

論文審査の結果の要旨

氏名 井上 靖雄

本論文は5章から構成されている。

第1章では、まずアスベストのもつ物性面での特徴を整理し、我が国における利用と規制の歴史に触れ、そして現在におけるアスベスト問題の特徴を述べている。その中から、繊維数計数の公定法となっている位相差顕微鏡を用いた目視観察による計数法(PCM法)の問題点を指摘し、計数法の自動化によってその解決の可能性があることを示し、自動計数システムの開発を本研究の目的として導出している。

第2章では、観察視野数と計数精度の関係について議論している。計数操作では一般に、計数値の相対標準偏差(RSD)は計数値の $1/2$ 乗で与えられることが知られており、気中アスベストの場合においても、計数される繊維数が多いほどそのばらつきは小さくなる。しかしこれまでのPCM法では、作業環境のような高濃度環境で得られるサンプルを人が目視で計数することを前提に、50視野を上限にランダムに視野選択することとされており、一般環境のような低濃度に適用するには不十分であると考えられた。そこで本章では、低濃度な一般環境であっても、十分な精度で計数を可能とするために必要となる観察視野数を、モンテカルロシミュレーションを用いることで理論的に推定している。具体的には、フィルタ上の分布としては、偏りなくランダムな分布(均一分布)と、より現実的に中央に偏在させた分布(中央分布)を二通り与え仮想的なサンプルを想定し、目視観察と同じ面積の正方形領域を観察視野(仮想視野)と考え、この仮想視野を最大2,000視野までランダムに計数する試行を繰り返すことで、濃度を0.1、0.5、1、5、10 f/Lと変化させたときの計数結果のばらつきを推計している。その結果、理想的な均一分布を想定した場合より、現実的な中央分布を想定した方がばらつきは大きくなることが確認された。また、測定法として許容されるばらつきを、NIOSHや環境庁通達に見られるように20%と考え、フィルタ上の分布として均一分布を想定した場合、5 f/L程度までの高濃度な環境であれば50視野の観察でそのばらつきを20%程度に抑えることが可能であるが、0.5 f/L程度の一般環境では理想的な計数条件下であってもばらつきを20%程度に抑えるには、300視野程度の多視野観察が必要であることを示している。これまで考量されていなかった低濃度環境で、多視野観察が必要であることを定量的に論じ、それを実現するためにも自動化が必要であることが述べられている。

第3章では、位相差顕微鏡を用いた観察操作のうち、視野を移動させ、フォーカスを調整するという機械的な操作の自動化の実現について述べている。システムは位相差顕微鏡に視野移動のためのXY自動ステージを顕微鏡のステージに合わせて改造し装着し、3CCDカメラとオートフォーカスコントローラを装着した。同時にCCDの画像信号はコンピュータに送られる。捕集物が比較的少ない気中アスベスト標本のフォーカスの調整

は、PCM 法の顕微鏡観察で最も技量を要する操作であり、繊維計数の大きな誤差要因と考えられている。本章では、一般的なオートフォーカスアルゴリズムをベースに、気中アスベストのサンプルに適したフォーカスアルゴリズムを考案し、実験室で作製されたサンプルや実際のアスベスト除去現場で得られたサンプルで、熟練者と遜色のない精度でフォーカスを調整できることを実証的に確認している。

また、アスベスト観察用の 40 倍の位相差対物レンズは焦点深度がおよそ $0.5\mu\text{m}$ と非常に浅いため、正しい焦点位置であってもフィルタ上に斜めに存在するような繊維では、繊維の一部にしかフォーカスが合わず、正しい繊維像を画像として取得することが困難である。この問題に対応するために、本章では深度合成技術を利用することで、フォーカス位置の上下の $0.2\mu\text{m}$ ごとに 30 枚の画像を取得してこれを合成し、一枚の画像に繊維全体を再現可能としている。既存の技術を適切に融合してアスベストの顕微鏡観察に適用することで、形状が不定で一般に困難と考えられる位相差顕微鏡による気中アスベストの観察の自動化を実現している。

第 4 章では、CCD カメラで撮影し合成された画像から繊維を認識、計数する画像処理アルゴリズムの構築について述べている。画像処理によって計測を行うには、通常、対象物の認識と計測の二つの課題が存在するが、本アルゴリズムでは市販の汎用画像処理ライブラリを活用することでこれらの課題に込んでいる。従来技術では、対象物の認識のために、位相差画像の輝度情報から画像中の全ての繊維に対して繊維認識のクライテリアとなる輝度をただ一つ決定していたため十分な精度が得られなかったが、本アルゴリズムでは「エッジ」の概念を用いて局所的な輝度情報から局所的に繊維の外縁部の認識を行うことで、柔軟な繊維認識を実現している。さらにエッジが断片的に認識された場合には、適切な条件でエッジを接続することで、連続した繊維の外縁部として正しく認識させている。また、明瞭なエッジと不明瞭なエッジの 2 段階に分けてエッジの認識を行うことで、繊維認識の精度を向上させている。一方対象物の計測は、必要な情報が長さや幅といった単純な情報であるため、画像処理ライブラリの機能によって容易に実現されている。構築されたアルゴリズムを用いて、 $100\sim 5,000\text{ f/L}$ という広い濃度範囲のサンプルを用いて熟練者による目視計数結果と比較することで、アルゴリズムの妥当性や適応性が十分に確認されている。

第 5 章では、上記をまとめ PCM 法の自動化が実現されたと同時に、熟練者に依存し、精度管理が困難で、技術の継承といった問題を有している PCM 法の標準化への一歩を開くものであることが述べられており、単に既存の技術の自動化にとどまらず、今後の社会的貢献も期待される論文であるといえる。

なお、本論文の第 2 章は、山本 尚理、丸喜 勝、小西 淑人、柳沢 幸雄の各氏、第 4 章は、山本 尚理、柳沢 幸雄両氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となつて解析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（環境学）の学位を授与できると認める。