繊維および糸におけるエロージョンの測定と評価法*

鮑 力 民^{*1}, 銭 丹 娜^{*2}, 佐 藤 康 之^{*2}, 島 川 聡^{*3}
高 寺 政 行^{*1}, 日 向 滋^{*4}, 剣 持 潔^{*1}

Measurement and Evaluation of Erosion Characteristic for Fiber and Yarn

Limin BAO^{*5}, Danna QIAN, Yasuyuki SATO, Satoshi SHIMAKAWA,
Masayuki TAKATERA, Shigeru HINATA and Kiyoshi KEMMOCHI^{*5} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

Bag-filter of fibrous components is widely used as materials that clean exhaust gas. It is reported that the filter damage phenomenon at dust collection is a destruction of erosion wear caused by the particle collision. So, we are necessary to determine the life prediction of bag-filter. It is required to clear up erosion mechanism of fibrous materials. The experiment and an evaluation method were developed to investigate an erosion characteristic of fiber. Using the experiment, erosion of fiber materials was able to be reproduced. Relation between erosion damage rate of a sample and total kinetic energy of particles before colliding by measurement displays a characteristic of erosion in fiber materials. Using suggested damage energy curve, we can evaluate an erosion wear characteristic of fibers in a different experiment condition. An erosion characteristic of mixed yarn and FRP is estimated using this method.

Key Words: Erosion, Solid Particle Impact, Wear, Fiber, Yarn, Measurement and Evaluation of Erosion

1. 緒 言

環境問題が重視されている今日では、クリーンな地球環境を保つために、ごみ焼却施設では諸装置の性能向上のほかに、運転上の安全を確保する設計が重要な役割を占めている。現在、ごみ焼却炉から出た粉じんを含む有害ガス、ダイオキシンおよび重金属などを高効率で除去できる方法として繊維材料で構成されているバグフィルタが広く用いられている。また、バグフィルタは、粒子状物質に吸着したダイオキシン類など環境汚染物質の除去性能が高く評価されたため、都市ごみ焼却設備だけでなく産業廃棄物焼却設備を始め、多くの排ガス処理システムに使用されている⁽¹⁾。しかし、長期間使われることや内部の偏流などの不正使用により損傷し、有毒な気体が外部へ流れることにより周辺地域の環境を汚染する問題が生じている。

バグフィルタ損傷の原因は化学反応および高温によ

る材料の劣化などが指摘されているが、その一つは、排ガスに含まれている粒子の衝突による摩耗損傷(ドライサンド・エロージョン)との実験調査結果が報告されている⁽²⁾。

構造材料のエロージョンの研究は橋本ら⁽³⁾⁽⁴⁾による長年にわたる金属と無機材料を主とした基礎研究から、多くの成果が得られている。その応用により、産業界に多く貢献している。一方繊維材料とその構造材料の摩耗では古くから軍服、鉱山のベルトの摩耗が注目されて、摩耗の研究が始まると同時に、盛んに調査されている。Galbraithは繊維の摩耗を直接摩耗(繊維と滑っている硬い表面)、アプレシブ摩耗と間接摩耗(繊維と繊維との間)に分けて、その研究結果を詳しくまとめた⁽⁵⁾。また、最近、繊維強化複合材料のドライサンド・エロージョンについて工業界の要望で活発に研究されている。1986年から材料のエロージョン性能の研究は、Pool⁽⁶⁾により金属からポリマとその複合物まで及んだ。その後、Harshaら⁽⁷⁾やBarkoulaら⁽⁸⁾を代表として、工業用として多く使われているGFRP、CFRPなどに対して、衝撃角度、速度と衝撃粒子の形状の影響、母材樹脂の耐エロージョン性の調査などを行った。FRPの研究は繊維材料のエロージョンメカニズムが不明なので、おもに実験的な考察に

* 原稿受付 2007年5月16日。

^{*1} 正員、信州大学繊維学部(☎ 386-8567 上田市常田 3-15-1)。^{*2} 信州大学大学院工学系研究科(☎ 386-8567 上田市常田 3-15-1)。^{*3} 正員、信州大学大学院総合工学系研究科。^{*4} 正員、フェロー、信州大学繊維学部。

E-mail: baolimi@shinshu-u.ac.jp

止まっている。繊維材料と繊維集合体(糸とフィラメント)のエロージョンのメカニズムの究明も繊維強化複合材料のエロージョン特性の向上につながると考えている。しかし、繊維材料と繊維集合体のエロージョンの研究は見当たらず、不明の点が多くあった。

本研究では繊維材料と繊維集合体のエロージョンに注目し、その実験方法と評価方法を考案し、考案された測定装置を試作する。それを利用して繊維とその集合体のエロージョンを再現し、繊維材料とその集合体のエロージョン特性の測定と評価を試みる。

2. エロージョンの測定方法

2・1 繊維材料のエロージョン試験 金属材料等の板材のエロージョン特性を調べるためには、一定の条件で粉体を板材に衝突させ、試料を摩耗させ、実験前後の材料の重量差を摩耗量として測定し、その摩耗量より材料のエロージョン特性を評価している⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、繊維材料では同様の方法で測定するのは困難である。繊維材料は金属ブロックに比べ、はるかに小さいので実験前後の重量差がわずかである。また、温度と湿度による影響が大きく、実験中の人間の触りにより大きな誤差が生じる。さらに繊維のすきまに粒子が入り込んでしまう。そのため繊維だけの正確な変化量がわからず、誤差が出やすくなるのである。よって繊維材料に対しては今までと違った実験方法が必要だと考える。

本研究では次のように繊維のドライサンド・エロージョン実験方法を提案する。

長繊維または繊維で構成された糸に、一定の粒径分布の粉体を一定の衝突角度で高速に衝突させ、繊維を

摩耗させる。一定時間の摩耗後、摩耗された糸の引張試験を行い、その強度と伸長を測定する。繊維強度の低下の測定により、繊維のドライサンド・エロージョン状況を推測し、繊維における摩耗特性の評価を行う。

図1は提案された実験装置の概要図である。図2はその写真である。長繊維または糸のサンプルの両端をロードセル(LUB-B 100 N, KYOWA Co. Ltd.)と電動スライダに付けたチャックに固定する。繊維をたるまないようにステージの上に置く。噴流により繊維がステージの上に振動しているので、繊維の振動範囲は粒子衝突範囲を超えないように繊維の両端にマグネットシートで固定する。マグネットシート間の距離は15 mmであるサンプルから一定の距離離れたエアガンの噴射口から毎秒一定量の粉体を発射させ、サンプルに衝突させる。粉体と繊維の衝突角度はスライダにより15°~90°変化できる。また粉体はマイクロフィーダ(ME-1, TSUTSUI RIKAGAKU KIKAI Co. Ltd.)により一定量をエアガンに供給する。粉体が繊維と衝突してから、一定の時間経過後、マグネットシートを外し、摩耗により損傷している繊維または糸を電動スライダで破断するまで引っ張り、その変位-荷重の関係と破断力をロードセルにより計測し、データ収集システム(PCD-100, KYOWA Co. Ltd.)に記録する。

エアガンのノズルから流出したすぐ後の噴流中央部の速度分布は一様で、ポテンシャルコア部分を超えると均一な噴流速度部分が少なくなり、サンプル繊維の直径方向にあたる部分の速度分布は不均一になり、エロージョンの不均一が生じる。コア部分が小さくなると、サンプルをセットしにくくなる。ここで、ノズルからサンプルまでの距離を変化させ、ピトー管流速計

Fig. 1 Schematic drawing of the test system for erosion of fibers

Fig. 2 Photograph of experimental apparatus

を利用してその速度の分布を測定した。図3はその測定結果である。図3に示したように、ノズル内径が5.35 mmであると、15 mm 以下離れた場合、約4 mmの幅で一様速度分布のコアがあるから、本研究では、衝突距離は10 mm に設けた。

本実験装置では、ノズル内径は5.35 mmで、エアコンプレッサとノズルの間に設けるエアタンク(60 リットル)の圧力の制御で粉体の噴射速度を調節する。図4は測定したエアタンクの圧力と噴射速度の関係である。なお粉体供給量を一定にするために実験環境は温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $65\% \pm 5\%$ とした恒温恒湿室で行った。

2.2 試料 試料は、東洋紡製の Procon 繊維、ユ

Table 1 Details of samples

Sample name	Material	Diameter of fiber (μm)	Yarn counts (dtex)
Nylon 6	Nylon 6	200	—
Procon	PPS	20	250
DE-75	Glass	6	675

Fig. 3 The potential core domain (speed distribution) in collision distance in erosion system

Fig. 4 Relation between air velocity and air pressure in air tank by measurement

ニチラグラスファイバー製の DE-75 繊維(ガラス繊維)の2種類とした。表1に2種類の繊維材料のデータを示す。Procon と DE-75 は現在バグフィルタに使用されている繊維である。また、エロージョン予備実験として、東レ製のやや太いナイロン6(直径が0.2 mm)を用いて行った。

本実験で使用する粉体は、白色アルミナ研削材(Showa Denko K. K.)で、平均粒径は $11.5 \mu\text{m}$ で、標準偏差は $21.5 \mu\text{m}$ である。実際にごみ焼却場によって回収されたフライアッシュの径平均を参考にこれを選択した。

図5はナイロン6の測定例である。衝突角度は 90° で、粉体衝突速度は 127.4 m/s 、摩耗時間は2 min である。引張実験の測定より、図5のような Stress-strain 曲線が示される。繊維の最大応力と取り、破断応力(Breaking stress)とする。各エロージョン時間においても同様の実験を5回行い、図6の摩耗時間-破断応力曲線が作成できる。横軸は摩耗時間で、摩耗

Fig. 5 Stress-strain curve of fibers after wear (Nylon 6, Impact angle: 90 degree, Wear: 2 min)

Fig. 6 Breaking stress-wear time curve of fibers (Nylon 6, Impact angle: 90 degree)

時間が増えるに従って、繊維の破断応力が低下している。SEM 写真によると、摩耗時間が長くなると、繊維表面が摩耗されていて、エロージョンが実験的に再現できている。

ごみ焼却施設のバグフィルタの繊維材料は、ダイオキシンの発生などを考慮して、190°C以下の環境で使用されている。このため高温環境での繊維のエロージョン特性を調べる必要がある。ここで、図1に示すホットエアビーム(HAB 4051, HAKKO Co. Ltd.)を利用して、300°Cまで噴射の空気を加熱できるようにした。図7はその部分の写真である。

3. エロージョンの評価方法と考察

3・1 粉体衝突角度による粉体重量 材料のエロージョンにおける摩耗量は単位面積当たりの衝突粉体量と関連している。粉体が繊維に衝突接触面積は衝突角度(Impact degree)によって図8に示したように変化する。単位面積当たりの衝突粉体総重量(W_c)は次のようになる。

$$W_c = \rho \cdot t / A \quad [\text{g/m}^2] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし t が摩耗時間[s], A が粉体真の接触面積 [m^2] (True contact area), ρ が単位時間当たりのマイクロフィードから供給された粉体の重さ [g/s] である。

図9は衝突粉体総重量と繊維の破断応力との関係で

Fig. 7 The sketch map of hot air beam

Fig. 8 True contact area (A) of the particle

ある。サンプルは Procon 繊維で、衝撃の角度は 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 衝突速度は 80.2 m/s である。図9に示したように、衝突角度が 75°, 90° のものに比べて、角度が小さくなると、繊維が急速に摩耗され、その破断応力が急に小さくなる。

3・2 粉体の運動エネルギーと材料の損傷率 材料のエロージョン特性は粉体がサンプルに衝突する速度に大きく影響している。衝突速度が大きければ、粉体がサンプルに衝突する前の運動エネルギーが大きくなり、サンプルが摩耗されやすくなる。また、材料によって、その影響と程度が変わると考えている。ここで単位面積当たりの衝突粉体総重量から、衝突する前の粉体の運動エネルギーの和 (W_E) は

$$W_E = W_c V^2 / 2 \times 10^{-3} \quad [\text{J/m}^2] \quad \dots\dots\dots (2)$$

とする。ただし、 V は粉体の衝突速度 [m/s] である。

また、繊維の破断応力について、異なる繊維のエロージョン特性を比較できるように、損傷率(Damage)を次のように定義する。

Fig. 9 Relation between particle mass per area of fiber and breaking stress for Procon

Fig. 10 Kinetic energy of impact—damage curve for Procon fibers

Damage

$$= \frac{\text{Breaking stress}_{\text{before}} - \text{Breaking stress}_{\text{after}}}{\text{Breaking stress}_{\text{before}}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\text{Breaking stress}_{\text{before}}$ は繊維摩耗する前の破断応力で、 $\text{Breaking stress}_{\text{after}}$ は繊維が摩耗されてからの破断応力である。図 10 は式(2)と式(3)を利用して、図 9 の結果を変換したものである。横軸は衝突する前の粉体の運動エネルギーの和で、縦軸は損傷率である。この曲線で、繊維と繊維集合体がエロージョンによる材料の損傷状況と変化傾向が把握できる。

3.3 繊維とその集合体のエロージョン特性 繊維材料とその集合体のエロージョン特性が図 10 のような $\text{Damage}-W_E$ の表示方法で示すことができるが、いろいろな繊維と繊維集合体のエロージョン特性をわかりやすく比べるために、材料のある損傷率に至るまでに必要とする粉体の運動エネルギー和を用いて、繊維およびその集合体の耐エロージョン特性を評価す

る。ここで、サンプルの損傷率が 0.8 に至るまでに必要とする粉体の運動エネルギーの和を 0.8 ダメージエネルギー ($\text{Damage energy}_{0.8}$, J/m^2) とする。図 11 は図 10 のデータを利用して、3 種類の繊維材料の 0.8 ダメージエネルギーと衝撃角度の関係を示している。●印、▲印と■印はそれぞれ PPS 繊維、ナイロン 6 繊維とガラス繊維の測定値である。図 11 でわかるように、サンプルの損傷率が 0.8 に至るまでに、PPS 繊維はガラス繊維より大きな粉体の運動エネルギーの和 ($\text{Damage energy}_{0.8}$) が必要で、各衝撃角度ともに PPS 繊維の耐エロージョン特性がガラス繊維よりかなり優れていることを示している。式(2)で示したとおり、粉体の運動エネルギーの和に粉体の衝突速度、単位面積の粉体の量、摩耗の時間などの要素が含まれているので、図 11 の 0.8 ダメージエネルギー曲線より、それらの影響程度を推測することができる。

また、図 11 は繊維ごとのサンプルの損傷率が 0.8 に至るまでに必要となる粉体の運動エネルギーの和と衝撃角度の関係を示しているから、粉体衝撃角度の影響も明らかになった。図 11 に示したように PPS 繊維は低角度より高角度 (75° 90°) のほうが必要となる粉体の運動エネルギーの和が大きく、耐エロージョン特性はよいことがわかった。ガラス繊維について、PPS 繊維と反対に高角度より低角度 (15° 30°) のほうが必要となる粉体の運動エネルギーの和が大きく、耐エロージョン特性は良いことを示している。これらより、材料のエロージョンタイプなどを示され、繊維材料のエロージョンメカニズムの究明に対して参考になる。繊維材料におけるエロージョンのメカニズムの詳細解析は次報で報告する。

図 12 は PPS 繊維の損傷率が 0.4, 0.6, 0.8 に至るまでに必要となる粉体の運動エネルギーの和の曲線で

Fig. 11 Comparison of damage energy_{0.8} for fiber

Fig. 12 Various damage energy of PPS fiber

Fig. 13 Comparison of damage energy_{0.8} in temperature

ある。図12に示したように、PPS繊維のエロージョンは、摩耗の初期で激しく、だんだん緩和されている。繊維材料の各種ダメージエネルギー曲線を利用して、エロージョン特性が既知の繊維に対してその繊維混紡材料のエロージョン特性が予測できる。また、今までの予測できない繊維強化プラスチックのエロージョン特性の予測に応用できると考えている。

図13はPPS繊維に対して環境温度によるエロージョン特性の変化を示している。これより、高分子材料のPPS繊維は適度の温度の上昇で、耐エロージョン特性も変わることがわかる。

4. ま と め

繊維材料とその集合体のドライサンド・エロージョン特性を把握するために、エロージョンによる引張破断応力の低下程度を測定することにより材料のエロージョン評価法を提案した。

提案した評価法と試作した測定装置を利用して、繊維材料とその集合体のエロージョンの状態が再現でき、測定したサンプルの損傷率と衝突する前の粉体の運動エネルギーとの関係から繊維材料エロージョンの特性を把握できる。

それらをまとめたダメージエネルギー曲線は各種繊維材料に対して粉体衝突角度、衝突速度、粉体供給量に変化しても測定結果を比較することが可能となり、FRPのエロージョン特性の定量化にも応用できると考える。

本研究に当たって、有益な助言と協力をいただいた

日本スピンドル製造(株)の辻井澄生と木嶋敬昌にお礼を申し上げる。

本研究は文部科学省科学研究費補助金(COE形成基礎研究費:10 CE 2003)と[(C)(2)16560067]の補助を受けて行った。

文 献

- (1) Hashimoto, K., Association of Powder Process Industry and Engineering Japan, *Technology and Apparatus of Dust-Collection*, (2001), pp. 87-99, NIKKAN KOGYO SHIMBUN, Ltd.
- (2) Kishima, T. et al., Experimental study about particle wear of the bag filters, *Society of Powder Technology of Japan Preprints*, (2003), pp. 55-57.
- (3) Hashimoto, K., Wear Resistance Designing of Particulate, *Powder Science and Engineering*, (1987), pp. 122-128.
- (4) Kimura, K. and Okabe, H., *Introduction to Etiology*, (1982), pp. 178-191, YOKENDO Inc.
- (5) Schick, M. J., *Surface characteristics of fibers and textiles, Part I*, (1975), pp. 1-66, Marcel Dekker Inc., NY.
- (6) Pool, K. V. et al., Erosive wear of composite materials, *Wear*, Vol. 107 (1986), pp. 1-12.
- (7) Harsha, A. P. et al., Solid particle erosion behaviour of various polyarylether-ketone composites, *Wear*, Vol. 254 (2003), pp. 693-712.
- (8) Häger, A. et al. (Street, K. and Whistler, B. C. eds.), Study of erosion wear of advanced polymer composites, *Proceedings of the ICCM-10*, (1995), pp. 155-162, Canada Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- (9) Barkoula, N. M. and Karger-Kocsis, J., Effects of fibre content and relative fibre-orientation on the solid particle erosion of GF/PP composites, *Wear*, Vol. 252 (2002), pp. 80-87.