

ナノファイバーを用いた空気清浄機用集塵フィルター濾材

Filter Media with Nanofibers for Air Purifier

高橋 慶太
Keita Takahashi

辻 由浩
Yoshihiro Tsuji

稲垣 純
Jun Inagaki

要 旨

集塵（しゅうじん）フィルターは、空気に含まれる粉塵粒子を捕集する、空気清浄機の集塵性能を決める重要なデバイスである。そして、昨今の市場からの大風量化要望に応えるには、集塵フィルターの性能向上が必要不可欠である。しかし、従来技術では、集塵フィルターの性能である集塵効率と圧力損失のトレードオフ関係の克服は困難であった。この問題を解決するために、ナノファイバーを用いたフィルター濾（ろ）材を開発した。ナノファイバーを空気流の上流から $\phi 850$ nmの繊維、 $\phi 250$ nmの繊維の順で積層し、かつ2種の繊維の目付量のバランスを最適化することで、従来よりも初期の濾材性能を2.8倍に向上させ、さらにタバコ負荷に対する10年相当の耐久性も確保した集塵フィルター濾材を開発した。

Abstract

An air filter is a key device that affects the performance of an air purifier. Filters have come to require a higher performance so that the airflow can be increased in accordance with the demand for a faster purification speed. However, for many years it has been difficult to optimize the trade-off between filter efficiency and pressure loss. In order to solve this problem, we have developed a filter that uses nanofibers. We were able to produce a filter that had both the initial performance and durability of two different diameters of nanofiber. This was achieved by overlaying 850 nm fiber on the upstream of 250 nm fiber and optimizing their weights.

1. はじめに

近年、中国のPM2.5や東南アジアのHAZEなどの大気汚染が懸念されるなか、室内の空気環境を改善する空気清浄機が注目されている。そして、空気環境への意識の高まりから、浄化速度を速めるために、処理風量の大きい空気清浄機に注目が集まっている。それに伴って空気清浄機本体の大型化が進んでおり、これに対応するため、搭載する集塵（しゅうじん）フィルターの使用濾（ろ）材面積を増やし、フィルターサイズを大きくしている。

一方、設置場所の制約やデザイン性から、市場では本体の小型化、薄型化が要望されており、そのためには濾材面積を小さくし、フィルターの厚みを薄くする必要がある。この大風量化とサイズダウンを同時に満たすためには、濾材の集塵効率を確保しつつ、空気抵抗によるエネルギーロス（以降、圧力損失）を低くすることが重要であるが、濾材性能を示すこの2つはトレードオフの関係にあり、従来技術の改良では対応が困難であった。

そこで、筆者らは、「ナノファイバー」という新規素材に着目した。ナノファイバーは、直径が極めて細い繊維状物質であり、濾材の圧力損失を低減しながら集塵効率を高めることができる技術として、世界中で研究が行われている[1]。しかし、初期の濾材性能の確保には有効であっても、長期使用に対する耐久性が不十分という問題のため、現在まで空気清浄機用としての実用化には至っ

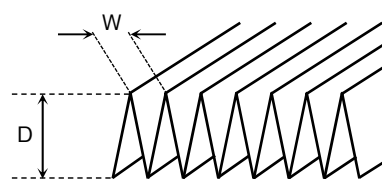
ていない。

本開発では、ナノファイバーの繊維径による濾材性能への影響に着目し、空気清浄機用のフィルターに最適な濾材の開発に取り組んだ結果、初期性能と耐久性を兼ね備えた集塵フィルター用の濾材（以降、フィルター濾材）の開発に成功した。

2. 開発目標

集塵フィルターは、第1図に示すように、不織布濾材を蛇腹状に加工して形成（以降、プリーツ加工）したものである。プリーツ加工により、濾材の濾過面積を大きくし、濾材を通過する風速を遅くすることで圧力損失を抑え、フィルター性能を高めている。そして、本体性能に応じて、フィルターの厚み（D）や凹凸幅（W）を調整する。

今回、従来の集塵フィルターに対して、性能を維持し



第1図 フィルター外観

Fig. 1 External view of filter

つつ、厚みDの50%薄型化につながる濾材の開発を行った。このとき、濾材面積が減少するため、濾材を通過する風速が増大する。そのため、従来のガラス繊維濾材よりも初期の性能指数（集塵効率と圧力損失から算出した指標値）を2.5倍以上に高める必要がある。

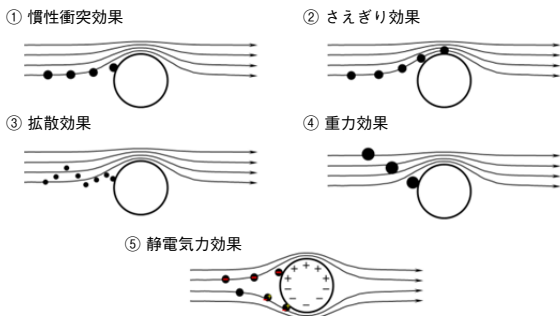
また、集塵フィルターは初期の性能に加え、長期使用に対する耐久性能も同様に重要であり、濾材として、10年相当（タバコの負荷量から換算した使用年数）の耐久性が必要である。

3. ナノファイバーを用いたフィルター濾材の開発

3.1 フィルター濾材の捕集機構

まず、フィルター濾材の粉塵粒子に対する捕集機構を述べる。主な捕集機構として、第2図に示すように5つの機構がある。

- ① 慣性衝突効果は、粉塵粒子がフィルター繊維近傍で変化する空気流れに追従できず、空気流れを外れて繊維に衝突することで発生する。
- ② さえぎり効果は、粉塵粒子が空気流れに沿って移動し、繊維表面から粒子の半径以内に近づき、繊維に接触することで発生する。
- ③ 拡散効果は、粉塵粒子の質量が小さい場合、粒子はブラウン運動しているため、繊維近傍を通過する際、不規則な移動により繊維に衝突することで発生する。
- ④ 重力効果は、粉塵粒子の径が大きく、流速が小さい場合、粒子が空気流れを外れて繊維に衝突することで発生する。また、流れの向きによって、効果の寄与度が異なる。
- ⑤ 静電気力効果は、帯電している繊維近傍における誘電分極と静電気力により、粉塵粒子が吸着されることで発生する。



第2図 粉塵粒子の捕集機構
Fig. 2 Particle-trapping mechanism

空気清浄機の集塵フィルターは主に濾材の通過風速が1 cm/s~10 cm/sの範囲で利用されており、このときの捕集機構はさえぎり効果と拡散効果が支配的である。さえぎり効果と拡散効果の集塵効率に影響するパラメータRとPは(1)式、(2)式のように示される。

$$R = \frac{d_p}{d_f} \dots\dots\dots (1)$$

$$P = \frac{D}{d_f V} \dots\dots\dots (2)$$

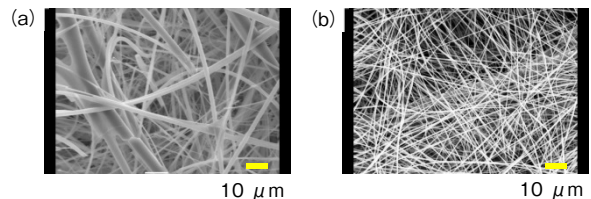
d_p : 粉塵粒子径 [μm], d_f : 繊維径 [μm]
 V : 通過風速 [cm/s],
 D : 粉塵粒子の拡散係数 [cm²/s]

これらのパラメータは繊維径 d_f に反比例していることから、フィルターの集塵効率を向上させるには、フィルター濾材を構成する繊維の繊維径 d_f を細くすることが有効である[2]。

3.2 ナノファイバーの概要

第3図(a)の電子顕微鏡写真に示すような一般的な集塵フィルターに用いられるガラス繊維で構成された濾材（以降、ガラス繊維濾材）は、繊維径1 μm~5 μmのガラス繊維を、バインダとともに抄紙したものである。繊維密度が低い場合、微細粒子を捕集するためには多数の繊維を用いて、繊維と粒子との衝突回数を増加させて集塵効率を確保している。しかし、濾材における繊維は障害物でもあり、目付量（単位面積当たりの質量）、すなわち繊維数を増加させれば、通気時の圧力損失が高くなるという課題があった。

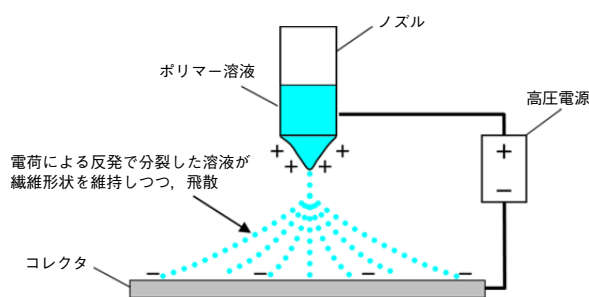
ナノファイバーはナノメートルサイズの微細径を有する繊維である。第3図(b)に示すように、それを不織布状に絡ませて得た濾材（以降、ナノファイバー濾材）では、通気時に障害となる繊維数が少なく、かつ、細かな網目構造を得ることができる。よって、一般的なガラス繊維濾材に比べ、高い集塵効率を保持しつつ、圧力損失を低減できるとされている[1]。



第3図 ガラス繊維濾材 (a) とナノファイバー濾材 (b) の電子顕微鏡像
Fig. 3 Electron micrographs of filters with glass fibers (a) and nanofibers (b)

3.3 ナノファイバーの作製方法

ナノファイバーの製造方法であるエレクトロスピンング法の概要を第4図に示す。この方法は、ポリマー溶液の入ったノズルに高電圧を印加し、コレクタ上に吹きつけられる過程で静電分裂により、ポリマーが細繊維化を起こすものである。



第4図 エレクトロスピンング法の概要
Fig. 4 Image of electrospinning

エレクトロスピンング法は、熔融紡糸法や湿式紡糸法では困難であった材料でも容易に微細繊維化が可能である。さらに、ポリマー溶液の濃度や粘度などの溶液特性、温湿度や圧力などの紡糸環境、印加電圧やノズル-コレクタ間距離などの紡糸条件の調整で繊維径を制御でき、繊維径の細い均一性の高いナノファイバーの作製が可能という利点がある。

また、得られるナノファイバーが不織布状となるため、フィルター濾材を得るのに適した方法である[3]。

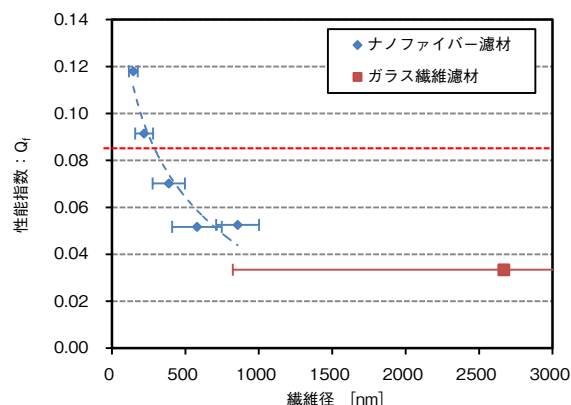
3.4 ナノファイバー濾材の基本性能

ナノファイバーの繊維径と性能との関係を明確にするため、ナノファイバーの繊維径を100 nm～1000 nmの範囲に変化させた濾材を作製し、性能を比較した。ナノファイバーはそれ自体にはほとんど強度がないため、土台となる繊維径が5 μm～20 μmの繊維で形成された骨材不織布上に形成した。結果を第5図に示す。縦軸の性能指数は(3)式で求めたものであり、この指標は、値の大きいほうが高性能であることを示す。評価対象間で圧力損失と集塵効率の両方が異なる材料でも、性能の優劣を判断できる指標となっている[4]。図中の破線は前章で述べた性能目標であるガラス繊維濾材に対し、2.5倍の性能を示す値である。

$$Q_f = \frac{-\ln(1-E/100)}{\Delta p} \dots\dots\dots (3)$$

Q_f : 性能指数 [1/Pa], E : 集塵効率 [%],
 Δp : 圧力損失 [Pa]

ナノファイバー濾材は、繊維径の最も太い850 nmでも、従来のガラス繊維濾材より高い性能を示した。また、繊維径が細くなるほど、高い性能を示し、繊維径150 nmのナノファイバー濾材は、ガラス繊維濾材の3.5倍も高い性能を発揮した。そして、繊維径が350 nm以下であれば、必要な性能を確保できることがわかった。なお、繊維径は平均値であり、標準偏差は図中に示す。



第5図 繊維径に対する濾材性能
Fig. 5 Performance of filters media in relation to fiber diameter

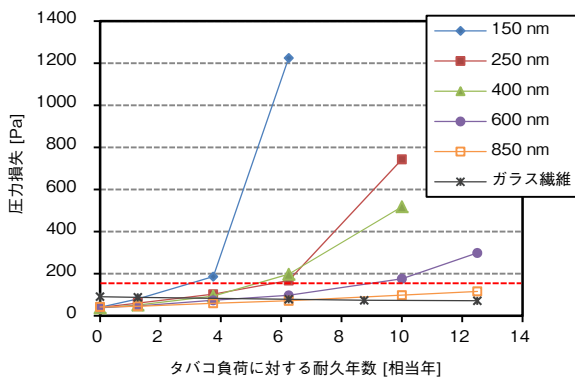
3.5 フィルター濾材の耐久性評価

空気清浄機の集塵フィルターの耐久性は(一社)日本電機工業会規格JEM1467[5]で定められており、タバコに対する集塵性能で定義されている。集塵フィルターの耐久性は、1日の粉塵負荷量をタバコ5本分と想定し、試験結果から算出された空気清浄機の集塵性能が、初期の50%以下になった時点をもって、集塵フィルターの耐久使用年数となる。

ナノファイバー濾材の繊維径に対する耐久性への影響を検証するため、密閉容器内で小スケール試験を行った。容器内でタバコを燃焼させ、煙をポンプで循環させながらナノファイバー濾材紙片に負荷を与えた。初期および一定負荷ごと(タバコ1本=約1.3年相当)に、圧力損失を測定した。結果を第6図に示す。図中の破線は、10年相当のタバコ負荷後において許容される圧力損失(160 Pa)である。この値以下であれば、空気清浄機の本体性能への支障が小さく、十分な風量を確保できる。

繊維径が小さくなるほど、圧力損失の増加が著しく、長期使用に対しては繊維径が太いほうが好ましい結果となった。

一般的に、ナノファイバー濾材では、単位容積が同じであれば、ガラス繊維濾材に比べ表面積が大きくなる。そのため、集塵容量が増加して、例えばカーボン粉末の捕集などにおいては耐久性が向上するという報告がされ



第6図 タバコ負荷に対する圧力損失の推移

Fig. 6 Change of pressure loss for tobacco

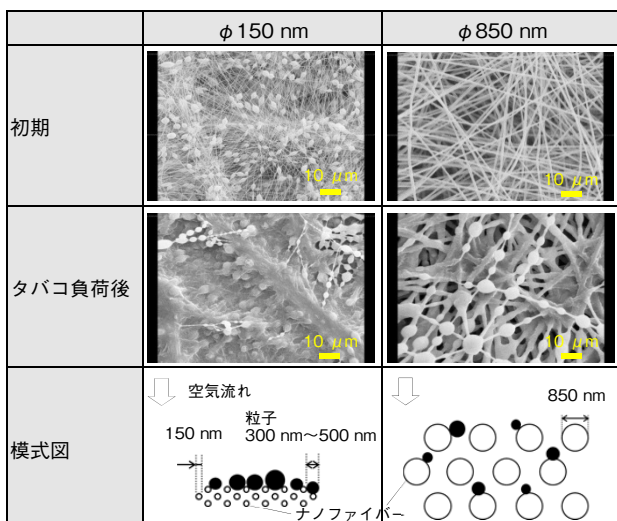
ている[6]. しかしながら、タバコの煙は、カーボン粉末のような $0.3\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 程度の粒子状物質のほかにも、酸性ガス、アルカリ性ガス、油分などを含んでいる. 今回の結果では、ナノファイバー濾材の表面積増大効果が見られず、むしろタバコに含まれる油分が濾材の目詰まりを生じさせて、耐久性を悪化させる影響が顕著に現れている.

細繊維 (150 nm) と太繊維 (850 nm) における、耐久性試験前後の電子顕微鏡写真を第1表に示す.

ナノファイバーの繊維径が細かい場合、繊維間距離が近く、細孔は小さくなる. このとき、粒子状物質と油分を捕集すると、油分は液体であるため、粒子状物質と絡まりあって繊維表面で膜状になり、空隙を埋めていくと考えられる. さらに、油分は毛細管現象によって広がりやすいため、早期に濾材の目詰まりが生じ、圧力損失が急激に増加したものと考えられる.

第1表 タバコ負荷前後における濾材の電子顕微鏡像と模式図

Table 1 Electron micrographs and diagram of filters for tobacco



一方、ナノファイバーの繊維径が大きくなれば、繊維間距離も大きくなるため、粉塵粒子や油分が捕集されても、目詰まりが生じにくく、圧力損失は低く保たれる.

4. フィルター濾材の耐久性向上への取り組み

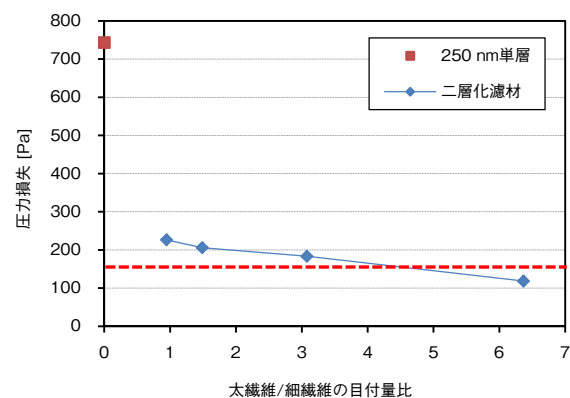
細繊維は初期の濾材性能が高いが、タバコ負荷に対する耐久性が低い. 一方、太繊維は初期の濾材性能が低い、タバコ負荷に対する耐久性が高い. 初期の濾材性能とタバコ負荷に対する耐久性はトレードオフの関係にあり、両立するためには、繊維径のバランスを考慮した濾材構成が必要である.

そこで、空気流の上流に、粗大粒子と油分の捕集を目的とする太繊維層を、下流に、微細粒子を捕集する細繊維層を配置した二層構造のナノファイバー濾材の開発に取り組んだ.

4.1 ナノファイバーの二層化

前章の通り、ナノファイバー濾材の特性は繊維径に強く依存しており、これは、積層構造においても同様と考えられる. 実際に、繊維径の組み合わせを検討した結果、細繊維に150 nmを適用すると、太繊維の繊維径を850 nm以上にしてもタバコ負荷による圧力損失の増加を抑えることはできなかった. また、細繊維を250 nmにしても、太繊維に600 nmを適用するとやはりタバコ負荷による圧力損失の増加が著しく、160 Pa以下に抑制できなかった. そのため、3.4節と3.5節の結果から、250 nmと850 nmの組み合わせで初期の濾材性能と耐久性のバランスを確保できることがわかった.

さらに、太繊維 (850 nm) と細繊維 (250 nm) の目付量比を変えた濾材を作製し、タバコ負荷に対する耐久性を検証した. その結果を第7図に示す. 横軸は太繊維/



第7図 タバコ負荷後の目付量比に対する圧力損失の推移

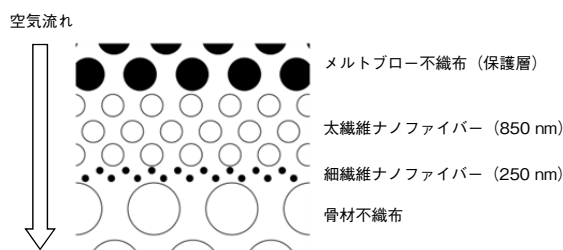
Fig. 7 Change of pressure loss in relation to weight ratio

細繊維の目付量比、縦軸は10年相当のタバコ負荷後の濾材の圧力損失とした。

10年相当の負荷後において、圧力損失は、太繊維の目付量が多い、すなわち太繊維／細繊維の目付量比が大きいほうが、増大が小さく、これには前章で得た結果が反映されていた。目付量比は4.5以上であれば、ナノファイバー濾材は10年相当の耐久性を確保できることがわかった。

4.2 メルトブロー不織布の利用

今回開発した濾材は、第8図に示すように、外的衝撃によるナノファイバー層の破損を防止するため、空気流の最上層に「保護層」の役割として不織布を設けている。この保護層に用いられる不織布と骨材不織布でナノファイバーを挟み込む構成で、接着材によって一体化している。



第8図 ナノファイバー濾材の模式図
Fig. 8 Diagram of nanofiber media

前述の「二層構造」の濾材において、太繊維／細繊維の目付量比を大きくすると、太繊維が支配的になるため、タバコ負荷に対する耐久性能は向上する一方、初期の濾材性能が低下する。そこで、初期の濾材性能を高めるため、帯電加工を施したメルトブロー不織布を保護層に用いた。このメルトブロー不織布は、静電気力によって圧力損失を増大させることなく集塵効率を高めており、初期の濾材性能を高めることができる。ただし、この帯電は永久的なものではなく、経年や汚染によって劣化するため、メルトブロー不織布のみの濾材構成では長期的に性能を維持することはできない。そのため、ナノファイバーで初期の濾材性能と耐久性を確保し、不足分をメルトブロー不織布で補足する構成とした。

その結果、ナノファイバーの二層化濾材に、メルトブロー不織布を組み合わせることで、10年相当のタバコ負荷に対する耐久性を確保しつつ、初期の濾材性能をガラス繊維濾材に対して2.8倍 ($Q=0.090$) に高めることができ、これまでにならぬ高性能な濾材を開発できた。

5. まとめ

今回、ナノファイバーを利用したフィルター濾材のタバコ負荷による圧力損失の増大メカニズムを明らかにし、微細粒子を捕集する250 nmの細繊維層に対し、上流の粗大粒子と油分を捕集する850 nmの太繊維層を多く積層することで、初期の濾材性能の向上と、タバコ負荷に対する10年相当の耐久性を両立した。さらに、帯電加工を施したメルトブロー不織布とナノファイバーを組み合わせることにより、これまでにならぬ高性能なフィルター濾材の開発に成功した。

今後は、空気清浄機のさらなる性能向上を目指して開発を推進する。さらに、住宅設備用空気清浄機や外気導入機器に適した構成のナノファイバー濾材の開発に取り組み、清浄な室内空気質による健康寿命の延伸化に貢献していくことを目指す。

参考文献

- [1] 東レリサーチセンター調査研究部, ナノファイバー, 黎明社, pp.248-251, 2014.
- [2] ウィリアム C. ハイムズ, エアロゾルテクノロジー, 早川一也 (訳), 井上書院, pp.168-179, 1985.
- [3] 山下義裕, エレクトロスピンニング最前線, 繊維社, pp.1-12, 2007.
- [4] 楚山智彦 他, “高効率エアフィルタメディアの捕集性能に及ぼすガラス繊維径の影響,” エアロゾル研究, vol.23, no.3, pp.210-216, 2008.
- [5] 家庭用空気清浄機, JEM1467, 1995.
- [6] 本宮達也, 図解よくわかるナノファイバー, 日刊工業新聞社, pp.108-111, 2006.

執筆者紹介



高橋 慶太 Keita Takahashi
パナソニックエコシステムズ (株)
R&D本部
Corporate R&D Div.,
Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.



辻 由浩 Yoshihiro tsuji
パナソニックエコシステムズ (株)
R&D本部
Corporate R&D Div.,
Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.



稲垣 純 Jun Inagaki
パナソニックエコシステムズ (株)
R&D本部
Corporate R&D Div.,
Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.