

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月1日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560585

研究課題名（和文）

ニューラルネットワーク手法を組み込んだ浮遊アスベスト自動計数システムの構築

研究課題名（英文）

Construction of airborne asbestos fibers automatic counting system incorporated the neural network technique

研究代表者

井上 義雄 (INOUE YOSHIO)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：60203262

研究成果の概要（和文）：本研究では、大気中の浮遊アスベストを対象とした繊維数濃度自動測定システムを構築した。本システムは、画像解析とニューラルネットワークの手法を用いて、アスベスト繊維と非アスベスト繊維を区別する。この区別基準は、繊維の幾何学的形状が用いられていたが、その基準に偏光情報を追加した。従来法では、形がよく似たアモサイトとガラス繊維を区別することは困難であったが、本システムによって高い信頼性で区別することができた。

研究成果の概要（英文）：An automated system to measure the fiber concentration of airborne asbestos fibers in the atmosphere was constructed in this study. The new technique is able to distinguish between asbestos fibers and non-asbestos fibers by using image analysis techniques and neural network concepts. It is difficult to distinguishing Amosite fibers and Glass fibers by the conventional method, which use geometric information of the fibers for the identification process. The efficiency and the accuracy of identifying asbestos fibers by the new method were improved by adding polarization information to the identification process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：アスベスト、繊維状物質、画像処理、自動計測、位相差顕微鏡、偏光、ニューラルネットワーク

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

現在、一般的に使われている石綿モニタリング手法としては、位相差顕微鏡（以下、PCM: Phase Contrast Microscope）法がある。これは、大気塵をサンプリングしたフィルタに透明化を施して位相差顕微鏡試料を作製し、肉眼で計数を行うという方法である。PCM法の長所として、他の光学顕微鏡に比べて微細なものまで識別することができる、比較的簡単な装置で計数できる、長きにわたるデータの蓄積がある、といった点が挙げられる。反面、人的負担が大きく計数に長時間を要するために、実際に除去現場などで用いる場合には迅速性に欠ける。また、計数者によって計数値が異なるなどの再現性等が問題視され、信頼性の低下が指摘されている。他の計数法としてPCM法と併用した分散染色法、偏光顕微鏡法、電子顕微鏡法、X線回折法などが挙げられる。分散染色法は、対象物がそれぞれ固有の屈折率をもつことを利用した同定法であり、屈折率を調整した浸液に浸すと石綿の種類によって異なった色になるのを利用して同定を行うが、浮遊石綿のような微細な石綿の色は変化が認識できない場合がある。偏光顕微鏡法は石綿と偏光板の相対的な位置関係により石綿の色や明るさが変化することを利用して同定を行うが、個々の石綿に対して偏光板の位置を合わせる必要がある、実用的な測定は難しい。電子顕微鏡法はエネルギー分散型マイクロアナライザー（EDXMA: Energy-Dispersive X-ray Micro Analyzer）を装備すれば、粒子個々の元素分析が可能となり確実な同定ができる。しかし、装置が高価であり研究用の計測に使われる場合もあるが、実用的な測定は困難である。X線回折法は定性・定量分析ができるとされているが基本的には結晶構造の違いにより固有のX線回折スペクトルが得られる定性分析用であり、精度の高い定量分析はできない。したがって同じ結晶構造をもつ繊維状鉱物と非繊維状鉱物の違いを評価することはできない。即ち、他の測定法は形状を考慮した計数法であるのに対しX線回折法は形状評価を伴わない重量法であり、従来から実施されている疫学調査で用いられている計数法との測定値の換算係数が明確でなく両者の測定結果を比較することができない。また、定量する場合 30~40mg の粉じんを必要とし、建材中の石綿濃度を測定する以外にはあまり用いられていない。PCM法よりも計数に長時間を要する、計数装置が高価である上に持ち運びに適していないといった問題点がある。

最近では、バイオ分子がアスベストに選択

的に結合するのを利用して、アスベストの同定をしようとする方法が考案されている。この方法はバイオ分子が非アスベストと結合しないという保証が確立していない。つまり必要条件是満たしているが、十分条件は満たしていないといえる。また光エネルギーの吸収量から対象物を同定しようとする方法によりいくつかの計測法が考案されている。一例として、近赤外線吸収スペクトルからアスベストを同定する方法があり、この原理に基づいて計測器が製品化されている。これは建材中のアスベストを計測する目的で作られており小型軽量である。さらにレーザーラマン分光法を応用したアスベスト同定法が開発されつつある。顕微鏡の視野内の対象物に細く絞ったレーザー光を照射し、そこから発せられるラマン散乱光を分析し同定するが、今のところ分光装置の小型軽量化に課題があるのと高価な装置となるため、研究用の域にとどまり実用化の域には達していない。

本研究ではPCM法の優位性を認めた上で、位相差顕微鏡による計数時に肉眼で行うのではなく、自動的に計数できるシステムを提案した。システムには石綿計数熟練者の石綿判定時の知識（コツ・ワザ）を取り入れるために、人間の脳における神経回路をモデル化したニューラルネットワーク（以下、N-N）・アルゴリズムを用いることとした。なお、石綿には蛇紋石系のクリソタイルと角閃石系のアモサイト、クロシドライト、アンソフィライト、トレモライト、アクチノライトなどの種類があり、日本国内で主に使われていたのは、クリソタイル、アモサイトである。アモサイトとクロシドライトの判別は熟練計数者でも相当困難であるので、本報ではアモサイトに代表させた。また、トレモライトの日本国内での使用が一部で取り糺されているが、測定基準が定まっておらず、本報では取り上げていない。

2. 研究の目的

現在の日本においては、大気中に浮遊するアスベスト繊維濃度測定自動化への期待は大きく、実用的な自動測定法の構築は急務の課題である。1950年代から1970年代半ばにかけて建設されたビルには多量の吹きつけアスベストが使用され、国交省の試算によると今後10年から20年後には解体のピークを迎える。従来のアスベスト繊維濃度測定法は人的操作が多く、測定結果の客観性・再現性等の諸問題が指摘されている。これに代わる測定法は未だ開発されていないため、ヒトの脳神経細胞の伝達機能をモデル化したニューラルネットワーク・アルゴリズムと画像

処理手法を用いたアスベスト繊維の自動計数システムを構築することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、アスベスト測定用位相差顕微鏡(ニコン製 ECLIPSE80i+位相差装置 PH-21)、高解像度デジタルカメラ(OHCL/SX910)を使用し、自動計数システムは可搬性を考慮し、ノート型 PC 上に構築するものとする。また、本研究の対象を次の項目に大別して実施する。

- (1) 教師用試料の作製：針状の角閃石系アスベスト(アモサイトで代表)、繊維状の蛇紋石系アスベスト(クリソタイル)とアスベスト類似繊維(ガラス繊維、ロックウール、動植物系の天然繊維等)である非アスベストを対象に実施する。アスベスト系は標準試料を用い、鉱物系や天然繊維等の非アスベストは一般建家の室内、事務室、工場の浮遊粉じんをろ過捕集する。
- (2) 画像サンプリングにおける画像合成法の開発：位相差顕微鏡の XYZ ステージ制御系ソフトの作成を行う。PCM の倍率が高く、被写界深度いわゆる焦点が合う範囲が狭いため視野全体に焦点が合った Z 方向の画像の合成方法を開発する。また、繊維状物質の消光角測定のための自動回転アナライザー装置の作製及び制御ソフトの作成を行う。
- (3) 特徴抽出及び特徴量計測アルゴリズムの開発：現在採用している 10 種に加え、消光角情報を基にしてアスベストと非アスベストのグループ分けを検討するとともに、他の有効な特徴を検討する。併せて、それらの特徴の数値化に対するアルゴリズムを検討する。
- (4) N-N 判別及び学習過程の構築及びその高速化の検討：学習に必要な教師信号の作成を行う。併せて、中間層のユニット数の最適化、学習過程における収束状態の安定化及び高速化の検討を行う。

各研究者の役割を図 1 に示す。位相差顕微鏡像の CCD カメラによるデジタル画像化の他に、ステージの高速制御の検討も行う。

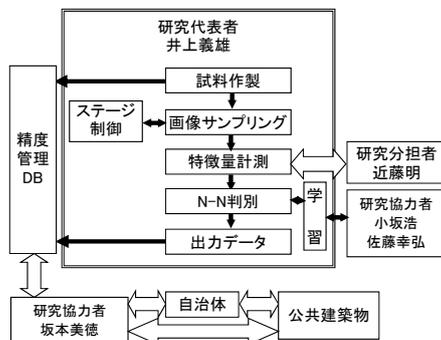


図 1 研究者の役割

試料作製に関しては、公共建築物解体及びアスベスト除去工事現場における飛散アスベスト採取は研究協力者・坂本美徳(兵庫県環境研究センター・主任研究員)が担当する。非アスベスト試料作製は研究代表者・井上義雄が担当する。

N-N の入力情報としての特徴は、対象物の「長さ」、「幅」、「平均曲率」など幾何学的特徴に関する 7 種、「輝度の分散」など光学的特徴に関する 3 種の計 10 種を採用する。これらの定量化に向けたアルゴリズムの開発及び自動回転アナライザー装置を用いた計測対象繊維の偏光情報(消光角等の測定)導入の検討を行う。併せて、他の特徴を抽出すべく熟練計数者へのヒアリングを実施する。この研究項目は研究代表者・井上義雄と研究分担者・近藤明が担当する。

N-N 判定及び学習に関するソフトは、操作のフレンドリー性に乏しく、手直しを予定している。また、学習に必要な教師信号(入力データと熟練計数者による判定結果)の作成には、アスベスト、非アスベスト、繊維状物質、非繊維状物質などバラエティーに富んだ計数対象となる物質の特徴量データが必要となる。中間層のユニット数は正確に見積もることはできず、試行錯誤的に決めなければならないが、ユニット間の結合荷重を解析することによりある程度の最適化は図れるものとする。更に教師信号とする画像データの普遍性を確保するための工夫も必要であろうし、安定な学習を得るための最適パラメータも決定する必要がある。また、正確な判定結果が求められるため、もし判定が困難な物質であるならば、成分分析を行ってでも正しく判定しなければならない。この教師信号作成には、研究代表者・井上義雄が担当する。熟練者による判定は、アスベスト計測の実務・理論に対する造詣が深く、我が国における代表的な計数者の一人であり、環境省の関連委員にも任ぜられている研究協力者・小坂浩(元兵庫県立健康環境科学研究所・主任研究員)が担当し、成分分析には分析機能付き走査型電子顕微鏡を用いた金属等の表面加工・分析の専門家である研究協力者・佐藤幸弘(元大阪府立産業技術総合研究所・主任技師)が担当する。

画像サンプリングを除いた研究対象項目は、計数対象アスベストを角閃石系の針状アスベスト(アモサイト)から蛇紋石系の繊維状アスベスト(クリソタイル)及びその混合したものへと拡大させる。クリソタイルは幾何学的形状もより複雑化すると同時に、位相差顕微鏡像においてもコントラストが弱く判別が困難になるため、別途対象物と背景を分離する二値化手法の再検討が必要になる場合が予想される。この場合には位相差顕微鏡像の Z 方向の画像合成での新たな対応を試

みる。また、新たな特徴の抽出や数量化の検討も行う。

PCM法とAFACS IIのクロスチェックやAFACS II独自の精度評価（正答率等）など自動計数システムの評価法の検討も行う。

4. 研究成果

(1) 計数システムの全体像

アスベスト繊維の位相差顕微鏡像を CCD カメラ経由でパーソナルコンピュータ（以下、PC）にデジタル画像として取得・保存しておいた複数の画像データをハードディスクから逐次読み出し、これらの画像に対して連続的に画像処理を行うことにより特徴量を求める。この特徴量を N-N 法の入力データとして、石綿の判定・計数を行う。なお、熟練計数者によって判定された複数枚の石綿画像・非石綿画像の特徴量と判定結果を教師信号として用い、予め学習をし、ニューラルネットワークを構築させておく。簡単に流れを述べると、

①画像の取り込み：CCD カメラ経由で位相差顕微鏡像と偏光顕微鏡像（ともにアナログ情報）を位相差顕微鏡のデジタル画像（以下位相差顕微鏡画像）と偏光顕微鏡のデジタル画像（以下偏光顕微鏡画像）として PC に取り込む。

②石綿繊維画像の前処理：幾何学的形状を求めるため位相差顕微鏡画像に対し、二値化処理、二値化後補正処理、細線化、ひげ除去の順に、PC 上で対象物の特徴量を円滑に計測できるようにするための画像処理を行う。

③対象物の特徴量計測：各対象物について、それを特徴付ける量を計測する。例えば、曲率・分岐点個数・幅・長さ・輝度分布・消光角などが挙げられる。

④判別・計数：あらかじめ学習させてある N-N に各対象物の特徴量を入れて、自動的に石綿か非石綿であるかを判別させる。

機器構成を以下に示す(図 2 参照)。測定用顕微鏡は位相差画像と偏光画像に対応できるように、ニコン社製ユニバーサルコンデンサレンズ LV-CUD U コンドライを装備したニコン社製位相差顕微鏡 ECLIPSE 80i に、本研究用に自作した偏光板駆動装置を付加したものを使用した。また、同位相差用対物レンズはニコン社製 CFI Plan DL 20×を使用した。試料の水平移動のための XY ステージは中央精機製ニコン 80i アスベスト用自動ステージ VVS-EL80i-00 を、垂直移動にはフォーカシングカプラ MSS-FM を使用し、XY 軸コントローラ及び Z 軸コントローラとして各々中央精機製 2 軸コントローラドライバ QT-CM2、フォーカシングユニット MSS-MFC を用いた。2 枚の偏光板（アナライザとポラライザ）の回転装置はシャフト-ギア伝達機構を採用し、中央精機製 2 軸コントローラドライバ QT-CM2 に

より制御した。CCD カメラは SONY 社製 XCD-SX910 を、PC はエプソン社製ノート型パーソナルコンピュータ Endeavor NT9500Pro を使用した。

一方、ソフトウェアに関しては、次のものを使用した。CCD カメラによる画像取り込み及びステージ制御には、XY ステージとフォーカシングカプラを同時に PC から制御できる専用ソフトに、偏光情報を取り込むための偏光板回転装置の制御専用ソフトを追加構築した(ライブラリー社製「AfacsCap Version 1.3」)。各種画像処理には、ライブラリー社製多機能汎用画像解析ソフト「Cosmos32」を基にした石綿計測専用ソフト(ライブラリー社製「Asbestos Version 1.1」)を構築した。N-N 法を用いた石綿判定用ソフトは、学習用及び判定用専用ソフト(ライブラリー社製「NNM Version 1.1」)として構築した。

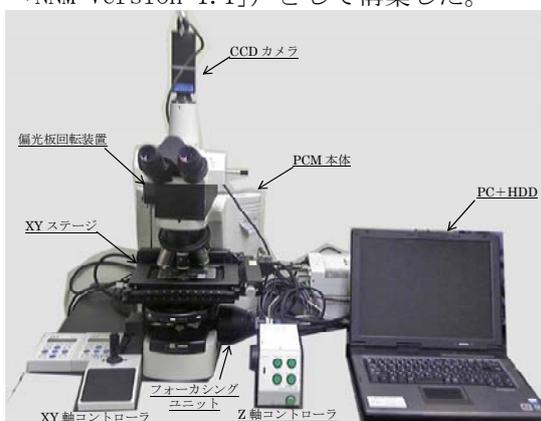


図 2 機器構成

(2) 画像サンプリング

位相差顕微鏡像を、CCD カメラを通して得るデジタル画像（以下原画像という）の画像サンプリングは、顕微鏡の焦点合わせやステージ移動を伴う。本研究では、これらの操作を自動制御することにより、画像選択の客観化及び画像サンプリングに要する時間の短縮を図ろうとするものである。ここでは、水平方向の視野移動、視野内の焦点合わせ、偏光情報取得のための画像サンプリングについて述べる。

①視野移動：肉眼計数の誤差の要因の一つに計数視野の選択の客観性がある。顕微鏡を覗きながら計数すべき視野を選択する場合、主観的な視野選択に陥りやすい。これを防ぐには、視野を移動する場合、顕微鏡を覗かず一定の間隔で視野移動させることが有効である。本研究では、XY ステージを各軸に取り付けたステッピングモータで移動制御している。PC により X 軸方向と Y 軸方向とも、各々測定視野数と視野間距離が指定可能である。②深度合成：顕微鏡を用いた計測では、高倍率下における顕微鏡像を対象としているので、被写界深度の浅さが問題になってくる。つまり、試料の計数領域全体に顕微鏡の焦点

が合っているか否かが問題になる。ここでは、1 試料あたり x 方向に 20 視野、 y 方向に 20 視野、合計 400 視野（各方向の視野数は設定可）中の石綿繊維を計数するが、必要に応じて予め z 方向にも幾層（層数は設定可）かの画像を取得しておき、視野内の分割エリアごとに焦点が合った層を選択した後、視野内のエリアごとの合焦点画像を結合する。

③偏光画像：本研究では、一般の偏光顕微鏡で使用されている偏光板を固定しステージを回転させるかわりに、ステージを固定し偏光板を回転させる方式を採用した。この方式は撮影視野を決めると以後試料は水平方向の移動がないため、CCD カメラと試料の相対位置の変化がない。また、試料が回転しないので、視野が変わらず、有効計測領域も変化しない。ただし、撮影はクロスニコルで行わなければならない、偏光板を回転させるにはポライザーとアナライザーの 2 枚の偏光板の相対位置を保ちながら、言い換えれば同期させて回転しなければならない。通常はアナライザーとポライザーを各々の駆動用ステッピングモータを用いて同期回転させればよい。しかし、本研究のようにできるだけ高速に始動、停止を繰り返し行う場合、脱調現象が発生し、しばしばクロスニコル状態が保てない場合が生じる。そのため、両偏光板をシャフトとギアで機械的に結合し 1 台のステッピングモータで駆動する方法を採用し、両偏光板の同期回転を実現した。

本研究では、オープンニコル状態で位相差顕微鏡による撮影視野と同じ視野でクロスニコルにし、1 度間隔で基準角度 0 度から 89 度まで偏光板を回転させ合計 90 枚の撮影を行い、偏光画像として取得した。このようにすれば、画像番号が基準画面からの相対回転角度に対応しているため、後の作業に大変便利である。

(3) 石綿繊維画像の前処理

画像前処理は幾何学的特徴量計測を円滑に行うためにも重要な作業である。輝物体除去、輝度値の反転、しきい値決定、二値化処理の順に行った後、輝物体除去、輝度値の反転、しきい値決定、二値化処理の順に行う。通常、対象物の幾何学的特徴量を求めるための形状解析をする場合には二値化処理を行う。二値化処理は、対象物の形状情報を得るための最も重要な処理の一つであり、画像解析が適切に行えるか否かを左右する。本研究の対象となる石綿繊維を含んだ画像は、ヒストグラムが単峰性を有する、対象物が背景に占める割合が低い、などの特徴がある。これらの特徴を抽出するために開発した正規分布法をしきい値決定法に用いた。また、物体の持つ特徴量を求めるためには、マクロな形状を認識する必要がある。そのために Hildich の方法を用いた細線化を施した。

(4) 石綿繊維画像の特徴量計測

一般大気中のアスベストの測定は、環境省発行のアスベストモニタリングマニュアル（第 4.0 版）に定められており、本研究では、PCM 法に準拠した測定法に基づいた測定法をとることにする。PCM 法は長さ、幅、アスペクト比を計数基準項目とし、いろいろな場合のルールが決められている。このようなアスベストか否かの判定に用いる計数基準項目を以下特徴ということにする。

本研究では、光学的特徴と幾何学的特徴はオープンニコル状態でサンプルされた画像を、偏光情報に関する特徴はクロスニコル状態でサンプルされた画像を用いた。光学的特徴として「二値化のしきい値と平均輝度の差（正と負）」、「輝度の分散」の 3 種類、幾何学的特徴として「分岐点個数」、「長さ」、「幅」、「幅の分散」、「アスペクト比」、「平均曲率」、「曲率の分散」の 7 種類、偏光情報に関する特徴として「消光角」、「偏光板回転角度に対する輝度差」の 2 種類を採用し、合計 12 種類の特徴に対する特徴量を画像計測により求めた。これら特徴量は、N-N での入力データとして使われる。

①光学的特徴：「二値化のしきい値と平均輝度の差（正と負）」、「輝度の分散」は原画像における対象物の輝度分布と二値化しきい値から求めた。

②幾何学的特徴：「分岐点個数」は対象物の全細線構成点から交差数の概念を導入して求めた。「長さ」、「幅」、「幅の分散」、「アスペクト比」、「平均曲率」、「曲率の分散」は対象物の二値画像と細線から求めた。

③偏光情報に関する特徴：「消光角」は対象物の細線から求めた長軸角度と消光時の偏光板角度から求めた。「偏光板回転角度に対する輝度差」は偏光板回転角度に対する対象物の輝度分布から求めた。

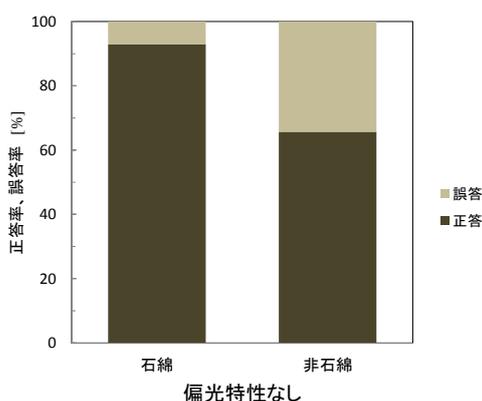
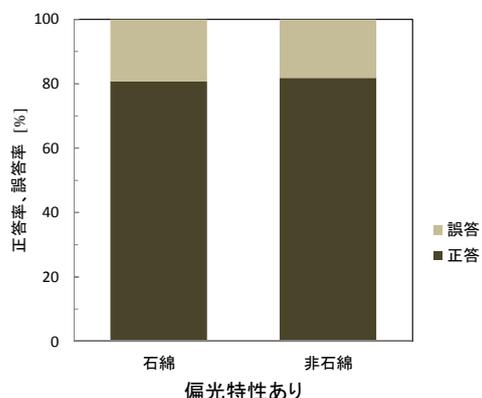
(5) ニューラルネットワーク・アルゴリズムを用いた石綿繊維判定

本研究では、石綿繊維判定に熟練者の石綿同定に関するノウハウを取り入れるため、ニューラルネットワーク・アルゴリズム（N-N 法）を採用した自動計数システムを用いた。ニューラルネットワークとは人間の神経細胞（ニューロン）のしくみを応用したネットワークモデルである。人工ニューロン（以下ユニットと呼ぶ）が、学習によってユニット間の結合荷重を変化させることにより、問題解決能力を持つ。ここでは教師あり 3 階層 N-N を構築した。

N-N の学習は、学習データを入力し、評価基準である教師信号を参照して結合荷重の値を調整し、再び評価を行う。このようなプロセスを繰り返して、次第に最適値に近づけていく。学習にはバックプロパゲーション（BP：Back Propagation）法を用い、伝達関

数にはシグモイド関数を採用した。光学的、幾何学的、偏光情報の特徴量を入力データとした。

幾何学的形状がよく似た角閃石系アズベスト（代表としてアモサイトを用いた）と断熱材として使用されるガラス繊維について、光学的特徴と幾何学的特徴を用いた場合と偏光情報を考慮した場合について教師信号（石綿：144、非石綿：123）で学習させ、その後試験信号（石綿：114、非石綿：99）を与えたときの判定結果を以下に示す。ここで、中間層のユニット数は7とし学習回数は20万回とした。また、正答とは石綿を石綿と判定した場合、非石綿を非石綿と判定した場合をいい、誤答とはその他の場合をいう。偏光特性あり、なしにおける全正答率はそれぞれ81.2%、80.3%となり、有意な差はなかったが、全正答率に対する石綿、非石綿の正答率の差は、それぞれ1.4%と34.0%となり、判定の信頼性に大きな差があることがわかった。



本システムの特徴は、

- 1) できるだけ従来法 (PCM 法による目視計数) の計数方法に沿ったアルゴリズムとし、長きにわたり蓄積されてきた疫学データの継続性を損なわないこと
- 2) コンピュータを用いた客観計測であり、人的負荷の軽減や計測値の再現性に優れていること
- 3) N-N 法を採用したことにより、計測熟練者

の「コツ・ワザ」を石綿判定に導入したことが挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

① 井上義雄、佐藤星河、近藤明：変更情報を考慮したニューラルネット法による石綿の同定、日本労働衛生工学会、2012. 11. 14-16、博多サンヒルズホテル

② 井上義雄、佐藤星河、近藤明：浮遊石綿の自動計数システムにおける偏光特性の導入とその効果、大気環境学会、2012. 9. 12-14、神奈川大学

③ 井上義雄、佐藤星河、近藤明：浮遊石綿の自動計測のための消光角測定、大気環境学会、2011. 9. 14-16、長崎大学

④ 井上義雄、佐藤星河、近藤明：浮遊石綿の消光角の自動計測、日本エアロゾル学会、2011. 8. 27-29、大阪府立大学

⑤ 佐藤星河、井上義雄、近藤明：偏光顕微鏡画像を用いた浮遊石綿の光学的特徴に関する研究、空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会、2011. 3. 17、大阪大学中之島センター

[その他]

ホームページ等

<http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeea/seeaiyl/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 義雄 (INOUE YOSHIO)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：60203262

(2) 研究分担者

近藤 明 (KONDO AKIRA)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：20215445

(3) 研究協力者

坂本 実徳 (SAKAMOTO MINORI)
兵庫県環境研究センター・主任研究員
研究者番号：20446818

小坂 浩 (KOSAKA HIROSHI)
元兵庫県環境研究センター・主任研究員

佐藤 幸弘 (SATO YUKIHIRO)
元大阪府立産業技術総合研究センター・主任技師