光ファイバーと磁性体粒子とを用いたバグフィルターの摩耗評価法

名古屋工業大学大学院 工学研究科 渡辺 義見・岸 悟志・佐藤 尚・壬生 攻
信州大学繊維学部 島川 聡・日向 滋

Evaluation Methods of Wear Properties of Bag Filter using an Optical Fiber and Magnetic Particles

*Yoshimi Watanabe^{*1}, Satoshi Kishi^{*1}, Hisashi Sato^{*1}, Ko Mibu^{*1},
Satoshi Shimakawa^{*2}, and Shigeru Hinata^{*2}*

^{*1} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan

^{*2} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University
3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

Abstract: In these years, the bag-filter in a dust collector of the waste incinerator is used widely to remove the toxic substance, for example toxic gas, dioxins and heavy metals included in the ash dust by passing through the filter cloth. In order to prevent the destroy of filter, it is necessary to establish the evaluation method of wear for bag-filter. In this study, evaluation methods of wear for bag-filter are proposed by using ferromagnetic particles and optical fiber. Using these evaluation methods, wear mechanism for bag-filter was discussed.

(Received 6 July, 2007 ; Accepted 7 December, 2007)

1. 緒 言

環境問題が 21 世紀の重要なキーワードとなっている今日、環境変化をできるだけ抑える、あるいは新しい環境に適応したサイクルシステムを構築することが要求されている。ゴミ焼却炉におけるダイオキシン排出抑制も上述の要求のひとつである。国内でのダイオキシン発生量のうち、一般ゴミ焼却炉および産業廃棄物焼却炉からの発生が 90% を占めているといわれている。ダイオキシン対策として、ゴミ焼却施設の排ガス処理は集塵システムが効果的と判断されており、バグフィルターを組み込んだシステムの高度化高性能化が進んでいる。Fig. 1 にパルスジェット式バグフィルター集塵機の概略図を示す。パルスジェット式バグフィルターは機械振動式や逆洗式のものとは比べ濾過速度が大きく、連続運転が可能であるといった利点があり、ゴミ焼却施設、石炭ボイラ排ガス処理など多方面から需要がある。ところがフィルターには煤塵によって摩耗が生じ、交換時期を誤ると大気中に汚染物質を排出するという重大な事故が発生する。このような事故を防ぐことは社会的要請である。

これまでにバグフィルターの特性については種々の研究がなされている。例えば、バグフィルター集塵機内の流れ¹⁾、バグフィルターにおける圧力損失特性の解析²⁾⁻⁵⁾、バグフィルターダスト払落し機構^{6), 7)}などが報告されている。しかしながら、摩耗量の評価や摩耗機構に関する報

告は少ない。現在、摩耗量評価に広く用いられている手法として、(1)摩耗前後の質量あるいは体積の変化を測定する手法や、(2)顕微鏡などにより摩耗後の表面を観察し摩耗による欠損量を評価する手法がある。しかし、これら既存の摩耗量評価法はバグフィルターの粉塵による摩耗量を評価する手法としては不適切である。これは、(1)においては、粉塵摩耗に伴いバグフィルター内に粉塵が混入し、これにより質量や体積増加が伴ってしまうためである。また、(2)の摩耗に伴う欠損量を顕微鏡などの観察により評価する方法も、バグフィルターが変形容易な材料であるために不適切である。

ところで、我々は磁性材料の磁化が示量変数であることを利用すれば、バグフィルター中に混入した粉塵量の評価が可能であることを見いだしている^{8), 9)}。また、光ファイバーの光の減衰量からバグフィルターの寿命を予知する計測システムの開発を行ってきた¹⁰⁾。しかしながら、個々の研究は異なる実験条件にて遂行されたため、実験結果に関する総合的な議論が行えていない。そこで本研究では、両評価方法を併用、すなわち、強磁性体を用いたバグフィルター摩耗量評価^{8), 9)}および光ファイバセンサーによるバグフィルターの寿命予知システム¹⁰⁾を併用することにより、摩耗評価をより精密かつ統一的に行うことを目的とした。

Fig. 1 Dust collector of bag-filter.

2. 実験方法

2.1 光ファイバーを用いたバグフィルター寿命予知方法

バグフィルターは不織布のテフファイヤー(泉株)である。光ファイバーはコア径 $50\mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\mu\text{m}$ の石英ガラスで、バグフィルターと同程度の耐摩耗性を持たせるために $150\mu\text{m}$ のポリイミド被覆を施したものを使用した。テフファイヤーの特性を Table 1 に示す。PTFE(テフロン)繊維 75%、ガラス繊維 25% を混合した短い繊維を PTFE 繊維の基布上に植えて製造したフェルトである。本実験では、煤塵として強磁性体である還元鉄粉($100\sim 125\mu\text{m}$)を使用した。実際の煤塵の大きさは本来 $1\mu\text{m}\sim 120\mu\text{m}$ 程度であるが、粒子の大きさによる摩耗量の影響を取り除くため、ふるいにより上記の粒度にそろえてある。ここで、粒子径を大きくしたのは、摩耗の加速実験が行えると考えたためである。

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。直径 60mm の中空の取付台に直径 80mm の円に切り取ったバグフィルターを被せる。そして、ショットピニング装置⁹⁾を用いて還元鉄粉をバグフィルターに一様に照射し、バグフィルターに摩耗を生じさせた。ショットピニング装置として、不二製作所製のニューマ・ブラスター(SFK-2 型)を用いた。ブラストガンから発射されるとききの噴射圧力を 0.2MPa 、ブラストガンと試料の距離を 200mm とした。摩耗試験は、1 つの試料に対し 1 回行った。

Fig. 3 にバグフィルターの断面模式図を示す。光ファイバーを異なる 2 箇所に設置した。図のように表面に配備したものとバグフィルターの基布部に配備したものとである。前者は光ファイバーそのものの摩耗特性を調査するのが目的である。後者はバグフィルターの交換が必要な時期を評価する目的のためであり、ここでは、バグフィルターの基布部の露出が摩耗の限界値と定義した。

光ファイバーには LED 安定光源(Photom 製 MODEL

Fig. 2 Experimental apparatus.

370H) が放つ光を導入し、これが光パワーセンサ(ADVANTEST 製 Q82311)が受け取るまでの通路となる。前者の実験の場合、バグフィルターの摩耗が進むにつれ、基布は露出することになり、そこを通る光ファイバーが摩損する。光ファイバーが摩損すれば光は外に漏れ、光の伝送量は減衰する。光の伝送量は光出力計を介して PC に逐次取り込み観測するため、光ファイバーが摩損するまでにかかった時間が特定可能となる。なお、測定は、

Fig. 3 Cross-section view of bag-filter during the experiments.

(a) Optical fiber is put on the bag-filter.

(b) Optical fiber is inserted around the foundation cloth.

Table 1 Properties of bag-filter.

Weight (mg/mm ²)	0.700
Thickness (mm)	1.4
Fiber diameter (μm)	7.9

バッグフィルターの中心に、15mm 間隔の切れ込みを入れ、その間に光ファイバを通して行った。すなわち、測定範囲 15mm の切れ込み間となる。また、切れ込み部分で摩擦が起きないように、その部分に覆いを被せた。

2.2 磁性体粒子を用いた摩耗量評価法

強磁性体の磁化は示量変数である。予備実験として、既知の質量の強磁性体粒子(Mn-Zn フェライト粒子)を不織布に付着させ、その磁化曲線を室温において試料振動型磁力計(VSM)により測定した。結果を Fig. 4 に示す。図のように不織布の量が一定で有るにも関わらず、混入した強磁性体粒子の量に比例し、ヒステリシスが大きくなっている。不織布のみの磁性を測定したところ、Fig. 4 に示すように磁性を示さなかった。このように、Fig. 4 におけるヒステリシスの変化は強磁性体粒子の量にのみ関係する。そこで、混入した強磁性体粒子の質量と磁化との関係で整理した図を Fig. 5 に示す。相関係数が 0.998 を示しており、強磁性体粒子が混入した不織布の巨視的磁性は混入した強磁性体粒子の質量と線形的に比例する。

したがって、強磁性体粒子が混入したバッグフィルターの巨視的磁化を測定すれば、逆にバッグフィルターに混入している強磁性体粒子の質量が算出できることを意味する。一般的に、 I_s (emu/g) の飽和磁化を有する磁性体粒子粉塵がバッグフィルターに混入した場合、その磁性体粒子粉塵が混入したバッグフィルターの巨視的磁化の値 M_m (emu) を測定すれば、バッグフィルターに混入している磁性体粒子粉塵の質量 M (g) は、

$$M(g) = M_m \text{ (emu)} \div I_s \text{ (emu/g)} \quad (1)$$

Fig. 4 Magnetic field vs magnetization curves. **Fig. 5** Relationship between mass of ferromagnetic particles and magnetization.

により算出できる。したがって、バッグフィルターの初期質量を M_o (g)、粉塵摩擦を受け磁性体粒子粉塵を含んだバッグフィルターの質量を M_w (g)、磁性体粒子粉塵の飽和磁化を I_s (emu/g)、磁性体粒子粉塵を含んだバッグフィルターの巨視的磁化の値を M_m (emu) とした場合、粉塵摩擦によるバッグフィルターの有効な質量損失 ΔM (g) は

$$\Delta M(g) = M_o(g) - \{M_w(g) - [M_m \text{ (emu)} \div I_s \text{ (emu/g)}]\} \quad (2)$$

により評価が可能である。今回摩擦試験に供した還元鉄粒子は強磁性体粒子であるため、この関係を適用することができる。

3. 実験結果

3.1 光ファイバーによる測定結果

各時間、還元鉄粒子をショットピニング装置により照射した後のバッグフィルターの光学顕微鏡写真を Fig. 6 に示す。時間の増加に伴い、繊維の損傷が顕著となっている。また、長時間照射したものでは、繊維の潰れも確認できる。粒子径を大きくしたことによる加速実験のため、バッグフィルターの摩擦は激しくなっている。そして、還元鉄粒子の残存も見出され、この量は照射時間の増加に伴い増大している。

光ファイバーそのものの摩擦特性を調査する目的で光ファイバーをバッグフィルターの上に直接置いた状態にて摩擦試験を行った。還元鉄粒子照射に伴う光ファイバーの特性変化を Fig. 7 に示す。ここで、縦軸は光の伝送量、横軸は摩擦時間を表す。試験開始からおよそ 15s で光の伝送量の減衰が始まっている。これは、光ファイバーが照射粒子に被爆され、150mm のポリイミド被覆が損傷するに要する時間である。

次に、バッグフィルターの交換が必要な時期を評価するため、バッグフィルターの基布部に光ファイバーを挿入した。還元鉄粒子照射に伴う光ファイバーの特性変化を Fig. 8 に示す。試験開始から 220s を経過したあたりから、光

Fig. 6 Optical micrographs.

の伝送量は急激に減衰し、数秒後に零となった。したがって、Fig. 7 と Fig. 8 との実験結果を併せると、この実験条件では、還元鉄粒子照射 200s で粒子はバグフィルターの基布部まで到達していることが分かった。

摩耗試験後の光ファイバーの写真を Fig. 9 に示す。ここで、(a)はバグフィルターの上、(b)はバグフィルターの中に設置したものである。両光ファイバーでは、どちらも同じような摩耗痕が見られ、同様の摩耗が起こったと考えられる。

3.2 磁性体粒子を用いた摩耗評価

次に、予備実験として、ポリイミドのバグフィルターに還元鉄粒子照射を照射した。Fig. 10 (a)に還元鉄粒子照射に伴うバグフィルターの質量変化を示す。照射初期において、還元鉄粒子照射に伴いバグフィルターの質量は

Fig. 7 Relationship between transmitted optical power and wear time (on bag-filter).

Fig. 8 Relationship between transmitted optical power and wear time (in bag-filter).

減少している。これは、主に摩耗によりバグフィルターから繊維が抜け落ちたためである。これに対し、照射後期において、還元鉄粒子照射に伴いバグフィルターの質量が増加している。このことは、バグフィルター内に還元鉄粒子が混入してしまうことを意味する。したがって、図から明らかなように、質量変化からバグフィルターの摩耗評価を行うことは不可能である。

そこで、照射後のバグフィルターの磁性を VSM により測定した。その結果を同時に Fig. 10 (a)に記す。2.2 項で

Fig. 9 Micrographs of optical fiber after the wear tests.
(a) Optical fiber is inserted around the foundation cloth.
(b) Optical fiber is put on the bag-filter.

記載したように、この磁化の値は混入した還元鉄粒子の質量に比例する。そのため、本研究では、磁化値を用いて還元鉄粒子の質量換算を行った。このデータより、還元鉄粒子を含まないバグフィルターの質量が算出できる。この結果を Fig. 10 (b) に示す。還元鉄粒子照射に伴いバグフィルターの摩耗が生じ、質量の減少が生じていることがわかる。

混入した粉塵を含まない有効な摩耗量は、初期バグフィルターの質量と摩耗後のバグフィルターとの差により求めることができる。Fig. 10 (c) に還元鉄粒子照射に伴うバグフィルターの摩耗量を示す。還元鉄粒子照射に伴い、摩耗量が増大していくことが確認できた。

そこで、この手法を用いて 3.1 節と同一の実験条件にて還元鉄粒子の照射を行い、そのときの摩耗量を算出した。

Fig. 10 Calculation method of wear amount for bag-filter.

Fig. 11 Amount of wear as a function of wearing time for bag-filter.

その結果を Fig. 11 に示す。50s と 100s における摩耗量の変化が見られなかったが、還元鉄粒子照射に伴い、摩耗量がほぼ直線的に増大していく。250 秒の照射による摩耗量は 0.11 mg/mm^2 であり、これは、バグフィルター質量のおよそ 16% 程度である。

4. 考 察

光ファイバーの実験結果から 200s で粒子はバグフィルターの基布部まで到達していることが分かった。このときの摩耗量は Fig. 11 から 0.09 mg/mm^2 であった。これは、バグフィルター質量のおよそ 13% 程度である。厚さで考えるとおよそ 0.2 mm 摩耗したところで光ファイバーに到達したことになる。光ファイバーが通っている基布部はバグフィルターの間層(表面からおよそ 0.7 mm)に位置しており、光ファイバーまで到達するにはまだ多量の摩耗が起きる必要がある。ここで、バグフィルターとして使用しているテフファイヤーは不織布である。繊維集合体であるため変形が容易であり通気性の良さもある、また、不織布は規則的な折り目をもつ織布とは異なり、折り目が不均一で疎密の部分が存在するため、粒子がバグフィルター基布部まで侵入することが容易であると考えられる。そのため、摩耗量が少ないに関わらず、そのわずかにできた基布部までの道を粒子が通過し、光ファイバーの摩耗を起こしている。また、バグフィルターに穴ができた場合、その穴付近における粒子衝突速度が数十倍程度の高速になる可能性があり、摩耗が激しくなる原因となると報告されている¹¹⁾。このことから、バグフィルターの摩耗は、均一に摩耗が進むのではなく、通気性の良い箇所で集中的に摩耗が進んでいくものと考察できる。また、そこはバグフィルターの疎の部分でもあるので、限界摩耗量に達する時間を早める原因になると考えられる。

摩耗量評価を行うに際してバグフィルターの疎密が重要な要因になるのは明らかである。とくに、光ファイバーを用いたバグフィルター寿命予知は、繊維が疎の部分であるところに光ファイバーを通さなければ、意味を成さないだろう。この問題は、光ファイバーを複数本同時に通しておけば、測定漏れを防ぐことができると考えられ

る。

光ファイバーを用いた手法では、局所的な評価が可能である。また、実機での使用も可能である。得られるデータはデジタル的であるため、バグフィルター交換時期決定に有益なツールとなるであろう。バグフィルターの深さ方向に複数本挿入する、あるいは異なる被覆厚さを有する光ファイバーを同一深さに同時設置することにより、段階に分けた交換時期告知が可能となる。これに対して、還元鉄粒子を用いた摩耗評価法では、平均的な摩耗量評価が可能である。異なる材質のバグフィルターに対し、性能の優劣の評価などに用いることができる。また、バグフィルターの使用環境の検討にも有用であろう。なお、本実験で使用した還元鉄粒子の粒径は大きいことから、上述の摩耗のほかに脆性破壊によるフィルタ破損も生じる可能性がある。何れにせよ、摩耗加速実験として本実験法は有効と考えられる。

5. 結 言

詳細なバグフィルターの摩耗評価を得るために、光ファイバーを用いた寿命予知方法および磁性体粒子を用いた摩耗量測定方法を併用して実験を行った。煤塵とした強磁性体粒子がバグフィルターの限界摩耗量と定めた基布部に達するのにかかった時間およびその間に起きた摩耗量を求め、その結果を考察し、以下の結論を得た。

- (1) 強磁性体を用いたバグフィルター摩耗量評価および光ファイバセンサーによるバグフィルターの寿命予知システムを併用することにより、摩耗評価をより精密かつ統一的行うことが可能となった。
- (2) 光ファイバーが破損した時間のバグフィルターの摩耗量は、バグフィルターの質量の13%程度であった。これは、バグフィルターの基布部まで進入しやすい箇所が存在しており、全体的に摩耗が起きる前に光ファイバーまで粒子が到達したためと考えられる。
- (3) バグフィルターは均一に摩耗が起きず、バグフィル

ターが疎であり、通気性が良い箇所で粒子の衝突が激しくなり、摩耗が促進すると考えられる。

- (4) 光ファイバーを用いた摩耗評価法では、局所的な評価が可能である。これに対して、還元鉄粒子を用いた摩耗評価法では、平均的な評価が可能である。
- (5) 光ファイバーを用いた寿命予知方法は、バグフィルターの疎密に結果が影響を受けるため、光ファイバーを複数本同時に測定することで測定誤差を小さくすることができる。

文 献

1. K. Yamashita and K. Ikemori, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Series B*, **52**, 1040 (1986).
2. H. Ikeno, Y. Tada, S. Hiraoka and Y. Shuto, *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **28**, 241 (2002).
3. C. Kanaoka and Y. Yao, *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **29**, 267 (2003).
4. H. Ikeno, Y. Tada, S. Hiraoka and Y. Shuto, *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **29**, 701 (2003).
5. H. Ikeno, Y. Tada, S. Hiraoka, M. Ikei and Y. Shuto, *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **30**, 7 (2004).
6. C. Kanaoka, M. Furuuchi and J. Murai, *J. Soc. Pow. Tech., Jpn.*, **31**, 424 (1994).
7. S. Noso, *Pow. Sci. Eng.*, **29**, 55 (1997).
8. Y. Hirai, Y. Watanabe and S. Hinata, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.*, **29**, 2073 (2004).
9. Y. Watanabe, H. Sato, Y. Hirai, I.-S. Kim, S. Hinata and J.-Y. Kim, to be submitted.
10. S. Shimakawa, S. Hinata, L. Bao, Y. Watanabe, T. Kishima and H. Shimizu, *SICE Trans. on Industrial Application*, **5**, 35 (2006).
11. S. Shimakawa, S. Hinata, L. Bao, Y. Watanabe, H. Shimizu and T. Mukai, *Jpn. J. Multi Flow*, **21**, 288 (2007).