

偏光情報を考慮したニューラルネットワーク法による 石綿の判別成績の評価

佐藤星河, 井上義雄, 近藤 明

Performance evaluation of the asbestos counting system combined with
polarization information.

Seiga Sato, Yoshio Inoue, Akira Kondo

Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

It is well known that lung cancer, pneumoconiosis and mesothelioma are caused by asbestos. Japanese government decided to ban the production and the consumption of asbestos in 2006. But it is necessary to monitor asbestos, because there is a some possibility of asbestos escaping to the atmosphere.

Counting asbestos are carried out by experts, still there are the problems of costs, tiredness of experts and scatter of counting result due operational errors.

In order to solve these problems, we developed an asbestos counting system which can identify and count asbestos automatically. This system use image processing technology and Neural network algorithm which can reflect the expert's experience of counting asbestos.

Until now, this system use information which could only obtain by using phase-contrast microscope. But the problem of identifying the fibers which are similar to asbestos in terms of geometry, still exist.

So we added new information of extinction angle and brightness gap of polarization which could be obtained by using polarizing microscope to this system. Counting tests were carried out and the results indicated, that the reliability of the results obtained by counting tests were increased.

Key Words : asbestos, image processing, extinction angle, neural network algorithm,
polarization

石綿の吸入により、健康被害が生じることは知られている。石綿は建物の解体・除去現場において漏出する可能性があり、モニタリングが必要である。現在、モニタリングは計数者が肉眼で行っている¹⁾が、これは計数者の熟練が必要であることや、計測結果に個人

差があり、かつ肉体的負担がある等の問題点がある。そこでわれわれは位相差顕微鏡像からデジタル画像を取得し、画像処理とニューラルネットワーク・アルゴリズム (N-N 法) を導入することで熟練計数者の判別知識を取り入れた石綿の同定を行う自動計数システムを構築した。これは石綿同定の際、位相差顕微鏡で取得可能な情報 (幾何学的形状、輝度等) を特徴として利用していたが、幾何学的形状の似た非石綿繊維に対しては判別精度が低くなるという欠点があった。今回新たに偏光顕微鏡による偏光特性 (消光角等) を特徴として追加し、判別精度の向上を図り、結果として判別精度の信頼性が向上するに至った。

1. はじめに

われわれはニューラルネットワーク (N-N) 法を用いた浮遊石綿の自動計数システムを構築した²⁾。本報では、既報^{2,3)}における N-N 法の入力 (幾何学的・光学的特徴) に、消光角等の偏光特性を付加した場合と付加しなかった場合のシステムの判別精度を比較し、その有効性を検討したので報告する。ただし、既報^{2,3)}では位相差顕微鏡のみを使用したのに対し、本研究では位相差・偏光顕微鏡を使用した。この顕微鏡は、位相差顕微鏡モードと偏光顕微鏡モードを切り替えることが可能であり、状況に応じて使い分ける (以後、位相差顕微鏡モードを位相差顕微鏡、偏光顕微鏡モードを偏光顕微鏡と記述する)。測定対象は角閃石系のアモサイト ((公社)日本作業環境測定協会、石綿標準試料, JAWE231) と繊維状の非石綿繊維とした。

2. 実験方法

2.1 自動計数システムの機器構成

位相差・偏光顕微鏡 (ECLIPSE80i (ニコン製) に自作の偏光装置を付加) と CCD カメラ (XCD-SX910 (SONY 製)) により、幾何学的と光学的特徴量の計測に用いるオープンニコル状態の画像と偏光の特徴量の計測に用いるクロスニコル状態の画像を撮影した。XYZ 方向のステージ移動および深度合成と偏光板の回転はパーソナルコンピュータ (Endeavor NT9500 pro (セイコーエプソン製)) により自動制御した。

2.2 偏光板回転装置

本研究用に作製した偏光顕微鏡は、一般的なものとは異なった構造および特徴を有する。一般的な偏光顕微鏡は、対象物の偏光特性を観察するために試料の乗

ったステージを回転させるが、この方法では視野内にある全ての対象物を同一条件で同時に観察することができない。これを解消するために、われわれはステージを固定し、ステージの上下に配した 2 枚の偏光板を同期回転させることとした (図 1)。これにより視野内の全対象物の偏光特性を同時に観察できるようになった。

2.3 特徴および特徴量

各対象物に対し、それらの特徴付ける以下の量を計測した。幾何学的特徴として平均曲率・曲率の分散・分岐点数・長さ・幅・幅の分散・アスペクト比を、光学的特徴として、しきい値と平均輝度の差 (正負の区別あり)・輝度の分散、の合計 10 特徴を採用した。また、偏光に関する特徴として消光角と偏光板回転角度に対する輝度差の 2 つを採用した。前者は消光時の偏光板角度と対象物の長軸角の差の絶対値であり、後者は偏光板回転角に対する対象物の輝度分布の最大値と最小値の差とした。ただし、消光角を求める際の対象物の長軸角は 2.4.2 で述べる細線構成点座標から求めた。

2.4 消光角測定システム全体の流れ

消光角測定システムでは、偏光顕微鏡を用いて、オープンニコルとクロスニコルの両状態で、CCD カメラにより顕微鏡像を撮影する。オープンニコル状態による取得画像は、二値化、細線化等の前処理を行った後に対象物の位置、角度情報、輝度測定位置等を取得するのに、クロスニコル状態による取得画像は、偏光板を 0° から 89° まで 1° ずつ回転させた時の対象物の輝度分布を取得するのに用いた。消光角 ϕ は式 (1) で定義する⁴⁾。

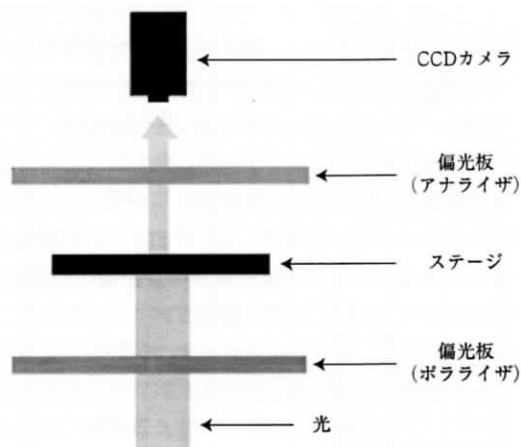


図1 偏光顕微鏡の構造

$$\varphi = |\theta - \theta'| \quad (1)$$

ここで、 φ ：消光角、 θ ：対象物の長軸角、 θ' ：石綿消光時の偏光板角度。

2.4.1 画像の前処理²⁾

1) 二値画像作成

二値化とは、背景と対象物を分離するのによく用いられる処理であり、ある一定の値(しきい値)を定め、それよりも大きな輝度をもつ画素に最大輝度値を、逆に小さければ最小輝度値を与える処理をいう。a) 輝物体除去→b) しきい値決定→c) 二値化処理、という順番に処理を行った。

a) 輝物体除去

画像中の高輝度を示す物体は、試料作製時に生じた気泡や、不純物である場合が多く、これを除去する必要がある。そこで、画像から輝度に対する画素数の累積相対ヒストグラムを求め、その上位1%の輝度値を補正輝度値とし、補正輝度値以上の値をもつピクセルを全て補正輝度値に置き換える。

b) しきい値決定

石綿繊維を含む画像は輝度のヒストグラムが単峰性を示し、繊維の画像全体に占める面積割合が少ないという特徴がある。このような画像のしきい値を求める場合に適したしきい値決定法として、正規分布法³⁾を用いた。

c) 二値化処理

求めたしきい値 k_i を用いて以下の二値化を行う。輝度値 k (0-255)に対して

$$k \geq k_i \text{ ならば } k = 255$$

$$k < k_i \text{ ならば } k = 0 \text{ とする。}$$

2) 二値画像後補正処理

二値化後の画像には、対象物以外の画素が対象物として含まれている場合が多いため、その不具合を解消することを目的に二値化後の画像に対して以下の補正処理を行う。

a) 閉口演算処理

対象物体の図形を膨張・収縮させ、外縁部に生じた小さな画素の欠損を埋める処理を行う。ここでは膨張と収縮を1回ずつ行った。この処理には対象の輪郭の凹凸が滑らかになる利点もある。

b) 穴埋め

対象物体の内部に生じた大きな欠損を埋める処理を行う。

c) 円形物体除去

円形度 R を式(2)により定義し、国際石綿協会が定めるアスベスト繊維の判別基準⁶⁾にそぐわない R が0.6以上のものを円形物体(非繊維)と見なし、あらかじめ除去を行った。

$$R = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (2)$$

ここで、 S ：対象物の面積、 L ：対象物の周囲長とする。

3) 細線化

線状の二値図形を芯線化する処理を細線化という。細線化において、処理後の図形は途切れたり、穴が開いたりしてはならず、処理後の図形は元の図形の幅の中心に来ることが望ましい。本報ではこの細線化に、計算機向きであるHildithの方法⁷⁾を用いた。

4) ひげ除去

細線が分岐点、交差点を有し、かつ分岐点、交差点から端点までの画素数が規定数以下の場合、その部分を「ひげ」と見なし除去を行った。ここでは、規定数を経験的に20とした。

画像処理前のオープンニコル状態での撮影画像を図2に、前処理を全て終えた画像を図3に示す。



図2 画像処理前 (アモサイト)

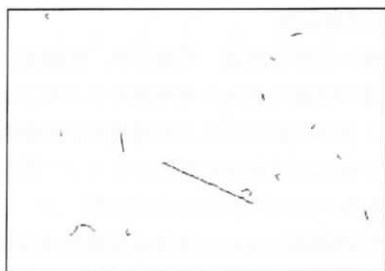


図3 画像処理後 (アモサイト)

2.4.2 石綿位置測定

石綿の位置を探索する際には、式(3)に示す交差数の概念⁸⁾を用いた。画像中の石綿を表すピクセルと、その周囲の8近傍ピクセルに対し式(3)を適用し、 $R_c = 1$ であった場合、そのピクセルを端点として検出する。

8近傍ピクセル $x_1 \sim x_8$ の位置と交差数 R_c の値に対する意味を、図4に示す。8近傍ピクセルとは注目するピクセルの周囲8方向のピクセルのことである。

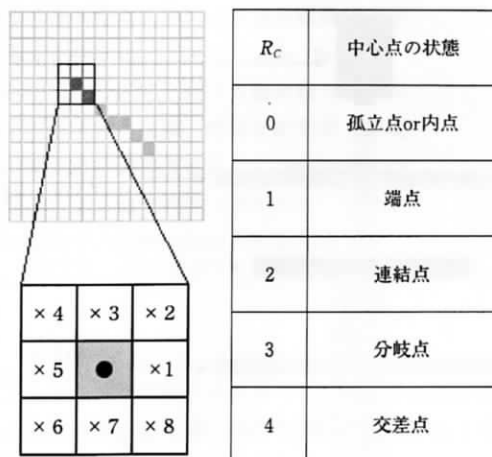
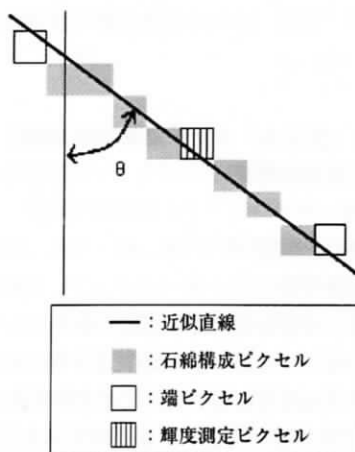
$$R_c = \sum_{k=1}^8 f(x_k) (1 - f(x_{k+1})) \quad (3)$$

($k = 1, 2, \dots, 8$) : 周囲8ピクセルの画素値を表す。ここで、画素が物体に属する場合、その画素値を1、背景に属する場合その画素値を0とする。

ただし、 $x_9 = x_1$ とする。

2.4.3 輝度測定位置と石綿長軸角の決定

まず画像内の細線化された石綿構成ピクセルの両端を交差数 R_c の定義により検出し、次にその片側端ピクセルから、1個ずつ構成ピクセルをカウントし、細線構成ピクセルの中点を輝度測定ピクセルとする。

図4 交差数 R_c の決定図5 石綿長軸角 θ と近似直線

また、視野の垂直方向に対する角度 θ を測定し、石綿の長軸角とする。石綿の構成ピクセルに対し、最小二乗法を利用して細線の一次式近似を行い、近似式の傾きから角度 θ を算出する(図5)。 a を直線の傾き、 b を切片とすると近似式は式(4)で表せる。

$$Y = aX + b \quad (4)$$

石綿長軸角 θ は式(5)で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} a \quad (5)$$

2.4.4 輝度測定

消光角の性質は偏光板を 90° 回転させる毎に繰り返して現れるので、偏光板をクロスニコル状態のままで 90° まで 1° 毎回転させて撮影を行った。撮影した90枚の画像に対し、輝度測定位置ピクセルの座標の輝度値をそれぞれ読み取り、偏光板回転角度に対する輝度分布図を作成する(図6参照)。消光時の偏光板回転角度 θ' は輝度の最低点から ± 19 個のデータ点を取り、最小二乗法により二次式近似を行い、近似式の最低点を示す角度を消光時の偏光板角度とする。また、この時の最高輝度値と最低輝度値の差の絶対値を、特徴の一つである偏光板回転角度に対する輝度差とした。

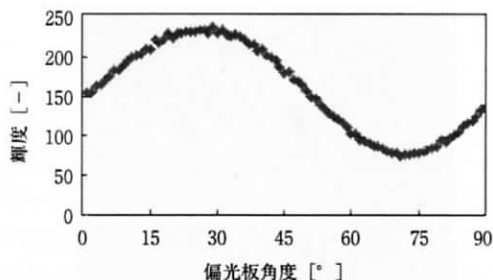


図6 偏光板回転角度に対する石綿輝度変化

2.5 N-N法⁹⁾

N-Nは神経細胞の信号伝達系を応用した情報処理モデルであり、既知である教師信号(t)と呼ばれる理想的な出力を外部から繰り返し与え、学習により各層間の結合荷重(W)を決定し、未知の入力(x)に対して教師の判断を模倣した出力(o)を得られるようにしたものである(図7にN-Nモデルの概略を示す)。

本研究では3階層型モデルを用い、各層のユニット(ニューロン)数は、入力層に10個(偏光特徴を加えた場合は12個)、中間層に7個、出力層に2個用いた。入力層には各種特徴量を入れ、出力層には学習時に教師信号として石綿か否かの肉眼による判断を入れ、誤差逆伝搬法により学習させた(図8に学習構造を示す)。なお、動作関数にはシグモイド関数を用いた。図8に示す行程を繰り返し行うことにより、学習を行う。本研究では、20万回学習を行い、結合荷重を決定した。教師信号として、アモサイト138個、非石綿繊維116個の計254個を、判別試験にはアモサイト114個、非石綿繊維99個の213個を使用した。非石綿繊維は、室内粉じんと、従来のシステムでは判別が困難であった、石綿と幾何学的形状が似ている断熱材の2種類を非石綿繊維として利用した。

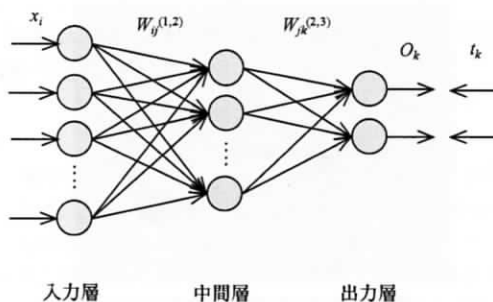


図7 N-Nモデル概要

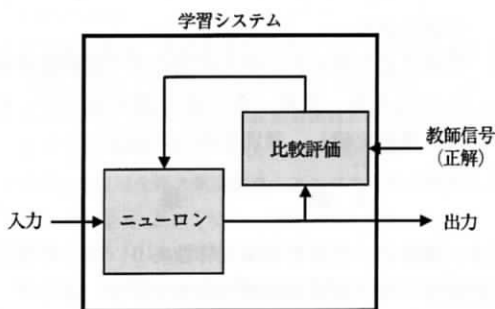


図8 学習構造

2.7 測定手順

測定手順をまとめると、以下のとおりである。

- ① 位相差顕微鏡による石綿繊維の特徴量測定
- ② 偏光顕微鏡による石綿繊維の特徴量測定
- ③ ①-②を非石綿繊維に対しても行う
- ④ ①-③で得られたデータに対し、目視により石綿/非石綿の判別を行う
- ⑤ ④のデータを教師信号と試験信号にランダムに選び、グループ分けを行う
- ⑥ 教師信号をN-Nに入れ、石綿/非石綿の判別

2.6 対象物

対象とした物体は、石綿がアモサイト、非石綿繊維が断熱材および室内粉じんである。それぞれ図9と図10に、クロスニコル状態下の偏光顕微鏡像を撮影した画像を示す。対象物の教師信号数と試験信号数を表1に示す。



図9 アモサイト

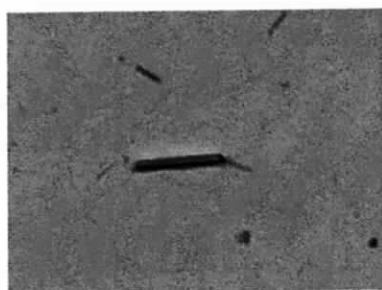


図10 非石綿繊維 (断熱材)

学習を行う

- ⑦ 学習により得られた結合荷重の元で試験信号をN-Nに入れ、石綿/非石綿の判別を行い、目視結果と比較し、判別成績の評価を行う

3. 結 果

表2、表3に、それぞれ偏光特性あり、なしの場合の試験信号に対する判別試験の結果を示す。ここで、正答とは石綿を石綿と判別した場合と非石綿を非石綿と判別した場合をいい、誤答とはそれ以外の場合を指す。また、石綿数に対する石綿を石綿と判別した場合数の割合を石綿の正答率とし、同様に非石綿数に対する非石綿を非石綿と判別した場合数の割合を非石綿の正答率とした。石綿と非石綿の正答率を加重平均したものを全正答率とした。括弧中の平均偏差率¹⁰⁾は、全正答率に対する石綿と非石綿の正答率の偏差の絶対値から求められる。ただし、試験信号の正解は本来未知なものであるが、ここでは判別成績を求めるため、教師信号と同様肉眼による判別結果を用いた。

表1 対象物の教師信号数

	教師信号	試験信号
石綿	138	114
非石綿	116	99
計	254	213

表2 試験信号に対する判別結果 (偏光情報ありの場合)

対象物	正答数	誤答数	正答率 [%]	全正答率 (平均偏差率) [%]
石綿	92	22	80.7	81.2 (0.673)
非石綿	81	18	81.8	

表3 試験信号に対する判別結果 (偏光情報なしの場合)

対象物	正答数	誤答数	正答率 [%]	全正答率 (平均偏差率) [%]
石綿	106	8	93.0	80.3 (16.9)
非石綿	65	34	65.7	

4. 考 察

偏光特性を導入した場合と導入しない場合の全正答率には大きな差は見られなかったが、個々の正答率を見ると前者の石綿と非石綿の正答率はほぼ同じなのに対し、後者のそれらには大きな隔りがある。そこで、全正答率の信頼性の指標として、平均偏差率を採用した。この指標は、全正答率に対する石綿あるいは非石綿における正答率のばらつきの程度を示すものである。偏光情報を導入した場合の平均偏差率が0.673%

であるのに対し、導入しなかった場合のそれは16.9%となり、その比は25を越す。このことは、偏光情報を導入することにより判別の信頼性が向上したといえ、偏光情報が判別材料として有効であることを示している。

一方、偏光情報を導入しなかった場合は、石綿の正答率は高いものの、幾何学的形状が似かよった非石綿は石綿と誤答され正答率は低くなっており、判別の信頼性は劣る。この原因の一つとして、overfitting¹¹⁾が考えられる。これは、N-N法の非線形動作によって発生するもので、学習データについての近似精度が過度に向上した場合、試験信号(未学習データ)に対する精度が悪くなる現象が生じる。今回の場合、石綿に対する過度の学習が行われた結果、石綿の正答率は93.0%と高率になった反面、非石綿に対する正答率は65.7%と低下した。

入力層、出力層のユニット数は、それぞれ特徴数、分類数であるが、中間層のユニット数を決定する方法は研究されているものの未だ解明されてはいない。一般的には、中間層のユニット数を増やすほど複雑な関数を近似できるが、overfittingの可能性が増大する、演算量が増大する等の問題があり、収束する必要最小限のユニット数にすれば、これらの問題点を回避できる。今回は予備学習として、中間ユニット数を50、24、15、7とし、5万回学習を行い全て収束したので、中間ユニット数を最小の7とした。

判別精度のさらなる向上には、教師信号として入力する情報の選び方や、消光角計測の改善が必要である。また、太さが1.5 μm以下の細い対象物は光量が少ないため、消光角の測定が困難なものが多くあった。これらの対象物に対しては、倍率や光量の増幅等の条件を最適化することによって測定精度の改善ができると思われる。

5. 結 論

本研究における石綿の自動判別システムにおいて、幾何学的形状が似かよった石綿と非石綿を判別するには偏光情報を考慮することにより、判別成績の一定の上昇を確認できた。今後は偏光特徴を取得する際の条件の最適化を行った上で、クリソタイル等のより複雑な形状の石綿に対しても消光角の測定が行えるようにシステムを改良する予定である。

謝 辞

本研究は科研費補助金基盤研究(C)(22560585, 研究代表者: 井上義雄)の助成による。

参 考 文 献

- 1) 環境省, アスベストモニタリングマニュアル(第4.0版), http://www.env.go.jp/air/asbestos/monitoring_manu/rev4_full.pdf, 2010: 1-2
- 2) 井上義雄他, ニューラルネットワーク法を用いたアスベスト繊維の同定, 日本労働衛生工学会抄録集, Vol. 48, 2008
- 3) 井上義雄他, 浮遊アスベスト繊維の自動計数-クリソタイル, アモサイトを対象として-, 大気環境学会講演要旨集, Vol. 49, 2008
- 4) 日本規格協会, 建材製品中のアスベスト含有率測定方法(JIS A 1481: 2008), 日本規格協会, 2008: 30
- 5) 井上義雄他, 繊維状粒子の顕微鏡画像解析のための2値化手法, エアロゾル研究, 第10巻, 第4号, 1995
- 6) 環境庁大気保全局大気規制課, アスベスト排出抑制マニュアル(増補版), ぎょうせい, 1986: 247-250
- 7) Hilditch, C. J., Linear skeletons from square cupboards, in Machine Intelligence IV (Meltzer, B. & Michie, D., eds.), University Press, Edinburgh, 1969
- 8) 田村秀行, コンピュータ画像処理入門, 総研出版, 1985: 72-73
- 9) 例えば, 市川絃, 階層型ニューラルネットワーク-非線形問題解析への応用-, 共立出版, 1993: 1-9
- 10) 堀川明, ランダム変動の解析増訂版, 共立出版, 1977: 58-60
- 11) 市川絃, 階層型ニューラルネットワーク-非線形問題解析への応用-, 共立出版, 1993: 53-56