。これは、新しいろ布では粒子がろ布内部に侵入し、表面にケーキ層を形成するまでに時間がかかるためと考えられる。 $N=10, 100$ で比較すると、圧力損失の時間変化パターンはろ布により

異なる。既報¹⁹⁾では、ろ布の圧力損失の時間的変化率により集塵の段階を、 $\frac{d\Delta p}{dt}$ が時間とともに増加し下

に凸の圧力損失変化をする内部ろ過、 $\frac{d\Delta p}{dt}$ が時間とともに減少し上に凸の圧力損失変化をする内部ろ過から均一な粉塵層が形成される表面ろ過への遷移、 $\frac{d\Delta p}{dt}$

が一定となり直線的圧力損失変化をする表面ろ過段階に分類した。この傾向は、ろ布 C, D では観察されたが、ろ布 A では払い落とし直後から圧力損失が上に凸な増加をした後に、時間に対して直線的に増加しており、 $N=10$ では内部ろ過はほとんど起きていないと考えられる。また、ろ布 D では、 $N=10$ の $t=300\text{s}$ で見られるように、表面ろ過段階中に階段状に跳ね上がる現象が時々観察される。これは、前述のように表面の融着繊維により開口部が不均一に分布しているため、気流が一部の開口部に集中する。粉塵が選択的に開口部に堆積・閉鎖するため、圧力損失が急増し、ある圧力損失に達すると、他の部位に気流が流れるため、このようなステップ状の圧力損失変化が観察されたと考えられる。複層加工のろ布 B はろ布 A と、毛焼き処理のろ布 E はろ布 C, D と同じ傾向を示し、表面

Fig. 3 Change in pressure drop with time (filter A)

Fig. 4 Changing of pressure drop with time (filter C)

処理状態が同様であれば圧力損失の経時変化傾向が似ている。次に、払い落とし回数の増加に伴う集じん・払い落とし特性の変化に及ぼすろ布の種類の影響を検討した。

a) 集塵サイクル時間の払い落とし回数に伴う変化

集塵サイクル時間 T は払い落とし後圧力損失 Δp が 1kPa に達し、次の払い落としを行うまでに要した時間で、Fig. 6 に各ろ布の払い落とし回数に伴う変化を示す。いずれのろ布も初期の段階で T は急激に短くなるが、その後は、穏やかに減少している。 $N=100$ では、E が最も長く、C と A はほぼ等しく、B、D の順に短くなっている。フィルタの処理方法との関係を見ると、毛焼き処理 (C、E) が長く、鏡面処理 (D) が短くなる傾向がある。

b) 残留圧力損失の払い落とし回数に伴う変化

残留圧力損失は払い落とし直後の圧力損失で、Figs. 3~5 では各曲線の $t=0$ での圧力損失に対応する値である。Fig. 7 に各ろ布の残留圧力損失増加量 ΔP_r の払い落とし回数 N に伴う変化の平均的挙動を、Table 3 に実験終了後の残留粉塵質量 m を示す。なお、ここでは測定値から清浄ろ布の初期圧力損失 ΔP_0 (Figs. 3~5 に示した $N=1$, $t=0$ での値) を差し引い

Fig. 5 Change of pressure drop with time (filter D)

Fig. 6 Relation between cycle time and number of filtration cycle

Fig. 7 Relation between increase of residual pressure drop and number of filtration cycle

た値 (測定圧力損失 - 清浄ろ布圧力損失) を残留圧力損失増加量 ΔP_r とした。

残留圧力損失増加量 ΔP_r は初期に急激に増加するが、払い落とし回数とともに緩やかになっている。 $N=100$ では、 ΔP_r は D、C、E、B、A の順に大きくなり、単層ろ布 (C、D、E) と複層ろ布 (A、B) の 2 グループに分かれる結果となった。ただし、経験的には単層ろ布は圧力損失の初期値が低い、払い落とし回数に伴う残留圧力損失の増加が大きく安定にも時間がかかるのに対して、複層加工ろ布ではろ布自身の圧力

Table 3 Mass of residual dust, m (g/m²)

Filter A	Filter B	Filter C	Filter D	Filter E
24.0	67.0	98.0	101.0	130.0

After 100cycles
JIS # 10 fly ash
 $v=5\text{cm/s}$
 $C=5\text{g/m}^3$
 $P_t=500\text{kPa}$

Fig. 8 Relation between duration time of stage I and number of filtration cycle

損失は高いが、残留圧力損失は早い時期に安定し、長期的には単層ろ布より低いと言われている。しかし、本報の結果では単層ろ布に比べ複層加工ろ布の ΔP_r が常に高く安定もしていない。同一ろ布の場合、残留粉塵が多いほど残留圧力損失が大きいと言われているが^{19, 21, 22)}、残留粉塵量 m を示した Table 3 では、 ΔP_r の大きい複層ろ布 A, B の残留粉塵量 m のほうが単層ろ布 C, D, E の残留粉塵質量 m よりも小さい。詳細な計測は出来なかったが、実験終了後のろ布断面を顕微鏡で観察したところ、粉塵はろ布表面のごく近傍にしか観察されなかった。顕微鏡観察ではろ布間の粒子侵入深さの差を計測することまではできなかったが、エアフィルタの捕集理論²³⁾を用いて考えれば、以下のように考えることができる。複層ろ布は表面層が数 μm 以下の微細繊維で構成されているため、本実験の粒子径、ろ過条件では、表面層のごく表面近傍に集中的に捕集されるため、 ΔP_r が大きいと考えられる。一方、単層ろ布の繊維径は大きく、複層ろ布よりは深くまで粒子が侵入できるため ΔP_r が小さいと考えられる。

c) 内部ろ過段階中の圧力損失曲線の払い落とし回数に伴う変化

内部ろ過段階が明確に観察されたろ布 C, D, E について、内部ろ過段階の持続時間 t_I 及びこの時間内での圧力損失増加幅 ΔP_I ($\Delta P_I = \Delta p(t_I) - \Delta p(t=0)$) の払い落とし回数に伴う変化の平均的挙動を Figs. 8, 9 に示す。

内部ろ過段階は、複層ろ布 (A, B) ではほとんど観察されない。単層のろ布については同じ PPS 基材の C, D はほぼ同じ変化を示す。一方、PI 基材でろ布の空間率の大きい単層ろ布の E では C, D に比べ t_I の値が大きく、安定するまでも多くの回数がかかる。内

Fig. 9 Relation between increase of pressure drop in stage I and number of filtration cycle

部ろ過段階での圧力損失増加 Δp_I は、E, C, D の順に大きく、基材の構造より毛焼き処理 (E, C)、鏡面処理 (D) と表面処理別の順となっている。ろ布 D と C は t_I はほぼ等しいが、 Δp_I は大きく異なる。これは、前述したように表面の開口部に気流が集中するため、侵入が完了するまでの時間 t_I はろ布 C, D では同程度だが、D では限られた開口部に粒子が深く侵入するため、 ΔP_I が大きくなると考えられる。ろ布 E は空間率が大きいので、内部ろ過時間 t_I が長くなるが、ろ布内部に空隙がある段階で表面ろ過に移行するため、 ΔP_I は小さいと考えられる。

d) 遷移段階中の圧力損失曲線の払い落とし回数に伴う変化

内部ろ過から表面ろ過への遷移段階の持続時間 t_{II} の平均的挙動を Fig. 10 に、この時間内での増加圧力損失 Δp_{II} の払い落とし回数に伴う変化の平均的挙動を Fig. 11 に示す。遷移段階の持続時間 t_{II} は A, B, E, C, D の順に長く、E と C はほぼ同等で、複層加工 (A, B)、毛焼き処理 (C, E)、鏡面処理 (D) と表面

Fig. 10 Relation between duration time of stage II and number of filtration cycle

Fig. 11 Relation between increase of pressure drop in stage II and number of filtration cycle

処理別の順となっている。複層ろ布では、ろ布Aが初期から、ろ布Bも少ない払い落とし回数で一定値を示しているのに対し、単層ろ布(C, E, D)では一定となるまでに必要な払い落とし回数が多い。遷移段階の圧力損失 Δp_{II} は、A, E, C, B, Dの順で増加し、EとCはほぼ同等である。つまり、表面近傍の繊維径が小さいろ布ほど t_{II} が短く、また、融着繊維が多いろ布ほど t_{II} が長く、 t_{II} の長いものは Δp_{II} も相対的に高くなる傾向がある。これは、試験終了後の各ろ布表面に粉塵層が部分的に残留した状態は見られなかったので、表面近傍繊維の繊維径や融着繊維の割合に起因する平坦なケーキ層の形成されやすさの違いと考えられる。ただし、ろ布Bはろ布C, Eより t_{II} が短い、 Δp_{II} はろ布C, Eより大きくなっている。複層ろ布の表面繊維層の空間率は小さい上に、粉塵の堆積後のろ布の空間率がさらに低下したためと考えられる。さらに、ろ布C, Eの結果から、 t_{II} , Δp_{II} ともにろ布基材の違いによる影響は小さく、表面処理状態が t_{II} , Δp_{II} には大きく影響していると考えられる。また、ろ布Dの t_{II} , Δp_{II} が特に大きいのは、前述のように開口面積が狭く開口部が不均一に分布している表面特性によるもので、優先的に大きな開口部から粉塵が詰まっていくため、均一なケーキ層になるまでの遷移期間が長くなると考えられる。

e) 表面ろ過段階中の圧力損失曲線の払い落とし回数に伴う変化

Table 4に、表面ろ過段階における各ろ布の6秒平均の圧力損失増加率を示す。差はわずかであるが、複層加工(A, B)が低く、毛焼き処理(C, E)、鏡面処理(D)と表面処理別の順で増加している。本実験では粉塵流入濃度が一定であったにもかかわらず、ろ布間で圧力損失増加率に差があるのは、ろ布表面の堆積粉塵

Table 4 Increase rate of pressure drop in stage III

Filter	$\Delta p_{III} / \Delta t (\text{Pa/s})$
A	1.36
B	1.37
C	1.47
D	1.66
E	1.40

Fig. 12 Porosity of dust cake

の状態が異なっている可能性が考えられる。そこで、各ろ布上に形成された粉塵堆積層の空隙率を推定した。粉体層の圧力損失をよく表現しているといわれている Kozeny・Carman 式を用いると、圧力損失増加率は次式で表される。

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \frac{180(1-\varepsilon)C\mu v}{d_p^2 \varepsilon^3 \rho} \quad (1)$$

本実験では、粉塵濃度 C 、ガスの粘度 μ 、気流速度 v 、粉塵の粒子径 d_p 、粉塵の粒子密度 ρ は一定なので圧力損失増加率の差は空隙率 ε の違いによると考えることが出来る。そこで、上式を用い圧力損失増加率から算出した各ろ布上の粉塵堆積層の空隙率 ε を Fig. 12に示す。同一のろ布上に気流速度、粉塵濃度が同じ条件であれば、ろ布上では同一の空隙率の粉塵堆積層を形成すると考えられる。実験からはろ布により異なる空隙率 ε が得られ、大きい順に A, B, E, C, Dで鏡面処理のろ布Dが特に小さく、ろ布の表面が粗いほど空隙率 ε が小さい結果となった。さらに、ろ布Cについてろ過流速3.33~6.67cm/sの範囲で同様の実験を行い、圧力損失増加率より求めた粉塵堆積層の空隙率 ε を Fig. 12に示した。Eq. (1)が示すとおり、同一ろ布であれば流速が変わると粉塵堆積層の空隙率が

変わることが分かる。このことから、同一の流速条件でも粉塵堆積層の空隙率が変わるのは、ろ布に流れ込む気流の流速は同じでも粉塵をろ過している部分での実効的な流速が違っていることが原因と考えられる。実効的な流速は、ろ布の空間率もしくは表面の開口面積により異なると考えられるが、ろ布A～Dは同一基材であり、ろ布の空間率がやや大きい基材のろ布Eも他のろ布に比べ粉塵堆積層の空隙率の差がないので、ろ布の空間率ではなくろ布表面の開口面積の影響が大きいと考えられる。ろ布Dは開口部が少なく、実質流速が速いため、特に空隙率が低くなったと考えられる。

4. 結 論

ろ布の表面状態が圧力損失特性に及ぼす影響を検討するため、表面処理方法及び基材の異なる5種類のろ布を用いて集塵・払い落としの繰り返し実験を行い、払い落としの残留圧力損失及び各集塵過程について以下の結論を得た。

- 1) 単層ろ布 (C, D, E) では圧力損失の経時変化から3段階の集塵段階が観察されたが、複層ろ布 (A,

B) では1段階目がほとんど観察されなかった。

- 2) 払い落とし直後の残留圧力損失 Δp_r は複層ろ布 (A, B) が単層ろ布 (C, D, E) より大きい。 $N=100$ 後の残留粉塵量は複層ろ布のほうが多いことからろ布表面近傍の粉塵残留量が ΔP_r に影響すると考えられた。
- 3) 内部ろ過段階が観察された単層ろ布 (C, D, E) での内部ろ過段階の持続時間 t_I はろ布の空隙率の高いEで長く、C, Dは短い。この段階での圧力損失変化 ΔP_I は毛焼き処理 (C, E) より、鏡面処理 (D) のほうが大きい。
- 4) 内部ろ過が終了し、均一なケーキ層が形成されるまでの遷移段階の持続時間 t_{II} は複層ろ布で短く、単層ろ布で長い。圧力損失 ΔP_{II} は t_{II} が長いろ布ほど、大きい傾向があるが、分枝繊維による複層ろ布Bは t_{II} が短いわりに、 ΔP_{II} が大きかった。
- 5) 表面ろ過段階での圧力損失変化 ΔP_{III} は、形成されるケーキ層の空隙率に依存すると考えられ、開口部が少ないろ布Dでは実効的なろ過速度が速く、空隙率が他のろ布より小さいため、 ΔP_{III} が高いと推測された。

Nomenclature

C : dust concentration	(g/m^3)	R : parameter of interruption	(—)
d_p : particle diameter	(m)	t : filtration time	(s)
m : residual dust	(g/m^2)	t_I : duration time of stage I	(s)
N : cycle number	(—)	t_{II} : duration time of stage II	(s)
Δp : pressure drop of filter	(Pa)	t_{III} : duration time of stage III	(s)
Δp_0 : initial pressure drop of filter	(Pa)	T : cycle time	(s)
Δp_I : increase of pressure drop in stage I	(Pa)	v : filtration velocity	(cm/s)
Δp_{II} : increase of pressure drop in stage II	(Pa)	ϵ : porosity of dust cake	(—)
Δp_{III} : increase of pressure drop in stage III	(Pa)	μ : gas viscosity	($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
P_1 : pressure of pulse-jet	(kPa)	ρ : particle density	(kg/m^3)

References

- 1) Nakai, A. and K. Iinoya : "Experimental Study on Dust Collection Performance of Glass Bag Filter Cloths", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **9**, 399-402 (1972)
- 2) Silva, C. R. N., V. S. Negrini, M. L. Aguiar and J. R. Coury : "Influence of gas velocity on cake formation and detachment", *Powder Technol.*, **101**, 165-172 (1999)
- 3) The Association of Powder Process Industry and Engineering of Japan : "The technology and equipment of dust collection", p. 67, Nikkan Kogyo Shinbun Ltd. (1997)
- 4) Calle, S., P. Contal, D. Thomas, D. Bemer and D. Leclerc : "Description of the clogging and cleaning cycles of filter medium", *Powder Technol.*, **123**, 40-52 (2002)
- 5) Allen, R. W. K., H. G. D. Goyder and K. Morris : "Modeling medium movement during cleaning of pulse-jet fabric filters", *Chem. Eng. Res. and Design*, **77** (3), 223-230 (1999)
- 6) Dennis, R., J. E. Wilder and D. L. Hammon : "Predicting pressure loss for pulse jet filters", *J. Air Pollution Control Assoc.*, **31** (9), 987-992 (1981)
- 7) Humphries, W. and J. J. Madden : "Fabric filtration for coal-fired boilers : dust dislodgement in pulse jet filters", *Filtration and Separation*, **20** (1), 40-44 (1983)
- 8) Morris, W. J. : "Cleaning mechanisms in pulse jet fabric filters", *Filtration and Separation*, **21** (1), 50-54 (1984)
- 9) De Ravin, M., W. Humphries and R. Postle : "A model

- for the performance of a pulse jet filter", *Filtration and Separation*, May/June, 201-207 (1988)
- 10) Lu, H. C. and C. J. Tsai: "A pilot-scale study of the design and operation parameters of a pulse-jet baghouse", *Aerosol Sci. and Technol.*, **29** (6), 510-524 (1998)
 - 11) Lu, H. C. and C. J. Tsai: "Influence of design and operation parameters on bag-cleaning performance of pulse-jet baghouse", *J. Environmental Eng.*, **125** (6), 583-591 (1999)
 - 12) Lu, H. C. and C. J. Tsai: "Numerical and experimental study of cleaning process of a pulse-jet fabric filtration system", *Environmental Sci. and Technol.*, **30** (11), 3243-3249 (1996)
 - 13) Sievent, J. and F. Loeffler: "Fabric cleaning in pulse-jet filter", *Chem. Eng. Process*, **26**, 179-183 (1989)
 - 14) Morris, K.: "Expert system control of fabric filters", *Filtration and Separation*, **28** (4), 275-280 (1991)
 - 15) Simon, X., D. Thomas, D. Bemmer, S. Calle, R. Regnier and P. Contal: "Influence of cleaning parameter on pulse-jet filter bag performance", *Filtration*, **4** (4), 253-260 (2004)
 - 16) Tsai, C. J., M. L. Tsai and H. C. Lu: "Effect of filtration velocity and filtration pressure drop on the bag cleaning performance of pulse-jet baghouse", *Separation Sci. and Technol*, **35** (2) 211-226 (2000)
 - 17) Klingel, R. and F. Loeffler: "Dust collection and cleaning efficiency of a pulse-jet fabric", *Filtration and Separation*, **20** (3), 205-208 (1983)
 - 18) Leith, D., M. W. First and H. Feldmann: "Performance of a pulse-jet filter at high filtration velocity - II Filter cake redeposition", *J. Aerosol Pollution Control Assoc.*, **27**, 636-642 (1977)
 - 19) Kanaoka, C. and Y. Yao: "The time dependency of pressure drop in a flat type pulse jet fabric filter", *Kagaku kogaku Ronbunshu*, **29**, 267-271 (2003)
 - 20) VDI/DIN 3926: "Testing of Cleanable Filter Media standard test for evaluation of cleanable filter media", VDI/DIN Manual Air Pollution Prevention, Vol. 6. Verein Deutscher Ingenieure.
 - 21) Kanaoka, C., M. Furuuchi and J. Murai: "The dust cleaning mechanism of a pulse jet type bag filter", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **31**, 424-429 (1994)
 - 22) Mao, N., Y. Yao and C. Kanaoka: "Comparison of filtration performance of cleanable fabric filters measured by VDI and JIS testing rigs", *Advanced Powder Technol.*, **17**, 85-97 (2006)
 - 23) The Association of Powder Process Industry and Engineering of Japan: "The technology and equipment of dust collection", p. 33, Nikkan Kogyosinbun Ltd. (1997)