

個人サンプラーNWPS-254 に用いるフッ素樹脂処理ガラス繊維 フィルター4種類の粒子捕集効率の評価†

山田 丸*1*2 鷹屋 光俊*1*2

個人サンプラーNWPS-254 (柴田科学) で粉じんを捕集する際の、フッ素樹脂処理ガラス繊維フィルター4種類 (T60A20, TF98, TX40HI20WW, PG60) の粒子捕集効率を評価した。実験装置は、エアロゾル発生部、フィルター (NWPS-254 にセットし吸引流量 2.5 L/min でエアロゾルを捕集) および測定装置からなり、それぞれを導電性チューブで繋いで評価システムを構成した。粒子捕集効率の測定には静電分級器で分級した塩化カリウムエアロゾル (30~500 nm の単分散 10 粒径) を用い、フィルター通過前後の粒子数濃度を凝縮核カウンターで計測して求めた。その結果、いずれのフィルターも粒径 100 nm において捕集効率が最も低く、T60A20 で 87.0%、TF98 で 91.9%、TX40HI20WW で 99.6%、PG60 で 99.7% となった。一方、作業環境測定基準 (300 nm の粒子を 95% 以上捕集する性能を有するものに限る) はすべてのフィルターが満たしており、いずれも個人サンプラーNWPS-254 を用いた作業環境測定に利用可能であることが確認された。

キーワード: PTFE 処理ガラス繊維フィルター、個人サンプラー、サブミクロンエアロゾル、捕集効率。

1. はじめに

有害物質による健康障害を防ぐためのばく露対策は、作業中のばく露の程度を正確に評価したうえで実施することが肝要である。我が国で実施されている作業環境測定ではサンプラーあるいは簡易計測装置 (デジタル粉じん計など) を作業場に固定して測定を行う「場の測定」が基準となる。一方、諸外国では、作業者の呼吸域にサンプラー等を取り付けて測定を行う「個人ばく露測定」が一般的であり¹⁻³⁾、この測定に用いるサンプラーを「個人サンプラー」と呼ぶ。

個人サンプラーは、我が国では法令等の定めもあり、現時点で普及はしていないが、化学物質のリスクアセスメントの義務化 (平成 28 年 6 月 1 日施行) や「個人サンプラーを活用した作業環境管理のための専門家検討会」 (平成 29~30 年; 厚生労働省)⁴⁾等を背景に、今後、利用機会が増加すると見込まれる。なお、本報告書の執筆中の令和 2 年 1 月 27 日に、「作業環境測定法施行規則の一部を改正する省令 (令和 2 年厚生労働省令第 8 号)」及び「作業環境測定基準等の一部を改正する告示 (令和 2 年厚生労働省告示第 18 号)」が発出され、令和 3 年 4 月 1 日からは個人サンプラーを用いた作業環境測定が一部の物質について選択的に実施できる見通しとなった。また、当研究所で実施した有害物質ばく露が原因と考えられる疾病の調査では、原因物質の特定、ばく露濃度の

評価、高濃度作業の特定のためにしばしば個人サンプラーを使用している^{5,6)}。

粉じん質量濃度の一般的な測定方法であるろ過捕集法に用いるろ過材には、湿度の影響が少なく、圧力損失が小さいフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルター (以下、PTFE 処理フィルター) が推奨される。「作業環境測定ガイドブック 1 鉱物性粉じん・石綿 (第 5 版)」⁷⁾では、PTFE 処理フィルターとして「T60A20 (Pall)」を例示しているため、これまで作業環境測定の事実上のスタンダードとして使用されてきた。しかし、近年 T60A20 が製造中止となったため、現在数種類のフィルターが代替品として提案されている。(なお、T60A20 製造中止後に改訂された同ガイドブック第 6 版 (2018) では、T60A20 の記載が削除されている。)

作業環境測定のろ過捕集法で用いるフィルターは、作業環境測定基準第一条 5 (300 nm の粒子を 95% 以上捕集する性能を有するものに限る、という条件) を満たす必要がある。そのため各フィルターメーカーは 300 nm の粒子に対する捕集効率を公表しているが、粒子が捕集されにくいとされる粒径 100~300 nm の捕集効率データは公表していないので、今後は 300 nm 以下の粒子の捕集効率を把握し、適切なフィルターを選択して正確なばく露評価を図る必要がある。

本研究では、個人サンプラーによる粉じん濃度測定を想定し、国内で製造販売されている吸入性粉じん用個人サンプラーNWPS-254 (柴田科学) を用いた際の PTFE 処理フィルターの粒子捕集効率と圧力損失の評価を行った。また、粒径 30~500 nm の粒子に対する特性に着目し、粒径毎の捕集効率を調べた。評価対象のフィルターは、国内で購入可能な 3 種類と、現在製造中止となっている T60A20 とした。ここで得られた知見は、個人サンプラーによる粉じん濃度測定において、フィルターを適切に選択する際の一助になると期待される。

† 本報は労働安全衛生研究, 12 巻, 第 2 号, pp.107-111, 2019 の記述の一部に加筆修正を行い、まとめ直したものである。

*1 労働安全衛生総合研究所作業環境研究グループ

*2 現所属 労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター
ばく露評価研究部

連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター

ばく露評価研究部 山田 丸*2

E-mail: yamadam@h.jniosh.johas.go.jp

2. 実験

2.1. フィルター

本研究で評価した PTFE 処理フィルターには、T60A20 (Pall, 製造中止), TX40HI20WW (Pall), TF98 (柴田科学), PG60 (アドバンテック東洋) の 4 種類を選び、各フィルターを NWPS-245 に装着した状態で評価した。なお、TX40HI20WW と PG60 は長年にわたって販売されているフィルターで、主に大気環境分野のエアロゾル捕集材として使用されているものである^{8,9)}。表 1 には、各フィルターの吸湿性、厚さ、重量、捕集効率、圧力損失に関するメーカー公表値を示す。(一部単位の異なるものもあるが、公表資料の値をそのまま掲載している。) なお、ここでの吸湿性は、JIS K0901 に従い湿度 90% 雰囲気中で 24 時間経過後の吸湿量を直径 47 mm のフィルターで測定した値である。また粒子捕集効率は、300 nm の DOP (dioctyl phthalate) エアロゾルを面速約 5 cm/sec で通気させた際の結果である。

表 1 フィルターの標準性能 (メーカー公表資料に基づく) および評価に用いたフィルターのロット

	T60A20	TF98	TX40HI20WW	PG60
吸湿性 ^{*1}	0.04mg	0.04mg	0.03mg	0.11mg
厚さ	203μm	0.12 ±0.02mm	178μm	0.15mm
重量	3.4mg/cm ²	(4.1mg/cm ²) ^{*2}	5.0mg/cm ²	6.0mg/cm ²
捕集効率	96.4% ^{*3}	97.5% ^{*3}	99.9% ^{*3}	99.95% ^{*4}
圧力損失 ^{*5}	—	0.15 kPa	—	0.44 kPa
ロット	T9153A	73	T16036DW	50516702
番号	T14940A	81	T16334FW	80406701
	T14942A	87	T16334EW	90204704

*1: JIS K0901 の湿度 90% 雰囲気内で 24 時間後の吸湿量を φ 47 mm フィルターで測定。ただし PG-60 は実測に基づく参考値。

*2: 本研究における実測値。

*3: ASTM D2986-95A: 300 nm DOP, 32LPM/100cm² (面速 5.3 cm/s)。

*4: 300 nm の DOP を使用し、面速 5 cm/s での測定。

*5: 面速 5 cm/s での測定値

2.2. 評価試験

図 1 に、当研究で使用したフィルターの粒子捕集効率評価システムの概略を示す。本システムは、エアロゾル発生部、サンプラー (NWPS-254)、および測定装置からなる。配管には導電性シリコンチューブおよび金属製のコネクタを用い、可能な限り静電気の影響を排除した。サンプラーには直径 25 mm のフィルターをセットし、規定流量 2.5 L/min (面速約 13 cm/sec; フィルターの有効径から見積り) で試料空気を吸引し、サンプラーに衝突板 (慣性衝突式の分粒装置) を装着した状態で試験を実施した。試験に用いたエアロゾル粒子は、アトマイザー (Model 3079, TSI Inc.) で発生させた塩化カリウム (KCl) 液滴をディフュージョンドライヤーで乾燥させ

固体粒子にした後、静電分級器 (DMA; Model 3080, TSI Inc.) によって分級した粒径 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 nm の単分散 KCl 粒子である。静電分級器は、中和器 (Neutralizer) を通って平衡帯電分布状態になったエアロゾル粒子を、電気移動度 (単位電界あたりの粒子の移動速度) の違いにより分級する装置である。電気移動度は粒径の大きさに反比例し、この移動度から求めた粒径が電気移動度径 (Mobility diameter) である。なお、発生させるエアロゾル濃度は、分級粒径によって異なるが、500~1500 個/cm³ の範囲内となるよう調整した。フィルター通過前後の粒子濃度の測定では、配管途中に設けた三方コックで流路を切り替えて試料空気の採取を行い、それぞれの粒子数濃度を凝縮粒子カウンター (CPC; Model 3776, TSI Inc.) で測定して、その濃度比から粒子捕集効率 (部分捕集効率) を求めた。粒子数濃度は、各粒径に対してそれぞれ 5 回繰り返して測定し、その平均値を用いた。各粒径に対する粒子捕集効率 (部分捕集効率) を次式に示す。

$$E=1-(N_{out}/N_{in}) \quad (1)$$

ただし、E は各粒径粒子に対しての粒子捕集効率、N_{out} と N_{in} はそれぞれフィルター前方と後方で測定した粒子数濃度 (粒子数/cm³) である。また、粒子の透過率 P は、

$$P=1-E \quad (2)$$

である。

なお、本研究ではフィルターのロット間のばらつきを確認するために、3 つの異なるロットから無作為に各一枚を抜き取って測定を行った。

フィルターの圧力損失は、サンプラーのインレットおよびアウトレットの配管部に接続したデジタル差圧計 (Testo 510) により測定した (図 1 の Δp)。これは、捕集効率と圧力損失の関係を評価するのに加え、装着したフィルターに損傷がないか、また適切にフィルターが装着されているかをモニターする役割も担っている。

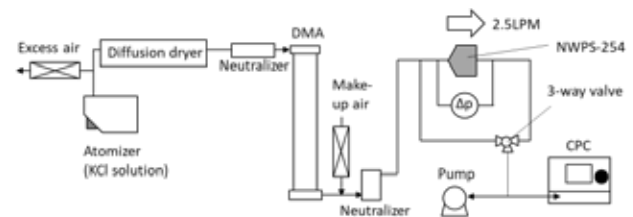


図 1 実験システム

3. 結果と考察

フィルターの捕集効率測定に先立ち、フィルターを装着しない状態 (ただし衝突板は装着した状態) でサンプラー通過前後の粒子数濃度を測定し、粒子がサンプラーを通過する際のサンプラー内部での損失率を式(1)に従って求めた。図 2 は、各粒径におけるサンプラー内での粒子損失率を示す。粒径 30 nm の粒子で 10%、50 nm で 5%程度がサンプラー内で損失していた。これは、粒径が小さいほどブラウン拡散の影響が顕著になり、サン

プラー内部の壁面や衝突板に付着する確率が高まるためと考えられる。粒径 70~150 nm では平均数%, 200 nm 以上ではサンプラーによる粒子損失は無視できることが確認された。

図 3 は各フィルターをサンプラーに装着して捕集効率を測定した結果である。現在市販されている PTFE 処理フィルターは T60A20 よりも捕集効率が高く、特に TX40HI20WW と PG60 の捕集効率はどの粒径においても高い捕集効率を示した。粒径 100 nm における捕集効率はいずれのフィルターでも最も低く、T60A20 が 87.0%, TF98 が 91.9%, TX40HI20WW が 99.6%, PG60 が 99.7%であった。一方、作業環境測定基準 (300 nm で捕集効率 95%以上) は、公表値 (表 1) よりも面速が速いにもかかわらず、すべてのフィルターが満たした (図 3)。各フィルターの捕集効率のロット間でのばらつきを調べたところ、変動計数 (CV) が最大値を示したのは、

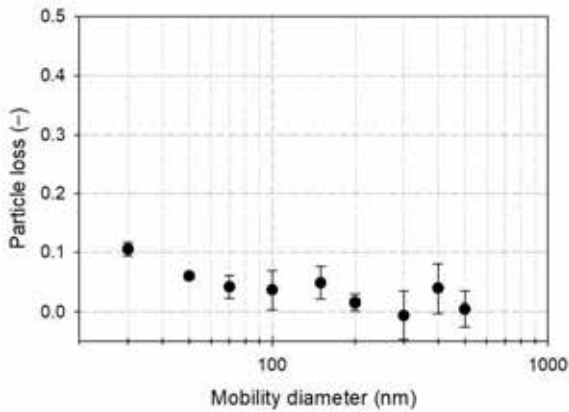


図 2 粒子捕集用フィルターをセットしていない時の NWPS-254 通過時の粒子損失率
エラーバーは 5 回繰り返し測定した際の標準偏差を示す。

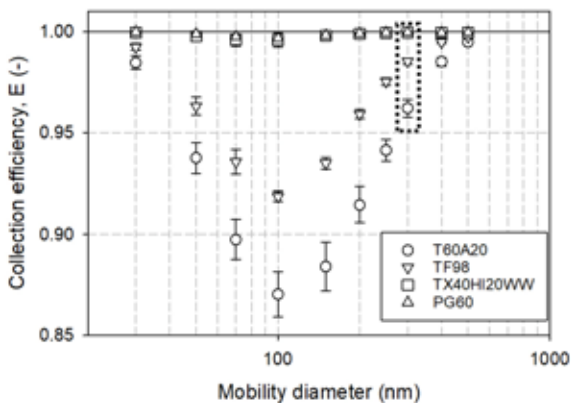


図 3 NWPS-254 による各フィルターの粒子捕集効率
捕集効率 E=1 を実線で示す。破線で囲った部分は作業環境測定基準の 300 nm で 95%以上の基準である。エラーバーはロット間の違いによるバラツキ (N=3 の標準偏差) を示す。

粒径 100, 150 nm における T60A20 の約 1.3%であったが、捕集効率が高い領域ではばらつきがほとんど見られなかった。

以上より、作業環境測定ではどのフィルターを使用しても問題のないことが示された。ただし、粒径 100 nm 付近の濃度が高い粒子を測定する場合、T60A20 および TF98 では捕集開始直後の粉じん堆積がない状態において、捕集効率が 95%未満となる可能性が示された。

各フィルターの圧力損失は、T60A20 が 0.48 ± 0.02 kPa と最も低く、TF98 が 0.56 ± 0.03 kPa, TX40HI20WW が 1.34 ± 0.13 kPa, PG60 が 1.41 ± 0.05 kPa であった。ここで、各フィルターの捕集効率 (あるいは粒子透過率) と圧力損失の関係を知りたくため、粒径 100 nm と 300 nm の粒子に対する全フィルターの粒子透過率 P (式(2)) と圧力損失 Δp の関係を調べた。その結果を図 4 に示す。これより、圧力損失が高いフィルターほど粒子透過率が低くなる負の相関性が確認された。また、フィルターをセットしていない状態 (圧力損失のない状態 ($\Delta p=0$ kPa)) における透過率を 1 として回帰分析を行ったところ、 Δp と P との間に指数関数的な直線関係が確認された (図 4)。

フィルターの性能を客観的に示す指標として用いられる Quality Factor (Q_f 値)¹⁰⁾は、

$$Q_f = \ln(1/P) / \Delta p = \ln E / \Delta p \quad (3)$$

と定義され、式 (3) は

$$P = \exp(-Q_f \Delta p) \quad (4)$$

と変形できる。したがって、図 3 で示した粒径 100 nm と 300 nm に対する Q_f 値は、それぞれ約 4.23 kPa^{-1} と 5.97 kPa^{-1} となり、本研究で評価したフィルターの性能 (圧力損失に対する粒子捕集率) は、どれを取っても大差のないことが明かされた。

本研究では、粉じんの堆積がない状態での捕集効率を測定しているが、フィルター上に粉じんが堆積するとフィルターの空隙率が低くなるため捕集効率は高まることが知られている。例えば、Kittelson ら⁸⁾は、T60A20 に粒

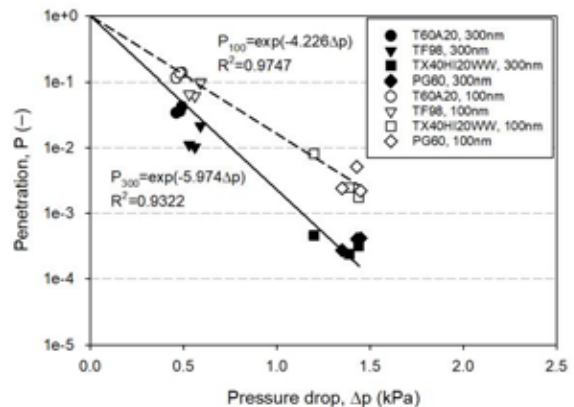


図 4 各フィルターの粒子透過率と圧力損失の関係。
粒径 300nm と 100nm での測定値に対する回帰分析の結果 P_{300} と P_{100} をそれぞれ実線と破線で示す。

子が堆積すると急速に捕集効率が高まるため、初期の粒子透過率が高くても測定への影響は小さいことを示している。T60A20 に次いで捕集効率が低かった TF98 も、粉じんの堆積量が増えるに従って捕集効率は高くなると予想されるが、粉じん負荷に伴う圧力損失および捕集効率の変化を把握するためにはさらなる実験が必要である。フィルターの圧力損失は、ポンプを選択する際に重要な情報となる。TX40HI20WW と PG60 の圧力損失は、T60A20 と比べて約 3 倍高かったものの、従来の個人サンプラー用ポンプでは問題なく使用できる値であった。ただし高濃度の粉じん環境で長時間サンプリングを行う場合はフィルターの目詰まりにより圧力損失が高くなるため、そのような環境では、捕集効率の高低によるだけでなく、目詰まりの起こりにくさもポンプの選択に際して考慮すべきである。

以上より、T60A20 を他の 3 種類の PTFE 処理フィルターに代替しても、NWPS-254 を使用する場合、粉じん濃度は正しく評価できることが示された。しかし、本研究と異なるサンプラーで測定を行う場合は面速も本研究と異なってくるため、粒子とフィルター繊維間での拡散、衝突、さえぎりの影響から捕集効率が変わり、効率曲線も図 2 と異なってくることに留意する必要がある。

4. まとめ

昨今、我が国においても個人サンプラーによる測定の機会が増えてきた。その際、フィルターの捕集効率を把握することは粉じんの濃度を正確に評価する上で必須である。本研究では、粉じん濃度測定用のろ過材として推奨されている PTFE 処理フィルターについて、現在国内で購入可能な 3 種類および製造中止となった T60A20 を選び、各々について吸入性粉じん用個人サンプラー NWPS-254 に装着した時の粒子捕集効率を測定した。その結果、いずれのフィルターであっても、粉じん濃度を測定するのに十分な捕集効率が確認された。ただし、粒径が 300 nm 以下、特に 100 nm 程度の粒子に対しては、最大 10%以上の透過率を持つものがあつた。

本研究では未使用のフィルターを用いて測定を行ったが、現場で使用する場合には、フィルターの吸湿、粉じん捕集に伴う圧力損失の増加、ピンセットによるフィルター取り扱い時の損傷等も測定結果に大きな影響を及ぼす要因として考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Leidel, N.A., Busch, K.A., Lynch, J.R. Occupational Exposure Sampling Strategy Manual (NIOSH Publication No. 77-173). Washington, D.C.: US Government Printing Office; 1977.
- 2) American Industrial Hygiene Association. A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposure. Bullock WH, Ignacio JS, ed. 3rd ed. Fairfax, VA: AIHA Press; 2006.
- 3) CEN. European Standard EN689:1995. Workplace atmospheres—Guidance for the assessment of exposure by inhalation to chemical agents for comparison with limit values and measurement Strategy. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 1995.
- 4) 厚生労働省労働基準局安全衛生部. 個人サンプラーを活用した作業環境管理のための専門家検討会報告書. 平成 30 年 11 月 6 日. 2018.
[<https://www.mhlw.go.jp/content/11305000/000378671.pdf>]
- 5) 労働安全衛生総合研究所. 災害調査報告書「福井県内の化学工場で発生した膀胱がんに関する災害調査」A-2015-07 (一般公開版). 2016.
[https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/pdf/saigai_houkoku_2016_01.pdf]
- 6) 労働安全衛生総合研究所. 災害調査報告書「化学工場で発生した呼吸器疾患に関する災害調査」(要約版). 2019.
[https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/pdf/saigai_houkoku_2019_01.pdf]
- 7) 日本作業環境測定協会編. 作業環境測定ガイドブック 1 鉱物性粉じん・石綿 (第 5 版). 2014: 32-33.
- 8) Kittelson, D.B., Moon, K.C., Liu, B.Y.H. Filtration of diesel particles, *Sci. Total Environ.* 1984; 36: 153-158.
- 9) 功刀正行, 土器屋由紀子. 大気中の微量ガスおよび粒子状物質の分析. *ぶんせき*. 1990; 1. 40-50.
- 10) Hinds, W.C. *Aerosol Technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd ed. New York, NY: Wiley-Interscience; 1999: 182-205.