

F-1K を用いた RCF 取扱い作業現場の簡易測定法

名古屋俊士（早稲田大学）

1. 目的

リフラクトリーセラミックファイバー（以下、RCFと略す）は、IARCで2Bであることから、平成22年の「化学物質のリスク評価に係る企画検討会」で有害物曝露作業報告の対象物質に選定された。その後23年1月から3月の期間にRCF取扱い事業場から398の曝露作業報告が提出された。その内、個人曝露濃度測定を受け入れてくれる8事業場、40人の作業者に対して24年度初期リスク評価の為に曝露濃度測定に実施した。その結果を「化学物質のリスク検討会」で、リスク初期評価を行った結果、詳細リスク評価対象物質になった。25年に4事業場、11人の作業者に対して詳細リスク評価のための曝露濃度測定を実施した。26年7月に詳細リスク評価を行い、健康障害防止措置の導入が必要な物質と判断した。「化学物質の健康障害防止措置検討会」で検討した結果、RCF及びRCFを含む製剤その他の物を製造し、又は取扱う作業については、特化則の管理第2類物質と同様の措置を講じる必要があるとされた。

そこで、今後 RCF の規制がかかり、定期的に作業環境測定が実施されることから、RCF の測定法に着目した。RCF などの人造鉱物繊維の濃度測定には、石棉と同様に位相差顕微鏡を用いる方法（以下、PCM 法と記す）が従来から用いられている。しかし RCF の製造や成形や加工、発泡作業を行う労働環境において、浮遊する繊維状物質に対する作業環境管理を行うためには、PCM 法に比べて計測に熟練度を必要としない簡便な測定法として、繊維状物質を測定対象とするリアルタイム計測機器による測定も考えられる。そのような測定機器の一つであるファイバーモニターF-1K 型（柴田科学株式会社製、以下、F-1K と記す。）は、空气中に浮遊する粒子に、吸引したダクト内で電圧をかけて挙動を制御した状態でレーザー光を照射し、その散乱光信号を解析することにより繊維数濃度を算出する測定器である。そこでこの F-1K について、実験室において RCF 試料に対する測定結果を PCM 法と比較するとともに、RCF 取扱い現場における簡易測定法として適用の可能性を検討した。

2. 実験チャンバーを用いた F-1K と PCM 法の相関性の調査

2.1 目的

繊維状物質として広く知られているアスベストは天然鉱物繊維であり、人工鉱物繊維である RCF とは発生する繊維状粒子の特徴が異なる。アスベスト、特にクリソタイルは細く湾曲した繊維状粒子が多く発生する一方で、RCF は直線的かつ幅もアスベストと比べ太いものが多い。F-1K はアスベスト測定器として用いられてきた背景があり、校正試料として、アスベストを用いたため、RCF に対する感度が正確であるとは言い難い。そのため、実験チャンバーを用いて、従来から用いられている PCM 法と F-1K の測定結果の比較を行うことで、それらの間どのような相関性があるか調査する。

2.2 使用試料

本実験で用いた試料はセラミックファイバー工業会から提供して頂いた A 社製 RCF 試料である。

2.3 実験方法

実験装置の概略図を図 2.1 に示す。ガラスビーズと RCF 試料を封入したガラス製発生装置を振とうさせ、ポンプを用いて約 40L の実験チャンバー(縦 30cm×横 30×幅 45cm)内へ RCF を飛散させ、F-1K とオープンフェースホルダーによるろ過捕集との並行測定を行った。1 回の測定時間は 30 分とした。チャンバー内の濃度は、RCF 発生装置の振とう回数を変えて調整し、今回は等間隔にプロットが存在する様に濃度を調整し、実験を行った。また、ろ過捕集にはメンブランフィルターを用い、アセトントリアセチン法により透明化処理を行った観察試料について、PCM 法により繊維数濃度を求めた。使用機器等の実験条件のまとめを表 2.1 に示す。

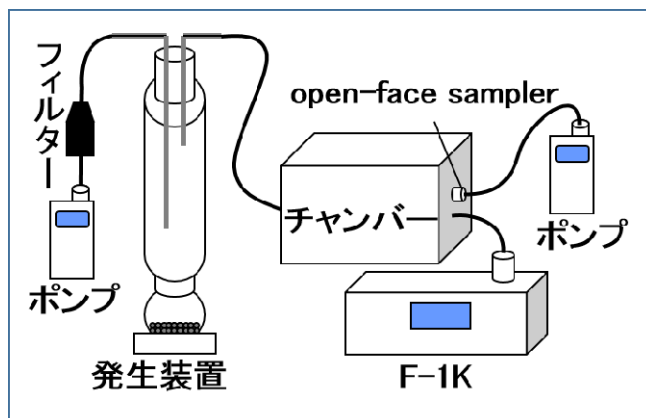


図 2.1 実験装置概略図

表 2.1 実験条件

| | |
|-------------------|--|
| 使用試料 | RCF(A社製) |
| チャンバー大きさ (縦×横×長さ) | 30cm×30cm×45cm |
| 使用機器 | F-1K (流量 2L/min) MP-Σ3 (流量 1L/min) MP-Σ500 (流量 3L/min) |
| 測定時間 | 30min |
| 測定回数 | 10回 |

2.4 実験結果

PCM法とF-1Kの比較実験結果を図2.2に示す。横軸に基準となるPCM法の繊維数濃度、縦軸にF-1Kの繊維数濃度を取り、黒線が1:1を示す直線である。また、(公社)日本作業環境測定協会における石綿分析に係るクロスチェック事業における「空気中の石綿計数分析に関するクロスチェック」の分析技術者Aランクの基準の1つである「50視野の合計の計数結果が標準値±20%以内であること」を参考に、本実験においても比が±20%以内である場合、1:1の相関性を許容できると判断する。そこで、図2.2に、その比が±20%を赤線で示し、近似曲線を青線で示す。

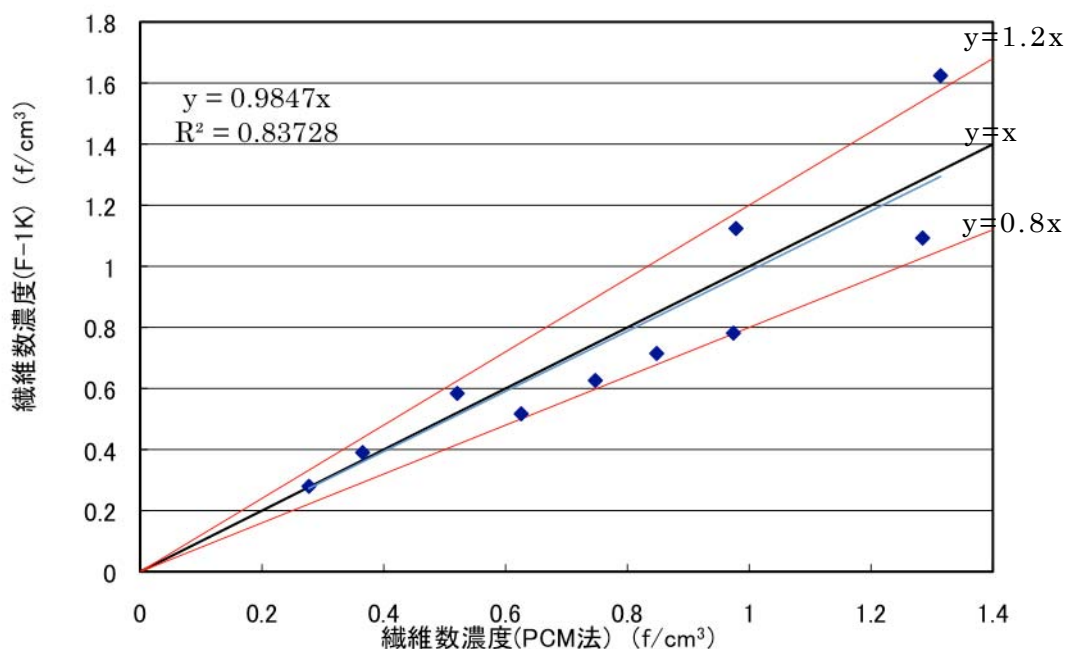


図 2.2 F-1K vs PCM法

図 2.2 より、1:1 に対して若干のばらつきはあるものの 10 回中 9 回、比が $\pm 20\%$ 以内であった。また、回帰曲線も $y=0.98x$ と比は $\pm 20\%$ 以内であり、1:1 の相関性を示す良好な結果であった。また、比が $\pm 20\%$ 以内に収まらなかった 1 回は濃度が $1f/cm^3$ を超えた実験回であり、柴田科学株式会社が定める F-1K の測定範囲外の濃度であったため、差が大きく生じ、比が $\pm 20\%$ 以内に収まらなかったと考える。

3. 8 種類の RCF 試料を用いた F-1K と PCM 法の相関性の調査

3.1 目的

A 社製 RCF 試料の実験結果より、PCM 法と F-1K の 1:1 の相関性が得られ、F-1K は PCM 法とほぼ同等の精度で測定可能であることが示唆された。しかし、用いた試料は A 社製の試料のみで、メーカーや製造工程が異なると発生する繊維状物質の形状も異なることが考えられる。そこで、異なる RCF 試料に対して、同様の実験を行い、PCM 法と F-1K の 1:1 の相関性についてより詳しく検討することを目的として、実験を行った。

3.2 使用試料

本実験で用いた試料はセラミックファイバー工業会から提供して頂いた RCF 及びアルミナファイバー試料計 8 種類（以下 RCF 試料と略す）である。

3.3 実験内容

RCF 試料 8 種類について、図 2.1 の実験装置を用い、2 章と同様な実験（以下、チャンバーありの実験とする）を行った。一方、基礎実験前に RCF 取扱い作業現場で現場測定を行ったとき、F-1K が PCM 法に比べて過小評価する傾向が認められた。考えられる原因として、発生繊維の違いが考えられ、特に幅 $3\mu m$ に近い太い繊維の割合が F-1K に影響を及ぼしていたと考えられる。そこで、チャンバーを介さず発生装置に直接接続することにより、 $3\mu m$ 近くの太い繊維の割合が高まることを利用して、図 3.1 に示す実験装置を用いて実験（以下、チャンバーなしの実験とする）を行うことにした。ガラスビーズと RCF 試料を封入したガラス製発生装置を振とうさせ、RCF を飛散させ、F-1K とディスポーザブルサンプラーによるろ過捕集との並行測定を行った。1 回の測定時間は基本 15 分とした。チャンバー内の濃度は、RCF 発生装置の振とう回数を変えて調整した。またろ過捕集にはメンブランフィルターを用い、アセトントリアセチン法により透明化処理を行った観察試料について、PCM 法により繊維数濃度を求めた。使用機器等の実験条件のまとめを表 3.1 に示す。

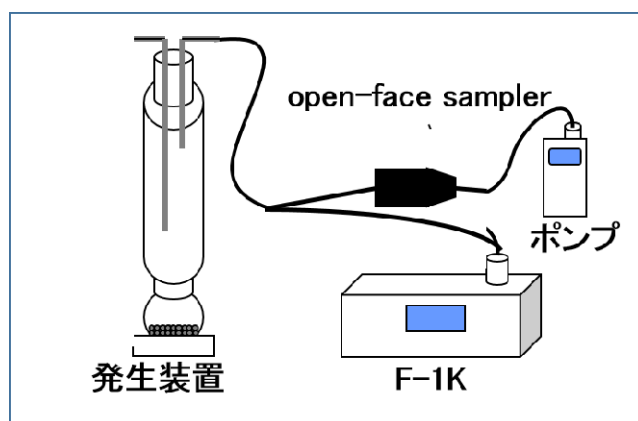


図 3.1 実験概略図

表 3.1 実験条件

| | |
|------|--|
| 使用試料 | RCF 試料 8 種類 |
| 使用機器 | F-1K (流量 2L/min) MP-Σ3 (流量 1L/min) MP-Σ500 (流量 3L/min) |
| 測定時間 | 15min |
| 測定回数 | 各試料 5 回 |

3.4 実験結果

チャンバーありでの並行測定の近似曲線とチャンバーなしでの並行測定の近似曲線をまとめて 8 種類の結果を表 3.2 に示す。

表 3.2 各試料におけるチャンバー有無の近似曲線の比較

| 試料 | チャンバーあり | チャンバーなし |
|-------|-----------|-----------|
| A 社試料 | $y=1.01x$ | $y=0.97x$ |
| B 社試料 | $y=0.87x$ | $y=0.82x$ |
| C 社試料 | $y=0.96$ | $y=0.82x$ |
| D 社試料 | $y=1.13x$ | $y=1.00x$ |
| E 社試料 | $y=0.81x$ | $y=0.83x$ |
| F 社試料 | $y=0.88x$ | $y=1.00x$ |
| G 社試料 | $y=0.81x$ | $y=1.03x$ |
| H 社試料 | $y=0.98x$ | $y=1.01x$ |

チャンバーの有無において、回帰曲線の比較を行った結果、8 試料中 6 試料はほぼ同等もしくは傾きが低い値となった。チャンバーなしの場合は、発生繊維に

おける幅 2.5 μ m 以上の繊維割合及び幅 3 μ m 以上の繊維割合が高くなるため、太い繊維が F-1K の測定精度に影響を与えていることを示唆する結果と考える。一方で、F 社及び G 社においては傾きが高い値となった。その為、発生繊維の他に製造メーカーや工程において、測定精度に個体差が生じていることも推測される。

以上より、全試料において回帰曲線は $\pm 20\%$ 以内に収まっており、F-1K は PCM 法とほぼ同等の精度での測定が可能であると考えられる。

4. RCF 取扱い作業現場の簡易測定の検証

4.1 目的

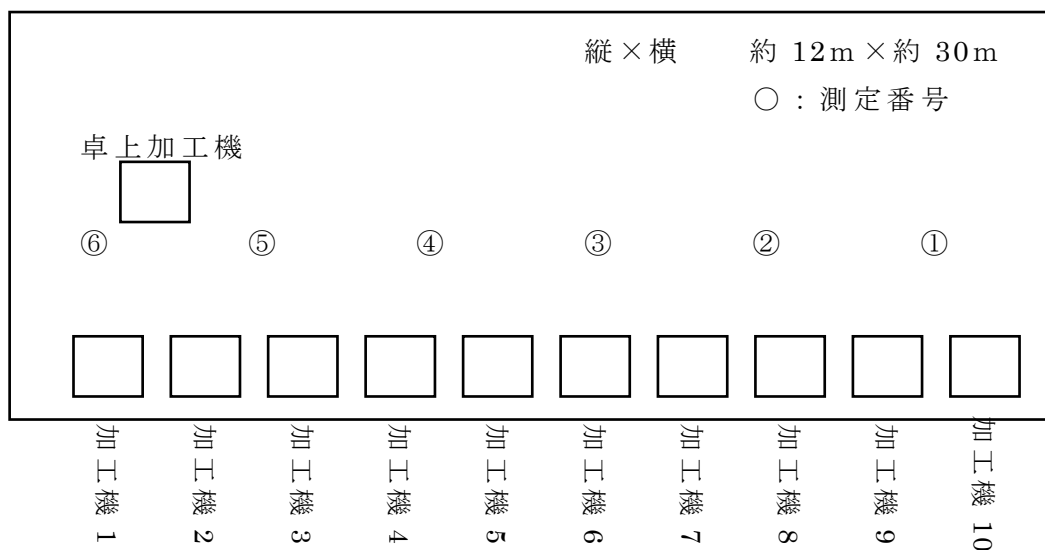
実験室において RCF の従来の測定法である PCM 法と F-1K との 1:1 の相関性が示され、F-1K は PCM 法とほぼ同等の精度で測定可能であるという知見が得られた。そこで、RCF の加工及び製造等を行う RCF 取り扱い作業現場へ実際に行き、工場内にて並行測定及び A 測定を実施し、F-1K と PCM 法との相関性調査及び現場適用に向けた検討を行った。

4.2 測定概要

測定場所は RCF の加工を行っている工場にて、加工作業場 1 及び加工作業場 2 を選定し、測定を行った。ディスポーザブルサンプラーと F-1K による並行測定を単位作業場所の各測定点にて実施し、PCM 法と F-1K の相関性を調査した。使用機器等を記した測定概要を表 4.1 に示す。また、加工作業場 1 及び加工作業場 2 の概略図及び測定点を図 4.1 及び図 4.2 にそれぞれ示す。

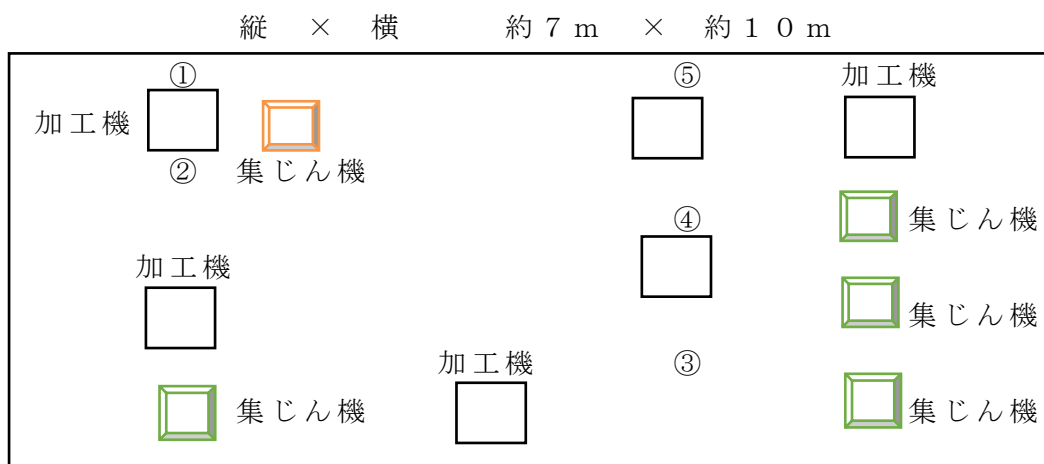
表 4.1 測定概要

| | |
|--------------------|---|
| 使用機器 | ディスポーザブルサンプラー MP- Σ 3 (流量 1L/min) F-1K (流量 2L/min) |
| 測定時間 | 並行測定 : 10min |
| 測定単位作業場所 (測定点数) | 加工作業場 1 (6 点) 加工作業場 2 (5 点) |



加工機は、切断、表面研削等の加工機

図 4.1 加工作業場 1 の概略図及び測定点



加工機は、切断、表面研削等の加工機

図 4.2 加工作業場 2 の概略図及び測定点

4.3 測定結果

4.3.1 加工作業場 1 における測定結果

加工作業場 1 における各測定点における PCM 法及び F-1K の測定結果を表 4.2 及び図 4.3 に示す。さらに、単位作業場所における幾何平均 M、幾何標準偏差 σ 等評価結果を併せて表 4.2 に示す。また、PCM 法の 10 分間の定量下限値は $0.03f/cm^3$ であるが、本測定において、この定量下限値を下回る場合には計数視野を 100 視野とすることで定量下限値を 0.02 とした。

表 4.2 加工作業場 1 における測定結果

| 測定点 | F-1K | PCM 法 |
|-----------------|----------------|-------|
| | 繊維数濃度 f/cm^3 | |
| 測定点 1 | 0.073 | 0.082 |
| 測定点 2 | 0.042 | 0.047 |
| 測定点 3 | 0.038 | 0.059 |
| 測定点 4 | 0.015 | 0.035 |
| 測定点 5 | 0.023 | 0.020 |
| 測定点 6 | 0.092 | 0.11 |
| M | 0.039 | 0.051 |
| σ | 2.60 | 2.47 |
| E _{A1} | 0.19 | 0.23 |
| E _{A2} | 0.062 | 0.077 |
| E | 0.20 | 0.20 |
| 管理区分 | 1 | 2 |

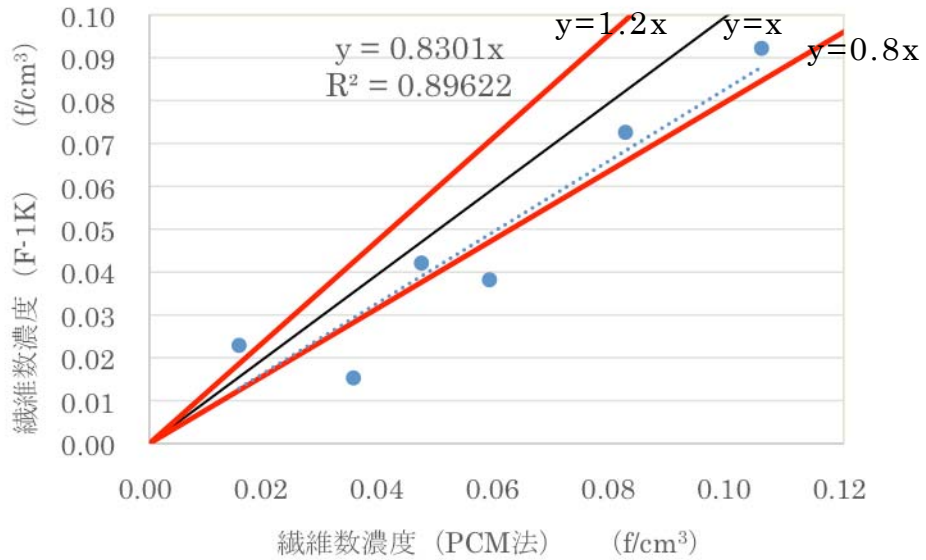


図 4.3 加工作業場 1 における F-1K と PCM 法の比較結果

図 4.3 より、 $\pm 20\%$ の範囲を超える測定点が 3 つあったが、表 4.2 より加工作業場 1 では各測定点の幾何平均は PCM 法の $M=0.051$ に比べて、F-1K の $M=0.039$ と低い値を示し、管理区分は PCM 法で第 2 管理区分に対し、F-1K では第 1 管理区分であった。

また、本測定においても F-1K のバックアップフィルターに捕集された RCF の濃度を PCM 法により求めた結果を図 4.4 に示す。

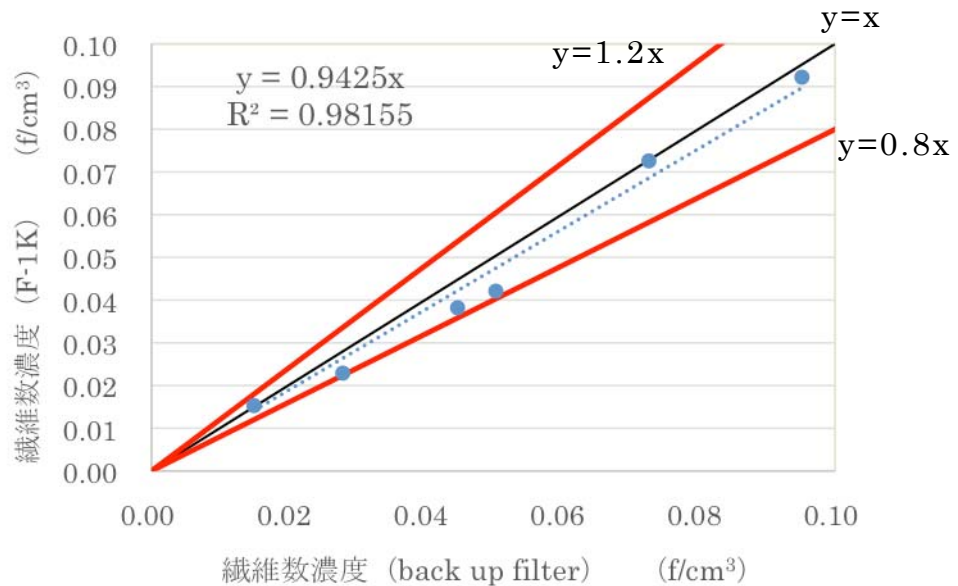


図 4.4 加工作業場 1 における back up filter と F-1K の比較結果

図 4.4 より、F-1K のバックアップフィルターの繊維数濃度と F-1K の値は、全ての測定点で±20%の範囲以内であった。

そこで、F-1K の測定結果にバックアップフィルターから求めた繊維数濃度変換係数 F 値を乗じた結果を表 4.3 に示す。さらに、単位作業場所における幾何平均 M、幾何標準偏差 σ 等評価結果を併せて表 4.3 に示す。繊維数濃度変換係数 F 値の求め方は、PCM 法と F-1K の値の近い、測定点 2 及び測定点 5 を選定し、その測定値から式 1 を用いて F 値を求めた。測定点 2 のバックアップフィルターから求めた繊維数濃度は、0.050 であり、測定点 5 のバックアップフィルターから求めた繊維数濃度は、0.028 であった。

$$F(\text{値}) = (\text{バックアップフィルターの濃度}) / (\text{F-1K の測定値}) \quad \text{式 1}$$

各測定点における F 値は、下記の通りである。

測定点 2 における F 値は、 $F=0.050/0.042=1.19$ より、 $F=1.19$

測定点 5 における F 値は、 $F=0.028/0.023=1.22$ より、 $F=1.22$

表 4.3 加工作業場 1 における F 値による変換後の測定結果

| 測定点 | F-1K | F-1K 測定点 2 | F-1K 測定点 5 | PCM 法 (参考) |
|----------|-------|---------------|---------------|---------------|
| 測定点 1 | 0.073 | 0.087 | 0.089 | 0.082 |
| 測定点 2 | 0.042 | 0.050 | 0.051 | 0.047 |
| 測定点 3 | 0.038 | 0.045 | 0.046 | 0.059 |
| 測定点 4 | 0.015 | 0.018 | 0.018 | 0.035 |
| 測定点 5 | 0.023 | 0.027 | 0.028 | 0.02 |
| 測定点 6 | 0.092 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| M | 0.039 | 0.047 | 0.048 | 0.051 |
| σ | 2.60 | 2.60 | 2.60 | 2.47 |
| E_{A1} | 0.19 | 0.23 | 0.23 | 0.23 |
| E_{A2} | 0.062 | 0.074 | 0.075 | 0.077 |
| E(二次評価値) | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| 管理区分 | 第 1 | 第 2 | 第 2 | 第 2 |

表 4.3 より、F 値を求め変換することで、F-1K で直接求めた M より、F 値で

変換した後の M、特に、測定点 5 から求めた M は、PCM 法で求めた M に近く、管理区分も一致した。ただ、粉じん濃度測定の際に単位作業場所のどの位置に併行測定点を決めるかは、作業環境測定士の判断にかかっているのと同様に、F-1K の繊維数濃度変換係数 F 値を求める併行測定点をどこに決めるかは、作業環境測定士の判断にかかっていると考えられる。

4.3.2 加工作業場 2 における測定結果

加工作業場 2 における各測定点における PCM 法及び F-1K の測定結果を表 4.4 及び図 4.4 に示す。

表 4.6 加工作業場 2 における測定結果

| 測定点 | F-1K | PCM 法 |
|-------|-------|-------------------|
| | 繊維数濃度 | f/cm ³ |
| 測定点 1 | 0.035 | 0.035 |
| 測定点 2 | 0.023 | 0.020 |
| 測定点 3 | 0.019 | 0.024 |
| 測定点 4 | 0.019 | 0.035 |
| 測定点 5 | 0.035 | 0.059 |

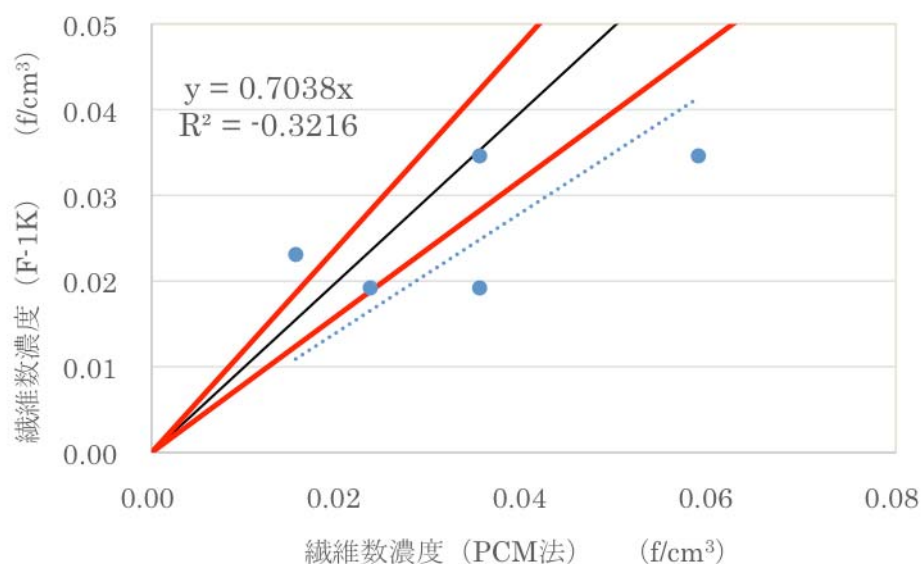


図 4.4 加工作業場 2 における F-1K と PCM 法の比較結果

次に、F-1K の測定結果にバックアップフィルターから求めた繊維数濃度変換係数を乗じた結果を表 4.7 に示す。繊維数濃度変換係数 F 値の求め方は、PCM 法と F-1K の値の近い、測定点 1 及び測定点 2 を選定し、その測定値から式 1 を用いて F 値を求めた。測定点 1 のバックアップフィルターから求めた繊維数濃度は、0.039 であり、測定点 2 のバックアップフィルターから求めた繊維数濃度は、0.034 であった。

測定点 1 における F 値は、 $F=0.039/0.035=1.11$ より、 $F=1.11$

測定点 2 における F 値は、 $F=0.034/0.023=1.48$ より、 $F=1.48$

表 4.7 加工作業場 2 における F 値による変換後の測定結果

| 測定点 | F-1K | F-1K 測定点 1 | F-1K 測定点 2 | PCM 法 (参考) |
|----------|-------|---------------|---------------|---------------|
| 測定点 1 | 0.035 | 0.039 | 0.052 | 0.035 |
| 測定点 2 | 0.023 | 0.026 | 0.034 | 0.020 |
| 測定点 3 | 0.019 | 0.021 | 0.028 | 0.024 |
| 測定点 4 | 0.019 | 0.021 | 0.028 | 0.035 |
| 測定点 5 | 0.035 | 0.039 | 0.052 | 0.059 |
| M | 0.025 | 0.028 | 0.037 | 0.032 |
| σ | 2.09 | 2.09 | 2.09 | 2.20 |
| E_{A1} | 0.085 | 0.094 | 0.12 | 0.12 |
| E_{A2} | 0.033 | 0.037 | 0.049 | 0.044 |
| E(二次評価値) | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| 管理区分 | 第 1 | 第 1 | 第 1 | 第 1 |

表 4.7 より加工作業場の場合と同様、加工作業場 2 においても繊維数濃度変換係数 F 値を求めて、補正した方がより、PCM 法で求めた結果に近いことが明らかとなった。

4.4 考察

本作業現場は各作業場所に局所排気装置等が設置され、周りの作業環境への飛散を防止していた。その結果、全ての測定点において二次評価値 ($0.2f/cm^3$) よ

り低い濃度を示した様に、良好な作業環境であった。ただ、加工作業場 1 では、作業環境の評価結果が第 2 管理区分になった。これは、1 日測定による日間変動の影響と考える。

そのような作業環境における PCM 法と F-1K の測定結果より、加工作業場は 6 点中 3 点で、回帰曲線は $y=0.83x$ と $\pm 20\%$ 以内であり、R 値は 0.938 とばらつきの少ない 1:1 の相関性を示す結果が得られた。また、加工作業場 2 は 5 点中 2 点で、回帰曲線は $y=0.70x$ と $\pm 20\%$ 以内であり、R 値は 0.32 とばらつきが大きく、1:1 の相関性が認められない結果が得られた。

今回の作業現場のような低濃度域では、測定時間が短く、捕集繊維数が少ない場合には、計数の際の測定誤差が生じやすいと考えられる。そのため、多少の誤差が生じてしまうことを加味すると、ばらつきがあるもののこれまでの結果と似た、F-1K が過小評価する傾向であると考ええる。

そこで、F-1K を PCM 法とほぼ同等の高い精度で測定を行うための対策として、併行測定点を決めた測定点でバックアップフィルターによる繊維数濃度変換係数（F 値）を算出し、他の測定点では F 値を F-1K の値に乗じた値を用いることを提案する。今回も加工作業場でバックアップフィルターの計数を行った結果、1:1 に対する各測定点でのバラツキは有ったものの、F-1K は 6 点中 6 点で回帰曲線も $y=0.94x$ と $\pm 20\%$ 以内となり、1:1 の相関性を示す結果となった。

単位作業場所において、結果が異なるものの、バックアップフィルターと F-1K の関係において、F-1K の測定結果がバックアップフィルターの測定結果より低くなる傾向であることがわかった。また、バックアップフィルターと PCM 法の関係は、PCM 法の測定結果がバックアップフィルターの測定結果より高くなる傾向であることがわかった。完璧に補えないものの、F-1K とバックアップフィルターの測定結果より、繊維数濃度変換係数 F 値を求め、換算することで F-1K の測定結果が PCM 法とほぼ同等になると考えられる。

そこで、繊維数濃度変換係数（F 値）を求め、F-1K の測定結果を変換し、PCM 法の測定結果と比較を行った。F-1K 単独で求めた幾何平均値 M より、F 値を乗じて求めた幾何平均値 M の方が、PCM 法で求めた幾何平均値 M に近い値を示すことが明らかとなった。また、本作業環境は環境管理がしっかりと行われていたため、低濃度で計数誤差が生じやすいと考える。その為、より精度を上げるためには、このような低濃度の作業環境において実際に繊維数濃度変換係数 F 値を求め、換算を行う場合は併行測定の時間を長くとり、十分な捕集を行うことで、計

数の際などの測定誤差の低減につながり、より精度が高めることができると考える。

最後に、幾何平均値 M では、PCM 法と近い値をとったものは、F-1K のバックアップフィルターから求めた F 値で補正した F-1K であった。また、第一管理水準及び第二管理水準も幾何平均値 M に、変換後の F-1K が PCM 法と近い値をとったことから、繊維数濃度変換係数 F 値を用いることで F-1K が PCM 法とほぼ同等の精度での測定が可能となることが示された。

以上より、バックアップフィルターと F-1K から繊維数濃度変換係数 (F 値) を求め、F-1K の測定結果に換算することで、F-1K が PCM 法とほぼ同等の高い精度で測定が可能であると考ええる。

4.5 総括

本作業現場のような低濃度の作業環境において繊維数濃度変換係数 F 値を用いる場合は、併行測定の時間を長くとり、十分な捕集を行うことで、計数の際などの測定誤差の低減につながり、精度を高めることができると考える。

以上より RCF 取り扱い作業現場において、F-1K が PCM 法とほぼ同等の精度で測定が可能であると考ええる。しかし、作業環境によっては F-1K が過小評価する場合が存在する。その対策として、バックアップフィルターと F-1K の測定結果から繊維数濃度変換係数 (F 値) を求め、F-1K の測定結果に換算することで、PCM 法とほぼ同等の高い精度で測定が可能であることが示された。ただ、粉じん濃度測定の併行測定と同様に単位作業場のどの場所に併行測定点を取るかによって、作業環境評価区分が変わる可能性があると考えられることから、今後、より RCF の作業現場を増やし、同様な測定を行い、F-1K による簡易測定法の検証を行う必要が考える。