

## 迅速測定法の新規技術情報収集結果

### 1. 目的

2017年のアスベストモニタリングマニュアル改訂時から現在までの期間に発表されたアスベストの迅速測定法技術を網羅的に把握するため、文献調査を実施した。

### 2. 検索方法

- 検索単語：文献検索にあたり、下記検索単語にて検索を行った。
  - ① (measurement OR analysis) AND asbestos NOT mesothelioma
  - ② "fluorescence microscopy" AND asbestos NOT mesothelioma
  - ③ "real time" AND asbestos NOT mesothelioma
  
- 検索年代：2017-2021
  
- 文献の検索サイト：上記検索単語を使用し、下記サイトにて、文献検索を行った。検索単語に対する各サイトでの検索数を以下に示した。
  - ・CiNii Research で検索した結果：①48件、②3件、③0件
  - ・PubMed で検索した結果：①384件、②4件、③9件

### 3. 大気中アスベスト濃度測定方法に関する論文の選定

検索で抽出された文献の概要を読み、建材分析法や医療関係からの文献を除き、大気中アスベスト濃度測定方法に関する物のみを選定した。選定された論文は7本であった。

No.	測定手法	タイトル	筆頭著者
1	リアルタイムファイバーモニター	HY-微分型電気移動度測定装置と光散乱粒子計数装置を使用した繊維状物質のリアルタイム測定 (KOFAM)	Sungwon Choi
2	自動 SEM-EDS	アスベスト繊維の定量化のための革新的な自動 SEM-EDS 分析	Roberto Cossio
3	A-TEM と PCM 比較	アスベスト繊維への職業性ばく露の評価：分析透過電子顕微鏡分析と位相差顕微鏡との比較	Céline Eypert-Blaison
4	測定方法比較	アスベスト含有建築物の解体改修時立入検査に自治体を実施する大気中アスベスト濃度測定方法の検討	飯田裕貴子
5	蛍光顕微鏡	大気アスベストを迅速検査するための蛍光顕微鏡法の開発と自動化の試み	黒田章夫
6	AI-SEM	走査型電子顕微鏡と人工知能組み合わせた大気中総繊維数濃度測定により迅速で高精度な分析方法の開発	飯田裕貴子
7	DL-蛍光顕微鏡	蛍光顕微鏡画像と深層学習によるアスベスト検出	Changjie Cai

## NO. 1

英文 タイトル	Real-time measurement of fibers using an HY-differential mobility analyzer with an optical particle counter (KOFAM)
和文 タイトル	HY-微分型電気移動度測定装置と光散乱粒子計数装置を使用した繊維状物質のリアルタイム測定 (KOFAM)
出版年	2017
雑誌名	PLOS ONE
著者	Sungwon Choi, Kwangmyung Jang, Kyunghoon Park, Hyunwook Kim
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182119">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182119</a>
概要	<p>この研究では、KOFAM と名付けた光散乱粒子計数装置を備えた環状体の微分型電気移動度測定装置 (HY-DMA/OPC) の、繊維状粒子のリアルタイム計数に対するの適用性について検証した。</p> <p>HY-DMA によって他の粒子から分離された繊維状物質は、OPC (Optical particle counter) でカウントされた。KOFAM の性能を評価するために、従来の標準的手法である位相差顕微鏡法 (PCM) を用いて再現性、相対的な違い、決定係数、適合性などの観点において、KOFAM と PCM での計数結果を比較した。HY-DMA 内部流量の最適な流量比率は、試料空気：希釈空気で 1.6 : 1 であると決定されました。HY-DMA の PCM との一致率に関しては、どのタイプのアスベストで試験を行ったかに関係なく、電圧 500V 時において一致率が高かった。蛇紋石 (<math>R^2 = 0.89</math>) と角閃石 (<math>R^2 = 0.87</math>) の決定係数には高い相関関係が確認された。変動係数 (CV) に関しては、KOFAM は M7400AD および F-1 法よりも優れた性能を示し、PCM 法とほぼ差がなかった (KOFAM : 22.5%、M7400AD : 32.4%、F-1 : 88.8%、および PCM : 21.9%)。KOFAM 分析と PCM 分析の濃度測定値の間では、統計的に有意差は確認されなかった。結果より、KOFAM は従来の繊維測定方法の代替手段として優れていると結論付けられた。予備実験結果も、KOFAM を用いて大気中アスベスト濃度をリアルタイムで継続的に測定できることを示している。</p>

## NO. 2

英文 タイトル	Innovative unattended SEM-EDS analysis for asbestos fiber quantification
和文 タイトル	アスベスト繊維の定量化のための革新的な自動 SEM-EDS 分析
出版年	2018
雑誌名	Talanta
著者	Roberto Cossio, Carlo Albonico, Andrea Zanell, Silvia Fraterrigo-Garofalo, Chiara Avataneo, Roberto Compagnoni, Francesco Turci
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.07.083">https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.07.083</a>
概要	<p>重要なポイント</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自然界の様々な母岩におけるアスベスト定量のための自動 SEM-EDS 解析</li> <li>・自動画像処理は、UICC (Union for International Cancer Control) クロシドライト繊維の最大 94%を特定する。</li> <li>・この技術は、様々な種類のアスベストの識別を可能にする。</li> <li>・生産性とデータ品質の両面で劇的な改善が想定されている。</li> <li>・定量測定は、1 サンプルあたり 2 時間未満で完了する。</li> </ul> <p>エネルギー分散分析を併用した走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) は、無機繊維の形態と元素組成の両方を区別できる唯一の手頃な分析技術である。SEM-EDS は、自然のマトリックス (例えばオフィオリ酸塩) を交配する際にアスベストを定量化するために実際に必要とされるが、時間がかかり、オペレータに依存し、フィルター表面上の繊維の確率分布に強く依存する。分析時間/コストとメソッドの感性のバランスは、フィルターの約 0.5%しか分析されず、結果の統計的有意性に大きな影響を与える。感度と精度を向上させ、生産性を高めるために、SEM-EDS によるアスベスト繊維の自動定量測定が提案されている。この方法は、最初に粒子形状を特定し、後に EDS でそれらの化学組成を決定し、分析時間を短縮できる。本検討は 4 つのアスベスト標準品でテストされ、繰り返し測定値の相対的な誤差は 10%未満であった。検討した自動測定法は、非常に低いアスベスト含有量も定量的に評価した。</p>

## NO. 3

英文 タイトル	Assessment of occupational exposure to asbestos fibers: Contribution of analytical transmission electron microscopy analysis and comparison with phase-contrast microscopy
和文 タイトル	アスベスト繊維への職業性ばく露の評価：分析透過電子顕微鏡分析と位相差顕微鏡との比較
出版年	2018
雑誌名	Journal of Occupational and Environmental Hygiene
著者	Céline Eypert-Blaison, Anita Romero-Hariot, Frédéric Clerc, Raymond Vincent
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1412583">https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1412583</a>
概要	<p>2009年11月から2010年10月まで、フランス労働総局は、分析透過電子顕微鏡（A-TEM）を使用して、アスベスト含有材料（ACM）の作業中のアスベスト繊維への職業的ばく露を特徴付ける大規模な現地調査を実施した。この研究の主な目的は、さまざまな職業環境でサンプリングされた個々のフィルターの空中アスベストの分析に A-TEM を使用する方法を確立し、その実現可能性を検証することであった。各サンプリングフィルターについて、A-TEM データを、WHO が推奨する技術である位相差顕微鏡（PCOM）によって得られたデータと比較した。労働者が ACM と接触した 29 の建設現場から合計 265 の結果が得られた。データは、ACM タイプと除去手法の組み合わせに応じて分類された。「ACM 除去技術」の組み合わせごとに、A-TEM データを使用して、短い、細い、及び WHO のアスベスト繊維に関する統計指標を計算した。さらに、呼吸保護装置（RPD）の使用を考慮してばく露を評価した。以前の研究と同様に、PCOM と A-TEM のカウント方法による結果の間に単純な相関関係は見つからなかった。アスベスト含有石膏ボードなどの一部の ACM は非常に高い濃度の粉じん量であり、一部の技術は ACM が処理したものに關係なくかなりの量の粉じんを発生した。これらの観察に基づいて、職業ばく露限界を測定及び管理するための勧告がなされた。ACM での作業中に取られる一般的な予防措置も提案されている。最後に、特に RPD と、この調査で評価できなかった内容について A-TEM によって測定された粉じん量に関する知見を継続的に取得する必要がある。</p>

和文 タイトル	アスベスト含有建築物の解体改修時立入検査に自治体を実施する大気中アスベスト濃度測定方法の検討
出版年	2019
雑誌名	環境と安全
著者	飯田 裕貴子, 村山 武彦, 錦澤 滋雄, 長岡 篤, 本多 将俊
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.11162/daikankyo.19G0301">https://doi.org/10.11162/daikankyo.19G0301</a>
概要	<p>本研究では、自治体が所有する設備で、迅速に、行政指導に必要な精度を備えた大気中アスベスト濃度測定方法を確立することを目的とした。</p> <p>アスベストモニタリングマニュアル（第 4.1 版）に記載されている測定方法 8 種の自治体での測定機整備状況、解体現場等への可搬性、測定条件、分析精度、測定機購入価格、分析上の利点と課題について分析実験結果と文献調査のデータを用い比較した。その結果、分析精度を維持しつつ位相差顕微鏡法の簡便化を検討することが最も有効と判断した。</p> <p>位相差顕微鏡法の捕集時間と計数視野数を変えた場合の測定所要時間と分析精度（検出下限値、測定誤差範囲）を検討した。特に迅速性が求められる場合の条件とされている捕集 30 分と計数 100 視野での測定所要時間は 2.2～4.7 時間、検出下限値 0.4 本/L、測定誤差範囲 1.6 本/L と算出された。条件検討の結果、捕集 2 時間と計数 50 視野のとき測定所要時間 2.8～4.1 時間、捕集 1 時間と計数 100 視野のとき測定所要時間 2.7～5.2 時間で、どちらも検出下限値 0.2 本/L、測定誤差範囲 1 本/L であった。</p> <p>上記の測定条件は、特に迅速性が求められる場合の測定条件と比較して、測定時間はほぼ同じ、分析精度はより高かった。アスベスト含有建築物解体改修時の立入検査において、迅速性が求められる場合に使用可能であると考えられる。</p>

和文 タイトル	大気アスベストを迅速検査するための蛍光顕微鏡法の開発と自動化の試み
出版年	2020
雑誌名	廃棄物資源循環学会誌
著者	黒田 章夫, 石田 丈典, 西村 智基
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.3985/mcwmr.31.345">https://doi.org/10.3985/mcwmr.31.345</a>
概要	<p>大気中に浮遊するアスベスト微細繊維の検出には位相差顕微鏡と電子顕微鏡を組み合わせた方法が使われる。しかし、この方法は時間がかかり、高度な技術とともに大型の装置を必要とすることから、解体現場等でのアスベスト検出には適さない。著者らは、アスベストを選択的に光らせる蛍光試薬を利用した蛍光顕微鏡法の開発を行ってきた。蛍光顕微鏡法による測定と、電子顕微鏡法による測定を実施して比較した結果、両方法による測定結果は高い相関性を示すことが判明した。2017 年、本方法は解体現場等におけるアスベスト漏えいの検査法として、アスベストモニタリングマニュアル（第 4.1 版）に掲載された。また一方、現場での蛍光顕微鏡法の利用を促進するために、野外での利用に耐えうるような可搬型蛍光顕微鏡を開発した。本装置と大気サンプリング/染色装置を利用した蛍光顕微鏡法は、解体現場で 1 時間以内に結果を出すことが可能である。著者らは現在、人工知能を搭載したアスベスト繊維解析ソフトウェアを利用して蛍光顕微鏡法の完全自動化を行っている。</p>

## NO. 6

英文 タイトル	Development of rapid and highly accurate method to measure concentration of fibers in atmosphere using artificial intelligence and scanning electron microscopy
和文 タイトル	走査型電子顕微鏡と人工知能組み合わせた大気中総繊維数濃度測定により迅速で高精度な分析方法の開発
出版年	2021
雑誌名	Journal of Occupational Health
著者	Yukiko Iida, Kenji Watanabe, Yusuke Ominami, Toshiyuki Toyoguchi, Takehiko Murayama, Masatoshi Honda
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.1002/1348-9585.12238">https://doi.org/10.1002/1348-9585.12238</a>
概要	<p>繊維幅 <math>0.2 \mu\text{m}</math> 以下のアスベストが中皮腫の発生に影響する可能性が報告されている。しかし、現在の大気中アスベスト濃度の主要な測定方法である位相差顕微鏡法は、原理的に繊維幅 <math>0.25 \mu\text{m}</math> 以上のアスベストしか確認できていない。</p> <p>本研究では、フィルターに捕集した繊維径 <math>0.05-3 \mu\text{m}</math> のクリソタイルを対象として、走査型電子顕微鏡法による計数に人工知能画像認識システム (AI) の適用を試みた。</p> <p>クリソタイルを水分散後フィルターろ過し、大気中クリソタイルの模擬サンプリングフィルターを調製し、走査型電子顕微鏡の倍率 1 万倍・加速電圧 5 kv にて 108 画像撮影した。3 人の分析者がそれぞれ 108 枚画像の計数を行い、アスベスト様形状物質の模範解答計数結果を作成した。108 枚のうちの 25 枚の画像を用いて AI に教育を施した。教育後、撮影した 108 画像中のアスベスト様形状の物質を AI に計数させた。AI による計数結果と、3 人の分析者により作成された計数結果とを比較し、87.9 % が一致した。</p> <p>走査型電子顕微鏡の倍率 1 万倍でアスベストモニタリングマニュアル (第 4.1 版) が指定する倍率 1500 倍と同様の面積を観察する場合、教育した AI の予想所要時間は 5.4 時間、分析者による観察の場合の予想所要時間は 251 時間であり、大幅な分析所要時間の短縮が期待できる。結論として、AI-SEM は従来行われてきた分析手法 PCM 及び SEM と比較して、より高い分析精度と迅速さを有し、かつ PCM よりも細い繊維も含めて計数することが可能である。</p>

英文 タイトル	Asbestos Detection with Fluorescence Microscopy Images and Deep Learning
和文 タイトル	蛍光顕微鏡画像と深層学習によるアスベスト検出
出版年	2021
雑誌名	Sensors
著者	Changjie Cai, Tomoki Nishimura, Jooyeon Hwang, Xiao-Ming Hu, Akio Kuroda
掲載 URL または DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/s21134582">https://doi.org/10.3390/s21134582</a>
概要	<p>蛍光プローブは、様々な種類のアスベスト(蛇紋岩族と角閃石族)を検出するために使用することが可能である。しかし、以前に開発したソフトウェアを使用した繊維カウントでは、低濃度の繊維サンプルでは正確に検出できなかった。機械学習の技術による画像解析、特に畳み込みニューラルネットワーク(CNN)は、多くの分野に広く適用されている。本研究の目的は、(1)アスベスト繊維数濃度0~50本/Lの範囲での蛍光顕微鏡(FM)画像データベースを実験室で作成すること、(2)アスベストを正確に検出するための最先端の物質検出 CNN モデルである YOLOv4 の適用性を判断すること、である。アスベスト繊維が含まれる蛍光顕微鏡の画像を撮影し、画像内の個々のアスベスト繊維にラベル付けを行った。GTX 1660 Ti グラフィックスプロセッシングユニット(GPU)を使用し、アスベストにラベルを付けた画像を用いて YOLOv4 モデルへのトレーニングを実施した。結果は、蛍光アスベストの形態を学習する YOLOv4 モデルの優れた性能を実証した。閾値 0.5 (mAP@0.5) の平均精度は、国立労働安全衛生研究所(NIOSH)繊維計数法 7400 を基準として、0.4%±96.1%であった。以前アスベスト繊維の計数に用いたソフトウェア(Intec/HU)と比較して、YOLOv4 は、より高い正解率(0.997 対 0.979)、非常に高い適合性(0.898 対 0.418)、再現率(0.898 対 0.780)、F 値(0.898 対 0.544)を示した。加えて、YOLOv4 は Intec/HU と比較して、低濃度のアスベスト繊維(&lt;15 本/L)が含まれる画像の解析において高性能を示した。従って、YOLOv4 と組み合わせた FM 法は、アスベスト繊維の検出と、他の非アスベスト粒子とアスベスト繊維の識別において極めて優れている。</p>

#### 4. まとめ

No.	測定手法	評価
1	リアルタイムファイバーモニター	これまでのリアルタイムファイバーモニターよりも分析精度が高く、PCMにより近い結果が得られるとの報告。アスベスト原料を試料として検証を実施しており、アスベスト以外の粒子が混在した解体作業現場の環境でも高い精度で分析が行えるかは、今後の検証報告を待つ必要がある。
2	自動 SEM-EDS	画像解析技術を SEM 分析に組み合わせ、最初に粒子形状を特定し、後に EDS でそれらの化学組成を決定することで、分析時間を短縮できる。アスベスト原料を試料として検証を実施しており、アスベスト以外の粒子が混在した解体作業現場の環境でも高い精度で分析が行えるかは、今後の検証報告を待つ必要がある。
3	A-TEM と PCM 比較	アスベスト含有建材を取扱い作業現場でのサンプリングを行い、PCM と A-TEM とでの分析結果比較を行った報告。結果はこれまで同様 PCM と A-TEM との結果には単純な相関は見られなかったとのこと。新規技術開発についての論文ではない。
4	測定方法比較	アスベストモニタリングマニュアル（第 4.1 版）に記載されている測定方法 8 種の自治体での測定機整備状況、解体現場等への可搬性、測定条件、分析精度、測定機購入価格、分析上の利点と課題について分析実験結果と文献調査のデータを用い比較し、どの測定方法が自治体の立入検査において適しているのかを検証した論文。新規技術開発についての論文ではない。
5	蛍光顕微鏡	現在までの蛍光顕微鏡法開発の過程について書かれている。前半に記載されている内容は、既にアスベストモニタリングマニュアル（第 4.1 版）に反映されており、後半に記載されている内容は、論文 7 の内容だと思われる。
6	AI-SEM	人工知能と SEM を組み合わせることで、PCM で観察される繊維よりも細かい繊維径 $0.05\text{--}3\mu\text{m}$ のクリソタイルを計数対象とし、分析時間の短縮と分析精度の向上について検証した報告。標準クリソタイルを試料として用いており、アスベスト以外の粒子が混在した解体作業現場の環境でも高い精度で分析が行えるかは、今後の検証報告を待つ必要がある。
7	DL-蛍光顕微鏡	蛍光顕微鏡法に危害学習での画像解析技術を組み合わせた報告。ソフトウェアに YOLOv4 モデルを使用し、低濃度のアスベスト繊維 (<15 本/L) 画像の解析においても高性能を示した。さまざまな解体集現場での現場の大気じんを用いて検証を行っており、実用化に向けた検証が進んでいる。

## 5. アスベストモニタリングマニュアルへの追記について（案）

2017年～2021年の期間での文献調査結果から、従来の顕微鏡法に新しい技術である人工知能や機械学習による画像解析を組み合わせることで、より分析精度高く迅速に分析結果を得る手法の開発が始まっていることが判明した。しかし、いずれも開発段階であり、アスベストモニタリングマニュアルに記載する段階ではないと思われる。今後も引き続き情報収集が必要である。