

## A. 研究目的

リフラクトリーセラミックファイバー(RCF)は非結晶性の合成ガラス纖維の一種で、類似のものとして、グラスウール、スラグウール、ロックウールなどがある。日本で取り扱われているRCFの纖維径は一般的に2~4 μm程度である。RCFは非結晶性であるため、アスペストのように、纖維が更に細くなるような纖維方向の割れ方はせず、纖維が短くなるように折れる、と言われている。一般に纖維状物質は、纖維径が3 μm以下では吸入性粉じんとなり、肺深部に到達するとされているが、RCFも飛散する粒子の一部は吸入性の粒子となる。RCFは国際がん研究機関(IARC)によって人への発がん性の可能性があるとされるグループ2Bに分類されている(IARC)。アスペストを始めとして纖維状物質には発がん性物質に分類されるものがあるが、一般的に纖維状物質の発がん性については、纖維径、纖維長、ばく露量、生体中における安定(不溶)性(形状・性質)から推測される。

RCFはアルミナとシリカを混合して1925程度までの高温で溶融して纖維を製造する。更に、追加の工程を経て布状、フェルト状、板状に整形したり、ペースト状に加工したりする。加工の作業が実施されるのは、RCFの製造工場や、下流の中間品の製造工場、あるいはRCFを用いて施工する炉や高温設備である。また、使用した炉については内壁の補修や解体作業がある。製造工場においてはいわゆる作業環境測定が可能であるが、炉の補修や解体については作業者や作業場所を特定することが難しい。

厚生労働省はRCFの有害性に関する情報や使用状況、ばく露濃度等を検討し、平成28年度に特定化学物質に指定した。従って、RCFは作業環境測定の対象物質となり、作業環境測定にはメンブランフィルターに粒子を捕集して位相差顕微鏡(PCM)を用いて纖維数を計数する米国NIOSH、英国HSE等で採用されている方法が提案されている。炉の内張や補修の作業や、解体工事における

国内外での測定事例では、製造現場よりもばく露濃度が高い報告例がある。短期間で、非定常に行われる作業環境測定が適さない職場では、個人ばく露測定を実施することが望ましく、粒子を捕集してPCMで測定する方法を実施することになる。しかしながら、このような方法では短時間作業について発じん対策の有効性等を評価するには、結果が出るのに時間がかかるため、実際的ではない、という意見もある。一般的な粉じんでは、粉じん計によりリアルタイムに粉じんのばく露状況を知ることができるが、纖維状物質については纖維状粒子自動計測装置があるが、装置が大きく(5~12 kg)、高価で一般に普及しているとは言い難い。纖維状粒子自動計測装置は、例えば、環境省のアスペストマニュアルにも測定法の一つとして記載されている。しかし、自動計測装置も正しい測定には、目的物質を用いた校正が必要であり、RCFについてPCMと同程度の性能を示すのか、検討がなされている(Kauffer, 2003)。他のリアルタイムモニターについても同様の課題がある。

そこで、本研究では、RCFエアロゾルを様々な現場においてばく露評価するために、リアルタイムモニターと、フィルター捕集/走査型電子顕微鏡(SEM)を利用して測定する方法を評価する。それにより、RCF取扱い作業のばく露をより簡単に短時間で評価する方法を探索する。そのためには、纖維状物質のエアロゾルを安定して連続発生して、リアルタイムモニターの応答を検証する必要がある。RCFは有害性が高いため、基本的な実験は有害性の低い纖維状物質を用いて実施することとした。初年度は纖維状物質エアロゾルの安定発生法のプロトコルをグラスウールを用いて確立し、二年度(最終年度)はそのエアロゾルを使用してリアルタイムモニターの応答を確認することを目的とする。併せてSEM画像を用いた自動係数についても検討した。

## B. 研究方法

### 1 試料

纖維状物質のエアロゾルを安定して連続発生するための検討用試料として、グラスワール粉体(品名 GW1、日本纖維状物質研究協議会)を用いた。この纖維状物質は人造鉱物纖維の標準試料として日本纖維状物質研究協議会が提供したものの一つである。この標準試料は自動計測装置の評価にも使用されている。GW1 の物性等は Kohyama et al. (1997) に詳述されており、纖維長及び纖維径の平均はそれぞれ約 20  $\mu\text{m}$  及び 0.9  $\mu\text{m}$  である。纖維径は RCF に比べて半分程度である。なお、今回実験で使用した GW1 粉体は、かさ密度がおよそ 400  $\text{mg}/\text{cm}^3$  の状態であった。

### 2 発生方法の検討

纖維状物質をエアロゾルとして連続発生させる方法として、粉体材料のダスティネス試験にも用いられているボルテックスシェーカー法 (Baron et al., 2003; 小倉ら, 2011; 山田ら, 2014) による乾式発生法を採用し、発生濃度と粒径分布の長時間変動を評価した。ボルテックスシェーカー法は、粉体を封入した試験管をボルテックスシェーカーで振動搅拌することにより粉体を浮遊させ、そこに HEPA フィルターでろ過した清浄空気を通氣することで浮遊した粒子を配管下流の気中に分散させる方法である(図 1)。試験管から排出されたエアロゾルは中和器 (Am241) を通過することで帶電した粒子が中和され、そして調整用空気との混合チャンバーを通して試験用エアロゾルとなる。ボルテックスシェーカー法の発生システムにおけるコントロール可能なパラメーターは、試験管内の通気流量、封入する粉体試料の量、ボルテックスシェーカーの搅拌回転数、及び粉体試料にビーズを入れることによる搅拌改善措置である。本研究では、その内の通気流量、粉体試料量及び搅拌改善措置を変えた 3 つの条件(表 1)における纖維状粒子の発生濃度および粒径分布の時間変動を

測定した。なお、試験管内の粉体試料は、実験の途中で追加や入れ替えはせずに最初に封入した粉体を搅拌し続けることとした。また、粉体試料及び試験管は未使用のものとし、再利用しないこととした。

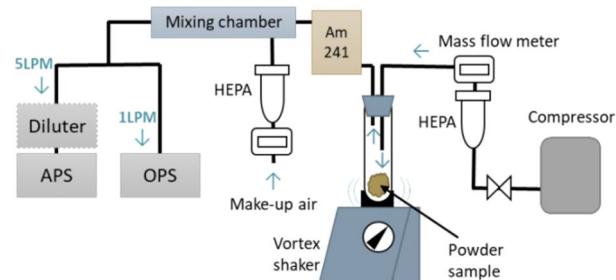


図 1 繊維状粒子発生システムと粒子測定システムの概略図

図中の矢印は空気の流れの方向を示す

表 1 エアロゾルの発生条件

	試験管 通気流量	試料量	搅拌改善措置
ケース A	5 L/min	1 $\text{cm}^3$	なし
ケース B	5 L/min	1 $\text{cm}^3$	ステンレスビーズを混合 (1/16 インチ、5 個)
ケース C	1.5 L/min	0.5 $\text{cm}^3$	なし

### 3 繊維状粒子の発生濃度および粒径分布測定

ボルテックスシェーカー法によるエアロゾル発生の安定性を確認するために、2 種類のエアロゾル測定装置により濃度および粒径分布の時間変動を測定した。一つは、光散乱式エアロゾル粒子カウンター(OPS : Model 3330、TSI 社)であり、装置内に吸引したエアロゾルへレーザー照射することにより個々の粒子が発する散乱光シグナル及びその強度から、個数濃度及び光散乱径にもとづく粒径分布(粒径範囲 0.3~10  $\mu\text{m}$ 、分級能 16 チャンネル)を計測する装置である。他方は、エアロダイナミック粒子サイズ(APS:Model3321、TSI 社)であり、装置内に吸引した個々の粒子が 2 点間のレーザーを通過する時間を求めて粒径

を算出して空気力学径にもとづく粒径分布（粒径範囲 0.5~20  $\mu\text{m}$ 、分級能 52 チャンネル）を測定する装置である。こちらも粒径分布に加えて粒子数濃度の測定が可能である。なお、測定対象が高濃度である際に生じる測定装置のコインシデントロスの影響を低減するため、必要な場合には希釈装置（Diluter : Model3302A、TSI 社）を用いた。なお、本報告書において特に断りのない限り、濃度は個数濃度のこととする。

#### 4 繊維状粒子の形状観察

発生したエアロゾル粒子の形状確認のために、走査電子顕微鏡（SEM: JMS-7900F、JEOL Ltd.）による粒子の観察を行った。SEM 観察用粒子は、インハラブルサンプラー（Zefon International Inc.）にセットした Nuclepore フィルター（孔径 0.2  $\mu\text{m}$ 、25 mm、Whatman）上に捕集した。粒子の発生条件は表 1 のケース C とし、図 1 の OPS を取り外し、同じ個所に上記サンプラーをインラインで繋ぎ、流量 1 L/min で 100 分間ポンプにより吸引した。

SEM 観察のための前処理として、粒子捕集後のフィルター中心部から数 mm 角の観察部位を切り抜き、SEM 観察用試料載台にカーボン両面テープで固定し、厚さ 4 nm の Pt コーティングを施した。

SEM によって観察した粒子像は、画像解析ソフトウェア（WinRoof2018、三谷商事）を用いて、粒子の面積、円相当径、アスペクト比等の形状情報を取得した。

### C.結果

#### 1. 繊維状粒子の発生濃度の時間変動

図 2 は、各発生条件における纖維状粒子の発生濃度の時間変動を示す。ここで発生濃度は、OPS で測定した 0.3  $\mu\text{m}$  以上の粒子数濃度に調整空気による希釈の影響を補正した値である。いずれの条件においても、攪拌を開始して 10~20 分後に最大濃度を示し、その後は減少した。最大値は、ケ

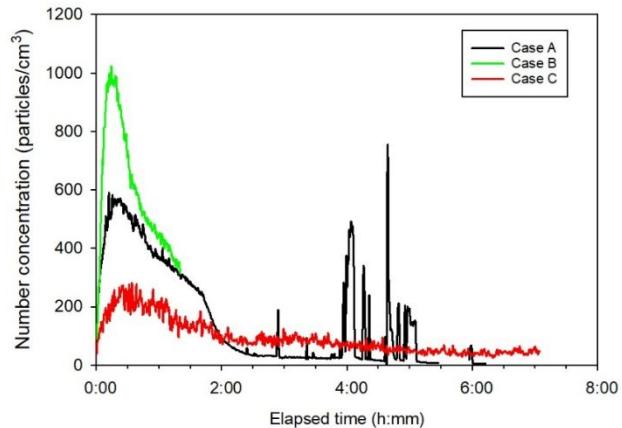


図 2 繊維状粒子の発生濃度および時間変動。  
図中の Case A, B, C は表 1 のケース A, B, C を指す

ース A、B、C でそれぞれ約 1000、600、250 個/ $\text{cm}^3$  であった。数時間経つと、時折散発的な高濃度イベントが見られるものの（例えばケース A の 4 時間後、4 時間 40 分後）、濃度減少率が緩やかになり、ケース A では 10~30 個/ $\text{cm}^3$ 、ケース C では 80~100 個/ $\text{cm}^3$  となり安定して発生した。ケース B では、ステンレスビーズによる攪拌改善により初期の発生濃度は高い値となったが、1 時間後にはビーズなしの条件と同程度まで減少した（なお、2 時間半経過後から測定器のエラーのためデータ未取得）。ケース A と C の条件の違いは通気流量と試料量である。一般に通気流量が大きく試料量が多いほど発生濃度が高くなると考えられ、初期ではそのような傾向を示したが、2 時間経過後には通気流量が小さく試料量が少ないケース C の方が高い濃度で安定して発生していた。

ボルテックスシェーカー法に関しては、これまでに様々な発生条件において、また多様な粉体材料に関して事例が報告されているが、粉体の性状によって発生の挙動が複雑に変化するため、粉体材料ごとに発生条件を検討・調整する必要がある。また、ケース A の後半で見られるように、散発的な濃度上昇イベントが頻繁にみられる場合があり、時間の経過に伴う発生状況の変化については、再現性の確認や纖維形状の違いの影響について検証

が必要である。

## 2 . 粒形分布の変動

図 3 はケース A、B、C の 10~20 分経過後ににおける発生濃度が高かった時点の粒径分布である。粒径分布は APS の測定による空気力学径にもとづいている。濃度は発生条件によって異なるが、分布のモードはケース A、B、C でそれぞれ約 1.6、1.5、1.3  $\mu\text{m}$  であり、単峰性分布で分布形状もよく似ていた。

図 4 は長時間測定したケース A と C における粒径分布(空気力学径)の時間変化を示す。粒径分布は、高濃度ピーク時の 10~20 分後と、濃度の減少率が緩やかになり安定していた 3 時間後及び 6 時間後である。ケース A の 3 時間および 6 時間経過した粒径分布と濃度ピーク時とを比較すると、長時間経過後はモードが 1.1~1.3  $\mu\text{m}$  に小さくなり、分布形状も 7~8  $\mu\text{m}$  のところで傾きの角度が異なっていたが、時間変化による分布形状への影響は小さいといえる。ケース C は時間が経過に伴って、わずかにモード値が小さくなっているが、分布形状は変わらずに長時間保たれていた。非晶質の GW や RCF ではビーズの存在による物理的な破碎にも注意が必要であるが、ビーズを用いていないケース A と C では粒径変化に大きな差は認められなかった。粒径の意味するところについては更なる考察が必要である。

## 3 . APS と OPS による測定値の比較

前述の纖維状粒子の発生濃度の時間変動の結果から、APS と OPS の両装置による測定値比較のための並行測定において、濃度の変動が比較的穏やかで、可測範囲内の濃度を供給することを考慮し、エアロゾル発生条件を試料量 0.5  $\text{cm}^3$ 、試験管通気流量 1.5 L/min とした。

図 5 は、APS と OPS の粒子数濃度を比較した結果である。どちらも発生開始直後に、濃度のピークがあり、その後徐々に濃度が減少した。濃度

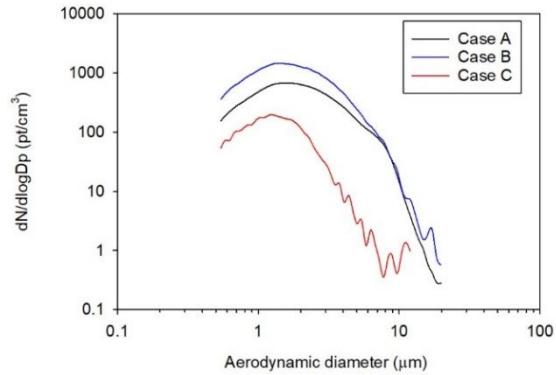


図 3 各発生条件における 10~20 分経過後の粒径分布  
粒径分布は APS の測定による空気力学径

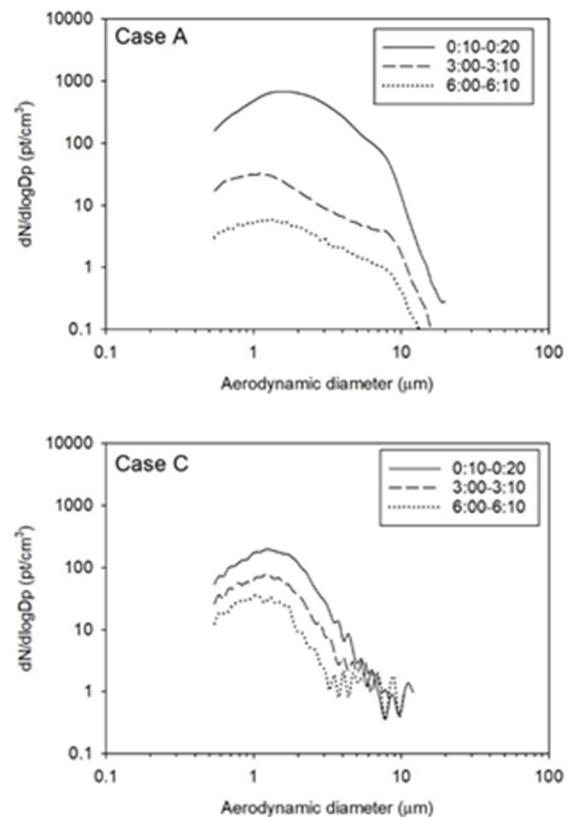


図 4 粒径分布の時間変化。(上図)ケース A、(下図)ケース C  
粒径分布は APS の測定による空気力学径

に関しては、0.3  $\mu\text{m}$  以上と 0.56  $\mu\text{m}$  以上の 2 粒径について比較している。APS で空気力学径を測定する場合は 0.56  $\mu\text{m}$  以下の粒子は測定できない

が、本装置は光散乱による検出器を備えているため、それにより  $0.3\text{ }\mu\text{m}$  以上の粒子の個数濃度を測定できる。よって、図中の APS Total Conc. は光散乱による  $0.3\text{ }\mu\text{m}$  以上の粒子を、APS  $0.56\text{ }\mu\text{m}$  以上は空気力学径で  $0.56\text{ }\mu\text{m}$  以上の粒子のことである。並行測定を行っていた OPS は、APS の約 2 倍の濃度を示した。一つの可能性として APS で測定する際に使用した希釈装置 (Model3302A) の補正係数 (オレイン酸粒子 (油滴状の粒子) を校正粒子として算出) が、纖維状粒子を測定する場合に影響が出たかもしれない。その他、両装置とも検出部の較正はポリスチレンラテックス粒子 (PSL 粒子、球体で比重が約 1.06、屈折率が約 1.59) で校正されており、形状が球体から離れた纖維状粒子を測定する場合には、光散乱や空気力学的なずれが生じ、装置の感度に影響を及ぼす可能性がある。現時点では機種間での濃度差の原因を特定できなかった。

図 5 には、個数中央径 (CMD: Count median diameter) を併せて示している。濃度は時間の経過に伴って変動しているが、CMD はほぼ一定であった。APS で測定した CMD は約  $1.2\text{ }\mu\text{m}$  で、OPS では約  $0.85\text{ }\mu\text{m}$  であった。この違いに関しては後で考察する。

なお、図 5 の測定条件は図 2 ケース C と同じであるにもかかわらず、図 5 の濃度が低くなっている。これは、調整空気による希釈の影響を補正していないためである。補正を行った場合は、同等の値になる。

図 6 は、APS と OPS で纖維状粒子の粒径分布を測定した際の時間変動である。APS は  $1.2\text{ }\mu\text{m}$ あたりにモードを有する単峰性分布であり、分布形状を保ったまま時間とともに緩やかに濃度が減少していった。事前に行った試験 (図 4) と同様の分布と変動を示しており、再現性があることも確認された。一方で、OPS で測定した粒径分布は、 $0.5$ 、 $0.9$ 、 $2.0\text{ }\mu\text{m}$  あたりにモードをもつ多峰性の分布を示し、濃度は粒径分布の形状を保ったま

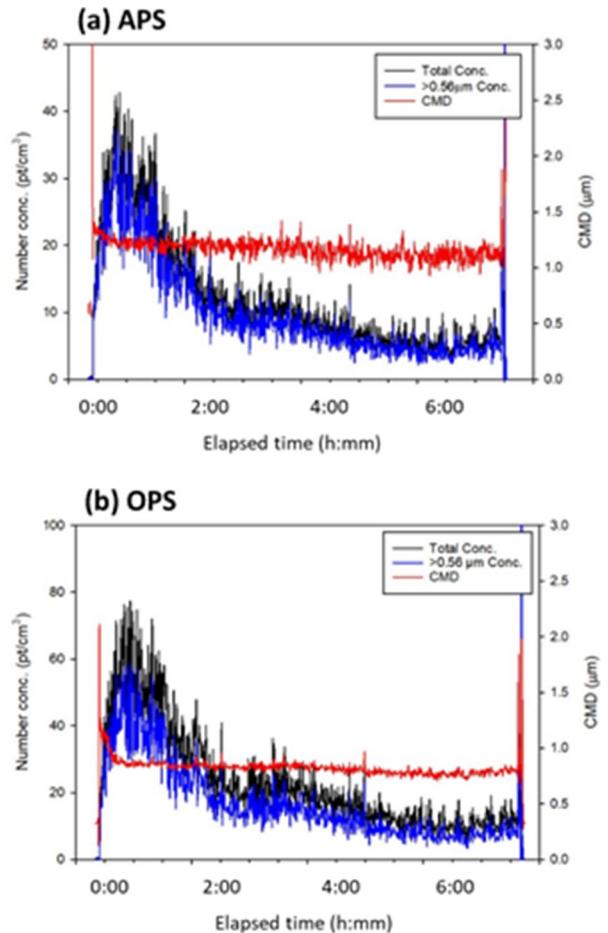


図 5 繊維状粒子の発生濃度および粒子中位径の時間変動。(a) APS と(b) OPS によって並行測定を行った結果。

ま時間とともに緩やかに減少していった。

#### 4 . SEM による粒子形状の確認

図 7 はボルテックスシェーカー法で気中分散した GW1 粒子の SEM 観察像であり、表 1 ケース C の条件で濃度が安定した状態において  $100\text{ L}$  の試料空気を吸引した試料である (( 実際には図 5、6 の OPS、APS の並行測定後に同一試料、同一条件で粒子を捕集。APS で並行測定を行っており粒子数濃度は約  $10\text{ 個}/\text{cm}^3$  であった ) 繊維の直径は  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  から  $10\text{ }\mu\text{m}$  まで広範囲であった。粒子のアスペクト比は、比の大きな細い糸のようなものから 1 に近いものまでまんべんなく見られた。また、纖維直径が太くなり  $10\text{ }\mu\text{m}$  に近づくとアス

ペクト比の大きなものはほとんど見られなかった。粒子の形状を定量的に記述するために、画像の二値化処理を行い(図7)、この粒子に対しての形状特徴を把握した。図8は粒径(円相当径、粒子の面積と同面積の円の直径)に対するアスペクト比である。円相当径が1μm以上の粒子でアスペクト比が大きい傾向が見られた。アスペクト比毎に見ると2未満が340個(全体の59%)、2以上3未満が88個(15%)、3以上5未満が63個(11%)、5以上10未満が58個(10%)、10以上

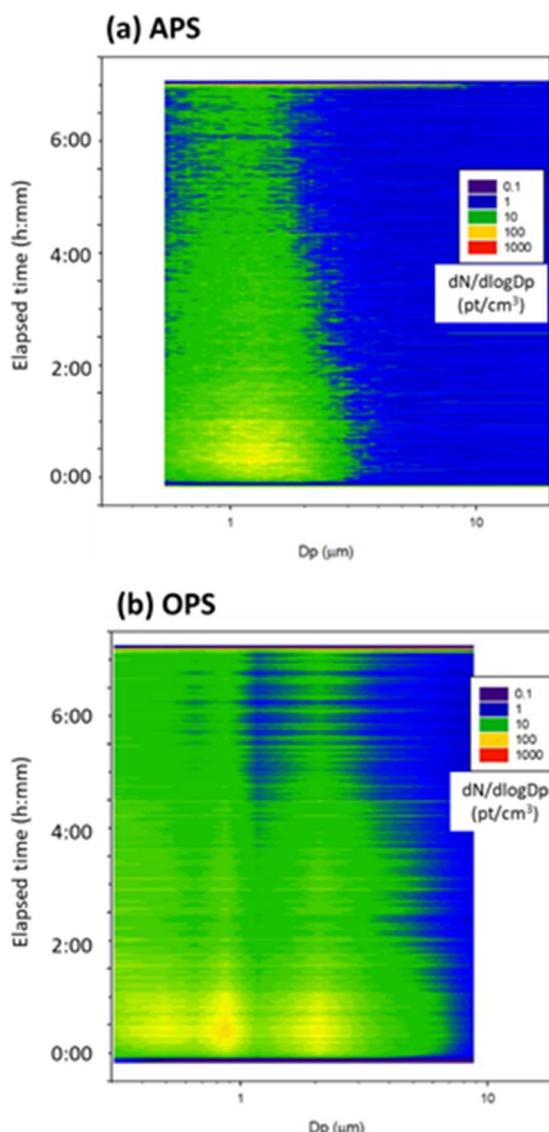


図6 発生させた纖維状粒子の粒径分布の時間変動。(a) APS と(b) OPS で測定。

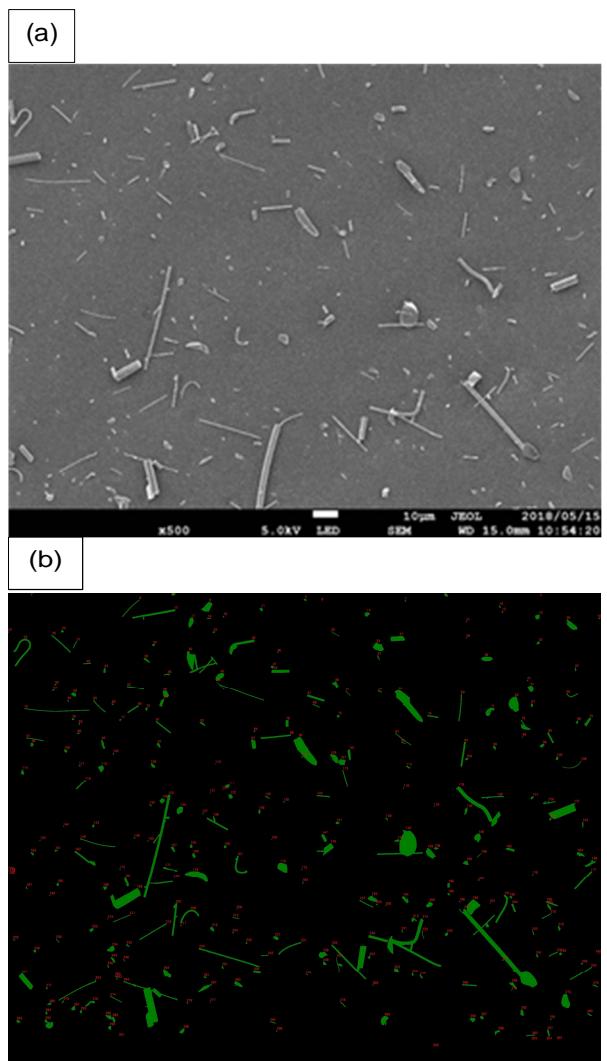


図7 SEMによる纖維状試料GW1の観察例および画像解析ソフトウェアによる二値化像  
(a) SEMによる観察例 (b)二値化像

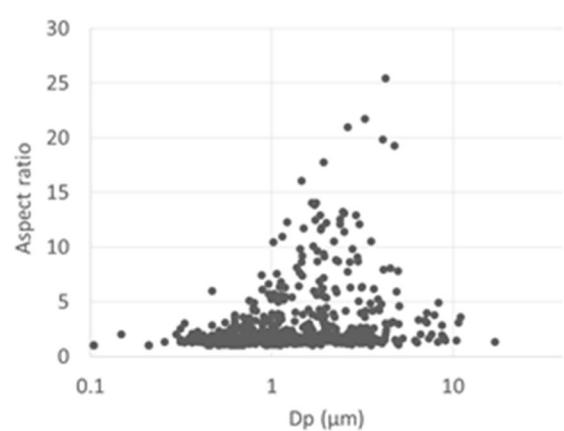


図8 粒径(円相当径)に対するアスペクト比

30 未満が 29 個 (5%) であった。以上 3 未満が 88 個 (15%)、3 以上 5 未満が 63 個 (11%)、5 以上 10 未満が 58 個 (10%)、10 以上 30 未満が 29 個 (5%) であった。

画像解析によって求めた個々の粒子の円相当径から粒径分布を求め、APS および OPS と比較した(図 9)。円相当径と空気力学径は似た分布を示したが、光散乱計は前述したとおり多峰性の分布を示した。

#### D. 考察

ボルテックスシェーカー法によるエアロゾルの安定発生に関しては、本実験で用いた GW1 粉体だけでなく、ナノ TiO<sub>2</sub> 粉体においても数時間経過すると濃度が安定するという傾向が確認されている。ただし、ナノ TiO<sub>2</sub> 粉体の多くは一定時間経過後の粒径分布は初期とは異なり、大きいサイズにシフトした粒径分布を示し、この原因は長時間攪拌に伴う凝集体の成長の影響と示唆された。一方で、本研究で使用した纖維状物質 GW1 は纖維径がサブミクロン以上と太く、また、直線性が高く枝分かれが少なかった。絡まるような形状ではないため、長時間攪拌しても粒子の凝集は顕著でなく、単体の粒子として発生するため粒径分布が変わらずに保たれたと考えられる。また、破碎による粒径の変化も大きくはないと判断された。

このようにして発生した纖維状物質エアロゾルを用いて、リアルタイムモニターの評価を進めるために、OPS と APS を用いて、表 1 のケース C の条件で得られた粒子の測定結果を比較した。個数濃度の経時変化と個数中央径の安定性については、どちらの装置も傾向が一致した。しかしながら、個数中央径は OPS で APS より小さく、光散乱測定による個数濃度を求めたところ、OPS が APS の約 2 倍となった。粒子のリアルタイム測定装置は通常、球形粒子で校正すること、粒子の形状や屈折率などが散乱光強度に影響を及ぼすことは知られていることであり、リアルタイムモニタ

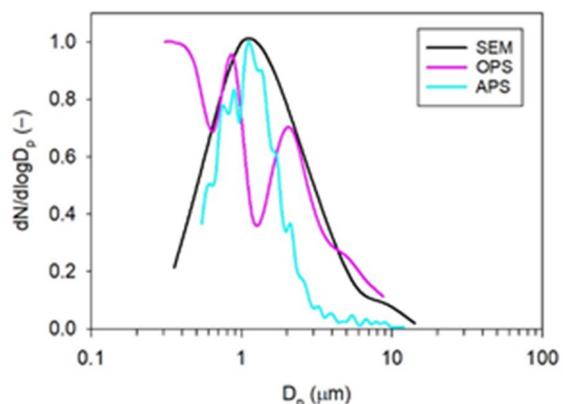


図 9 円相当径 (SEM 観察)、光散乱径 (OPS 測定)、空気力学径 (APS 測定) による纖維状粒子の粒径分布比較

ーを使用する際にも、校正を目的物質で行う必要があることを示唆している。アスベストを自動計測装置で計測をする際にも、可能であれば目的の纖維状粒子で校正することや 1 年に 1 度は校正して装置の状態を確認することの必要性が述べられている (環境省、2018; Kauffer, 2003)。また、感度に影響するのは、纖維径よりも纖維長であるが、PCM 計数とは概ね 20% 程度の誤差との報告もある (柏柳, 2015; 森田, 2017)。これまでに纖維状粒子の自動計測装置は四種類が市販されている (環境省) が、実際に現在入手できて、かつ校正を依頼できる機種は 1 社のみのようである。RCF はアスベストより種類が少ないため、変換係数を求めて利用することは可能かもしれない。ただし、自動計測装置はメーカー毎に原理や仕様が異なるため、測定可能な対象範囲も変わることが知られている。例えば、纖維状粒子の検出最小長さは装置によって 2 μm、5 μm または直径 0.1 μm × 長さ 1 μm である。また、炉の改修の場合は、設置時と RCF の性状や状態が変化していることが予想されるため、作業環境としての測定はフィルター捕集 - 顕微鏡による計数が必要であろう。PCM での計数は纖維径が 1 μm 未満の纖維の数え落としがあるため、自動計数装置の測定値が高いと言われている。日

本で取り扱われている RCF の纖維径は一般的に 2 ~ 4  $\mu\text{m}$  程度である。RCF は非結晶性であるため、アスペストのように、纖維が更に細くなるような纖維方向の割れ方はしないと言われているが、バルクの纖維径に比べて作業環境中の纖維は纖維径が小さい方向にシフトしているデータがある (Greim, 2014)。一般に纖維状物質は、纖維径が 3  $\mu\text{m}$  以下では吸入性粉じんとなり、肺深部に到達するとされていることから、RCF も飛散する粒子では吸入性の粒子の割合が高くなる可能性があるため、PCM ではなく SEM での評価が必要かもしれない。しかし、これまでと測定法を変更することは管理区分に直接的に繋がるため、難しいことが予想される。実際の作業環境では管理濃度より低い値の範囲で測定の正確さが求められる。海外の測定例では、TLV-TWA 値として 0.5 f/cm<sup>3</sup> に収束して来ており、作業環境対策としては限界に達しているとの報告がある (Maxim, 2008)。公表されている国内の労働環境のデータも特に高い値ではない (Hori, 1991)。RCF の歴史を考えるとばく露歴はアスペストに比べると短いため、生体影響が出るとするとこれからになる可能性がある。非定常作業における個人ばく露データをできる限り正確に残すべきである。

狭隘空間での重労働の場合、フィルター捕集は作業者への負担が大きいことから、簡単なリアルタイムモニターによる測定ができることが望ましい。図 6 や図 9 に示すように、同じように発生した GW エアロゾルに対して OPS と APS の応答が異なるため、リアルタイムモニターの導入には更なる研究が必要と思われる。図 9 では SEM 観察で求めた円相当径と APS 測定から得られた空気力学径の粒径分布が比較的良く一致しており、今後に向けて期待される。顕微鏡像の自動計数の高度化と、安定して発生した低濃度の RCF エアロゾルによる試験を行うことで、リアルタイムモニターによる RCF の作業場の環境管理ができるようになることが期待される。0.1 ~ 10 f/cm<sup>3</sup> 程度の範

囲で装置の検証を行うことになる。現在のエアロゾル発生方法では 100 個/cm<sup>3</sup> 以上の濃度で発生可能であるが、今後は低濃度側の供給という点において、適切な希釈方法を検討して、要求される濃度でのエアロゾルにより自動計測装置の評価をする必要がある。特に RCF を用いて実験する場合には、その有害性を考慮して、希釈前でも低い濃度となる発生法を検討する必要がある。0.1 ~ 10 f/cm<sup>3</sup> 程度の範囲で装置の検証を行うことになる。現在のエアロゾル発生方法では 100 個/cm<sup>3</sup> 以上の濃度で発生可能であるが、今後は低濃度側の供給という点において、適切な希釈方法を検討して、要求される濃度でのエアロゾルにより自動計測装置の評価をする必要がある。

## E. 結論

本研究ではボルテックスシェーカー法を用いて安定した纖維状粒子グラスワールのエアロゾルを発生し、そのエアロゾルを使用して、OPS, APS 及び SEM 観察による粒径分布を評価した。更なる検証が必要であるが、迅速に SEM 画像を評価できれば、纖維状物質をリアルタイムモニターで測定する際の粒子分別を可能にすることができる可能性が示唆された。非定常作業等で使用可能な簡便な曝露測定への可能性も示唆された。また、SEM を用いた自動計数が可能になると、PCM で取りこぼす細い纖維についても十分な計測が可能になり、RCF の製品の歴史の短さから来るばく露情報の少なさを新しい手法でデータを増やすことができる可能性がある。

## 参考資料

- Baron, P. et al., NIOSH DART 02-01(2003)
- IARC, IARC Monographs, volume 81(2002)
- Greim, H., Utell, M.J., et al., Inhal. Tox. 26(13), 789 (2014)
- Hori, H., Higashi, T., et.al., Ann. Occup. Hyg. 37(6), 623(1991)
- 柏柳太郎、村田克ら、第 54 回日本労働衛生工学会予稿集、p.38(2014)

Kauffer, E., Martin, P., et al., Ann Occup. Hyg.  
47(5), 413 (2003)

環境省編：エアロゾルモニタリングマニュアル改  
訂版（2018）

小西 労働衛生工学会予稿集（2017）

Kohyama, N., Tanaka I., et al., Ind Health, 35,  
415(1997)

Maxim, L.D. and Utell, M.J., Inhal. Tox. 20,  
289(2008)

中西準子編、ナノ材料リスク評価書最終報告版、  
小倉勇 p.55(2011)

森田晶子、荒川大悟ら、第5回日本纖維状物質研  
究学術集会、p.70(2017)

山田丸ら、労働安全衛生研究, 7, 31(2014)



