

平成 23 年度

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書

石綿含有廃棄物の処理・再資源化過程における石綿の  
適正管理に関する研究 (K2133, K22039, K2335)

平成 24 年 4 月

(代表研究者) 愛媛大学 貴田 晶子

国立環境研究所 山本 貴士

京都大学 酒井 伸一

環境管理センター 豊口 敏之

日本環境衛生センター 藤吉 秀昭

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業(平成 21 年度～平成 23 年度)

所 管 環境省

国庫補助金 94,645,000 円

研究課題名 石綿含有廃棄物の処理・再資源化過程における石綿の適正管理に関する研究 (K2133, K22039, K2335)

研究期間 平成 21 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日

代表研究者名 貴田晶子 (愛媛大学)

共同研究者名 山本貴士 (国立環境研究所)  
酒井伸一 (京都大学)  
豊口敏之 (環境管理センター)  
藤吉秀昭 (日本環境衛生センター)

研究協力者名 一般社団法人 日本環境測定分析協会  
小坂浩 (元兵庫県立健康環境科学研究所)  
平井康宏、川端信裕、水嶋周一(京都大学)

平成 23 年度

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書

## 石綿含有廃棄物の処理・再資源化過程における石綿の 適正管理に関する研究

### 目 次

1. 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要版…………… 1
2. 電子顕微鏡による石綿測定法の標準化及び分析精度管理手法の検討…………… 9  
分担研究者 国立環境研究所 山本 貴士  
愛媛大学 貴田 晶子
3. 光学顕微鏡による石綿分析の精度管理手法の検討…………… 38  
分担研究者 環境管理センター 豊口 敏之  
元兵庫県立健康環境科学研究センター 小坂 浩
4. 建築物解体時の石綿含有廃棄物の発生・石綿飛散に関する研究…………… 53  
分担研究者 京都大学 酒井伸一、平井康宏、水嶋周一、川端信裕
5. 一般廃棄物破碎施設における石綿の排出動態等の把握…………… 78  
分担研究者 日本環境衛生センター 藤吉 秀昭

## 1. 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要版

・研究課題名・研究番号＝石綿含有廃棄物の処理・再資源化過程における石綿の適正管理に関する研究 (K2133、K22039、K2335)

・国庫補助金精算所要額(円)＝94,645,000

・研究期間(西暦)＝2009－2011

・研究代表者名＝貴田晶子(愛媛大学)

・研究者分担者名＝山本貴士(国立環境研究所)、酒井伸一(京都大学)、豊口敏之(環境管理センター)、藤吉秀昭(日本環境衛生センター)

・研究目的＝

新たな石綿曝露の場となり得る石綿含有廃棄物の処理・再資源化過程における石綿の適正管理は喫緊かつ重要な課題である。処理・再資源化過程における各媒体の石綿測定法及び精度管理手法を確立することが第一の目的であり、電子顕微鏡法及び光学顕微鏡法でクロスチェックを実施して誤差要因を抽出し、分析精度管理上の留意点として取りまとめる。また、石綿使用の静脈過程におけるライフサイクルリスク管理手法の検討が第二の目的であり、石綿廃棄物のリスク制御に資する飛散性石綿の除去費用簡易推計モデルの開発、石綿含有成形板の廃棄量推定、解体工事現場および廃棄物埋立地での石綿濃度測定、破碎実験による解体時石綿飛散係数の推定に取り組むとともに、石綿含有建材の混入が懸念される建設系混合廃棄物の処理・資源化過程、小型家電の破碎処理過程での石綿挙動の把握、加えて加えて、災害廃棄物の処理・資源化過程での石綿管理の課題を明らかにする。

・研究方法＝

### (1) 電子顕微鏡による石綿測定法の標準化及び分析精度管理手法の検討

電子顕微鏡法による石綿分析精度管理手法の検討としてクロスチェックを実施した。平成 21 年度には透過型電子顕微鏡法(TEM法)で4機関、走査型電子顕微鏡法(SEM法)で3機関が参加し、石綿標準(TEM法ではクリソタイル、SEM法ではアモサイト)と集じんダストから作製したTEM観察試料(Ni製200メッシュ)またはSEM観察試料(炭化タングステン製、一辺100 $\mu\text{m}$ )について、予め指定した目開きに存在する繊維を同定・計数・計測することとした。なお、集じんダストについては懸濁液も配布し、各機関で観察試料を作製して任意に選択した目開きについて測定を行った。平成22年度にはTEM法で4機関、SEM法で5機関が参加し、石綿熱処理物(アモサイト100 $^{\circ}\text{C}$ 処理物、クリソタイルとクロシドライトのそれぞれ600 $^{\circ}\text{C}$ 処理物の混合物)から作製したTEM観察試料(Ni製200メッシュ)またはSEM観察試料(炭化タングステン製、一辺200 $\mu\text{m}$ )について、同様にクロスチェックを実施した。平成23年度には、集じんダスト試料(21年度)及び石綿標準熱処理物試料(22年度)の結果について精査し、繊維サイズや元素組成(EDS分析)と石綿繊維数及び総繊維数との関係について解析し、分析精度に影響を与える要因について考察した。

### (2) 光学顕微鏡による石綿分析の精度管理手法の検討

本研究では、位相差顕微鏡(PCM)分析における精度管理手法として、同一視野を複数の分析者が観察

でき、視野ごとの石綿繊維濃度が既知であるリロケータブルテストスライドを用いた精度管理プログラムを検討した。対象とする石綿鉱物はアモサイトとクリソタイルとし、これら2種類の石綿鉱物について精度管理プログラムを実施した。精度管理プログラムは、テストスライドを各分析機関に回覧し、その回答を回収し、合意標準と比較・評価後、視野毎の評価結果を計数者にフィードバックし、合意標準とのずれや課題を提示した上で、再度、同一のリロケータブルテストスライドを観察し、確認する手法を用いた。

### (3) ライフサイクルリスク評価のための石綿含有廃棄物発生量予測と破碎飛散調査

飛散性石綿除去費用は、3段階(吹付け石綿の有無を推定する段階(出現率)、延べ床面積に対する吹付け石綿使用面積を求める段階(使用面積割合)、石綿使用面積から除去費用を求める段階)に分けて推定した。出現率は、石綿施工量推移と地域別の除去対策率をもとに、建築年と立地地域を入力値として、推定するモデルとした。使用面積比率は、76件の建物におけるデータをもとに、建物規模(延べ床面積2500m<sup>2</sup>未満 or 以上)別および建物構造(S造 or RC/SRC造)別に設定した。除去費用単価は、スケールメリットを反映するよう除去面積の関数として推定した。

石綿含有成形板の廃棄量は、石綿含有成形板等の種類別(9種類)の使用量推移ならびに、建築物の構造(木造、RC造、SRC造、S造、S造)および用途(居住用、事務所/産業用)別の着工量および残存率をもとに推定した。

解体工事現場での石綿濃度測定は、北九州市の事業所、京都大学法経済学部北館および工学部8号館の建材撤去作業にあわせ実施した。建材除去作業の前・中・後における、除去作業個人曝露、養生区画出口、工事建物周辺等での石綿濃度を測定した。なお、除去業者および測定者は、保護衣および保護マスクを着用し曝露防止を図った。埋立地での石綿濃度測定は、石綿含有廃棄物の埋立作業中に、処分場内の2地点および処分場外の1地点において実施した。

破碎実験では、送気・吸気口を設けた筒の内部で建材に錘を落下させて破碎し、筒内部の空気を吸引して、粉じん計を通過させた後、石綿繊維をろ紙上に捕集した。筒をグローブバッグ内に入れることで、実験環境全体を養生することなく簡便に安全な実験が行えるようにした。建材の幅および錘の落下距離を組み合わせた3条件(表1)で各4回破碎実験を実施した。建材には、京都大学工学部8号館地下厨房天井の建材を使用した。

### (4) 廃棄物資源化過程における石綿の管理手法の検討

廃棄物処理・再資源化過程における石綿管理手法の検討として、建築混合廃棄物を受け入れている建設廃棄物処理施設での処理・再資源化過程、石綿含有一般廃棄物の混入が疑われる小型家電の破碎過程での石綿飛散実態の把握、また災害がれき処理場での石綿管理の状況のヒアリングや実態調査を行った。

#### (ア) 建設廃棄物処理施設における石綿の排出実態調査

建設混合廃棄物を受け入れている産業廃棄物処理施設において、処理対象物、処理後物(可燃物、不燃物)、バグフィルタダスト、回転選別機内部ダスト、排水・汚泥、排ガス(バグフィルタ入口、出口)、作業環境空気(投入口付近、回転選別機付近、可燃物貯留ピット上)を採取した。排ガスについては、インピンジャー・メンブランフィルタで捕集し、位相差顕微鏡(PCM)による計数法(環境庁告示第93号)により分析した。処理対象物、処理後物、バグフィルタダスト、ろ布中、汚泥中の石綿については、JIS A 1481による分析し、石綿繊維が検出された場合はJIS K 3850-1(SEM-EDX)により繊維の同定を行った。作業環境空気については、メンブランフィルタで捕集し、PCMによる計数法(労働安全衛生法労働省令第39号)により分析した。

#### (イ) 一般廃棄物処理施設(小型家電破碎過程)における石綿の排出実態調査

小型家電を別途収集している一般廃棄物処理施設において、小型家電から経産省のリストに従って石綿を含有している小型家電を抜き取った。また、処理後物(可燃物、不燃物)、バグフィルタダスト、排ガス(バグフィルタ入口、出口)、作業環境空気(受入ホッパ周辺、粒度選別機周辺)を採取した。試料の採取、分析方法については(ア)と同様に行った。排ガスのサンプリングと併行して、リアルタイム繊維状粒子モニターである柴田科学製 F-1 ファイバーモニターを破砕排ガスラインのバグフィルタ入口付近に接続して連続モニタリングを実施した。

#### (ウ) 災害がれき処理・再資源化過程の石綿管理の実態調査

災害がれきの処理処分現場における処理物や周辺環境大気の実態調査を行った。調査は A と O の 2 カ所のがれき処理場において、平成 24 年 1～2 月に行った。それぞれ現場作業の状況を考慮してサンプリングと測定を行った。選別物、選別物、選別残さは 4 分法で縮分しながら検体を採取した。処理物、資源化物(処理残渣中)の石綿濃度は MADEP sieve Method および CARB 435 Method により測定した。また、O 処理場においては気中繊維濃度の採取、測定も行った。測定法は計数法(労働安全衛生法労働省令第 39 号)により測定した。

#### ・結果と考察＝

##### (1) 電子顕微鏡による石綿測定法の標準化及び分析精度管理手法の検討

石綿標準試料の石綿繊維計数値の相対標準偏差(ばらつき)は、TEM 法で 48%、SEM 法で 16%であった(図 1)。TEM 法で計数基準外(0.5 $\mu$ m 以下)の繊維を計数していた 1 機関の結果を除くと機関間の計数値のばらつきは 10%未満となった。集じんダスト試料の石綿繊維数と総繊維数の計数値のばらつきは、TEM 法ではそれぞれ 23%と 9.9%、SEM 法では 76%と 39%であり、石綿繊維の計数値のばらつきは総繊維よりも大きかった。アモサイト熱処理物試料の石綿繊維数と総繊維数の計数値のばらつきは、TEM 法で 44%と 19%、SEM 法では 4.8%と 4.3%となった。また、クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料の石綿繊維数と総繊維数の計数値のばらつきは、TEM 法で 14%と 6.6%、SEM 法では 11%と 14%となった。これらの結果から、分析結果に影響を与える要因として、計数基準外繊維の計数、繊維束の扱い、繊維以外のものを繊維と誤認すること、また、石綿判定基準の機関間の違い等が推定され、繊維サイズや元素組成と石綿繊維数及び総繊維数の関係について検討することとした。

繊維サイズについて、集じんダスト試料の繊維長と石綿繊維数/総繊維数との関係について解析した結果を図 2 に示す。この結果から、TEM 法、SEM 法いずれも繊維長が長くなるほど石綿と判定される繊維の比率が高くなることが分かった。元素組成について、クリソタイル繊維と非石綿繊維の Mg/Si 比の平均値は、TEM 法ではそれぞれ 0.34～0.75、0.09～0.25、SEM 法ではそれぞれ 0.52～0.86、0.14～0.23 であった。クリソタイルの Mg/Si 比は非石綿よりも大きかったが、理論値である 1.5 よりも小さかった(TEM 法で特に顕著)。石綿熱処理物についても同様の傾向が見られた。電子顕微鏡の元素組成は EDS 分析によって測定するが、繊維以外の夾雑物(例えばセメント)からの特性 X 線も検出されるため石綿の元素組成が Mg/Si 理論値よりも低くなったものと見られる。しかし、Mg/Si 比や Fe/Si 比がこの範囲であれば石綿であるという基準を示すことは困難であった。

##### (2) 光学顕微鏡による石綿分析の精度管理手法の検討

アモサイトについては既に同様の精度管理を実施しているカナダや米国と同様にスコア 60 を超える者を、クリソタイルについては今回の精度管理プログラムの結果を踏まえスコア 50 を超える者を適切な計数作業を実施できる技量を持つ熟練者として判断した。

アモサイトの精度管理プログラムについては、平成 21～23 年度に 3 回実施した。いずれの回も参加者の 70%以上がスコア 60 を超えており、良好な結果であったといえる。誤差の要因は、繊維長さの判

定ミス(5 $\mu$ m未満の短い繊維を5 $\mu$ m以上と判定しているケース)、視野の境界に存在する繊維の判定ミス(円の外の繊維や境界付近の繊維を過剰にカウントする傾向)であった。全体的には合意標準と比較しての誤差は小さく、繊維の見落としや5 $\mu$ m以上の長い繊維を5 $\mu$ m未満と判定するケースは殆んど見られなかった。クリソタイルの精度管理プログラムについては、平成22～23年度に2回の精度管理を実施した。参加者中スコア50を超えたのは42.5～53.1%とアモサイトの精度管理と比較して低い結果となった。誤差の要因の大半は、繊維長さの判定ミス(5 $\mu$ m以上の繊維を5 $\mu$ m未満と判定しているケース)、繊維の見落とし等であり、負の誤差が大きい結果となった。

### (3) ライフサイクルリスク評価のための石綿含有廃棄物発生量予測と破碎飛散調査

建物の構造・建築年・立地地域・延べ床面積を入力値として、吹付け石綿の除去費用を推定する簡易モデルを構築した。RC/SRC造にくらべ、S造の方が吹付け石綿の使用面積割合が高いことが明らかになった。

石綿含有建材の廃棄量は、2016年に約94万トン/年でピークを迎え、その多くがS造からの排出であると推定された(図3)。

解体工事現場での測定では、比較的飛散性の少ないとされるレベル3の建材の除去工事であっても、個人曝露測定結果が作業環境の管理濃度(150 f/L)を超過することがしばしばあった。建物周辺においては、敷地境界基準(10 f/L)を超過することはなかった。

破碎実験より試算された解体時の石綿排出係数を用いて推定した石綿除去工事養生区画内の石綿濃度(1800～6400 f/L)は、実測の個人曝露測定結果(540～1600 f/L)と同程度かやや高い値であった。また、同一の建材を用いた本実験では、デジタル粉じん計で測定した累積粉じん量と石綿飛散量との間に強い相関が見られた。この結果は、石綿非含有の建材を破碎実験に用い、粉じん量を石綿飛散量の代理指標とすることで、種々の実験条件(破碎エネルギー、建材の割れ長さ等)が石綿飛散量に及ぼす影響を、安全な実験環境において調査することが可能であることを示唆する。

### (4) 廃棄物資源化過程における石綿の管理手法の検討

#### (ア) 建設廃棄物処理施設における石綿の排出実態調査

搬入物や処理後物(可燃物、不燃物)、排水汚泥、バグフィルタダストからは石綿は検出されなかった。破碎排ガスのバグフィルタ捕集後の繊維数濃度は0.3～1.8f/Lと敷地境界基準を下回っていた。

#### (イ) 一般廃棄物処理施設(小型家電破碎過程)における石綿の排出実態調査

搬入された家電製品の中に石綿含有物があったが、量的にはごく少なかった。処理後の可燃物、不燃物、バグフィルタダストからはいずれも石綿は検出されなかった。一方破碎排ガスとして、バグフィルタ入口、出口での測定の結果、1回目入口1.8f/L、出口4.7f/L、2回目入口0.52f/L、出口0.62f/Lといずれも微量だが入口、出口で同程度の濃度が検出された。作業環境空気中の総繊維数濃度は粒度選別機周辺で繊維数濃度1.0～1.4f/Lが検出されているが、作業環境管理濃度150f/L、敷地境界基準10f/Lをいずれも下回っており、顕著な飛散は確認できなかった。リアルタイム繊維状粒子モニターにより運転時間中連続モニタリングした総繊維濃度は1回目0～120f/L(平均8.5f/L)、2回目0～120f/L(平均3.0f/L)といずれも分析値よりやや高めであるが、通常時0f/Lで、濃度が上がった時も1～4分の短いピークとなっており、特定の廃棄物が破碎機に投入された時のみ繊維状物質を発生していると推定された。

#### (ウ) 災害廃棄物処理における石綿対策調査

がれき事業者へのヒアリングの結果、災害がれきを有効利用と最終処分量を減量化するため、可燃物と不燃物に選別を行っていた。さらに可燃物は焼却処理をおこない、また、不燃物は粒度で3種類に分け埋め戻し材等として資源化していた。労働安全衛生面での配慮として、作業員に対するマスク着用や

粉じん飛散防止のための散水を励行していた。また、資源物・有害物管理への配慮として、壁材、建材、屋根材とみなされる破片は石綿含有物として手選別で除去していた。

現地での今回、固体試料の測定に用いた法はアメリカで使用されている方法であり、MADEP Method(石綿含有建材の目視定量法)と CARB 435 Method(偏光顕微鏡による繊維数計測)を組み合わせたものである。これはがれき中の石綿建材分析に実績がある方法である。

Aがれき処理場の不燃物処理残さからは0.00 から0.35%の石綿含有が測定された。また、Oがれき処理場の処理前のコンクリートガラ系混合物からは0.52%の石綿含有が測定され、処理後の土砂(20 から50mmの粒度のもの)からは0.13%の石綿含有が測定された。AおよびOがれき処理場でともに資源化処理後に復興資材に利用される可能性のある不燃物残さ中の石綿濃度が一部では0.1%を超えるものもあった。

Oがれき処理場の作業現場の気中石綿濃度は1.27本/L および2.0本/Lであったが、この値は厚労省が23年度に測定した結果の平均より低いものであった。しかし、作業現場での飛散防止の散水や作業員へのマスク着用、衣服の着替え等を行うことにより石綿の吸引を防ぐ配慮が必要である。

#### ・結論＝

石綿分析法及び精度管理手法の確立において、電子顕微鏡による石綿分析では、繊維長が石綿繊維の判定に影響を与える要因の一つであることを確認した。また、元素組成も繊維の判定に影響する要因と考えられた。光学顕微鏡による石綿分析では、精度管理プログラムの結果、アモサイトでは適切な計数がなされている反面、クリソタイルでは計数値を低値となる傾向が確認された。

静脈過程におけるライフサイクルリスク評価手法の検討において、石綿含有建材廃棄量が2010年代にピークとなること、レベル3建材除去工事においても作業環境管理基準を超過しうることを明らかにした。また、建材の破碎を模擬した破碎実験により、建材からの石綿飛散を定量的に評価した。廃棄物処理・資源化過程での石綿管理に関して、石綿排出は直ちに問題となるレベルにないが、一方で災害がれき処理物への石綿混入や作業環境での石綿ばく露対策が重要な課題であることを示した。

#### 英語概要

・研究課題名＝「Study on proper management of asbestos in recycling and treatment processes of asbestos wastes」

・研究代表者名及び所属＝Akiko Kida (Ehime University)

・研究分担者名及び所属＝Takashi Yamamoto (National Institute for Environmental Studies), Shin-ichi Sakai (Kyoto University), Toshiyuki Toyoguchi (Environmental Control Center), Hideaki Fujiyoshi (Japan Environmental Sanitation Center)

・要旨(200語以内)

We conduct a study on proper management of asbestos to reduce exposure risk to asbestos in recycling and treatment processes of asbestos wastes. As for development of QA/QC system in asbestos analysis, we investigated in factors which affect analytical results in electron microscopy, and found that dimension and elemental composition of fibers may be in electron microscopy. It was also found that participants tend to



undercount fibers by missing thin fibers or misjudging fiber length in counting of chrysotile by PCM.

As for lifecycle risk evaluation of asbestos wastes, we developed a simple cost estimation model for removal of sprayed-on asbestos from buildings. We also estimated that generation of waste construction materials containing asbestos. Laboratory crushing experiments and field measurements were conducted to estimate the emission factor of asbestos from removal process. The estimated concentration of asbestos based on the crushing experiments were slightly larger than the measured concentrations. In investigation of construction and municipal wastes treatment processes, emission of asbestos was not significant levels, but control of asbestos in treated materials of earthquake rubbles and in working environment at their treatment sites may be important problem.

・キーワード(5語以内)

Asbestos, recycling and treatment process, risk management, quality control for asbestos analysis

別添 データ集

表 1 石綿含有成形板の破砕実験条件。建材種類はいずれもケイ酸カルシウム板第1種

条件	建材の大きさ	建材の厚み	錘の落下距離	錘の質量
条件 A	8cm×15cm	6 mm	30 cm	1 kg
条件 B	4cm×15cm	6 mm	30 cm	1 kg
条件 C	8cm×15cm	6 mm	60 cm	1 kg

表 1 アモサイト計数結果

SCORE	H21年度				H22年度				H23年度			
	1回目		2回目		1回目		2回目		1回目		2回目	
	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率
SCORE ≤20	4	2.6%	0	0.0%	1	2.9%	1	2.9%	0	0.0%	0	0.0%
20< SCORE ≤30	3	2.0%	1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1	2.0%
30< SCORE ≤40	7	4.6%	1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	1	2.0%	1	2.0%
40< SCORE ≤50	6	3.9%	1	0.7%	2	5.9%	3	8.6%	4	8.0%	1	2.0%
50< SCORE ≤60	23	15.1%	5	3.3%	3	8.8%	0	0.0%	5	10.0%	3	6.0%
SCORE ≤60 小計	43	28.3%	8	5.3%	6	17.6%	4	11.4%	10	20.0%	6	12.0%
60< SCORE ≤70	19	12.5%	29	19.1%	9	26.5%	4	11.4%	8	16.0%	8	16.0%
70< SCORE ≤80	48	31.6%	52	34.2%	8	23.5%	14	40.0%	16	32.0%	11	22.0%
80< SCORE ≤90	40	26.3%	56	36.8%	11	32.4%	12	34.3%	16	32.0%	25	50.0%
SCORE >90	2	1.3%	7	4.6%	0	0.0%	1	2.9%	0	0.0%	0	0.0%
60< SCORE 小計	109	71.7%	144	94.7%	28	82.4%	31	88.6%	40	80.0%	44	88.0%
合計	152	100.0%	152	100.0%	34	100.0%	35	100.0%	50	100.0%	50	100.0%

表 2 クリソタイル計数結果

SCORE	H22年度				H23年度			
	1回目		2回目		1回目		2回目	
	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率
SCORE ≤20	11	13.3%	7	8.8%	0	0.0%	2	6.3%
20< SCORE ≤30	10	12.0%	11	13.8%	4	10.8%	2	6.3%
30< SCORE ≤40	10	12.0%	14	17.5%	10	27.0%	4	12.5%
40< SCORE ≤50	14	16.9%	14	17.5%	6	16.2%	7	21.9%
SCORE ≤50 小計	45	54.2%	46	57.5%	20	54.1%	15	46.9%
50< SCORE ≤60	19	22.9%	14	17.5%	7	18.9%	8	25.0%
60< SCORE ≤70	11	13.3%	14	17.5%	7	18.9%	7	21.9%
70< SCORE ≤80	8	9.6%	4	5.0%	2	5.4%	2	6.3%
80< SCORE ≤90	0	0.0%	2	2.5%	1	2.7%	0	0.0%
SCORE >90	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
50< SCORE 小計	38	45.8%	34	42.5%	17	45.9%	17	53.1%
合計	83	100.0%	80	100.0%	37	100.0%	32	100.0%

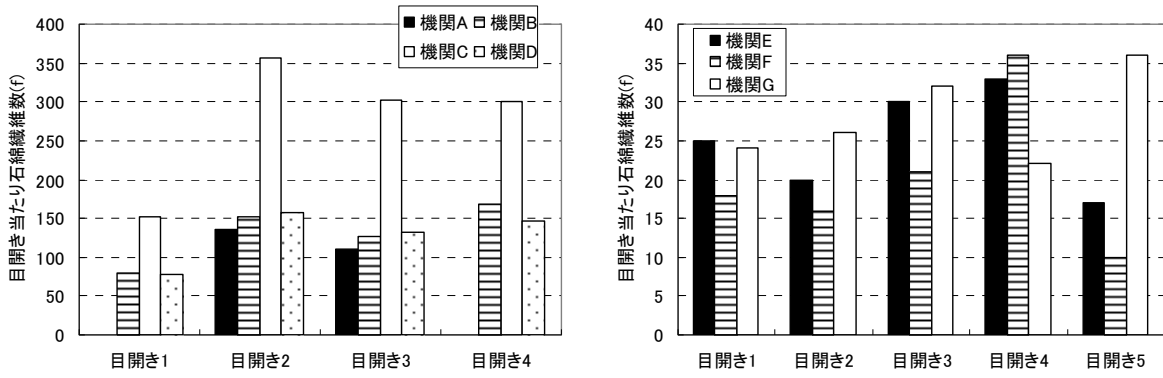


図1 石綿標準観察試料の石綿標準観察試料の目開き毎の石綿繊維計数值  
(左: TEM法、右:SEM法)

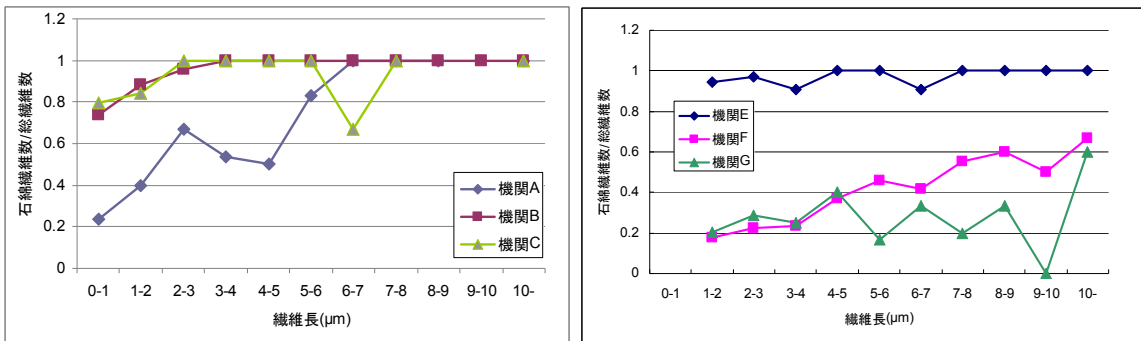


図2 集じんダスト観察試料における繊維長と石綿繊維数/総繊維数との関係  
(左: TEM法、右:SEM法)

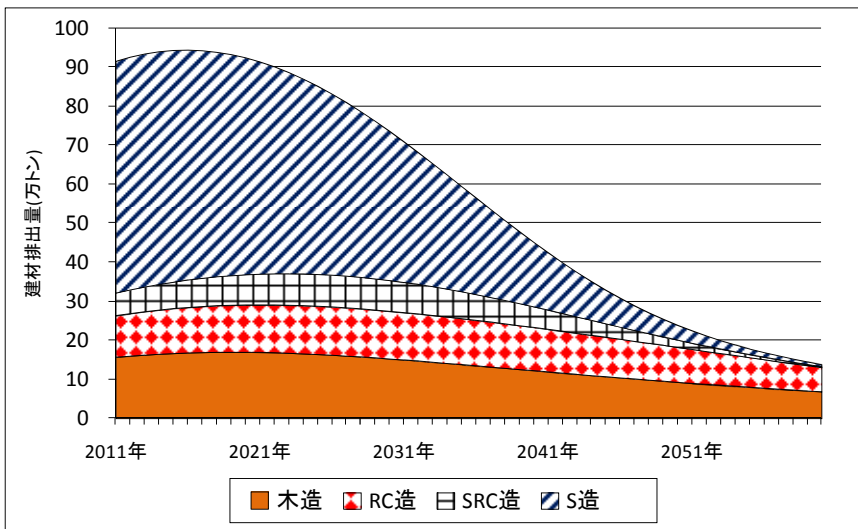


図3 石綿含有建材廃棄量推移の推定結果(石綿含有量換算)

## 2. 電子顕微鏡による石綿測定法の標準化及び分析精度管理手法の検討

分担研究者 国立環境研究所 山本貴士  
愛媛大学 貴田晶子

### A. 研究目的

石綿含有廃棄物の処理・再資源化の過程における石綿の適正な管理を進める上で、石綿含有廃棄物の無害化の確認や石綿繊維の飛散実態の把握等、石綿分析の役割は極めて大きい。我々は先行研究において、石綿含有廃棄物の無害化の確認試験法として、水分散による観察試料の作製と透過型電子顕微鏡法(TEM法)による石綿繊維の同定・計数を組み合わせた方法を開発・評価してきた<sup>1-3)</sup>。しかし、無害化処理システム全体の安全性の担保のためには、無害化処理物を対象とした石綿測定法だけでなく、全ての処理過程(破碎等)や媒体(排ガス、排水等)に対応した測定法の整備が必要である。特に建設系廃棄物の処理・再資源化においては、受入物中にガラス繊維や繊維状石膏等の無機繊維が存在することから、通常用いられる位相差顕微鏡(PCM)等の光学顕微鏡による測定では繊維の同定が困難である。従って、エネルギー分散 X 線分析(EDS)等の方法によって繊維同定の確度が高いことが期待される電子顕微鏡による測定が望ましい。一方で、電子顕微鏡による石綿測定は短所として、分析に要するコストや時間の他、光学顕微鏡に比べて観察視野が狭いために見かけの検出下限が高くなる点や、観察試料上の繊維分布の不均一性の影響を受けやすいといった点が挙げられる<sup>3)</sup>。従って、信頼性のあるデータ取得のためには、電子顕微鏡による石綿分析においても分析精度管理態勢の確立が急務である。分析精度管理手法としては、事業所内での標準作業手順書(SOP)の作成や分析従事者の教育といった取組(内部精度管理)や、精度管理プログラムへの参加(外部精度管理)等がある。このうち、外部精度管理に関しては、例えば諸外国ではPCMによる気中繊維の分析の精度管理プログラムが実施されている<sup>4-5)</sup>。国内においては同様の精度管理プログラムは地方自治体での取組<sup>6)</sup>や、我々の先行研究<sup>3)</sup>や本研究における取組がある。電子顕微鏡による石綿分析については、このような精度管理プログラムは国内外ともに実施されていない。

本課題では、主に廃棄物破碎施設排ガスを対象として走査型電子顕微鏡法(SEM法)を用いた石綿繊維濃度測定法の新規開発を行うとともに、電子顕微鏡による石綿分析における精度管理手法の検討としてSEM法及びTEM法のクロスチェックを実施し、精度管理上の問題点の抽出を行うことを目的とする。

### B. 研究方法

#### B-1 SEM法による石綿繊維濃度測定法の新規開発

SEM法はTEM法と比較して、①装置が安価であり普及の度合いが高い、②観察試料の作製が容易、③繊維の観察が容易なことから、解体現場モニタリングや廃棄物処理関連試料の分析等、無機繊維が大量に発生してPCM法では石綿繊維の同定が困難な局面での活用が期待される。その一方、石綿の定量分析を行う場合には観察面積(視野)の規格化が必須であるが、SEM測定では観察面積を規格化するのが困難である。JIS法<sup>7)</sup>や環境省のアスベストモニタリングマニュアル<sup>8)</sup>では、CRT画面や基準格子等の標準試料を用いた方形枠を1視野として計数するように規定されている。我々は観察面積の規格化にTEMメッシュの適用を試みたが、メッシュの枠付近の繊維のEDS分析が困難であり、SEMに特化した新たな基準面積をもつグリッドを作成する必要があることがわかった。

そこで今回、新規にSEMグリッドを作成して実試料の分析に適用し有用性を評価した。

#### (1) 試料及び器具

試料として、建設系廃棄物資源化施設の破碎排ガスをバグフィルターで処理した際に発生するダスト

(以下、「集じんダスト」と記述)を用いた。

SEM グリッドとして、株式会社シンテック(横浜市)に依頼し、炭化タングステン板(10mm 角×2mm 厚)に精密加工により 100 $\mu$ m 間隔に 50 $\mu$ m 幅の溝を刻んだもので、20×20 の格子があるものを製作した。TEM メッシュは凹型であるのに対し、新規開発したメッシュは凸型である。凹型の網目を持つ TEM メッシュでは、格子の枠付近にある繊維の EDS 分析において、特性 X 線が測定できない(TEM メッシュの 10 $\mu$ m の厚みにより検出器に特性 X 線が入射できなくなる)ため、このように凸型のグリッドとした。図 2-1 に SEM 用グリッドの全体像を模式的に示す。5 格子ごとに打点し、x-y に 1~20 の座標をもつ格子としている。また、同じグリッドを異なる機関で測定するため、SEM 用グリッドの右下を一部カットし、格子の座標を間違えないように作製した。

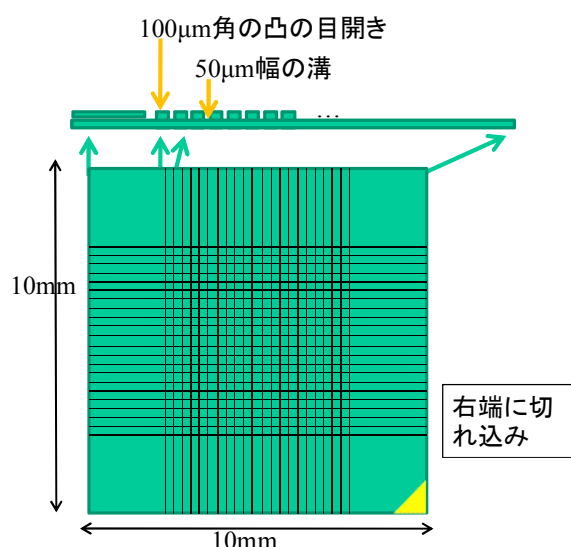


図 2-1 新規開発した SEM 用グリッドの全体

SEM/EDS 装置は日本電子 JSM-5900LV/Oxford Instruments Inca Energy を使用した。加速電圧は 10kV、観察倍率は 3000~10000 倍とした。

## (2) SEM 観察試料の作製

集じんダストの適量を電気炉(450 $^{\circ}$ C、1 時間)で低温灰化した。灰化後の試料約 1g をビーカーに秤り取り、6%ギ酸 50ml を加えて 1 分間超音波処理した。酸処理後の試料をメンブランフィルター(孔径 0.45 $\mu$ m、47mm  $\phi$ )で吸引ろ過し、無じん水で洗浄して酸を除いた。フィルターを無じん水中で 1 分間超音波を照射して残渣を完全に無じん水中に懸濁させた。これを 100ml に定容し、一部を分取して水中に懸濁し、ポリカーボネート製フィルター(孔径 0.2 $\mu$ m、47mm  $\phi$ )で吸引ろ過した。フィルターを風乾後、カーボン蒸着を施した。カーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出し、上記の SEM グリッドの上に乗せ、クロロホルム蒸気でフィルターを溶解した。SEM グリッドに更にカーボン蒸着して SEM 観察試料とした。

## (3) SEM による測定

SEM 測定では、SEM グリッドの任意の目開き(一辺 100 $\mu$ m の正方形の凸面)に存在する繊維を計数した。計数する繊維の基準は長さ 1 $\mu$ m 以上、幅 0.05 $\mu$ m 以上、アスペクト比(長さとの比)3 以上とした。繊維状物質の同定はエネルギー分散 X 線分析(EDS)により、化学組成を元に行った。

## B-2 電子顕微鏡による石綿分析精度管理手法の検討

電子顕微鏡による石綿分析精度管理手法の検討のため、クロスチェックを実施した。21年度にはTEM法で4機関(国環研含む)、SEM法で3機関(同)、また22年度にはTEM法で4機関(同)、SEM法で5機関が参加した。SEM法では、21年度には1機関、22年度には2機関が高解像度が得られる電界放出型のSEM(FE-SEM)を使用していた。最初に会合を持ち、観察試料の作製方法、石綿繊維の観察・同定の基準、結果報告様式等について取り決めた。各参加機関の使用する電子顕微鏡/EDS装置の型式を表2-1に示す。

表 2-1 参加機関の使用電子顕微鏡一覧

21年度の機関番号	22年度の機関番号	種別	電子顕微鏡/EDS装置の型式
A	A	TEM	日本電子 JEM-2010/日本電子 JED-2300T
B	B	TEM	日本電子 JEM-2010/日本電子 JED-2300T
C	D	TEM	日立ハイテクノロジーズ H-7650/堀場製作所 EMAX ENERGY
D	C	TEM	日本電子 JEM-2010/日本電子 JED-2300T
E	E	SEM	日本電子 JSM-5900LV/Oxford Instruments Inca Energy
F	F	SEM	日本電子 JSM-6390LA (SEM に内蔵)
G	—	SEM	日本電子 JSM-7100F/Oxford Instruments Inca Energy (FE-SEM)
—	G	SEM	日立ハイテクノロジーズ S-4800/EDAX Genesis 4000 (FE-SEM)
—	H	SEM	日本電子 JSM-6390LA (SEM に内蔵)
—	I	SEM	日本電子 JSM-7001F/Oxford Instruments Inca Energy (FE-SEM)

### (1) 観察試料の作製

観察試料として、21年度には①石綿標準観察試料、②集じんダスト観察試料、③集じんダスト懸濁液試料の3試料を、また22年度には④アモサイト熱処理物試料、⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料の2試料を作製した。試料の作製方法について、以下及び図2-2、2-3に示す。

### (ア) TEM用試料

#### ①石綿標準観察試料

クリソタイル標準(日本作業環境測定協会 JAWE131)を精秤して無じん水中に懸濁した。この一部を分取し、0.01M塩酸中に分散したものを、ポリカーボネート製フィルター(孔径0.2 $\mu$ m、47mm $\phi$ )で吸引ろ過した。フィルターを風乾後、カーボン蒸着を施した。カーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出し、Ni製TEMメッシュ(200メッシュ)の上に載せ、クロロホルム蒸気でフィルターを溶解して観察試料とした。フィルター当たりの試料負荷量は0.8 $\mu$ gとなる。

#### ②集じんダスト観察試料

下記③を2ml分取して100mlの無じん水に加え、ポリカーボネート製フィルター(孔径0.2 $\mu$ m、47mm $\phi$ )で吸引ろ過した。フィルターを風乾後、カーボン蒸着を施した。カーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出し、Ni製TEMメッシュ(200メッシュ)の上に載せ、クロロホルム蒸気でフィルターを溶解して観察試料とした。フィルター当たり試料負荷量は、集じんダストが1.7mg、アモサイトが0.085 $\mu$ g。

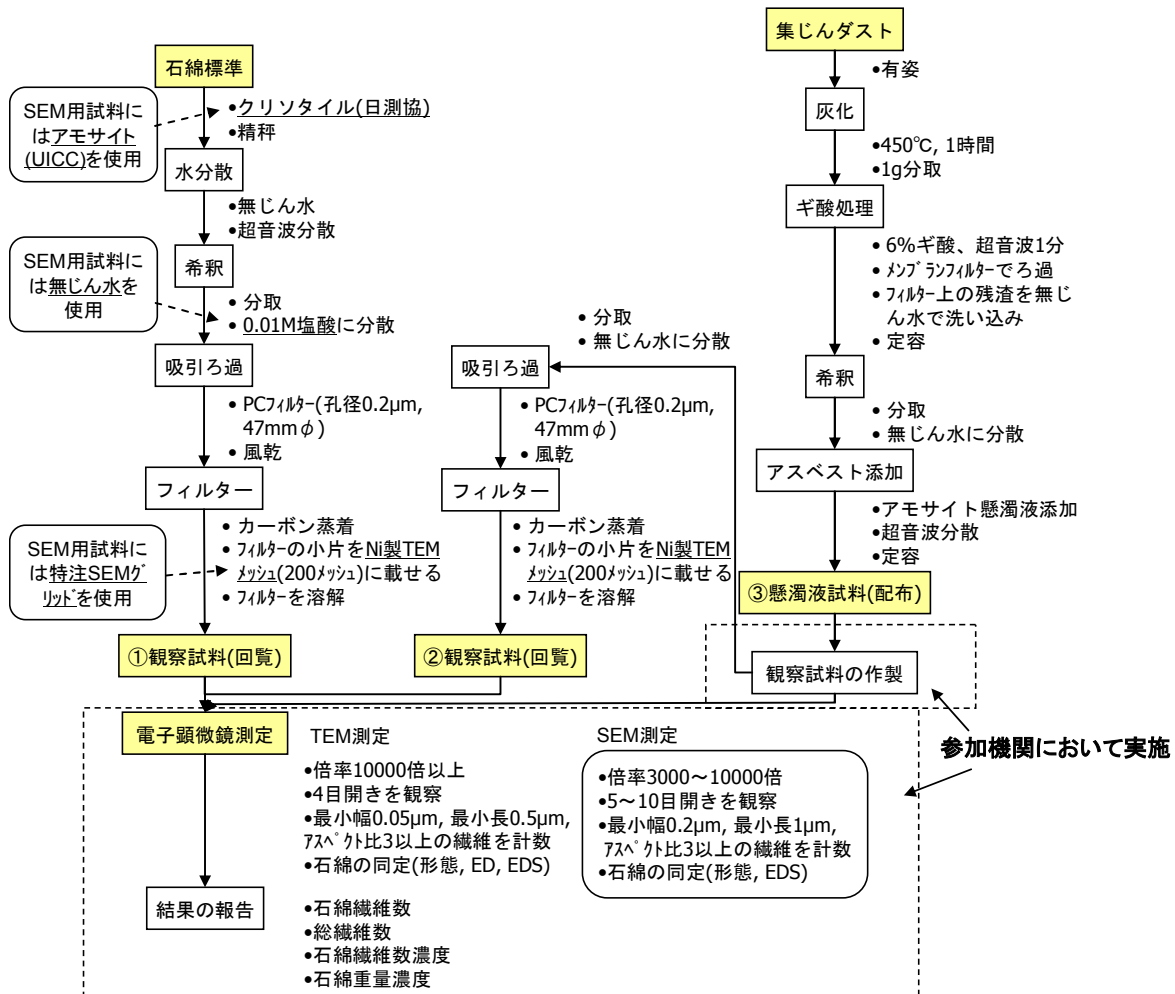


図 2-2 石綿分析クロスチェック試料作製方法及び測定方法(試料①~③、21年度)

### ③集じんダスト懸濁液試料

集じんダスト約 1g から上記 B-1(2)の手順に従って 120ml の集じんダスト懸濁液を調製した。この 5ml を分取し、アモサイト標準(UICC)の懸濁液を加え、無じん水を加えて 50ml に定容して配布試料とした。懸濁液試料中の集じんダスト濃度は 0.83mg/ml、アモサイト濃度は 0.043μg/ml。

### ④アモサイト熱処理物試料

アモサイト標準(UICC)を白金製ルツボに精秤し、高温ボックス炉中で空気雰囲気下、1000°Cで 2 時間加熱した。放冷後、熱処理物 10.8mg を精秤し、無じん水 100mL 中に分散させた。この分散液 100μL をマイクロピペットで分取して適量の無じん水中に分散したものを、ポリカーボネート製フィルター(孔径 0.2μm、47mmφ)で吸引ろ過した。フィルターを風乾後、カーボン蒸着を施した。カーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出し、Ni製TEMメッシュ(200メッシュ)の上に乗せ、クロロホルム蒸気でフィルターを溶解して観察試料とした。フィルター当たり試料負荷量は 10.8μg。

### ⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料

クリソタイル標準(日本作業環境測定協会 JAWE111)とクロシドライト標準(UICC)を別々の白金製ルツボに精秤し、マッフル炉中で空気雰囲気下、600°Cで 2 時間加熱した。放冷後、クリソタイル熱処理物 11.1mg、クロシドライト熱処理物 9.2mg を別々の容器に精秤し、無じん水 100mL 中に分散した。クリソタイル熱処理物分散液の 50μL、クロシドライト熱処理物分散液の 200μL をマイクロピペットで分取して無じん水中に分散し、以下、④と同様の手順で観察試料を作製した。フィルター当たり試料負荷

量はクリソタイル 5.6 $\mu\text{g}$ 、クロシドライト 18 $\mu\text{g}$ 。

試料①、②、④、⑤は TEM メッシュを参加機関に順次回覧し TEM 測定を行った。試料③は懸濁液を参加機関に配布し、参加機関において試料②と同様に観察試料を作製し、TEM 測定を行った。

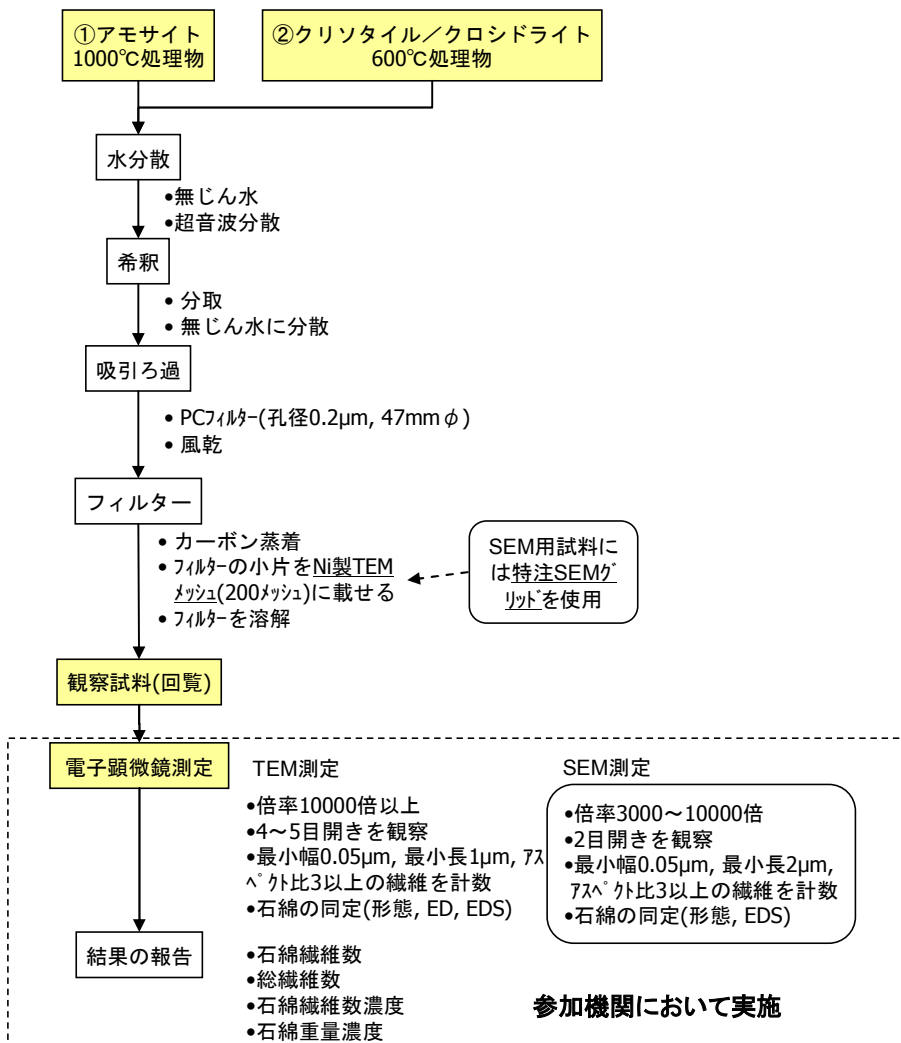


図 2-3 石綿分析クロスチェック試料作製及び測定方法(試料④～⑤、22 年度)

※図中①、②は、それぞれ④、⑤と読み替えて下さい。

### (イ) SEM 用試料

#### ①石綿標準観察試料

アモサイト標準(UICC)を精秤して無じん水中に懸濁した。この一部を分取し、水中に分散したものを、ポリカーボネート製フィルター(孔径 0.2 $\mu\text{m}$ 、47mm  $\phi$ )で吸引ろ過した。フィルターを風乾後、カーボン蒸着を施した。カーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出し、**B-1(1)**の SEM グリッドの上に載せた。クロロホルム蒸気でフィルターを溶解し、さらにカーボン蒸着を施したものを観察試料とした。フィルター当たり試料負荷量は 3.6 $\mu\text{g}$ 。

#### ②集じんダスト観察試料

試料③を 2ml 分取して約 100ml の無じん水に加え、ポリカーボネート製フィルター(孔径 0.2 $\mu\text{m}$ 、47mm  $\phi$ )で吸引ろ過した。フィルターを風乾後、カーボン蒸着を施した。カーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出し、SEM グリッドの上に載せた。クロロホルム蒸気でフィルターを溶解し、さらにカーボン蒸



着を施したものを観察試料とした。フィルター当たり試料負荷量は、集じんダストが 1.7mg、アモサイトが 0.085μg。

### ③集じんダスト懸濁液試料

TEM 用試料③に同じ。

### ④アモサイト熱処理物試料

TEM 用試料④として作製したカーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出して SEM グリッド<sup>(注)</sup>の上に乗せた。クロロホルム蒸気でフィルターを溶解し、さらにカーボン蒸着を施したものを観察試料とした。フィルター当たりの試料負荷量は 10.8μg となる。

### ⑤クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料

TEM 用試料⑤として作製したカーボン蒸着後のフィルターの小片を切り出して SEM グリッドの上に乗せた。クロロホルム蒸気でフィルターを溶解し、さらにカーボン蒸着を施したものを観察試料とした。フィルター当たりの試料負荷量はクリソタイル 5.6μg、クロシドライト 18μg となる。

試料①、②、④、⑤は SEM グリッドを参加機関に順次回覧し SEM 測定を行った。試料③は懸濁液を参加機関に配布し、参加機関において②と同様に観察試料を作製し、SEM 測定を行った。

<sup>(注)</sup> この SEM グリッドは B-1(1)のものとは異なり、炭化タングステン板(5.5mm 角×2mm 厚)に精密加工により 200μm 間隔に 50μm 幅の溝を刻んだもので、板の中央に 15×15 の格子がある。

## (2) 電子顕微鏡による測定

### (ア) TEM 法による測定

TEM 法による測定において、①石綿標準観察試料、②集じんダスト観察試料、④アモサイト熱処理物試料、⑤クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料については国環研が指定した目開き(各 4 目開き。④のみ 5 目開き)、また③集じんダスト懸濁液試料については各機関で任意に選択した目開きを TEM により観察し(倍率 10000 倍以上)、繊維を計数した。繊維の計数基準は、長さ 0.5μm 以上(④と⑤は 1μm 以上)、幅 0.05μm 以上、アスペクト比 3 以上とした。形態観察(管状構造の有無等)、電子線回折(ED)分析、EDS 分析の結果から繊維状物質の同定を行い、所定の記入様式に記入、報告した。

### (イ) SEM 法による測定

SEM 法による測定において、①石綿標準観察試料、②集じんダスト観察試料、④アモサイト熱処理物試料、⑤クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料については国環研が指定した目開き(①は 5 目開き、②は 10 目開き、④と⑤はいずれも 2 目開き)、また③集じんダスト懸濁液試料については各機関で任意に選択した目開きを SEM により観察し(倍率 3000～10000 倍)、繊維を計数した。繊維状物質の計数基準は、長さ 0.5μm 以上(④と⑤は 2μm 以上)、幅 0.05μm 以上、アスペクト比 3 以上とした。形態観察、EDS 分析の結果から繊維状物質の同定を行い、所定の記入様式に記入、報告した。

### (ウ) 繊維数濃度、重量濃度の計算

分析感度及び繊維数濃度は以下の計算式<sup>9)</sup>に従って計算、報告した。

$$S = A_f \div (k \times A_g \times w)$$

ここに、S : 分析感度(f/g)

A<sub>f</sub> : フィルターの有効ろ過面積(mm<sup>2</sup>)

k : 分析したグリッド目開き数

A<sub>g</sub> : グリッドの目開きの面積(mm<sup>2</sup>)

w : フィルター当たりの試料負荷量(g)

$$C=n \times S$$

ここに、

C : 繊維数濃度(f/g)

S : 分析感度(f/g)

n : 全ての分析グリッドで検出された繊維数の合計

重量濃度は次の通りに計算、報告した。

角閃石系石綿繊維は角柱とみなして繊維体積を求める。またクリソタイル繊維は円柱とみなして繊維体積を求める。これに各石綿の密度(クリソタイル 2.55、クロソドライト 3.37、アモサイト 3.43、アンソファイト 3.00、トレモライト 3.00、アクチノライト 3.10、その他角閃石系石綿 3.20g/cm<sup>3</sup>)を乗じて個々の石綿繊維の重量を求める。その総和に上記の分析感度 S を乗じて重量濃度を求める。

## C. 結果及び考察

### C-1 SEM 法による石綿繊維濃度測定法の新規開発

SEM 測定における観察面積の規格化のために、SEM グリッドを新たに製作した(図 2-1)。この SEM グリッドでは、試料面は一辺 100 $\mu$ m の正方形の凸面となるため、EDS 分析に支障はない。また、このグリッドの右下端は斜めに角を切り落としており、縦横 1、5、10、15、20 番目の列を示す刻印を施していることから、座標を指定することで、同一の目開き(凸面)の観察が可能となる。

この SEM グリッドを使用して観察試料を作製する方法として、試料をろ過したメンブランフィルターを SEM グリッド(銅タングステン製)に載せた後にフィルターを灰化し、SEM で観察する方法を検討した。しかし、灰化の際にグリッド表面が酸化して繊維観察に支障が出ることが分かった。そこで、メンブランフィルターをポリカーボネート製フィルターに変更し、カーボン蒸着後にクロロホルム蒸気でフィルター素材を溶解する方法を検討した。SEM グリッドも炭化タングステン製とした。その結果、SEM 用グリッドの凸面に繊維が観察でき(図 2-4)、EDS 分析も支障なく行うことができた。

また、SEM では二次電子像と反射電子像の観察を行うことができる。二次電子像(図 2-5 左)と反射電子像(図 2-5 右)を比較した場合、反射電子像では石綿繊維は背景のカーボン膜よりも明るく浮き上がって見え計数を行いやすい半面、輪郭は不明瞭であり繊維サイズの計測においては誤差要因となり得る。従って、反射電子像で繊維の計数を行いつつ、繊維サイズの計測は二次電子像で行うこととした。

以上の検討により、観察面積を規格化した SEM 測定が可能となった。今後廃棄物処理関連試料の定量分析や精度管理のためのクロスチェック等に活用できるものと考えられる。

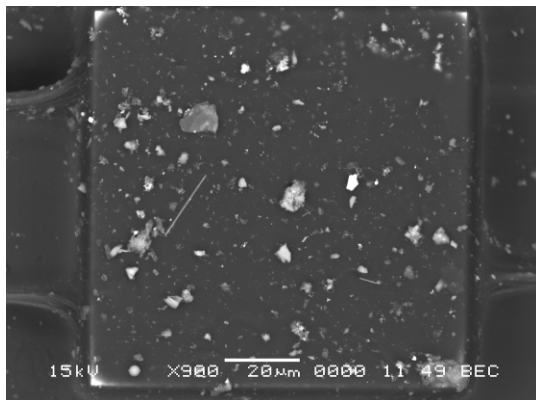


図 2-4 SEM 用グリッドの目開き(凸面)の SEM 画像(900 倍)

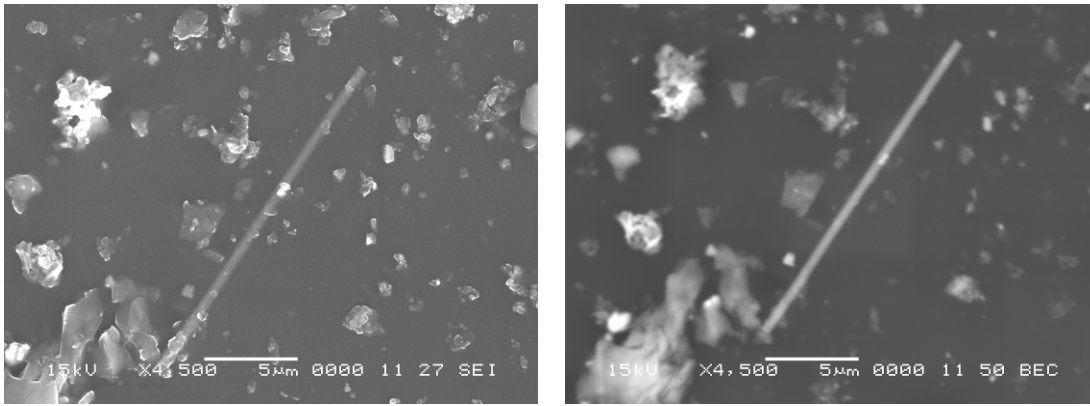


図 2-5 アモサイト繊維の SEM 画像(4500 倍)

左は二次電子像、右は反射電子像。

## C-2 電子顕微鏡による石綿分析精度管理手法の検討

### (1) TEM 法によるクロスチェック結果

この総合報告書では、過年度の報告書の取りまとめの段階で提出が間に合わなかった機関のデータの追加や、計数基準外の繊維の計数結果を除く等の操作を行っており、過年度の報告書掲載の図表と一致しない点があることに留意願いたい。

①石綿標準観察試料の結果について表 2-2 に示す。試料の回覧中に目開き 1、4 のカーボン膜が破損したため、機関 A ではこれらの目開きの計数を行っていない。従って、機関 A に関しては繊維数濃度、重量濃度の評価は行わない。機関 B～D の石綿繊維計数値は 512～946f であり、相対標準偏差(RSD)は 37.4%であった。図 2-6 に目開き毎の機関間の計数値のばらつきを示すが、機関 A の計数値は低め、機関 C の計数値は高めであった。本試料は同一の目開きを同一の計数基準に従って繊維を計数するため、目開き毎の計数値やその合計は全機関で一致することが期待されたが、上述の通り計数値は一致しなかった。過大評価の理由としては、繊維束を複数の単繊維(あるいはより小さい繊維束)として報告した可能性が考えられる。電子顕微鏡法による分析においては試料上の繊維分布の均一性が重要であるが、機関毎の目開き間の計数値のばらつきは RSD で 30%程度であり、繊維の分布は比較的均一であった。石綿繊維数濃度は  $3.1\sim 5.5\times 10^{13}$ f/g であった。本試料はクリソタイル標準から作製したことから、石綿重量濃度は 1g/g となることが期待されたが、石綿重量濃度は 0.57～3.5g/g となった。

表 2-2 ①石綿標準観察試料の TEM 法による分析結果

機関	計数結果							繊維数濃度 (f/g)	重量濃度 (g/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)		
	1	2	3	4					
A	NA	65	45	NA	(110)	(55)	—	$(1.3\times 10^{13})$	(1.4)
B	78	152	127	168	525	131	29.9	$3.1\times 10^{13}$	3.5
C	129	307	251	259	946	237	32.1	$5.5\times 10^{13}$	0.57
D	77	156	132	147	512	128	27.7	$3.0\times 10^{13}$	2.9
平均	94.7	170	139	191	661	165	—	$3.9\times 10^{13}$	2.2
RSD (%)	31.4	59.1	61.1	31.1	37.4	37.4	—	37.4	—

※明記していない単位は f。

NA:未測定、カッコ内の数字は参考。

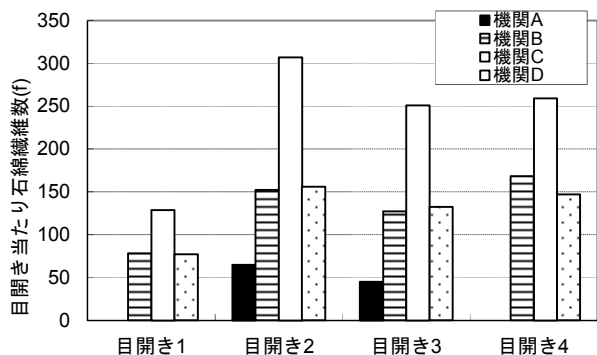


図 2-6 ①石綿標準観察試料の目開き毎の石綿繊維計数値

表 2-3 ②集じんダスト観察試料の TEM 法による分析結果

(a)石綿繊維

機関	計数結果				合計	平均	RSD (%)	繊維数濃度 (Mf/g)	重量濃度 (μg/g)
	目開き								
	1	2	3	4					
A	32	NA	25	39	(96)	(32)	(21.9)	(3500)	(330)
B	80	72	67	107	326	81.5	21.9	9000	740
C	92	93	76	96	357	89.3	10.1	9800	390
D	74	52	46	43	215	53.8	26.0	5900	450
平均	69.5	72.3	53.5	71.3	299	74.8	—	8300	530
RSD (%)	37.5	28.3	42.6	49.5	24.9	24.9	—	24.9	35.3

※明記していない単位は f。

NA:未測定、カッコ内の数字は参考。

(b)総繊維

機関	計数結果				合計	平均	RSD (%)	繊維数濃度 (Mf/g)
	目開き							
	1	2	3	4				
A	67	NA	50	67	(184)	(61.3)	(16.0)	(6800)
B	89	85	77	108	359	89.8	14.7	9900
C	106	105	89	103	403	101	7.87	11000
D	164	100	81	77	422	106	38.2	12000
平均	107	96.7	74.3	88.8	395	98.7	—	11000
RSD (%)	39.0	10.8	22.8	22.4	8.19	8.19	—	8.19

※明記していない単位は f。

NA:未測定、カッコ内の数字は参考。

②集じんダスト観察試料の結果について、表 2-3 に示す。試料の回覧中に目開き 2 のカーボン膜が破損したため、機関 A では目開き 2 を測定していない。従って、機関 A に関しては繊維数濃度、重量濃度の評価は行わない。機関 B～D の石綿繊維(クリソタイル及びアモサイト)の計数値は 215～357f であり、

RSDは24.9%であった。図2-7に目開き毎の機関間の計数値のばらつきを示す。機関A、Dの計数値は低めであった。機関毎の目開き間の計数値のばらつきはRSDで10.1~26.0%であり、繊維の分布の均一性は良かった。石綿繊維数濃度は5900~98000Mf/g、石綿重量濃度は390~740 $\mu$ g/gであった。総繊維の計数結果を表2-4(b)に示すが、機関B~Dの計数値は359~422fであり、RSDは8.19%とばらつきは小さかった。目開き毎の機関間の計数値のばらつきはRSDで10.8~39.0%であった。また、機関毎の目開き間の計数値のばらつきはRSDで7.87~38.2%であった。総繊維数濃度は9900~12000Mf/gであった。

本試料は同一の目開きを同一の計数基準に従って繊維を計数するため、目開き毎の計数値やその合計は全ての機関で一致することが期待されたが、上述の通り石綿繊維の計数値は一致しなかった。一方で総繊維数の計数値はよく一致している。機関Dの石綿繊維の計数値は他機関よりも少なかったが、総繊維数の計数値は他機関と差がなかった。このことから、分析誤差要因として、分析機関において石綿繊維をどこまで厳格に判定するかといった基準が示唆された。

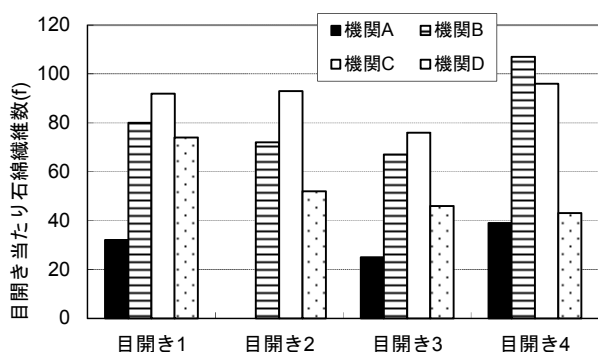


図2-7 ②集じんダスト観察試料の目開き毎の石綿繊維計数値

③集じんダスト懸濁液試料の結果について表2-4に示す。本試料は各機関で観察試料を作製することになっており、懸濁液の分取量や使用するフィルター、ろ過器、TEMメッシュ等が機関毎に異なるため、機関間で計数値自体を比較することには意味がない。従って、石綿繊維数濃度、石綿重量濃度、総繊維数濃度のみを比較した。機関A~Dの石綿繊維数濃度は3300~7000Mf/g、石綿重量濃度は97~6600 $\mu$ g/g、総繊維数濃度は6200~9400Mf/gであった。石綿繊維数濃度、石綿重量濃度、総繊維数濃度のRSDはそれぞれ30.1%、159%、22.4%であり、試料②のRSDと大きな違いはなかった。今回、試料②、③をクロスチェック試料としたのは、試料作製段階の誤差と電子顕微鏡による測定段階の誤差を比較することであったが、試料作製段階を含む試料③で特にばらつきが大きくなっているとは認められなかった。機関毎の目開き間の石綿繊維計数値のRSDは12.2~37.8%であり、繊維の分布の均一性は良かった。また、試料②と③の石綿繊維数濃度を比較すると、分析誤差の大きさから有意であると言えないものの、機関Bは9000Mf/gが5900Mf/g、機関Cは9800Mf/gが7000Mf/g、機関Dは5900Mf/gが3700Mf/gといずれも低くなる傾向にあった。

TEM分析の精度に関して、USEPAのMethod 100に石綿標準を添加した水試料を2機関で分析した結果が掲載されており<sup>10)</sup>、繊維数濃度のRSDはクリソタイル試料で17%、クロシドライト試料で16%であった。また重量濃度のRSDはクリソタイル試料で16%、クロシドライト試料で37%であった。また、先行研究においてクリソタイルを添加したスラグ溶出物試料を用いてクロスチェックを行ったが、繊維数濃度のRSDは65%、重量濃度のRSDは67%であった<sup>3)</sup>。今回の試料である集じんダストは、これらの試料に比べて観察の妨害となる粒子状物質が多く測定が困難であると考えられたが、スラグ溶出物試料の分析結果よりもRSDは小さく、良好な結果であった。

表 2-4 ③集じんダスト懸濁液試料の TEM 法による測定結果

(a)石綿繊維

機関	計数結果							繊維数濃度 (Mf/g)	重量濃度 ( $\mu$ g/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)		
	1	2	3	4					
A	18	40	32	49	139	34.8	37.8	3300	310
B	100	81	95	109	385	96.3	12.2	5900	270
C	25	43	25	—	93	31	33.5	7000	97
D	35	44	29	27	135	33.8	22.6	3700	6600
平均	—	—	—	—	—	—	—	5500	1800
RSD (%)	—	—	—	—	—	—	—	30.1	159

※明記していない単位は f。

(b)総繊維

機関	計数結果							繊維数濃度 (Mf/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)	
	1	2	3	4				
A	58	68	54	76	256	64	15.5	6000
B	106	84	99	113	402	101	12.3	6200
C	33	61	31	—	125	41.7	40.3	9400
D	82	95	86	76	339	84.8	9.41	9300
平均	—	—	—	—	—	—	—	8300
RSD (%)	—	—	—	—	—	—	—	22.4

※明記していない単位は f。

④アモサイト熱処理物試料の結果について表 2-5 に示す。当初、目開き 3、5、6、8、10 を観察すべき目開きとして指定したが、回覧中に目開きのカーボン膜の破損や指示のミス等などがあり、従って、4 機関全てが観察したのは目開き 5、6、10 であり、目開き 2 と 8 はそれぞれ 3 機関、目開き 3 と 7 はそれぞれ 2 機関のみの観察となった。

石綿繊維計数値は機関 A が 7 目開きの計数で 40f、機関 C～D がそれぞれ 5 目開きの計数で 54～92f であった。石綿繊維数濃度は  $9.9 \times 10^{10} \sim 3.2 \times 10^{11}$  f/g (平均  $2.2 \times 10^{11}$  f/g) であり、相対標準偏差(RSD)は 44.3% であった。目開き毎の各機関の計数値のばらつき(RSD)は、全機関が観察した目開き 5、6、10 で 49.9～55.4% であり、ばらつきは大きかった。石綿重量濃度に関して、本試料はアモサイトの熱処理物であり、脱水等重量が減少する反応がなければ石綿重量濃度は 1g/g となることが期待される。各機関の分析値は 0.40～1.5g/g (平均 1.1g/g) となり、機関 A で低い値であったのを除くと 1g/g を若干超える数字となった。総繊維計数値は機関 A が 7 目開きで 177f、機関 C～D がそれぞれ 5 目開きで 79～109f であった。総繊維数濃度は  $2.7 \times 10^{11} \sim 4.4 \times 10^{11}$  f/g (平均  $3.8 \times 10^{11}$  f/g) であり、RSD は 18.7% であった。目開き毎の各機関の計数値のばらつき(RSD)は、目開き 5、6、10 で 14.4～20.4% であり、石綿繊維数と比較してばらつきは小さかった。①石綿標準観察試料の結果と比較すると、総繊維数濃度のばらつきに関しては良好であったが、石綿繊維数濃度のばらつきは若干大きくなった。これは、繊維幅が太く観察が容易なアモサイト熱処理物を用いたことから、総繊維数濃度のばらつきに関しては前回より良好になったと考えられる。一方で、アモサイト熱処理物を用いたことにより繊維判定が困難になっており、石綿繊維数濃度のばらつきは大きかったと考えられる。

表 2-5 ④アモサイト熱処理物試料の TEM 法による分析結果

(a) 石綿繊維

機関	計数結果 (f)									繊維数 濃度 (f/g)	重量 濃度 (g/g)	
	目開き							合計	平均			RSD (%)
	2	3	5	6	7	8	10					
A	12	9	4	4	6	2	3	40	5.7	62.9	$9.9 \times 10^{10}$	0.40
B	32	—	14	15	—	20	11	92	18.4	44.9	$3.2 \times 10^{11}$	1.5
C	—	28	6	6	—	7	7	54	10.8	89.1	$1.9 \times 10^{11}$	1.2
D	30	—	14	12	11	—	12	79	15.8	50.7	$2.7 \times 10^{11}$	1.3
平均	24.7	18.5	9.5	9.25	8.5	9.67	8.25	—	—	—	$2.2 \times 10^{11}$	1.1
RSD (%)	44.7	—	55.4	55.4	—	96.1	49.9	—	—	—	44.3	44.3

(b) 総繊維

機関	計数結果 (f)									繊維数 濃度 (f/g)	
	目開き							合計	平均		RSD (%)
	2	3	5	6	7	8	10				
A	50	48	21	17	16	16	9	177	25.3	65.6	$4.4 \times 10^{11}$
B	37	—	18	15	—	22	12	104	20.8	47.0	$3.6 \times 10^{11}$
C	—	41	19	14	—	20	15	109	21.8	50.6	$3.8 \times 10^{11}$
D	30	—	14	12	11	—	12	79	15.8	50.7	$2.7 \times 10^{11}$
平均	39.0	44.5	18.0	14.5	13.5	19.3	12.0	—	—	—	$3.8 \times 10^{11}$
RSD (%)	26.0	—	16.4	14.4	—	15.8	20.4	—	—	—	18.7

繊維判定に関して、「石綿含有一般廃棄物等の無害化処理等に係る石綿の検定方法について」では、繊維状物質を(a)～(g)の7種<sup>(註)</sup>に分類して記載することが示されており<sup>9)</sup>、これに基づいた繊維数の内訳について図 2-8 に示す。一見して分かるのは、機関 A と C では(f)と判定している繊維が多く、さらに

(註) (a)クリソタイル、(b)アモサイト、(c)クロシドライト、(d)アモサイト、クロシドライト以外の角閃石系石綿(アンソフィライト、トレモライト、アクチノライト)、又は判別できない角閃石系石綿、(e) (a)～(d)の処理により生成する鉱物で、繊維状鉱物であるもの、(f)石綿以外の結晶性の繊維状物質、(g)非結晶性の繊維状物質の7種。

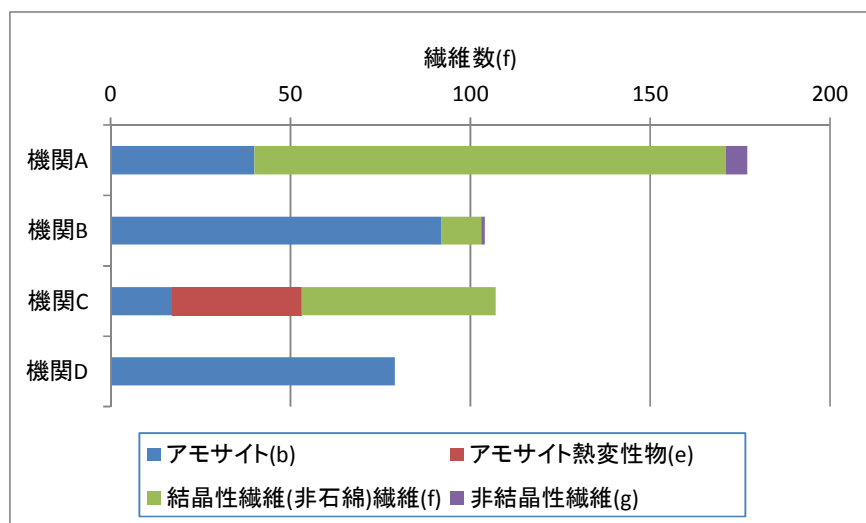


図 2-8 ④アモサイト熱処理物試料の繊維計数結果の内訳

※機関 A は 7 目開き、機関 B～D は 5 目開きの計数結果。

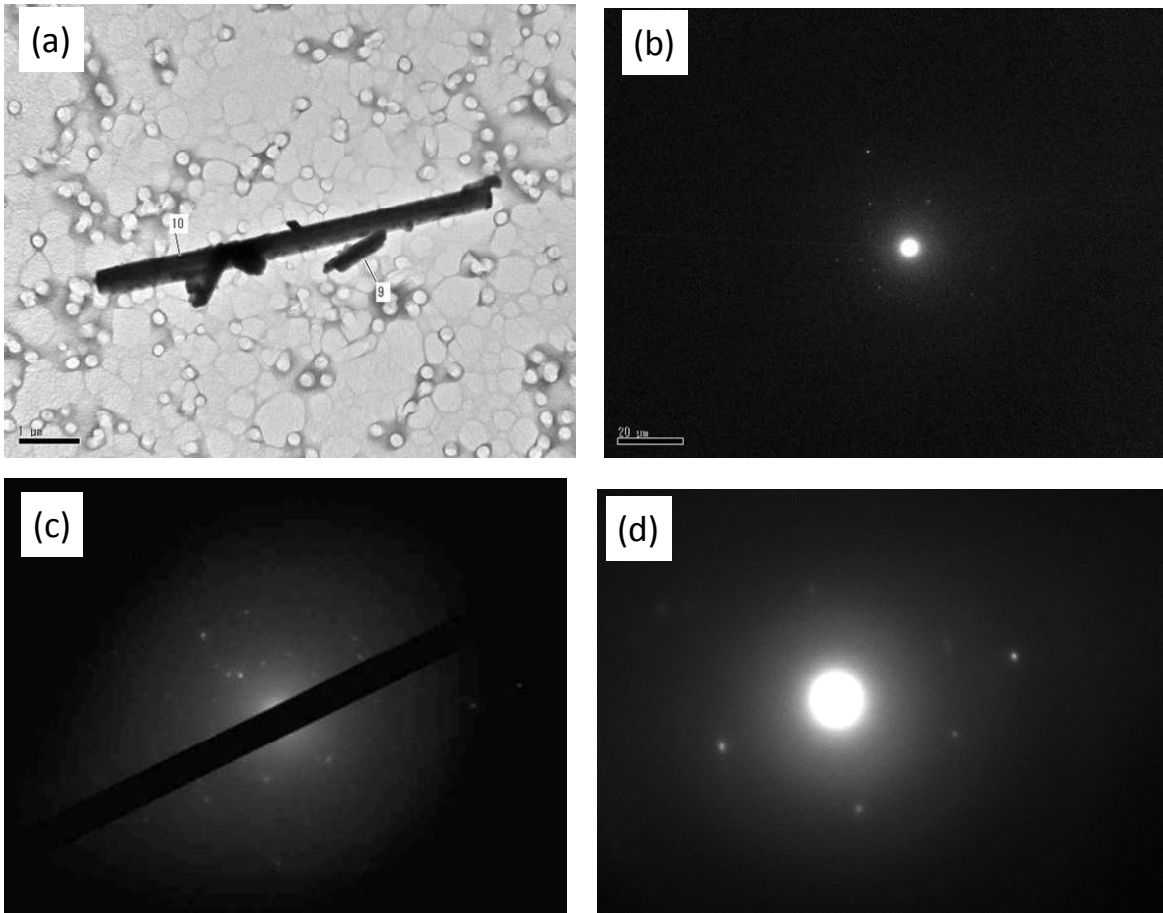


図 2-9 ④アモサイト熱処理物試料中繊維の画像及びその電子線回折(ED)像  
 (a)繊維画像(機関 A)、(b)ED 像(機関 A)、(c)ED 像(機関 B)、(d)ED 像(機関 C)

機関 C では(e)と判定している繊維も多いことである。機関 B と D では逆に(b)と判定している繊維が多い。TEM 法による石綿分析では、繊維形態、ED 分析による結晶構造解析、EDS 分析による化学組成の把握から繊維の判定を行う。今回のクロスチェックで用いた熱処理物では、繊維の結晶構造や化学組成が元の石綿標準のものと変化しているものと考えられることから、各機関の繊維判定の基準が計数結果に大きく影響を与える。④アモサイト熱処理物試料で機関によって判定結果が分かれた繊維を図 2-9 に示した。機関 A はこの繊維を(f)、機関 B は(b)、機関 C は(e)、機関 D は(b)と判定している。各機関の報告した ED 像を図 2-9(b)~(d)に示したが、機関 B の画像では角閃石系石綿に特徴的な回折パターンが見られたが、他機関の画像では特徴的な回折パターンは見られず、アモサイトではないと判断したと思われる。また、同一繊維の EDS 分析結果を表 2-6 に示した。アモサイトの組成式は $(\text{Mg}<\text{Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  であり、Fe/Si 比が 1 より若干小さく、Mg/Si 比はそれより小さい値となる。Fe/Si 比は機関 A と機関 B では 0.72 であったが、機関 C では 0.40、機関 D では 0.54 とやや低くなっている。また、Mg/Si 比は機関 A~C で 0.17~0.19 と近い値であったが、機関 D では 0.38 と他機関の値から外れていた。EDS の分析結果からは、機関 A と機関 B の分析値からはアモサイト繊維と判定するのが適当であり、機関 C と機関 D の分析値からは非アモサイト繊維と判定するのが適当なように思われる。



表 2-6 ④アモサイト熱処理物試料中繊維(図 2-8)の EDS 分析結果

機関	原子数(%)							Fe/Si	Mg/Si
	Si	Ca	Mg	Al	Fe	Na	O		
A	26.25	0.06	4.87	0.07	18.87	0.1	47.98	0.72	0.19
B	19.12	0.07	3.38	0.16	13.81	0.00	63.47	0.72	0.18
C	48.78	0.10	8.39	0.13	19.73	0.13	22.73	0.40	0.17
D	56	0	21	3	30	0	0	0.54	0.38

⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料の結果について表 2-7 に示す。この試料ではカーボン膜の破損等による観察不能な目開きは発生しなかった。石綿繊維計数値は 114~158f (平均 136f)、石綿繊維数濃度は  $2.2 \times 10^{11} \sim 3.1 \times 10^{11}$  f/g (平均  $2.7 \times 10^{11}$  f/g) であり、RSD は 13.8% であった。目開き毎の各機関の計数値のばらつきは 9.51~27.0% であり、④アモサイト熱処理物試料よりも小さかった。また、機関毎の各目開きの計数値のばらつきも 3.27~17.8% と小さく、フィルター上の繊維の分布の均一性も良好であった。石綿重量濃度は 0.12~0.86g/g (平均 0.44g/g) であり、RSD は 85.3% とばらつきは大きかった。クリソタイル及び熱変成物の繊維計数値は 6~46f (平均 22.8f)、クリソタイル及び熱変成物繊維数濃度は  $1.2 \times 10^{10} \sim 9.0 \times 10^{10}$  f/g (平均  $4.5 \times 10^{10}$  f/g) であり、RSD は 77.3% とばらつきは大きかった。クロシドライト繊維計数値は 88~129f (平均 113f)、クロシドライト繊維数濃度は  $1.7 \times 10^{11} \sim 2.5 \times 10^{11}$  f/g (平均  $2.2 \times 10^{11}$  f/g) であり、RSD は 16.0% とばらつきは小さかった。総繊維数計数値は 142~162f (平均 148f)、総繊維数濃度は  $2.8 \times 10^{11} \sim 3.2 \times 10^{11}$  f/g (平均  $2.9 \times 10^{11}$ ) であり、RSD は 6.59% とばらつきは小さかった。

表 2-7 ⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料の TEM 法による分析結果

(a) 石綿繊維

機関	計数結果 (f)							繊維数濃度 (f/g)	重量濃度 (μg/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)		
	1	3	5	8					
A	40	41	39	38	158	39.5	3.27	$3.1 \times 10^{11}$	0.13
B	34	29	35	31	129	32.3	8.54	$2.5 \times 10^{11}$	0.86
C	32	21	31	30	114	28.5	17.8	$2.2 \times 10^{11}$	0.65
D	40	31	34	37	142	35.5	10.9	$2.8 \times 10^{11}$	0.12
平均	36.5	30.5	34.8	34	136	—	—	$2.7 \times 10^{11}$	0.44
RSD (%)	11.3	27.0	9.51	12.0	13.8	—	—	13.8	85.3

(b) クリソタイル及び熱変成物繊維

機関	計数結果 (f)							繊維数濃度 (f/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)	
	1	3	5	8				
A	11	7	17	11	46	11.5	35.9	$9.0 \times 10^{10}$
B	1	1	1	3	6	1.5	66.7	$1.2 \times 10^{10}$
C	6	6	7	7	26	6.5	8.88	$5.1 \times 10^{10}$
D	3	3	4	3	13	3.25	15.4	$2.5 \times 10^{10}$
平均	5.25	4.25	7.25	6	22.8	—	—	$4.5 \times 10^{10}$
RSD (%)	82.8	64.8	95.8	63.8	77.3	—	—	77.3

## (c) クロシドライト繊維

機関	計数結果 (f)							繊維数濃度(f/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)	
	1	3	5	8				
A	29	34	22	27	112	28	17.7	$2.2 \times 10^{11}$
B	33	28	34	28	123	30.8	10.4	$2.4 \times 10^{11}$
C	26	15	24	23	88	22	22.0	$1.7 \times 10^{11}$
D	37	28	30	34	129	32.3	12.5	$2.5 \times 10^{11}$
平均	31.3	26.3	27.5	28	113	—	—	$2.2 \times 10^{11}$
RSD (%)	15.3	30.5	20.0	16.2	16.0	—	—	16.0

## (d) 総繊維

機関	計数結果 (f)							繊維数濃度(f/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)	
	1	3	5	8				
A	41	42	39	40	162	64.8	1.99	$3.2 \times 10^{11}$
B	42	31	37	34	144	57.6	8.14	$2.8 \times 10^{11}$
C	45	27	35	35	142	56.8	13.0	$2.8 \times 10^{11}$
D	40	31	34	37	142	56.8	6.82	$2.8 \times 10^{11}$
平均	42	32.8	36.3	36.5	148	—	—	$2.9 \times 10^{11}$
RSD (%)	5.14	19.7	6.12	7.25	6.58	—	—	6.59

繊維判定に関して、①アモサイト熱処理物と同様に繊維数の内訳を図 2-10 に示す。いずれの機関も(c)と判定した繊維が最も多かった。以下、機関 A では(e)>(f)の順であり、機関 B と C では(f)>(e)の順、機関 D では(a)>(e)の順であった。600℃での熱処理では、クリソタイトの熱変性が起きてフォルステライト( $Mg_2SiO_4$ )に変化する途中であり、一方でクロシドライトの熱変性はほとんど起きていないと考えられ<sup>1,11)</sup>、(e)の熱変性物はそのほとんどがクリソタイト由来のものであると考えられる。②クリソタイト／クロシドライト熱処理物試料で機関によって判定結果が分かれた繊維を図 2-10 に示した。機関 A はこの繊維を(e)、機関 B は(f)、機関 C は(e)、機関 D は(a)と判定している。各機関の報告した ED 像を図 2-11b)~(d)に示したが、いずれもクリソタイトや角閃石に特徴的なパターンは見られない。

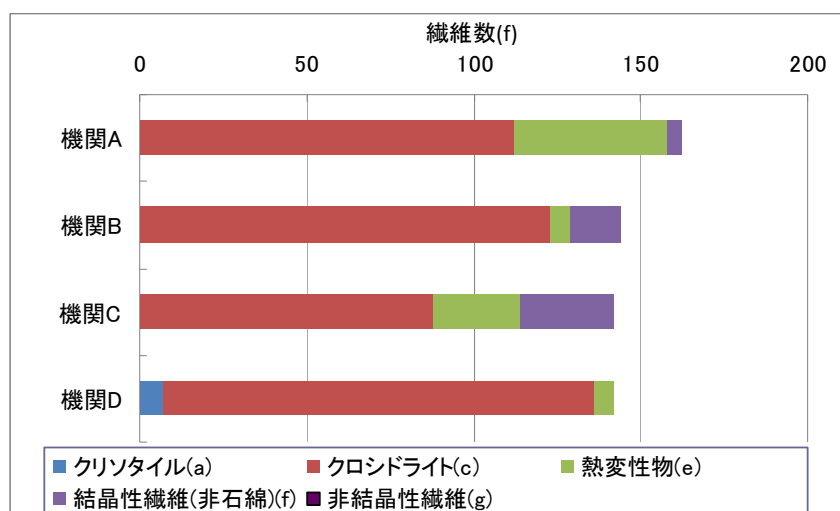


図 2-10 ⑤クリソタイト／クロシドライト熱処理物試料の繊維計数結果の内訳

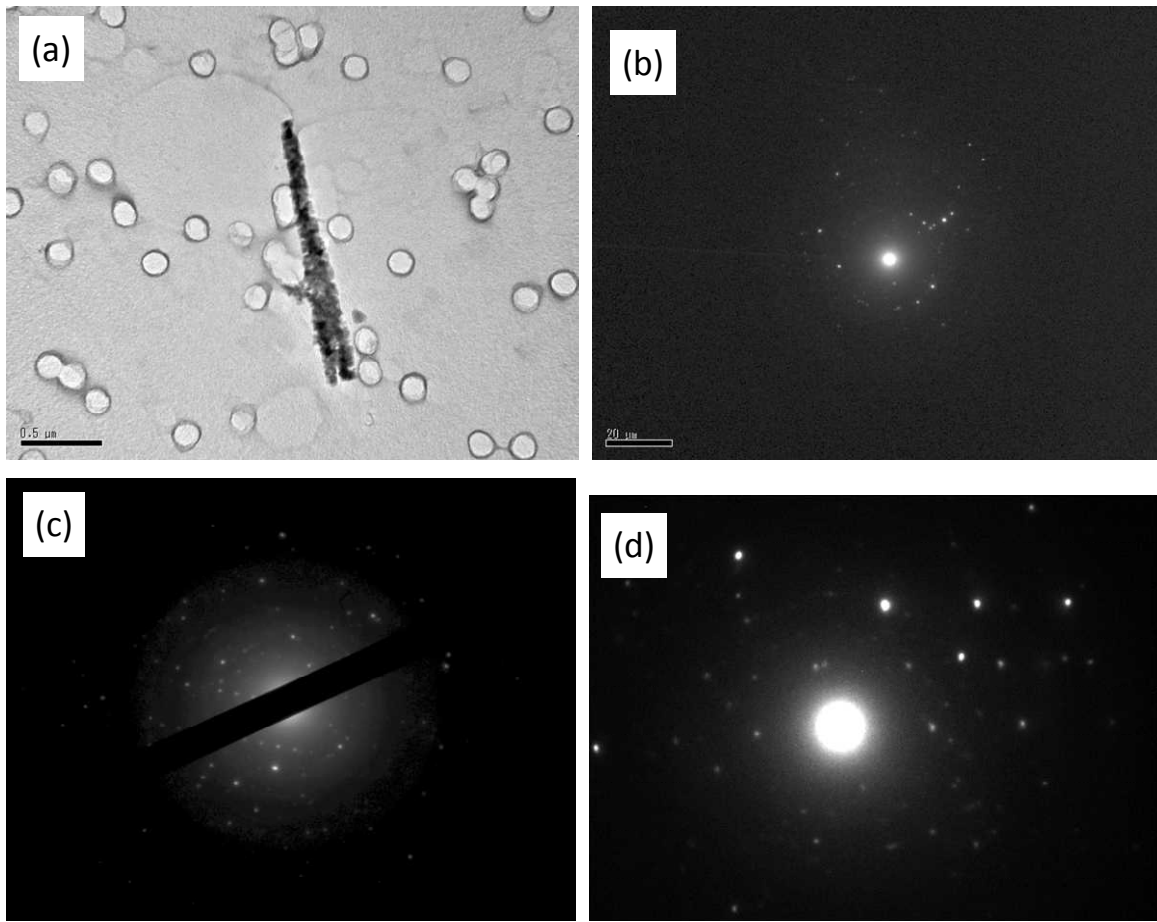


図 2-11 ②クリソタイル/クロシドライト熱処理物中繊維の画像及びその電子線回折(ED)像  
(a)繊維画像(機関 A)、(b)ED 像(機関 A)、(c)ED 像(機関 B)、(d)ED 像(機関 C)

表 2-8 ②クリソタイル/クロシドライト熱処理物中繊維(図 2-10)の EDS 分析結果

機関	原子数(%)							Fe/Si	Mg/Si
	Si	Ca	Mg	Al	Fe	Na	O		
A	15.49	0.01	21.56	0.4	0.84	0	61.13	0.054	1.39
B	12.32	0	15.17	0.18	0.39	0.15	71.79	0.032	1.23
C	23.86	0	35.40	0.31	0.39	0	40.04	0.016	1.48
D	41	0	59	0	0	0	0	0	1.44

また、同一繊維の EDS 分析の結果を表 2-8 に示した。いずれの分析結果も Fe や Na はほとんど検出されず、クリソタイルまたはその熱変性物であることが分かる。クリソタイルの組成式は  $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$  であり、理論上 Fe/Si 比は 0、Mg/Si 比は 1.5 となる。熱変性物であるフォルステライトは組成式が  $Mg_2SiO_4$  であることから、Mg/Si 比は 2 とクリソタイルよりも大きくなる。この繊維に関して各機関の報告した Fe/Si 比は 0.054 以下であり、Mg/Si 比は 1.23~1.48 とクリソタイルの値に近いものであったが、EDS 分析の精度がクリソタイルとフォルステライト(即ち(a)と(e))の Mg/Si 比を判別するに足るかは疑問であり、EDS の結果からこの繊維がクリソタイルであると即座に判定するのも危険である。以上の ED 及び EDS 分析の結果からこの繊維は(e)または(f)と判定されるが、機関 D が(a)と判定したのは ED がうまく測定できなかったことによると思われる。この繊維を(e)と(f)のいずれに判定するかは、試料が熱変性を受けて

いる可能性があることを示す周辺情報や、各機関の経験に依存するところであり、こうした情報や経験を集約して供給する、あるいはマニュアル等の整備が必要となろう。

## (2) SEM 法によるクロスチェック結果

①石綿(アモサイト)標準試料のクロスチェック結果について表 2-9 に示す。機関 E~G の石綿繊維の計数値は 95~140f であり、RSD は 19.1%であった。図 2-12 に目開き毎の機関間の計数値のばらつきを示すが、機関 F の値は概ね小さく、機関 E、G の値は同程度であった。機関毎の目開き間の計数値のばらつきは機関 F を除くと RSD で 30%未満であり、繊維の分布は比較的均一であった。石綿繊維数濃度は  $6.3 \times 10^{11} \sim 9.3 \times 10^{11} \text{f/g}$  であった。本試料は石綿標準から作製したことから石綿重量濃度は 1g/g となることが期待されたが、報告値は 1.9~2.9g/g と過大となった。これは繊維幅と繊維長を用いて繊維重量を推定する際、繊維束の濃度変換を過大に評価したためと考えられる。

表 2-9 ①石綿標準観察試料の SEM 法による分析結果

機関	計数結果									繊維数濃度(f/g)	重量濃度(g/g)
	目開き					合計	平均	RSD (%)			
	1	2	3	4	5						
E	25	20	30	33	17	125	25	26.7	$8.3 \times 10^{11}$	1.9	
F	17	16	21	32	9	95	19	44.5	$6.3 \times 10^{11}$	2.9	
G	26	24	32	22	36	140	28	20.8	$9.3 \times 10^{11}$	2.0	
平均	22.7	20	27.7	33.7	16	120	—	—	$8.0 \times 10^{11}$	2.3	
RSD (%)	21.8	20.0	21.2	6.2	41.0	19.1	—	—	19.1	25.4	

※明記していない単位は f。

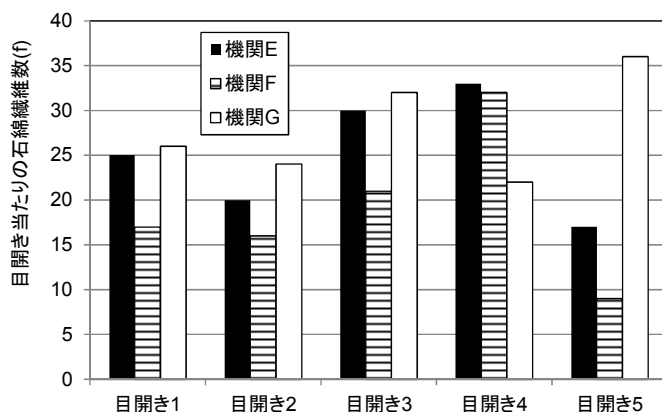


図 2-12 ①石綿標準観察試料の目開き毎の石綿繊維計数値

本試料は同一の目開きを同一の計数基準に従って繊維を計数するため、目開き毎の計数値やその合計は全ての機関で一致することが期待されたが、上述の通り計数値は一致しなかった。この原因は、用いた SEM 機種によっては十分な解像度が得られないために繊維を見落とす場合があること、1  $\mu\text{m}$  以下の短繊維を見落とす場合があることによると考えられた。繊維数が長い繊維の見落としはみられておらず、また RSD は 16.1%と小さく、機関間の計数値のばらつきは小さかった。なお、機関 G の SEM 機種は FE-SEM で、機関 E 及び F は通常の SEM であった。FE-SEM は高分解能であり、クリソタイルの単繊維のように細い繊維の確認には適している。

②集じんダスト観察試料の結果について表 2-10 に示す。機関 E~F の石綿繊維(クリソタイル及びアモサイト)の計数値は 47~226f であり、RSD は 77.2%と大きかった。図 2-13 に目開き毎の機関間の計数値

のばらつきを示すが、機関Eの値が大きかった。機関毎の目開き間の計数値のRSDは33.3～62.6%であった。石綿繊維数濃度は330～1600Mf/g、RSDは77.2%とばらつきは大きかった。石綿重量濃度は480～2200μg/g、RSDは60.7%でありばらつきは大きかった。

総繊維の計数結果を表2-10(b)に示す。機関E～Fの計数値は181～340f、RSDは32.0%であり、石綿繊維と比較してばらつきは小さくなった。目開き毎の各機関の計数値のばらつきは14.7～73.7%であった。総繊維数濃度は1300～2400Mf/gであった。

表2-10 ②集じんダスト観察試料のSEM法による分析結果

(a)石綿繊維

機関	計数結果											合計	平均	RSD (%)	繊維数濃度 (Mf/g)	重量濃度 (μg/g)
	目開き															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
E	16	25	36	29	26	21	13	24	25	11	226	22.6	33.6	1600	2200	
F	9	21	7	4	5	13	15	4	7	5	90	9	62.6	640	1900	
G	4	8	6	3	5	4	6	4	4	3	47	4.7	33.3	330	480	
平均	9.67	18.0	16.3	12	12	12.7	11.3	10.7	12.0	6.33	121	—	—	850	1500	
RSD (%)	62.4	49.4	104	122	101	67.1	41.7	108	95.0	65.7	77.2	—	—	77.2	60.7	

※明記していない単位はf。

(b)総繊維

機関	計数結果											合計	平均	RSD (%)	繊維数濃度 (Mf/g)
	目開き														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
E	21	25	36	32	28	21	13	24	25	11	236	23.6	32.6	1700	
F	25	45	39	26	28	28	40	39	33	37	340	34	20.4	2400	
G	13	24	16	20	17	13	18	21	27	12	181	18.1	27.4	1300	
平均	19.7	31.3	30.3	26	24.3	20.7	23.7	28	28.3	20	252	—	—	1800	
RSD (%)	31.1	37.8	41.2	23.1	26.1	36.3	60.7	34.4	14.7	73.7	32.0	—	—	32.0	

※明記していない単位はf。

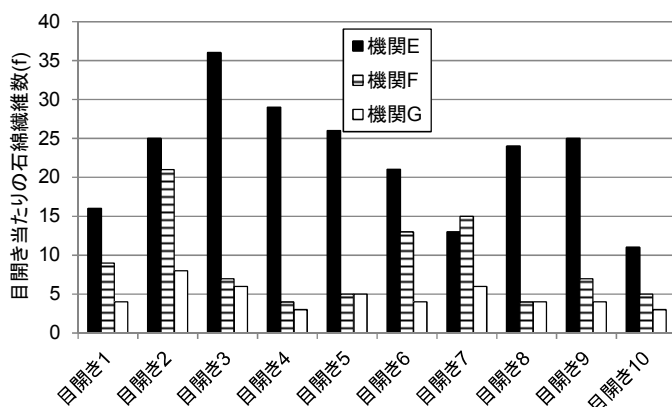


図2-13 ②集じんダスト観察試料の目開き毎の石綿繊維計数値

本試料は同一の目開きを同一の計数基準に従って繊維を計数するため、目開き毎の計数値やその合計は全ての機関で一致することが期待されたが、上述の通り計数値は一致しなかった。石綿繊維では機関

E の計数値が最も高かったが非石綿繊維の計数値は逆に少なく、石綿繊維の判定基準が他機関より緩い可能性がある。総繊維では機関 F の計数値が最も高く、機関 E とは逆に石綿繊維の判定基準が厳しい可能性がある。TEM 法による分析同様に、繊維判定基準は分析結果に影響を与える大きな要因である。

③集じんダスト懸濁液試料の結果について表 2-11 に示す。TEM 法と同様、機関間で計数値自体を比較することには意味はなく、石綿繊維数濃度、石綿重量濃度、総繊維数濃度のみを比較した。なお、機関 E は本試料の分析を行わなかった。石綿繊維数濃度は機関 F で 110Mf/g、機関 G で 440Mf/g であった。石綿重量濃度は機関 F で 19000 $\mu$ g/g、機関 G で 100 $\mu$ g/g であった。総繊維数濃度は機関 F で 790Mf/g、機関 G で 1100Mf/g であった。この結果を試料②と比較すると、機関 G では石綿繊維数濃度と総繊維数濃度は同程度であり、石綿重量濃度もオーダーは一致し、良好な結果であった。機関 F では石綿繊維数濃度、総繊維数濃度は試料②の数分の 1 であり、石綿重量濃度は逆に試料②より一桁高い値となった。重量濃度が高くなった原因は観察した目開きに極端に大きいクリソタイル繊維束(長さ 23.75 $\mu$ m、幅 4.78 $\mu$ m)が存在したことによると推定したが、繊維数濃度が試料②より小さくなった原因は不明である。

表 2-11 ③集じんダスト懸濁液試料の SEM 法による分析結果

(a)石綿繊維

機関	計数結果							繊維数濃度(Mf/g)	重量濃度( $\mu$ g/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)		
	1	2	3	4					
F	2	1	3	0	6	1.5	86.1	110	19000
G	5	10	5	5	25	6.3	40	440	100
平均	—	—	—	—	—	—	—	270	380
RSD (%)	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(b)総繊維

機関	計数結果							繊維数濃度(Mf/g)
	目開き				合計	平均	RSD (%)	
	1	2	3	4				
F	13	11	8	13	45	11.3	26.7	790
G	12	20	16	16	64	16	20.4	1100
平均	—	—	—	—	—	—	—	1000
RSD (%)	—	—	—	—	—	—	—	—

SEM 分析の精度管理に関して、先行研究においてクリソタイルを添加したスラグ溶出物試料を用いてクロスチェックを行ったが、石綿繊維数濃度の RSD は 120%、重量濃度の RSD は 160%であった<sup>3)</sup>。今回の試料である集じんダストは、スラグ試料に比べて観察の妨害となる粒子状物質が多く測定が困難であると考えられたが、スラグ試料よりも RSD は小さく、良好な結果であった。これは、新たに開発した SEM 用グリッドであったことも一因であり、今後更に共通分析を行うことにより、石綿繊維濃度測定の精度向上に向けた取り組みを行う。

④アモサイト熱処理物試料のクロスチェック結果について表 2-12 に示す。石綿繊維計数値は 174～195f(平均 180f)、繊維数濃度は  $2.4 \times 10^{11} \sim 2.7 \times 10^{11}$  f/g(平均  $2.5 \times 10^{11}$  f/g)であり、RSD は 4.83%とばらつきは小さく良好な結果であった。目開き毎の各機関の計数値のばらつきは 4.36～7.07%と良好な結果であった。石綿重量濃度は 1.1～2.5g/g(平均 1.9g/g)と過大となったが、RSD は 28.4%と比較的良好であった。総繊維数計数値は 177～196f(平均 182f)、総繊維数濃度は  $2.5 \times 10^{11} \sim 2.7 \times 10^{11}$  f/g(平均  $2.5 \times 10^{11}$  f/g)で

あり、RSD は 4.33%とばらつきは小さかった。目開き毎の各機関の計数値のばらつきは、4.79～5.58%と良好な結果であった。①石綿標準観察試の結果と比較すると、総繊維数濃度、石綿繊維数濃度のいずれも、ばらつきは前回よりも良好であった。石綿重量濃度の過大評価傾向、ばらつきともに前回の結果と同程度であった。また、今回の TEM 法でのクロスチェック結果と比較すると、石綿繊維数濃度は概

表 2-12 ④アモサイト熱処理物試料の SEM 法による分析結果

(a) 石綿繊維

機関	計数結果 (f)				繊維数濃度(f/g)	重量濃度 (g/g)
	目開き		合計	平均		
	1	2				
E	78	96	174	87	$2.4 \times 10^{11}$	1.9
F	94	101	195	97.5	$2.7 \times 10^{11}$	1.8
G	83	97	180	90	$2.5 \times 10^{11}$	2.4
H	82	93	175	87.5	$2.4 \times 10^{11}$	2.5
I	86	90	176	88	$2.4 \times 10^{11}$	1.1
平均	84.6	95.4	180	90	$2.5 \times 10^{11}$	1.9
RSD (%)	7.07	4.36	4.83	—	4.83	28.4

(b) 総繊維

機関	計数結果 (f)				繊維数濃度(f/g)
	目開き		合計	平均	
	1	2			
E	83	99	182	91	$2.5 \times 10^{11}$
F	94	102	196	98	$2.7 \times 10^{11}$
G	83	97	180	90	$2.5 \times 10^{11}$
H	83	94	177	88.5	$2.5 \times 10^{11}$
I	87	90	177	88.5	$2.5 \times 10^{11}$
平均	86	96.4	182	91.2	$2.5 \times 10^{11}$
RSD (%)	5.58	4.79	4.33	—	4.33

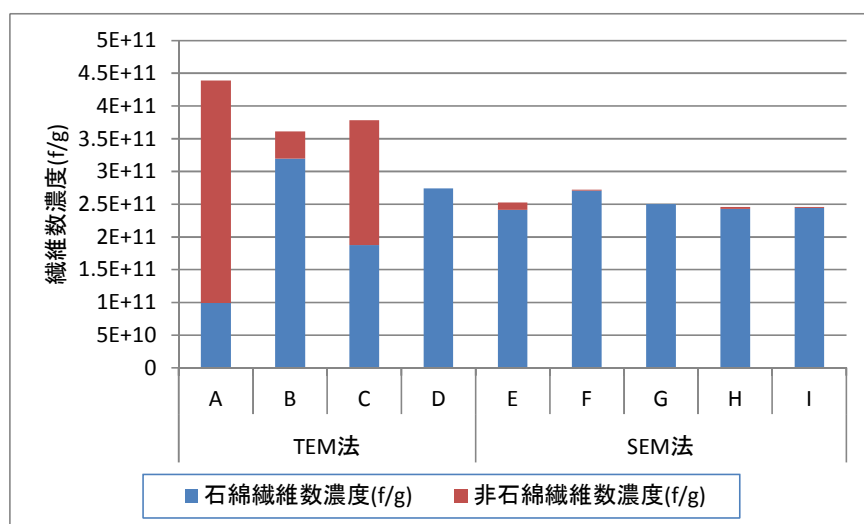


図 2-14 ④アモサイト熱処理物試料の TEM 法及び SEM 法による繊維数濃度分析結果

ね同等であり、石綿重量濃度はやや高く、総繊維数濃度はやや低かった。ばらつきは総じて TEM 法の結果よりも良好であった。TEM 法及び SEM 法による④アモサイト熱処理物試料の繊維数濃度分析結果を図 2-14 にまとめた。

繊維判定に関して、TEM 法でのクロスチェックと同様に繊維数の内訳を図 2-15 に示す。但し、SEM 法では ED 分析が不可能であるため結晶性の有無で判定が分かれる(f)と(g)の判別はできず、両者をまとめて示した。TEM 法での結果と異なるのは、繊維のほとんどが(b)と判定されていることである。上記の通り SEM 法では ED 分析が不可能であるため繊維の結晶性やその構造に関する情報が得られず、繊維の同定は形態観察と EDS 分析によって行うことになる。アモサイトの熱変成の過程で繊維が繊維形態を保ったまま内部にヘマタイト( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )やマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )の微結晶を晶出することが神山らによって指摘されており<sup>12)</sup>、この場合、EDS 分析では数十  $\mu\text{m}$  のスポット内の組成を分析するため微結晶の組成は得られずに繊維全体を分析してしまい、アモサイトの組成であると判断される可能性がある。無害化処理に限らずアモサイトは保温材に用いられることもあり、熱変成した繊維を適切に判定できる何らかの指標が望まれる。

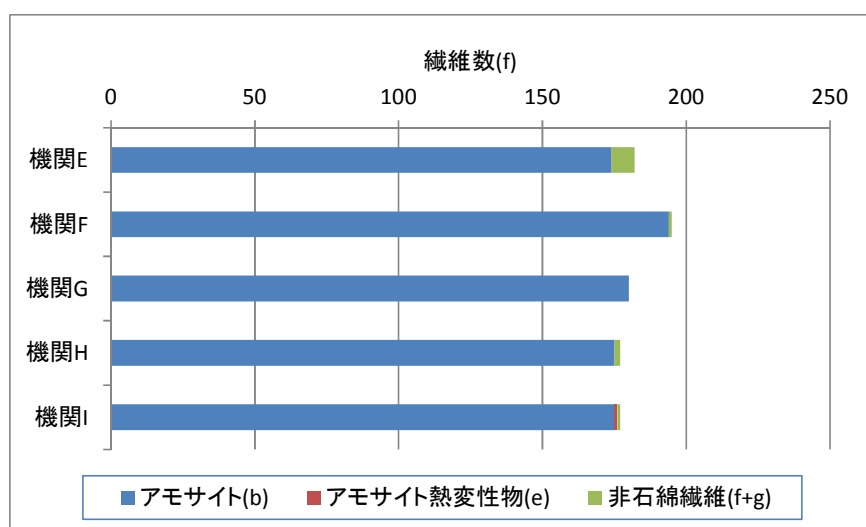


図 2-15 ④アモサイト熱処理物試料の繊維計数結果の内訳

⑤クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料の結果について表 2-13 に示す。機関 E については目開き 2 の計数が完了しておらず、ここでは機関 F～G の結果のみ述べる。石綿繊維計数値は 108～152f(平均 134f)、石綿繊維数濃度は  $6.8 \times 10^{10} \sim 9.5 \times 10^{10}$  f/g (平均  $8.4 \times 10^{10}$  f/g) であり、RSD は 14.0%とばらつきは小さく、良好な結果であった。目開き毎の各機関の計数値の RSD は 7.80～20.8%とばらつきは小さかった。石綿重量濃度は 0.71～0.91g/g (平均 0.84 g/g)、RSD は 10.9%とばらつきは小さかった。クリソタイル及び熱変成物繊維計数値は 19～26f (平均 21.8f)、クリソタイル及び熱変成物繊維数濃度は  $1.2 \times 10^{10} \sim 1.6 \times 10^{10}$  f/g (平均  $1.4 \times 10^{10}$  f/g) であり、RSD は 13.7%とばらつきは小さかった。クロシドライト繊維計数値は 75～130f (平均 102f)、クロシドライト繊維数濃度は  $4.7 \times 10^{10} \sim 8.1 \times 10^{10}$  f/g であり、RSD は 25.0%であった。総繊維数計数値は 109～153f (平均 138f)、総繊維数濃度は  $6.8 \times 10^{10} \sim 9.6 \times 10^{10}$  f/g (平均  $8.6 \times 10^{10}$  f/g) であり、RSD は 14.4%とばらつきは小さかった。今回の TEM 法でのクロスチェック結果と比較すると、石綿繊維数濃度、総繊維数濃度ともに TEM の結果の約 1/3 と小さかったが、石綿重量濃度は約 2 倍と高かった。ばらつきは総じて TEM 法の結果と同程度であった。TEM 法及び SEM 法による②クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料の繊維数濃度分析結果を図 2-16 にまとめた。



表 2-13 ⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料の SEM 法による分析結果

(a) 石綿繊維

機関	計数結果 (f)				繊維数濃度 (f/g)	重量濃度 (g/g)
	目開き		合計	平均		
	1	2				
F	62	46	108	54	$6.8 \times 10^{10}$	0.86
G	73	68	141	70.5	$8.8 \times 10^{10}$	0.90
H	70	65	135	67.5	$8.5 \times 10^{10}$	0.91
I	74	78	152	76	$9.5 \times 10^{10}$	0.71
平均	69.8	64.3	134	67	$8.4 \times 10^{10}$	0.84
RSD (%)	7.80	20.8	14.0	—	14.0	10.9

(b) クリソタイル及び熱変成物繊維

機関	計数結果 (f)				繊維数濃度 (f/g)
	目開き		合計	平均	
	1	2			
F	15	6	21	10.5	$1.3 \times 10^{10}$
G	11	8	19	9.5	$1.2 \times 10^{10}$
H	16	10	26	13	$1.6 \times 10^{10}$
I	10	11	21	10.5	$1.3 \times 10^{10}$
平均	13	8.75	21.8	10.9	$1.4 \times 10^{10}$
RSD (%)	22.7	25.3	13.7	—	13.7

(c) クロシドライト繊維

機関	計数結果 (f)				繊維数濃度 (f/g)
	目開き		合計	平均	
	1	2			
F	47	40	87	43.5	$5.5 \times 10^{10}$
G	58	59	117	58.5	$7.3 \times 10^{10}$
H	36	39	75	37.5	$4.7 \times 10^{10}$
I	64	66	130	65	$8.1 \times 10^{10}$
平均	51.3	51	102	51.1	$6.4 \times 10^{10}$
RSD (%)	24.1	26.7	25.0	—	25.0

(d) 総繊維

機関	計数結果 (f)				繊維数濃度 (f/g)
	目開き		合計	平均	
	1	2			
F	63	46	109	54.5	$6.8 \times 10^{10}$
G	73	68	141	70.5	$8.8 \times 10^{10}$
H	82	66	148	74	$9.3 \times 10^{10}$
I	75	78	153	76.5	$9.6 \times 10^{10}$
平均	73.3	64.5	138	68.9	$8.6 \times 10^{10}$
RSD (%)	10.7	20.8	14.4	—	14.4

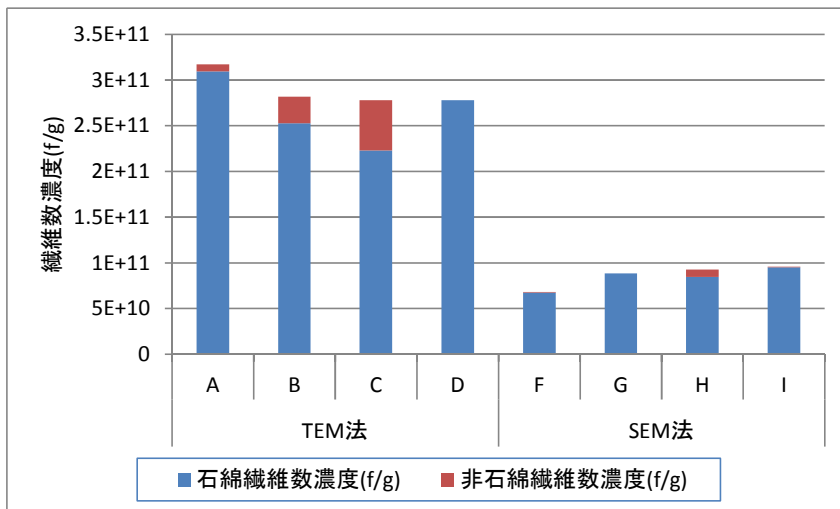


図 2-16 ⑤クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料の TEM 法及び SEM 法による繊維数濃度分析結果

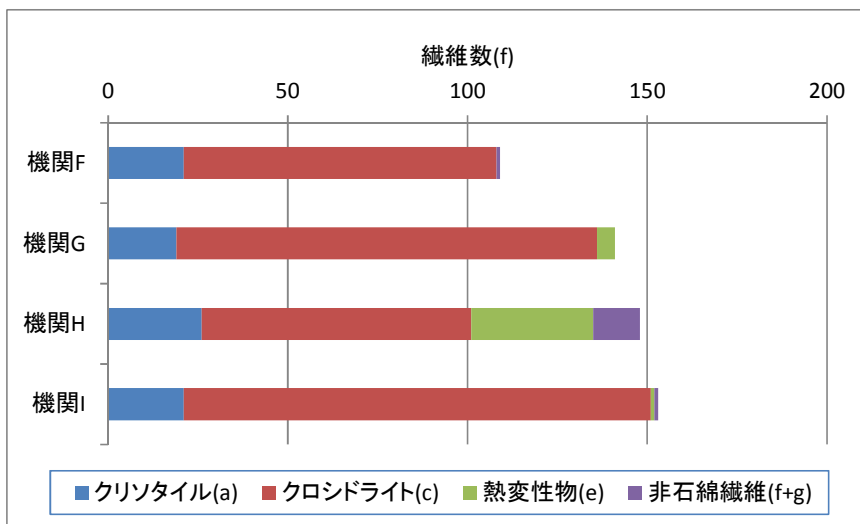


図 2-17 ⑤クリソタイル／クロシドライト熱処理物試料の繊維計数結果の内訳

繊維判定に関して、繊維数の内訳を図 2-17 に示す。(c)と判定された繊維が最も多く、次いで(a)が多かった。機関 H では(e)と判定された繊維も多かった。TEM 法の結果と比較して異なるのは(a)と判定された繊維が多かったことである。上述の通り、クリソタイルの熱処理によってフォルステライトが生成するが、フォルステライトが繊維状態である場合には、EDS 分析による Mg/Si 比では両者を判別することは難しい。各種公定分析法において EDS 分析による繊維の判定について定量的に記述されているものではなく、例えば環境省のアスベストモニタリングマニュアル(第 4.0 版)<sup>7)</sup>では、EDS 分析による繊維の判定に関して「アスベストの種類ごとに特徴的な EDX スペクトルを示すので、ほとんどの場合、スペクトルからアスベストの種類が同定できる。アスベストの EDX スペクトルの例を参考資料に示す。」として石綿繊維の EDS スペクトルを例示しているのみである。石綿は天然鉱物であるため産地によっても組成が変わることや、EDS 装置の個体差、測定条件等によっても測定結果が変わってくることから、この種の石綿であれば元素組成比がこの程度の範囲に入るということは明示しづらいと思われるが、石綿標準や熱変成物の測定例を蓄積することである程度の範囲を示すことができれば、分析を行う者にとって有用であろう。

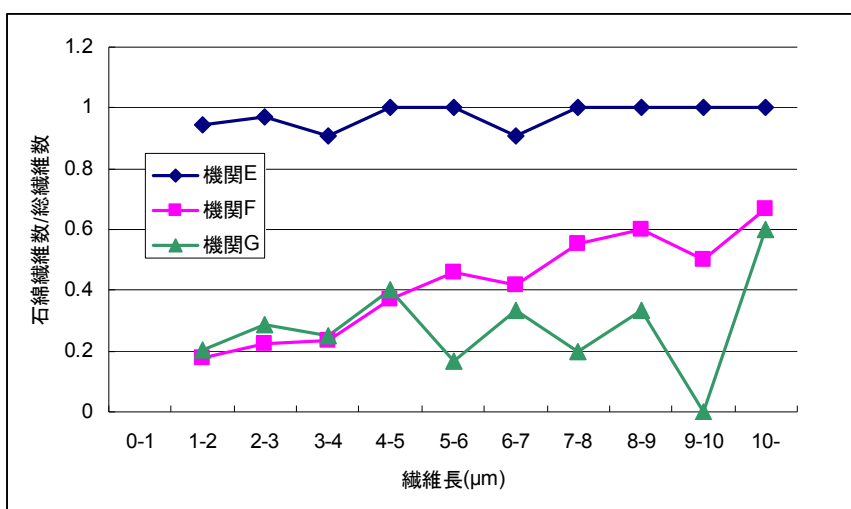
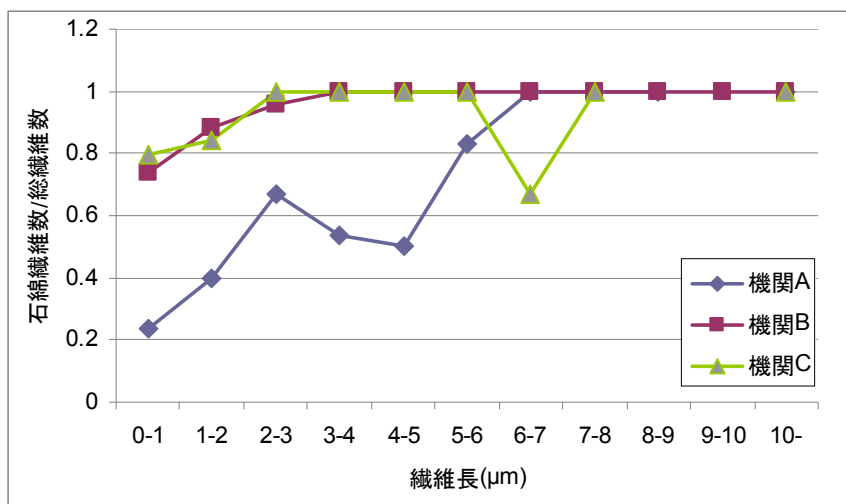


図 2-18 ②集じんダスト観察試料における繊維長と石綿繊維数/総繊維数との関係  
(上：TEM法、下：SEM法)

### (3) 分析誤差要因に関する検討

②集じんダスト観察試料はTEM法で4機関、SEM法で3機関がクロスチェックに参加した。TEM法ではカーボン膜の破損等の理由により当初指定した目開きが観察不能となったこともあり、4機関が共通して観察した目開きは2個であったが、その2目開きの石綿繊維数は平均117本(相対標準偏差43%)、総繊維数は164本(同20%)であった。SEM法では観察不能となる目開きはなく、共通して観察した10目開きの石綿繊維数は平均123本(同76%)、総繊維数は267本(同39%)であった。また、クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料はTEM法で4機関、SEM法で5機関がクロスチェックに参加した。この試料では指定した目開きが観察不能になるといった事例はなく、TEM法で共通して観察した4目開きの石綿繊維数は平均136本(相対標準偏差14%)、総繊維数は148本(同6.6%)、SEM法で共通して観察した2目開きの石綿繊維数は平均134本(同14%)、総繊維数は138本(同14%)であった。両方の試料共、石綿繊維数の相対標準偏差(ばらつき)が総繊維数のばらつきよりも大きくなる傾向にあり、過年度に指摘した通り、繊維判定が計数結果の誤差要因の一つであることが示唆される。

ここで、繊維サイズが大きくなるほど形態観察やEDS、電子線回折(ED)等が容易となり、繊維判定の確度が上がると仮定して、②集じんダスト観察試料について、繊維長と石綿繊維数/総繊維数の比との関係について解析した結果を図2-18に示す。TEM法、SEM法いずれも繊維長が長くなるほど石綿と判

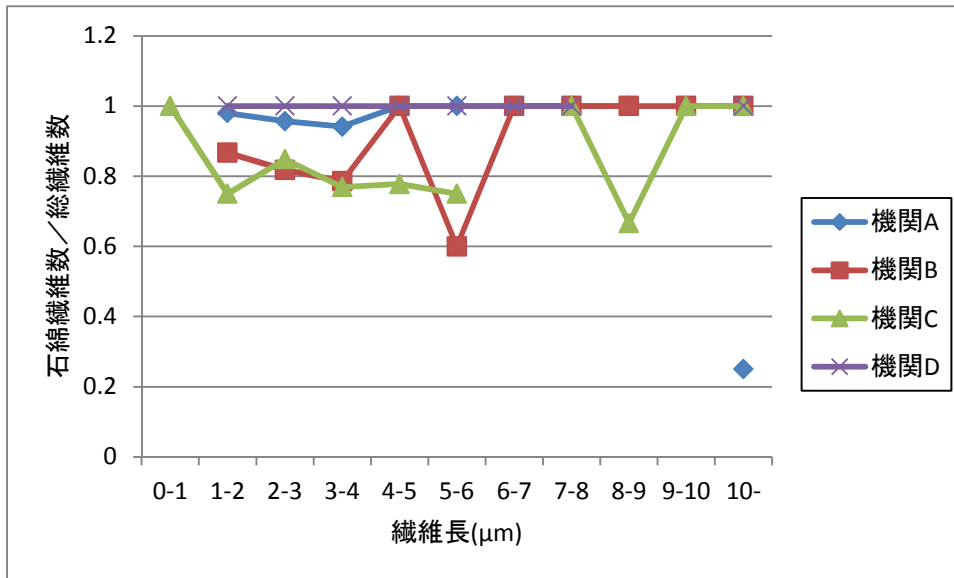


図 2-19 ⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料における繊維長と石綿繊維数/総繊維数との関係(TEM 法)

定される繊維の比率が高くなることが分かった。TEM 法の 3 機関の比較では、短繊維では機関 A の石綿繊維数/総繊維数の比が他機関より小さくなる傾向にあったが、概ね 5 $\mu\text{m}$  以上の繊維では 3 機関の石綿繊維数/総繊維数の比はほぼ 1 となった。また、SEM 法の 3 機関の比較では、機関 E は長さによらず石綿繊維数/総繊維数の比がほぼ 1 であったが、他機関では 10 $\mu\text{m}$  以上の長繊維でも約 0.6 であり、TEM 法の結果と比較して非石綿と判定される繊維数が多かった。続いて、⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料について同様の解析を行った。TEM 法の結果を図 2-19 に示すが明確な関係は得られなかった。SEM 法では非石綿と判定された繊維数は極めて少なかった。従って、TEM 法、SEM 法のいずれも繊維サイズが石綿/非石綿の判定に影響を与えるかは判断できなかった。このように、集じんダスト試料では長さや石綿繊維数/総繊維数の比の関係性があるように見えたが、集じんダスト中に存在する長繊維のほとんどが石綿であるのか、長繊維ほど繊維同定の確度が高くなるのか、いずれを示しているのかは明確でない。しかし、短繊維の判定についてはより慎重に行う必要があることが、今回の解析結果から示唆された。一方で、光学顕微鏡法による分析結果との比較や健康影響評価を考えた場合には 5 $\mu\text{m}$  以上の長い石綿繊維の判定が確かであればよいとも考えられ、今回の結果から長繊維の TEM 法による判定結果が機関間でほぼ一致していることは好ましいことであると言える。

繊維が石綿であるか、非石綿であるかの判定は、形態観察、EDS 分析による元素組成分析、ED による結晶構造解析(TEM 法のみ)に基づいて行われる。環境省の「アスベストモニタリングマニュアル(第 4.0 版)」では、A-SEM 法(=SEM 法)では、繊維を EDX(=EDS)検出装置を用いて構成成分を確認し、①クリソタイル、②アモサイト、③クロシドライト、④その他の角閃石系アスベスト、⑤その他の繊維の 5 つの区分に識別するとしている<sup>8)</sup>。また A-TEM 法(=TEM 法)では、繊維を①EDX スペクトル、②形態、③ED から判定するとしている。但し、いずれも石綿や環境中で見られる代表的な繊維の EDX スペクトルを例示しているのみであり、具体的に Mg や Fe の存在比が具体的にどの程度であればどの石綿である、という書きぶりではない。また、「石綿含有一般廃棄物等の無害化処理等に係る石綿の検定方法」でも主要元素の化学組成の比率が石綿標準物質と一致するかどうかを判定の基準としている<sup>9)</sup>。具体的に主要元素の比率がどの程度であれば石綿と判定されるかは、こちらでも明確でない。こうした元素組成比について、目安を示して欲しいという要望が常にあり、今回のクロスチェック結果によって報

表 2-14 ②集じんダスト観察試料中繊維の Mg/Si、Fe/Si 比の平均値

分析方法	機関	クリソタイル		アモサイト		その他角閃石		非石綿	
		Mg/Si	Fe/Si	Mg/Si	Fe/Si	Mg/Si	Fe/Si	Mg/Si	Fe/Si
TEM 法	A	0.36	0.09	—	—	—	—	0.16	0.19
	B	0.34	0.10	—	—	—	—	0.09	0.28
	C	0.75	0.29	0.13	0.21	—	—	0.25	0.81
	D	0.77	0.03	—	—	—	—	0.23	0.13
SEM 法	F	0.86	0.01	0.24	1.23	0.41	0.32	0.14	0.63
	G	0.52	0.10	0.18	0.92	—	—	0.20	0.73

表 2-15 ⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物中の繊維の Mg/Si、Fe/Si 比の平均値

分析方法	機関	クリソタイル		クロシドライト		石綿熱変成物		非石綿	
		Mg/Si	Fe/Si	Mg/Si	Fe/Si	Mg/Si	Fe/Si	Mg/Si	Fe/Si
TEM 法	A	—	—	0.06	0.59	0.18	0.56	0.04	0.58
	B	—	—	0.05	0.59	—	—	0.74	0.30
	C	—	—	0.05	0.47	0.44	0.33	0.06	0.43
	D	1.38	0.05	0.05	0.75	0.02	1.00	—	—
SEM 法	E	1.36	0.14	0.09	1.25	—	—	0.000	1.05
	F	1.46	0.07	0.08	0.75	—	—	0.01	0.01
	G	1.16	0.07	0.14	0.27	0	0.27	—	—
	H	0.98	0.09	0.07	2.63	0.05	3.03	0.40	0.85
	I	1.30	0.01	0.13	1.33	—	—	0.04	0.72

告のあった繊維の Mg/Si 比や Fe/Si 比について解析した。

②集じんダスト観察試料中に観察された繊維の元素組成について、クリソタイルと判定された繊維と非石綿と判定された繊維の Mg/Si 比、Fe/Si 比の平均値を表 2-14 に示す。TEM 法では、Mg/Si 比はクリソタイル繊維が 0.34～0.77、非石綿繊維が 0.09～0.25 であり、SEM 法ではそれぞれ 0.52～0.86、0.14～0.20 であった。クリソタイル( $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )と判定された繊維の Mg/Si 比は非石綿と判定された繊維のそれよりも大きかったが、理論値である 1.5 よりも小さかった(TEM 法で特に顕著)。破碎排ガス集じんダストは建設系廃棄物の破碎排ガスをバグフィルタで捕集したものであり、土砂やセメントといった夾雑物が存在している。EDS 分析ではこれらからの影響を受けてクリソタイルと判定された繊維の Mg/Si 組成比が理論値よりも低くなったものと見られる。

⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料中に観察された繊維の元素組成について、クリソタイルと判定された繊維、クロシドライトと判定された繊維、熱変成物と判定された繊維、非石綿と判定された繊維の Mg/Si 比、Fe/Si 比の平均値を表 2-15 に示す。TEM 法では、Mg/Si 比はクリソタイルが 1.38、クロシドライトが 0.05～0.06、石綿熱変成物が 0.02～0.45、非石綿が 0.04～0.74 であり、SEM 法ではそれぞれ 0.98～1.37、0.07～0.13、0.046、0～0.40 であった。クリソタイルの熱変成物(フォルスセライト)の Mg/Si 比の理論値は 2 であるから熱変成物繊維の Mg/Si 比は大きくなる筈であるが、TEM 法ではクリソタイルと判定された繊維はほとんど無く、逆に SEM 法では熱変成物繊維と判定された繊維はほとんど無かったため、その傾向は明確には確認できなかった。

集じんダストの場合も同様であるが、Mg/Si 比や Fe/Si 比がこの範囲であれば石綿であるという基準を示すことは、試料の状態や機関毎の分析装置の特性や調整等の要因のため困難であると考えられる。各機関において石綿標準物質や関連繊維状物質の EDS 分析を行い、組成比の情報を整備しておくことが望ましい。

#### D. 結論

観察面積が規格化されておらず、定量分析への適用が難しい SEM による石綿測定法の検討として、一定サイズの目開き(凸面)を有する SEM グリッドを新規開発した。それを用いて SEM 観察試料を作製し、評価した。この SEM グリッドを用いることで、繊維状物質の観察や EDS 分析が支障なく行うことができ、観察面積を規格化した石綿測定が可能となった。今後廃棄物処理関連試料の定量分析や精度管理のためのクロスチェック等に活用できるものと考えられる。

電子顕微鏡による石綿分析における精度管理手法の検討のためのクロスチェックを行った。21 年度には①石綿標準観察試料、②集じんダスト観察試料、③集じんダスト懸濁液試料の 3 試料について TEM 法 4 機関、SEM 法 3 機関の参加、また 22 年度には④アモサイト熱処理物試料、⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料の 2 試料について、TEM 法 4 機関、SEM 法 5 機関の参加を得て実施した。TEM 法によるクロスチェックでは、繊維数濃度のばらつきは RSD として 35%以下であった。石綿重量濃度のばらつきは繊維数濃度のばらつきより大きかった。機関毎の目開き間の計数値のばらつきはさほど大きくなく、繊維は比較的均一に分散していることが示唆された。また、試料②と③の結果の比較から、観察試料の作製段階で分析値が低下する傾向が見られたが、特にばらつきが増えるということはなかった。分析の誤差要因として、計数基準外繊維の計数の有無や繊維判定基準の機関毎の違いといった要因が推定された。SEM 法によるクロスチェックでは、繊維数濃度のばらつきは TEM 分析よりも大きくなった。重量濃度も観察目開きに巨大繊維束が載る等があったため、ばらつきは大きかった。また、試料②と③の結果の比較から、TEM 法と同様、観察試料の作製段階で分析値が低下する傾向が見られた。誤差要因としては、TEM 法と同様、繊維判定基準の機関毎の違いといった要因が推定された。試料④、⑤のクロスチェックにおいては、試料①の結果と比較して繊維数濃度のばらつきは小さくなったが、石綿重量濃度のばらつきはそれほど変化しなかった。TEM 法と SEM 法の比較では、試料④では石綿繊維数濃度は概ね同等であったが、石綿重量濃度は SEM 法が若干高かった。ばらつきは SEM 法の方が良好であった。試料⑤では石綿繊維数濃度は TEM 法が SEM 法の約 3 倍程度高かったが、石綿重量濃度は TEM 法は SEM 法の約 1/2 であった。ばらつきは同程度であった。石綿熱処理物試料においても、石綿繊維数濃度のばらつきは総繊維数濃度のばらつきより大きく、繊維判定基準の機関毎の違いが計数結果に大きな影響を与える要因であることが示唆された。TEM 法、SEM 法共通して EDS 分析において Mg/Si 比、Fe/Si 比などを指標に石綿の判定を行うには難しく、同一の繊維でも分析法毎、あるいは分析機関毎に判定が異なる例が見られ、周辺情報や経験、分析事例の蓄積等が必要であると考えられた。

クロスチェック結果について、繊維サイズや元素組成と石綿繊維数及び総繊維数との関係について解析した。繊維サイズについては、②集じんダスト観察試料では繊維長が長くなるほど石綿繊維数/総繊維数の比が増加する関係が確認された。TEM 法では 5 $\mu$ m 以上の繊維はほぼ石綿繊維と判定され、機関間で判定の結果に相違はなかったが、SEM 法では 10 $\mu$ m 超の繊維でも石綿繊維と判定された繊維は 6 割程度と、測定法により異なる結果となった。一方、⑤クリソタイル/クロシドライト熱処理物試料では繊維長と石綿繊維数/総繊維数の比との関係は明確にはならなかった。元素組成については、クリソタイルと判定された繊維の Mg/Si 比の平均値は理論値を下回り、熱変成物についても同様の傾向であった。

アンケート結果では、各機関の繊維判定基準や、電子顕微鏡法による石綿分析方法についての疑問点や要望等について寄せられた。今後詳細に検討し、電子顕微鏡法による石綿分析の改善につなげたい。

## E. 参考文献

- 1) 平成 18 年度廃棄物処理等科学研究費補助金研究成果報告書「アスベスト含有廃棄物の分解処理による無害化の確認試験方法の確立とその応用(K1804)」平成 19 年 3 月
- 2) 平成 19 年度廃棄物処理等科学研究費補助金研究成果報告書「アスベスト含有廃棄物の分解処理による無害化の確認試験方法の確立とその応用(K1947)」平成 20 年 3 月
- 3) 平成 20 年度廃棄物処理等科学研究費補助金研究成果報告書「アスベスト含有廃棄物の分解処理による無害化の確認試験方法の確立とその応用(K2051)」平成 21 年 3 月
- 4) T.W.S.Pang, M.Harper: The quality of fibers counts using improved slides with relocatable fields, J. Environ. Monitoring, 10, 89-95 (2008)
- 5) P.W.Brown, A.D.Jones, B.G.Miller: Developments in the RICE asbestos fiber counting scheme, 1992-2000, Ann. Occup. Hyg., 46, 329-339 (2002)
- 6) 坂本美徳、吉村陽、中坪良平、藤原拓洋、岡田圭司、小坂浩：位相差顕微鏡法によるアスベスト計数クロスチェック結果の検討(クリソタイル繊維)、第 48 回大気環境学会年会講演要旨集、650 (2007)
- 7) 日本規格協会：JIS K 3850-1:2006「空气中の繊維状粒子測定方法－第 1 部：光学顕微鏡法及び走査電子顕微鏡法」(2006)
- 8) 環境省水・大気環境局大気環境課：アスベストモニタリングマニュアル(第 4.0 版)(2010)
- 9) 環境省通知「石綿含有一般廃棄物等の無害化処理等に係る石綿の検定方法について」、平成 21 年 12 月 25 日 (2009)
- 10) USEPA: Method 100.1, Analytical method for determination of asbestos fibers in water, EPA-600/4-83-043 (1983)
- 11) Jeyaratnam, M., West, N.G.: A study of heat-degraded chrysotile, amosite, and crocidolite by X-ray diffraction, Ann. Occup. Hyg., 38, 137-178 (1994)
- 12) 神山他：平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費補助金総合研究報告書「アスベスト廃棄物の無害化処理品の生体影響評価に関する研究(K1919, K2056, K2159)」平成 22 年 4 月

## F. 研究発表

- (1) 山本貴士：廃棄物及び関連試料中のアスベスト測定法の検討と精度管理について－3.土壌中のアスベスト分析、平成 21 年度廃棄物資源循環学会研究討論会(川崎市、2009.5)
- (2) 山本貴士、貴田晶子、野馬幸生：電子顕微鏡(走査型および透過型)による石綿繊維数濃度測定の比較、第 18 回環境化学討論会(つくば市、2009.6)
- (3) 山本貴士、貴田晶子、野馬幸生、酒井伸一：透過型電子顕微鏡による旧石綿製品製造工場周辺土壌等試料中の石綿濃度の分析、第 18 回環境化学討論会(つくば市、2009.6)
- (4) アスベスト熱処理物の透過型電子顕微鏡(TEM)による評価(3)－アンソフィライト熱処理物の評価－、第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会(名古屋市、2009.9)
- (5) 山本貴士、貴田晶子、野馬幸生：透過型電子顕微鏡法による石綿分析における精度管理のためのクロスチェック、第 19 回環境化学討論会(春日井市、2010.6)
- (6) 貴田晶子、山本貴士：走査型電子顕微鏡による石綿の繊維数濃度測定方法の標準化に向けて、第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会(金沢市、2010.11)
- (7) 山本貴士：日本における石綿含有廃棄物の状況とその処理技術の概要、韓日石綿建設資材の安定的な解体及び最終処理関連工法国際セミナー(ソウル特別市 2010.12)

- (8) 山本貴士、貴田晶子：電子顕微鏡法による石綿分析における精度管理のためのクロスチェック、第20回環境化学討論会 (熊本、2011.7)
- (9) 山本貴士:アスベストの無害化処理に関する最新の研究開発動向について、産業と環境、40(11)、41-45 (2011)



### 3. 光学顕微鏡による石綿分析の精度管理手法の検討

分担研究者 環境管理センター 豊口敏之

研究協力者 元兵庫県立健康環境科学センター 小坂浩

#### A. 研究目的

現在、国内の空气中石綿濃度の測定は、石綿除去作業中の作業環境管理、排出口からの漏洩管理及び周辺環境への飛散状況の確認を目的とし、実施されている。

石綿廃棄物の処理・再資源化においても、処理工程を管理する上で、空气中の石綿濃度測定が必要となる。

空气中の石綿濃度測定の分析手法は、「空气中の繊維状粒子測定方法(JIS K 3850)」(以下 JIS)や環境省より提示されている「アスベストモニタリングマニュアル」(以下マニュアル)に示されており、各分析機関がその手法に準じて分析を実施している。主な分析手法としては、位相差顕微鏡法(以下 PCM 法)、位相差顕微鏡を用いた分散染色法(以下 DS 法)、分析走査型電子顕微鏡法(以下 A-SEM 法)、分析透過型電子顕微鏡法(以下 A-TEM 法)が示されている。

従来、石綿調査の殆どどのケースでは、PCM 法と DS 法が評価手法として用いられてきたが、マニュアルの平成 22 年 6 月の第 4.0 版への改定により、PCM 法による総繊維濃度測定による評価を実施し空气中濃度が 1 本/L を超えた場合には、A-SEM 法や A-TEM 法による計数を実施する流れが示され、これが一般的な評価手法となりつつある。

また、マニュアルでは、現場での迅速分析法として位相差/偏光顕微鏡法(以下 PCM/PLM 法)による評価手法も紹介されており、これら光学顕微鏡を使った評価手法の組み合わせでアスベストの評価をする分析機関も増えてきている。

現在、主たる測定手法である位相差顕微鏡を用いた観察・計数手法は、分析機関や作業者の経験や技量に大きく影響を受ける。しかし、分析値のばらつきが大きいにもかかわらず、十分な精度管理の仕組みが確立されていないのが現状である。

本研究では、このような背景をふまえて平成 21 年度から平成 23 年度の 3 年間継続して光学顕微鏡による石綿分析の精度管理手法の確立について検討した。

#### B. 研究方法

本研究では、位相差顕微鏡分析における精度管理手法として、同一視野を複数の分析者が観察でき、視野ごとのアスベスト繊維濃度が既知であるリロケータブルテストスライド(図 3-1)を用いた精度管理<sup>1)</sup>プログラムを検討した。

対象とするアスベスト鉱物は平成 21 年度はアモサイト、平成 22 年度及び平成 23 年度はアモサイトとクリソタイルを対象とし、これら 2 種類のアスベスト鉱物について精度管理プログラムを実施した。

リロケータブルテストスライドはアモサイトについてはアモサイト標準を用いて作製したテストスライド、クリソタイルについてはクリソタイル標準を用いて作製したテストスライドを準備して精度管理プログラムに使用した。使用するスライドはカナダで既に合意基準が設定されたものと合わせて、本研究においても同様の手法でテストスライドを作製し各スライドの合意基準は、試験開始前に複数の熟練者の計数結果から暫定値を決定した。

なお、一部のスライドでは、試験後に参加者の計数結果も参考にして修正したものもある。

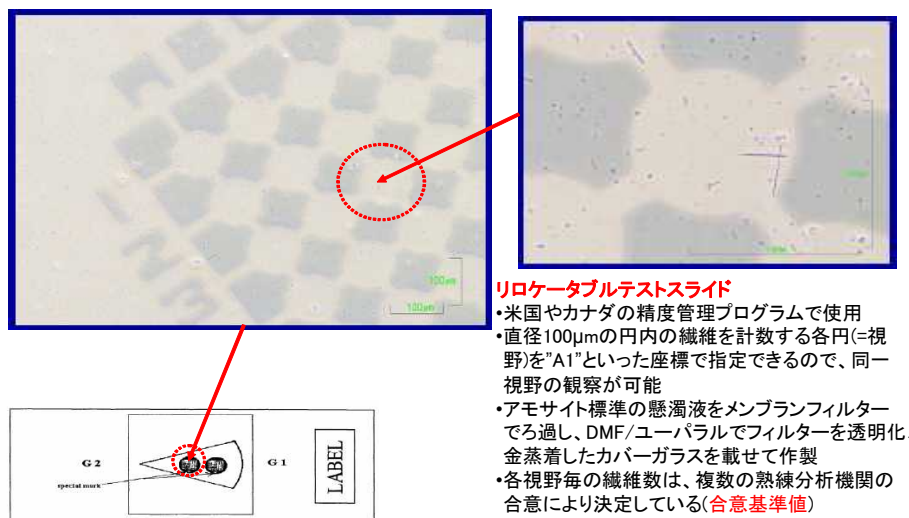
精度管理プログラムは、テストスライドを各分析機関に回覧し、その回答を回収し、合意標準と比較・評価後、視野毎の評価結果を計数者にフィードバックし、合意標準とのずれや課題を提示した上で、再

度、同一のリロケータブルテストスライドを観察し、確認する手法を用いた。

位相差顕微鏡での観察倍率は400倍とし、分析者は、事前に指定されたテストスライドの視野を接眼レンズに取り付けたアイピースグレーティクルの円と重ねた上で、WHOの計数ルール([http://www.who.int/occupational\\_health/publications/en/oehairbornefibres.pdf](http://www.who.int/occupational_health/publications/en/oehairbornefibres.pdf))

または、環境省のアスベストモニタリングマニュアル(第4.0版)の計数ルールに従い、幅3μm未満でアスペクト比3以上の繊維を計数した。計数する視野数は繊維密度によりスライドごとに設定し30~110視野とした。

計数結果は視野ごとの繊維の数とその位置を図示して報告とした。(図3-2)



- リロケータブルテストスライド**
- 米国やカナダの精度管理プログラムで使用
  - 直径100μmの円内の繊維を計数する各円(=視野)を“A1”といった座標で指定できるので、同一視野の観察が可能
  - アモサイト標準の懸濁液をメンブランフィルターでろ過し、DMF/ユーパラルでフィルターを透明化、金蒸着したカバーガラスを載せて作製
  - 各視野毎の繊維数は、複数の熟練分析機関の合意により決定している(合意基準値)

図 3-1 リロケータブルテストスライドのイメージ

グリッド	視野座標	計数繊維数

FIBERS REPORTED			
SIZING:	EXTRA	MISSING	
VISUAL ACUITY:	EXTRA	MISSING	
IDENTIFICATION:	EXTRA	MISSING	
RECORDING:	EXTRA	MISSING	

記入例

グリッド	視野座標	計数繊維数
○	○○	2.5

記入しないで下さい

FIBERS REPORTED			
SIZING:	EXTRA	MISSING	
VISUAL ACUITY:	EXTRA	MISSING	
IDENTIFICATION:	EXTRA	MISSING	
RECORDING:	EXTRA	MISSING	

図 3-2 結果の報告様式(左)と記入例(右)

各分析者の分析結果は、以下に示す内容<sup>1)</sup>で評価、解析した。

《結果の集計》

- 視野毎の報告値(Reported Fibers; RF)と合意基準値(Verified Fibers; VF)との誤差

(Discrepancy;D)を求める。

- 正の誤差(D+)、負の誤差(D-)をそれぞれ合計する。
- 誤差の絶対値の総和を求める。

《結果の評価》

- スコアを次の式に従って求める。

$$\text{Score} = \{(\sum \text{VF} - \sum |\text{D}|) \div \sum \text{VF}\} \times 100$$

∑VF：各視野の合意基準値の総和

∑|D|：各視野での報告値と合意基準値の差の絶対値の総和

- アモサイトについてはスコア 60 以上を、クリソタイルについてはスコア 50 以上を一定の技術水準の認められる熟練者とした。

《結果の解析》

- 正の誤差、負の誤差それぞれの総和を、VF の総和で割って規格化したもの(Normalized D+、D-)で過大評価、過小評価の傾向を把握する。
- 報告様式を確認し、分析者のアスベスト繊維の観察の癖について解析しフィードバックする。

第 1 回目の解析結果(図 3-3)(スコア、視野ごとのアスベスト繊維の観察結果の評価)を各分析者にフィードバックし、その内容を同一のスライドで分析者本人が再確認した上で、次のステップである第 2 回目の回覧を実施した。

テストスライド配布から最終評価までの流れを図 3-4 に示す。

PROFICIENCY EVALUATION OF PCM FIBRE COUNTING Round 2009-1									
		SLIDE NUMBER	<b>B</b>						
		ANALYST NUMBER	101149						
		ANALYST NAME							
# OF "VERIFIED" FIBRES =		112.5	NORMALISED D+	0.178					
# OF FIBRES REPORTED (RF) =		124	NORMALISED D-	-0.076					
# OF DISCREPANCIES =		28.5	SUM OF NORMALISED D+ +  D-	0.253					
			NORMALISED RF	1.102					
SCORE =		74.67							
DISCREPANCIES									
FIELD NUMBER	GRID #	FIELD ID	VERIFIED FIBRES VF	REPORTED FIBRES RF	RF -VF	POSITIVE DISCREPANCIES D+	NEGATIVE DISCREPANCIES D-	TOTAL DISCREPANCIES D+ +  D-	
#1	1 D-1		2	2	0	-	-	0	
#2	1 D-2		3.5	3.5	0	-	-	0	
#3	1 D-3		3	3	-2	-	-2	2	
#4	1 D-4		3.5	3.5	0	-	-	0	
#5	1 D-5		1	2	1	1	-	1	
#6	1 D-6		2	2	0	-	-	0	
#7	1 D-7		1	2	1	1	-	1	
#8	1 D-8		0	0	0	-	-	0	
#9	1 D-9		0	1	1	1	-	1	
#10	1 D-10		2	2	0	-	-	0	
#11	1 G-1		2	2	0	-	-	0	
#12	1 G-2		1.5	1	-0.5	-	-0.5	0.5	
#13	1 G-3		1.5	2.5	1	1	-	1	
#14	1 G-4		0.5	0.5	0	-	-	0	
#15	1 G-5		1	0	-1	-	-1	1	
#16	1 G-6		3	3	0	-	-	0	
#17	1 G-7		2	3	1	1	-	1	
#18	1 G-8		1	1	0	-	-	0	
#19	1 G-9		3	3	0	-	-	0	
#20	1 G-10		4.5	6.5	2	2	-	2	
#21	1 H-1		2.5	2.5	0	-	-	0	
#22	1 H-2		3	3	0	-	-	0	
#23	1 H-3		3	4	1	1	-	1	
#24	1 H-4		1	2	1	1	-	1	
#25	1 H-5		2	3	1	1	-	1	
#26	1 H-6		0	0	0	-	-	0	
#27	1 H-7		1	1	0	-	-	0	
#28	1 H-8		2	2	0	-	-	0	
#29	1 H-9		2	2	0	-	-	0	
#30	1 H-10		3	3	0	-	-	0	
#31	2 D-1		1.5	1	-0.5	-	-0.5	0.5	
#32	2 D-2		5.5	4	-1.5	-	-1.5	1.5	
#33	2 D-3		1	1.5	0.5	0.5	-	0.5	
#34	2 D-4		5	5	0	-	-	0	
#35	2 D-5		4	4	0	-	-	0	
#36	2 D-6		2	1	-1	-	-1	1	
#37	2 D-7		1	1	0	-	-	0	
#38	2 D-8		0	0	0	-	-	0	
#39	2 D-9		2	2	0	-	-	0	
#40	2 D-10		2	2.5	0.5	0.5	-	0.5	
#41	2 F-1		3	3	0	-	-	0	
#42	2 F-2		1	1	0	-	-	0	
#43	2 F-3		3	2	-1	-	-1	1	
#44	2 F-4		1	3	2	2	-	2	
#45	2 F-5		0.5	0.5	0	-	-	0	
#46	2 F-6		0	1	1	1	-	1	
#47	2 F-7		1	3	2	2	-	2	
#48	2 F-8		0.5	1.5	1	1	-	1	
#49	2 F-9		0.5	0.5	0	-	-	0	
#50	2 F-10		2.5	2.5	0	-	-	0	

図 3-3 分析者へのフィードバック用成績評価シートの一例

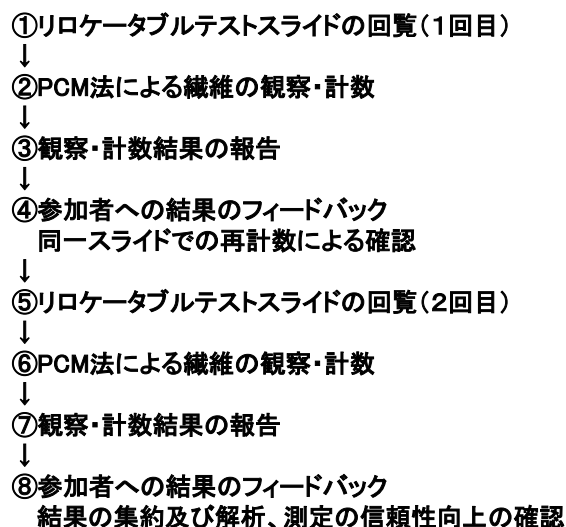


図 3-4 テストスライド配布から最終評価までの流れ

また、本研究においてもカナダで使用されているものと同様のリロケータブルテストスライドを作製した。本研究で実施したリロケータブルテストスライドの作製法について以下に示す。

#### ①試料調製

クリソタイル標準品の適量を分取し秤量した後、無じん水を加えて試験管ミキサーを用いて分散し、適宜希釈した分散液を直径 47mm(有効ろ過面積 1004mm<sup>2</sup>)、孔径 0.8μm のメンブランフィルターを用いて吸引ろ過を行った。今回はろ紙上の繊維密度の異なるテストスライドを準備した。分散液はろ紙 1 枚あたりの標準試料 2μg または 5μg となるように希釈、調製した後にろ過し、ろ過後のろ紙の透明化は、ジメチルホルムアミド(以下 DMF)/ユーパラル法で実施した。

作製したろ紙試料を位相差顕微鏡で観察し、標本用のろ紙上の繊維密度を確認した上で本精度管理で使用するテストスライドを選定した。

#### ②リロケータブルテストスライドの作製方法

リロケータブルテストスライドは Orden らの方法<sup>2)</sup>を参考に、以下の手順で作製した。

#### DMF /ユーパラル法

1. 水、ジメチルホルムアミド、酢酸を容量比 50:35:15 で混合して DMF 溶液を作成する。  
注：(2mL : 1.4mL : 0.6mL) 1 週間ごとに作り直す。
2. スライドグラス、フィルターを置く位置を記した図を作成する。
3. スライドグラスを図にあわせて置く。
4. カバーガラスの隅を指で触って蒸着面を確認する。(指で触ると蒸着面がわずかに不鮮明になる。)
5. カバーガラスに記されたリロケータブル視野の各グループの上側に記されているマークを確認する。(各グループには 140 個の円形のリロケータブル視野があり、各視野の直径は約 100μm。)
6. 蒸着面が上に向くようにカバーガラスをスライドグラスの上に置く。  
注：カバーガラスに汚れが付着していないか、蒸着が失敗していないか、顕微鏡で確認する。

7. カバーガラスの蒸着面がフィルターの捕集面に接触するように、また、蒸着グリッドのマークがフィルターの下側になるように、正しい位置にカバーガラスを置く。マークが上側になるようにカバーガラスを置いてフィルターを透明化し、裏返してスライドガラスに固定すると、最終的にマークが下側になり、顕微鏡で観察するときはマークが上側になる。
8. 25mm φ のフィルターの適量(1/8~1/5)を裁断し、捕集面を下にしてカバーガラスの上に置く。図を見ながら 2 つの蒸着グリッドが完全にフィルター捕集面に隠れるように置く。
9. フィルター上に DMF 溶液を 20 μL 滴下する。DMF 溶液がフィルターを完全に湿らせるようにする。
10. フィルター、カバーガラスをのせたスライドガラスを約 60°C のホットプレート上で 30 分間加熱して、フィルターを透明化する。
11. 透明化したフィルターにユーパラルを滴下する。フィルター全体の 1/2 から 2/3 を覆う程度の量を滴下する。  
注：ユーパラルは暗所で保管、5~10 年。
12. フィルター、カバーガラスをピンセットで持ち上げ、上下を裏返してマークが下になるようにユーパラル付着面を下にして新しい清浄なスライドガラスの上に置く。  
注：この時、スライドガラスの右端にラベルを付ける。
13. スライドガラスを約 60°C のホットプレート上で 30 分間加熱して、ユーパラル樹脂を固定する。

上記の手順で作成したリロケータブルテストスライドの各視野について位相差顕微鏡を用いてアスベストの繊維密度や本数を確認する。目的にあった条件のスライドを選定し、精度管理用のリロケータブルテストスライドとした。

作成したスライドのいくつかについて、代表的な視野の写真を図 3-5 に示す。

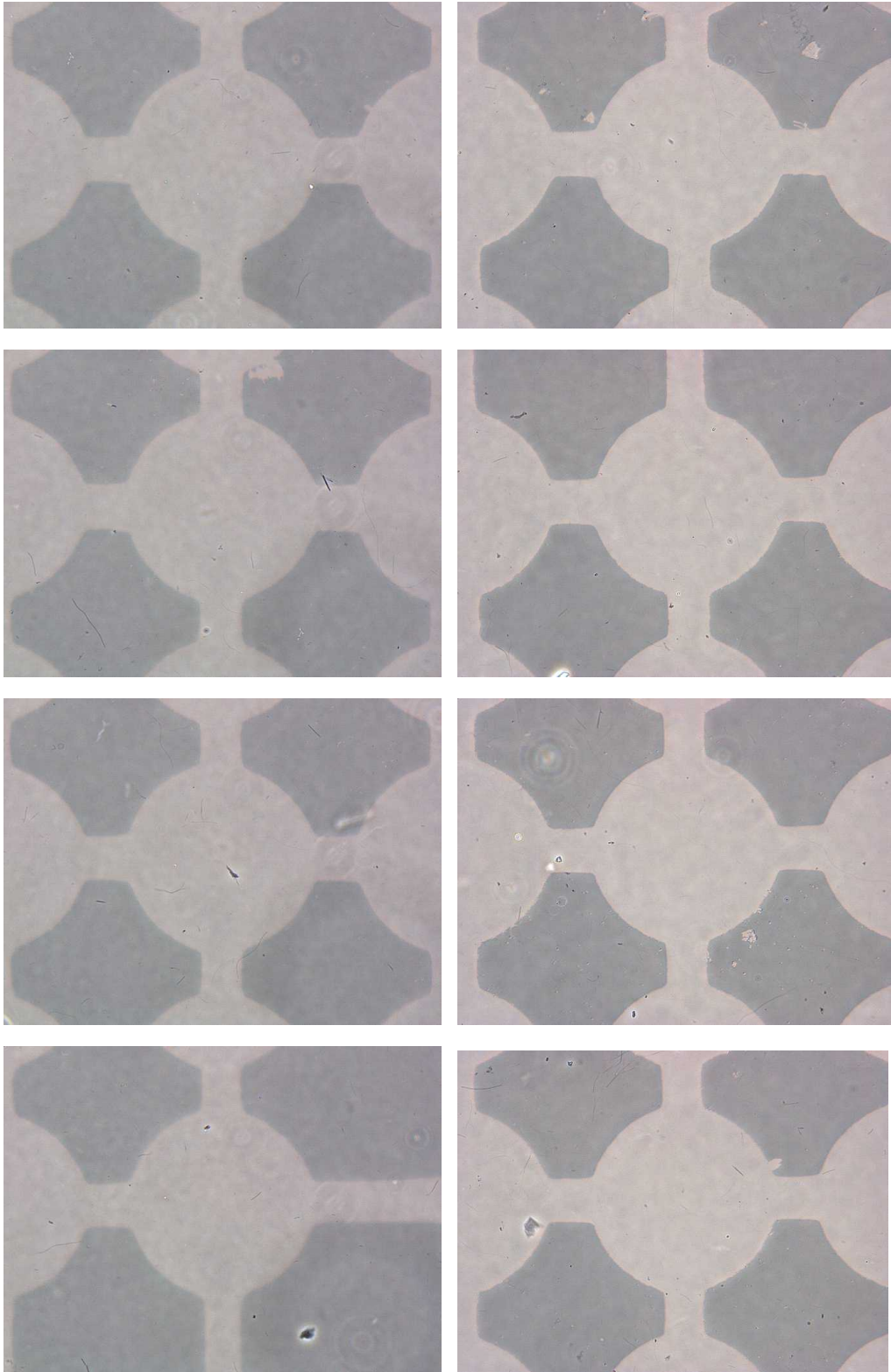


図 3-5 作成したクリソタイル標準リロケータブルテストスライドの位相差顕微鏡写真  
(左側 : 2 $\mu$ g-クワタムろ紙、右側 : 5 $\mu$ g-クワタムろ紙)

### C. 結果及び考察

本精度管理プログラムには、平成 21 年度はアモサイトについて 119 機関 153 名、平成 22 年度はアモサイトについて 33 機関 36 名及びクリソタイルについて 72 機関 83 名、平成 23 年度はアモサイトについて 39 機関 50 名及びクリソタイルについて 30 機関 37 名が参加した。

このうち、記載ミスや誤判定(スミルノフ・グラブスの棄却検定において有意水準 5%で棄却されたもの)を除いた回答を有効回答とし計数結果の評価を実施した。

評価については、アモサイトについては既に同様の精度管理を実施しているカナダや米国と同様にスコア 60 を超える者を、クリソタイルについては本研究での精度管理プログラムの結果を踏まえスコア 50 を超える者を適切な計数作業を実施できる技量を持つ熟練者として判断した。

#### (1) アモサイトの精度管理実施結果

平成 21 年度から平成 23 年度に 3 回の精度管理を実施した。

過去 3 回の精度管理プログラムの結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 アモサイト計数結果

SCORE	H21年度				H22年度				H23年度			
	1回目		2回目		1回目		2回目		1回目		2回目	
	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率
SCORE ≤20	4	2.6%	0	0.0%	1	2.9%	1	2.9%	0	0.0%	0	0.0%
20 < SCORE ≤30	3	2.0%	1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1	2.0%
30 < SCORE ≤40	7	4.6%	1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	1	2.0%	1	2.0%
40 < SCORE ≤50	6	3.9%	1	0.7%	2	5.9%	3	8.6%	4	8.0%	1	2.0%
50 < SCORE ≤60	23	15.1%	5	3.3%	3	8.8%	0	0.0%	5	10.0%	3	6.0%
SCORE ≤60 小計	43	28.3%	8	5.3%	6	17.6%	4	11.4%	10	20.0%	6	12.0%
60 < SCORE ≤70	19	12.5%	29	19.1%	9	26.5%	4	11.4%	8	16.0%	8	16.0%
70 < SCORE ≤80	48	31.6%	52	34.2%	8	23.5%	14	40.0%	16	32.0%	11	22.0%
80 < SCORE ≤90	40	26.3%	56	36.8%	11	32.4%	12	34.3%	16	32.0%	25	50.0%
90 < SCORE	2	1.3%	7	4.6%	0	0.0%	1	2.9%	0	0.0%	0	0.0%
60 < SCORE 小計	109	71.7%	144	94.7%	28	82.4%	31	88.6%	40	80.0%	44	88.0%
合計	152	100.0%	152	100.0%	34	100.0%	35	100.0%	50	100.0%	50	100.0%
SCORE AVERAGE	66.87		76.57		70.10		73.29		71.11		74.29	
SCORE MIN	-64.29		26.32		18.43		14.86		39.19		27.75	
SCORE MAX	90.23		94.44		88.29		91.67		89.51		88.92	

いずれの回においても参加者の 70%以上がスコア 60 を超えており、良好な結果であった。

また、1 回目と比較して 2 回目の熟練者数及びスコアの平均値が上昇しており、繰り返し計数プログラムに参加することにより計数技術が向上することが示唆された。

各年度の分析者別の報告値の合意基準からのずれを図 3-6～3-11 に示す。

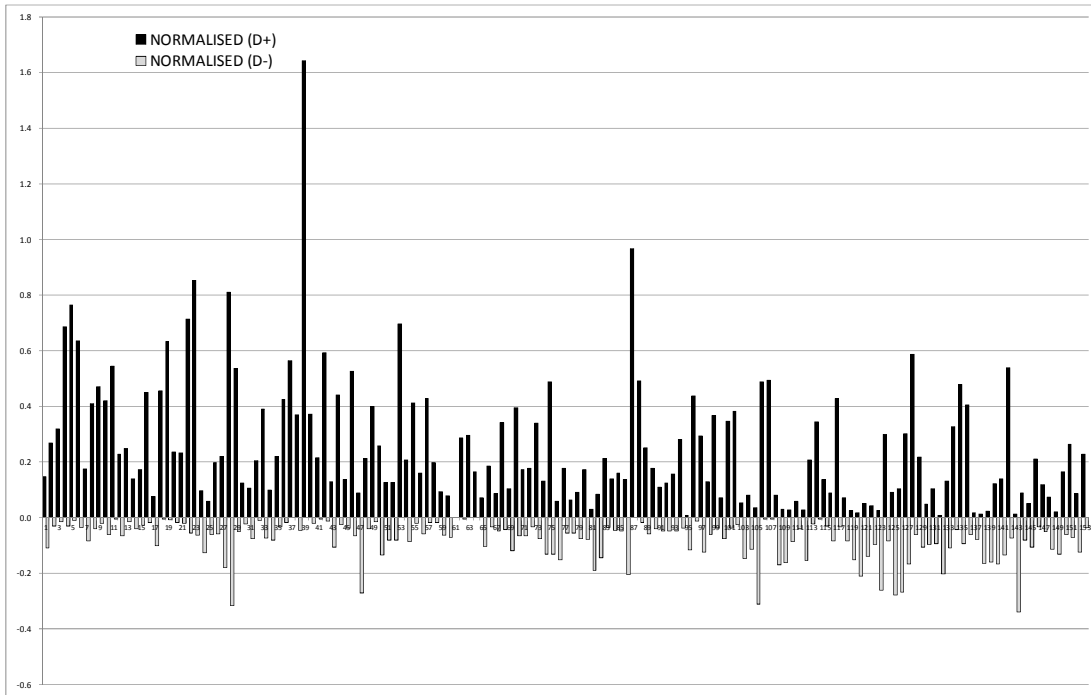


図 3-6 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 21 年度 アモサイト第 1 回目)

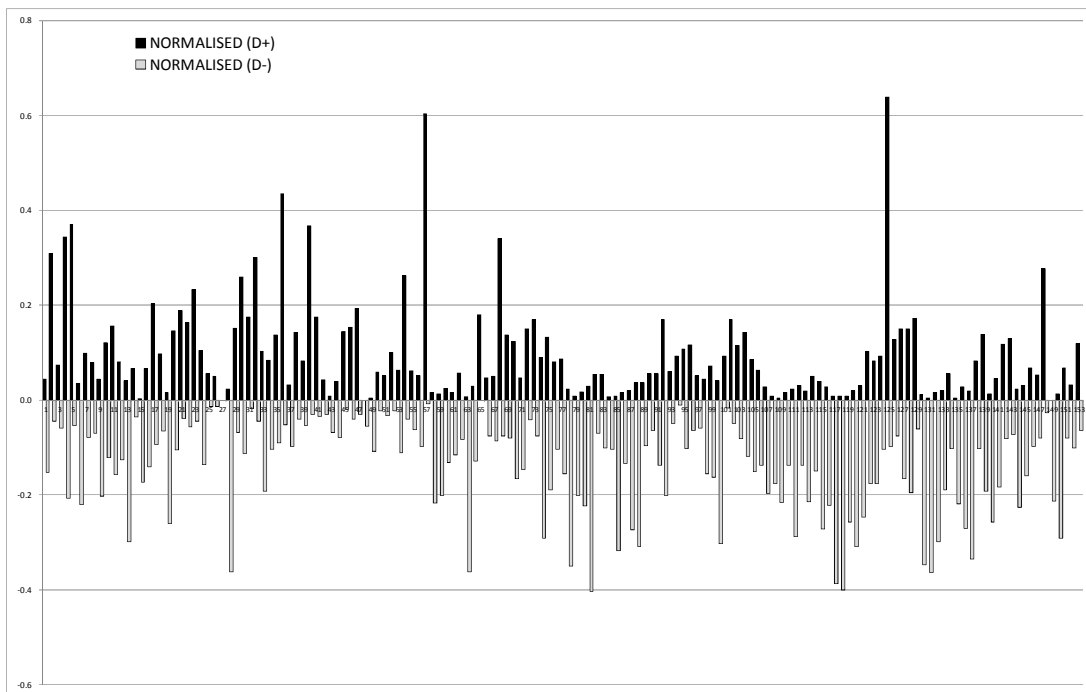


図 3-7 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 21 年度 アモサイト第 2 回目)



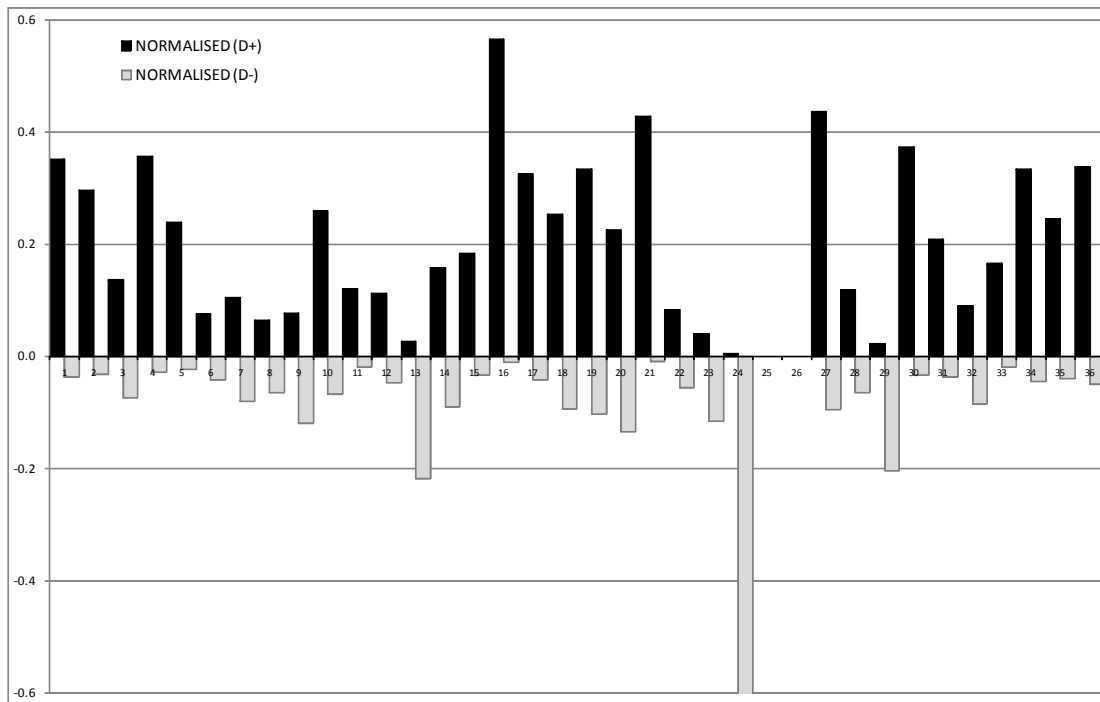


図 3-8 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 22 年度 アモサイト第 1 回目)

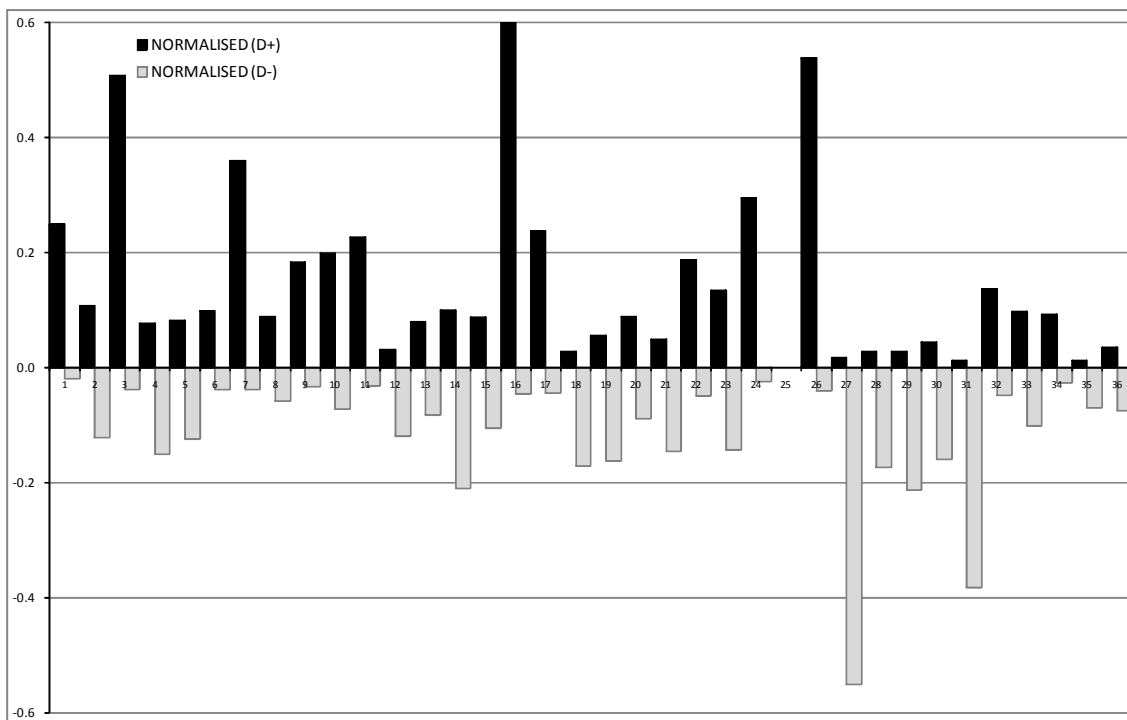


図 3-9 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 22 年度 アモサイト第 2 回目)

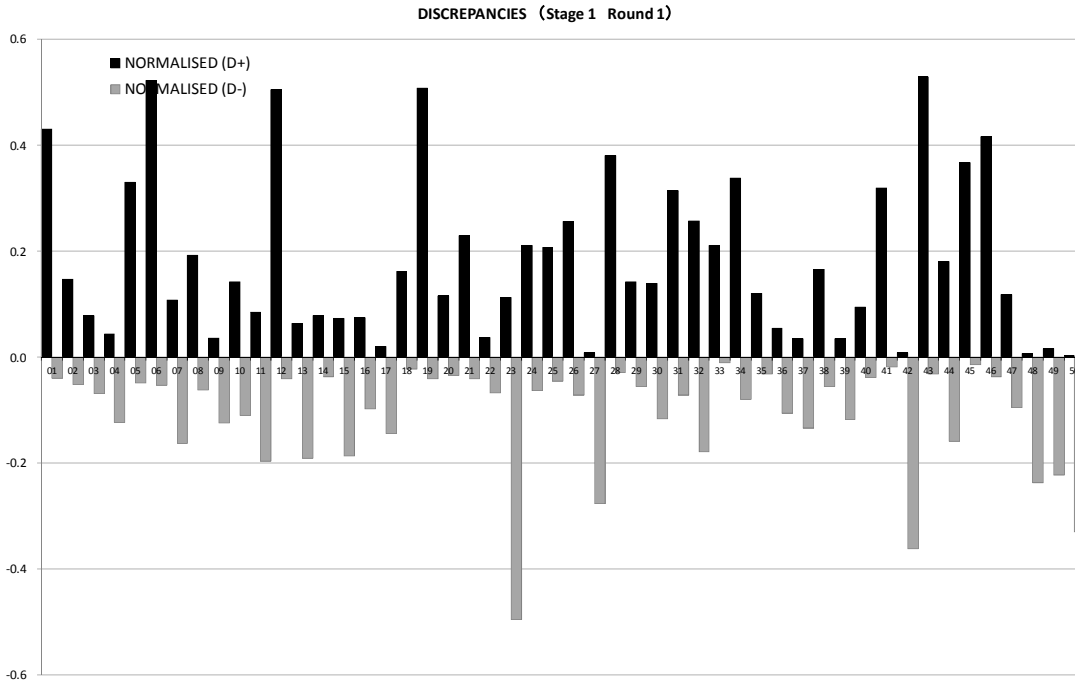


図 3-10 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 23 年度 アモサイト第 1 回目)

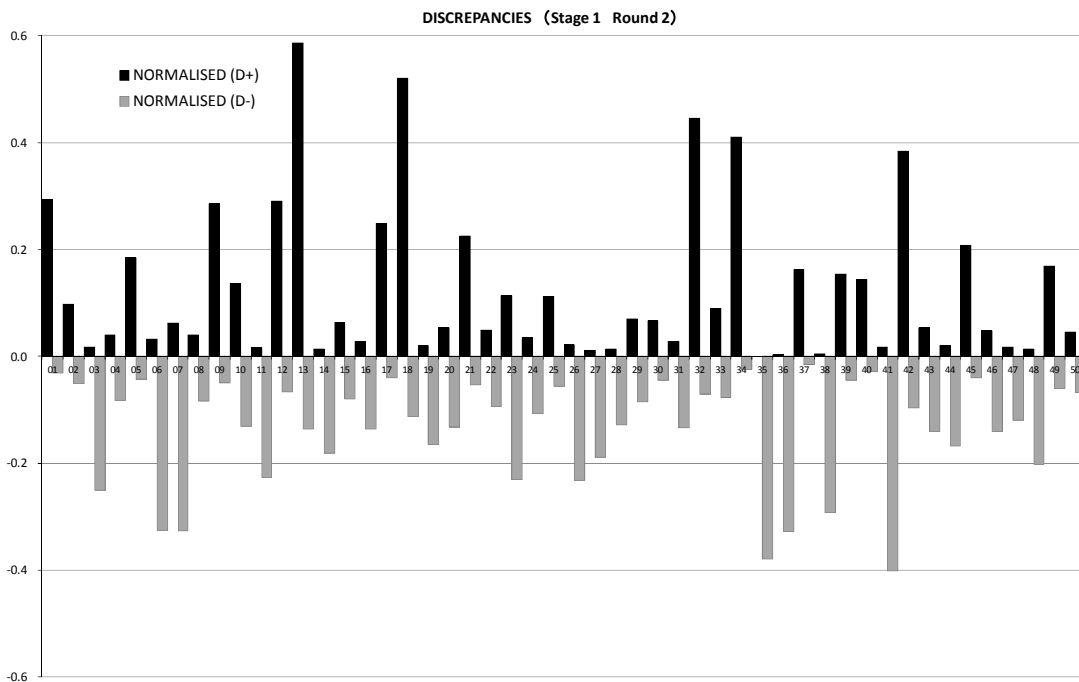


図 3-11 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 23 年度 アモサイト第 2 回目)

誤差の主な要因は、繊維長さの判定ミス(5 $\mu$ m未満の短い繊維を 5 $\mu$ m以上と判定しているケース)、視野の境界に存在する繊維の判定ミス(円の外の繊維や境界付近の繊維を過剰にカウントする傾向)であった。全体的には合意標準と比較しての誤差は小さく、繊維の見落とし等による誤差は少ない傾向であった。

(2) クリソタイルの精度管理実施結果

平成 22 年度から平成 23 年度に 2 回の精度管理を実施した。

過去 2 回の精度管理プログラムの結果を表 3-2 に示す。

表 3-2 クリソタイル計数結果

SCORE	H22年度				H23年度			
	1回目		2回目		1回目		2回目	
	人数	比率	人数	比率	人数	比率	人数	比率
SCORE ≤20	11	13.3%	7	8.8%	0	0.0%	2	6.3%
20 < SCORE ≤30	10	12.0%	11	13.8%	4	10.8%	2	6.3%
30 < SCORE ≤40	10	12.0%	14	17.5%	10	27.0%	4	12.5%
40 < SCORE ≤50	14	16.9%	14	17.5%	6	16.2%	7	21.9%
SCORE ≤50 小計	45	54.2%	46	57.5%	20	54.1%	15	46.9%
50 < SCORE ≤60	19	22.9%	14	17.5%	7	18.9%	8	25.0%
60 < SCORE ≤70	11	13.3%	14	17.5%	7	18.9%	7	21.9%
70 < SCORE ≤80	8	9.6%	4	5.0%	2	5.4%	2	6.3%
80 < SCORE ≤90	0	0.0%	2	2.5%	1	2.7%	0	0.0%
SCORE >90	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
50 < SCORE 小計	38	45.8%	34	42.5%	17	45.9%	17	53.1%
合計	83	100.0%	80	100.0%	37	100.0%	32	100.0%
SCORE AVERAGE	44.27		44.17		48.00		50.28	
SCORE MIN	0.00		-71.91		21.95		15.96	
SCORE MAX	79.10		80.34		84.57		77.97	

平成 22～23 年度に 2 回の精度管理を実施した。参加者中スコア 50 を超えたのは 42.5～53.1%とアモサイトの精度管理と比較して低い結果となった。誤差の要因の大半は、繊維長さの判定ミス(5μm以上の繊維を 5μm未満と判定しているケース)、繊維の見落とし等であり、負の誤差が大きい結果となった。

各年度の分析者別の報告値の合意基準からのずれを図 3-12～3-15 に示す。

なお、平成 23 年度実施の第 2 回目は参加者 37 名中、有効回答は 36 名であったが、有効回答者 36 名中 4 名はスコアが「≤0」で母集団から離れておりこれらの誤差の主要な要因は「合意基準では繊維がない位置に繊維を書き込む誤判定」であり、これらの 4 つのデータについてスミルノフ・グラブスの棄却検定によって有意水準 5%で検定したところ棄却できることが確認できたのでこれらを除く 32 名のデータ最終的な有効回答とした。

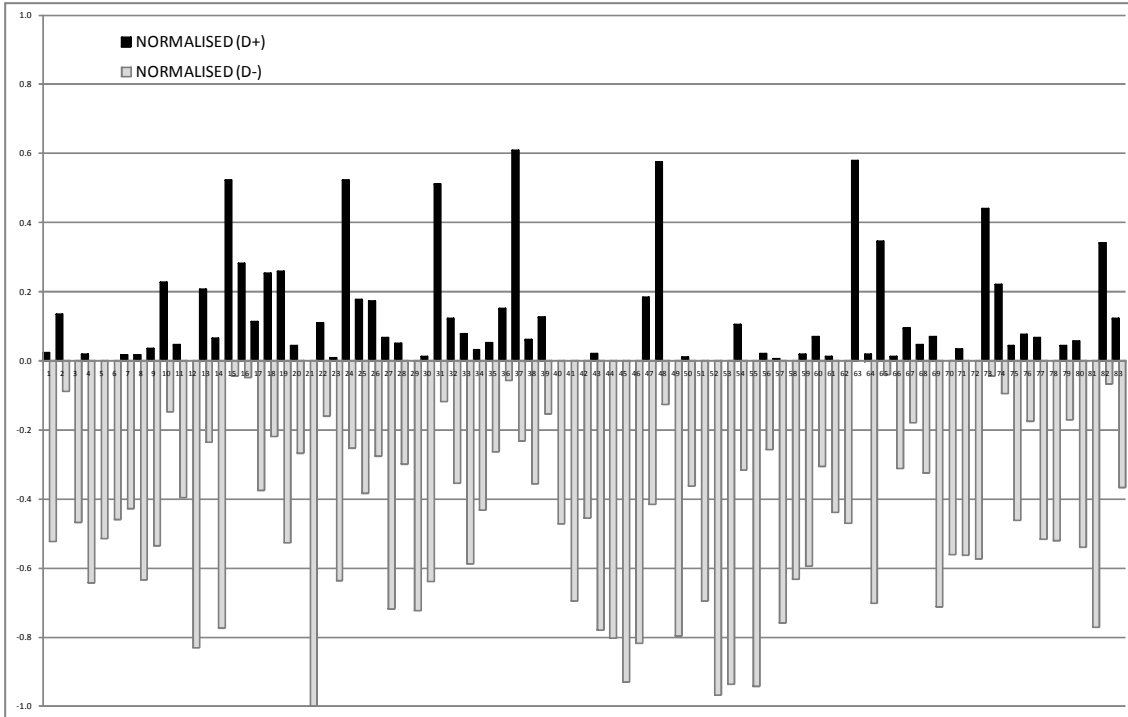


図 3-12 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 22 年度 クリソタイトル第 1 回目)

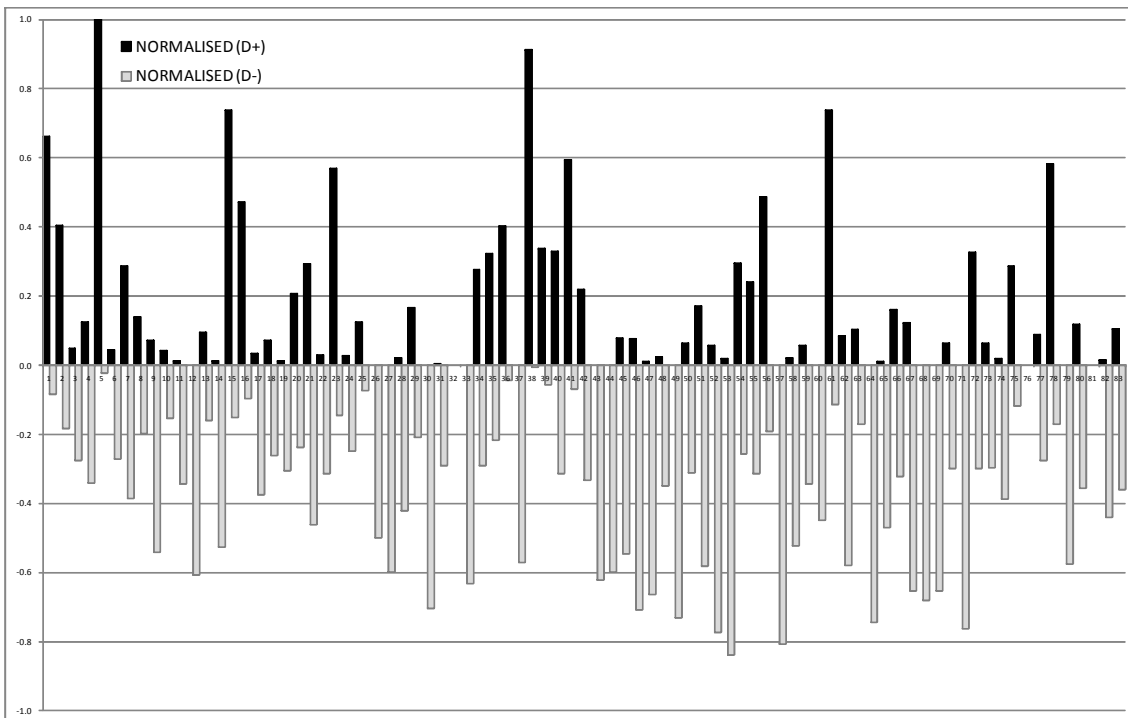


図 3-13 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 22 年度 クリソタイトル第 2 回目)

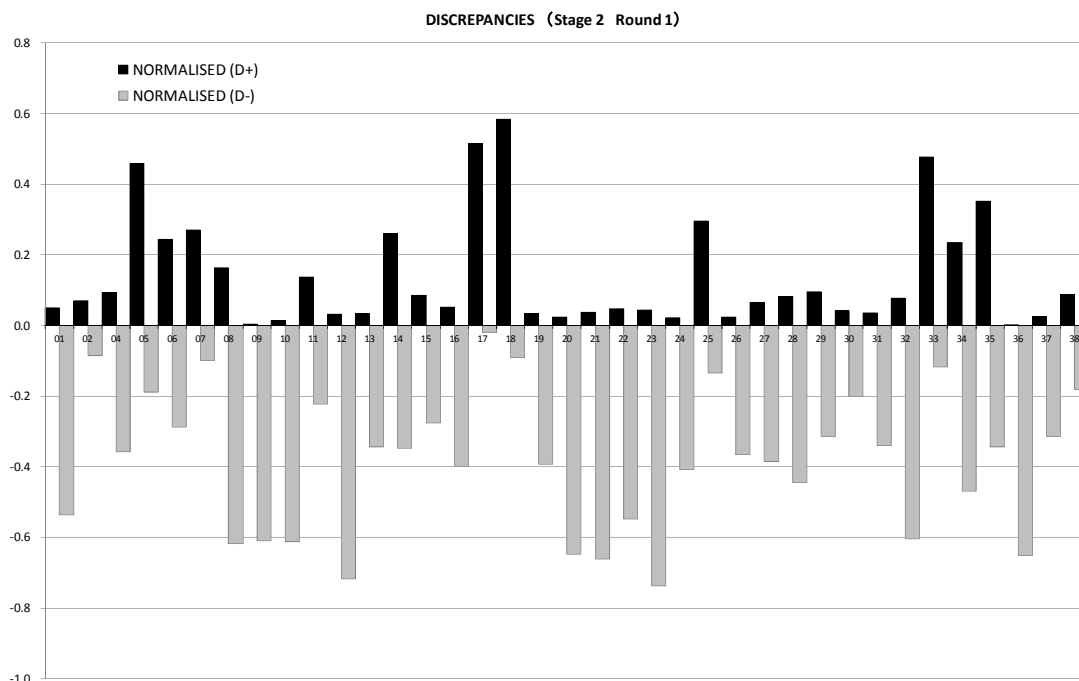


図 3-14 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 23 年度 クリソタイル第 1 回目)

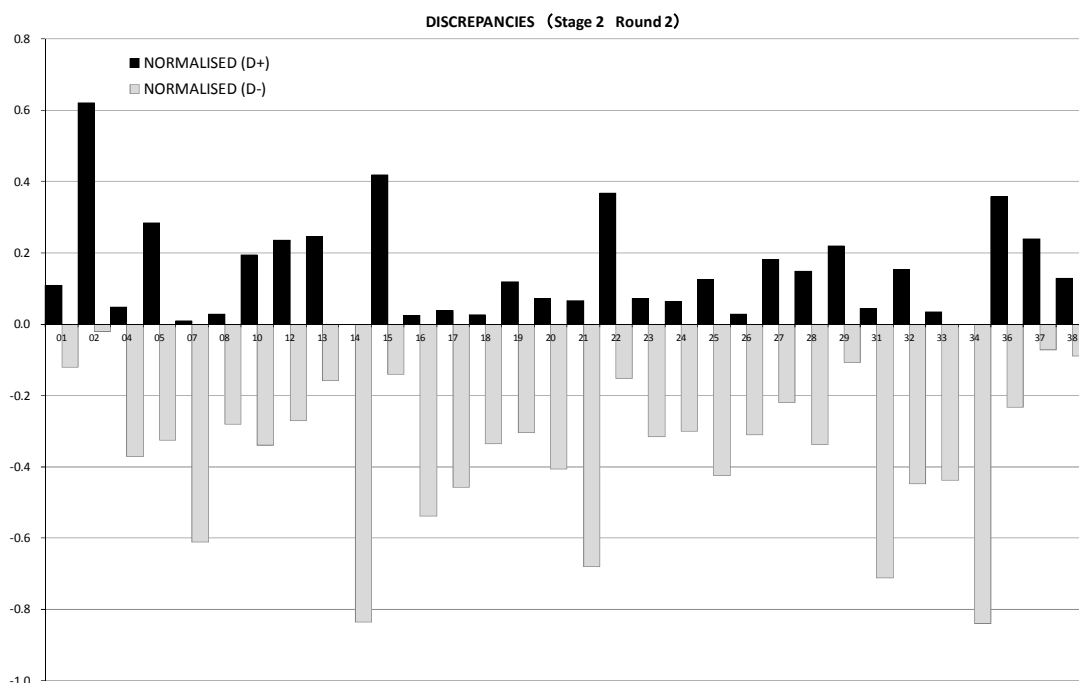


図 3-15 分析者別の報告値の合意基準からのずれ(平成 23 年度 クリソタイル第 2 回目)

#### D. 結論

アモサイトの精度管理プログラムでは 80%以上の参加者が熟練者としての認定されており、実際の試料の計数に際してもほぼ良好な観察データが得られているものと推測できる。

それに対して、クリソタイルの精度管理プログラムにおいては、全体的に負の誤差が大きく、熟練者

は 42.5～53.1%、スコアの平均も 44.17～50.28 とアモサイトと比較して低い値であった。全体的に繊維の見落としや長さを短めに判定するなど合意基準と比較して繊維を少なめに計数するケースが多く、クリソタイルの計数がアモサイト等の角閃石アスベストと比較して、分析者による計数にばらつきが大きいことが改めて確認される結果となった。

クリソタイルの計数で一部の分析者にみられた「合意基準では繊維がない位置に繊維を書き込む誤判定」については、Cherrie らは同様の計数ミスが繊維密度の低いスライドで起こることを報告している<sup>3)</sup>。その原因として Cherrie らは背景のフィルターの「しわ」等を分析者が繊維と見誤ることを挙げている。低密度スライドでの繊維数の過大評価については他にも報告例があり、Beckett はその原因として低密度スライドの場合、より一層一生懸命に繊維を探そうとする心理が分析者にはたらくのではないかとしている<sup>4)</sup>。

クリソタイルの精度管理プログラムにおいては使用するスライドの適切な繊維密度やその為のスライド調製の工夫が必要となることが示唆された。課題を整理し改善しながら、精度管理プログラムを継続していくことが必要である。

しかしながら、アモサイトの計数においては、精度管理プログラムを通して、分析者が自分の分析技術の課題やばらつきの要因を理解し改善することで、位相差顕微鏡による観察・計数で指摘されている分析値のばらつき等の課題が改善されることが期待できる結果であり、本研究で実施した精度管理プログラムについては一定の効果が期待できる結果であった。

位相差顕微鏡によるアスベスト繊維の計数技術の向上において、本研究で実施したプログラムは有効であると考えられる。光学顕微鏡を用いたアスベスト分析には依然として課題も多く、また、クリソタイルの精度管理については今後の検討も必要ではあるが、分析者の計数技術を維持していくためには、継続してこのようなプログラムに参加し、技術レベルを維持、向上させていくことが重要であると考えられる。

## 謝辞

本研究に関してアスベスト繊維計数技能向上プログラムを通じて社団法人日本環境測定分析協会に多大なご協力を賜りました。深謝します。

## E. 文献

- 1) T.W.S.Pang,M.Harper: The quality of fiber counts using improved slides with relocatable fields,J.Environ.Monitoring,1089-95(2008)
- 2) T.L.Orden,D.J.M.Thomson and P.A. Ellwood: Euparal and its Use in Measurement of Asbestos,MICROSCOPE(1986)
- 3) Cherrie,J.,Jones,A.D.,Johnston,A.M.:The Influence of Fiber Density on the Assessment of Fiber Concentration Using the Membrane Filter Method,Am.Ind. Hyg.Assoc.J.,Vol,No.8,p465-474,1986
- 4) Beckett,S.T.:The Effect of Sampling Practice on the Measured Concentration of Airborne Asbestos,Ann.Occup.Hyg.,Vol.23,p259-272,1982

## F. 研究発表

- (1) 豊口敏之、山本貴士、貴田晶子：位相差顕微鏡によるアスベスト分析の精度管理、平成 21 年度廃棄物資源循環学会研究討論会（川崎市、2009.5）
- (2) 豊口敏之、小坂浩、山本貴士、貴田晶子、(社)日本環境測定分析協会：位相差顕微鏡による石綿分

析の精度管理手法の構築と実施結果、第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (金沢市、2010.11)

## 4. 建築物解体時の石綿含有廃棄物の発生・石綿飛散に関する研究

分担研究者 京都大学 酒井伸一、平井康宏、水嶋周一、川端信裕

### A. 研究目的

石綿は、耐熱性や耐摩擦性、扱いやすさなどの優れた性質を持ち、主に建築物の天井、梁など耐火性が求められる箇所に使用された[1]。日本では1970年代前半が使用量のピークであり、その後石綿の使用は段階的に規制された[2]。依然として石綿が使用された建物は存在しており、建築物の石綿使用の有無の把握、特に吹付け石綿の存在を認識することは、無防備な曝露を防止するという観点から非常に重要である。また、当該建築物の解体において適切な曝露防止対策をとるためには、あらかじめ不動産の担保評価時に石綿の除去費用を考慮しておくこと[3]が有効である。担保物件の評価においては、個別に立ち入り調査して吹付け石綿の有無やその除去費用を把握することは膨大な費用と時間がかかり困難である。このため、建築年や延べ床面積などの限られた情報から、石綿の除去費用を簡易に推定するモデルの開発が望まれる。

国内への石綿輸入積算量は1945年から2006年の間におよそ1,000万トンあり、これまでも使用済みとなり廃棄物として排出されてきたが、今後はその量や種類が増えてくる可能性がある[4]。そこで、石綿を使用した建築物が現在どのくらいありそれらがどのようなペースでどのくらい排出されるのかを知ることが非常に重要となる。しかしながら、石綿含有建材のこれまでの出荷量に関する統計情報は充実しているとは言い難く、その種類や出荷年を網羅するという点において新たな研究が必要とされている。

また、石綿含有建材をどのように処理するかによって作業員や近隣住民が被るリスクの大きさも変わってくると考えられ、対策によるリスクの違いを定量的に把握することも重要である。吹付け石綿に対しては多くの対策事例や飛散実態に関する知見があるが、飛散性が低いとされるアスベスト成形板については今後の研究・調査の蓄積が期待されているところである。

以上の背景を踏まえ、石綿廃棄物のリスク制御に資するため、1)飛散性石綿の除去費用簡易推計モデルの開発、2)石綿含有成形板の廃棄量推定、3)解体工事現場および廃棄物埋立地での石綿濃度測定、4)破碎実験による解体時石綿飛散係数の推定に取り組んだ。

### B. 研究方法

#### B-1 飛散性石綿の除去費用簡易推計モデルの開発

##### B-1-1 研究方法

除去費用を求めるに当たっては、3つのプロセスを経ることとした。まず、当該建物について吹付けアスベストが使用されているか否か(出現率)を推定し、使用されている場合、どのくらいの面積で使用されているのか(使用面積)を求め、そしてその面積に基づいて除去費用(除去費用推定式)を求めるという流れである。調査の実施にあたっては保険分野を専門とする民間コンサルティング会社の協力を得、同社が所有する建物または同社が収集した建物についてのデータを用いて推定を行った。

##### (1) 出現率

建築物にアスベストが含まれるか否かを表す「出現率」は、使用率 $\times$ (1-除去率) $\times$ 地域係数によって推定した。使用率は、当該建築物の建築時の使用有無を表す。建築物によっては、吹付けアスベストの除去工事がすでに行われていることもあるため、除去率を考慮した。また、アスベストの使用状況は地域によって異なることが分かっているため、地域係数で補正することとした。



使用率は、建物の年代別にアスベスト使用の有無を調査し、(使用あり建物数/当該年建築の建物数)として算出した。そして、年別使用率が吹付けアスベストの出荷量推移 [5] に沿う形で推移するものと仮定し、建築年をパラメータとした当該年の使用率を求めるための係数を最尤法により推定した。なお、吹付けアスベスト出荷量は 1975 年以降はデータが存在しないため、これ以降は指数関数的に減少すると仮定した。

- 1955 年から 1974 年までの使用確率  
アスベスト施工量推移<sup>1)</sup>に比例すると仮定

$$p = a \times \text{出荷量比率}(\text{year}) \quad (1)$$

- 1975 年以降の使用確率  
指数関数的に減少すると仮定

$$p = a \times \text{出荷量比}(1974) \times \exp\{b(\text{year} - 1974)\} \quad (2)$$

なお、式中の p は使用率((1-p)は不使用率)の尤度である。そして、尤度の対数を取ったものに、各年における吹付けアスベスト使用の有、無の観測数を乗じることで対数尤度関数が得られる。この対数尤度関数の各年についての和が最大となるような係数 a、b を求めた(表 4-1)。

表 4-1 使用確率推定式の係数推定結果

	係数 a	係数 b
含有率 1%以上	0.30	-0.13
含有率 5%以上	0.15	-0.52

除去率は、国土交通省の「民間建築物における吹付けアスベストに関する調査結果について [6]」に基づいて設定した。同資料によると、1956 年～1989 年までに施工された民間の建築物のうち大規模(概ね 1,000 m<sup>2</sup>以上)な建築物で、「露出して吹付けアスベスト等の使用が確認されたもの」は、2009 年 9 月時点で 16,212 件であり、そのうち「未対応の建築物」の数は 6,081 件と報告されている。これより、「非除去率(= 1 - 除去率)」は 6,081/16,212 = 37.5%とした。

地域係数は、全国の都道府県を 8 区分し、資料 5)に示された各都道府県の「調査報告建築物数」と「未対応建築物数」から区分内で合計し、各区分における未対応率を求めた。また、全国(都道府県合計)での未対応率も同時に求め、前者を後者で割ることで、地域係数を求めた(表 4-2)。

表 4-2 全国を 8 区分した場合の地域係数

区分	調査報告 建築物数	未対応 建築物数	A	地域係数
			未対応/ 調査報告	地方区分(A)/ 全国区分(A)
北海道・東北	23,710	851	3.6%	1.36
関東	62,764	1,262	2.0%	0.76
北陸	11,096	472	4.3%	1.61
中部	35,853	912	2.5%	0.96
近畿	42,192	1,517	3.6%	1.36

中国・四国	26,178	535	2.0%	0.77
九州	26,903	530	2.0%	0.74
沖縄	1,263	2	0.2%	0.06
全国計	229,959	6,081	2.6%	1.00

## (2) 使用面積

未除去の吹付けアスベストを含む建築物について、建物構造別に、延べ床面積あたりのアスベスト吹付面積(使用面積割合)を求めた。建物構造は、建築物の情報として入手が容易であり、かつ、S造においては鉄骨への吹付けが多い等の特徴があるため、吹付け面積を推定する上で有用であると考えたためである。

過去にアスベストの使用有無の調査が行われた建築物の情報をもとに推定を実施した。アスベストの使用が確認された76件の建物(最大延べ床面積:101,519 m<sup>2</sup>、最小延べ床面積:143 m<sup>2</sup>)のうち、10,000 m<sup>2</sup>以下の65件について、延べ床面積と使用面積割合(使用面積/延べ床面積)の関係をプロットしたところ、2,500 m<sup>2</sup>付近で急激に割合が低下していることが観察された。そのため、2,500 m<sup>2</sup>を境界値として、その前後で使用面積比率を区別することとした。

構造と延べ床面積とを組み合わせた3区分において、使用面積割合  $r_s$  の分布は、表 4-3、図 4-1 の通りであった。

表 4-3 修正された区分の組み合わせ

	S造・ 2500 m <sup>2</sup> 未満	RC+SRC造・ 2500 m <sup>2</sup> 未満	S造+RC+SRC造・ 2500 m <sup>2</sup> 以上
データ数	20	33	23
平均値	0.857	0.307	0.204

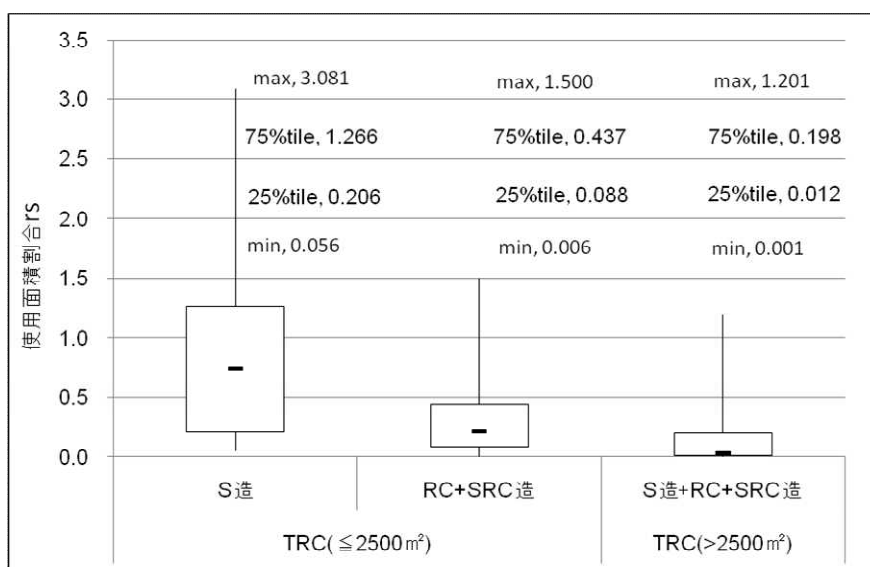


図 4-1 修正された区分における  $r_s$  分布

## (3) 除去費用推定式

吹付けアスベストの除去費用は、除去面積の関数として推定した。吹付けアスベストの除去費用単価

と除去面積のそれぞれの対数値をプロットすると、図 4-2 のようになり、ほぼ直線に近い形で分布していることがわかる。ただし、実際にはこれらは完全な線形ではなく、 $\log(\text{除去面積})=3.0$ (除去面積=1000 m<sup>2</sup>) 付近までは線形関係が見られるものの、それ以上ではその傾きが緩やかになっていることが見て取れる。そのため、 $\log(\text{除去面積})=3.0$  を境に近似式を 2 種類設定することとし、 $\log(\text{除去面積})=3.0$  以上では費用単価は一定とした。

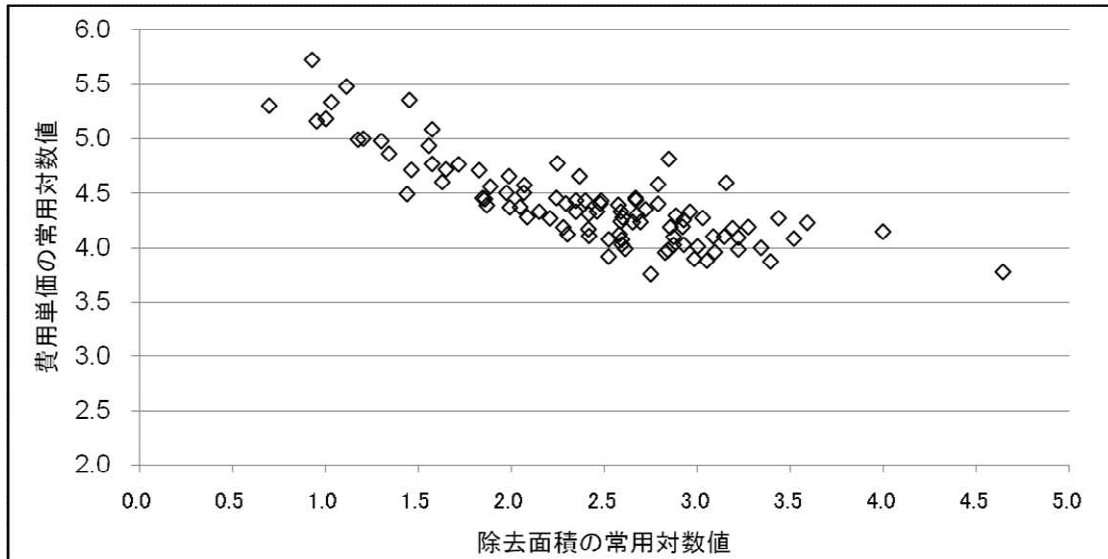


図 4-2 除去面積と除去費用単価の対数値分布

## B-2 石綿含有成形板の廃棄量推定

### B-2-1 研究方法

橋本らの研究 [7]を参考に、1961 年から 2004 年築の建物に使用されたアスベスト成形板(外装材：4 種類、内外装材：5 種類)から排出される石綿量を式(3)を用いて推定した。以降では、式(3)の解体建築物量  $D_{(i,l)}(t)$  の予測、石綿使用量原単位  $G_{(i,k)}$  の設定について述べる。

$$W_k(t) = \sum_l \sum_i D_{(i,l)}(t) \times G_{(i,k)} \quad (3)$$

$2011 \leq t \leq 2060$

$W_k(t)$  : t 年に排出されるアスベスト含有建材 k 由来の石綿量(トン)

$D_{(i,l)}(t)$  : t 年に解体される i 年築 l 造の建築物量(m<sup>2</sup>)

$G_{(i,k)}$  : i 年築の建築物面積あたりの建材 k 由来の石綿使用量原単位(トン/m<sup>2</sup>)

#### (1) 解体建築物量

まず、2010 年末時点における残存建築物量(1961 年～2004 年築)を、各年の着工建築物量 [8]と構造・用途別の残存率関数から推定した。構造は木造、RC(鉄筋コンクリート)造、SRC(鉄骨鉄筋コンクリート造)、S 造(鉄骨造)の 4 種類を、用途は建築統計年報の区分と同じ、居住専用、居住産業併用、事務所、店舗、工場・作業場、倉庫、学校校舎、病院・診療所、その他の 9 種類とした。

残存率関数は対数正規分布(式(4))とワイブル分布(式(5))の 2 種類を用いた。残存率関数のパラメータは小松らの研究のパラメトリック分析結果 [9]を用い、以下のように設定した(表 4-4)。木造は専用住宅

の残存率関数を全用途に代用、RC造とS造は専用住宅と事務所の2つが求められているため、居住専用と居住産業併用は専用住宅の残存率関数を、それ以外の事務所以下の用途については事務所のそれを用いた。そして、SRC造はすべて同構造の事務所用途のものを用いた。

$$f(t-i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} (t-i)\sigma} \exp\left[-\frac{\{\log(t-i) - \mu\}^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

対数正規分布  
t-i: 経過年数、 $\mu$ : 経過年数の対数値の平均値、 $\sigma^2$ : 経過年数の対数値の分散

$$f(t-i) = \frac{m}{\eta} \left\{ \frac{(t-i) - \delta}{\eta} \right\}^{m-1} \exp\left[-\left\{ \frac{(t-i) - \delta}{\eta} \right\}^m\right] \quad (5)$$

ワイブル分布  
t-i: 経過年数、m: 形状パラメータ、  
 $\eta$ : 尺度パラメータ、 $\delta$ : 位置パラメータ

表 4-4 本研究で用いる残存率関数

構造	用途	基準年	本研究で用いる残存率関数
木造	全	1987	対数正規: $\mu=3.655$ $\sigma=0.63$
RC造	居住専用、居住産業併用	1987	ワイブル: $m=3.091$ $\eta=61.19$ $\delta=-3.74$
	事務所、店舗、工場・作業場、倉庫、学校校舎、病院・診療所、その他	1987	対数正規: $\mu=3.549$ $\sigma=0.39$
SRC造	全	1990	ワイブル: $m=14.06$ $\eta=154.9$ $\delta=-112.4$
S造	居住専用、居住産業併用	1987	ワイブル: $m=6.747$ $\eta=64.37$ $\delta=-28.44$
S造	事務所、店舗、工場・作業場、倉庫、学校校舎、病院・診療所、その他	1987	ワイブル: $m=3.127$ $\eta=40.44$ $\delta=-7.329$

以上の設定をもとに、残存建築物量の2011年から2060年にかけての解体量(解体建築物量) $D_{(i,l)}(t)$ を(6)から推定した。

$$D_{(i,l)}(t) = \sum_m f_{(l,m)}(t-i) \times C_{(i,l,m)} \quad (6)$$

$f_{(l,m)}(t-i)$ : l造・用途mの解体率の確率密度関数

## (2) 石綿排出量原単位

原単位は、単位面積( $m^2$ )あたりから排出される石綿量(トン)とし、次式によりアスベスト含有製品ごとに設定した。

$$G_{(i,k)} = \frac{H_{(i,k)} \times Cr_{(i,k)}}{F_{(i,k)}}$$

$G_{(i,k)}$ : i年に出荷された建材kの建築面積あたり石綿使用量原単位(トン/ $m^2$ ) (7)

$H_{(i,k)}$ : i年の建材kの出荷量(トン)

$Cr_{(i,k)}$ : i年に出荷された建材kの石綿含有率(%)

$F_{(i,k)}$ : 建材kが使用されたi年築の建物の着工建築物数( $m^2$ )

本研究の対象とするアスベスト含有建材について、(社)日本石綿協会 環境安全衛生委員会の報告書 [4]で 1971 年以降の出荷量が概ね網羅されているスレート波板、スレートボード、ケイ酸カルシウム板第一種、窯業サイディング、住宅屋根用化粧スレート、石綿含有ロックウール吸音天井板、石綿含有押出成形セメント板、パルプセメント板、スラグ石膏板の 9 種類とした。なお、1970 年以前の出荷量について、スレート波板とスレートボードについては窯業建材統計年報 [10]の値で補完し、それ以外の建材は 1971 年のスレート波板とスレートボードの統計値の和と当該建材の出荷量との比を、スレート波板とスレートボードの統計値の和(1961 年～1970 年)に乗じて求めた。出荷量から質量 (kg)への換算、さらに石綿使用量の算出には文献 [4]の換算係数と石綿含有率(年別)を用いた。

また、9 種類の建材がどの用途に使用されているのかについて、建築物の解体等における石綿飛散防止検討会の報告書 [11]中に示された、建物用途別にアスベスト含有建材と施工部位との関係から、表 4-5 のように設定した。

表 4-5 アスベスト含有建材と用途の関係

建材種類	石綿含有率(%)	質量換算	用途
スレート波板	5～20	15kg/枚	工場・作業場、倉庫・・・2用途
スレート板	10～20	12kg/枚	全・・・9用途
ケイ酸カルシウム板第1種	5～25	5.5kg/m <sup>2</sup>	全・・・9用途
窯業サイディング	5～15	13kg/m <sup>2</sup>	居住専用、居住産業併用、事務所、店舗、工場・作業場、倉庫、その他・・・7用途
住宅屋根用化粧スレート	5～20	18kg/m <sup>2</sup>	居住専用、居住産業併用・・・2用途
ロックウール吸音天井板	4	4.8kg/m <sup>2</sup>	事務所、店舗、学校、病院・診療所、その他・・・5用途
押出成形セメント板	5～25	55kg/m <sup>2</sup>	居住専用、居住産業併用、工場・作業場、その他・・・4用途
パルプセメント板	5	6kg/m <sup>2</sup>	居住専用、居住産業併用、事務所、店舗、学校、病院・診療所、その他・・・7用途
スラグ石膏板	5	6kg/m <sup>2</sup>	全・・・9用途

### B-3 解体工事現場および廃棄物埋立地での石綿濃度測定

#### B-3-1 研究方法

解体工事現場での石綿濃度測定は、北九州市の事業所、京都大学法経済学部北館および工学部 8 号館での建材撤去作業にあわせ実施した。建材除去作業の前・中・後における、除去作業個人曝露、養生区画出口、工事建物周辺等での石綿濃度を測定した。埋立地での石綿濃度測定は、石綿含有廃棄物の埋立作業中に、処分場内の 2 地点および処分場外の 1 地点において実施した。

#### (1) 民間建築物(事業者 A)

測定で対象とした建材はケイ酸カルシウム板第 1 種であり、2 階の面会室と西執務室という部屋、その他で使用されていた。ただし、石綿含有率は分析の結果、面会室の方がクリソタイル 2.0%、アモサイト 0.1%含有に対し、西執務室の方はクリタイル 1.5%、アモサイト 2.0%含有と互いに若干異なっていた。

本調査では作業環境測定のア測定および B 測定、そして個人曝露測定を実施した。A 測定点は、面会室内の 5 点を設定した。また、B 測定点は、発散源とともに労働者が移動しながら行う作業や有害物質を発散するおそれのある装置、設備等の近くで行う作業で実施することが必要な測定方法であるため、気中濃度が最大となると考えられる作業位置および時間に行った。さらに、作業員への直接的な影響を見るため、個人曝露測定を行った。

(2) 京都大学法経済学部北館

書面調査により、石綿含有のおそれのある建材を抽出し、表 4-6 に示した 6 種類の建材試料を採取して、石綿含有に関する定性・定量分析を委託した。分析方法は、「石綿に係る特定粉じんの濃度の測定方法」(平成元年 12 月 27 日、環境庁告示第 93 号)に定める方法 [12]に準拠した。調査は 2010 年度に実施した。

定性・定量分析によってアスベスト含有と判断された 3 種類の建材が使用された部屋のうち、作業室内環境測定の対象とする部屋を表 4-7 のように決定した。なお、ビニルアスベストタイルは分析上石綿含有無であったが、このような塩ビ系タイルには表面および接着剤にのみアスベストが極少量使われており、分析対象とする試料の採取箇所によって今回は含有無となった可能性があること、そして名称に「アスベスト」とあることから、これを使用した部屋も測定対象とした。

また、個人曝露測定として、作業員にアスベストサンプラーを装着して作業をしてもらい、作業員の曝露濃度を測定した。

表 4-6 法経済学部北館における建材中アスベストの定性・定量分析結果

No.	建材名	定性分析結果				石綿含有判定		定量分析結果
		X線回折分析法		分散染色法		石綿有無	石綿種類	石綿含有率 (%)
		石綿有無	石綿種類	石綿有無	石綿種類			
1	ソリッドビニルタイル	無	—	無	—	無	—	—
2	ビニルアスベストタイル	無	—	無	—	無	—	—
3	吸音テックス	無	—	無	—	無	—	—
4	有孔フレキシブルボード	有	Chr	有	Chr	有	Chr	4.4
5	有孔軽量アスベストボード	有	Chr	有	Chr	有	Chr	0.59
		有	Amo	有	Amo	有	Amo	19
6	フレキシブルボード	有	Chr	有	Chr	有	Chr	4.4

※Chr:クリソタイル、Amo:アモサイト

表 4-7 法経済学部北館における測定対象の部屋と使用建材

部屋名	面積(m <sup>2</sup> )	使用建材・箇所
地下 1 階ボイラー員控室	28	有孔フレキシブルボード 壁 有孔軽量アスベストボード 天井
1 階男子トイレ	12	フレキシブルボード 天井
2 階国際法政文献資料センター	28	ビニルアスベストタイル 床

(3) 京都大学工学部 8 号館

京都大学法経済学部北館での調査と同様の手順により、調査を実施した。建材分析の結果(表 4-8)をふまえて、地下 1 階厨房および 1 階男子トイレを測定対象とした(表 4-9)。また、該当作業場所と 2 階廊下、さらに敷地境界に代わる一般環境として建物周辺を選んだ。建物周辺は、工事関係者のみが立ち入るフェンス内のエリアのうち、一般人が通行するエリアに最も近い地点とした。調査は 2011 年度に実施した。分析には、JIS K-3850「空気中の繊維状粒子測定方法」に準じて位相差顕微鏡を用いた。なおこの方法では石綿以外の繊維状鉱物なども石綿として計数してしまうことが起こり得る。そのため計数した試料のうちいくつかを SEM-EDS によって分析し、観察された繊維のうち石綿がどれだけ含まれるかを判定した。

表 4-8 工学部 8 号館における建材中アスベストの定性・定量分析結果

採取場所		建材の種類	石綿の有無 石綿の種類	平均含有率(wt%)	
				クリソタイル	アモサイト
地下1階 厨房*1	天井	けい酸カルシウム 板	クリソタイル アモサイト	3.6	7.3
地下1階 厨房*2	天井	けい酸カルシウム 板	クリソタイル アモサイト	0.5	16.6
地下1階 職員組合1	天井	吸音ボード	石綿含有せず	—	—
1階 男子トイレ	天井	石綿ボード	アモサイト	—	20.0
2階 203 研究室	床	ビニル床タイル	石綿含有せず	—	—
3階 小講義室3*3	天井	せっこうボード 吹付け材	石綿含有せず 石綿含有せず	— —	— —

\*1\*2 建材撤去作業時の気中濃度測定を行った場所では\*2の建材を使用していた

\*3 せっこうボードに吹付けがされていたため、両方を測定の対象とした

表 4-9 工学部 8 号館における測定スケジュール

2011年9月4日 (作業前)	2011年9月5日	2011年9月6日	2011年9月7日 (作業後)
1階男子トイレ  地下1階厨房	男子トイレ出入口 (養生区域外)	厨房出入口 (養生区域外)	1階男子トイレ  地下1階厨房
2階廊下	2階廊下	2階廊下	2階廊下
	個人曝露(撤去)	個人曝露(撤去) 個人曝露(清掃)	
建物周辺	建物周辺	建物周辺	建物周辺

#### (4) 廃棄物埋立処分時の石綿濃度調査

2010年度の調査において、最終処分場 B(以下、処分場 B)で石綿含有廃棄物の埋立地における作業場所付近の気中濃度を測定した。処分場 B で処分できる産業廃棄物は燃え殻、がれき類、汚泥、そして廃石綿等の特別管理産業廃棄物等である。そして、浸出水による公共用水域および地下水の汚染防止のための処理設備が備わった管理型最終処分場である。埋立地は石綿含有廃棄物とそれ以外の産業廃棄物は分けられていた。

石綿含有廃棄物の埋め立て方法は、細長く直方体形に掘られた穴の中に端から順に廃棄物を投入し、基準の高さまで達すると覆土するというものであった。なお、穴を一度に埋めてしまうのではなく、複数のエリアに区切り一エリア内で投入+覆土を行い、そこでの埋め立てが完了すると、次のエリアに進むという具合に埋め立てが進む。そして、運び込まれるものはアスベスト専用黄色袋に入れられ、二重梱包されていることを目視で確認した。

測定項目は、作業場所付近の気中濃度測定と敷地境界測定の種類である。作業場所付近での気中濃度測定は埋立地近傍 2 か所での測定を 2 時間×2 回、敷地境界測定は処分場に隣接する搬入管理施設付近での測定を 4 時間×1 回とした。図 4-3 に作業中測定地点を示す。地点①は風下であり、廃石綿等の

埋立地で発生した粉じんがここを通過することによる影響を見た。地点②は廃石綿等の埋立地の真横であり、より直接的な影響を見た。

また、測定日に埋立地に搬入された石綿含有廃棄物は表 4-10 のようであった。飛散性石綿の搬入数が最も多く、その体積も全体の約 4 割と高かった。

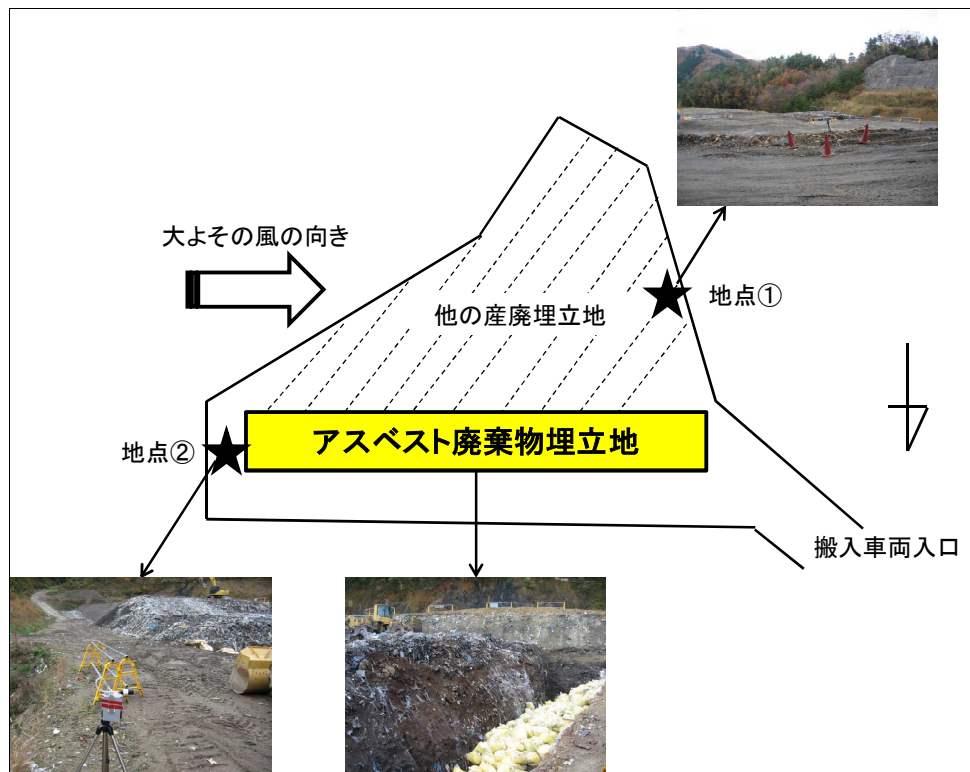


図 4-3 最終処分場におけるサンプリング地点配置図

表 4-10 最終処分場での測定日における受け入れ石綿含有廃棄物の状況

		搬入者数	受入体積(m <sup>3</sup> )
石綿製品・建材等を含む廃棄物	ガラス	12	183.5
	がれき	2	7.6
	廃プラ	4	17.3
飛散性石綿		19	138.2
合計		37	346.6

#### B-4 破碎実験による解体時石綿飛散係数の推定

成形板の解体におけるリスクを適正に評価するためには、建材破碎による石綿飛散の程度を定量的に把握し、排出係数を把握することが重要である。また、リスク制御に向けては、破碎に関する種々の要因(湿潤有無、破碎エネルギー、破断面積など)が石綿飛散に及ぼす影響を定量的に把握することが必要である。そこで、藤川ら [13]の方法を参考に、建材の破碎実験を行った。

##### B-4-1 研究方法

実験の内容は、試験材の上から錘を落下させて試験材を破碎し、破片から飛散した粉じんおよび石綿繊維をカウントするというものであり、錘の重量や落下高さによって破碎方法を変えた。



## (1) 実験装置

2010 年度の実験に用いた装置は藤川らの研究で用いたものを拝借し、養生したプレハブ小屋内で実施した。装置はシャフト部分とチャンバー部分からなる。シャフト部分(内径 52.7 mm)の全長は 120 cm、チャンバー部分(内径 60 mm)は 13.6 cm である。また、チャンバーには台座(30 cm×30 cm)が接続されている。サイクロンを経て 2 台のデジタル粉じん計 LD-3K2 および 1 台のアスベストサンプラーと接続した。接続状況を図 4-4 に示す。シャフト部分とチャンバー部分に 3 つの孔(上、中、下)があり、上孔から 4.5 L/min、下孔から 2.5 L/min を送気し、中孔からサイクロンを経て測定系に 7.0

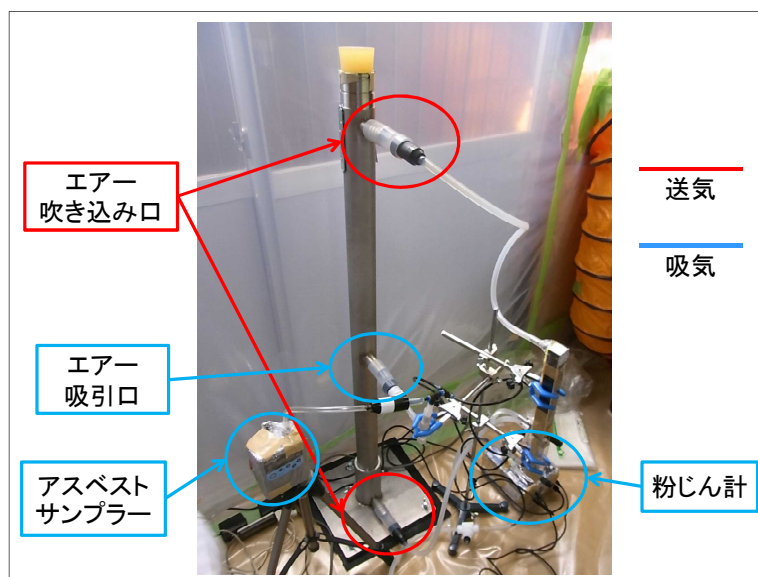


図 4-4 破碎実験装置の接続状況(2010 年度実施分)

L/min を吸引した。測定系が吸引する空気は 2 台の粉じん計にそれぞれ 2.0 L/min ずつ、アスベストサンプラーに 3.0 L/min とした。

2011 年度は、内径 200 mm の透明アクリル製円筒またはステンレス製円筒を破碎装置とし、グローブバッグ内で実施した。アクリル製円筒は、内径 20 cm、外径 21 cm、高さ 104 cm のアクリル製のものを使用した。アクリルは外側から破碎の様子を観察でき、その軽さから取り扱いが容易である。ただし静電気を帯びやすいため、各実験前には除電機(キーエンス製 SJ-F035)と帯電防止剤を用いて除電をした。また実験中は筒上端にアクリル製の蓋をした。蓋には錘を吊る紐を通すための穴が 2 つ開いており、錘の落下時以外はシール材で穴を塞いだ。筒には 2 か所の送気口と 1 か所の排気口を用意した。下部の送気口は下端から 5 cm の箇所であり、上部排気口は下端から 90 cm にある。下部から 2 L/min、上部から 4 L/min の流量で、孔径  $0.20\ \mu\text{m}$  の送気側フィルターを通した空気を送気ポンプによって送気した。排気口は下端から 50 cm の高さであり、排気側配管に接続した。送気口と排気口には金属製ボール弁を接続し、吸引中のみ弁を開くようにした。排気側の配管は、サイクロン(Dekati 製 SAC-65、 $20^\circ\text{C}$ 、湿度 50%、流量 6 L/min で粒径  $16.5\ \mu\text{m}$  の粒子を 50%除去)を経て 2 つに分岐させ、計測用フィルター(サンプル a)とデジタル粉じん計(柴田科学製 デジタル粉じん計 LD-3K2)に接続した。粉じん計の排気はフィルターを通し、これをサンプル b とした。出口には排気ポンプ(柴田科学製 ミニポンプ MP- $\Sigma$ 300)を配置し、各 3.00 L/min の流量で排気した。装置全体の概要図を図 4-5 に示した。

また、静電気が実験結果に及ぼす影響を検証すべく、ステンレス製円筒ならび配管に導電性チューブを用いた実験を行った。ステンレスの筒は長さ 70cm、下端から 5 cm に下部送気口、下端から 65 cm の場所に上部送気口があり、排気口は下端から 35 cm の高さにひとつである。破碎する建材は石綿非含有のケイ酸カルシウム板とした。

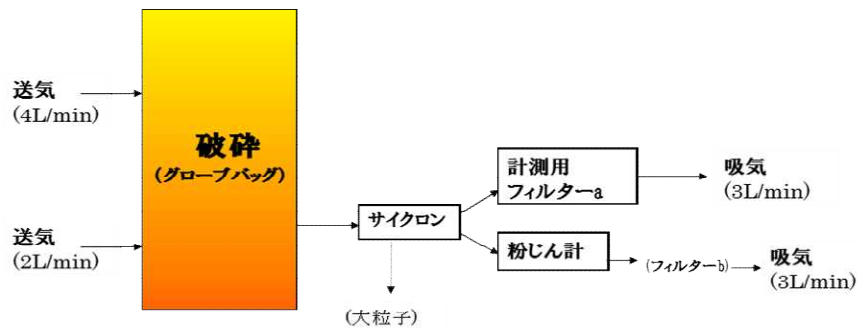


図 4-5 破砕実験の装置全体の概要図(2011 年度実施分)

## (2) 建材試料

実験に用いた建材は、京都大学法経済学部北館 1 階男子トイレに使用されていたフレキシブルボード (クリソタイル 4.4%含有)、京都大学 8 号館厨房で除去されたケイ酸カルシウム板第 1 種、市販のケイ酸カルシウム板第 1 種(石綿非含有)とした。

## (3) 実験手順

大まかな実験の流れは以下の通りである。

### 2010 年度

- 1) 試験装置を組み立て、流量の調整を行った
- 2) 筒内を清掃し、粉じんのバックグラウンド測定を行った
- 3) 試験材を筒の底に設置し、筒をセットした
- 4) 粉じんのバックグラウンドが落ち着いたと判断した時点で粉じん計をスタートさせ、錘を落下させた
- 5) 錘は落下後すぐに引き上げ、シャフトに蓋をした
- 6) アスベストサンプラーをスタートさせた
- 7) 錘落下から 7 分後、粉じん計とアスベストサンプラーを同時に停止させた
- 8) アスベストサンプラーの吸入量を記録した
- 9) PC と粉じん計を接続し、粉じんデータ(cpm)を読み取り保存した

### 2011 年度

- 1) 室内の粉じん濃度を測定した(5 分間)
- 2) グローブバッグの内側で台座に建材を設置し、その上に突起を置いた  
(グローブバッグは閉じずに作業した)
- 3) 除電した筒を設置して、筒を密閉した
- 4) 送気ポンプで筒に送気して排気側流量を確認  
(流量が 6L/min より明らかに低い場合、空気漏れの対処をした)
- 5) グローブバッグを密閉した
- 6) フィルター a,b の部分には流量調整用に用意したフィルターを接続しておき、排気・送気ポンプにより筒内の空気を清浄な空気では置換した
- 7) 粉じん計の積算値が変化しなくなったら粉じん計と送気・排気ポンプを停止して計測用のフィルターを取り付けた

- 8) 粉じん計、排気・送気ポンプを作動してから錘を落下し、建材を破碎した(錘の落下時のみ蓋の穴を塞ぐシールを外した)
- 9) 飛散した粉じんが捕集されて総粉じん数が増加しなくなったら、送気・排気ポンプと粉じん計を停止してサンプルを回収した
- 10) 割れた建材を袋に入れる。器具を拭いたのち、バッグ内に水を噴霧した。その後バッグを開き、改めて器具を洗浄した

計測用フィルターに捕集した石綿の計数は分析会社に依頼した。位相差顕微鏡を用いて計数し、一部は SEM-EDS によって石綿の判定をした。

#### (4) 実験条件

2010 年度の実験においては、建材の破碎方法は、工具破碎、重機破碎、手ばらしの 3 種類を設定した。各破碎方法を錘の落下に対応させるにあたり、工具破碎を基準として考えた。工具破碎に対応するエネルギーの大きさを把握するため、北九州市での民間建築物解体工事の際の作業員の動きを動画で撮影したものを解析した。その結果、0.8 kg のバールで壁の建材を破碎するときのエネルギーの大きさとそれを得るための 1 kg の錘の落下高さは表 4-11 のようになった。建材を確実に破碎するために、最もエネルギーの大きな場合の高さ 0.33m を工具破碎の場合の落下高さとした。そして、その他の重機破碎、手ばらしについては、工具破碎のエネルギーの 10 倍、10 分の 1 となるように錘の重量とその落下高さを設定した(表 4-12)。

また、チャンバーの底には円形の中空台座を設置し、その上に試験材を置いた。そして、錘の底にはボルトを取り付けて落下させた。これにより、錘が試験材に当たる際にボルトが試験材を貫通しやすくなり、実際の工事でのバールによる破碎の状況に近づけることができると考えた。

なお、実験スケジュールの都合上、石綿含有のフレキシブルボードについては 4 条件すべてで破碎できたが、ケイ酸カルシウム板第 1 種は乾燥状態での工具破碎のみを行った。

表 4-11 工具破碎のエネルギー算出結果

No.	時間	壁までの長さ (cm)	バール速度		エネルギーの大きさ J	同等のエネルギーを得るための高さ (m)
	(s)		(cm/s)	(m/s)		
1	0.08	20	250.0	2.50	2.50	0.25
2	0.11	20	181.8	1.82	1.32	0.13
3	0.07	20	285.7	2.86	3.27	0.33

表 4-12 破碎条件(2010 年度)

	工具破碎		重機破碎	手ばらし
	無	有	無	有
散水				
錘重量(kg)	1.05	1.05	3.05	3.05
落下高さ(m)	0.33	0.33	1.15	0.03
エネルギー(J)	3.4	3.4	34	0.31

2011 年度の実験においては、破断長および破碎エネルギーの影響を検討することを目的に、建材の幅および錘の落下距離を変化させた実験条件を設定した(表 4-13)。建材は 2 節の京都大学 8 号館厨房で除

去されたケイ酸カルシウム板第1種を用いた。なお、実験に使用した全試験片の見かけ比重の算術平均は  $0.889 \text{ g/cm}^3$  であった。破断長の再現性を良くするため、対辺支持した建材の上に突起を置き、この突起に錘を当て、建材の幅方向に一直線に建材が破断するようにした。突起は2つの山形鋼(アングル材)をビスでつなぎ合わせたもの(図4-6参照)で、合計質量は  $101.03 \text{ g}$  である。また、予備実験として石綿非含有のケイ酸カルシウム板を破砕し、確実に破砕できる条件を確認したうえで錘の落下距離を決定した。各条件について4回ずつ試験を行った。また実験中はエアコンと加湿器を用いて室内環境の管理を行い、室温約  $17^\circ\text{C}$ 、湿度約  $40\%$  でほぼ一定だった。

表 4-13 破砕条件(2011年度)

条件	建材大きさ	建材厚み	錘落下距離	錘質量
条件A	8 cm×15 cm	6 mm	30 cm	1.0 kg
条件B	4 cm×15 cm	6 mm	30 cm	1.0 kg
条件C	8 cm×15 cm	6 mm	60 cm	1.0 kg



図 4-6 建材と突起の設置状況

さらに、静電気の影響の検討のため、石綿非含有のケイ酸カルシウム板を用い、実験装置に除電したアクリル製の筒を用いた条件と、筒をステンレス製のものに変え、配管に導電性チューブを用いた条件とで破砕実験を実施した。その他の条件は表4-14の通りとした。繰り返し数は、各条件について3回とした。

表 4-14 破砕条件(静電気影響検討)

建材の大きさ	建材の厚み	錘の落下距離	錘の質量
4 cm×15 cm	8 mm	30 cm	1.0 kg

## C. 結果と考察

### C-1 飛散性石綿の除去費用簡易推計モデルの開発

使用面積については、76件のサンプルの検討により、S造の方がRC、SRC造よりも使用面積割合が高くなっていること、面積が大きい場合、割合は小さくなることがわかった。

除去費用の推定式は式(8)のとおりとなった。括弧内の数字はt値であり、いずれも大きな値を示しており、各係数は有意とみなすことができる。式(9)は、対数をとった式を示した。

$$\begin{cases} \log(y) = -0.56 \log(x) + 5.7, & \log(x) < 3.0 \\ \quad \quad \quad (-13.6) & \quad \quad (61.2) \\ \log(y) = 4.0, & \log(x) \geq 3.0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} y = 5.0 \times 10^5 \times x^{0.56} \\ y = 11,000 \end{cases} \quad (9)$$

推定により、除去費用単価の下限は 11,000(円/㎡)となった。国土交通省による吹付けアスベストの処理費用の目安(平成 19 年 1 月から平成 19 年 12 月の 1 年間における施行実績データより算出)によると [14]、アスベスト処理面積が 1,000 ㎡以上の場合、その費用単価は 10,000 円～30,000 円にほぼ収まっている。本研究で求めた費用単価の下限値は、やや過小ではあるものの妥当性のある数値といえよう。

## C-2 石綿含有成形板の廃棄量推定

### C-2-1 解体建築物量

2010 年末における建築物ストックの解体量の推移を、2011 年以降 2060 年までについて構造別に図 4-7～図 4-10 に示した。ピークは木造と S 造が 2018 年、RC 造と SRC 造が 2025 年となった。

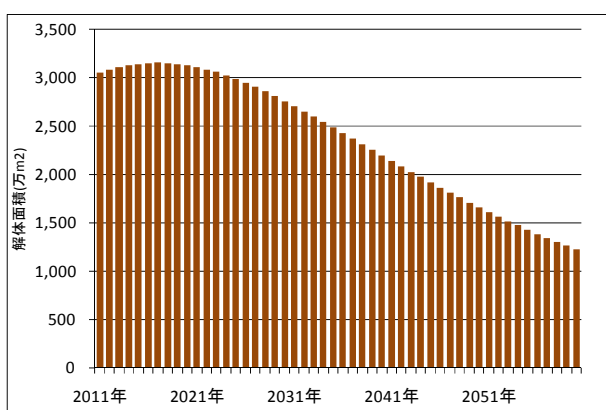


図 4-7 解体面積(木造)

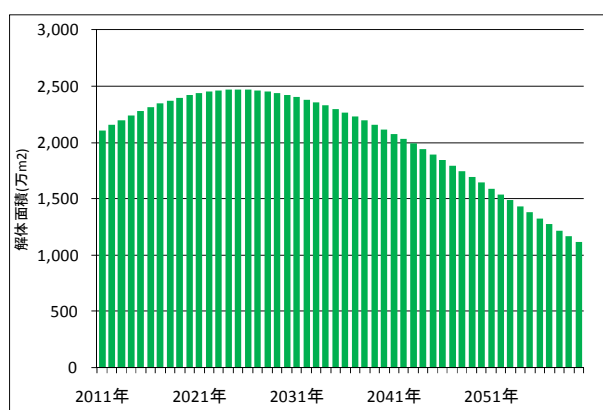


図 4-8 解体面積(RC 造)

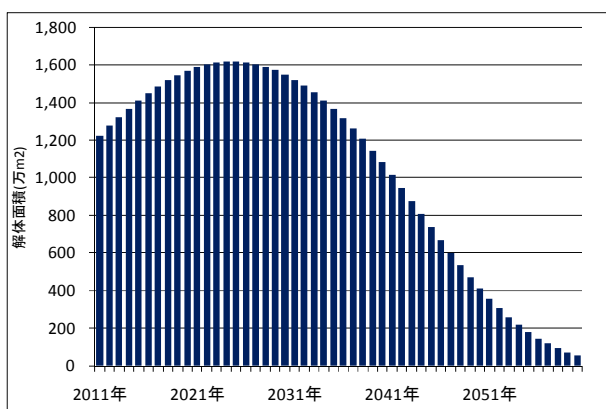


図 4-9 解体面積(SRC 造)

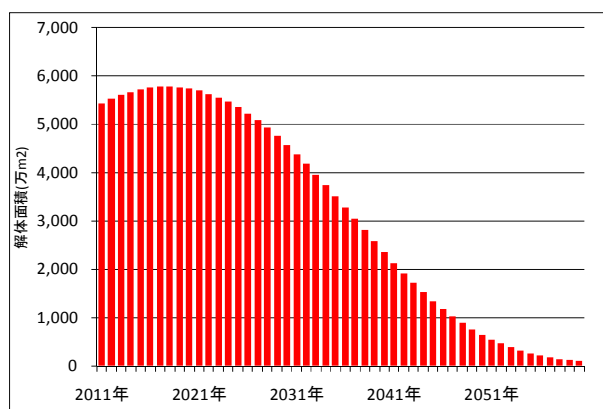


図 4-10 解体面積(S 造)

### C-2-2 石綿使用量原単位

建材別・年別の石綿使用量をそれが用いられた建物用途の各年の建築面積で割ることで石綿排出量原単位を算出した。その結果を図 4-11 に示す。

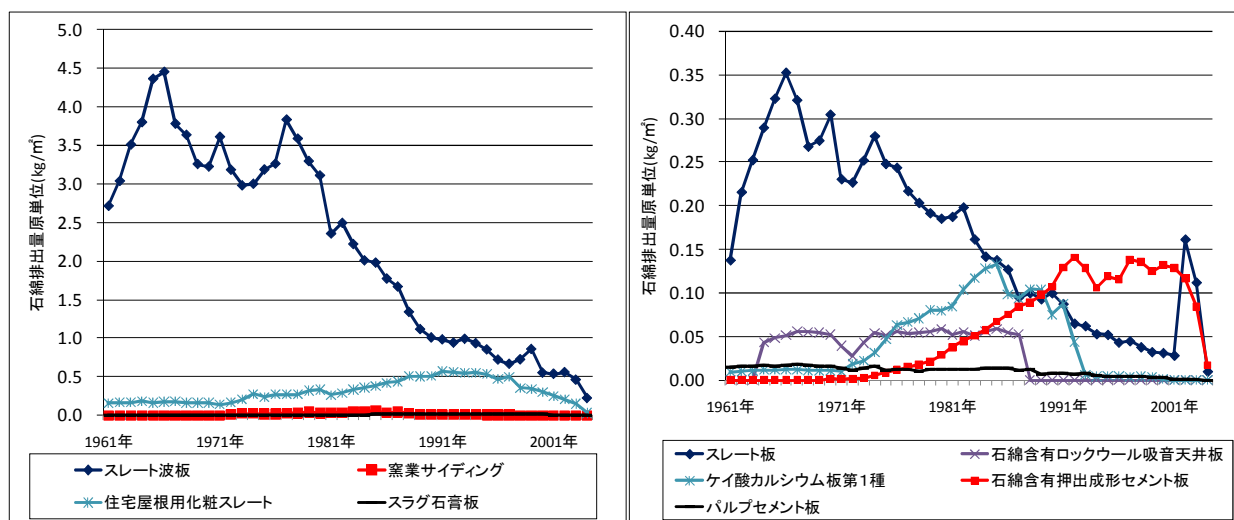


図 4-11 建築面積あたり石綿使用量原単位の推移(左：外装材、右：内装材)

### C-2-3 石綿排出量

アスベスト含有建材自体の排出量を図 4-12 に示した。排出量のピークは 2016 年であり、その量は約 94 万トンとなる。そして、2060 年までに排出される含有建材は約 2,900 万トンとなった。佐川 [15] は吹付石綿等の成形板以外のアスベスト含有建材も含め、ワイブル分布を用いて将来排出量予測を行った。その結果、排出量のピークは 2014 年頃で、その量は約 130 万トン、成形板は約 100 万トンと推計しており、本研究の値ともほぼ一致した。また、石綿協会の予測 [4]では 2020 年に約 160 万トンとやや大きい、2030 年は約 80 万トンと推定しており、概ね本研究の値と一致している。

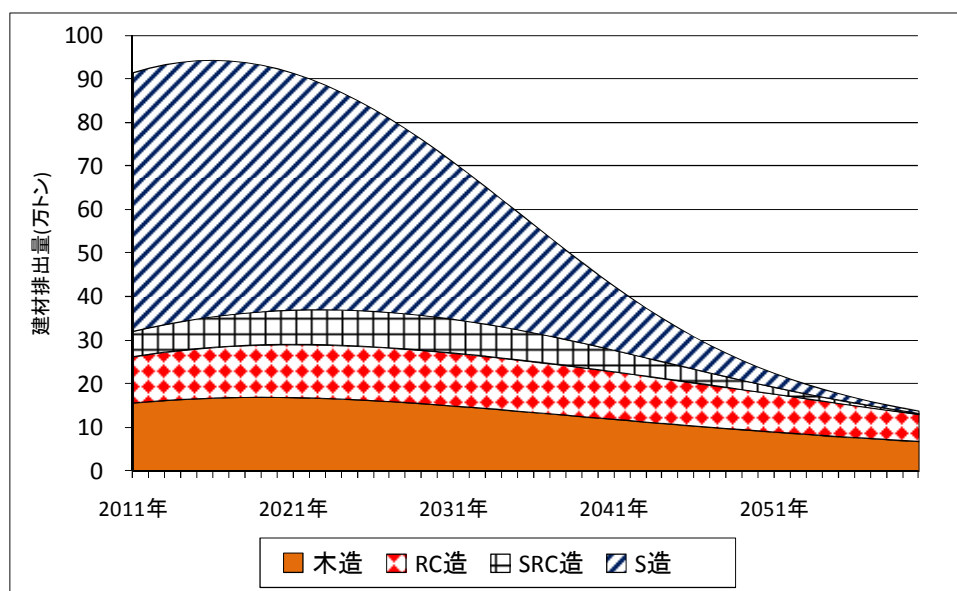


図 4-12 石綿含有建材排出量の予測結果

図 4-13 に、1961 年以降の建材への石綿使用量(日本への石綿総輸入量の 8 割として算出)推移と、その排出量を示した。建材への石綿使用量は約 740 万トンであり、2010 年末までにそのうちの 34%である約 250 万トンが既に排出されたことになる。そして、2011 年に排出量が 11.5 万トンで最大となり、その後 2060 年までに約 320 万トンが排出されると推定された。橋本ら [7]の研究では建材からの石綿排出量を



2010年で13.7万トン、2030年で10万トン推定しており、本研究での値ともほぼ一致した。いずれにせよ、建材由来の石綿はまさに現在がピークであり、その後も排出量が多い時期が続くと言える。そして、2060年末時点での累積排出割合は77%であることから、解体時における石綿の管理はまさにこれからより重要になってくるだろう。

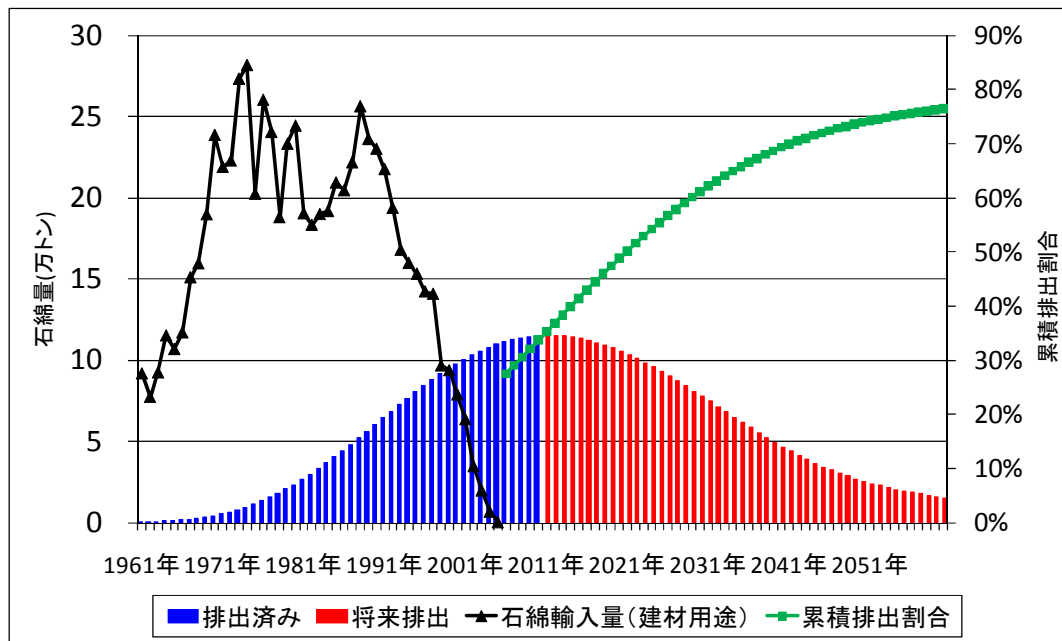


図 4-13 日本における石綿排出量の推移

### C-3 解体工事現場および廃棄物埋立地での石綿濃度測定

#### C-3-1 民間建築物(事業所 A)

作業室内環境測定結果を表 4-15 に、個人曝露測定結果を表 4-16 に示した。撤去前に測定したバックグラウンド濃度は定量下限値以下であった。撤去中濃度は A 地点で吹付けアスベストのそれと同レベルであり、飛散性が非常に高かった。また、作業環境濃度に比べて今回の個人曝露濃度は 8~10 倍程度であった。

表 4-15 事業所 A での作業環境測定結果

	バックグラウンド	A測定					B測定
		測定点①	②	③	④	⑤	
石綿濃度(f/L)	<8.7	1,116	820	591	820	812	959

表 4-16 事業所 A での個人曝露測定結果

	個人①	個人②
吸引時間	14:08~15:08	15:08~16:08
作業内容	①面会室壁+②廊下壁撤去	②廊下壁撤去+③面会室廊下側壁撤去
石綿濃度(f/L)	7,412	8,791

#### C-3-2 京都大学法経済学部北館

ボイラー員控室での測定結果を表 4-17 に示した。作業前の室内濃度 3.7 f/L は一般環境中の濃度より

も 10 倍程度高い値となった。含有率の高い有孔軽量アスベストボードが使用されていることや、天井と壁の両方に含有建材が使用されていることが原因と考えられる。撤去中および清掃・片付け中の室内濃度は、作業環境における管理濃度である 150 f/L と比較すると 10～30 倍ほどの値となった。これらの濃度は、吹付けアスベストの除去工事時と同程度のレベルであり、成形板を対象とする作業であっても、リスク上昇の可能性が十分にあると考えられる結果である。

表 4-17 作業室内環境測定結果(ボイラー員控室)

	測定地点		アスベスト濃度(f/L)							
			作業前	撤去中			清掃中			作業後
	地点名	地点番号		Chr	Amo	合計	Chr	Amo	合計	
作業環境	室内(奥)	①	3.7	42	1,058	1,100	90	3,910	4,000	3.9
	室内(中央)	②		69	2,131	2,200	48	3,452	3,500	
	室内(入口付近)	③		11	849	860	133	3,467	3,600	
	室内(平均)	-	-	40	1,346	1,387	91	3,609	3,700	-
	部屋入口	④	-	3	25	28	9	121	130	-
	フロア	⑤	<0.5	2	11	13	3	107	110	1.2
	フロア入口	⑥	-	4	9	13	-	-	-	-
個人曝露		-	43	1,584	1,627	84	3,583	3,667	-	
敷地境界	⑱、⑲	<0.3	0.1	0.3	0.4	0.1	0.3	0.4	<0.3	

部屋の入口や地下1階フロア、そしてフロアの入口でもバックグラウンドよりも濃度が上昇していた。作業中は道具の出し入れ等で部屋入口の扉をあけることがしばしばあり、その際に室外に石綿繊維が飛散したことによると思われる。そして、含有建材がほぼ取り除かれ、清掃もなされたにもかかわらず作業後のボイラー員控室の濃度は作業前と同レベルの 3.9 f/L であり、一般環境中濃度よりも高かった。建材と骨材との接合部や空気中に残存した繊維によると推測される。

男子トイレの測定結果を表 4-18 に示す。作業前の濃度は 0.5 f/L と一般環境とほぼ同じレベルであった。撤去中の濃度は 80 f/L とボイラー員控室のそれと比べるとかなり低かった。建材の使用部位が天井のみであることやフレキシブルボードの石綿含有率が 4.4%と低かったことが理由と考えられる。通常業務の部屋はいずれも定量下限値以下となり、作業による影響はないことが確認された。作業後の男子トイレ室内濃度は 0.5 f/L となり、一般環境中濃度と同レベルとなった。

表 4-18 作業室内環境測定結果(男子トイレ)

	測定地点		アスベスト濃度(f/L)							
			作業前	撤去中			清掃中			作業後
	地点名	地点番号		Chr	Amo	合計	Chr	Amo	合計	
作業環境	室内	⑦	0.5	80	0	80	37	0	37	0.5
	部屋入口	⑧	-	5	0	5	5	0	5	-
	フロア	⑨	<0.5	-	-	<0.9	4	0	4	2
通常業務の部屋	法経済学部図書館室内	⑰	-	<0.6	<0.6	<0.6	<0.8	<0.8	<0.8	-
	職員休憩室入口	⑱	-	<0.6	<0.6	<0.6	<0.8	<0.8	<0.8	-
個人曝露		-	-	29	0	29	156	0	156	-
敷地境界	⑱、⑲	<0.3	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.3

国際法政文献資料センターの結果を表 4-19 に示す。この部屋に使われたビニルアスベストタイルは定性・定量分析で石綿含有無しとされていた。測定結果はそれを反映するものとなり、作業前はもちろん、作業中も室内ではすべて定量下限値以下であった。



表 4-19 作業室内環境測定結果(国際法政文献資料センター)

	測定地点		アスベスト濃度(f/L)							
			作業前	撤去中			清掃中			作業後
	地点名	地点番号		Chr	Amo	合計	Chr	Amo	合計	
作業環境	室内(南側)	⑩	<0.5	-	-	<10	-	-	<10	<0.5
	室内(北側)	⑪	-	-	<10	-	-	<10	-	
	室内(平均)	-	-	-	<10	-	-	<10	-	
	入口	⑫	-	-	<0.9	1	0	1	-	
	フロア	⑬	<0.5	-	-	<0.9	-	-	<0.9	1.2
通常業務の部屋	法経済学部図書館室内	⑭	-	<0.9	<0.9	<0.9	<0.8	<0.8	<0.8	-
	事務室入口	⑮	-	<0.9	<0.9	<0.9	<0.7	<0.7	<0.7	-
	個人曝露	-	-	-	-	<20	-	-	<20	-
	敷地境界	⑩、⑲	<0.3	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.3

敷地境界については、3 部屋の作業中は定量下限値付近または未満となり、外部環境への繊維飛散はほとんどないことが確認された。

### C-3-3 京都大学工学部 8 号館

建物周辺ならびに作業前の測定結果は、いずれも敷地境界基準(10 f/L)を下回った。

2 階廊下(9 月 5 日)での測定値は作業場所出入り口での濃度よりも 2 桁高かった(表 4-20)が、SEM-EDS 分析では石綿は検出されなかった(表 4-21)。個人曝露は 2 つとも高濃度(1630 f/L, 2180 f/L)であった。厨房での作業中に、厨房出入り口で 561 f/L とかなり高い値を観測した。2 階廊下は作業前や同日の建物周辺での測定値に比べて高いが、敷地境界基準値を超えない程度であった。トイレでの作業同様、個人曝露は高い濃度であった。なお、厨房作業中の個人曝露 1,4 では、機器操作のトラブルにより設定した吸引量を確保できず、それぞれ 11.8 L, 4.9 L であった

表 4-20 工学部 8 号館における作業前(9/4)・中(9/5, 6)・後(9/7)の測定結果

採取場所	採取日	クリソタイル濃度(f/L)	角閃石系石綿濃度(f/L)
厨房	9 月 4 日	<0.48	<0.48
男子トイレ	9 月 4 日	<0.48	1.27
2F 廊下	9 月 4 日	<0.48	<0.48
男子トイレ出入口	9 月 5 日	<1.45	24.5
2F 廊下	9 月 5 日	<1.45	1120
個人曝露 1	9 月 5 日	<12.9	1630
個人曝露 2	9 月 5 日	<12.9	2180
厨房出入り口	9 月 6 日	<1.45	561
2F 廊下	9 月 6 日	<1.45	6.54
個人曝露 1(撤去中)	9 月 6 日	<22.0	9590
個人曝露 2(撤去中)	9 月 6 日	<12.9	4080
個人曝露 3(清掃中)	9 月 6 日	14.6	5740
個人曝露 4(清掃中)	9 月 6 日	<52.9	12000
厨房	9 月 7 日	1.27	133
男子トイレ	9 月 7 日	<0.48	10.6
2F 廊下	9 月 7 日	0.54	3.27

また、これらの試料のうち3点でSEM-EDSによる元素分析を行い、無作為に抽出された繊維について石綿か否かの判定を行った(表 4-21)。2F 廊下試料で検出された繊維はすべて非アスベストであった。これにより、作業場所外への多量の漏えいがあったわけではないことが確認できた。厨房で採取した試料について、位相差顕微鏡によって計数された繊維の15本中2本がアモサイトで、残りは非アスベストだったと仮定しても、作業後の厨房での石綿濃度は17.9 f/Lである。少なくとも敷地境界基準は超えていたと考えられ、看過できない結果である。

表 4-21 SEM-EDS による工学部 8 号館試料の分析結果

採取場所	分析繊維本数	石綿と判定された繊維本数	アスベストの種類
9/5 2F 廊下	15	0	-
9/6 個人曝露 3	15	2	アモサイト
9/7 B1 厨房	15	2	アモサイト

### C-3-4 廃棄物埋立処分時の石綿濃度調査

作業場所付近の2点、そして敷地境界の濃度はすべて定量下限値以下、もしくは一般環境中と同レベルであった(表 4-22)。地点②の午前、地点①の午後でいずれも吹付け石綿や保温材等に多く使用されたアモサイトの繊維を検出しており、処分対象の石綿含有廃棄物に含まれる飛散性石綿の多さを表していると思われる。ただし、その濃度が十分に低いこと、そして受入時の廃棄物の状態も法律施行令を満たしていることから、処分場 B での作業環境は適切に管理されていると判断された。

表 4-22 管理型最終処分場での測定結果

測定地点	測定時点	吸入量(L)	総繊維数濃度 (f/L)	石綿種類	石綿濃度 (f/L)
地点①	9:56~12:02	372.1	0.13	-	<0.13
地点②	9:49~11:54	372.9	0.78	アモサイト	0.13
地点①	13:28~15:28	362.8	0.81	アモサイト	0.4
地点②	13:32~15:32	360.0	0.28	-	<0.14
敷地境界	10:49~14:49	2,400	<0.08	-	<0.08

※1：総繊維数、石綿濃度は、小坂浩氏(NPO 法人ひょうご労働安全センター)の分析に基づく

※2：定量下限値は、ISO14966:2002 の方法 [16]に基づきポアソン分布の95%上限値を用いて算出した

## C-4 破砕実験による解体時石綿飛散係数の推定

### C-4-1 試料の破砕状況

2010 年度実験での破砕後の試験材について、図 4-14 に写真を示す。ボルトを突起としたため、建材の中心から割れていることが推察される。フレキ板は、手ばらし以外すべて割れており、破片の形も比較的整っている。一方、ケイカル板の方も割れたが、破片の形はやや不規則であった。工具破砕(フレキ・湿潤)、手ばらし(フレキ・湿潤)での建材含水率は、4.7%、1.8%であった。

2011 年度実験においては、直線状の突起を用いたため、破断面は建材と突起物の接触線となることが多かった。ただし、錘がはねて突起物が2回建材に接触し、2カ所で割れることもあった。

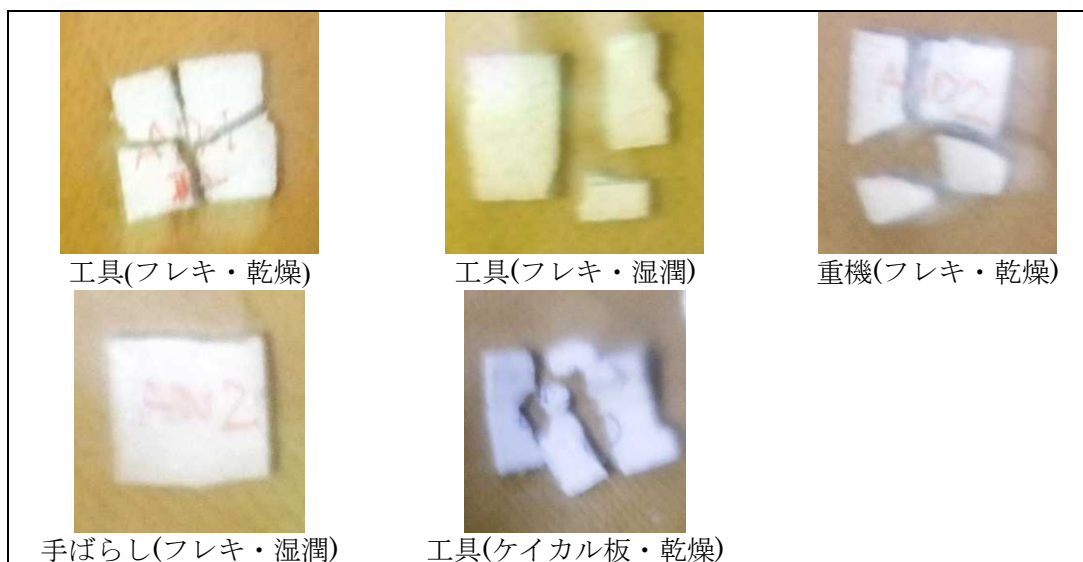


図 4-14 試験材の破片

### C-4-2 石綿飛散本数と粉じん計の値の関係

2010 年度の破碎実験について、粉じん計の流量と測定時間、アスベストサンプラーの吸入量から求めた粉じん濃度および石綿濃度を表 4-23 に示す。石綿繊維が得られたフレキ/工具・乾燥、フレキ/工具・湿潤、フレキ/重機・乾燥について、総粉じん数と石綿繊維数との関係を見ると、粉じんが多くなれば繊維も多くなるという関係はあるが、互いに相関があるかはこのデータのみでは判断が難しい。

表 4-23 総粉じん・石綿繊維数測定結果(2010 年度実験)

建材/破碎条件	粉じん			総繊維数(f)	石綿	
	ピーク値 (個/sec)	総数(個)	濃度(個/L)		繊維数(f)	濃度(f/L)
フレキ/工具・乾燥	24.5	856	31	2,514	1,829	45
フレキ/工具・湿潤	3.9	145	5.3	1,143	915	27
フレキ/重機・乾燥	43.9	1,755	63	26,740	26,283	751
フレキ/手ばらし・湿潤	0.5	19	0.68	<259	<259	<16.8
ケイカル/工具・乾燥	148.1	4,611	165	<259	<259	<16.8

2011 年度の破碎実験について、石綿飛散本数を表 4-24 に示した。3 組の試料について、フィルター a とフィルター b とで石綿本数を比較したところ、ほぼ同数であった。また、SEM-EDS 分析の結果、15 本の繊維中、B-2-a では 9 本、C-2-a では 10 本が石綿(すべてアモサイト)と判定された。これらの結果より、総飛散繊維数はフィルター a の測定結果の 2 倍で、そのうち 30 本中 19 本が石綿であるとして石綿飛散本数を算出した。

表 4-24 石綿飛散本数の推定結果(フィルター a の計数値を 2 倍、EDS の結果により補正)

実験番号	石綿飛散本数(本)	実験番号	石綿飛散本数(本)	実験番号	石綿飛散本数(本)
A-1	78,100	B-1	329,000	C-1	416,000
A-2	144,000	B-2	114,000	C-2	525,000
A-3	134,000	B-3	178,000	C-3	437,000
A-4	165,000	B-4	262,000	C-4	474,000

石綿飛散本数と粉じん計の値の関係を図 4-15 に示した。条件 A,B の結果は、原点を通る直線によって相関の良い近似ができる。(近似直線 :  $Y = 50.9X$ ,  $R^2$  値 : 0.9734)しかし、条件 C では、粉じんが多くなるにつれてこの直線から乖離し、より小さい測定値になっている。これは捕集された粉じんが多すぎたためと考えられる。JIS K-3850 の計数方法では、繊維同士が絡み合っただけで本数が判別不能な場合や、 $3 \mu m$  を超える粒子が付着している繊維は 0 本と計数する。計数を行った分析会社に問い合わせたところ、条件 A,B では粒子の付着はほとんどなく、条件 C では粒子の付着によって 0 本と計数した繊維が 20% ほどあったとの回答であった。条件 C での未計数の繊維の存在を考慮すると、粉じん計積算値と石綿本数との関係は、対数関係ではなく、直線関係にある可能性が高い。

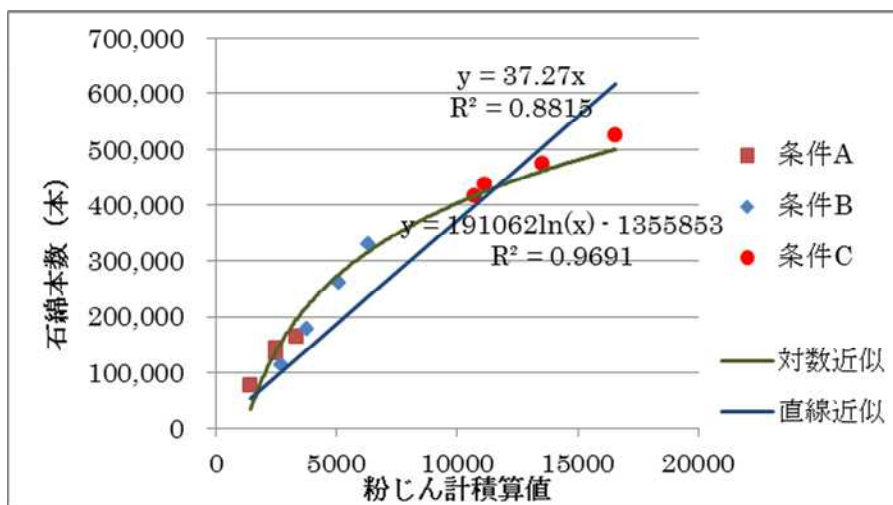


図 4-15 粉じん計積算値と石綿本数の関係。条件 C では 20%ほど未計数の繊維がある。

### C-4-3 破壊の度合いを表す指標と石綿飛散本数の関係

石綿飛散本数と破断長との関係を図 4-16、図 4-17 に、破断面積との関係を図 4-18、図 4-19 に示した。

破断長・破断面積ともに条件 A,B のみの結果ではある程度の相関が確認できた(それぞれ相関係数 0.744, 0.511)が、全条件間では相関はあまりない。条件 A,B と条件 C で異なるのは錘の落下距離である。したがって、破断長や破断面積による石綿飛散本数の評価は、同じ錘の質量・落下距離の条件で有効だが、落下エネルギーが異なると相関が得られないと考えられる。

石井ら [17]は、破壊の指標として破断長を用いる条件として「同一種類の同じ大きさの建材を同程度の力で破壊する」ことを挙げているが、本実験では建材の大きさが異なる条件間でも相関を得ることができた。また、本実験では錘の落下距離が増すと石綿飛散本数も増加する傾向にあったが、錘が建材に二度接触することもあり、錘の位置エネルギーと破碎に使われるエネルギーの関係は不明瞭である。破碎エネルギーと飛散本数の数量的な関係は明らかにできなかった。

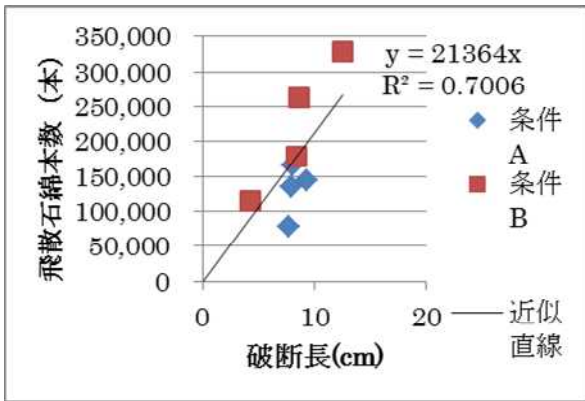


図 4-16 破断長と飛散本数(条件 A,B)

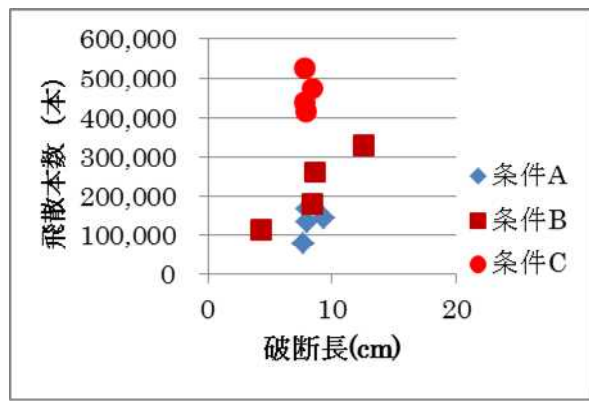


図 4-17 破断長と飛散本数(全条件)

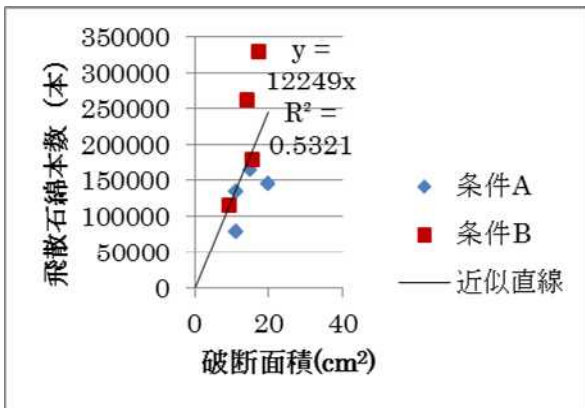


図 4-18 破断面積と飛散本数(条件 A,B)

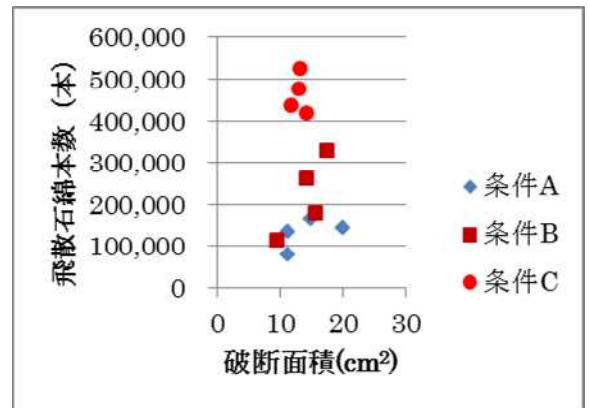


図 4-19 破断面積と飛散本数(全条件)

#### C-4-4 静電気の影響

アクリル製円筒およびステンレス製円筒での破碎実験結果を図 4-20 に示した。得られた 2 群についてマン・ホイットニーの U 検定を行った結果、p 値は 0.7 で、2 群の間に統計的に有意な差があるとは言えない。非含有建材から飛散した粉じんとアスベストで動態が異なる可能性は捨てきれないが、静電気による影響はなかったことを示唆する結果が得られた。

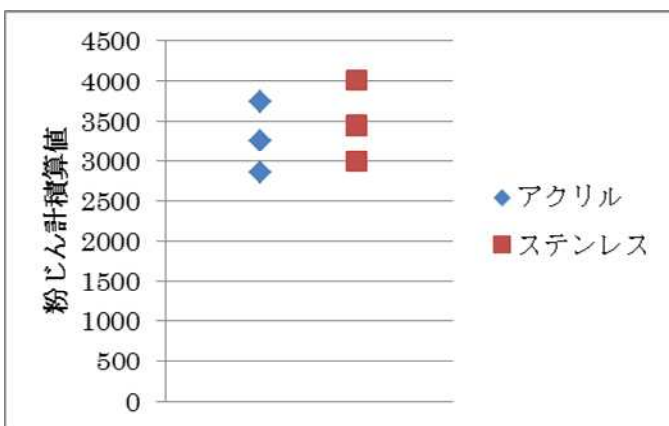


図 4-20 筒の素材による粉じん値の相違

### C-4-5 除去作業中濃度との比較

2011年度の破碎実験結果を用いて、石綿除去作業中の養生区画内石綿濃度を推定し、厨房での実測濃度と比較した。破碎試験の結果から推定される石綿の飛散量  $Z$  を用い、石綿が作業場内に均一に拡散したときの濃度を(10)によって、計算した。 $Z$  は飛散量が破断長に比例すると仮定して、(11)から算出した。式中のパラメータの値は、表 4-25 に示した。

$$Y = \frac{Z}{A \times h \times 1000} \quad (10)$$

$$Z = X \times l \times \frac{A}{a} \quad (11)$$

表 4-25 推定に用いたパラメータ

X (本/cm)	X <sub>A</sub>	16,300
	X <sub>C</sub>	57,900
l (cm)		720
A (m <sup>2</sup> )		20.4
a (m <sup>2</sup> )		1.62
h (m)		4

X: 破断長あたり飛散本数 (本/cm)

Y: 石綿濃度(本/L)

Z: 総飛散本数 (本)

l: 建材 1 枚あたりの破断長 (cm)

A: 天井の面積 (m<sup>2</sup>)

a: 建材 1 枚あたりの面積 (m<sup>2</sup>)

h: 部屋内部の高さ (m)

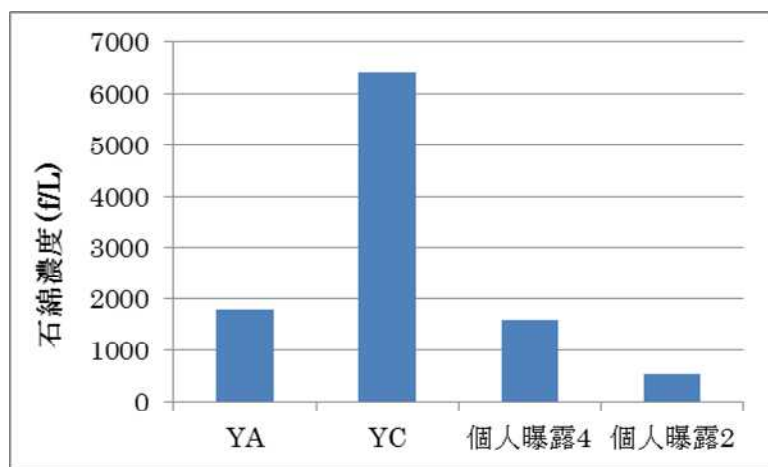


図 4-21 実験からの推定値と個人曝露濃度の比較(SEM-EDS の結果により補正後)

実験からの推定値と個人曝露濃度実測値との差は 1 桁以内に収まっていた(図 4-21)。

ただし、破碎試験と実際の除去作業では破碎の条件が異なるため、この推定が精密なものと保証されたわけではない。例えば今回の実験では建材を湿潤化しなかったが、除去時は湿潤化を行っている。比較対象に用いた個人曝露測定は、作業場内の均一な濃度より高い値になりやすい。また、推定に用いた建材の破断長は、1 枚の建材を均等な大きさの 15 枚の破片に割るとして求めたが、実際は大きささまざまな破片が生じるはずである。さらに精密な推定のためにはこれらの誤差を生む要因を排除しなければならない。



## D. 結論

建物の構造・建築年・立地地域・延べ床面積を入力値として、吹付けアスベストの除去費用を推定する簡易モデルを構築した。RC/SRC 造にくらべ、S 造の方が吹付けアスベストの使用面積割合が高いことが明らかになった。また、石綿含有建材の廃棄量は、2016 年に約 94 万トン/年でピークを迎え、その多くが S 造からの排出であると推定された。

2011 年の東日本大震災の被災地では多くのがれきが発生しており、これらの中には吹付け石綿や石綿含有建材も含まれている。これら石綿含有廃棄物の発生量の見積もり等に本研究成果を活用していくことが期待される。

解体工事現場での測定では、比較的飛散性の少ないとされるレベル 3 の建材の除去工事であっても、個人曝露測定結果が作業環境の管理濃度(150 f/L)を超過することがしばしばあった。

現行の作業マニュアル等 [18] [19]では、やむを得ず破砕する際の作業内容の説明や石綿飛散への注意喚起が不十分である。特に浮遊粉じんへの注意喚起、破砕の減少や湿潤化の徹底が重要と考える。また、ケイ酸カルシウム板第 1 種を破砕する際の飛散抑制について、現行のレベル 3 相当の対応でよいか検討が必要である。

成形板の破砕実験の結果、石綿飛散本数と粉じん計の値には強い相関があった。さらに、錘の落下条件が同一ならば、破断長や破断面積と石綿飛散本数の間にある程度の相関があった。また、破砕エネルギーとの関係は不明であった。

今回用いた建材は 1 種類のみであるため、今後は異なる種類の建材でも同様の関係が得られるか確認する必要がある。また粉じん値と石綿飛散本数の関係について、今回の実験では低粉じん域・高粉じん域で直線的な関係が保たれるか検証できていない。本研究の 2011 年度の実験方法は、小規模な設備内で行えるものであり、除去作業中の測定に近い結果が得られた。ただし、実験時間や精度などには改善の余地がある。今後は実験装置を改良し、実験を重ねていく所存である。

## E. 参考文献

- 1) 国土交通省. 目で見るアスベスト建材. 2006.
- 2) 中央労働災害防止協会. 石綿作業主任者テキスト. 第 5 版. 東京都, 2011.
- 3) 金融庁. 金融検査マニュアル(預金等受入金融機関に係る検査マニュアル). 2007.
- 4) (社)日本石綿協会環境安全衛生委員会. 石綿含有建築材料廃棄物量の予測量調査結果報告書. 2003.
- 5) 環境省. 建築物の解体等に伴う石綿飛散防止検討会の結果報告について. (オンライン) 2005 年 11 月 30 日. (引用日: 2012 年 5 月 8 日.) <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=6604>.
- 6) 国土交通省. 民間建築物における吹付けアスベストに関する調査結果の公表について. (オンライン) 2009 年 12 月 18 日. (引用日: 2012 年 5 月 8 日.) [http://www.mlit.go.jp/report/press/house05\\_hh\\_000138.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000138.html).
- 7) 橋本征二, 寺島泰. 建築物解体廃棄物の発生予測. 廃棄物学会論文誌, 第 11 巻, 第 5 巻, ページ: 271-279. 2000.
- 8) 国土交通省. 建築統計年報. 昭和 37 年-平成 17 年.
- 9) 小松幸夫. 建築寿命の年齢別データによる推計に関する基礎的検討. 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 439, ページ: 91-99. 1992.
- 10) 経済産業省. 窯業・建材統計年報. 昭和 37 年-平成 17 年.
- 11) 建築物の解体等における石綿飛散防止検討会. 建築物の解体等における石綿飛散防止対策の強化について. 2005.
- 12) 環境省. 石綿に係る特定粉じんの濃度の測定法(環境庁告示 93 号). (オンライン) 1999 年 12 月 27 日.

<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=04000055>.

- 13) 藤川陽子, 中坪良平, 平木隆年, 藤長愛一郎, 菅原正孝. 石綿含有廃棄物等の落下粉じん試験方法の開発. 環境衛生工学研究, 第 24 巻, 第 3 号, ページ: 109-115. 2010.
- 14) 国土交通省. 「石綿(アスベスト)除去に関する費用について」.(オンライン) 2008 年 4 月 25 日.(引用日: 2012 年 5 月 8 日.) [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/01/010425\\_4/01.pdf](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/01/010425_4/01.pdf).
- 15) 佐川修. マテリアルフロー解析によるアスベスト含有製品の使用実態調査. 建材試験情報, 第 43 巻, ページ: 19-24. 2007 年 5 月
- 16) ISO14966:2002. Ambient air - Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles - Scanning electron microscopy method.
- 17) 石井康一郎, 吉野昇. ボード破壊時のアスベスト飛散特性. 大気汚染学会誌, 第 28 巻, 第 5 巻, ページ: 288-294. 1993.
- 18) 建築物の解体等に関わる石綿飛散対策マニュアル編集委員会. 建築物の解体等に係る石綿飛散防止対策マニュアル. 2007.
- 19) 東京都環境局. 建築物等の解体等工事における石綿粉じんへの曝露防止マニュアル. 2006.

#### F. 研究発表

- (1) 水嶋周一、平井康宏、酒井伸一：吹付けアスベストの除去工事実績に基づく費用及び削減リスクの推定、第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (名古屋市、2009.9)
- (2) 水嶋周一、平井康宏、酒井伸一：吹付けアスベスト除去費用簡易推計モデルの構築、第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (金沢市、2010.11)
- (3) 平井康宏、水嶋周一、酒井伸一：石綿含有成形板の破碎試験による解体時飛散係数推定、第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (東京都、2011.11)



## 5. 建設廃棄物処理施設等におけるアスベストの排出実態等の把握

分担研究者 財団法人日本環境衛生センター 藤吉秀昭  
愛媛大学 貴田晶子  
国立環境研究所 山本貴士

### A. 研究目的

アスベスト含有建材混入の可能性が高い建設廃棄物の処理・資源化施設ではアスベストの飛散や管理実態が十分把握されていない。アスベスト含有建材等が多く含まれる建設廃棄物の処理・資源化施設に着目することで、資源化処理に伴うアスベストの挙動の実態を明らかにし、排出抑制対策および資源化物管理のあり方の検討を行う。

産業廃棄物等破砕処理施設でのアスベストの収支把握は、アスベスト含有廃棄物の搬入率及び混入率が低く、定常的に処理されていないため困難である。そこで、一般廃棄物破砕処理施設において、石綿含有廃棄物の混入する可能性が高い小型家電の破砕処理施設に焦点を絞って、アスベスト飛散リスクが大きいと考えられる産業廃棄物の搬入工程や処理物の搬出工程などの処理工程からのリーク箇所等の検出を行い、廃棄物破砕処理施設におけるアスベスト飛散リスクを把握する。加えて、時間分解能の高いファイバーモニターを組み合わせて繊維状物質の発生パターンを把握しながらアスベスト飛散実態を明らかにすることを目的とする。

加えて、震災・津波廃棄物の処理・資源化過程でのアスベスト管理の課題を明らかにするため①処理・資源化過程のアスベスト管理の実態調査、②処理・資源化物(処理残さ)中のアスベスト濃度の測定を行った。

### B. 研究方法

#### B-1 建設廃棄物の資源化および処理処分実態(既存資料等)

既存情報を基に建設廃棄物の処理・資源化施設設置状況、処理フローおよび資源化物や処理後物の扱い方を調査した。

#### B-2 現地調査

代表的な施設の現地調査を行い建設廃棄物の受け入れから処理資源化までの各工程を調査した。具体的には現地で前処理破砕工程等における発じん対策や集じん物のアスベスト含有量を分析した。

##### (1) 調査対象施設の選定および分析項目

処理対象物に混入したアスベストは、破砕処理により気中に放出される他、破砕物にも付着している可能性があり、選別、集じん工程でどのような挙動を示すか確認するため、建設混合廃棄物処理施設の調査を行った。分析個所と分析項目は図 5-1 および表 5-1 に示すとおりである。

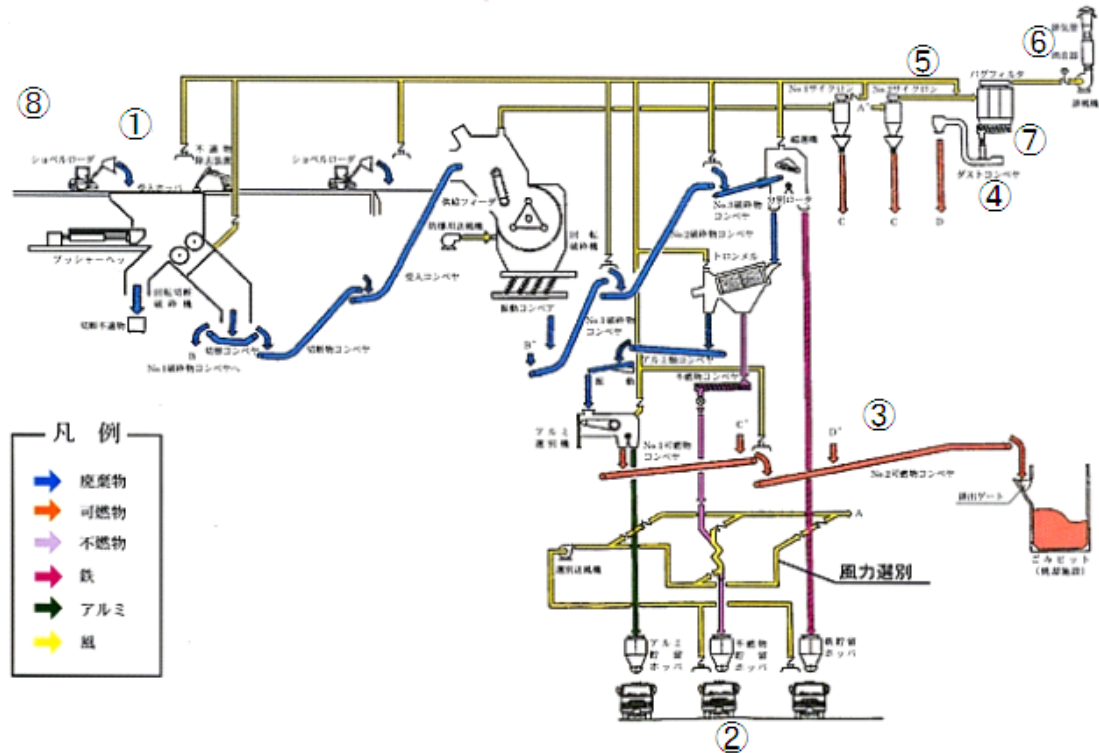


図 5-1 建設廃棄物資源化施設の処理工程

表 5-1 建設廃棄物資源化施設の試料採取位置と検体数

試料名		検体数	備考
処理対象物	受入ホッパ	① 1検体×3	1)
処理後物	不燃物	② 1検体×3	
	破碎可燃物	③ 1検体×3	
バグフィルタダスト	バグフィルタダストコンベヤ	④ 1検体×3	複数回に分けて採取
排気	バグフィルタ入口	⑤ 1検体×3	分析用と並行して各 1 検体採取する。
	バグフィルタ出口	⑥ 1検体×3	
ろ布	No.1 局部集じん用 BF	⑦ 1検体	後日送付 2)
作業環境	受入ホッパ付近	⑧ 1検体×3	分析用サンプル不要
汚泥	未定	⑨ 1検体	2)

1) 混入が予想される建設混合廃棄物を少しずつ分取して平均化する。

2) ろ布、汚泥については、採取できない場合、他の項目に振り分ける可能性がある

①～④、⑨は 500g あるいは 1L 程度を分析用以外に採取する。

(2) 分析方法

排気中の石綿分析(⑤,⑥)

分析方法：計数法(環境庁告示第 93 号)

処理対象物、処理後物、バグフィルタダスト、ろ布中、汚泥中の石綿分析(①～④、⑦、⑨)

分析方法：JIS A 1481、検出された場合 JIS K 3850-1(SEM-EDX)

作業環境(⑧)

分析方法：計数法(労働安全衛生法労働省令第 39 号)

### **B-3 一般廃棄物破碎処理施設の事前調査**

一般廃棄物処理破碎施設のうちアスベスト含有廃棄物の混入の可能性のある小型家電を破碎処理している施設 9 施設を事前調査し、破碎処理フロー、小型家電の処理状況を調査し、実測調査対象施設を選定した。

### **B-4 リアルタイム繊維状粒子分析装置の性能調査**

建設廃棄物処理・資源化施設で発じんの多くなる場所における、アスベストの暴露防止を図るために開発されているリアルタイム繊維状粒子分析装置の性能を調べた。

### **B-5 繊維状粒子リアルタイムモニターの選定、検証**

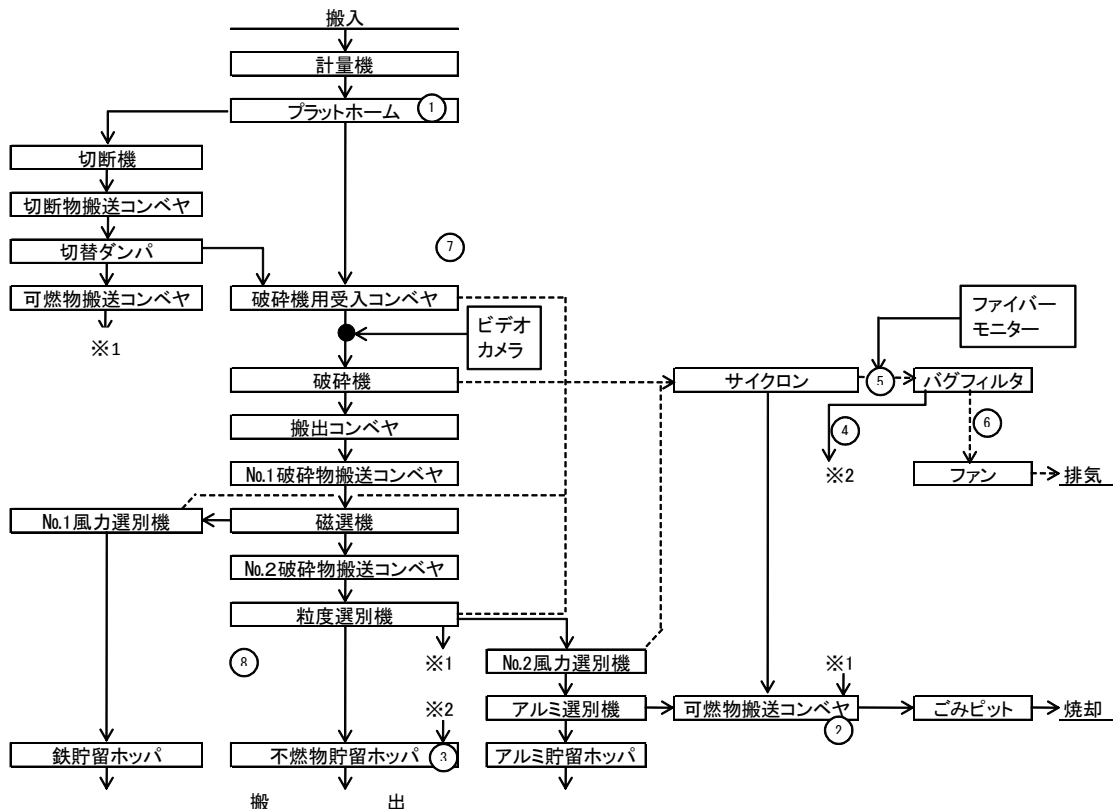
現在開発されている繊維状粒子分析装置の性能の中から、破碎施設の調査に用いる機種を選定し、破碎処理排ガス中のアスベスト繊維数のリアルタイムモニターの実用性の検証を行った。

### **B-6 小型家電破碎施設の現地調査**

一般廃棄物の破碎処理施設では、破碎処理後の選別装置として磁選機、粒度選別機、アルミ選別機を備え、鉄、アルミ、可燃物、不燃物の 4 種選別を行っている施設が標準的で、破碎、選別各工程からの発じんはサイクロン、バグフィルタを通して処理するのが標準的な構成であった。また、小型家電を他の粗大、不燃ごみと同時処理している場合は、アスベスト含有物の混入があってもその影響を把握しにくいため小型家電を別途処理している施設を調査対象に選んだ。

小型家電を破碎処理している施設で現地調査を行い、搬入物へのアスベスト含有物の混入割合調査を 1 回、及び受け入れから処理までの各工程でのアスベスト繊維濃度調査を 2 回実施した。

処理フローと測定場所は図 5-2 および表 5-2 に示すとおりである。



○番号はサンプリング箇所

図 5-2 小型家電破碎処理フローと測定箇所

表 5-2 小型家電破碎施設 試料採取箇所

試料名／試料採取場所			採取日		
			1/18	1/31	2/1
処理対象物	分別ステージ	①		○	
処理後物 可燃物	可燃物搬送コンベヤ	②	○		○
不燃物	不燃物貯留ホツパ	③	○		○
バグフィルタダスト	バグフィルタ下部シュート	④	○		○
排ガス	バグフィルタ入口	⑤	○		○
	バグフィルタ出口	⑥	※		※
作業環境	受入ホツパ周辺	⑦	○		○
	粒度選別機周辺	⑧	○		○

**B-7 震災・津波廃棄物処理・資源化過程におけるアスベスト管理の実態把握**

(1) 震災・津波廃棄物処理におけるアスベスト対策の実態について

既存報告とがれき処理事業者へのヒヤリングにより行った。ヒヤリング項目は以下のとおりである。

- 処理実績、処理量・ごみ質
- 処理フロー
- 処理収支

- 分別の工夫
- 労働安全衛生への配慮
- 資源物への配慮、有害物管理配慮

(2) がれき置き場アスベスト飛散等既存調査結果

平成 23 年度に実施された厚労省のがれき集積場でのアスベスト調査結果を集約した。

**B-8 震災・津波廃棄物処理資源化過程におけるアスベスト測定調査**

(1) 処理資源化物—処理残さ中のアスベスト濃度の測定方法

ア. A 市がれき処理場

A 市がれき処理場の資源化処理フローとサンプリング位置は図 5-3 に示すとおりである。

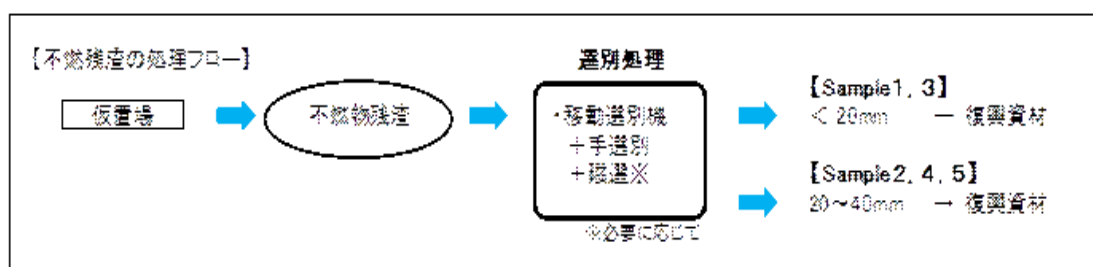


図 5-3 A 市がれき処理場の資源化処理フロー

イ. O 市がれき処理場

O 市がれき処理場の資源化処理フローとサンプリング位置は図 5-4 に示すとおりである。

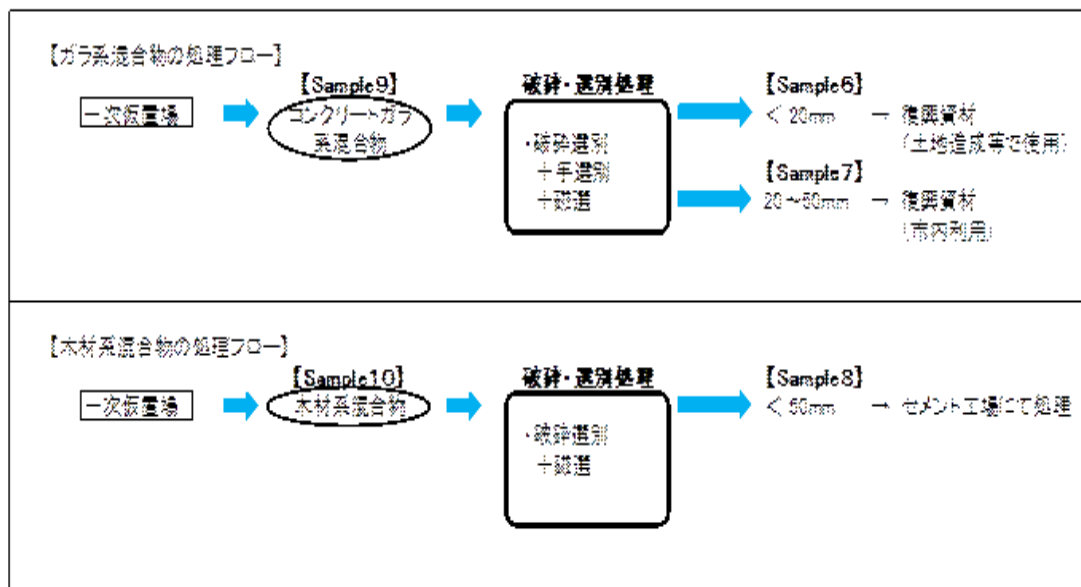


図 5-4 O 市がれき処理場の資源化処理フロー

(2) がれき処理資源化現場における作業環境中総繊維濃度の測定

O 市がれき処理場の資源化現場の発生源近傍において作業環境中総繊維濃度測定を行った。

(3) 採取・分析方法

ア. 処理対象物(震災がれき)等の採取方法

貯留ヤードからランダムに一定量の破碎対象物を採取し、4分法で縮分したのちアスベスト含有量を分析する検体とした。選別物、選別残さについても同様に4分法で縮分しながら検体を採取した。

イ. 処理対象物、処理後物中の石綿含有量分析方法

MA DEP Sieve Method および CARB435 Method により行った。その分析フローを図 5-5 に示す。

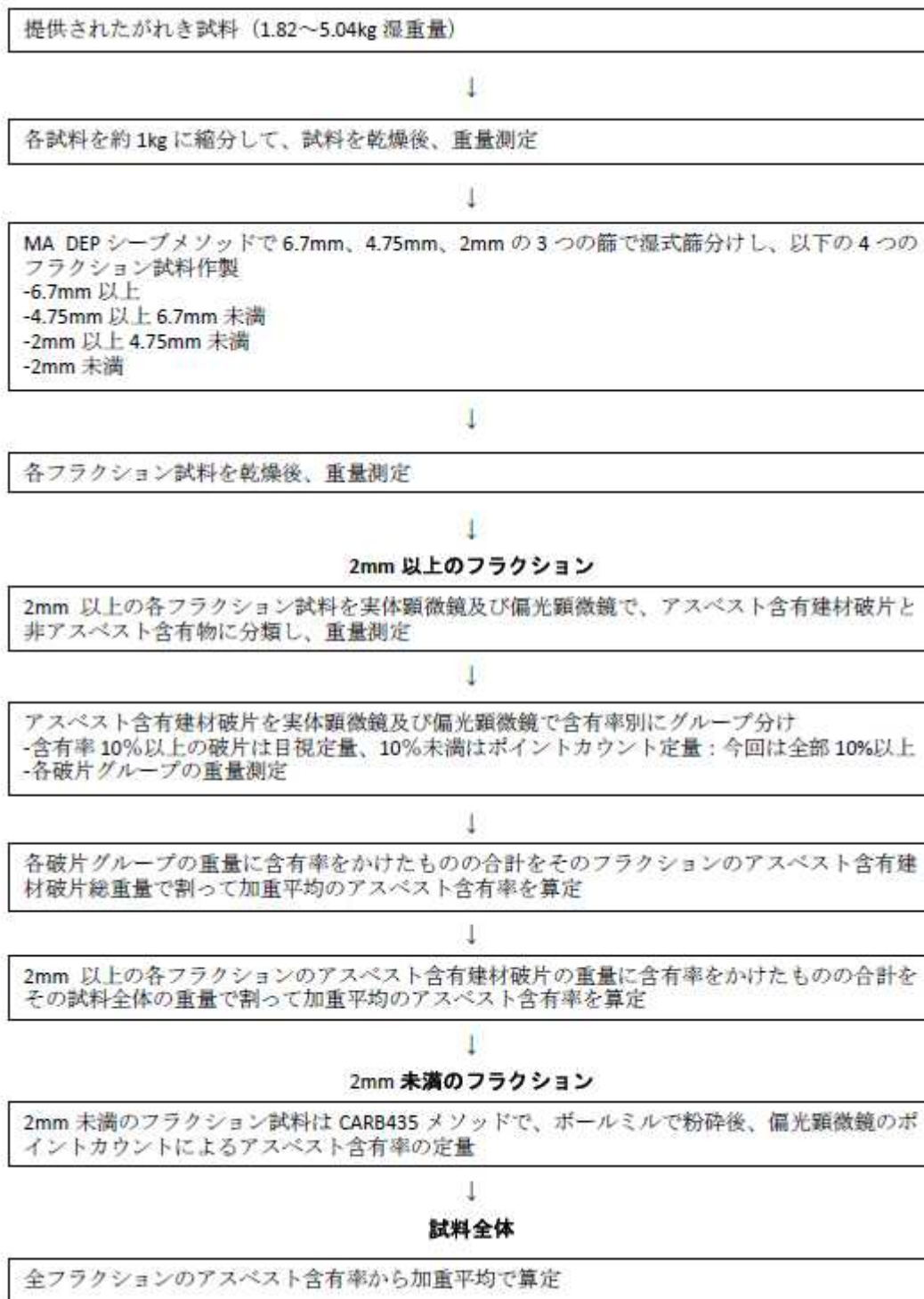


図 5-5 MA DEP Sieve Method の分析フロー

ウ．資源化現場における作業環境中総繊維濃度の測定

計測法： 労働安全衛生法労働省令第 39 号 位相差顕微鏡法

## B-9 一般及び産業廃棄物処理施設における石綿挙動の把握

一般及び産業廃棄物において、受入物に石綿含有廃棄物が混入していた場合には、破碎・選別工程で石綿繊維の一部が飛散して破碎排ガスに移行する可能性がある。この場合、排ガス処理工程(サイクロン、バグフィルター)で石綿繊維は除去され集じんダストへ移行すると考えられる。また、一部は破碎処理残渣中に残存し、その後の処理・資源化工程において適切に処理されない場合には、再利用あるいは最終処分等の過程で石綿による健康被害を引き起こす可能性がある。従って今回、これらの施設において破碎排ガス集じんダストや破碎処理残渣を採取し、石綿の存在の有無を確認した。

### (1) 施設及び試料

以下の 5 施設において破碎排ガス集じんダストや破碎処理残渣 9 試料を採取し、石綿を分析した。施設 A～C は一般廃棄物処理施設、施設 D 及び E は産業廃棄物処理施設である。

- 施設 A：不燃ごみ破碎残渣、不燃ごみ破碎排ガス集じんダスト、資源ごみ破碎排ガス集じんダスト
- 施設 B：破碎ガス集じんダスト、不燃ごみ破碎残渣
- 施設 C：破碎ガス集じんダスト、不燃ごみ破碎残渣
- 施設 D：破碎排ガス集じんダスト
- 施設 E：破碎排ガス集じんダスト

### (2)分析方法

試料の適量を電気炉(450℃、2 時間)低温灰化した。灰化後の試料 1g をビーカーに秤り取り、6%ギ酸 50ml を加えて 1 分間超音波処理した。メンブランフィルター(47mmφ、孔径 0.45μm)で吸引ろ過した。フィルターを無じん水で洗浄して残渣を完全に洗い落とし、洗浄液に無じん水を加えて 100ml に定容した。この一部を分取して無じん水中に懸濁し、ポリカーボネート製フィルター (47mmφ、孔径 0.2μm) で吸引ろ過した。風乾後、フィルターにカーボン蒸着を施し、その小片を切り出してニッケル製 TEM メッシュ(100 メッシュ)に載せ、クロロホルム蒸気でフィルターを溶解して、TEM 観察試料を作成した。

TEM/EDS 装置として日本電子 JEM-2010/日本電子 JED-2300T を使用した。TEM 測定においては、目開き 4～6 個について、長さ 0.5μm 以上、幅 0.05μm 以上、アスペクト比 3 以上の繊維を計数した。繊維の同定は、形態観察、電子線回折、EDS 分析の結果から行った。繊維の計数・計測結果から石綿繊維数濃度と重量濃度を求めた。

## C. 研究結果と考察

### C-1 建設廃棄物の資源化及び処理処分実態調査

#### (1) 建設混合廃棄物の処理

建設混合廃棄物の処理処分の実態、処理施設の処理工程の設備構成等を検討するため、混合系廃棄物の処理の流れ、及び混合系廃棄物処理施設の具体的な処理工程を、建設廃棄物処理業者のホームページ等から収集・解析し、建設混合廃棄物を扱っている業者の処理状況を調査し以下の問題点を抽出した。混合廃棄物のため、粗選別、手選別、粒度選別、機械選別(鉄、アル

ミ)を経て再利用可能なものを回収したのち、破碎処理にかけている場合が多い(前選別、破碎処理とも12件で、混合廃棄物を扱っていると思われる業者の約75%)。破碎処理を行うと、混入したアスベスト含有廃棄物が小さく破碎され中のアスベストが飛散する恐れがある。

(2) 破碎選別後の利用状況

施設により再資源化の程度にはかなり差があるが、全般に一般廃棄物の粗大ごみ処理施設と比較して資源化が進んでいる。特に不燃物系の再利用が進んでおり、集じんダストの利用も見受けられるなど資源化の推進には望ましいことであるが、一方アスベストが建設混合廃棄物中に混入しているとこれら不燃物、集じんダスト中にアスベストが検出される可能性があると考えられた。

(3) 現地調査結果

分析結果は表5-3-1～表5-3-2に示すとおりである。破碎ガスのバグフィルター捕集後の繊維数濃度は大気環境基準を下回っていた。サンプリングした固形物(バグフィルターダスト、排水汚泥、不燃物等)はすべてアスベスト繊維は検出されなかった。

表 5-3-1 建設廃棄物資源化施設測定結果(処理物(不燃物))

試料採取場所		採取月日	
不燃物貯留ホッパ		2月9日	
定性分析結果	X線回折分析法	石綿の有無	無
		石綿の種類	-----
	分散染色法	石綿の有無	無
		石綿の種類	-----
石綿含有判定結果		石綿の有無	無
定量分析結果	石綿含有率(%)		0.3未満



2月9日	排ガス流量	湿り	46,800	53,700
	(m <sup>3</sup> (N)/h)	乾き	46,300	53,000
	水分量 (%)		1.2	1.2
	排ガス温度 (°C)		14	14
	排ガス流速 (m/s)		12.5	19.0

表5-3-2 排ガス中アスベスト分析結果

採取月日	試料採取場所		バグフィルタ入口		バグフィルタ出口	
	項目		①	②	①	②
2月5日	ASB繊維数濃度 (f/L <sub>(N)</sub> )		35	11	0.8	0.5
	吸引乾きガス量 (L <sub>(N)</sub> )		465.46	469.14	1115.60	1163.05
	排ガス流量	湿り	50,500		54,700	
		乾き	49,900		54,400	
	(m <sup>3</sup> (N)/h)					
	水分量 (%)		1.1		0.6	
	排ガス温度 (°C)		6		6	
排ガス流速 (m/s)		13.1		18.8		
2月8日	ASB繊維数濃度 (f/L <sub>(N)</sub> )		29	43	1.8	1.2
	吸引乾きガス量 (L <sub>(N)</sub> )		505.65	499.67	915.18	991.70
	排ガス流量	湿り	50,100		55,800	
		乾き	49,800		55,500	
	(m <sup>3</sup> (N)/h)					
	水分量 (%)		0.7		0.5	
	排ガス温度 (°C)		6		6	
排ガス流速 (m/s)		13.0		19.2		
2月9日	ASB繊維数濃度 (f/L <sub>(N)</sub> )		23	13	1.6	0.3
	吸引乾きガス量 (L <sub>(N)</sub> )		573.39	559.54	864.47	875.91
	排ガス流量	湿り	46,800		53,700	
		乾き	46,300		53,000	
	(m <sup>3</sup> (N)/h)					
	水分量 (%)		1.2		1.2	
	排ガス温度 (°C)		14		14	
排ガス流速 (m/s)		12.5		19.0		

特記事項：①及び②は、並行測定時の識別番号とする。  
 繊維数濃度 (f/L<sub>(N)</sub>) は、ろ紙捕集試料及び水捕集 (インピンジャー捕集) 試料の合算値とする。

## C-2 小型家電破碎施設調査結果

### (1) 維状粒子数のリアルタイムモニターの検証

#### ア. アスベスト繊維の現場モニター技術調査

アスベスト除去工事現場や建設廃棄物資源化現場での不注意なアスベスト暴露を防ぐに

は、アスベストの現地におけるリアルタイムモニターが必要である。現在この様な目的で繊維状粒子の測定機器が開発されている。その現状の機器の情報収集を行い性能等をまとめた。既存発表データの調査結果では、作業環境等における繊維状粒子のリアルタイムモニターはアスベスト繊維数濃度(PCM法)と相関が高く利用可能であるとする報文が多い中で、いくつかの報告では実用には残された課題があり慎重な扱いが必要としている。

イ. 繊維状粒子数のリアルタイムモニターの検証

破砕ガス(集じん処理前)中の濃度をモニタリングするため次のような条件を持つ装置を選んだ。アスベスト以外の繊維状物質も検出すると考え 1000f/L 程度まで測定可能であること、内部が陰圧の状態であるので、ある程度の吸引量があること、レンタル可能な機種であることから、柴田科学㈱のファイバーモニター(F-1)を選定し、事前に他の一般廃棄物処理施設でのモニタリングを行い、破砕処理中に繊維状粒子を 0-360f/L のレンジで検出できることを確認した。

(2) 現地調査結果

ア. 処理対象物の調査

アスベスト繊維数濃度調査に供する処理対象搬入物 6.38t 中のアスベスト含有家庭用品の混入状況を確認した結果、アイロン、こたつ、電気アンカの 6 製品(うちこたつ 4 製品)からアスベスト(製品重量の 0.09~0.074%、全重量換算 5.29g)が検出された。ただし、処理対象小型家電全体に占める石綿の重量割合は  $8.3 \times 10^{-5}\%$  と非常に低いものであった。

イ. アスベスト繊維濃度調査

小型家電の破砕処理に伴うアスベスト調査結果は表 5-4-1~表 5-4-3 に示すとおりである。処理後の可燃物、不燃物、バグフィルタダストからはいずれもアスベストは検出されなかった。一方破砕ガスとして、バグフィルタ入口、出口での総繊維数濃度の測定の結果、1 回目入口 1.8f/L、出口 4.7 f/L、2 回目入口 0.52 f/L、出口 0.62 f/L といずれも微量だが入口、出口で同程度の濃度が検出された。また、作業環境濃度は粒度選別機周辺で繊維数濃度 1.0~1.4 f/L が検出されているが、労働安全衛生法の作業環境の管理濃度 150 f/L、大気汚染防止法の敷地境界の基準 10f/L をいずれも下回っていた。

表 5-4-1 小型家電破砕施設アスベスト調査結果(処理後物)

試料名及び試料採取場所	採取日	定性分析		石綿含有判定	定量分析
		X線回折	分散染色		含有率(%)
不燃物 不燃物貯留ホッパ	1月18日	無し	無し	無し	—
	2月1日	無し	無し	無し	—
破砕可燃物 可燃物搬出コンベヤ	1月18日	無し	無し	無し	—
	2月1日	無し	無し	無し	—

表 5-4-2 小型家電破碎施設アスベスト調査結果(排ガス)

採取日	1月18日		2月1日	
試料採取場所	バッグフィルター 入口	バッグフィルター 出口	バッグフィルター 入口	バッグフィルター 出口
繊維数濃度(f/L)	1.8	4.3	0.52	0.62
測定時間	11:22~15:00	11:25~15:00	10:23~15:05	10:23~15:05
排ガス流量 (m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h)	湿り	12,900	15,500	11,600
	乾き	12,900	15,500	11,600
水分量(%)	0.6	0.6	0.3	0.3
排ガス温度(°C)	7.0	4.7	7.0	7.0
排ガス流速(m/s)	11.5	6.0	13.9	10.3

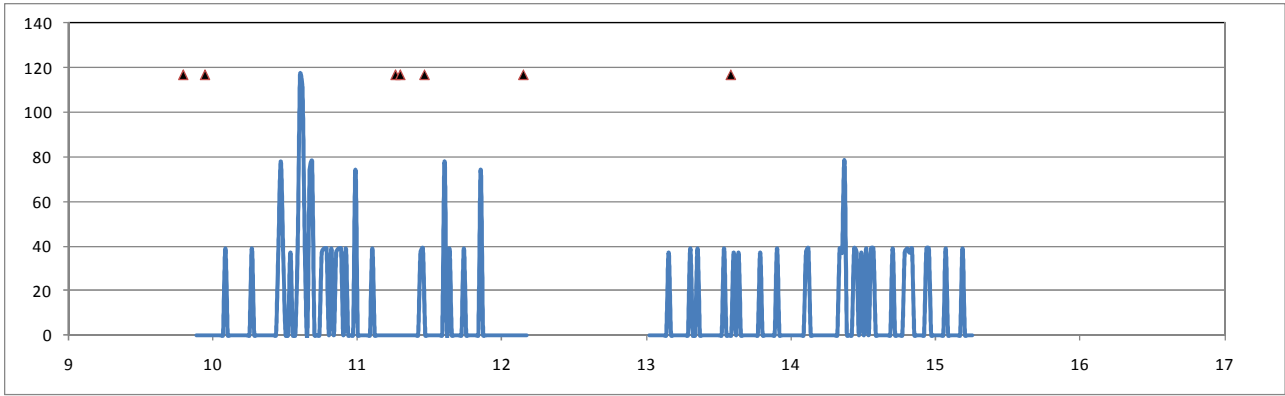
繊維数濃度(f/L<sub>N</sub>)は、ろ紙捕集試料及び水捕集(インピンジャー捕集)試料の合算値

表5-4-3 作業環境測定結果

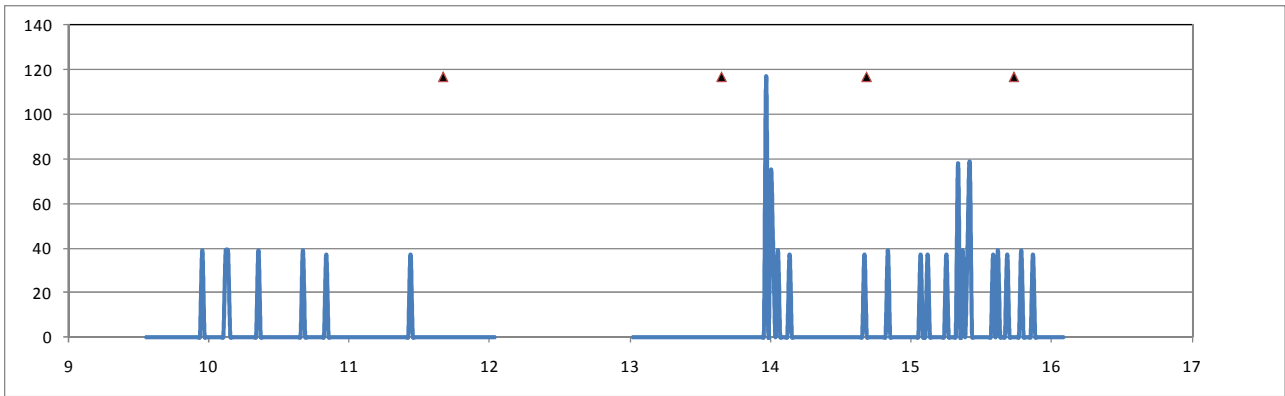
試料採取場所	採取日	繊維数濃度 (f/L)
受入ホッパ周辺	1月18日	0.23
	2月1日	0.23
粒度選別機周辺	1月18日	1.4
	2月1日	1.0

ウ. 繊維状粒子の連続モニタリング

運転時間中バッグフィルター入口で連続モニタリングした総繊維濃度は1回目 120f/L(平均 8.5 f/L)、2回目 0-120f/L(平均 3.0 f/L)といずれも分析値よりやや高めであるが、通常時 0 f/L で、濃度が上がった時も 1~4 分の短いピークとなっており、処理対象物の破碎は特定の製品廃棄物のときのみ繊維状物質を発生していると推定された。2回目は 14 時位までは搬入物の検査によりアスベスト含有と判定された製品を投入せず抜き出していたため、繊維状粒子のピークがほとんど出なかった。しかし 14:00 以降それ以外の小型家電を投入した際にピークが検出された。その製品廃棄物の投入状況を CCD カメラでモニターしていたが電気こたつの投入後に繊維状物質ピークがでており電気こたつヒータが関連している可能性が推定された。



(平成23年1月18日)



(平成23年2月1日)

図 5-6 ファイバーモニターチャート

### C-3 災害・津波廃棄物処理・資源化過程におけるアスベスト対策調査

#### (1) 震災・津波廃棄物処理・資源化過程におけるアスベスト管理の実態把握

##### ア. A市におけるがれき資源化作業とアスベスト対策

##### ①選別工程と選別種類

がれきは各集積場で重機と選別機により 8 種類に分けられた。

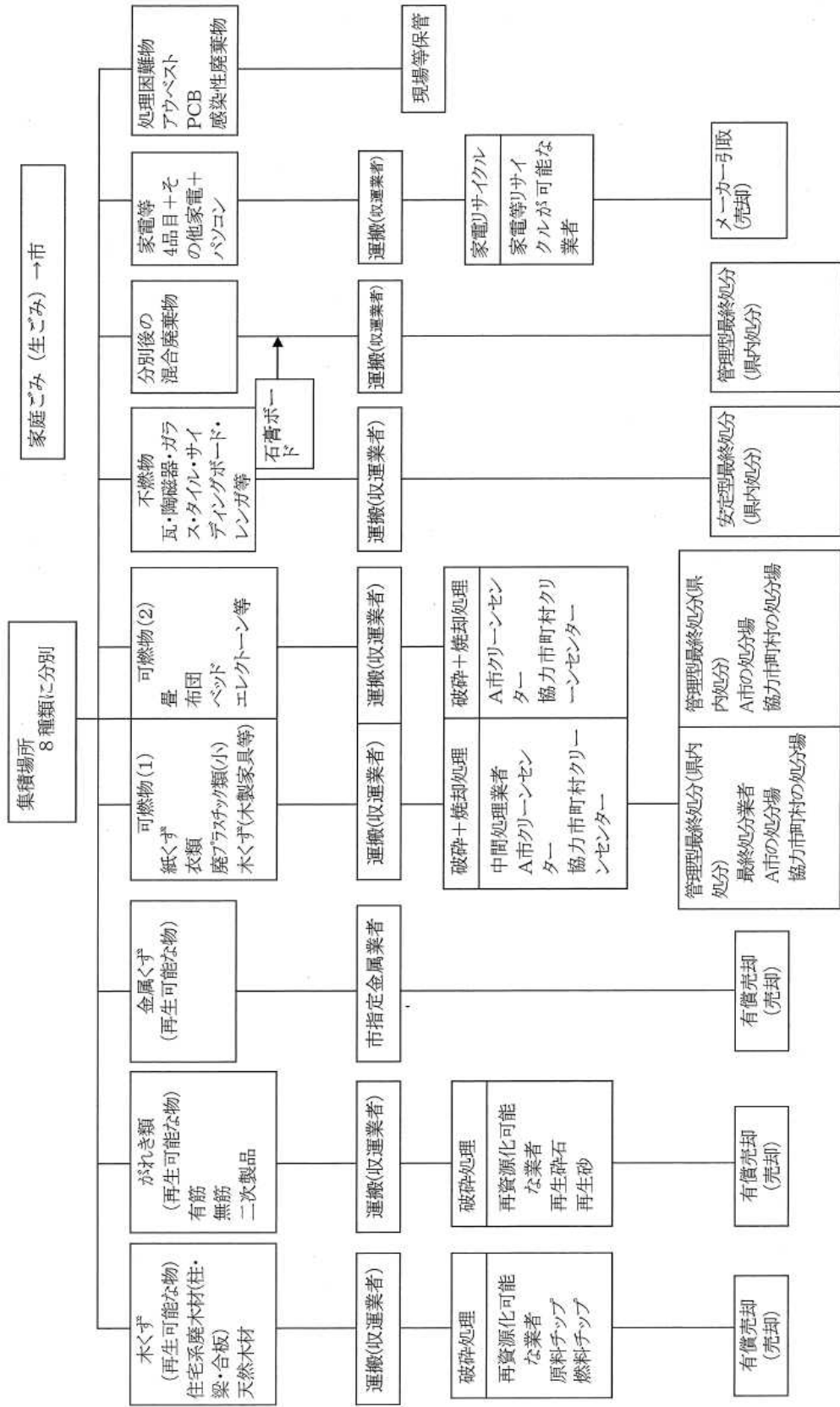


図 5-7 選別工程と選別種類

## ②選別調査結果

がれきの組成を明らかにするためがれき選別試験を実施した。

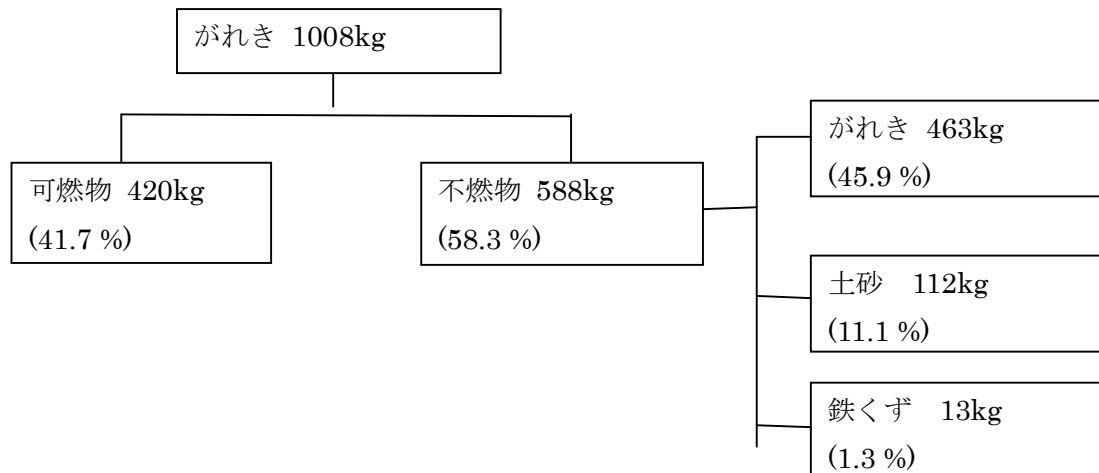


図 5-8 がれき選別試験結果(2011年7月7日実施)

## ③選別の工夫

がれきを有効利用するため、また最終処分量を減量化するため、選別により可燃物と不燃物さらに可燃物は焼却処理を行う。また、不燃物は粒度で3種類に分けた。

## ④労働安全衛生への配慮

マスクの着用、飛散防止用の散水

## ⑤資源物への配慮 有害物管理配慮

壁材、建材、屋根材とみなされる破片はアスベスト含有物として手選別で除去  
イ. O市におけるがれき選別処理場のアスベスト対策

## ①処理フロー

災害廃棄物の処理フローは図 5-9 のとおりである。

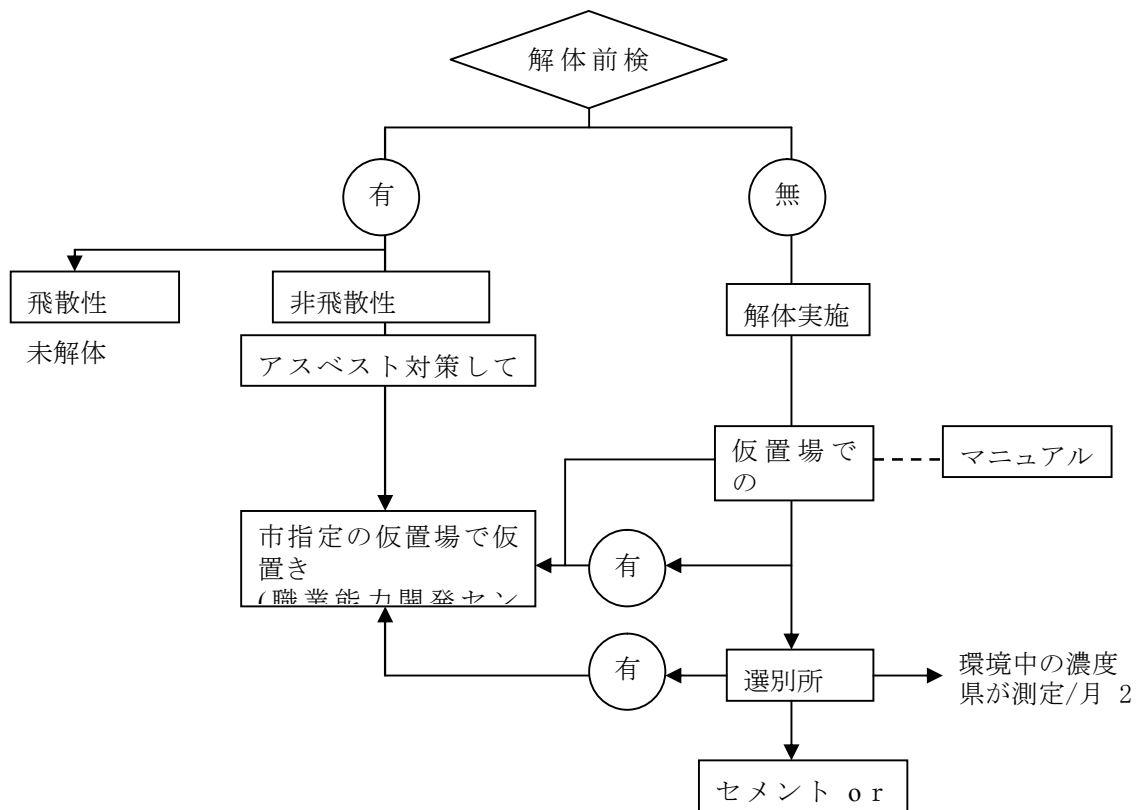


図 5-9 O 市がれき処理場の資源化処理フロー

可燃性混合ごみは破碎後に選別されセメント工場で原燃料として利用されている。不燃性混合物はサイズで 3 種類に選別されている。大きいサイズ(50mm 以上)は市内で陥没地の埋め戻し材として、中位のサイズ(20~50mm)は海岸埋め立て、土砂は土壌として利用予定されている。

- 可燃ごみセメント原燃料
- 不燃物 がれき 50mm 以上 市中陥没地の埋め戻し材
- 不燃物 がれき 20~50mm 場内埋め戻し用

②労働安全配慮

- 散水の励行、飛散防止フェンス、段幕の設置
- アスベスト定期モニタリング
- マスク着用、作業員教育

③資源物への配慮 有害物管理配慮

受け入れ時目視除去、アスベスト含有建材の見なし手選別を実施している。

(2) 震災・津波廃棄物処理資源化過程におけるアスベスト測定調査結果

ア. A 市における測定結果

①処理物等中のアスベスト濃度測定結果

表 5-5 A 市 処理物等中のアスベスト濃度

採取場所	a		b		c
アスベスト含有率(%)	処 理 物				
	不燃物残渣 < 20mm	不燃物残渣 20~40mm	不燃物残渣 < 20mm	不燃物残渣 20~40mm	不燃物残渣
MADEP 法+ CARB435 法	0.14	0.35	0.00	0.12	0.01

②選別されたアスベスト含有可能性のある建材の分析結果

表 5-6 A 市 選別されたアスベスト含有可能性のある建材のアスベスト濃度

採取場所	a	c
対象物	選別された Level3 建材	選別された Level3 建材
アスベスト含有率(%)	4	2

イ. O 市処理場における測定結果

①処理物等中のアスベスト濃度測定結果

表 5-7 O 市 処理物等中のアスベスト濃度

採取場所	二次処理場				
アスベスト含有率(%)	処 理 物			選別処理前(混合物)	
	土砂 < 20mm	土砂 20~50mm	可燃物 < 50mm	コンクリートガラ 系混合物	木材系 混合物
MADEP 法+ CARB435 法	0.04	0.13	0.01	0.52	0.02

②処理現場における気中総繊維濃度測定結果

表 5-8 処理現場における気中総繊維濃度

採取場所	総繊維粒子濃度(f/L)
風上(海岸付近)	ND
コンクリートガラ系混合物選別ヤード①	1.27
木材系混合物選別ヤード	2.00
コンクリートガラ系混合物選別ヤード②	2.00

### (3) 考察

震災がれきの処理・資源化においてアスベストやアスベスト含有建材等が混入し、その処理資源化の過程で飛散し労働現場でのアスベスト暴露による問題を引き起こしたり、資源化物の再利用にあたってアスベストの飛散拡散等が懸念されている。対策実態を把握するため2か所の震災がれき処理・資源化現場で具体的に施されたアスベスト対策の実態とがれき資源化の処理前後のものをサンプリングしてアスベスト含有濃度を測定した結果の考察は以下のとおりである。

ア. がれき処理現場での対策実態

現場でのアスベスト対策については法規制や各種ガイドラインに則った適切な対応がなされていた。また現場労働者のための作業環境対策についても所要の対策が取られていた。

しかし、がれきに混入してくるアスベスト含有建材等の破片類についてはみなし選別を实



施しているものの、その除去は大変難しい状況であった。

#### イ. がれき資源化処理物中のアスベスト濃度調査

この調査はサンプリング方法が極めて難しい。処理前のがれきは各種の組成と形状の混合物でありその代表試料を取るのには極めて困難であったが、不均質なものをサンプリングする廃棄物のサンプリング法(JIS)に則って行った。同様に破碎・選別後の各フラクションについても同様に JIS に則り 4 分法で縮分しながら 2 から 3kg の試料を採取した。

採取した試料はそのほぼ半分量を使い、アスベスト含有量の測定に行った。その方法は JIS A 1481 を用いてアスベスト含有建材と見なしうるかを判断して、見なし得た場合は運搬処理処分において規定された配慮を必要とされるものとして扱うのが一般的である。しかし、この方法は建材などの均一な性状のものには適用できるが、今回の様な極めて不均一なものにおいては測定サンプル採取誤差が大きすぎるため適用は困難と判断した。

ここで用いた分析法はアメリカで使用されている方法で MADEP Method(アスベスト含有建材の目視定量法)と CARB435 Method(偏光顕微鏡による繊維数計測)を組み合わせたものである。これはアメリカ合衆国でがれき中のアスベスト建材分析に実績がある方法である。その測定結果は以下のとおりである。

A 市がれき処理場の不燃物処理残さからは 0.00 から 0.35%のアスベスト含有が測定された。また、O 市がれき処理場の処理前のコンクリートガラ系混合物からは 0.52%のアスベスト含有が測定され、処理後の土砂(20 から 50mm の粒度のもの)からは 0.13%のアスベスト含有が測定された。

破碎資源化前のサンプルで 0.52%のアスベスト含有が測定されたのは、この方法がアスベスト建材破片を目視定量して求める方法であることから、比較的大きなアスベスト含有建材等の破片を含むサンプルで高い値が測定されている。また飛散性のものやすでに微小なサイズまで破碎されたアスベスト繊維については篩い目の 2mm アンダーとして別の方法(偏光顕微鏡法)により測定したが、どのサンプルからもアスベスト繊維は検出されなかった。

#### C-4 一般廃棄物及び産業廃棄物処理施設における石綿挙動の把握

分析した全試料から石綿繊維が検出された。検出された石綿繊維の例を図 5-10、5-11 に示す。石綿繊維数濃度を図 5-12、重量濃度を図 5-13 に示す。繊維数濃度と重量濃度の範囲は、集じんダストではそれぞれ 270~3900Mf/g (Mf/g=10<sup>6</sup>本/g)、11~610μg/g、破碎残渣ではそれぞれ 260~720Mf/g、0.54~39μg/g であり、一部の集じんダストでは、石綿含有の基準である 0.1 重量% (=1000μg/g)に近い濃度を示した。産業廃棄物処理施設で採取された試料は、一般廃棄物処理施設で採取された試料よりも高濃度であった。このことは、産業廃棄物の方が、より石綿含有廃棄物が混入しやすいことを示唆している。検出された石綿はほとんどがクリソタイルであったが、アモサイトが検出された試料もあった(図 5-3)。石綿繊維のサイズはほとんどが幅 0.2μm 未満であり、PCM では確認が困難なサイズであった。同一施設の集じんダストと破碎残渣の重量濃度を比較すると、集じんダストの方が濃度が高くなる傾向が見られた。このことは、受入物の破碎によって排ガス中に移行した石綿繊維がバグフィルタ等の集じん装置によって除去され、装置内ダスト中に蓄積されることを示唆しており、排ガス処理の観点からは石綿繊維が効果的に除去されていると言えるが、集じんダストを適切に処理する必要があるとも言える。また、集じん装置によって捕捉された石綿繊維の再飛散についても注意する必要がある。

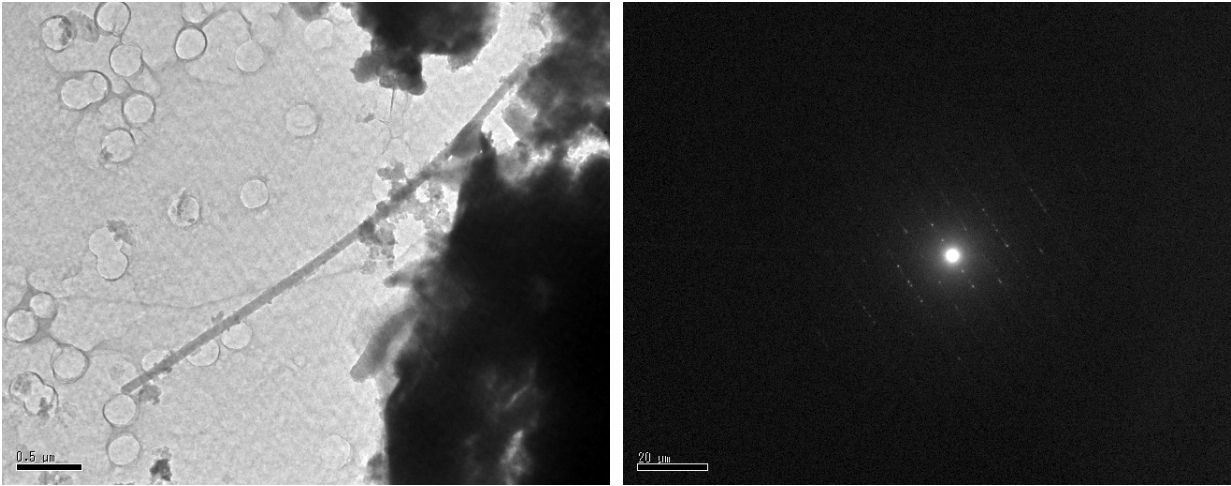


図 5-10 施設 A の不燃残渣中のクリソタイル繊維 (左：繊維の TEM 画像(30000 倍)、右：電子線回折像)

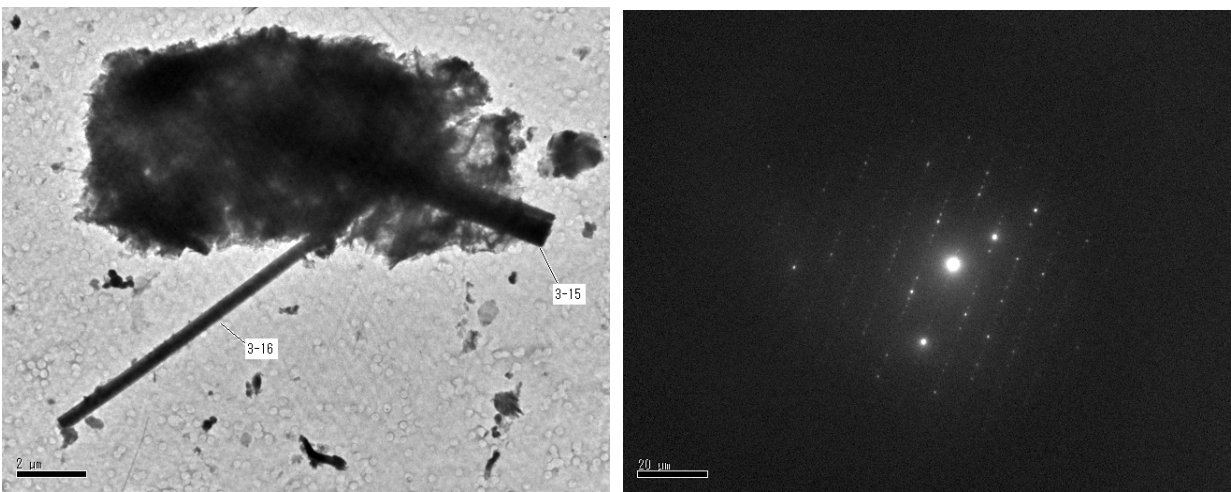


図 5-11 施設 E の集じんダスト中のアモサイト繊維 (左：繊維の TEM 画像(8000 倍)、右：電子線回折像)

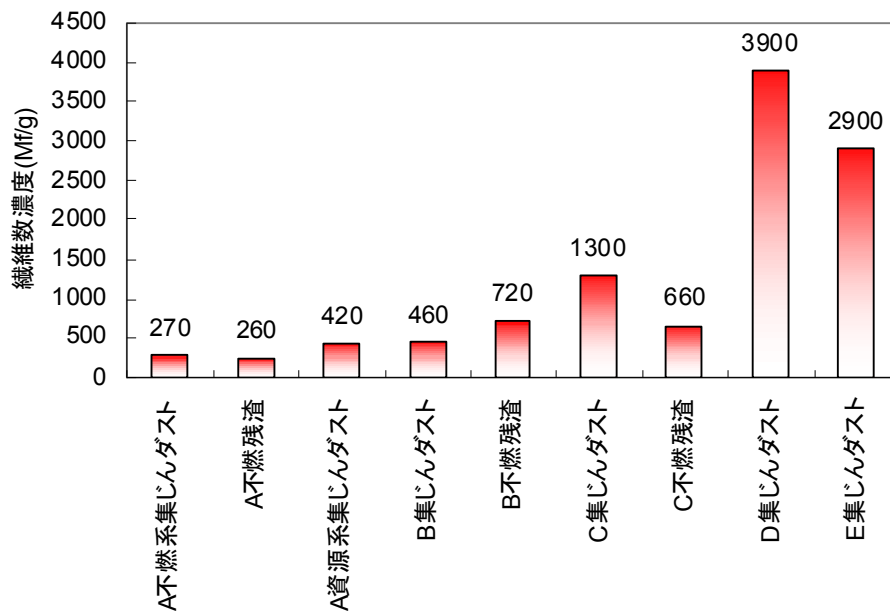


図 5-12 石綿繊維数濃度の分析結果

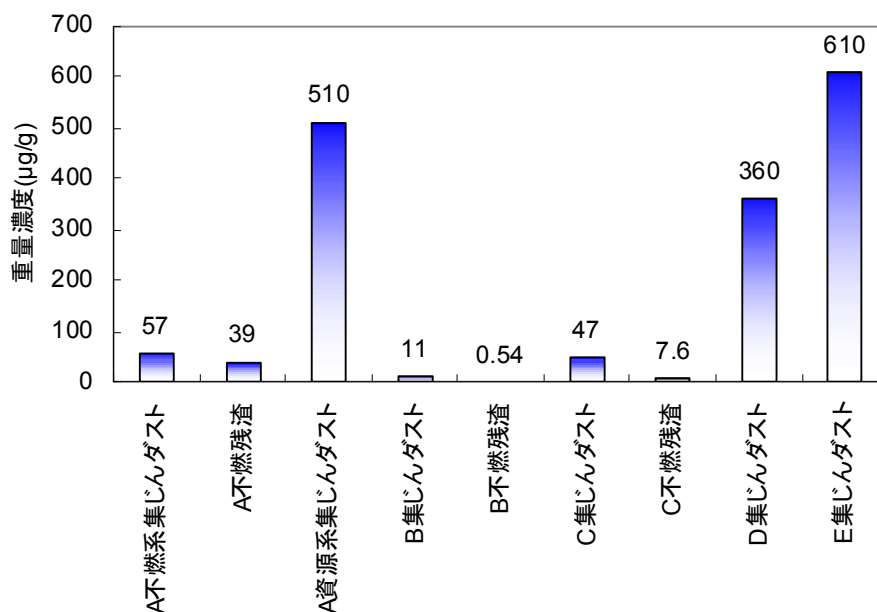


図 5-13 石綿重量濃度の分析結果

## D. 結論

### D-1 建設廃棄物の資源化及び処理処分実態調査

解体現場から出る混合廃棄物にはアスベスト含有物が含まれている可能性が高い。また、現場で発生した解体中清掃ダスト等はアスベストの含有が無いものとして扱われているケースがあるが、アスベストを含有する可能性は高い。本調査では、この様な観点から施設の破砕ガス等の排出口および集じんダスト等の集じん物および作業環境について調査した。

その結果、処理後の排気ガス中には基準を超えるアスベストは検出されなかった。また集じんダスト中にもアスベスト濃度は検出されなかった。建設廃棄物処理施設ではBFの設置と適正管理で施設から周辺環境へのアスベストの飛散は防止されていると考えられるが、処理後物中のアスベストの測定については、今後も引き続き調査を行い、より適切な資源化・処理手法を確立していくことが望ましい。

### D-2 小型家電破砕施設調査結果

搬入物の小型家電にアスベスト含有物がある程度混入していることが確認でき、特にアイロン、電気こたつ、電気アンカ等に含有している製品が混入する可能性があることがわかった。全体のアスベスト含有廃棄物割合が低いため、破砕ガス中の集じん器前後の値はわずかであった。またバグフィルタダストでも不検出であった。また、繊維状粒子の連続モニター装置で発生源の繊維状物質発生タイミングをモニタリングできる可能性が示せた。

### D-3 災害・津波廃棄物処理・資源化過程におけるアスベスト対策調査

A市およびO市がれき処理場でともに資源化処理後に復興資材に利用される可能性のある不燃物残さ中のアスベスト濃度が一部では0.1%を超えるものもあったことから、資源化にあたっては、基準に照らした判断ができるようロット代表サンプルをとり公定法で測定をしたうえで資源化等の利用に供すべきである。

O市がれき処理場の作業現場の大気中アスベスト濃度は1.27本/Lおよび2.0本/Lであったが、この値は厚労省が平成23年度に測定した結果の平均(2.37本/L)より低いものであった。しかし、作業現場では

飛散防止の散水や作業員へのマスク着用、衣服の着替え等を行うことによりアスベストの吸引を防ぐ配慮が必要である。

#### D-4 一般廃棄物及び産業廃棄物処理施設における石綿挙動の把握

一般廃棄物及び産業廃棄物処理・資源化施設において、破碎排ガス集じんダストや破碎処理残渣を採取して石綿を分析した。全ての試料から石綿を検出し、石綿繊維数濃度は 260～3900Mf/g、重量濃度は 0.54～610μg/g であった。産業廃棄物処理施設試料中の石綿は、一般廃棄物処理施設試料よりも高濃度であった。検出された石綿繊維のほとんどはクリソタイルであり、位相差顕微鏡では確認が困難なサイズであった。

#### E. 参考文献

- 1) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律
- 2) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律施行令
- 3) 平成 13 年 6 月、環境省通知(環廃産 276 号)建設工事から生ずる廃棄物の適正処理について
- 4) 藤吉秀昭：一般廃棄物処理施設におけるアスベストの排出実態の把握、平成 20 年度廃棄物処理等科学研究費補助金研究報告書(K2051)、平成 21 年 3 月
- 5) 環境省：災害時における石綿飛散防止に係る取り扱いマニュアル、平成 19 年 8 月
- 6) Massachusetts Department of Environmental Protection, (June 15, 2007), “Draft MA DEP Sieve Method for the Determination of Asbestos Debris in Soil, DRAFT Revision 4.5”
- 7) Environmental Protection Agency, (July 1993), “Method for the Determination of Asbestos in Bulk Building Materials” , EPA/600/R-93/116
- 8) California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, (June 6, 1991), “Determination of Asbestos Content of Serpentine Aggregate” , Method 435

#### F. 研究発表

- (1) 山本貴士、貴田晶子、野馬幸生：一般廃棄物及び産業廃棄物処理施設における石綿繊維飛散実態の把握、第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会(金沢市、平成 22 年 11 月)
- (2) 山本貴士、貴田晶子、藤吉秀昭、小田原伸行：一般廃棄物及び産業廃棄物処理施設における石綿繊維飛散実態の把握、第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会(東京都、平成 23 年 10 月)