

Title	大気中石綿繊維濃度の高精度・自動化測定法に関する研究
Author(s)	井上, 義雄
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3161873
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

大気中石綿繊維濃度の高精度・ 自動化測定法に関する研究

1999年4月

井上義雄

大気中石綿繊維濃度の高精度・
自動化測定法に関する研究

1999 年 4 月

井 上 義 雄

目 次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 石綿の歴史	1
1.1.2 石綿の定義	1
1.1.3 石綿の生産と消費	2
1.1.4 石綿と健康障害	7
1.1.5 一般環境への影響	8
1.1.6 石綿と法規制	9
1.2 石綿繊維濃度測定の実状と問題点	15
1.2.1 作業環境中の石綿の濃度計測	15
1.2.2 一般環境中の石綿の濃度計測	16
1.3 研究の目的と論文の構成	17
参考文献	21
第2章 肉眼計数による石綿繊維の濃度計測法	25
2.1 はじめに	25
2.2 石綿繊維の濃度測定法	25
2.2.1 計数試料作製法	26
(1) 石綿協会法	26
(2) ガイドブック法	29
(3) マニュアル法	29
2.2.2 石綿繊維の計数則	30
(1) 石綿繊維の形状による定義	31
(2) 計数則	31
(3) 石綿の計数例	31
2.3 肉眼計数による計数基準の計数者間の比較	34
2.3.1 比較試料の作製方法	35
2.3.2 計数者および計数方法	36
(1) 計数者	36
(2) 計数方法	36
2.3.3 比較結果	38
(1) 計数値と一致度係数	38
(2) 鮮明度と計数値	40
(3) 曲がり度と計数値	44
2.4 まとめ	48
参考文献	49
第3章 石綿計数過程の自動化システムの構築	51
3.1 はじめに	51
3.2 機器構成	51
3.3 自動計数システムで用いた計数基準	52
3.4 システム全体のアルゴリズムの概要	52

3.5	手動操作	54
3.5.1	照明強度の決定方法	54
3.5.2	原画像の取り込み・記録	57
3.6	自動計数における各処理過程のアルゴリズム	57
3.6.1	2値画像作成	57
	(1)輝物体除去	57
	(2)シェーディング補正	57
	(3)2値化処理	59
3.6.2	特徴量の計測	62
	(1)スムージング	62
	(2)細線化	65
	(3)セグメント化	65
	(4)特徴量計測	70
3.6.3	切断繊維の修復	71
	(1)修復アルゴリズム	71
	(2)修復判定条件	72
3.6.4	交差・分岐処理	74
	(1)交差処理	74
	(2)独立セグメント抽出	76
	(3)分岐処理	76
3.6.5	計数処理	77
	(1)計数判定	77
	(2)計数枠判定	78
	(3)粒子付着判定	78
	(4)偽繊維状物体判定	78
3.7	アルゴリズムの妥当性の検証	79
3.7.1	AIAの提示画像を使用した検証	79
	(1)単繊維の場合	79
	(2)枝分かれ繊維の場合	79
	(3)絡まった繊維の場合	79
	(4)粒子が付着した繊維の場合	80
3.7.2	自動計数と肉眼計数の比較検証	83
	(1)計数値と一致度係数	83
	(2)鮮明度と計数値	83
	(3)曲がり度と計数値	86
3.7.3	手動操作が自動計数結果に及ぼす影響	86
3.8	まとめ	88
	参考文献	89

第4章	微細粉じん除去および高繊維密度化試料作製法	91
4.1	はじめに	91
4.2	分級装置を用いたサンプリング法	91
4.2.1	分級法の特徴	91
4.2.2	分級装置の捕集理論	93

4.2.3	分級装置の性能試験	95
(1)	性能試験の概略	96
(2)	性能試験の方法	96
(3)	インパクト 2 段を使用した場合	98
(4)	インパクト 4 段を使用した場合	101
4.3	試料作製法	106
4.3.1	石綿の構造	106
4.3.2	熱処理	110
4.3.3	酸処理	111
4.4	試料作製手順	117
4.5	まとめ	117
	参考文献	119
第 5 章	一般環境における石綿繊維濃度の測定	121
5.1	はじめに	121
5.2	測定方法	121
5.2.1	測定地点の概要	121
5.2.2	測定日と気象状況	122
5.2.3	石綿濃度測定	126
(1)	粉じん捕集装置	126
(2)	試料作製	126
(3)	計数	126
5.2.4	風向風速測定	128
5.2.5	交通量測定	128
5.3	計数結果と考察	130
5.4	まとめ	138
	参考文献	139
第 6 章	結論	140
6.1	本研究のまとめ	140
6.2	今後の課題および展望	142
Appendices		143
参考文献		158
研究関連論文リスト		159
謝辞		162

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 石綿の歴史

石綿の使用に関する歴史は意外と古く、紀元前2500年頃に作られたフィンランドにおける焼き物の中の Anthophilite (直閃石) の発見にまで遡ることができる。また、スーダン南部からケニア北部にかけての地域では、石器時代に Amphibole (角閃石) が使用された形跡のあることが発見されている。1世紀前後のギリシャにおいては石綿製のナプキンとして使われ、4～5世紀のアテネではランプの芯に石綿が使われたとの記録がある。中国では紀元前4～6世紀ごろに早くも石綿を燈芯として使っている。古くから石綿の特徴の一つである紡織性が見出され、鉱物である石綿を織物として極々限られた社会の中ではあるが珍重されていた。¹⁾ また、日本においては1764年平賀源内が石綿を発見し、火浣布を織ったのが最初とされている²⁾。いずれも、19世紀までの長い歴史の中では、紡織性を有する石綿は布として織られ、主に燃えない布あるいは asbestos の語源の一つであるギリシャ語の $\alpha\sigma\beta\epsilon\sigma\tau\omicron\varsigma$ (消失しないの意味)³⁾ が示すようにランプなどの芯として上流階級の極一部で珍重されていたに過ぎず、現在のように多方面にわたって多量に使われだしたのは20世紀に入ってからである。従って、石綿の人体に及ぼす悪影響が問題になりだしたのは石綿の採掘現場や石綿製品の製造などの労働環境の分野からであり、特に一般環境の分野で石綿問題が顕在化し社会問題となりだしたのは20世紀も半ば以降のことである。

1.1.2 石綿の定義

石綿は鉱物の名称ではなく、鉱物が繊維状形態 (Asbestiform) で産出する場合の総称であり、工業で用いられる石綿の定義「Asbestiform をした鉱物を採掘、加工して得た工業原料」と鉱物学の定義「Asbestiform variety をした種々の鉱物を含む集合体の名称」とは一致していないように、石綿 (Asbestos) の定義は、定義する立場によって異なり⁴⁻¹⁰⁾、これを正確に答えることははなはだ困難である。そこで、まず始めに本論文で用いている石綿の定義を示す。本論文においては、石綿の定義として AIA (Asbestos International Association: 国際石綿協会) と同様な定義、即ち「NIOSH-OSHA Asbestos Work Group (NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health: 国立労働安全衛生研究所, OSHA: Occupational Safety and Health Administration: 米国労働省労働安全衛生局)⁴⁾ が定義した『石綿とは、クリソタイル (Chrysotile: 温石綿・白石綿), クロシドライト (Crocidolite: 青石綿), アモサイト (Amosite: 茶石綿), 繊維状トレモライト (Tremolite: 透角閃石), 繊維状アクチノライト (Actinolite: 陽起石), および繊維状アンソフィライト (Anthophyllite: 直閃石) と定義し、これらの Asbestiform が顕微鏡レベルでアスペクト比が3:1かそれ以上の粒子として確認された場合』に『線維幅が3 μm 以下』の条件を付加したもの」を採用した。この定義に従えば、『蛇紋石族 (Serpentine group) および角

閃石族 (Amphibole group) 鉱物のうち、顕微鏡レベルで Asbestiform をなす 6 種』となる。なお、NIOSH-OSHA Asbestos Work Group による石綿の定義は、British Advisory Committee on Asbestos の見解¹⁰⁾ともよく適合しているとされている。しかし、後述するように、現在までの日本における石綿の使用は Chrysotile, Crocidolite, Amosite に限られ、現実的には石綿をこの 3 種類に限定しても差し支えない。図 1-1 (a) に Chrysotile の顕微鏡写真と (b) に外観、図 1-2 (a) に Crocidolite の顕微鏡写真と (b) に外観、図 1-3 (a) に Amosite の顕微鏡写真と (b) に外観を示す。

1.1.3 石綿の生産と消費

現在の石綿の生産地は、旧ソ連のウラル地方、カナダのケベック地方、南アフリカの南部地方に大別され、この三大生産地で世界の石綿の 80% 以上が生産されている。この他ブラジル、アメリカ、ギリシャなどからも産出される。産出量の約 95% が Chrysotile で、Amosite が数%、Crocidolite は僅かである。世界の産出量は 1900 年頃から漸次増加し、1960 年代には急激に増加した。1970 年代から 1980 年にかけて年間総産出量は 500 万トンに達したが、その後減少し 1990 年には約 400 万トンになった。¹²⁾

日本国内における石綿の生産は、1941 年第二次世界大戦突入と同時に輸入が途絶えたため国内生産が急務となり、1944 年には約 13 千トンを生産した。しかし、現在では北海道中部で低品位の Chrysotile を年間約 2 千トン産出しているのみである。生産量は消費量に比べて極わずかな量であり、消費量のほとんどを輸入に頼っているため、日本の石綿輸入量は石綿消費量と見て大差ない。¹³⁾

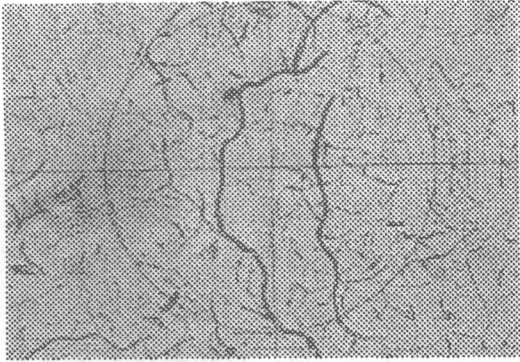
日本の石綿の年間輸入量を図 1-4 に示す。石綿の年間輸入量は戦前約 4 万トンに達し、戦中は一時途絶えたが、1960 年頃から世界の石綿産出量の増加を追うかのように急速に増加し、1974 年には年間輸入量が 35 万トンにも達した。オイルショック時には 20 数万トンから 30 数万トンを増減したが、1990 年代に入ってから減少傾向を示し、1997 年の年間輸入量は 17.6 万トン¹⁴⁾前年比 99.0% となっている。しかし、石綿の発ガン性が指摘され石綿の使用禁止が世界的世論のすう勢となって以来、アメリカでの石綿の年間消費量が最高の 80 万トンを示した 1973 年から約 10 年間で 1/4 ほどに急減した¹⁴⁾のに比べて、日本における石綿の年間消費量の減少率は様々な問題があるにせよいかにも緩慢であるといわざるを得ない。また、1993~1997 年における日本の石綿の主要輸入先はカナダ、ジンバブエ、南アフリカであり、ここ数年カナダ、ジンバブエの年間輸入量比率が若干増加傾向にあるが、反対に南アフリカは減少傾向にある。この輸入量の上位 3 カ国で、年間輸入量の 80% を越す¹⁴⁾。

一方、石綿は高抗張力性、不燃性、耐熱性、絶縁性、耐薬品性、耐腐食性、耐久性、親和性、耐摩耗性など優れた工業的特性を有し、また安価であるなど経済性にも優れているため重要な工業的原料として広く使用されている。その用途は、波形・住宅屋根用スレート、ボード類、成形セメント板、ビニル床タイルなどの建築資材、自動車のブレーキライニング・パッド、エンジンなどのガスケット、配管用パッキンや保温・断熱材、酒類・油類・化学薬品類などのろ過材、水道用石綿セメント管や金属パイプ類のコーティング材、

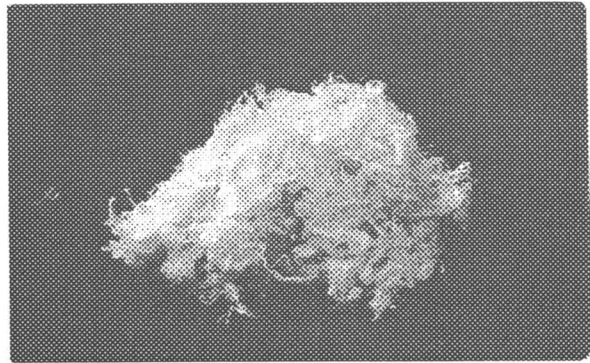
電気絶縁資材などを始めスペースシャトルの耐熱部材など約3000種類にも及ぶ¹⁵⁻¹⁷⁾といわれている。これらの内いくつかは、新規に使用されないものもあるが、その大半は現在も使用されている。以前は家庭の台所に石綿を張った金網が存在し、ヒータの支持部に石綿を使ったヘアードライヤーで髪を乾かしていた。このように我々の知る・知らないに関わらず至る所に石綿は存在しているということを認識すべきである。

図1-5に示す1997年に日本石綿協会が実施した「1995年度の日本における石綿製品の使用状況調査¹⁸⁾」によると、輸入された石綿の93.0%が建材製品、5.6%が石綿工業製品として製品化されている。建材製品の内訳の主なものは、工場・家屋の防火壁・内装・外装に用いられるスレートが62.7%（平板が2/3を占める）と一番多く、押出成形セメント板が18.4%、内装壁材・天井・軒天に用いられるパルプセメント板・スラグ石膏板が5.2%である。石綿工業製品の内訳の主なものは、自動車のクラッチ・ブレーキ・ディスクパッドに用いられる自動車用摩擦材が2.9%、パッキンやガスケットに用いられるジョイントシートが1.4%、産業用機械に用いられる産業用摩擦材が1.0%である。これらの製品の内、92.0%が建造物材料に、3.6%が自動車に、2.1%が陸・海運施設や輸送設備、船舶などの運輸関連に、0.7%が産業機械に、0.5%が化学設備に、0.1%以下がボイラや煙突、耐火壁などの一般民生用に使用されており、輸出は0.1%以下となっている。

1982年¹⁹⁾と1986年²⁰⁾にも同様な調査が行われておりこれらの調査を比較してみると、建材製品の使用量（使用割合）が152.2千トン（68.0%）から200.0千トン（78.2%）、165.9千トン（93.0%）と横這い状態にあるが使用割合は年々増加している。使用分野別にみると建造物材料分野は156.4千トン（69.9%）から198.9千トン（77.8%）、164.2千トン（92.0%）とほぼ横這い状態にあるが、産業用機械分野は8.7千トン（3.9%）から5.1千トン（2.0%）、1.2千トン（0.7%）に、化学設備分野は3.4千トン（1.6%）から1.5千トン（0.6%）、0.9千トン（0.5%）に、自動車分野は17.5千トン（7.8%）から17.4千トン（6.8%）、6.4千トン（3.6%）に減少した。産業用機械・化学設備分野においては、10数年前から石綿の使用自粛あるいは代替品への転換が急速に行われていることが分かる。また、自動車分野においては、乗用車は平成2年度、大型車は平成4年度の新車からブレーキには非石綿による代替品を用いるように業界で自己規制することになり、最近数年で使用量が従来¹/₃に減少している。このため、建造物材料分野の使用割合は急激に増加しており、関連業界における建築物材料の非石綿化に一層の努力を払わなければならないであろう。

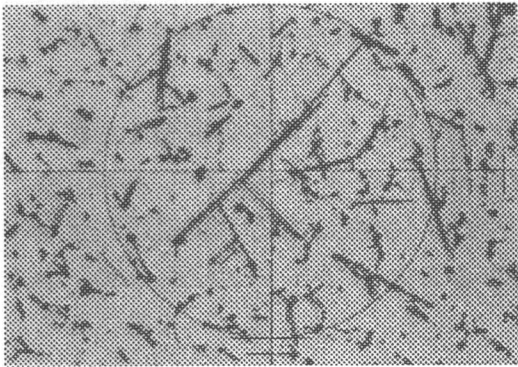


(a) 顕微鏡写真¹¹⁾

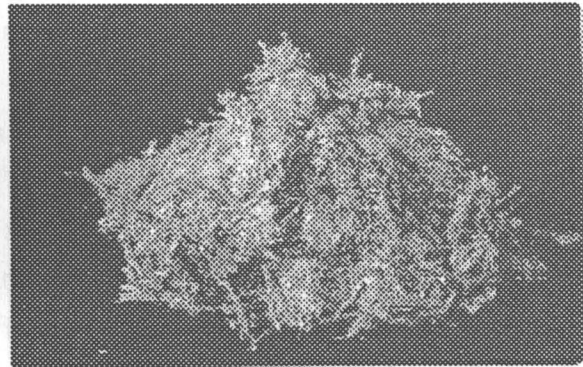


(b) 外観¹²⁾

図 1-1 Chrysotile

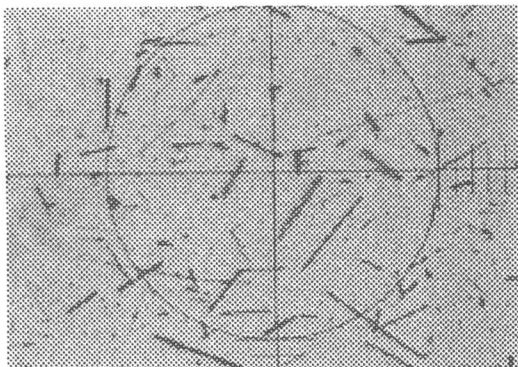


(a) 顕微鏡写真¹¹⁾

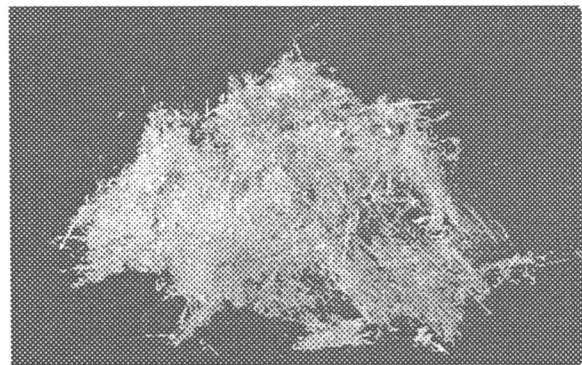


(b) 外観¹²⁾

図 1-2 Crocidolite



(a) 顕微鏡写真¹¹⁾



(b) 外観¹²⁾

図 1-3 Amosite

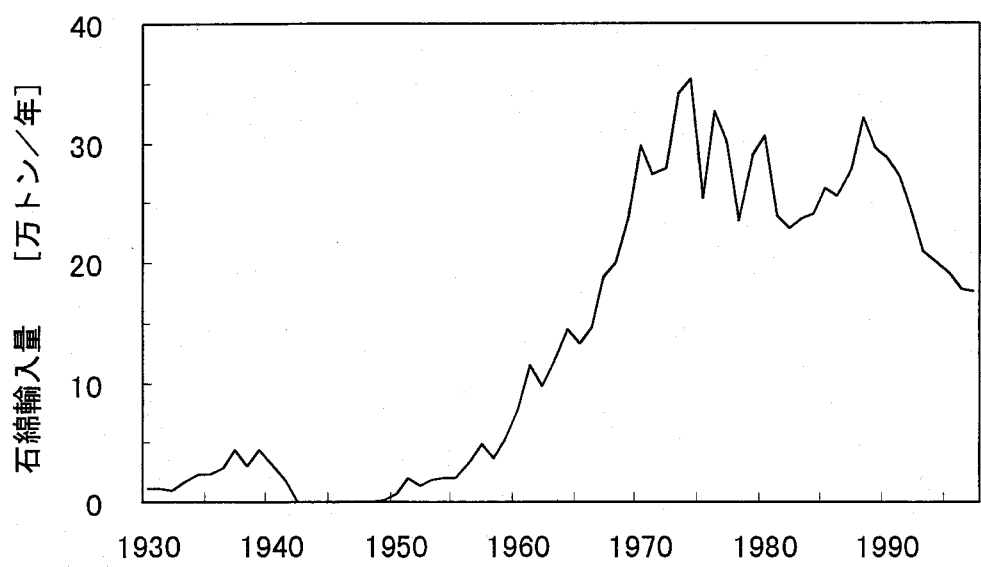
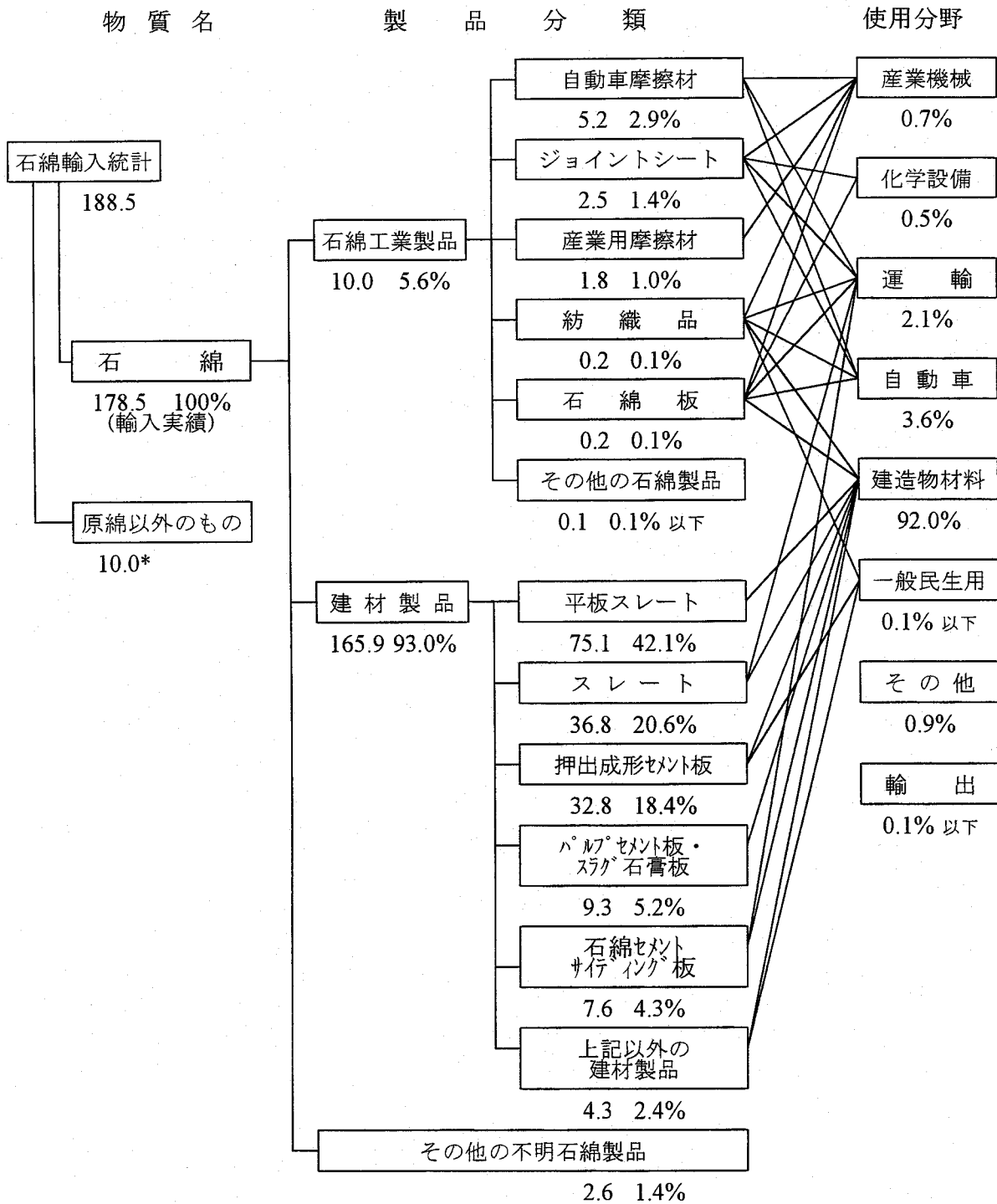


図 1-4 日本の石綿輸入量



石綿輸入統計
 暦年度 191.0千トン(1995年)
 会計年度 188.5千トン(1995年)

(単位：千トン)

*：通関統計上分類が同じ区分で、石綿原綿以外のものが約10.0千トン含まれているため、これを除いて集計した。

図 1-5 日本における石綿製品の使用状況 (1995年度)

平成9年5月日本石綿協会調べ
 文献17)一部抜粋

1.1.4 石綿と健康障害

石綿による健康障害の問題は、19世紀末の英国で興った石綿産業における作業従事者として高濃度の石綿粉じんを吸入することによって生じた呼吸器系疾患が最初であり、それ以来100年余りの間職業性疾患として労働衛生の分野で取り扱われてきた。石綿が原因の主要な職業性疾患には、①石綿肺、②胸膜肥厚斑、③石綿肺がん、④悪性中皮腫等がある。

石綿肺（アスベスト症）²¹⁾は、高濃度な石綿粉じんを吸入することにより比較的短期間に肺に進行性の不可逆性びまん性繊維増生が起こる致命的な疾患で、息切れや空咳の症状がある。高濃度曝露では通常7年程度で発病し12年程度で死亡するので、35年程度で死亡する珪肺に比べて病状の進行が速いという報告がある²²⁾。1930年までには病理組織学的所見や疫学的報告²³⁾がなされることにより疾患概念が確立し、防じん対策が講ぜられるようになった^{24,25)}。

胸膜肥厚斑は、横隔膜や肋骨の下半部、傍脊柱部によく見られる斑状の白色光沢を有する肥厚で、石灰沈着を伴う場合もある²⁵⁾。このような胸膜肥厚斑（あるいは胸膜石灰化斑）は過去の石綿曝露の指標となりうるものが広く認められている²⁶⁾が、そのことが石綿曝露に特異的な変化を意味してはいない。石綿粉じんが胸膜肥厚斑を形成する過程は未だ解明されていないが、肥厚斑からは石綿繊維や石綿小体が検出されている²⁷⁾。

石綿肺がんは、疫学的調査^{28,29)}により初めて石綿と肺がんの関係が立証され、その後の広汎な疫学的研究³⁰⁾により確証された。珪肺と肺がんの合併率が1～4%であるのに比べて、石綿肺と肺がんの合併率が13～50%と高合併率であることが報告^{31,32)}され、合併症についても各国で精力的に研究されてきた。石綿肺がんの特徴は、石綿曝露からガン発生までに長い潜伏期間があること、繊維の種類・量と反応の関係が明確でないこと、発ガン因子の相乗効果がありそうなことが挙げられる。例えば、日本での石綿肺がんの潜伏期間は平均32.6年であり、曝露期間が短期間にもかかわらず長年月後に発症した例³³⁾や喫煙が肺がんによる死亡の危険度を相加的ではなく相乗的に増加させることも報告されている³⁴⁾。しかし、石綿曝露の長短に拘わらず相当強い職業性の曝露歴がなければ、肺がんの相対危険度は零から最小レベルであろうと示唆されるとの報告³⁵⁾もある。しかし、石綿の特殊発生源のない一般住民の環境性肺がんの原因から石綿曝露を除外するには、未だ十分な事実や報告はない。

悪性中皮腫は、胸膜、腹膜、心膜、睪丸固有鞘膜などの体腔漿膜腔を覆う中皮表面あるいはその下層組織から発生する悪性腫瘍で、びまん性発育を示すことが多い。元来稀な腫瘍であるが、職業性石綿曝露による死因構成比で悪性中皮腫は8～11%の高率であることが報告されている³⁶⁾。また、20～40年の潜伏期間を経て石綿肺の有無に拘わらず悪性中皮腫は発生する²⁴⁾。石綿曝露との因果関係は、発がん因子の多い肺ガンより明確であり、特に Crocidolite³⁷⁾、Chrysotile³⁸⁾、Amosite³⁹⁾において高度の職業性曝露があった場合は、悪性中皮腫の高度発生がみられることは疑う余地はない。しかし、実際には石綿肺を伴わず発症する場合も少なくなく、また職業性曝露のない石綿曝露量が少ない場合にも発生した症例が報告されている^{40,41)}。この病気は、悪性中皮腫と診断がついて以来1

年以内に約2/3が死亡し、現在根本的治療法はない⁴²⁾といわれている。

高濃度で長期間にわたり石綿粉じんを吸入する職業性曝露の問題は、今後労働環境を改善することで減少するであろう。しかし、石綿労働者の家族、石綿鉱山あるいは石綿関連工場の周辺住民、ひいては一般環境住民などへの低濃度、長期間にわたる非職業性曝露に対する石綿粉じんの影響は未だ明らかではなく、これらの問題は今までの職業性曝露の場合以上に今後増加すると考えられる。また、石綿に対する研究の主体も労働衛生分野のみならず環境衛生も包含した総合的なものへと変化させる必要がある。今後、病理学、臨床学、疫学をはじめとする医学的多方面からの研究が待たれる。

1.1.5 一般環境への影響

1986年EPA (Environmental Protection Agency: 米国環境保護庁) が米国における一部の石綿製品の使用禁止および10年後の全面禁止を打ち出し、またILO (International Labour Organization: 国連国際労働機構) において職業上の石綿ばく露による健康障害防止のための「石綿の利用における安全に関する条約」が採択されたことから、日本における石綿問題は顕在化し、社会問題に発展していった。例えば、1950年代半ばから1970年半ばにかけて建設されたビルには、耐火・断熱・吸音の目的で石綿や吹き付け石綿が多量に使用され、1975年労働安全衛生法によりそれらの吹き付け石綿の全面禁止措置がとられていた⁴³⁾が、それらの石綿の劣化により飛散する問題が表面化した。もちろん全国の学校や公共施設の建築物も例外ではなく、1987年文部省は校舎の石綿の除去や石綿含有建材の使用の自粛を表明した。さらに、石綿を使用している建築物の大部分は建設され始めてから30年が経過しようとしており、今後立て替えのための解体における石綿の飛散による大気汚染の悪化の問題が大きく懸念される。1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災は記憶に新しいことであるが、環境庁による被災地(神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市、伊丹市、宝塚市、川西市、一宮町)周辺の1995年2月6日～10月27日にわたる9回の大気環境モニタリング調査の結果、石綿の一般環境濃度は2月、3月時において一部の地域で高い地点がみられたが、それ以降は改善し安定した数値となっているとの報告⁴⁴⁾がある。また、局所的にはこの震災による倒壊建築物解体現場からの飛散石綿濃度が250本/lと大気汚染防止法による排出基準値(10本/l)の25倍にも及んだとの報告もあり、震災直後の緊急時という特殊な事情でもあるが、建築物の解体から飛散する石綿の顕在化の一例として挙げられる。また、神奈川県横須賀市にある在日米海軍基地の米空母ミッドウェーの改修工事により出された石綿廃棄物が建設廃材として埋められたことが報じられ、国会衆議院環境委員会でも取り上げられた。さらに、自動車社会の日本においては、自動車のブレーキ関係に使用されている石綿は、全国津々浦々にまでまき散らされ、大気中の石綿濃度の平均値を押し上げている。ブレーキを作動させるとその高温の摩擦熱で石綿は無害なものに変質してしまうという説もあるが、まだ高温には至らない初期の作動段階ではそのまま放出されてしまい、100%無害であるとは断言できない。ただし、1990年以降に生産された自動車は、ブレーキライニングやパッドにスチールファイバやアラミド繊維などの非石綿繊維を用いた代替製品化が進めら

れている⁴⁵⁻⁴⁷⁾。しかし、肺がんなどの原因は石綿の化学的性質ではなく、長い繊維の形状によるとの仮説⁴⁸⁾もあり、またブレーキの代替物質に限らずロックウールやグラスウールでも動物にガンを起こすとの報告⁴⁹⁾もあることから、今のところ非石綿繊維の安全性は保証されていない。

環境庁の発がん性物質・石綿による大気汚染の昭和60年度実態調査結果によると、昭和56～58年度に実施した前回調査⁵⁰⁾と汚染状況は同レベルで、改善に兆しが見られなかった。さらに、石綿製品の生産事業所周辺においては、愛知県で最大44.23本/lと大気汚染防止法による排出基準値の約4.4倍、平均濃度も周辺に石綿の排出源のない農業地域の約10倍の高濃度データもあることから、環境庁は「一般環境におけるリスクは小さい」としながらも環境への長期蓄積を憂慮し、関係省庁や自治体、業界に排出抑制への配慮を要請するとともに、今後も長期モニタリングを続けることを決めた。

現在、日本における大気汚染物質対策は、従来のSO_x、NO_x、SPM等の大気汚染対策が現実発生している健康や環境に対する影響の防止を図ったのに対し、各種情報から推測される発ガン等の健康リスクの未然防止を図ることに重点が置かれている。発ガンに対する閾値濃度が明確でない石綿のように、汚染物質のばく露から発症に至るまでの潜在期間が長い物質については、石綿とガンなどの健康障害との因果関係が明らかにされた段階では、有効な対策が確立されたとしても実際に効果が得られるにはさらに長い年月を要する。健康影響を未然に防止するには、因果関係が明確でなくても少しでも健康に悪影響を及ぼす可能性があればリスクを軽減あるいはなくするための対策を行うとする考え、いわゆる予防医学的な観点からの考え方に変わりつつある。

ただし、このような低濃度長期ばく露の評価に資する必要から、適切なモニタリングを行わなければならない。そのためには、目的に応じたサンプリング・分析法の標準化が必要であり、さらには測定技術の開発・向上、人材養成等をはかり、測定値の信頼性の確保に努める必要がある。

1.1.6 石綿と法規制

現在、日本において使用が認められている石綿はChrysotileのみであり、石綿・石綿製品を取り扱う石綿業界では、安価で工業的性質が優れている石綿を「石綿製品は適切な管理をすれば安全であり、生活を豊かにする物質」とする立場をとっている。ここでいう適切な管理とは、石綿に係る法規制を遵守することを意味する。しかし、一般社会からみると法規制は守るべき最低限度のラインであり、必ずしも安全を保障するものではないことは明白である。そのためにもより安全な代替品による「無石綿化」を推進すべきであり、より厳しい監視の目を光らせる必要がある。

日本における石綿に対する法規制⁵¹⁾は、①労働者の健康障害防止を目的としたもの、②一般環境の保全ならびに公害防止を目的としたもの、に大別できる。前者は労働省所管の労働安全衛生法が、後者は環境庁所管の大気汚染防止法が主たる規制法になる。以下に各規制法について概略を述べる。

「労働安全衛生法・同施行令・同規則」（労働省関係）は、作業環境中の労働者の安全

と健康を守るためのものであり、石綿を特定有害物質と定め、Amosite, Crocidolite の製造を禁止している。また、石綿の含有量が1%を越えるものはその名称を表示し、それを製造または取り扱う者に対しては健康管理手帳を交付するよう義務づけている。ただし、石綿最終製品であってその製品が切断、研磨を要しないものや一般消費者の生活の用に供するものは表示の義務を除外されている。「特定化学物質等障害予防規則（特化則）」（労働省関係）においては石綿を特別の管理を要する物質に指定し、製造および取り扱いの管理基準や局所排気装置の設置について定めている。これによると、作業の記録、石綿の使用状況の調査と結果の記録、石綿除去作業場所の隔離、健康診断の実施と記録の30年間保存等が義務づけられている。作業環境の測定に関し測定士の資格や測定機関について定めた「作業環境測定法・同施行令・同施行規則」（労働省関係）によると作業環境中の特定化学物質等の測定を義務づけ、評価基準としての管理濃度は石綿においては2本/ccと定めている⁵²⁾。また、石綿のときほぐし、合剤、紡績、紡織、吹き付け、積み込み、積み卸し、または石綿製品の積層、縫い合わせ、切断、研磨、仕上げ、包装する場所における作業に対しては、「じん肺法・同施行規則」（労働省関係）が適用され労働者の健康保持その他福祉増進がはかられている。

「大気汚染防止法・同施行令・同施行規則」（環境庁関係）は、工場および事業所における事業活動に伴って発生するばい煙の排出等を規制し、大気の汚染に関し、国民の健康を保護するとともに生活環境を保全する目的があり、石綿を特定粉じん、吹き付け石綿を特定建築材料に指定し、特定粉じん発生施設設置工場または事業所の敷地境界線における石綿粉じん濃度基準を10本/lと定めている。また、吹き付け石綿の解体・改造の作業を特定粉じん排出作業とし、実施する場合は作業14日前までの届出を義務づけている。ただし、特定粉じん発生施設は原動機の出力が一定以上の施設に限定しており、また常時使用する従業員が20人以下の特定粉じん発生施設設置工場は敷地境界線における石綿粉じん濃度の測定を免除されるなど工場や事業所の規模により適用制限が設けられている。同様に、特定粉じん排出作業も一定規模以上の作業に限定されている。

「特定工場における公害防止組織の整備に関する法律・同施行令・同施行規則」（通商産業省関係）により、特定粉じん発生施設を設置した場合の特定粉じん関係公害防止管理者および公害防止統括者の選任を義務づけている。

「廃棄物の処理および清掃に関する法律・同施行令・同施行規則」（厚生省関係）は、廃棄物を適正に処理し、生活環境の保全および公衆衛生の向上を目的とし、「廃石綿」を特別管理産業廃棄物として処理基準を通常の産業廃棄物に比べて厳しく規定している。ここで「廃石綿」とは石綿建材除去事業により建築物から除去された吹き付け石綿と除去事業で使用された用具等、大気汚染防止法に定められた特定粉じん発生施設が設置されている事業所の集じん施設に集められた石綿と使用した用具等を指す。

「特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律・同施行令・同施行規則」（環境庁、厚生省、通商産業省関係）は、特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する「バーゼル条約」等の的確かつ円滑な実施を確保するため、有害廃棄物の国境を越える移動およびその処分の規制に関する措置を講じ、もって人の健康の保護および生活環境の保全に資するこ

とを目的とし、石綿廃棄物および石綿含有廃棄物を特定有害廃棄物に指定し、これらの輸出入を行う場合は通商産業大臣の承認を義務づけている。

「製造物責任法（PL法）」（法務省、通商産業省関係）は、民法の一部を被害者保護の観点から、製造物の欠陥により人の生命、身体または財産に係る損害が生じた場合に、製造者等の損害賠償の責任について定めたものである。

「化学物質等の危険有害性等に係る情報提供に関する指針」（労働省、厚生省、通商産業省関係）は、その化学物質を取り扱う者に対して必要な情報を的確に提供するため、その物質の物理・化学的性質、取り扱い上の注意等について記入した「化学物質安全性データシート（MSDS: Material Safety Data Sheet）」を事業者間で、その化学物質等の取り引きを行う際に交付するよう規定している。石綿は「特化則」に規定する「第2類物質」であるため、MSDSの交付対象となる。

次に、日本の作業環境における石綿粉じん濃度基準が、疫学調査の成果や国際情勢により、現在までどのように変わってきたのかをみる⁵³⁾。

石綿の法的規制は、昭和35年制定の「じん肺法」に始まる。しかし、この時点では石綿の濃度基準値は定められてはおらず、唯一濃度基準として昭和23年労働省通達「有害業務の範囲について」が存在していたに過ぎない。同通達は直接石綿には触れていないものの、土石、獣毛などのじんあい、または粉末を著しく飛散する範囲に関して定義され、「それらを15 mg/m³（1000個/cm³）以上含む場所」という基準を設定している。

昭和46年労働基準法の下に特化則が制定され、初めて石綿粉じん濃度基準が示された。この時は抑制濃度^{*1}で2 mg/m³という基準値であった。

昭和47年労働安全衛生法が制定されたが、労働基準法の安全衛生関係規則がすべてそのまま労働安全衛生法の一部に移行しただけで、石綿粉じん濃度基準に変化はなかった。

昭和48年行政指導通達「特化則に係わる石綿の作業環境中の測定について」が出され、初めて石綿粉じんの測定方法が示され、同時に抑制濃度を5本/cm³（質量濃度で0.3 mg/m³）にするという「繊維数濃度」による基準が設定された。

昭和50年には、「特化則」の大幅改正が行われ、名称表示、吹き付け石綿の原則禁止、および昭和48年の行政指導通達の石綿粉じん濃度基準に法的な位置づけが与えられた。

昭和51年、それまでの抑制濃度と異なり、初めて環境中の石綿粉じん濃度に関する基準を示した行政指導通達「石綿粉じんによる健康障害防止対策の推進について」が出された。基準値は2本/cm³（Crocidoliteは0.2本/cm³）であり、設定された測定場所内の測定結果の算術平均と比較して評価するものであった。

昭和59年に行政指導通達「作業環境評価に基づく作業環境管理の推進について」が出され、従来の測定場所内の測定結果の算術平均値だけで評価するのではなく、測定結果の幾何平均値とばらつき（幾何標準偏差）により統計的に処理された数値と比較して評価するための基準、すなわち「管理濃度^{*2}」の概念が打ち出された⁵⁵⁾。管理濃度は作業場所の空気中に含まれる有害物質の濃度を一定のレベル以下に保つための基準として定められたものであり、諸外国の規制基準として用いられている作業者が吸入する有害物質の量を一定のレベル以下に保つための基準である「ばく露濃度^{*3}」とは異なり、直接比較する

ことはできない。

昭和63年には、昭和61年に採択されたILO「石綿の利用に関する安全条約」に「作業環境評価のための基準すなわち管理濃度」が条文に加えられのを受けて、昭和59年行政指導通達における管理濃度が法的に位置づけられた。

平成7年には、「労働安全衛生法施行令・同規則」および「特化則」が改正され、①Crocidolite および Amosite の使用・輸入が禁止、②適用範囲が石綿含有率5重量%を越えるものから1重量%を越えるものに拡大、③吹き付け石綿の除去工事の届出、となった。

一方、一般環境中の石綿粉じん濃度規制は、石綿粉じんによる大気汚染が人の健康に影響を及ぼすことが懸念され、障害を未然に防止する目的で平成元年大気汚染防止法の一部改正が行われるまでは野放し状態であった。大気汚染防止法の改正による石綿粉じんの規制では、前述のように、特定粉じん発生施設設置工場または事業所の敷地境界線における石綿粉じん濃度基準が10本/lと定められた。平成8年健康リスクの概念を取り入れた大気汚染防止法の一部改正⁵⁶⁾が行われた。これにより吹き付け石綿の解体・改造の作業については特定粉じん排出作業に指定され、同様の規制を受けることになった。

次に、諸外国での1995年4月現在の作業環境における石綿に係る規制状況を表1-1に示す⁵⁷⁾。EEC (European Economic Community : 欧州経済共同体) はこれまで「石綿は管理すれば使用できる」との立場をとってきたが、ドイツ、オランダ、フランスなどの「全面禁止」派は必ずしもこの立場に同調はせず、1998年12月現在、ドイツ、フランスは石綿の使用を全面禁止、オランダは Crocidolite を含む製品の製造、売買と使用を禁止、ノルウェーは Crocidolite を使用禁止とし、建築現場でのすべての石綿セメント製品を禁止、デンマークは原則石綿を含む製品の製造、輸入および使用を禁止、スウェーデンも特別の場合を除いて石綿を含む製品の使用を禁止にした⁶⁰⁾。そのため今までフランスのパリにあった AIA の本部は閉鎖され、カナダのモントリオールへの移転を余儀なくされた。1997年イギリス政府は Chrysotile 石綿製品の使用および輸入を禁止する意向のあることを発表した。EEC における石綿の大気への排出基準は、石綿製品を製造、加工している工場、石綿粉じんの大気への排出が一番大きい除じん装置の出口からの石綿粉じんを抑制する立場から定められたものであり、日本の石綿製品製造、加工工場全体から発生する石綿粉じんの総量を敷地境界で抑制する基準とは規制の位置が異なっている。

先進国における石綿の使用は、発がん性のより大きい Amosite, Crocidolite の使用はほぼ禁止される傾向にあり、Chrysotile の使用量も減少傾向にある。また、発展途上国においても、一部の国を除いてはその使用量の対前年比を見るとマイナスを示す国が多くなってきている。しかし、この傾向の原因は先進国と異なり、安全性よりはむしろ近年の経済の沈滞による影響の方が大きいと考えられ、先進国が既に恩恵に浴してきた魅力的な石綿の経済性や優れた工業的特性を考えれば、発展途上国の経済が向上すれば必ずや石綿の消費量は増加に転ずるであろう。

一方、作業環境における石綿濃度の規制も0.1本/cm³以下が世界的基準値となっており、そのための管理コストも膨大なものとなっている。また、一般大気中における石綿濃度の規制も、低濃度・長期間ばく露に対する健康リスクの概念を導入することによ

り、予防医学的な観点から健康被害を未然に防止しようとする立場を取り始めている。

石綿の経済性と社会的、医学的を包含した総括的な管理コストとのバランスが、今後石綿が歩む方向を決定づける重要な因子であることは否定できない。

表 1-1 諸外国の石綿規制状況 (1995年4月現在)

AIA 資料による (単位: f/cm³)

国名	濃度基準				石綿の種類による禁止措置	備考
	クリソタイル	アモサイト	クロシトライト	アクションレベル		
スペイン	1		禁止	クリソタイル 0.25 アモサイト 0.25	クロシトライト	EC 加盟国
シンガポール	2					労働省作業要綱勧告
日本	2 ^{*2}	禁止			アモサイト, クロシトライト	日本石綿協会の自主規制 ^{*3}
ベルギー	0.5	0.15		クリソタイル 0.15 角閃石系石綿 0.05	クロシトライト ^{*1}	EC 加盟国
オランダ	1		0.5	0.25	クロシトライト	EC 加盟国
カナダ	2	0.5	0.2			
スウェーデン	0.5	—			クロシトライト, 他の石綿 ^{*1}	
デンマーク	0.3				全石綿 ^{*1}	EC 加盟国
フィンランド	0.5				クロシトライト ^{*1}	
ブラジル	2					
ギリシャ	1		0.5	0.25		EC 加盟国
フランス	1, 混合石綿 0.8		0.5			EC 加盟国
ドイツ	0.25	—	—			EC 加盟国
イタリア	1		0.5		クロシトライト ^{*1}	EC 加盟国
オーストラリア	0.5	—			全石綿 ^{*1}	
ニュージーランド	1	0.1			アモサイト, クロシトライト	
イギリス	0.5	0.2		クリソタイル 0.25 角閃石系石綿 0.1	アモサイト ^{*1} , クロシトライト ^{*1}	EC 加盟国
ロシア	2 mg/m ³ (33 f/cm ³)					
アメリカ	0.1			(0.05)		
WHO	1	—			アモサイト, クロシトライト	

*1: 禁止に例外があるものおよび許可が得られた場合は使用可能であるもの。

*2: 日本石綿協会では自主規制としてクリソタイルの管理濃度を1 f/cm³とし、諸外国の規制と同様にばく露濃度は0.5 f/cm³を併せ定めている。

*3: アクションレベルとは、概ね規制値の1/2を採用し、規則等の規制を受けないレベルを一般にいう。

*4: 日本における濃度基準は管理濃度として基準が定められている。ばく露濃度の基準とベースが違うため、直接の比較はできない。

参考文献 57) より転載

1.2 石綿繊維濃度測定の実状と問題点

1.2.1 作業環境中の石綿の濃度計測

1.1.6 項で述べたように、石綿は、「労働安全衛生法」等により譲渡または提供する場合には名称等を表示しなければならない有害物に指定されており、「特定化学物質等障害防止規則（特化則）」により「特定化学物質」の第2類物質に分類され、特別の管理を要する物質に指定されている。また、作業労働者の健康障害予防のため、屋内作業場の濃度測定と健康診断の結果および作業記録は30年間の保存が義務付けられている。石綿の測定方法は「作業環境測定基準」により細かく規定され、さらに、「作業環境測定法」等により作業環境測定士および測定機関について必要な事項を定められている。

労働安全衛生法第65条2項によると、「作業環境測定は労働大臣の定める作業環境測定基準に従って行わなければならない」とあり、また作業環境測定基準第10条2項では「空气中的石綿の粉じんの濃度の測定は次のいずれかの方法によること。イ.ろ過捕集方法および計数方法、ロ.ろ過捕集方法およびエックス線回析分析方法」と粉じんの捕集方法と測定方法が指定されている。後者のエックス線回析分析⁶¹⁾は重量法であり、従来から実施されている疫学的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計測結果を直接比較することもできないこともあり、現在では計数法が主に用いられている。

計数法には肉眼計数法と電子顕微鏡法がある。電子顕微鏡法は倍率が高く、光学顕微鏡では見ることでできない微細粉じんも計数できる。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を行うことが可能となり、石綿であるか否かの確実な判定ができる⁶²⁾。しかし、高倍率のため視野面積が狭く、計測面積全体を観察するには多大な時間を必要とし、設備も大がかりになるためコストも大きく、主として研究用のみ用いられている。肉眼計数法は電子顕微鏡法に比べて計数精度は劣るが、簡易的であり一般的な作業環境測定に用いられている。

作業環境測定法第3条では「作業環境測定を行うときには、労働省令で定めるところにより、その使用する作業環境測定士にこれを実施させなければならない」と規定され、計数には十分訓練をつんだ有資格者があたることになっている。ところが、肉眼計数には次のような問題点が指摘されている⁶³⁾。

- ①同じ計数法を用いて同じ試料を計数しても、異なった計数機関では計数結果が大きく異なる
- ②個々の計数者により計数値にばらつきが生じるため、長期間の安定性に欠ける
- ③計数のコストが大きく、また計数結果を得るまでに時間がかかる

肉眼計数は長時間の顕微鏡観察を要するため、肉体的、特に目の疲労が著しく、計数基準は定められてはいるが計数者の主観による計数基準で計数していると推測される場合が多いため計数値のばらつきが大きく、再現性に乏しい。

これらの諸問題を解決する方法に、計数の自動化がある。自動化の一方法として、四重

極の高電圧電界中を通過する繊維状粒子にレーザー光を照射し、その散乱光を検出して、繊維長を求める FAM (Fibrous Aerosol Monitor) がある⁶⁴⁻⁶⁷⁾。被検空気は 2 l/min の吸引速度で吸引され、サンプリング時間は 1 min, 10 min, 100 min, 1000 min と測定対象空気によって選択でき、作業環境中の空気など石綿濃度が比較的濃い場合はほぼリアルタイムで測定できる特徴をもつ。FAM の測定値と肉眼計数による較正は Amosite を用いた場合ほぼ 1 : 1 になると報告されているが、形が曲線状の Chrysotile による較正においては、FAM に数え落としが目立つ。また、FAM は肉眼計数法とは異なった、いわゆる間接的な計数法であるため、両者の計数結果を直接比較するにはやや説得性に欠ける。

一方、肉眼計数と同様顕微鏡像を測定対象とし、その像を解析することにより対象粉じんを石綿と認識し計数する、画像処理手法を用いた自動計数法^{63,68-70)}がある。この方法はいわゆる人間が計数する手順をコンピュータに置き換えて計数しようとするものであり、計数基準は肉眼計数の計数基準に準じているので、従来からの肉眼による計数結果との比較は容易である。しかし、この方法は計数試料を作製する必要がある、リアルタイムで計数結果を得ることはできない。

1.2.2 一般環境中の石綿の濃度計測

環境庁は、昭和 63 年度から未規制大気汚染物質対策の一環として一般環境中の石綿濃度のモニタリングを開始した^{71,72)}。平成元年度には、「大気汚染防止法」等の改正により、石綿は「特定粉じん」に指定され、その発生施設の敷地境界線上における濃度の定期的測定が義務づけられた⁷³⁾。前者のモニタリングは、環境庁の委託を受けた自治体が計測し、後者の測定は各企業が計数機関に委託しているのが現状である。計数方法は、従来から行われているろ過法により粉じんを捕集し、肉眼により石綿判定を行い、計数する方法を踏襲している。しかし、一般環境は作業環境に比べて、①非石綿繊維や微小粒子が多い、②石綿濃度が 2～3 桁低い、ことは周知のことであるが、特に一般環境中の石綿濃度測定に対する試料作製法は定めず、作業環境測定基準に示されているろ過法がそのまま流用されたため、以下のような諸問題が生じている。

- ①作業環境中における浮遊繊維状物質の大部分は石綿であるが一般環境中のそれは非石綿繊維であるため、形状による判定だけでは誤計数が増加する
- ②一般環境中の石綿濃度は作業環境中のそれに比べて極端に低く、計数精度を保持するためには多量の処理空気を必要とするが、フィルタ強度などの制限により 10 l/min で吸引ろ過されるため、サンプリング時間は 2～4 時間必要となる
- ③一般環境中には計数を妨害する微細粉じんが多量に含まれるため、多量の空気をフィルタでろ過すると捕集粉じんの大部分が微細粉じんでは占められ、適切な試料が作製できない

また、作業環境における石綿濃度測定は測定時点で規定値を満足しているか否かを調べるだけでよいが、一般環境中の石綿濃度の長期モニタリングは測定値の経時的変化を調べる必要がある。長期にわたり同じ計数者により測定できればいいのだが、実際には人事異

動等により測定担当者が替わることも珍しくはなく、長期にわたる計数値の信頼性が要求されるため、作業環境の場合以上に自動計数化が望まれる。それとともに、処理空気流量を大きく設定でき短時間のサンプリング時間ですむような、ろ過法に代わる一般環境用の試料作製法の開発が必要とされる。

一方、作業環境用に開発された FAM を一般環境中の石綿濃度測定に用いようとする、吸引空気流量が 2 l/min であるためサンプリング時間を長く設定しなければならず、FAM の特徴の一つであるリアルタイム測定ができなくなる。FAM を一般環境用として使用するためには吸引空気流量を大幅に大きくしなければ実用的ではない。

1.3 研究の目的と論文の構成

本研究は、一般環境中の石綿繊維数濃度を測定するために石綿繊維数の自動計数システムを構築することと一般環境用の計数試料作製法を新たに開発することを目的としている。

本論文は、第 1 章から第 6 章までの 6 つの章から構成されている。以下、順を追って概要を述べる。

第 1 章では、石綿の社会的におけるかかわりを色々な角度から見ることにより、石綿のもつ社会的特徴や問題点を探っている。

第 2 章では、作業環境中における石綿繊維濃度測定法の一つであり、現在最も一般的に用いられている肉眼計数法およびメンブランフィルタ法を用いた試料作製法の概要を述べる。また、肉眼計数法における計数者間の計数値の変動要因を特定するために、通常行われる計数値に重点をおいたクロスチェックに代えて、計数対象物の位置を正確に把握するために銀鏡法を用いた計数対象物を特定するクロスチェックを導入し、計数者によって常に同じ対象物を計数しているとは限らないことを明らかにし、肉眼による計数値には比較的客観性・再現性が乏しく信頼性に問題があることを示した。

第 3 章では、第 2 章で示した肉眼計数法のもつ問題点を解決する一手法として計数の自動化の必要性を説き、画像処理手法を用いた石綿繊維の自動計数システムを提案している。2 節から 4 節では「手軽な計測」に重点をおいたパソコンを用いた自動化システムの機器構成、このシステムで用いた石綿繊維の計数基準および自動化システム全体のアルゴリズムの概要を示した。5 節では顕微鏡の照明強度の選択や焦点合わせを含む画像の取り込みなど手動操作で行う部分について述べ、6 節では自動計数の前処理および計数の各過程のアルゴリズムについて述べている。7 節では国際石綿協会が示した計数則のための線図を用いて、6 節で述べた計数アルゴリズムの妥当性の検討を行っている。

第 4 章では、第 2 章で示した作業環境用の試料作製法を一般環境中の石綿繊維濃度測定のためにそのまま流用する方法の代替法として、分級法と熱・酸処理を用いた試料作製法（以下分級法という）を提案し、その有効性を検討している。2 節では分級法における理論および性能試験について述べ、3 節では石綿繊維を計数するときの誤計数の要因となる非石綿繊維をあらかじめ除去するための熱および酸処理について述べている。4 節ではメンブランフィルタ法と分級法による試料を比較することにより、分級法の一般環境用の試

料作製法としての有効性を示している。

第5章では、一般環境中における石綿繊維の濃度測定の一例として、自動車のブレーキシューに含まれる石綿繊維の大気中への飛散状態を調べるため、交差点の風上側と風下側の気中石綿濃度を測定した。ここでは、第4章で示した分級法により試料を作製し、第3章で示した石綿繊維の自動計数システムにより計数した。併せてメンブランフィルタ法による試料も同時に作製し、同じく自動計数システムで計数することにより、実際の一般大気中における石綿繊維計数システムの実用性を実証した。

第6章では、まとめとして第1章から第5章までの総括を行っている。

図 1-6 に本論文の構成を示す。

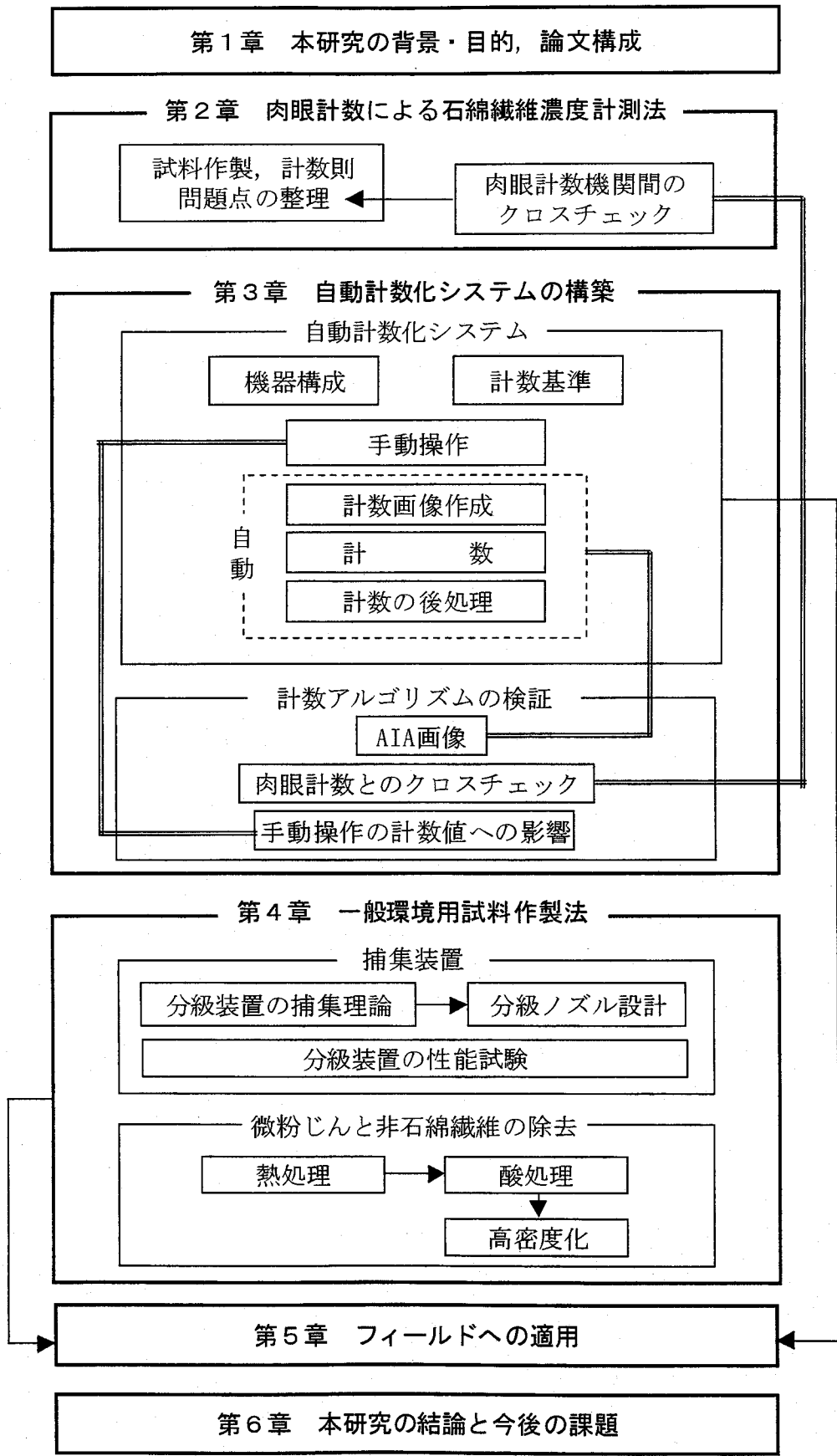


図 1-6 本論文の構成

用語の説明

- *1 ここでいう「抑制濃度」とは、粉じんを局所的に抑制する局所排気装置の吸い込み口周辺の石綿粉じん濃度が、この値以下になるような局所排気装置の性能を有する基準である⁵⁴⁾。
- *2 「管理濃度」は作業環境の適否を判断する際の管理区分を決めるための指標であると定義され、単位作業場所における気中濃度の平均的な状態を把握するための A 測定と製造工程、作業実態等から単位作業場所内で労働者が最も大きなばく露を受ける危険性が高いと判断される場所と時間を選定して測定する B 測定からなる⁵⁵⁾。
- *3 「ばく露濃度」は個々の作業者が吸引する有害物質を一定レベル以下に保つための基準であり、許容濃度をベースとしている⁵⁷⁾。作業場の空気中の平均濃度を指すものではない。

「許容濃度」は国によって解釈が異なる。例えば、英国では石綿の蓄積ばく露量と石綿肺の罹患指標となる basal rales（基底ラ音：肺底部の「ぜいぜい」という異常な呼吸音）間の研究結果から、Chrysotile の許容濃度は「(1 m³ 中の石綿繊維数)×(労働年数)が 100 以下であること」としており、Crocidolite は有害性の高さから Chrysotile の 10 分の 1 としている。日本では、日本産業衛生学会から勧告されている石綿粉じんの許容濃度はこの資料に準じ決定されたものである。米国では ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists：米国産業衛生専門官会議) の勧告によると、発がん性物質のばく露限界の閾値の存在を科学的に示すことができず、作業者のばく露管理する際の現実的なガイドラインとして定めたものとしている。ちなみに、許容ばく露限界 PEL (Permissible Exposure Limit) として OSHA が定めた 8 時間 (1 日の労働時間) のばく露濃度の時間荷重平均値で示される規制基準と 30 分程度の短時間のばく露濃度で示される規制基準がある⁵⁸⁾。ドイツでも石綿は発がん性物質である以上最大許容濃度を定めることは不可能であるとの見解を表明し、技術的なガイドラインとしてその濃度を示している。⁵⁹⁾

参考文献

- 1) D.H.K. Lee and I.J. Selikoff: Historical Background to the Asbestos Problem, *Environmental Research*, Vol.18, pp.300-314 (1979)
- 2) 三浦豊彦: 石綿と火浣布, 労働の科学, Vol.42, No.12, pp.66-67 (1987)
- 3) 神山宣彦: 石綿の鉱物学的特性と産業利用, 石綿・ゼオライトのすべて (環境庁大気保全局企画課監修), (財) 日本環境衛生センター, p.3 (1987)
- 4) NIOSH-OSHA Asbestos Work Group: Workplace Exposure to Asbestos, Review and Recommendations, DHHS (NIOSH) Pub. No.81-103 (1980)
- 5) 林久人: 石綿の種類と鉱物学的特性, 大気汚染物質レビュー石綿, 日本科学技術情報センター, p.3 (1984)
- 6) National Academy of Sciences: Drinking Water and Health, Safe Drinking Water Committee, (1977)
- 7) W.L. Campbell, et al.: Selected Silicate Minerals and their Asbestiform Varieties, Mineralogical Definitions and Identification - Characterization, U.S. Bureau of Mines Information Circular 8751 (1977)
- 8) IARC monographs on the Evaluation of carcinogenic risk of chemicals to man, Vol.14, IARC, Lyon, France (1977)
- 9) T. Zoltai, and A.G. Wylie: Definitions of Asbestos - Related Mineralogical Terminology, *Ann. New York Acad. Sci.*, Vol.330, pp.707-709 (1979)
- 10) British Advisory Committee on Asbestos: Final Report of the Advisory Committee on Asbestos, Her Majesty's Office, London, England (1979)
- 11) 日本石綿協会: 室内環境等における石綿粉じん濃度測定方法, 日本作業環境測定協会, p.22 (1988)
- 12) 日本石綿協会: THE ASBESTOS -せきめん読本-, 日本石綿協会, p.6-7 (1996)
- 13) 神山宣彦: 同上, pp.17-21 (1987)
- 14) 日本石綿協会: 石綿輸入実績, せきめん, Vol.627, p.0 (1998)
- 15) 神山宣彦: 同上, pp.22-24 (1987)
- 16) 日本石綿協会: THE ASBESTOS -せきめん読本-, 日本石綿協会, pp.18-26 (1996)
- 17) 広瀬弘忠: 静かな時限爆弾アスベスト災害, 新曜社, pp.5-6 (1985)
- 18) 日本石綿協会: 日本における石綿製品の使用状況について, せきめん, Vol.618, pp.1-2 (1997)
- 19) 神山宣彦: 同上, p.31 (1987)
- 20) 栗原崇: アスベスト汚染の現状と対策, 公害と対策, Vol.25, pp.971-978 (1989)
- 21) W.E.Cooke: Pulmonary Asbestosis, *British Medical Journal*, Vol.2, pp.1024-1025 (1927)
- 22) D.Hunter: The Diseases of Occupations (5th Edition), Hodder and Staughton, London, p.981 (1975)

- 23) E.R.A. Merewether and C.W. Price: Report on the Effects of Asbestos Dust on the Lungs and Dust Suppression in the Asbestos Industry, H.M. Stationery Office, London (1930)
- 24) 瀬良好澄：石綿の生体影響－臨床，大気汚染物質レビュー石綿，日本科学技術情報センター，pp.41-47 (1984)
- 25) 北川正信：石綿の生体影響－病理，大気汚染物質レビュー石綿，日本科学技術情報センター，pp.48-53 (1984)
- 26) J.S.P. Jones and G. Sheers: Pleural Plaques. In Biological Effects of Asbestos, *IARC Sci. Publ.*, No.8, pp.243-248 (1973)
- 27) P. Rosen, P. Gordon, A. Savino, and M. Melamed: Ferruginous Bodies in Benign Fibrous Pleural Plaques. *Amer. J. Clin. Pathol.* Vol.60, pp.608-612 (1973)
- 28) E.R.A. Merewether: Annual Report Chief Inspector of Factories for the Year 1947, H. M. S. O., London (1949)
- 29) R. Doll: Mortality from Lung Cancer in Asbestos Workers, *Brit. J. Industr. Med.*, Vol.12, pp.81-86 (1955)
- 30) I.J. Selikoff, J. Churg, and E.C. Hammond: Asbestos Exposure and Neoplasia, *J. Amer. Med. Ass.*, Vol.188, pp.22-26 (1964)
- 31) W.C. Hueper: Occupational and Environmental Cancers of Respiratory System. Springer-Verlag, New York, pp.43-44 (1966)
- 32) 松下秀鶴, 河合清之: アスベストの発がん性, 労働の科学, Vol.26, pp.14-21 (1971)
- 33) 松田実, 瀬良好澄: 石綿肺に合併した肺がんのレ線学および病理学的考察, 日本胸部疾患学会雑誌, Vol.16, pp.846-853 (1978)
- 34) I.J. Selikoff et al.: Asbestos Exposure. Smoking and Neoplasia, *JAMA*, pp.204-110 (1968)
- 35) *Brit. Med. J.*: Asbestos Hazard, Editorial, *Brit. Med. J.*, Vol.4, p.312 (1973)
- 36) M.L. Newhouse and G. Berry: Predictions of Mortality from Mesothelial Tumors in Asbestos Factory Workers, *Brit. J. Industr. Med.*, Vol.33, pp.147-151 (1978)
- 37) I. Webster: Malignancy in relation to Crocidolite and Amosite. Biological Effects of Asbestos, *IARC Scientific Publications* No.8, Ed. P.Bogovski et al., Lyon, pp.195-198 (1973)
- 38) J.C. MacDonald et al.: The Health of Crysotile Asbestos Mine and Mill Workers of Quebec, *Arch. Environm. Health*, Vol.28, pp.61-68 (1974)
- 39) I.J. Selikoff: Lung Cancer and Mesothelioma during Prospective Surveillance of 1249 Asbestos Insulation Workers, 1963-1974. Occupational Carcinogenesis, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, Vol.271, pp.448-456 (1976)
- 40) J.C. Wagner, C.A. Sleggs, and P. Marchand: Diffuse Pleural Mesothelioma and Asbestos Exposure in the North Western Cape Province, *Brit. J. Industr. Med.*, Vol.17, pp.260-271 (1960)
- 41) P.E. Enterline: Cancer Produced by Nonoccupational Asbestos Exposure in the United States, *J. Air Pollution Control Assoc.*, Vol.33, pp.318-322 (1983)
- 42) 北川正信: アスベストと悪性中皮腫, 第16回日本臨床細胞診学会秋季大会特別講演,

- (1977)
- 43) 環境庁大気保全局大気規制課長・厚生省生活衛生局企画課長：建築物に使用されているアスベストに係る当面の対策について（通知），昭和63年2月1日付大規第26号，衛企第9号
 - 44) 環境庁大気保全局，企画調整局：阪神・淡路大震災に伴う大気環境モニタリング調査等の実施結果について，環境庁，1995年12月22日
 - 45) 真保敬：部品技術の変遷(7) ブレーキ装置の変遷，自動車技術，Vo.40, pp.1041-1047 (1986)
 - 46) 青木和彦：ブレーキ，自動車技術，Vol.41, pp.162-165 (1987)
 - 47) 三部隆宏：自動車用ブレーキ材料の現状と将来，自動車技術，Vol.44, pp.68-73 (1990)
 - 48) M.F. Stanton, M. Layard, A. Tegeris, E. Miller, M. May, E. Morgan, and A. Smith: Relation of Particle Dimension to Carcinogenicity in Amphibole Asbestoses and Other Fibrous Minerals, *J. of the National Cancer Institute*, Vol.67, pp.965-975 (1981)
 - 49) 東敏昭：人造鉱物繊維の健康影響，エアロゾル研究，Vol.6, pp.39-44 (1991)
 - 50) 環境庁大気保全局大気規制課監修：アスベスト排出抑制マニュアル増補版，ぎょうせい，pp.72-151 (1988)
 - 51) 日本石綿協会：石綿に係る法規等，日本石綿協会，pp.4-5 (1995)
 - 52) 日本石綿協会：石綿粉じん濃度測定要領，日本石綿協会，pp.3-37 (1984)
 - 53) 日本石綿協会：石綿粉じん濃度の変遷について，せきめん，Vol.586, pp.1-3 (1994)
 - 54) 高木隆雄：アスベストと労働行政，労働の科学，Vol.42, pp.31-36 (1987)
 - 55) 日本石綿協会：石綿粉じん濃度測定要領，日本石綿協会，pp.77-97 (1984)
 - 56) 柳下正治：有害大気汚染物質対策時代の新しい流れ—大気汚染防止法の改正に携わって—，資源環境対策，Vol.32, pp.1122-1133 (1996)
 - 57) 日本石綿協会：THE ASBESTOS —せきめん読本—，日本石綿協会，p.76 (1996)
 - 58) OSHA 編（車谷典男，熊谷信二，天明佳臣訳編）：アスベストの人体への影響，中央洋書出版部，p.165 (1990)
 - 59) 木村菊二：アスベストと環境問題，労働の科学，Vol.42, No.12, pp.4-13 (1987)
 - 60) 海老原勇：石綿，アスベスト健康障害を予防するために，労働科学研究所出版部，p.22 (1987)
 - 61) 労働省労働安全衛生部環境改善室編：新訂作業環境測定ガイドブック（1）—鉱物性粉じん関係—，日本作業環境測定協会，pp.4-41 (1990)
 - 62) 神山宣彦，富田雅行：空気中の繊維状粒子測定法，空気清浄，Vol.32, pp.389-401 (1995)
 - 63) L.C. Kenny: Asbestos Fibre Counting by Image Analysis -The Performance of the Manchester Asbestos Program on Magiscan, *Ann. Occup. Hyg.*, Vol.28, pp.401-415 (1984)
 - 64) 小西淑人，高田勲：繊維状エアロゾルモニターによる大気中アスベストの測定，公害と対策，Vol. 25, pp. 990-995 (1989)
 - 65) 高月紘，酒井伸一，寺園淳：大気環境のアスベストモニタリングに関する検討，大気

- 汚染学会誌, Vol. 26, pp. 227-234(1991)
- 66) P. Lilienfeld, P.B. Elterman and P. Baron: Development of a prototype fibrous aerosol monitor, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol.40, pp.270-282 (1979)
 - 67) P.J. Iles and T.S. Taylor: Comparison of a Fibrous Aerosol Monitor (FAM) with the Membrane Filter Method for Measuring Airborne Asbestos Concentrations, *Ann. Occup. Hyg.*, Vol.30, pp.77-87 (1986)
 - 68) Technical Report: Automatic Detection and Counting of Asbestos Fibers, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol.40, pp.A50-A53 (1979)
 - 69) G. Van Autwerpen et al.: Automatic Recognition of Asbestos and Other Mineral Fibers, Proc. of 8th International Conference on Pattern Recognition, Computer Society Press, pp.555-557 (1986)
 - 70) G. Riediger and P. Thomas: Possibilities and Problem in Applying the Image Analyzing System IBAS 2 to the Evaluation of Fibers, Proc. of 2nd International Aerosol Conference on Berlin, Pergamon journals, pp.1012-1015 (1986)
 - 71) 環境庁大気保全局大気規制課監修：アスベスト排出抑制マニュアル増補版，ぎょうせい，pp.225-231 (1988)
 - 72) 早瀬隆時司他：アスベストモニタリング結果について，京都大学環境衛生工学研究会第9回シンポジウム講演論文集，pp.182-187 (1987)
 - 73) 環境庁大気保全局大気規制課：アスベスト規制のための「大気汚染防止法の一部を改正する法律案」について，産業公害，Vol.25, No.5, pp.53-54 (1989)

第2章 肉眼計数による石綿繊維の濃度計測法

2.1 はじめに

石綿は、「労働安全衛生法」等により譲渡または提供する場合には名称等を表示しなければならない有害物に指定されており、「特定化学物質等障害防止規則（特化則）」により「特定化学物質」の第2類物質に分類され、特別の管理を要する物質に指定されている。また、作業労働者の健康障害予防のため、屋内作業場の濃度測定と健康診断の結果および作業記録は30年間の保存が義務付けられている。さらに、「作業環境測定法」等により作業環境測定士および測定機関について必要な事項を定めており、「作業環境測定基準」によりその測定方法も細かく規定されている¹⁾。併せて、粉じんを吸入することにより肺に生じる繊維増殖性変化を主体とする疾病の予防を目的とした「じん肺法」等の適用対象にもなっている。

一方、環境庁は昭和63年度から未規制大気汚染物質対策の一環として一般環境中の石綿濃度のモニタリングを開始した^{2,3)}。平成元年度には、「大気汚染防止法」等の改正により、石綿は「特定粉じん」に指定され、その発生施設の敷地境界線上における濃度が規定された⁴⁾。

この他、「特定工場における公害防止組織の整備に関する法律」等（通商産業省関係）、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」等（厚生省関係）、「特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律」等（環境庁、厚生省、通商産業省関係）、「製造物責任法」（法務省、通商産業省関係）、「化学物質等の危険有害性等に係る情報提供に関する指針」（労働省、厚生省、通商産業省関係）等⁵⁾種々の法律、通達などの適用対象となる。

本章では、現在、石綿濃度測定に主として用いられている、メンブランフィルタを用いたろ過捕集による試料作製法と位相差顕微鏡を用いた計数則について述べる。加えて、肉眼計数者はどのようなものを石綿として計数しているのかを調べるため、肉眼計数による計数者間比較を行い、石綿繊維の濃度測定法の問題点を明確にする。

2.2 石綿繊維の濃度測定法

石綿の計数には、一般に光学顕微鏡が用いられているが、石綿の屈折率がフィルタの透明液の屈折率に近い非常に見にくくなる。そのため位相差顕微鏡（もしくは干渉位相差顕微鏡など）を用いて観察し石綿を計数する、いわゆる PCM（Phase Contrast Micro-scope）法が採用されている。しかし、これらの顕微鏡では主として形状のみで石綿と判断しているため、正確な同定を行うには相当な熟練を要する。また、一部では偏光顕微鏡、微分干渉顕微鏡などを用い石綿特有の色相を観察して同定する方法⁶⁾もあるが、石綿の方向により色相が異なるため、同定には豊かな経験が必要とし、計数には多大な時間を要する。また、石綿に蛍光色素を選択的に吸着させ蛍光顕微鏡で観察する方法⁷⁾も研究されているが、光照射時間とともに蛍光の消光が生じ、長時間の観察には適さない。

一方、石綿繊維の発がん性メカニズムの一つとして、石綿繊維の発ガン能は形状に依存

し長く細いものほど大きいと示された⁸⁾ことが注目され^{9,10)}、従来から実施されている石綿の疫学調査の多くは石綿の繊維数濃度と有症率とを関係付けているので、繊維数濃度の方が重量濃度より環境濃度を表す指標としてはふさわしいと考えられている。したがって、ここでは、一般的に石綿の濃度測定に用いられている位相差顕微鏡を用いた繊維数濃度測定法について述べる。

わが国の石綿の作業環境濃度を求める方法の一つである繊維数濃度測定法には、日本石綿協会が定めた測定法（以下協会法）と労働省の監修のもとに日本作業環境測定協会が定めたガイドブック法があり、表 2-1 にその対比を示す¹⁴⁾。両者の間には根本的な差はなく、サンプリングに使用するフィルタの大きさや格子の有無、計数すべき繊維数の規定など、多少の差があるだけである。

また、一般環境中の石綿濃度を計測する方法には、環境庁が示したアスベスト排出抑制マニュアル（以下マニュアル法）がある。マニュアル法は、石綿濃度の低い一般環境を対象としているため、捕集空気量を協会法やガイドブック法に比べ多くする必要があり、サンプリングに多大の時間を要する。（表 2-2 参照）

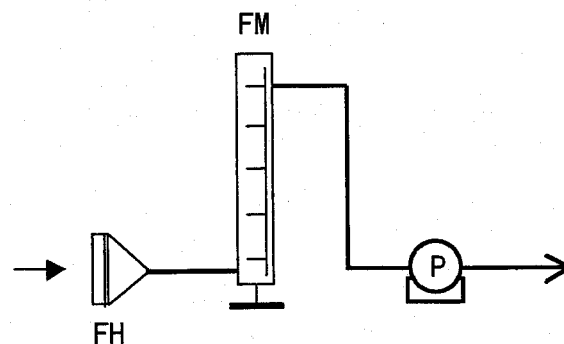
2.2.1 計数試料作製法

「作業環境測定基準第 10 条」により、計数法で濃度測定する場合はろ過法を用いて試料を作製することと規定されている。一般に、ろ過法はオープンフェイス型のフィルタホルダを用いてメンブランフィルタによりろ過し、石綿等の粉じんを捕集する。捕集装置を図 2-1 に示す。作業環境に対する協会法、ガイドブック法などでは、使用するフィルタ形状などが若干異なるので、それぞれについて説明する。

(1) 石綿協会法¹⁾

協会法では、「作業環境」と「建築物室内環境」に対する 2 種類の方法が決められている。ここでは、作業環境に対する石綿濃度を測定するための方法について説明する。

ろ過に用いるフィルタは、



FM : フィルタホルダ (オープンフェイス型)
FM : 流量計 P : ポンプ

図 2-1 捕集装置

表 2-1 作業環境における協会法とガイドブック法

	項 目	協 会 法	ガイドブック法
サ ン プ リ ン グ	フィルタの種類	白色ニトロセルロース系メンブランフィルタ	
	フィルタの孔径	0.8 μm	
	フィルタの格子	有	無
	フィルタの直径	47, 25 mm	47, 25, 13 mm
	採じん面の直径	35, 21 mm	35, 21, 10 mm
	吸 引 流 量	1 l / min	採じん面の空気流速が 1.5 ~ 5 cm / s
	吸 引 時 間	15min	10min 以上
	透 明 化 液	しゅう酸ジエチル法 アセトネートリアセチン法 のいずれか	
カ ウ ン テ イ ン グ	顕微鏡の種類	位相差顕微鏡, 干渉位相差顕微鏡のいずれか	
	総 合 倍 率	400 倍	
	石綿繊維の定義	長さ 5 μm 以上 長さとの比 3:1 以上	長さ 5 μm 以上 長さとの比 3:1 以上 幅が 3 μm 以下
	アイピースグレティクル	使 用	
	計数視野直径	アイピースグレティクルの大円 (直径 300 μm) の内側	
	計数総繊維数	200 本以上	200 本以上または 50 視野
	繊維数が小さい 場合	20 視野以上 (25mm) 50 視野以上 (47mm)	—
	計数視野境界線 と交差している 石綿の取扱基準	有	
	繊維幅 3 μm 以上の取扱	有 (記録する)	—
	検 出 限 界	0.055 f / cc	

牛山 昭：「石綿問題の現状とその対応策」より転載

表 2-2 一般環境におけるマニュアル法

	項 目	マニュアル法
サ ン プ リ ン グ	フィルタの種類	白色ニトロセルロース系 メンブランフィルタ
	フィルタの孔径	0.8 μm
	フィルタの格子	無
	フィルタの直径	47mm
	採じん面の直径	35mm
	吸 引 流 量	10 l / min
	吸 引 時 間	4 時間
	透 明 化 液	しゅう酸ジエチル法
カ ウ ン テ ィ ン グ	顕 微 鏡 の 種 類	位相差顕微鏡, のいずれか 干渉位相差顕微鏡
	総 合 倍 率	400 倍
	石綿繊維の定義	長さ 5 μm 以上, 長さとの比 3:1 以上
	ア化°-スグレティックル	使 用
	計 数 視 野 直 径	顕 微 鏡 の 視 野
	計 数 総 繊 維 数	200 本以上または 50 視野
	繊維数が小さい場合	—
	計 数 視 野 境 界 線 と 交 差 し て い る 石 綿 の 取 扱 基 準	有
	繊維幅 3 μm 以上の取扱	—
	検 出 限 界	0.1f / l

牛山 昭：「石綿問題の現状とその対応策」より転載

- ①捕集効率が高いこと、
- ②圧力損失が小さいこと、
- ③フィルタを均一に透明にできるマウント液があること、

を満足するものであればどのようなフィルタでもよいが、通常白色ニトロセルロース系のメンブランフィルタが用いられている。このフィルタは、透明化処理を施すと極めて高い透明度が得られ、そのまま光学顕微鏡用の試料として用いることができる。

フィルタ直径は47 mmと25 mmのうちどちらを採用してもよく、平均孔径0.8 μmのものをオープンフェイス型のフィルタホルダに装着して、吸引空気流量1 l/minで吸引する。直径25 mmのフィルタは、一般的に用いられている76 mm × 26 mmのスライドガラス上にそのまま置くことができる。また、国際的にも直径25 mmのフィルタを使用しているところが多く、今後はこの大きさに統一されていくと思われる。

捕集時間は、石綿濃度やその他の粉じん濃度によって異なるが、作業環境中の石綿濃度測定の場合は、原則として15分とする。

フィルタの透明化は、しゅう酸ジエチル法もしくはアセトン-トリアセチン法のいずれを用いても良いことになっているが、処理の簡便さ、透明度の良さ、試料の保存性の良さ、保存中に針状結晶が発生しないなどの理由により、ほとんどアセトン-トリアセチン法が用いられているのが現状である。

アセトン-トリアセチン法は、アセトンがセルロースエステルを溶解する性質を利用し、以下の要領でフィルタを透明化する。

- ①採じん面を上にして、採じんしたフィルタをスライドガラス上に置く。
- ②アセトン蒸気をフィルタに当てると、フィルタはすぐに透明になる。
- ③透明になったフィルタの中央部に、トリアセチンを数滴滴下し、その上にカバーガラスをのせ固定する。

常温で数時間経つと完全に透明なる。

(2)ガイドブック法¹²⁾

用いるフィルタは、協会法の場合とほとんど同じであるが、格子がない無地のものを用いる。フィルタ直径は47 mm, 25 mm, 13 mmを採用しており、吸引空気流量はフィルタ面での吸引速度が1.5～5 cm/sとなるよう調節し、吸引量も採じん量が多過ぎると誤計数が多くなるため0.3 mg/cm²以下に調節することになっている。また、吸引時間は10分以上とり、同時に試料を採取していないフィルタをブランク用として1組用意することになっている。

(3)マニュアル法²⁾

作業環境中の石綿濃度を測定する場合と異なる点は、

- ①直径47 mmのフィルタを用い、

- ②しゅう酸ジエチル法で透明化を行い、
- ③多量の捕集空気量をろ過する

ことである。

①は、フィルタを二等分し、他方をクロスチェックに供するためであり、②は、今後アセトノーリアセチン法に移行するものと思われる。③は、一般環境中の石綿濃度は、作業環境中のそれより2桁前後低いので、計測の精度を保つために多量の捕集空気量が必要となる。捕集効率の高いフィルタを用いるので、石綿計数の妨げとなる多量の微小非石綿粉じんも捕集してしまうため、注意が必要である。また、位相差顕微鏡では石綿も非石綿繊維も区別なく見え、生物顕微鏡では石綿は識別できないか非常に見えにくいので、それぞれの計数値の差を石綿と計数している。

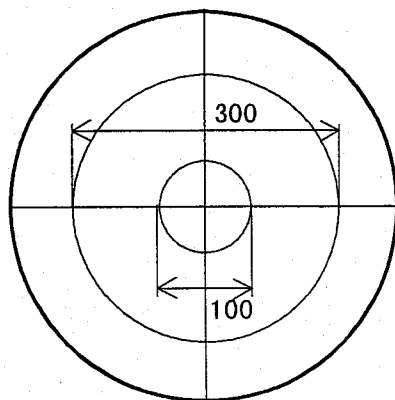
2.2.2 石綿繊維の計数則

石綿繊維の計数は、既述したように屈折率の関係で生物顕微鏡では明確に見ることができず、位相差顕微鏡等を使用して計数することになっている。また、40倍の位相差顕微鏡用対物レンズと10倍の接眼レンズを使用し、総合倍率400倍以上で計数しなければならない。

計数を容易にするため図2-2に示す石綿計測用アイピースグレイティクルを接眼部に挿入し、直径300 μm の大円内を計数視野として、その視野内部の石綿を計数する。

協会法では、フィルタの大きさに関係なく、計数石綿繊維数が200本以上になるまでランダムに視野を選んで計数する。石綿濃度が薄い場合は、フィルタ直径が25mmの時は20視野以上、47mmの時は50視野以上を計数する。

ガイドブック法では、計数石綿繊維数が200本以上あるいは50視野を計数する。なお、協会法とガイドブック法の検出限界は同程度になるように定めてある。捕集された繊維状物質のほとんどが石綿であると思われる、石綿の製造や加工をしている作業環境を対象とする場合、計数すべき石綿は形状のみで石綿と判定してもほぼ間違いはない¹⁵⁾ので、以下に形状による石綿の定義と計数法について述べる。



単位： μm

図2-2 アイピースグレイティクル

(1) 石綿繊維の形状による定義¹³⁾

長さ $5\mu\text{m}$ 以上、長さと同幅（繊維の直径）の比が3:1以上の繊維状物質を石綿と定義する。ただし長さは繊維に沿って計るものとする。

ガイドブック法や国際石綿協会（AIA : Asbestos International Association）では、上記の定義に幅が $3\mu\text{m}$ 以下の条件が付け加わる。

しかし、上記の定義を満足していても、明らかに石綿でないものはこの限りではない。

(2) 計数則

- ① 石綿の定義を満足する単繊維の場合は、これを1本と計数する。
- ② 1本の繊維から枝分かれしているものは、これを1本と計数する。
- ③ 複数の繊維が交差しているものは、交差しているそれぞれの繊維を判定し計数する。
- ④ 繊維が複雑に絡み合って正確に計数できないものは、これを計数しない。
- ⑤ 粒子の幅が $3\mu\text{m}$ 以上の粒子が繊維に付着している場合は、その繊維は計数しない。
- ⑥ 計数視野に繊維の両端が入っているものは1本と計数し、片方の端しか入っていない場合は0.5本、両端とも計数視野の外にある場合は0本と計数する。

(3) 石綿の計数例^{1,2)}

AIA が示した石綿の計数例を、図 2-3 ~ 6 に示す。また、計数視野領域境界線と交差する繊維の計数例を、図 2-7 に示す。

図 2-3 は単繊維の場合の計数例で、図の右下の数字は AIA が示した計数値である。A ~ R, W は、計数則①を満足しているので全て1本と計数している。S ~ V は、長さと同幅の比が3:1以下であるので計数しない。X は、長さが $5\mu\text{m}$ 以下なので計数しない。

図 2-5 は枝分かれした繊維の例を示している。A ~ P は全て計数則①を満足している1本の繊維から枝分かれしているので計数則②により1本と計数する。Q は、長さと同幅の比が3:1以下のものからの枝分かれなので計数しない。R は長さが $5\mu\text{m}$ 以下なので計数しない。

図 2-4 は絡み合っている繊維の場合の例を示している。A ~ D はそれぞれ単繊維が絡み合っているので、計数則③によりそれぞれの繊維について判定し計数する。E は1本の単繊維と1本の枝分かれした繊維が絡み合い、F は1本の枝分かれした繊維同士が絡み合っているのでそれぞれ2本と判定している。G は1本と数えている。H ~ L は複雑過ぎて数えられないので計数則④により計数しない。



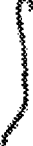




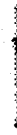



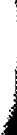












A  1	B  1	C  1	D  1	E  1	F  1
G  1	H  1	I  1	J  1	K  1	L  1
M  1	N  1	O  1	P  1	Q  1	R  1
S  0	T  0	U  0	V  0	W  1	X  0

図 2-3 石綿の計数例 (単繊維の場合)






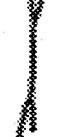

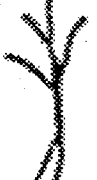










A  1	B  1	C  1	D  1	E  1	F  1
G  1	H  1	I  1	J  1	K  1	L  1
M  1	N  1	O  1	P  1	Q  0	R  0

図 2-4 石綿の計数例 (枝分かれの場合)

A 2	B 4	C 3	D 4	E 2	F 2
G 1	H 0	I 0	J 0	K 0	L 0

図 2-55 石綿の計数例 (絡み合っている場合)

A 1	B 1	C 1	D 1	E 1	F 1
G 1	H 1	I 1	J 2	K 2	L 2
M 1	N 1	O 0	P 0	Q 0	R 0
S 0	T 0	U 0	V 0	W 0	X 0

図 2-6 石綿の計数例 (粒子が付着している場合)

図 2-6 は粒子が付着している繊維の例を示す。A ~ G, I, J, L ~ N は、粒子は付着しているが直径が $3 \mu\text{m}$ より小さいので、粒子はないものとして計数している。H, K は、直径が $3 \mu\text{m}$ 以上の粒子が付着しているので、計数則⑤により粒子が付着した繊維は計数していない。また、O ~ X は直径が $3 \mu\text{m}$ 以上の粒子が各繊維に触れているので、計数則⑤により計数していない。

図 2-7 は計数視野領域境界と交差する繊維の計数例¹⁾を示したもので、図中の最大円はアイピースグレティクルの範囲を示しており、通常、ひとまわり小さな円内を計数領域とし、計数則⑥による計数を行っている。

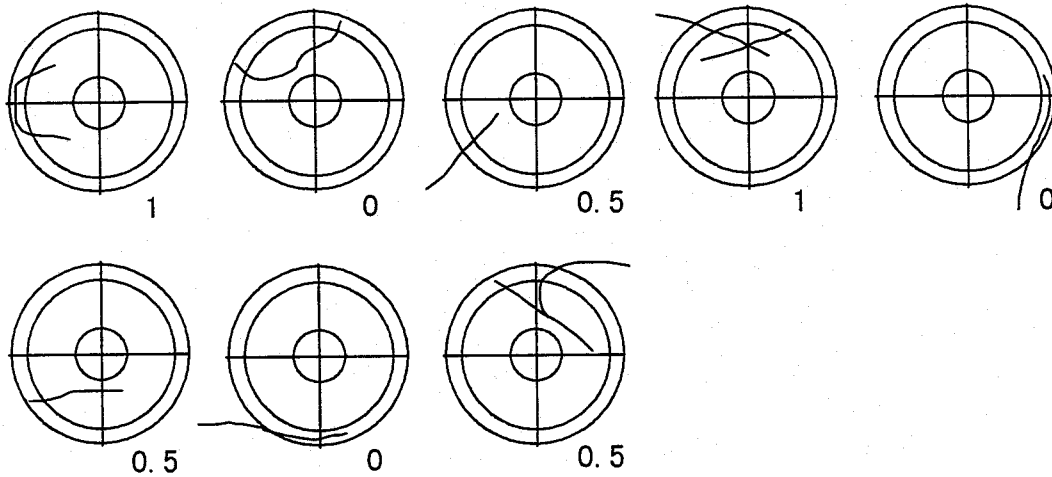


図 2-7 計数視野領域境界と交差する繊維の計数例

2.3 肉眼計数による計数基準の計数者間の比較

肉眼計数による計数値は、計数則が定められているにもかかわらず、一定の訓練を受けた計数者によってでも基準値の $50 \sim 200\%$ の範囲でばらつきがあった例¹⁶⁾や、同一計数機関内ではあるが、かなり熟練度の高い計数者でも同一試料を繰り返し計数した場合、平均して 16% 程度のばらつきがあったとの報告¹⁷⁾がある。しかし、計数機関が異なった場合の計数値のばらつきはこの程度では収まらず、 100 倍程度の差が生じたとの報告もある¹⁸⁾。

以上のことから、計数値のばらつきは計数者の肉体的負担からくるものや、熟練度によるものも無視できないが、計数基準は定められてはいるものの、計数者個人がもっている石綿の計数基準にそれぞれ微妙に差があるように思える。同じ計数機関内であれば日常における計数業務で訓練され、個人差もある程度抑えられるが、計数機関が異なればそれぞれの計数基準の差異も大きくなり、大きな計数値の差になって表れてくる。

そこで、計数値のばらつきぐあいを把握するため、クロスチェックがしばしば実施されている²⁰⁾。しかし、従来行われていたクロスチェックでは計数値のみの比較に留まり、計数者が全く異なったものを石綿と判定して計数しても、その計数値がある範囲に入って

いれば良く合っていると判断される。そこで、複数の計数機関に対し同一試料を提示し、どのような繊維状物質を石綿として判定し計数したかを特定し、その結果を比較検討することにより、各計数機関が共通の計数基準をもつか否かを調べた。

2.3.1 比較試料の作製方法

通常、肉眼計数においては、計数視野は一定の視野数をランダムに選択し計数するため、同一の試料を用いても同じ繊維状物体を計数対象にはしてはいない。また、位置や領域を単に指定しても、広範囲の計数領域から同一の計数対象物体を探索するにはかなりの時間と労力が必要になる。そこで、計数対象物質の特定を容易にするために、試料中に顕微鏡の視野と同程度の大きさをもつ計数窓を設けて、指定した計数窓内を計数する計数物体の探索域を狭める方法を用いたので、その方法を説明する。

カバーガラスに、銀鏡反応 (Tollens の反応)¹⁹⁾を利用して計数窓以外にコーティングを施すことにより不透明にし、窓部内のみ計数できるようにする。計数窓は1試料あたり、縦横5列合計25個の窓を設けた。

横穴式注射針の先端部を直径350 μm の円形状に研磨加工し(図2-8参照)、その部分を湯煎により溶融させたパラフィンに漬け、素早くカバーガラスの指定した場所に垂直に押しつけ、パラフィンを凝固させることにより計数窓部のマスキングを行った。計数部の位置決めと処理の効率化のために図2-9に示すマスキング用の治具を使用した。

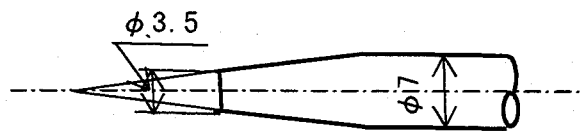


図 2-8 注射針の研磨加工

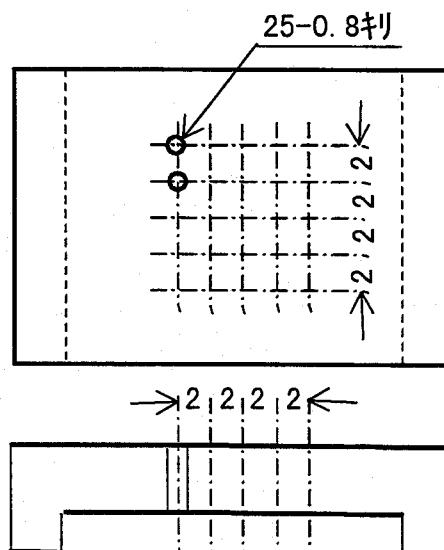


図 2-9 マスキング用治具

マスクングを施したカバーガラスを必要枚数ビーカーに吊るし、アンモニア性硝酸銀溶液（0.2 N 硝酸銀溶液に 2 N アンモニア水を滴下し、最初生じた沈澱が再び溶解するまで加える）を満たす。還元剤としてホルマリンを徐々に加えると、金属銀が沈澱しカバーガラス上に銀鏡を形成する。一度に多量の還元剤を加えると分厚い銀鏡が形成され、すぐにカバーガラスから剥がれてしまうので、適当に薄めたもので時間をかけて徐々に銀鏡を形成させる必要がある。清浄水で洗浄し乾燥後、有機溶剤でパラフィンを除去すれば計数窓をもつカバーガラスができる。

一方、蒸留水中で超音波により Chrysotile の繊維束を砕いたものを原液とし、別の蒸留水中にこの原液を適量入れ、直径 25 mm、孔径 0.8 μ m のメンブランフィルタでろ過し、清浄乾燥空気で乾燥させた。アセトノートリアセチン法により透明化を施し、計数窓の付いたカバーガラスを載せ、計数試料とした。

2.3.2 計数者および計数方法

(1) 計数者

石綿繊維の計数は、自治体（1）、公的計数機関（1）、民間計数機関（4）等の肉眼による 6 計数機関（計数機関 A～F、順不同）に依頼した。計数機関には、講習等による計数のトレーニングに参加している機関もあればその実績は全くない機関もある。

(2) 計数方法

各計数機関に 2 種類の試料とそれらの各視野の顕微鏡写真を提示し、石綿の計数とその特定を依頼した。写真は 10 倍の対物レンズを用いて撮影した低倍率（総合倍率が 188 倍）のものと 40 倍の対物レンズを用いて撮影した高倍率（総合倍率が 752 倍）の 2 種類（図 2-10、11 参照）用意した。低倍率の写真は計数視野の誤認の防止を目的とし、視野の確認のために使用した。計数した石綿は高倍率の写真上に印を入れることとし、計数領域はその写真の範囲内とした。

石綿の計数基準は特に指定せず、通常各計数機関が計数している基準で計数した。また、計数に用いる顕微鏡本体、レンズ等の保存状態並びに顕微鏡の軸合わせ等日常の整備が計数値に大きく影響するが、本調査では計数に用いる顕微鏡等は通常使用しているもので計数を行った。したがって、位相差顕微鏡のみで計数している機関や生物顕微鏡を併用している機関もある。

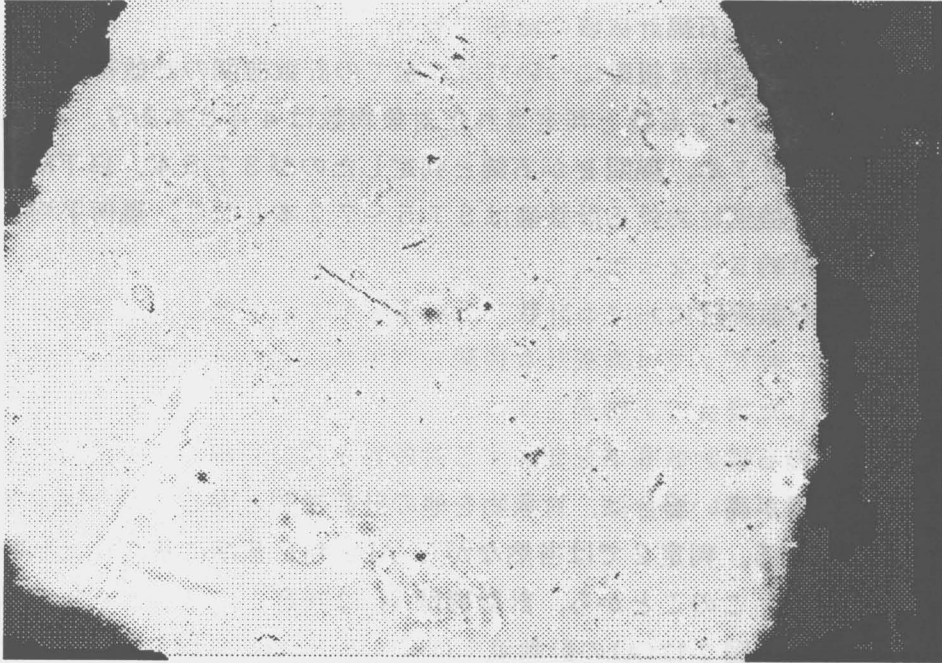


図 2-10 位相差顕微鏡像 (対物レンズ×10)

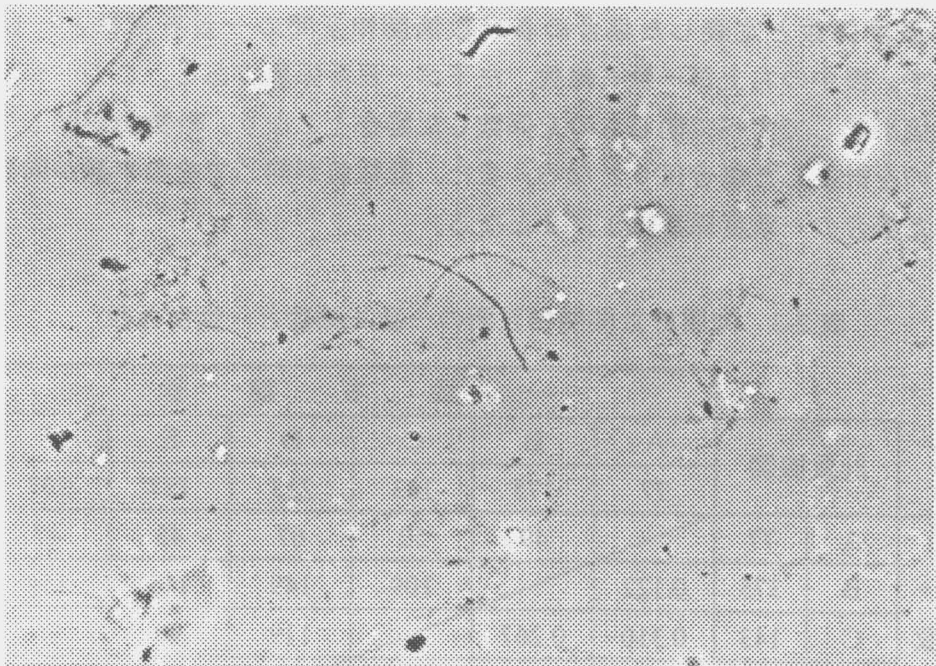


図 2-11 位相差顕微鏡像 (対物レンズ×40)

2.3.3 比較結果

(1) 計数值と一致度係数

図 2-12(A)に各計数機関が計数した石綿の計数值を示す。ここでは、全ての計数機関が計数できた視野についての石綿計数值の総和である。したがって、1ヶ所の計数機関においてでも計数不能と判断された視野については、全ての計数機関の計数視野数から除外した。いずれかの機関によって石綿と判定された対象物数は443本あり、その内機関 A が石綿と判定したのが77本、機関 B が石綿と判定したのが375本、以下同様である。図に示すとおり各計数機関における計数值は375～77本となり、幾何平均169本、最大値と最小値の比は約5となった。

図 2-12(B)に肉眼計数機関における計数の正解率を示す。ただし、真に石綿であるか否かは不明であるため、判定1では肉眼計数機関の内半数以上の計数機関が石綿と判断した対象物を真の石綿とした場合の正解率を求めた。また、判定2では写真上で対象物の長さや幅を計測し、AIA の石綿計数基準を満足する対象物を真の石綿とした場合の正解率を求めた。判定1の正解率が高い場合は、対象物を他の計数機関と同じような判定基準で石綿と判断しているといえる。判定2では当然ながら AIA 判定基準に基づいた判断をしていれば正解率は高くなる。このことから、計数機関 A は判定1、2とも正解率は他の計数機関に比べてやや低く、図 2-12(A)の計数值を加味すると AIA の判定基準を満たしている対象物でも独自の判定で非石綿と判断している傾向が見受けられる。反対に、計数機関 B は AIA 判定基準を満たしていない対象物でも石綿と判断する傾向がある。

また、任意の2計数機関において、少なくともどちらか一方の計数機関が石綿として計数した対象物の総和に対し、両計数機関がともに石綿として計数した対象物の割合を両計数機関の一致度係数と定義した場合の各計数機関相互間の一致石綿数と一致度係数を表 2-3 に示す。表中の右上が一致石綿数、左下が一致度係数である。この一致度係数は、両者の計数值が同じですべて同じものを係数した場合1となり、計数值が同じでもすべて異なったものを計数した場合は0となる。また、計数值が同じでその半数が同じものとして計数された場合の一致度係数は1/3となる。

表 2-3 肉眼計数機関相互間の一致石綿数と一致度係数

計数機関		一 致 石 綿 数					
		A	B	C	D	E	F
		77	375	143	213	127	207
一 致 度 係 数	A	77	49	52	67	45	47
	B	375	0.122	109	149	115	158
	C	143	0.310	0.267	119	90	96
	D	213	0.300	0.337	0.502	107	133
	E	127	0.283	0.287	0.500	0.459	101
	F	207	0.198	0.372	0.377	0.463	0.434

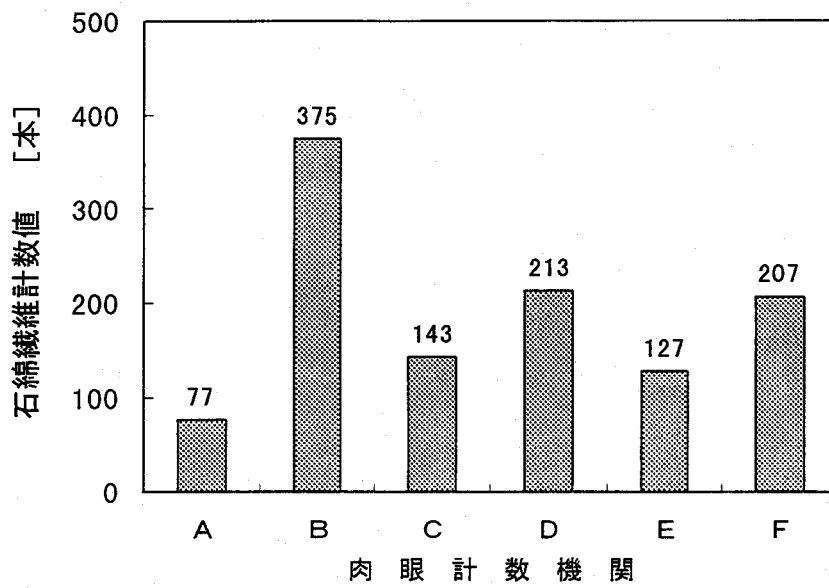


図 2-12(A) 肉眼計数機関の石綿計数值

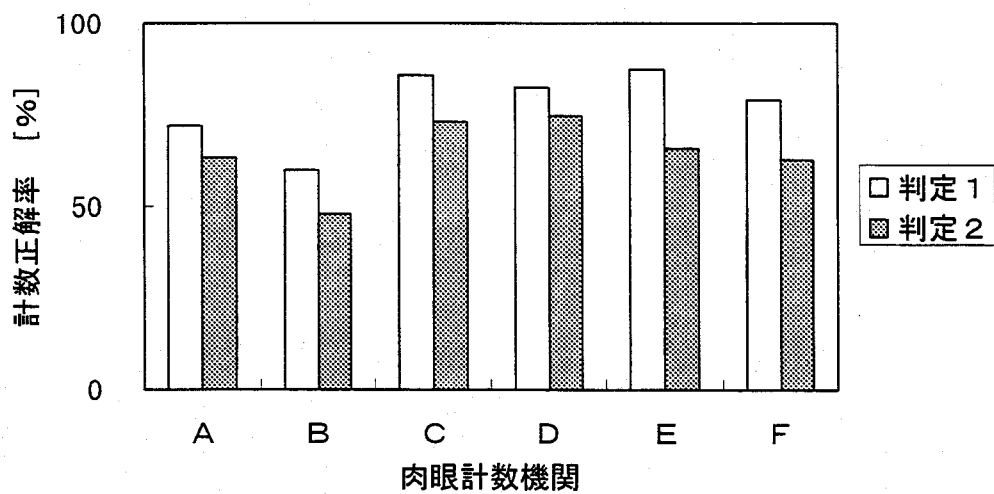


図 2-12(B) 肉眼計数機関の計数正解率

例えば、計数機関 C、D における石綿としての計数値が各々 143 本と 213 本であり、その内 119 本つまり計数値の約 83%、56% は同じ対象物を石綿と計数しており、その時の一致度係数が 0.502 と最も大きい。反対に、計数機関 A と B における各々の計数値が 77 本と 375 本であり、その内 49 本は同じ対象物を石綿と計数しており、その時の一致度係数が 0.122 と最も小さい。

(2) 鮮明度と計数値

また、いずれかの計数機関に計数された 443 本の対象物に対し、写真から繊維長と幅を計測し、試料の顕微鏡像から対象物の鮮明度を不鮮明：0、やや鮮明：1、鮮明：2 の 3 段階に分別し、石綿として計数したか否かを分類した。ただし、繊維長は、繊維に沿って物差しにより計測したので、石綿の顕微鏡像を目視計測するよりは高精度で計測できる。また、繊維幅（直径）は 3.6.2(4) で示す画像計測における繊維幅の定義とは異なり、繊維の平均的な幅として計測した。しかし、繊維幅が途中で大きく異ならない限り、両者の計測結果に大きな差は生じない。各計数機関についての石綿の鮮明度と計数値の関係を図 2-13 (A) ~ (F) に示す。図中の斜めの線は繊維長と繊維幅の比が 3:1 の領域の境界を示す。したがって、石綿の計数則にしたがうと繊維長 = 5 μm の直線の右側、繊維幅 = 3 μm の直線の下側、斜めの線の右下側の領域が計数すべき範囲となる。

肉眼計数全体において、繊維幅に関する判定基準はかなり細いところまで下がってきており、比較的長いものでも一見太めのものは計数しない傾向がある。

図 2-13 (A) においては、計数すべきでない領域の物体に対する誤計数はないが、計数すべき領域内の物体に対しては数え落としが目立つ。繊維幅が細く鮮明度が低いものはほとんど計数されていない。形状以外の他の計数基準が考慮されていることが示唆される。

反対に、図 2-13 (B) においては、繊維長が計数基準より短いものまで計数されており、また、鮮明度に関係なく高いものから低いものまで計数されている。数え落としのないかわりに、信頼性が問われることになるであろう。

図 2-13 (C) ~ (F) においては、繊維幅が細いものは鮮明度にかかわらず、繊維長が比較的長いものが計数されている。また、計数値が大きいものほど繊維長が比較的短いものまで計数する傾向が見受けられる。

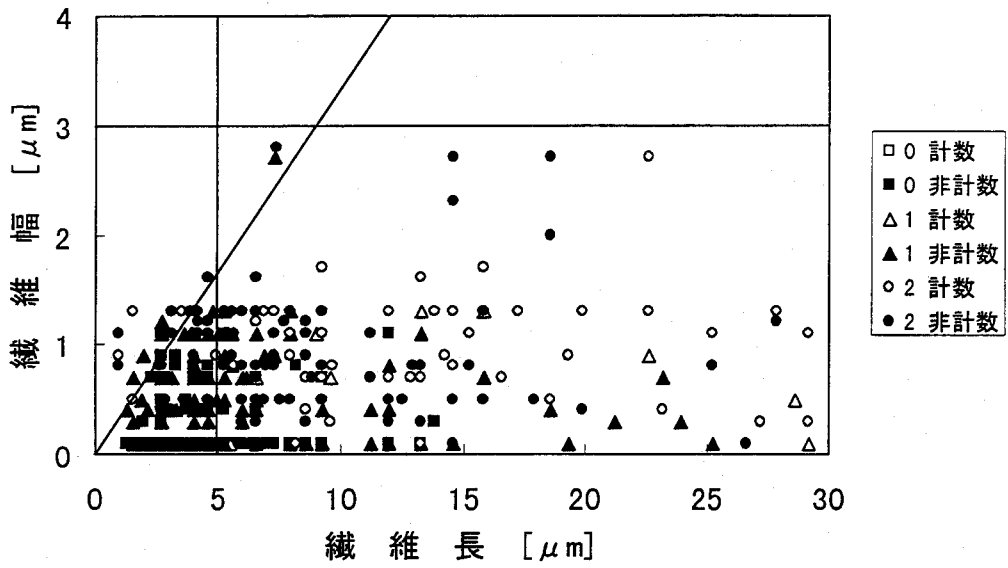


図 2-13(A) 石綿の鮮明度と計数 (機関 A)

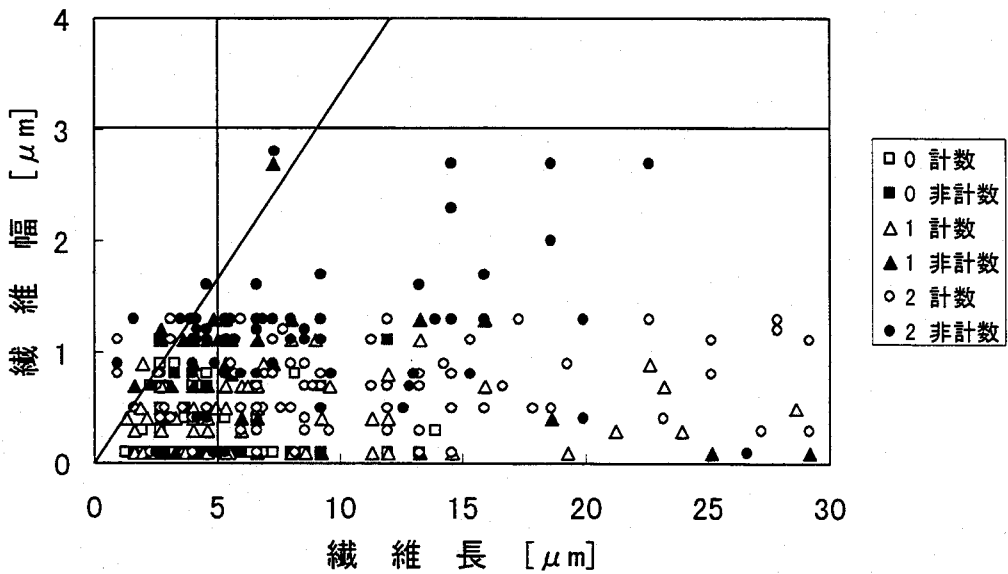


図 2-13(B) 石綿の鮮明度と計数 (機関 B)

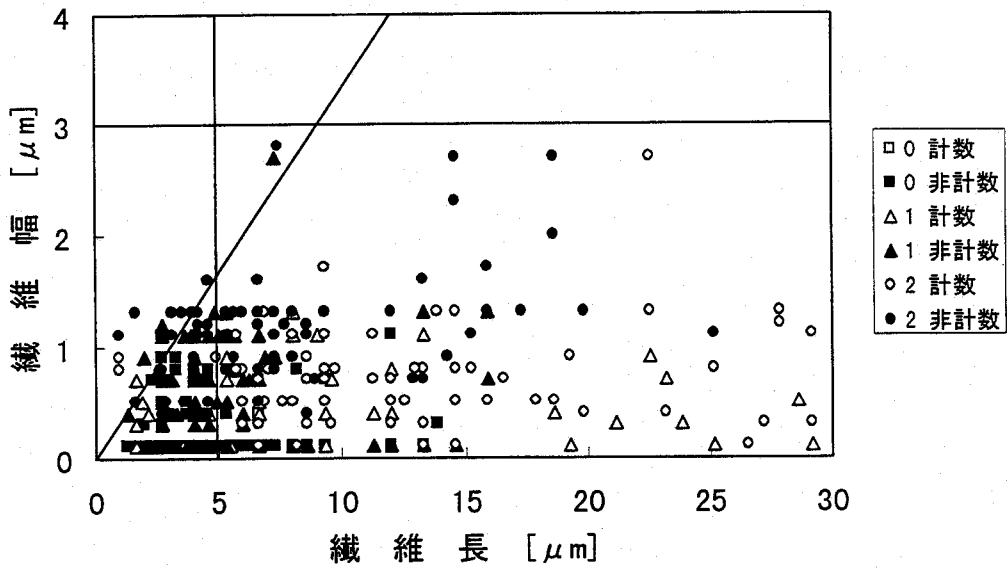


図 2-13 (C) 石綿の鮮明度と計数 (機関 C)

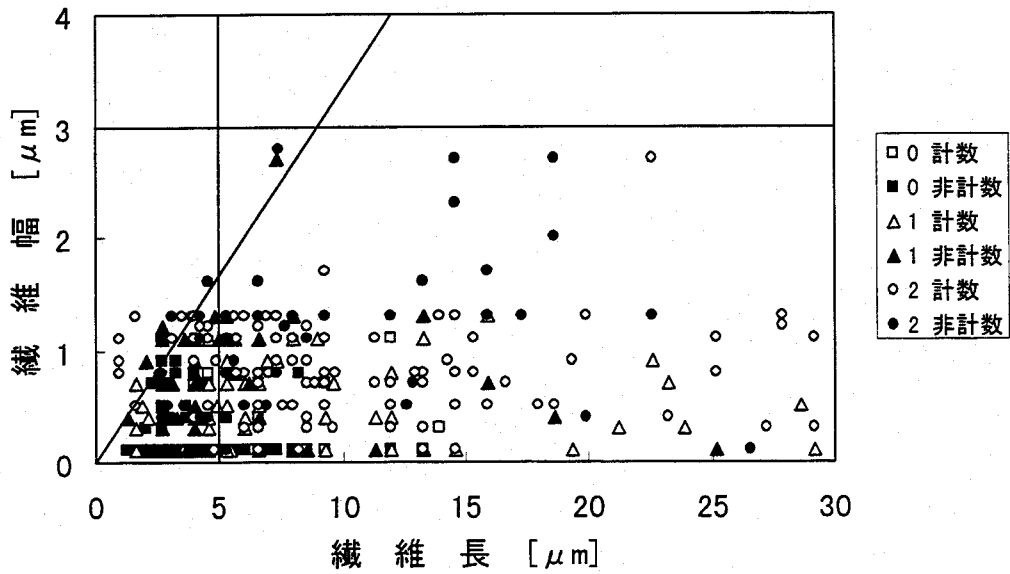


図 2-13 (D) 石綿の鮮明度と計数 (機関 D)

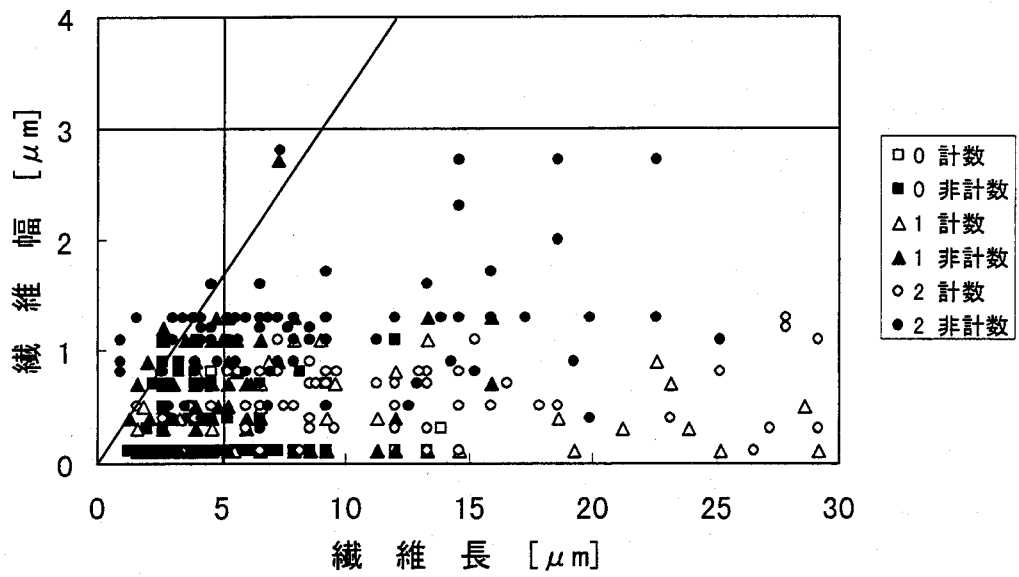


図 2-13 (E) 石綿の鮮明度と計数 (機関 E)

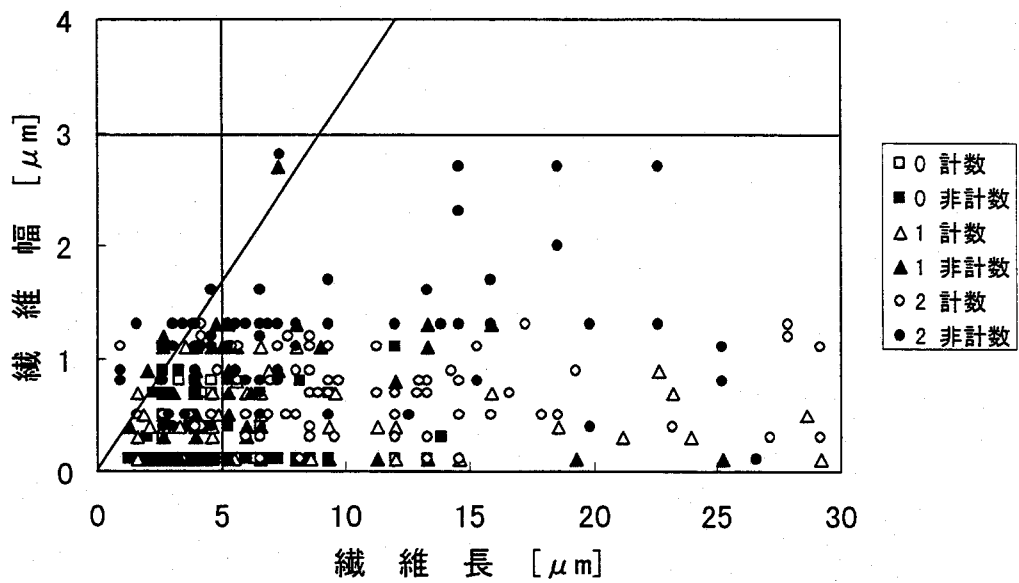


図 2-13 (F) 石綿の鮮明度と計数 (機関 F)

(3) 曲がり度と計数值

使用石綿量の大部分を占める Chrysotile の形状は、Amosite や Crocidolite のような直線状ではなく、しなやかに曲がりくねった特徴を有する。このため繊維長の測定が直線状の石綿に比べて困難であり、誤計数しやすい。そこで、曲がり度が計数にどのように影響を及ぼしているのか調べた。

鮮明度の場合と同様に、いずれかの計数機関に計数された 443 本の対象物に対し、真っ直ぐなもの：0，曲がり角度が 90 度以下：1，90 度以上：2，2 つ以上の変極点をもつ曲線状のもの：3 の 4 段階に区別し、石綿として計数したか否かを分類した。ただし、ここでは「くの字」状態に曲がった対象物の二辺のなす角の補角を曲がり角度とする。各計数機関についての石綿の曲がり度と計数の関係を図 2-14 (A) ~ (F) に示す。図より長くて細いものには曲線状のものが比較的多い。肉眼計数によるものでは、長くて細いものに対しては全般的に数え落としが少なく正確に計数されていると思われる。むしろ判定領域線近傍の長さのものが曲がり度の程度により、判定のばらつきが生じてくる。

また、曲がり度が深さ方向に生じている場合は、検鏡倍率が高く被写体深度が浅いため対象物の長さが長くなるほど焦点合わせが困難になり、対象物により個々に顕微鏡の焦点の位置を順次変える必要がある。

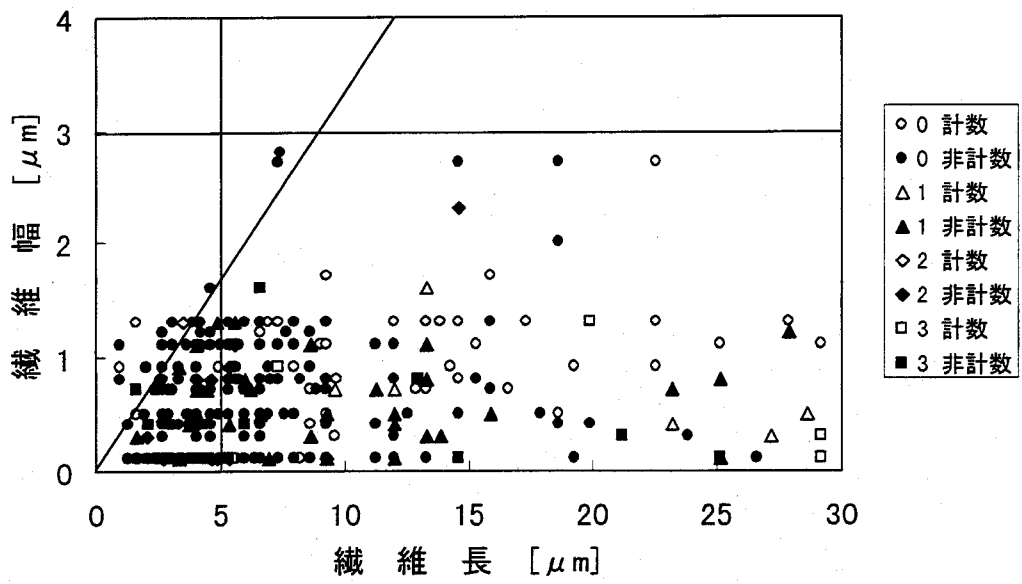


図 2-14(A) 石綿の鮮明度と計数 (機関 A)

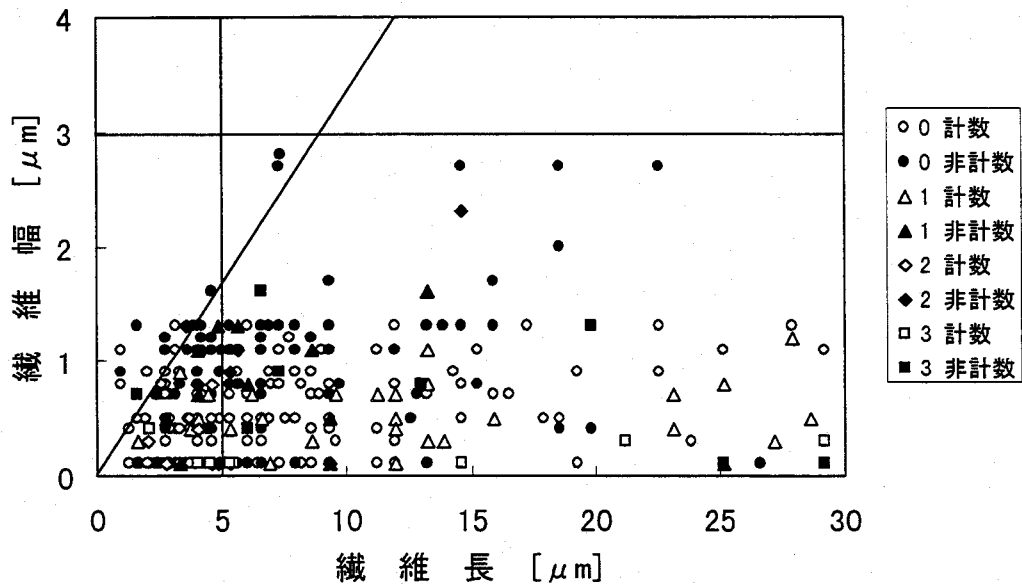


図 2-14(B) 石綿の鮮明度と計数 (機関 B)

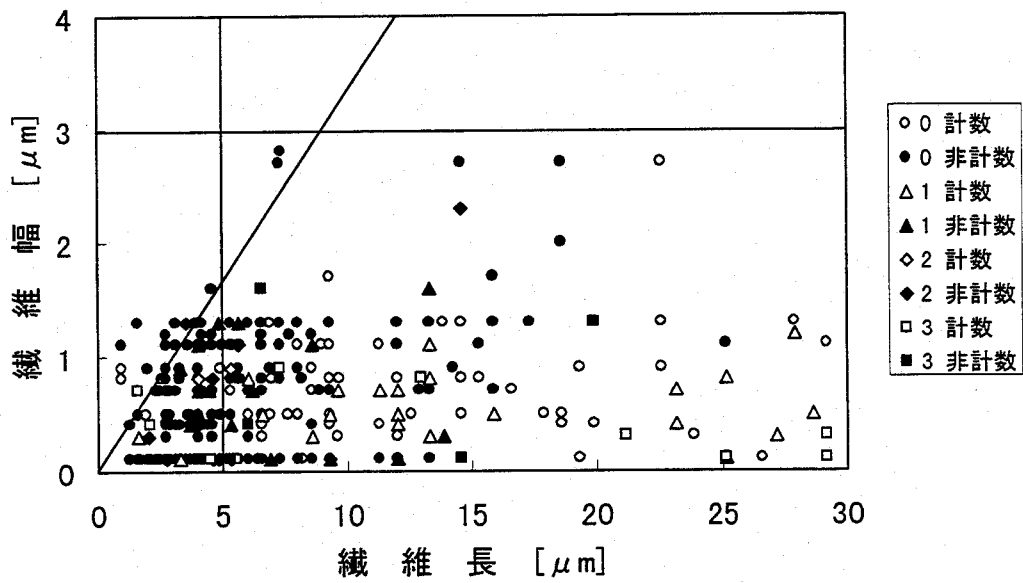


図 2-14(C) 石綿の鮮明度と計数 (機関 C)

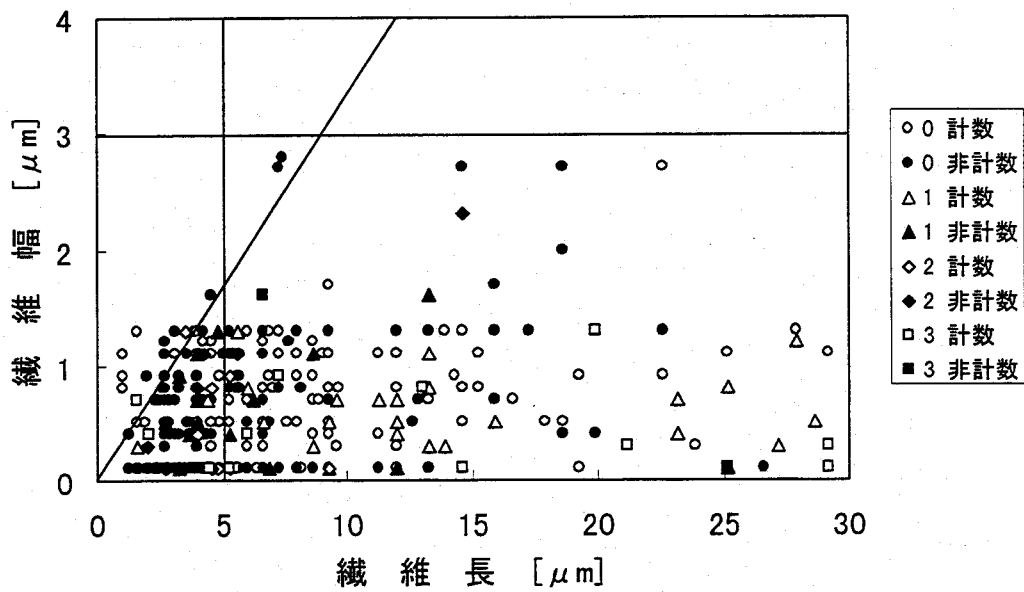


図 2-14(D) 石綿の鮮明度と計数 (機関 D)

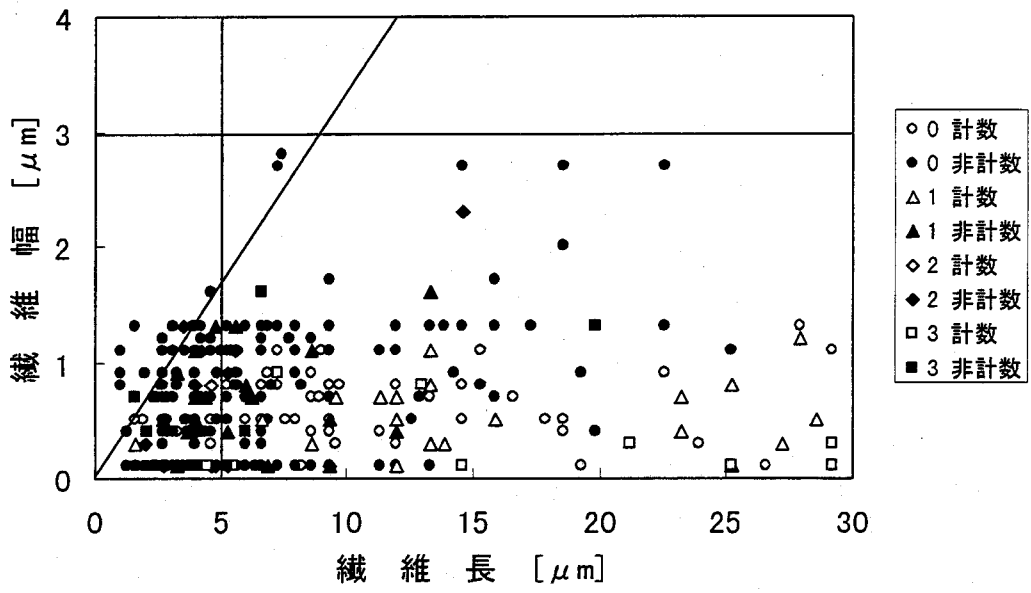


図 2-14(E) 石綿の鮮明度と計数 (機関 E)

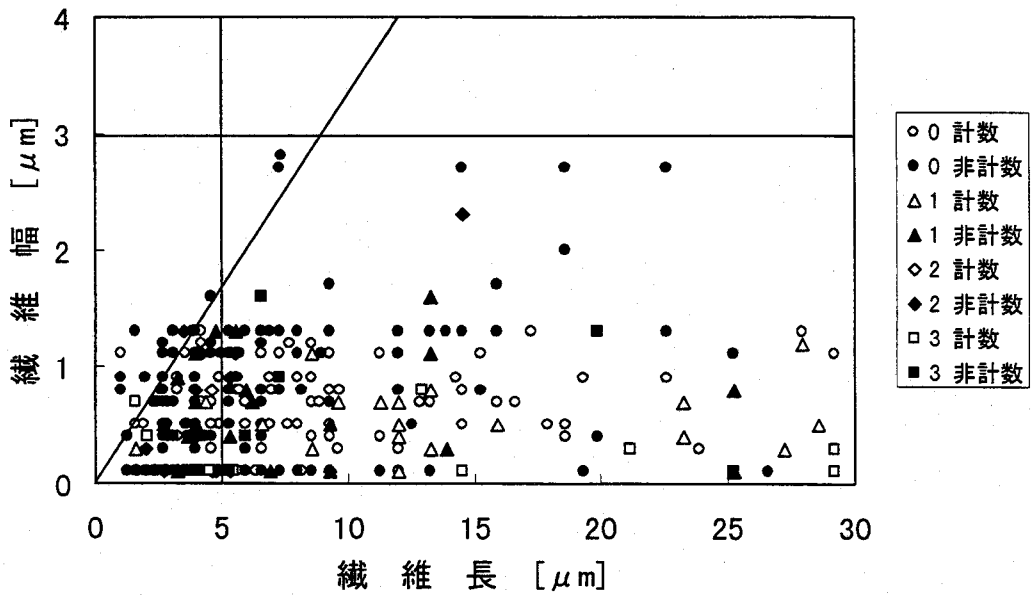


図 2-14(F) 石綿の鮮明度と計数 (機関 F)

2.4 まとめ

2.2 節では、従来から石綿の気中濃度測定のために主として用いられているメンブランフィルタ法を用いた PCM 法について述べた。測定法としては、作業環境に対しては協会法、ガイドブック法が、一般環境に対してはマニュアル法が用いられ、石綿のサンプリング方法が異なるが計数法にはほとんど差がない。計数法は、繊維状物質が石綿と計数してほとんど間違いがないと考えられる作業環境用のために AIA が定めた、形状による石綿同定法を採用している。しかし、これをそのまま非石綿繊維物質が多数含まれ、かつ石綿濃度が作業環境に比べてはるかに低い一般環境用の測定法として採用するには、形状情報のみによる石綿繊維の同定の可否や捕集時間の選定などの点で、少なからず問題が生じることが指摘できる。

2.3 節では、PCM 法の計数精度に大きくかかわる、計数者あるいは計数機関間による計数値のばらつきの原因を探る目的で行った肉眼計数による 6 計数機関間のクロスチェックについて述べた。本節におけるクロスチェックには、従来から実施されている計数値のみの比較ではなく、計数対象物を特定する方法を採用した。この結果から、各計数機関の計数値は 375～77 本（幾何平均 169 本）となり、最大値と最小値の比は約 5 となった。一致度係数の最大値は 0.502、最小値は 0.122、算術平均値は 0.347、標準偏差は 0.107 となった。このことから、肉眼計数においては計数基準が定められているにもかかわらず、必ずしも同一のものを計数しているとは限らないことが示唆された。

一方、計数における石綿同定の判定基準として繊維長と幅の特徴量を使用しているが、顕微鏡像の鮮明度とこれらの特徴量の関係および繊維の曲がり度と特徴量の関係を調べた。肉眼計数においては、計数機関によっては長さの判定が甘く、かなり微小なものまで計数しているものがある。幅については肉眼計数機関全体的に判定基準が細かい値でなされており、「繊維状」という判定基準に対し過敏に反応し、かなりスマートな形状のものしか計数しない傾向が見受けられる。また、計数則以外の独自の判断に基づいて計数されている機関の存在が示唆され、計数値にばらつきが生じているものと思われる。

作業環境中の濃度は比較的短期間の濃度変化を対象にしている。極端には測定時に規制値をクリアしているか否かが問われる。しかし、一般環境中の石綿濃度は、通常、年単位の低濃度の変化をモニタする必要がある。特に、計数値の客観性・再現性に対する信頼性が重要になる。このことから、一般環境における石綿濃度測定には人的測定ではもはや限界があり、計数基準が明確な自動化計数が必要となる。

参考文献

- 1) 日本石綿協会：石綿粉じん濃度測定要領，日本石綿協会，pp.3-37(1984)
- 2) 環境庁大気保全局大気規制課監修：アスベスト排出抑制マニュアル増補版，ぎょうせい，pp.225-231(1988)
- 3) 早瀬隆時司他：アスベストモニタリング結果について，京都大学環境衛生工学研究会第9回シンポジウム講演論文集，pp.182-187(1987)
- 4) 環境庁大気保全局大気規制課：アスベスト規制のための「大気汚染防止法の一部を改正する法律案」について，産業公害，Vol.25，pp.53-54(1989)
- 5) 日本石綿協会：石綿に係る法規等，日本石綿協会，pp.4-5(1995)
- 6) 房村信雄他：透過ノマルスキー微分干渉顕微鏡による各種繊維状物質の識別方法と定量に関する研究，作業環境，Vol.7，No.2，pp.65-72(1986)
- 7) Y.Soma et al. : Adsorption of Fluorescent Dyes to Chrysotile Asbestos, *Clay Science*, Vol.9, pp.9-20(1993)
- 8) M.F. Stanton, M. Layard, A. Tegeris, E. Miller, M. May, E. Morgan, and A. Smith: Relation of Particle Dimension to Carcinogenicity in Amphibole Asbestoses and Other Fibrous Minerals, *J. of the National Cancer Institute*, Vol.67, pp.965-975(1981)
- 9) 河合清之：石綿の生体影響－実験的研究，大気汚染物質レビュー石綿，日本科学技術情報センター，p.59(1984)
- 10) 宍戸眞二：動物実験，石綿・ゼオライトのすべて（環境庁大気保全局企画課監修），（財）日本環境衛生センター，pp.103-104(1987)
- 11) 木村菊二：メンブランフィルタ法による石綿粉じん測定上の留意点，労働衛生工学，No.18，pp.11-13(1979)
- 12) 労働省編：新訂作業環境測定ガイドブック1，日本作業環境測定協会，pp.134-148(1990)
- 13) Asbestos International Association: Reference Method for the Determination of Airborne Asbestos Fiber Concentrations at Workplaces by Light Microscopy (Membrane Filter Method), AIA
- 14) 牛山昭：石綿業界の現状と対応策，空気清浄，Vol.24，No.5，pp.22-31(1987)
- 15) 森義明：環境中のアスベストのサンプリングと分析法，環境技術，Vol.17，pp.115-118(1988)
- 16) 木村菊二：アスベスト測定技術の現状と課題，建築仕上技術，No.5，pp.58-61(1989)
- 17) 本間克典：アスベスト濃度測定用位相差顕微鏡（PCM）法の精度，エアロゾル協議会セミナーテキスト，pp.1-10(1989)
- 18) Gale et al. : Automatic detection and counting of asbestos fibers, *Am. Ind. Hyg. Assoc. j.*, No.40, pp.50-53(1979)
- 19) 日本化学会編：生物化学 I（実験化学講座 23），丸善，p.370

- 20) N.P.Crawford et al. : Towards Development of RICE to Include Low Density Samples from Asbestos Clearance Operations, *Spec. Publ. R. Soc. Chem.*, No.108, pp.463-465 (1982)

第3章 石綿計数過程の自動化システムの構築

3.1 はじめに

前章では、従来から大気中の浮遊石綿濃度測定のために実施されている PCM 法による肉眼計数の問題点を指摘し、計数の自動化の必要性を述べた。

本章では、肉眼計数の問題点を解消するための石綿繊維計数の自動化を目的として開発した、画像処理手法を用いた石綿繊維の自動計数システム (AFACS: Asbestos Fibers Automatic Counting System) の機器構成および計数アルゴリズムを述べる。また、国際石綿協会 (AIA: Asbestos International Association) が石綿繊維の判定要領として提示している図を用いた、AFACS の性能評価も実施したので、その結果も併せて述べる。

AFACS の開発コンセプトを、①計数基準は肉眼計数における計数基準に準拠していること、②ハードウェアは汎用機器で構成し、更新に対して柔軟に対応できることの2点に置き、コストを低く抑さえ導入の容易なものとした。

3.2 機器構成

計測システムの機器構成を図 3-1 に示す。PCM はニコン社製位相差顕微鏡 ph-21, CCD は NEC 社製 CCD カメラ TI-23A, IPB はライブラリ社製イメージ解析ボードひまわり 50 (縦 512 × 横 512 画素, 有効画素縦 512 × 横 484 画素, 256 階調, モノクロ 1/2 画面), MON はビクター社製画像モニタ AV-M150S, MC はエプソン社製パーソナルコンピュータ PC486HX (66MHz), パソコンの周辺機器として, MO はロジテック社製光磁気ディスクドライブユニット LMO-459M (230Mbytes), PR は Canon 社製レーザーショットプリンタ A404F を用いた。ただし, ここに示した機器類はいずれも同程度以上の仕様を有したものであれば, 必ずしもこれらの製品に限定するものではないことはいうまでもない。

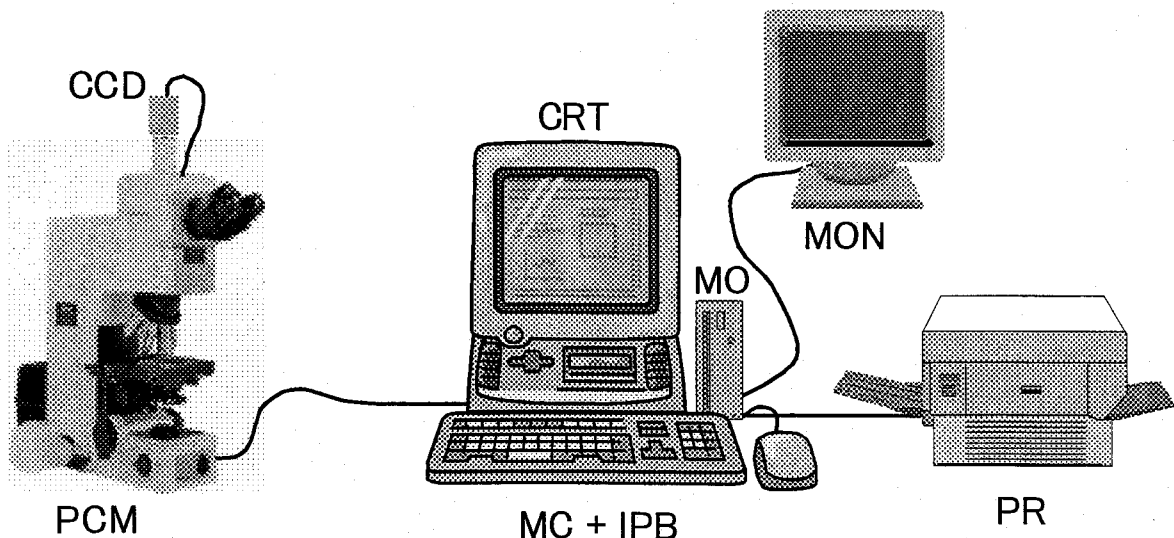


図 3-1 AFACS の機器構成

大気中から捕集された粉じんを顕微鏡用試料として作成した後、所定の倍率および照明強度による顕微鏡像を CCD カメラを通し、画像処理装置にデジタル画像として取り込む。なお、多量の画像を一括処理するために画像データは MO ディスクに一時的に格納する。1 画像のメモリ容量は 256Kbytes であり、230Mbytes の MO ディスク 1 枚には約 900 画像が格納できる。

なお、マイコンの OS は MS-DOS を使用し、計数システムのプログラムは C 言語で記述した。

3.3 自動計数システムで用いた計数基準

本システムの計数則は、基本的に協会法¹⁾に準じている。前述したように、石綿繊維は位相差顕微鏡と生物顕微鏡とでは見え方が異なることを利用して、それらによる計数値の差を石綿繊維数とする方法もあるが、本システムでは見え方の差を十分な精度で自動判別することが困難で、この方法を採用することができなかつた。したがって、形状だけで石綿の判定を行っており、以下に示す条件を全て満足しているものを石綿繊維とみなし計数する。

- ①長さが 5 μm 以上のもの。
- ②幅が 3 μm 以下のもの。
- ③長さとの幅の比が 3 : 1 以上のもの。
- ④粒子が付着している場合は、その粒子直径が 3 μm 以下であること。
- ⑤複数の繊維が交差している場合は、それぞれの繊維を①～③の計数基準により個別に判定する。
- ⑥1本の繊維から枝分かれしている場合は、これを1本と計数する。
- ⑦複数の繊維が複雑に絡み合い、計数不可能な場合は計数しない。
- ⑧繊維の一端が計数領域外にある場合は 0.5 本とし、両端点が計数領域外にある場合は計数しない。

3.4 システム全体のアルゴリズムの概要

図 3-2 に計数システム全体のフローチャートの概略を示す。システムを立ち上げた後、各種パラメータを設定し、以後変更が生じたときのみ再設定する。位相差顕微鏡の照明強度の決定は手動操作で行い、ある程度試行錯誤が必要である。

原画像を得るためのサンプリングは、位相差顕微鏡の焦点合わせやステージの移動を伴うため、手動で行う方が精度が高く、また処理速度も上がるので本システムでは手動操作とした。ここで、原画像とは CCD カメラを通して得た位相差顕微鏡像の信号を A/D 変換したデジタル画像を指すものとする。

必要な原画像をサンプリングした後、原画像中の繊維状物体を抽出し自動計数したが、原画像のままでは計数できないので、計数可能な画像を得るため原画像に前処理を施し、対象物と背景を分離する。

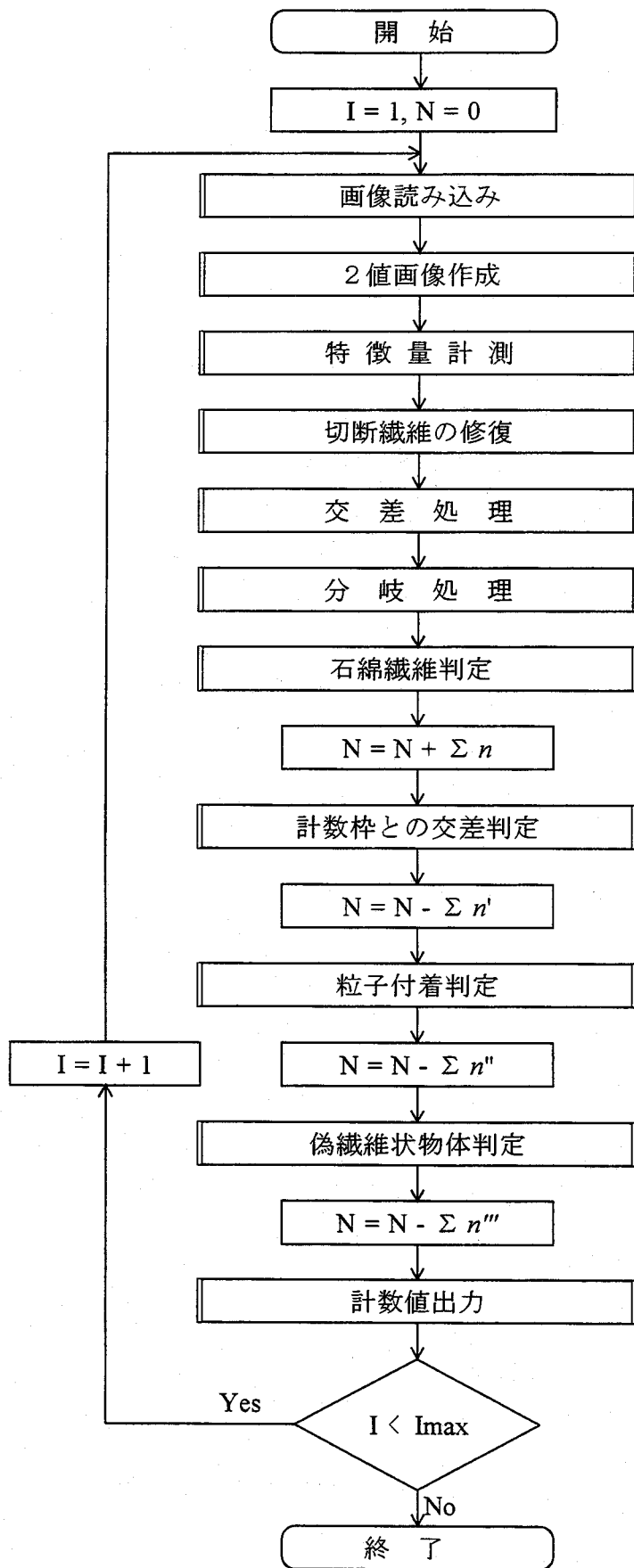


図 3-2 AFACS のフローチャート

前処理後、その画像を端から走査し、対象物を探索する。対象物を見つければ形状を計測し、石綿の計数条件を満足するかどうかを判定する。石綿と判定されればその繊維数を累積し、次の対象物を探索する。棄却されれば、直ちに次の対象物の探索に移る。画像全体の処理が終われば、その画像中の石綿繊維数を記録し、次の画像の処理に移る。指定した画像全ての計数が終われば、そのグループの総石綿繊維数を出力しシステムを終了する。

100枚の原画像をサンプリングするのに要する時間は約30分である。1枚の原画像を計数するのに要する時間は、画像中の対象物数にも依存するが約1分程度であり、より高速のマイコンを使用すれば処理時間の短縮は可能である。

なお、本計数アルゴリズム中には、

- ①不本意ながら切断されたもの、
- ②意図的に切断したもの、

の2種類の切断セグメントを元の状態に戻す処理がある。前者は2値画像を作成する際の2値化により切断されたものであり、修復する処理は3.6.3 切断繊維の修復の項で述べている。後者は交差や分岐した繊維をそれぞれ個別に判定、計数するための処理過程として、分離点で幹や枝を一旦切断したものであり、3.6.4 交差・分岐処理の項で切断方法と交差・分岐の判定法について述べている

3.5 手動操作

3.5.1 照明強度の決定方法²⁾

石綿試料の原画像の状態は、一定の照明強度でも試料の透明化などによる作成状態に変化する。また、使用する日あるいは時間帯が変わると照明の電圧が変化し、照度の再現性が悪くなり計数値に影響を及ぼす。

照明が暗すぎると対象物と背景の分離が悪くなるため計数値は少なくなり、反対に明るすぎると対象物が切れた状態で取り込まれ計数値は大きくなる傾向がある。さらに照明を明るくすると対象物は背景に取り込まれてしまい、何も見えなくなる。したがって、中間に最適な照明強度が存在することが示唆される。そこで、何らかのパラメータで最適な照明状態を表す必要がある。

本システムでは、最適照明のためのパラメータ候補として輝度値のメディアン（中位値）、標準偏差、四分位偏差を考え、18視野を対象として明るさを16段階に変化させた画像を用意し、それらを本システムで処理して、どのパラメータが最適照明を最もよく表現できるかを調べた。最適照明は相対繊維数（計数値／実際の繊維数）で評価し、1に近いものほど繊維数を正確に計数しているので最適照明と判断した。ここでは、実際の繊維数として肉眼計数値を用いた。また、各視野中の平均繊維数は約17本であった。

図3-3に輝度のメディアンと相対繊維数、図3-4に標準偏差と相対繊維数、図3-5に四分位偏差と相対繊維数の関係を示す。試料にはアモサイト（amosite：茶石綿）を用いた。

図3-3では、最適照明を示す相対繊維数=1がメディアンの大きな（200程度）領域に比較的多く分布するが、同時に相対繊維数<1の場合も多く分布している。分布型は概

してテーブルマウンテン型をしており、最適照明に対するメディアンを一義的に決定することが困難である。

図 3-4,5 ではばらつきが大きいですが、概して、いずれも標準偏差および四分位偏差の値が増えるにしたがって、相対繊維数が1に漸近する傾向がある。標準偏差，四分位偏差ともより大きな値ほどよいことがわかった。この傾向は標準偏差の方が四分位偏差より大きい。

以上の結果から、本研究では画像の輝度ヒストグラムの標準偏差が最大値となるように照明を調整する方法を採用し、原画像の最適化を図った。

通常、照明の調整は、測定対象場が変わるなど試料の状態が大きく変化する場合以外は再調整の必要はない。

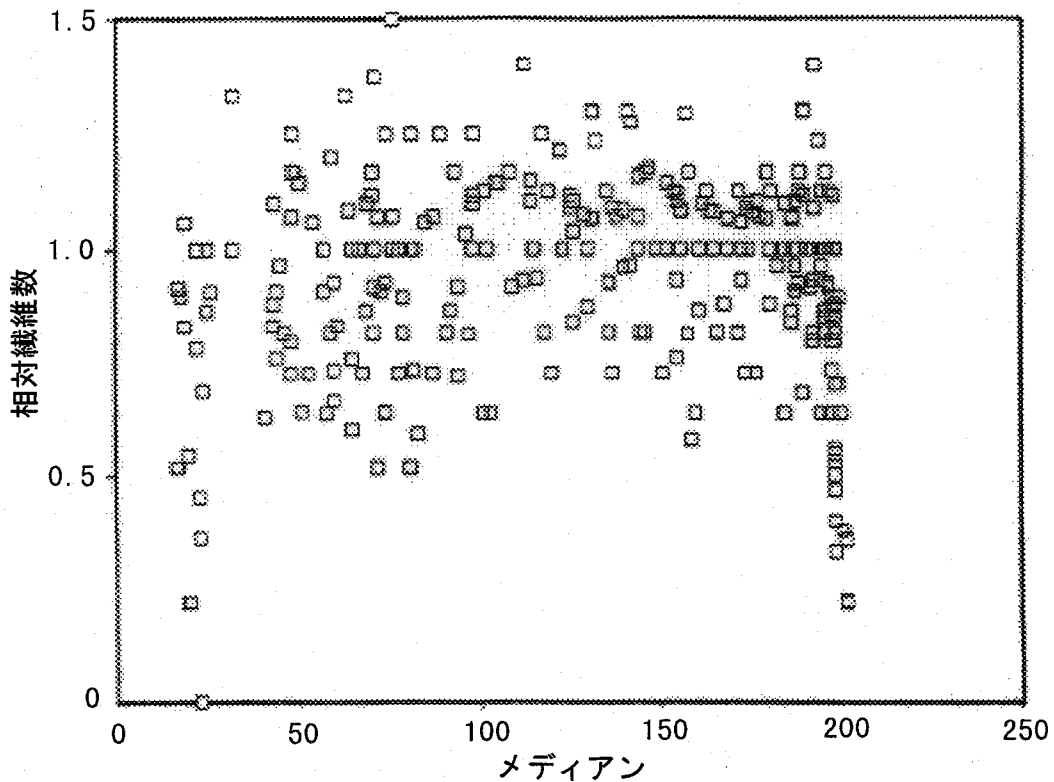


図 3-3 メディアンと相対繊維数の関係

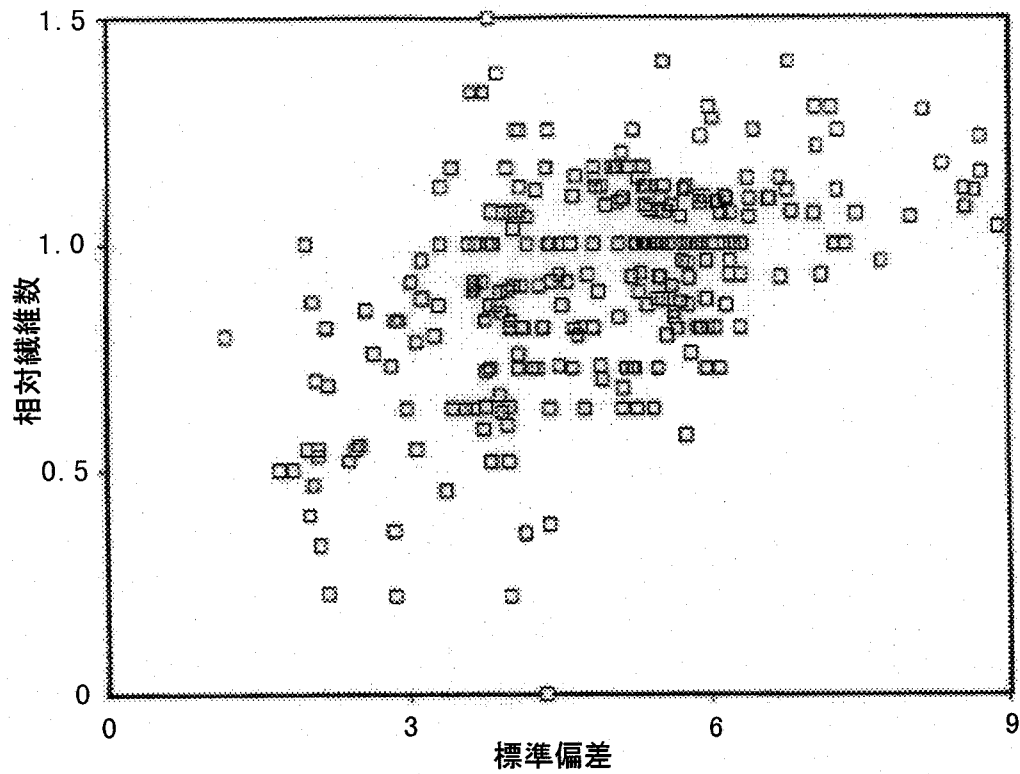


図 3-4 標準偏差と相対繊維数の関係

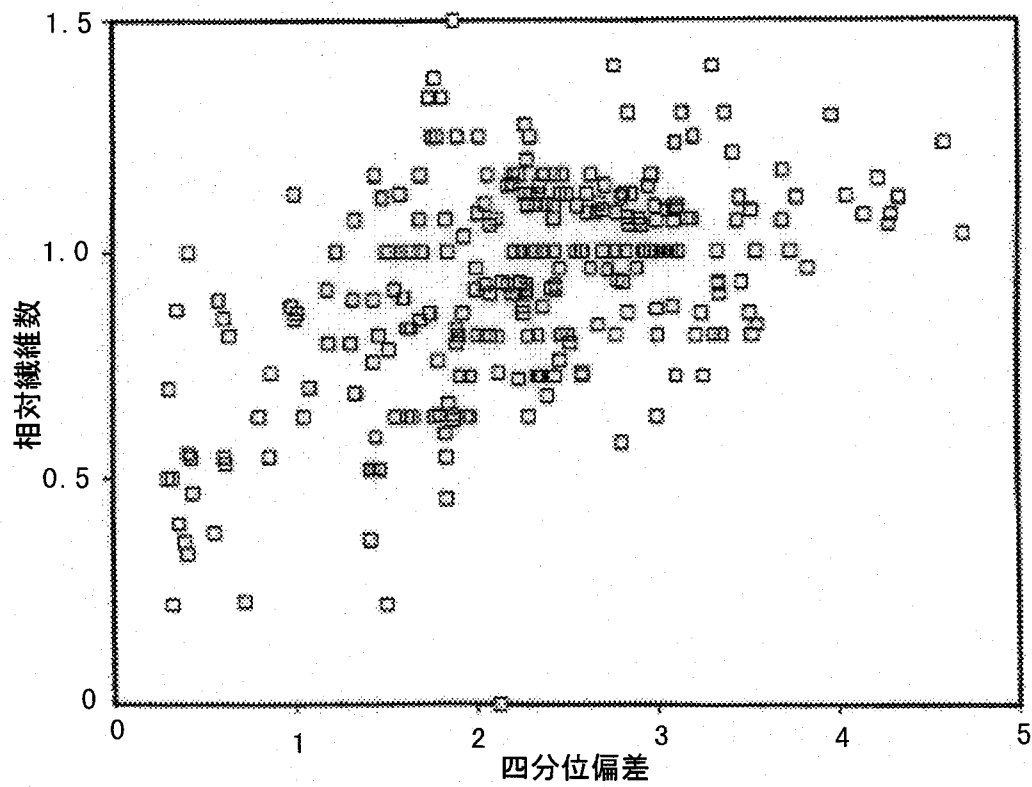


図 3-5 四分位偏差と相対繊維数の関係

3.5.2 原画像の取り込み・記録

顕微鏡の最適照明の調整後、原画像をサンプリングする。サンプリングに際しては、計数者の主観的要素を排除するため顕微鏡視野をランダムに選択し、試料の一部の領域に偏らず全体から選ぶ必要がある。また、石綿以外の極端に大きな鉱物が存在するなど、計数するのにふさわしくない像をあらかじめ除外できれば処理速度は向上する。

そこで、本システムでは計数者の主観を排除するため、顕微鏡のステージを一定間隔で移動させる方法により視野選択を行った。ただし、計数にふさわしくない像は飛ばした。また、顕微鏡の焦点合わせは、視野内の繊維状物体が全体的に明瞭になるように合わせた。このような視野選択および焦点合わせ等の操作は、処理の精度や速さを考慮して手動操作とした。

顕微鏡像は CCD カメラで電気信号に変換された後、A/D 変換されて画像処理装置にデジタルの原画像として取り込まれる。これらの原画像は、後の計数ルーチンで一括自動計数するために、MO ディスクに画像ファイルとして格納する。

この一連の操作を必要視野分行う。試料ごとにグループ分けをしておけば、グループ単位で計数処理され、グループごとの総石綿数が求められる。

3.6 自動計数における各処理過程のアルゴリズム

3.6.1 2 値画像の作成

(1) 輝物体除去³⁾

大きな鉱物質などは、原画像をサンプリングする際あらかじめできる限り除外することは 3.5.2 で述べたが、どのようにしても微小鉱物質を除外するには限界がある。微小鉱物質などの中でのガラス質のように、高い透明度、言い換えれば高輝度をもつ物体は、最適な 2 値画像を得るには妨げになるため、以下の方法でソフト的に除外する。

- ①原画像の全領域におけるヒストグラム（輝度に対する画素数の和の分布）を求める
- ②ヒストグラムの高輝度側からある輝度までの累積画素数を求める
- ③この累積画素数が全画素数の基準割合を越えたときの輝度を補修輝度とする
- ④補修輝度以上の輝度をもつ画素の輝度をすべて補修輝度に変換する

基準割合は画像によって変える必要があるが、ここでは 1% の値を採用した。

しかしながら、輝物体を除去したとき、輝物体の周辺部における輝度勾配によっては、2 値化の際にリング状、その一部が欠けた C 形状、またはちぎれて繊維状となったものが対象物として生じる場合がある。輝物体除去が原因で生じ、最後まで石綿計数条件を満たす繊維状対象物に対しては、3.6.5(4)の計数処理における偽繊維状物体判定により除去する。

(2) シェーディング補正⁴⁾

原画像には、照明の不均等さあるいは顕微鏡視野の中心部より周辺部は暗くなるレンズ

特性から必然的に生じる変調シェーディングなどによって生ずる「照明むら」が存在する⁵⁾。このまま照明むらを有する原画像に2値化処理を施すと正しい物体形状をもった画像を得ることが出来ない。そこで、この照明むらを除去するために、2値化の前処理としてのシェーディング補正処理が必要となる。

本システムでは、シェーディング補正として原画像と同じ照明むらをもち、かつ原画像から対象物を取り去ったいわゆる背景画像から原画像を減算する手法を用いた。しかし、単純に背景画像から原画像を減算すると、演算結果が負になる領域が生じる場合がある。

例えば、ある対象物を横切る線上の輝度分布が図3-6に示したものであったとする。本システムでは、透過光による顕微鏡画像を観察しているため、対象物の輝度は背景の輝度より低くなり、黒く見える。ここで、背景画像と原画像の各画素間で減算すると、背景画像の画素の輝度値より原画像の画素の輝度値が大きい領域(矢印で示した部分)では、演算結果が負となる。ところが、輝度値は正の値しかとらないため、これらの領域の輝度情報(言い換えれば形状情報)は欠落する。

そこで、このような情報の欠落を生じさせないために、シェーディング補正には以下の方法で作製した背景画像を用いた。

- ①フィルタのみを試料作成手順に従って透明化したブランク試料の顕微鏡像をサンプリングする
- ②①の画像に7×7のマトリックスフィルタにより単純平滑化処理を施し、輝度変化の高周波成分を除去する
- ③原画像から②の画像を減算して得られた画像の最大輝度値を求める
- ④②の画像の全領域に③で得られた最大輝度値分を加算する

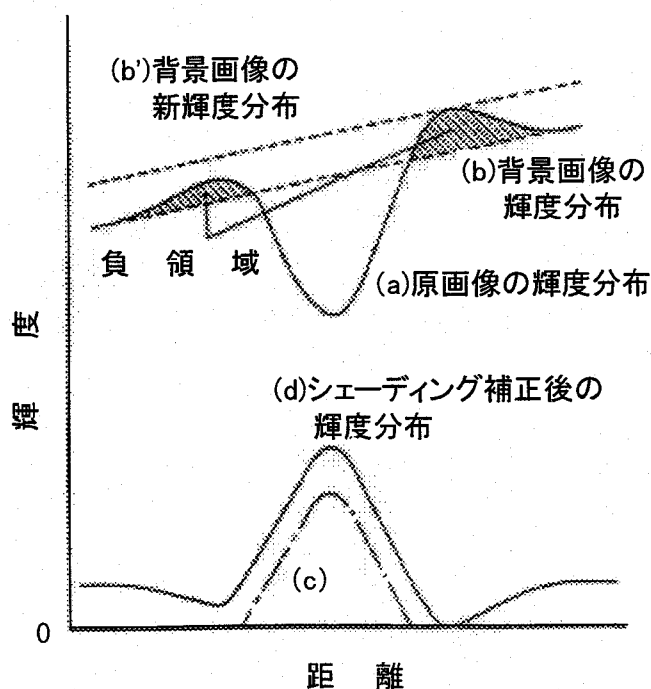


図3-6 対象物周辺の一次元輝度分布

④で得られた画像を補正用背景画像とした。

この補正用背景画像と原画像の差を求めることによりシェーディング補正を行った。ただし、補正後の画像は原画像の対象物と背景の輝度関係と逆になり、背景の輝度は低く、また対象物の輝度は背景のそれより相対的に高くなる。

(3) 2値化処理

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は、式(3-1)により対象物と背景に分離した2値画像を対象とする。

$$\begin{aligned} k \geq k_T \text{ の場合 } k &= k_{\max} \\ k < k_T \text{ の場合 } k &= 0 \end{aligned} \tag{3-1}$$

ここで、 k は輝度値 ($0 \leq k \leq k_{\max}$)、 k_{\max} はシステムの最大輝度値、 k_T はしきい値を表す。

2値化処理は、簡単ではあるが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。最適な2値画像を得ることと最適しきい値を選択することとは等価であり、従来からこの最適しきい値を自動的に求めるための最適しきい値評価法が多方面で研究されている⁶⁾。このことは取りも直さず、どのような画像に対しても満足できるような最適しきい値を求める方法が、未だ開発されていないことを意味し、対象画像によってしきい値選択法を使い分けなければならないのが現状である。

2値化しきい値選択法は、一つの画像に対して一つのしきい値を対応させる方法（以下単一しきい値選択法という）と複数のしきい値を対応させる方法に大別できる。しかし、後者の方法は一つの画像を任意の領域に分割し、各領域ごとに最適しきい値を求める方法であり、基本的には単一しきい値選択法と変わりはない。また、一般的に、後者の方が前者に比べて演算量が多く、計算時間は長くなる。

本研究では、処理時間の関係上、単一しきい値選択法により2値化処理をすることにした。単一しきい値選択法としては「pタイル法」、⁷⁾「モード法」、⁸⁾「微分ヒストグラム法」や「判別規準に基づく自動しきい値選択法（以下判別分析法という）」⁷⁾がよく用いられる。また、ニューラルネットワーク手法を最適しきい値選択に適用する研究（以下ニューラルネットワーク法という）⁸⁾も行われている。「pタイル法」は画像中に占める対象物の割合が予め分かっている場合に、また「モード法」は画像のヒストグラムが双峰性を成している場合には有効な手段である。「微分ヒストグラム法」⁹⁾は、画像のラプラシアンを求めることによりヒストグラムの双峰性を高めようとする方法である。「判別分析法」は、対象物と背景の分離性の評価関数として判別分析で用いられる判別規準を導入したもので、ヒストグラムが単峰性のものでもそれなりの結果が得られる。ただし、対象物と背景の面積比が大きく異なる場合には、よい結果が得られない。ニューラルネットワーク手法は脳の神経細胞（ニューロン）の情報伝達機能をモデル化したものであり、この手法は、

入力情報と出力結果間の因果関係（結合強度）が明確でないものに対しても，入力情報と教師情報を繰り返し学習することにより，その因果関係をモデル自身で構築（ニューロン間の結合強度を調節）していこうとするものである。

本研究の対象となる石綿繊維を含んだ画像は，①ヒストグラムが単峰性を有し，②対象物と背景の面積比は常に一定ではなく，③比較的小さい場合が多い，などの特徴がある。これらの理由から，従来からよく用いられてきた上述の最適しきい値選択法を採用することができないため，新しく繊維状粒子を含んだ画像のための最適しきい値選択法を開発し提案する⁴⁾。この方法は，対象画像の背景部分の輝度分布形を正規分布と仮定することにより最適しきい値を求めようとするものであり，以後正規分布法とする。以下に，正規分布法を用いた最適しきい値の求め方について述べる。また，繊維状粒子を含んだ画像に対する正規分布法の処理能力を判別分析法，ニューラルネットワーク法と比較することにより調べた（Appendix A 参照）。

図 3-7 に 2 値化対象画像の輝度と相対度数の関係の一例を示す。ただし，図中の丸印は 2 値化対象画像のヒストグラム処理から得た実測値である。シェーディング補正を行った画像中の対象物の平均輝度は背景の平均輝度より高いが，背景に対するコントラストが低く，また対象物の面積割合が低いいため，対象物上の画素は最大相対度数を示す輝度より高輝度側で背景部に重ね合わさった状態で存在することになる。そこで，背景の輝度分布を h ，対象物の輝度分布を g とすると，しきい値 k_T で 2 値化したとき， g の $0 \sim k_T$ の積分値 A は本来対象物であるにもかかわらず背景とみなされる部分であり， h の $k_T \sim k_{\max}$ の積分値 B は背景であるにもかかわらず対象物とみなされる部分となる。すなわち， $A + B$ を最小とする $g(k) = h(k)$ を満足する k を k_T として求めるが，輝度は整数値をとるため k を四捨五入し，正規分布法を用いた場合の最適しきい値 k_{ND} とした。

次に，本論文で用いた k_{ND} 推定のための背景および対象物の輝度分布 h ， g の求め方の具体例を示す。まず， h を推定するため，2 値化対象画像の輝度分布と累積相対度数の関係を正規確率紙上に丸印でプロットした例を図 3-8 に示す。同図から h は 1～90% の範囲でほぼ正規分布をしていることが確認できる。背景部の輝度分布パラメータ（最大相対度数，平均輝度，標準偏差）は，最大相対度数に対応する輝度（↑で示す）を中心として，それより低輝度側 2 点および高輝度側 2 点の合計 5 点（図 3-7，図 3-8 中の●で示す）の輝度分布データを用いて，最小自乗法により決定した（Appendix B 参照）。これらのパラメータを使って計算により求めた h を図 3-8 中に実線で示す。また， g は 2 値化対象画像の輝度分布と h の差とし，差が負の場合は 0 とした。

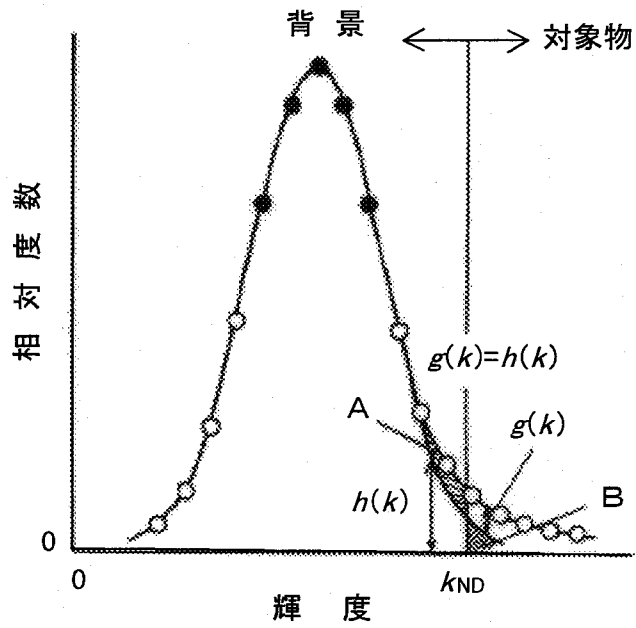


図 3-7 2 値化対象画像の輝度分布

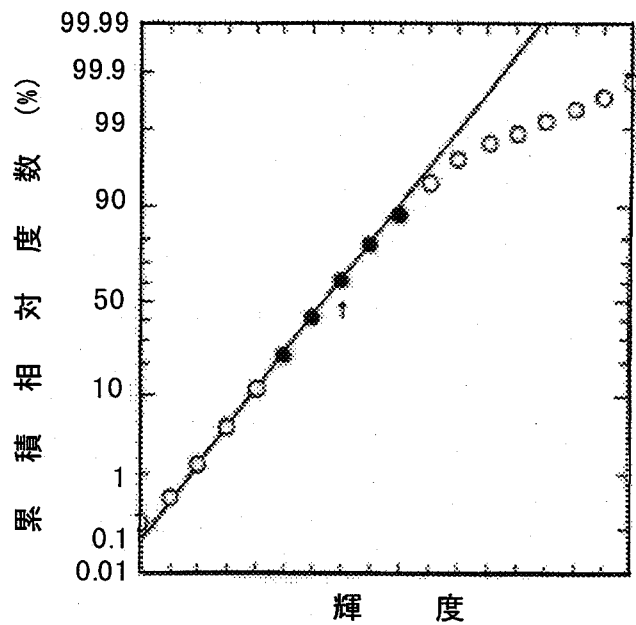


図 3-8 正規確率紙上にプロットした輝度に対する累積相対度数分布
(実線は●データから最小自乗法により求めたもの)

3.6.2 特徴量の計測¹⁰⁾

石綿繊維の計数基準から、対象物の石綿繊維判定に用いる幾何学的特徴を対象物の長さ l 、幅 w 、長さとの比 l/w とした。また、切断繊維の修復判定や交差・分岐処理に用いる対象物間の相対位置を表す特徴を、対象物の端点における近傍ベクトル、端点間距離 d とする。また各種特徴の量的計測を容易にするため、特徴量計測に先立って対象物のスムージング、細線化およびセグメント化等の前処理をする。以下に各前処理について述べる。

(1) スムージング

2値化によって作製された2値画像中の対象物の輪郭は凹凸の激しい形状をもつものが多く、そのままでは適切な特徴量計測に支障をきたすので、スムージング処理が必要となる。スムージング手法には種々のものが考案されている¹¹⁾が、スムージングにより対象物が結合・分離しない性質が要求される。ここでは、対象物を多角形近似することにより、凹凸のスムージングを行った。以下に、多角形近似法のアルゴリズムについて述べる。

(図 3-9 参照)

- ① 輪郭構成点を P_k ($k = 0, 1, \dots, m$) とし、さらに $n = 0$ とする
- ② $k = n + 2$
- ③ P_n と P_k を結ぶ線分を $\overline{P_n P_k}$ とし、 $i = n + 1, n + 2, \dots, k - 1$ における $\overline{P_n P_k}$ と P_i の距離の和を D とする
- ④ D が限界値を越えない場合は $k = k + 1$ とし、③へ戻る
- ⑤ D が限界値を越えた場合は P_n と P_{k-1} を直線で結び、 $n = k - 1$ とおく
- ⑥ $n < m$ ならば②へ戻り、 $n \leq m$ ならば終了

ここで、輪郭構成点座標は李らの輪郭追跡アルゴリズム¹²⁾に若干改良を加えた手法で求めた。

図 3-10 に多角形近似法を用いたスムージング処理例を示す。ただし、図 3-10a はスムージング処理前の画像であり、図 3-10b は処理後の画像である。処理前後で大きな変化は見受けられないが、円中の図形は若干変化している。

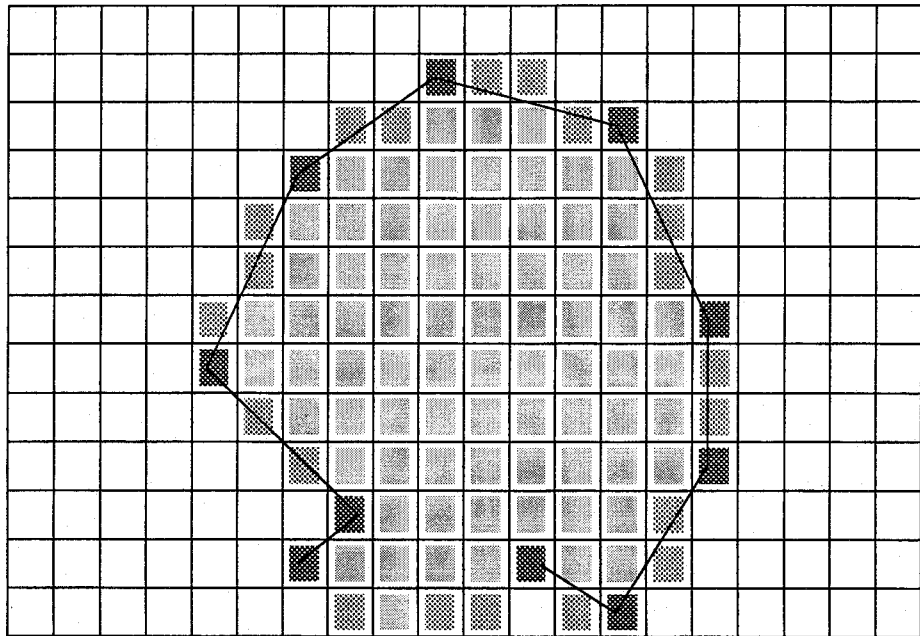


図 3-9 スムージングのための多角形近似法

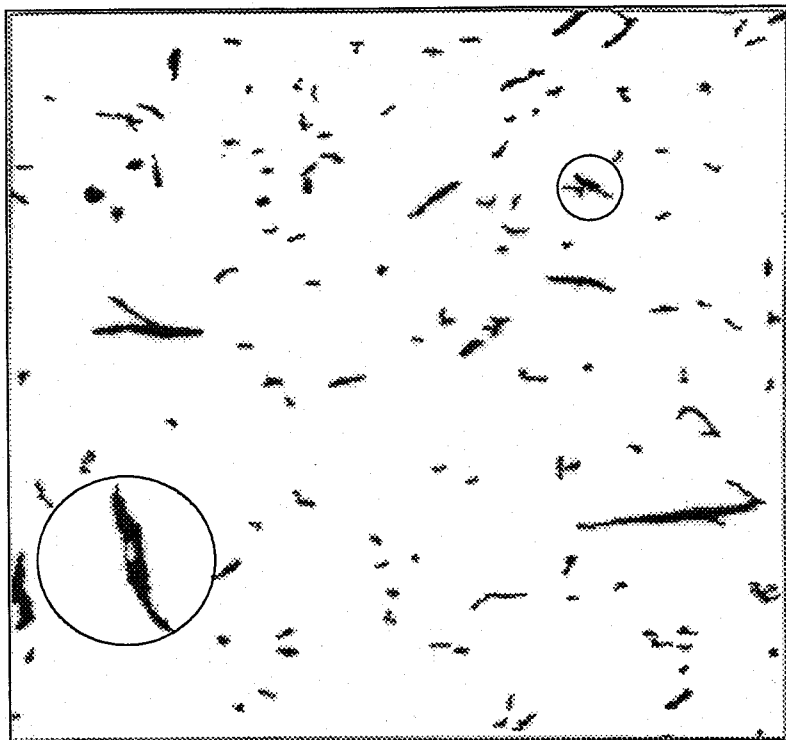


図 3-10a スムージング処理画像例 (処理前)

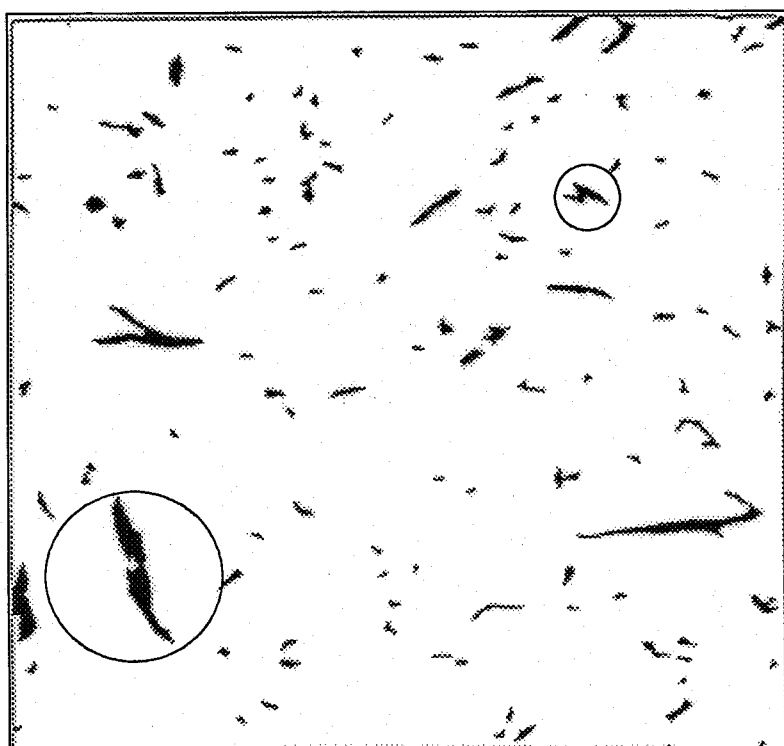


図 3-10b スムージング処理画像例 (処理後)

(2) 細線化

対象物の特徴量を計測するためには、その幾何学的形状をマクロ的に認識する必要がある。ここでは、対象物の連結状態を保存しつつ輪郭部から順次対象物上の画素を削り取り、最終的には幅1画素の芯線（以下、細線という）のみを残す細線化手法を、その幾何学的形状を認識するための前処理として用いた。細線化は従来から種々の手法が開発されている¹³⁾が、本システムでは細線追跡処理の都合上、「完全8連結」と「線幅が1画素」の条件を満たす必要がある。ここでは、その条件を満たし、比較的良好に普及している Hildich の手法¹⁴⁾を採用した。

図3-11に細線化処理例を示す。図3-11aは図3-10aの画像に細線化処理を施したものであり、図3-11bは図3-10bの画像に細線化処理を施したものである。図3-11aと図3-11bにおける円中の細線は異なるが、これはスムージング処理の効果によるものである。

(3) セグメント化

対象物の交差や分岐状態の認識を容易にするために、細線化により得られた対象物の細線を交差点や分岐点で分離する。この処理をセグメント化といい、分離により断片化された各細線をセグメントと呼ぶ¹⁵⁾。特徴量の計測はこれらのセグメントごとに行われる。

孤立点、端点、連結点、交差点および分岐点などは、交差数 (crossing number)¹⁶⁾ の概念を導入し求めた。交差数 R_c は、対象物および背景の画素値をそれぞれ1, 0としたとき、式(3-2)で求まる。

$$R_c = \frac{\sum_{k=1}^8 f(x_k)(1 - f(x_{k+1}))}{2} \quad (3-2)$$

ここで、 $f(x_k)$ ($k = 1, 2, \dots, 8$) は8近傍の画素値を表し、 $x_9 = x_1$ とする。結果が $R_c = 0$ の時は孤立点、 $R_c = 1$ の時は端点、 $R_c = 2$ の時は連結点、 $R_c = 3$ の時は分岐点、 $R_c = 4$ の時は交差点となる。これら、8近傍における孤立点、端点、連結点、分岐点、交差点の関係を図3-12に示す。

通常、セグメントは2つの端点（例外的に円をセグメント化した円形セグメントは1つの端点）をもち、セグメント化以前から端点であったものを「真の端点」、セグメント化により端点になったものを「偽の端点」と呼ぶことにする。また、細線の分離点（交差点と分岐点の総称）近傍は局所的な曲がりが生じ、正確な端点部の近傍ベクトルを求めることができない場合がある。それを防止するため、分離点を中心とする同心円上において、半径を順次大きくしながら背景に属する画素を細線化前の画像上で検索し、最初に見つかった時の半径より1画素小さい円内に属する細線を消去した。

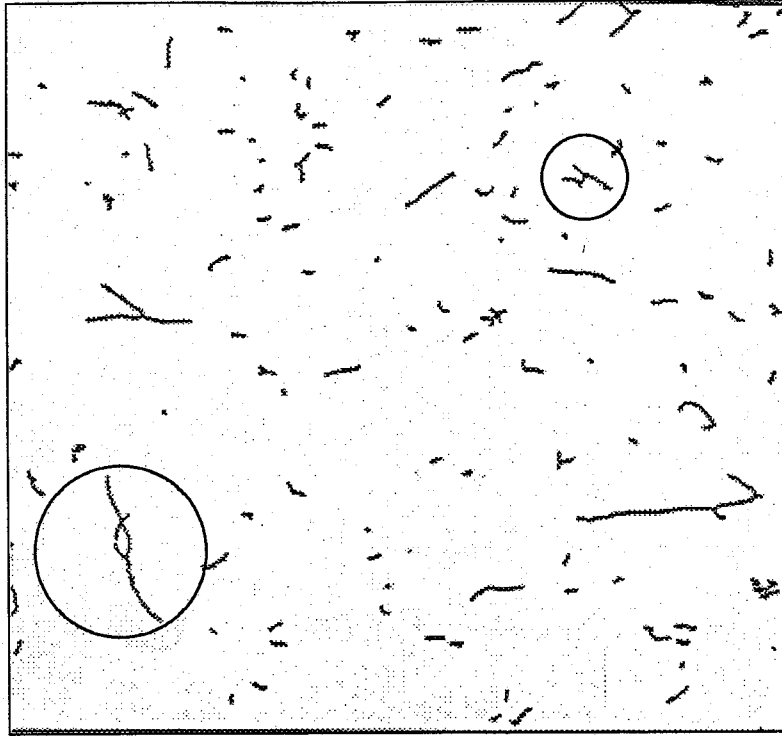


図 3-11a スムージング処理をしない画像の細線化例

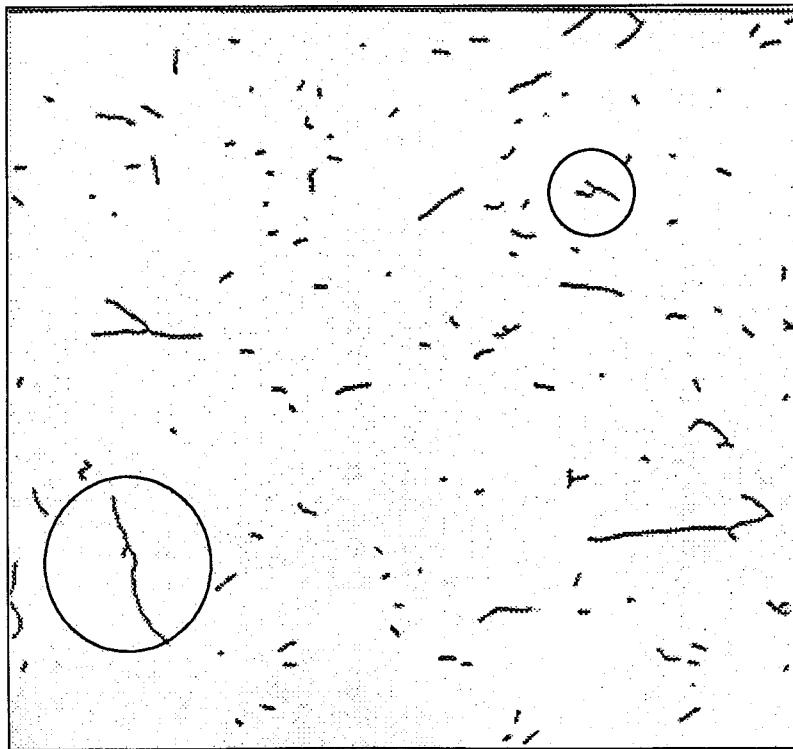


図 3-11b スムージング処理をした画像の細線化例

次に、セグメント化の手順を示す。(図 3-13 参照)

- ① 細線構成点を検索し、 P_k ($k = 0, 1, \dots, n$) とおく
- ② $k = 0$
- ③ P_k の R_c を求める
- ④ $R_c \neq 3$ または 4 であれば⑥へ進む
- ⑤ P_k 周りの細線構成点を削除
- ⑥ $k = k + 1$
- ⑦ $k \leq n$ ならば③へ戻る。 $k > n$ ならば終了

図 3-14 にセグメント化画像例を示す。

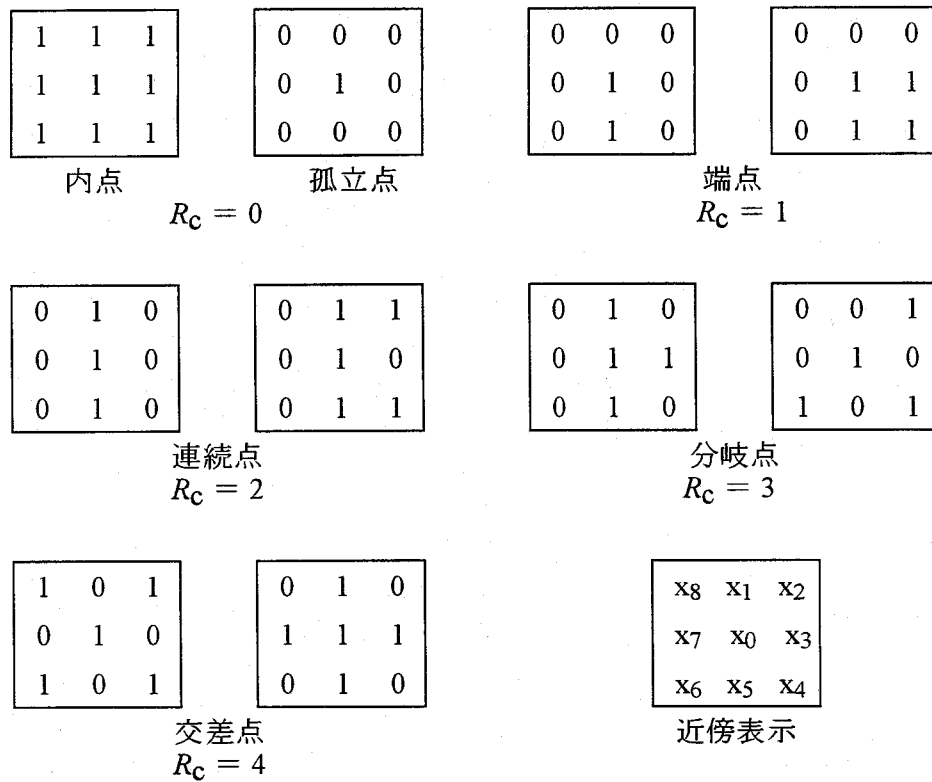


図 3-12 交差数 R_c と孤立点、端点、連結点、分岐点、交差点の関係

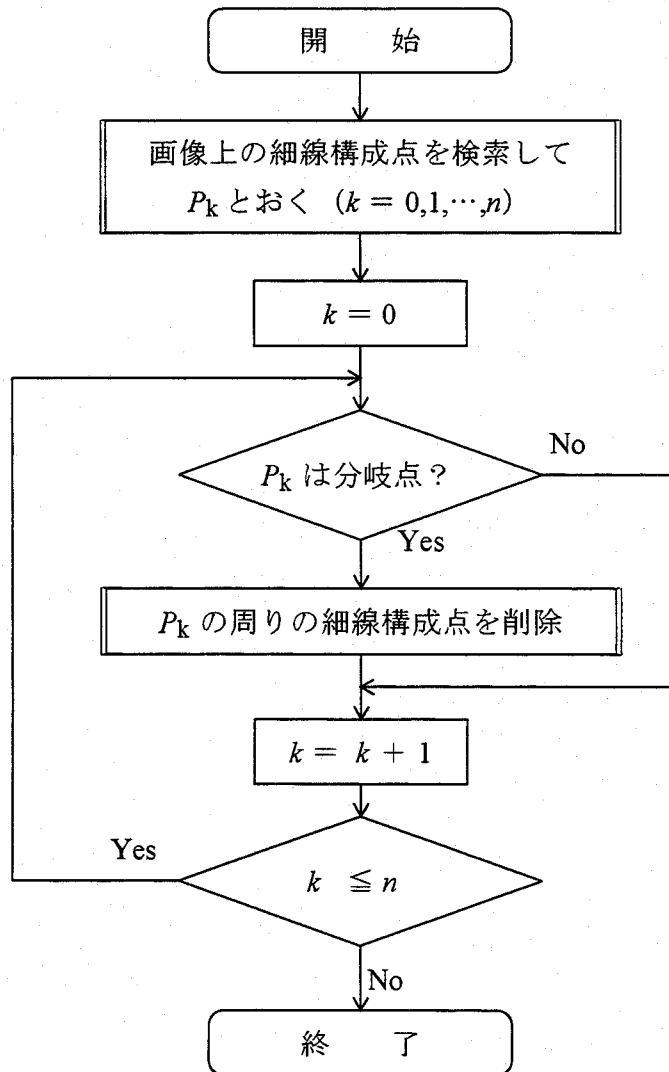


図 3-13 セグメント化手順



図 3-14a セグメント化処理前の画像



図 3-14b セグメント化処理後の画像

(4) 特徴量計測

セグメントの特徴は、長さ、幅、端点における近傍ベクトル、端点属性、対象物番号および円形セグメント属性とした。以下に、各特徴の定義と特徴量の測定方法について述べる。

セグメント長さは、セグメントの一方の端点から他方の端点までの細線長 l と定義する。細線長は、一方の端点から細線構成点を1点ずつ逐次追跡し、それらの点間距離の総和として求める。点間距離は4近傍方向に対しては1、斜め方向に対しては $\sqrt{2}$ とした。

セグメント幅は、全ての細線構成点における対象物までの最短距離の中間値 w と定義する。ここでいう最短距離とは、ある細線構成点を中心とする同心円上において、半径を大きくしながら背景に属する画素を探索し、最初に見つけた時より1つ前の段階の半径をいう。(図 3-15 参照)

近傍ベクトルは、端点近傍のセグメントの方向を示すもので、端点から5つ目の細線構成点とその端点を結んだベクトルと定義する。ただし、近傍ベクトルは方向のみもち大きさはもたない。(図 3-16 参照)

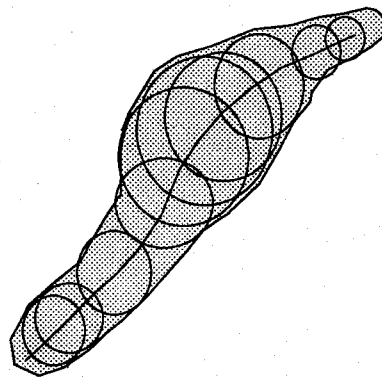


図 3-15 セグメント幅の定義

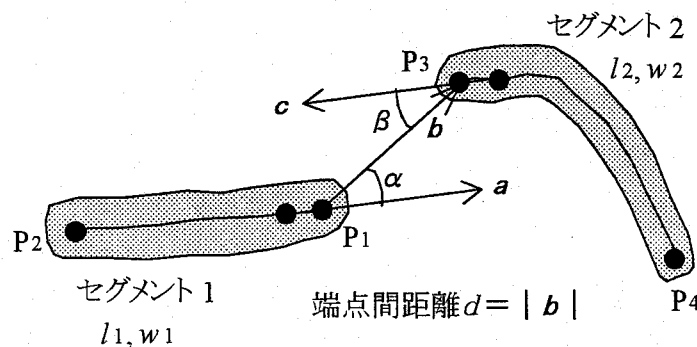


図 3-16 近傍ベクトル a , c の定義

端点属性としては、セグメントのもつ2つの端点が、それぞれ真の端点かセグメント化の分離により生じた偽の端点かを調べる。その端点の周囲点にセグメント化により生じた円が在れば交差の端点とする。

物体ごとに処理を行う際にその端点がどの対象物に属していたかを知っている必要がある。そのため、セグメント化前の対象物を単位として、その端点の属するセグメントが画像上で何番目の物体に属するか、いわゆる物体番号を調べる。

円形セグメント属性としては、円形セグメントであるか否かを調べる。円形の対象物を細線化すると1点に収縮してしまい、1点から成るセグメントが生成される。この円形セグメントは方向性をもたないため、非円セグメントとは異なった扱いをする必要がある。ここでは、①細線が1点から成るセグメント、②セグメント幅 \geq セグメント長さ、のどちらか一方を満たせば円形セグメントであると判定した。

3.6.3 切断繊維の修復^{10,17)}

顕微鏡の被写体深度やシェーディング補正の不十分さなどの関係から、本来1本であるべき対象物が2値化の際に複数個の対象物のように切られた状態になることがある。このまま放置すれば、個々の対象物に対して石綿繊維の計数判定がなされ0本あるいは複数本として計数されるおそれがあり、計数値の信頼性を著しく低下させる。本論文では、各セグメント間の類似性および相対的な位置関係から修復条件を満足するセグメント同士を接続することにより修復する処理を行った。以下に、修復アルゴリズムと修復条件判定について述べる。

(1) 修復アルゴリズム

端点の属性にはつながれた端点という概念を導入する。初期状態では、全ての端点はつながれた端点ではないとし、また真の端点を始点とする。

(Step1) 対象セグメントが円形セグメントであるか、あるいは真の端点をもたないならば、そのセグメントについての処理は行わず対象を次のセグメントに移す。そうでなければ、 $n = 0$ とおき、

- ・真の端点を1つだけもつ場合は、その端点を P_n とする。
- ・真の端点を2つもつ場合は、まず左側の端点を P_n とする。

そして、次のStepへ進む。

(Step2) P_n の属するセグメントの他方の端点を P_n' とおく。ただし P_n が円形セグメントに属しているならば $P_n' = P_n$ とおく。 P_n' の周囲を調べて、

- ・未調査の端点で修復条件を満たす点があれば、 $n = n + 1$ としてその点を P_n とおく。もし $P_n = P_0$ ならば(Step3)へ進む。そうでなければ(Step2)を繰り返す。調査済みの属性は、対象セグメントが替わって P_0 が更新されれば無効になる。
- ・未調査の端点で修復条件を満たす端点がなければ、
 - P_n' の属するセグメントが円形セグメントならば、 $n = n - 1$ として(Step2)を繰り返す。

- P_n' の属するセグメントが非円形セグメントで、かつ P_n' がつながれた端点ならば、 $n = n - 1$ として(Step2)を繰り返す。
- P_n' の属するセグメントが非円形セグメントで、かつ P_n' がつながれた端点でないならば、(Step4)へ進む。

(Step3) P_0 をつながれた端点とし、

- ・ $P_n = P_0$ となる直前に n を減じたならば、(Step5)へ進む。
- ・ $P_n = P_0$ となる直前に n を増したならば、(Step4)へ進む。

(Step4) $P_0 \sim P_n, P_0' \sim P_n'$ を全てつながれた端点として、 P_k' と P_{k+1} との間を直線で結ぶ。ただし、 $k = 0, 1, \dots, n - 1$ 。

(Step5) $n = 0$ とおき、 P_0 の属するセグメントのもう一方の端点を P_0 として、(Step2)へ戻る。ただし、既に P_0 の属するセグメントの真の端点が全て調査済みになったならば、対象セグメントを次のセグメントに移して、(Step1)へ行く。

このアルゴリズムの特徴は、円形セグメントの取り扱いにある。図 3-17 に示すように、円形セグメントで連鎖が終わることはないが、図 3-18 に示すように、円形セグメントが非円形セグメントに挟まれるような連鎖は成立する。



図 3-17 円形セグメント (○) が端にある場合



図 3-18 円形セグメント (○) が内部にある場合

(2) 修復判定条件

修復判定条件は、本来1本であったが2値化のために切られた対象物を滑らかに接続することを主目的として設定した。以下に、修復判定条件について述べる。

まず、修復判定の対象となる1組のセグメントを考える。一方のセグメントに属する端点と他方のセグメントに属する端点の組み合わせのうち最短距離をなす端点間において、両端点の相対位置と両セグメント幅の比を判定条件項目とし、判別分析法により修復判定を行った。両端点の相対位置は、角度変量と距離変量により、また両セグメント幅の比は幅比変量で表現した。角度変量には以下に述べる滑らかさ指標 γ を、距離変量にはマハラノビスの距離を考慮した距離関数 L を用いた。各変量の定義は以下の通りである。

(図 3-16 参照)

角度変量 γ

$$\gamma = \cos \alpha - \cos \beta + 2 \quad (3-3)$$

ここで、 α, β は両端点を結ぶベクトル b と近傍ベクトル a, c のなす角度。

幅比変量 R

$$R = \max (w_1 / w_2, w_2 / w_1) \quad (3-4)$$

ここで, w_1, w_2 はセグメント幅。

距離変量 L

$$L = \frac{d}{(l_1 l_2)^{0.1875}} \quad (3-5)$$

ここで, d は端点間距離, l_1, l_2 はセグメント長さ。

角度変量 γ , 幅比変量 R , 距離変量 L を用いて表した, 修復判定のための線形判別関数 z を式 (3-6) に示す。 z は修復される位置関係にあるほど大きな値をとる。

$$z = a_0 \cdot \gamma + a_1 \cdot R + a_2 \cdot L + a_3 \quad (3-6)$$

$z \geq 0$: 修復対象

$z < 0$: 修復対象外

ただし, a_0, a_1, a_2, a_3 は 70 枚の画像を用いて人間の主観的判断により修復の是非を判定した結果に基づいて算出された係数であり, 各々 1.321123, -0.268784, -0.323424, -1.380461 とした。(Appendix C 参照)

一方, 円形セグメントは方向性をもたないため, 非円形セグメントとは異なった扱いが必要となる。しかし, 角度条件について無条件扱いをすると条件が緩くなり過ぎ, 不自然な連鎖が生じるので, ここでは以下のように円形セグメントにある程度の角度条件を与えた。例えば, 図 3-19 において, 非円形セグメントと円形セグメントの修復を判定する場合, 端点 1 と端点 2 の修復判定には, 端点 2 が近傍ベクトルをもたないので条件を緩くせざるを得ないため, $\beta = -1$ とした。条件を満足し端点 1, 2 が接続されたとすると, もはや端点 2 は円形セグメントの端点ではなくなったので, 続いて端点 2 と端点 3 の修復を判定する場合には, 端点 2 の近傍ベクトル a' が必要となる。そのため, a' に端点 1 を始点, 端点 2 を終点とする移動ベクトル b を代入し $a' = b$ として判定した。

修復された新しいセグメントの長さ, 幅は, それぞれ修復前の二つのセグメントの長さの和, 算術平均幅とした。

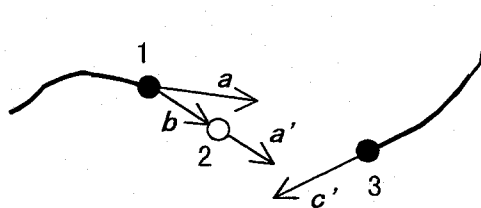


図 3-19 円形セグメント (O) の近傍ベクトル

3.6.4 交差・分岐処理¹⁰⁾

(1) 交差処理

ここでは、図 3-20 の交差・分岐処理の流れにしたがって、複数の重なった対象物に対する交差処理に続いて枝分かれをもつ対象物に対する分岐処理を対象物ごとに行う。

交差処理は、分離点に属する全端点の組み合わせを調べ、交差接続条件を満たしかつその内で最も滑らかに接続できる組み合わせの端点同士を接続する。滑らかさの評価には修復判定に用いた判別分析手法の角度変量の滑らかさ指標 γ をここでも用いることにし、交差処理に対する接続の是非を判定する線形判別関数 z を式 (3-7) により定義した。

$$z = \max (a_0 \cdot \gamma + a_1, 0) \quad (3-7)$$

ただし、 a_0 、 a_1 は人間の判定記録から判別分析法により求められた係数であり、各々 4.013828、-10.290412 を用いた。 γ は式 (3-3) で定義される滑らかさ指標である。交差接続判定は以下のように行い、 z の値が大きいほど交差接続の組み合わせが適切であるといえる。

$$z \begin{cases} > 0 & : \text{接続可 (滑らかである)} \\ = 0 & : \text{接続不可 (滑らかでない)} \end{cases} \quad (3-8)$$

次に、交差処理アルゴリズムを以下に述べる。

対象物のもつ全ての分離点について、以下の処理を行うものとする。

(Step1) 着目分離点に属する全ての端点の組み合わせについて、式 (3-7) で表される線形判別関数値 z を求めて、行に対応する端点と列に対応する端点の z を成分とする z 行列を作成する。 z 行列の例を図 3-21 に示す。

(Step2) z 行列の全ての行について、値が 0 を越える成分の個数 S を計数する。

(Step3) 着目分離点において、接続可能な組み合わせの最大個数を求める。その分離点に属する端点の個数を n とすると、接続可能な組み合わせの最大個数 m は、

$$m = \text{int} \left(\frac{n}{2} \right) \quad (3-9)$$

となる。ただし、 int は小数以下切り捨てを表す。

(Step4) S の値が大きい順の m 個の行について、 z が最も大きい成分を探し、その行と列の端点の組み合わせを接続候補として登録する。登録された端点は、以後接続候補に含まれてはならない。 m 個の行についてこれを行う。ただし、その行の成分が全て 0 ($S = 0$) の場合は、接続は行わない。これにより、最大 m 個の組み合わせが接続候補として登録される。 S の値が大きい順の m 個の行が決まらない場合は、 S が大きい行から順に m 個の組み合わせができるか対象が無くなるまで調べる。

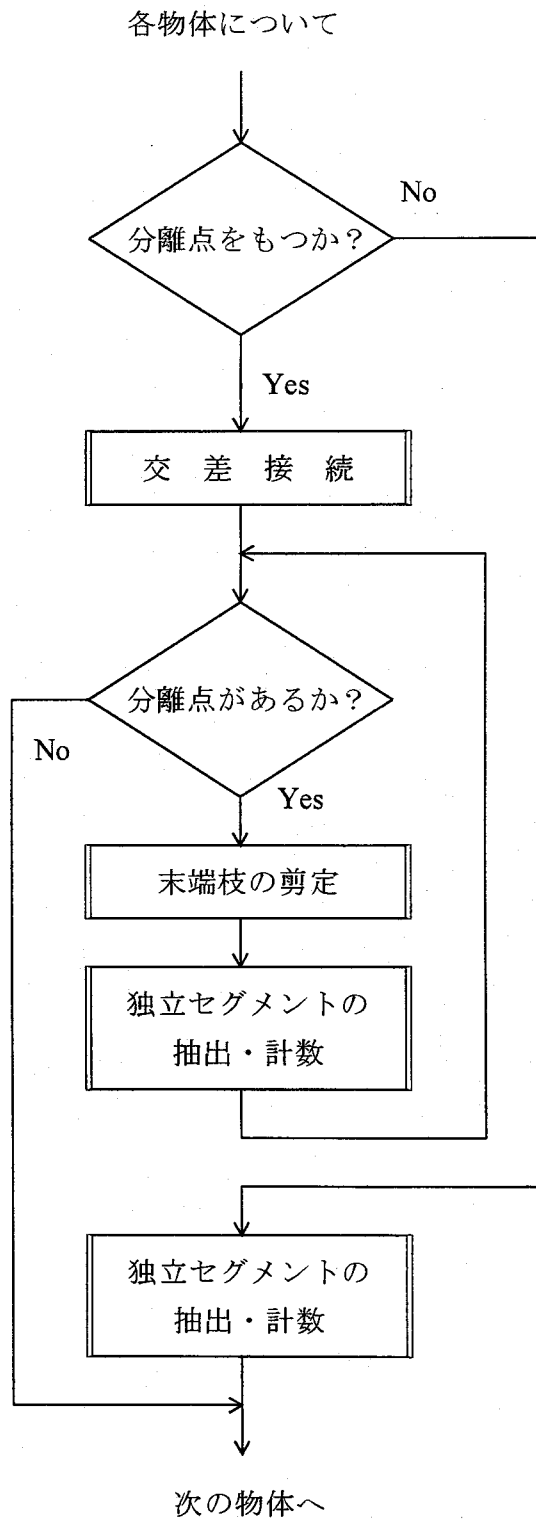


図 3-20 交差・分岐処理の流れ

	1	2	3	4	5
1	0	0.6	0	1.2	2
2	0.6	0	1.3	0	2
3	0	1.3	0	0.9	2
4	1.2	0	0.9	0	2

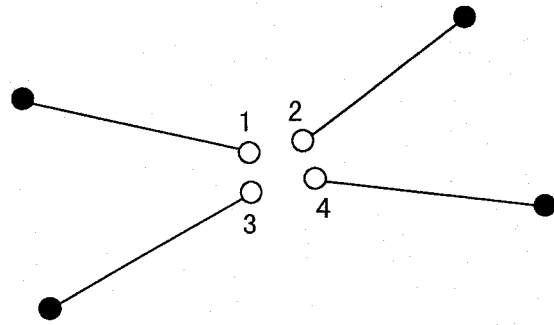


図 3-21 z 行列の例

(Step5) 着目分離点において、未登録の端点の存在を調べて、

- ・存在すれば、(Step6)へ進む
- ・存在しなければ(Step7)へ進む

(Step6) z 行列の未登録端点に対応する行において、z の値が最大の列を求める。

その列に対応する端点に幹の属性を付加し、接続候補登録から幹が含まれる組み合わせを取り除き、接続を解消する。この処理が行われるのは1本の幹となるセグメントに対して、複数のセグメントが接続可能になっている場合であり、この状態を枝分かれという。枝分かれは後述する分岐処理により解消される。

(Step7) 接続候補を接続する。接続時に交差の端点は消去され、2本のセグメントをつなぎ合わせた新しい1本のセグメントが生成される。この新しいセグメントの長さとは幅には、両セグメントの長さの総和と算術平均幅をもたせる。

(2) 独立セグメント抽出

次に、独立セグメントの抽出と計数について述べる。

対象物に属するセグメントを全て調べ、分離点をもたないセグメントが存在するならば、それは独立したセグメントとして計数判定対象セグメントとなるので、対象物から取り除く。そしてこのセグメントが、

- ①長さが $5 \mu\text{m}$ 以上
- ②幅が $3 \mu\text{m}$ 未満
- ③長さとは幅の比が3以上

の3条件を全て満たすならば、石綿繊維であると判定し、計数値に加算する。

(3) 分岐処理

この段階で残っている分離点は全て分岐点であり、この対象物は枝分かれ状態にある。ここでは、その枝分かれに対し、短い枝を刈り落とし、最長の長さが得られる枝の組み合わせを残す分岐処理アルゴリズムについて述べる。

対象物のもつ分岐点を C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) とする。

(Step1) $i = 1, F = 0$ とする。

(Step2) C_i に分岐端点をもつセグメントの内、幹でないセグメントを枝と呼ぶ。 C_i に属する全ての枝において、着目分岐点に属していない方の端点が真の端点ならば、その分岐点で最も長い枝以外は刈り落とし、同時に幹と最長の枝を接続して、その分岐点を解消する。 $F = 1$ とする。

(Step3) $i = i + 1$ とし、

- ・ $i \leq n$ ならば、(Step2)へ戻る
- ・ $i > n$ ならば、(Step4)へ進む

(Step4) $F = 1$ ならば(Step1)へ戻る。そうでなければ終了

なお、この分岐処理アルゴリズムで解消できない枝分かれについては、全ての枝の組み合わせから、最長の組み合わせを求める必要がある。

図 3-22 に分岐処理の例を示す。この場合、セグメント A, B, E を接続し残りのセグメント C, D を刈り落とすことにより、最長セグメントを得ている。ここで●は真の端点、○は偽の端点を示す。

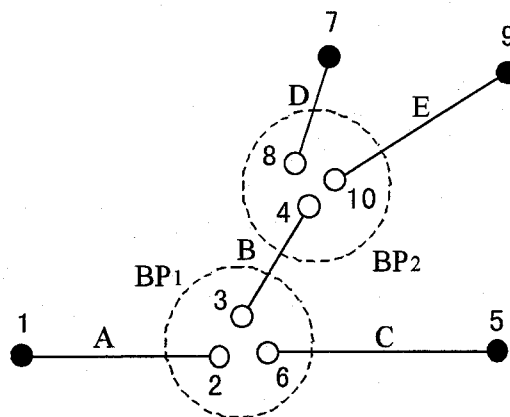


図 3-22 分岐処理例

3.6.5 計数処理

ここでは、計数判定および計数された対象物に対する粒子付着の有無と計数領域境界との交差の判定を行う。以下に計数とそれに付随する各処理について述べる。

(1) 計数判定

計数は、全対象物に対して、個々の対象物をもつ特徴量を元に、3.3 における石綿繊維判定基準①～③を適用する。全ての基準を満足する対象物は石綿繊維と判定し、計数する。それ以外は非石綿繊維と見なし計数はしない。

また、以下の粒子付着判定と計数枠判定は、石綿繊維と判定された対象物についてのみ行った。

(2) 計数枠判定

計数領域境界との交差の判定は、対象物の両端点の座標値から判定した。もしどちらか一方の端点が計数領域境界上に存在するならばその対象物は0.5本と計数するため、計数値から0.5を減ずる。あるいは、両端点が計数領域境界上に存在するならばその対象物は計数しないため、計数値から1を減ずる。

(3) 粒子付着判定

直径3 μm 以上の粒子が石綿繊維対象物に付着しているか否かの判定は、収縮(contraction)処理¹⁸⁾を用いて行った。収縮は、与えられた連結成分の境界点を全て取り除いて、周囲から1層分小さくする操作である。出力画像を $\{g_{ij}\}$ とすると、収縮処理は式(3-10)で定義される

$$\{g_{ij}\} \begin{cases} 0 : \text{画素}(i,j) \text{ あるいはその4近傍 (または8近傍)} \\ \quad \text{のいずれかが0} \\ 1 : \text{その他のとき} \end{cases} \quad (3-10)$$

背景のみからなる領域に対象物をコピーし、粒子半径に相当する操作回数分の操作後、その領域内に対象物が存在するか否かを調べ、もし存在するならば、直径3 μm 以上の粒子が付着していたと判断し計数値から1を減ずる。

(4) 偽繊維状物体判定³⁾

3.6.1(1)輝物体除去処理により生じ、この段階まで残った本来の繊維状物体ではない、いわゆる偽繊維状物体は、リング状の一部が欠けたC形状物体や複数にちぎれた物体になる。C形状物体は、両端点間距離を開口部長さとすると、開口部長さが繊維長の1/3より短い場合は輝物体除去により生じた偽繊維状物体と判定し、計数値から1を減ずる。それ以外のものは原画像の輝度情報を元に判定した。つまり、周囲点より1画素外側の画素と同じ位置の原画像の輝度を参照し、3.6.1(1)で述べた補修輝度より大きな値をもつ画素数を数え、その割合が基準範囲内であればC形状物体と同様に偽繊維状物体と判定し、計数値から1を減ずる方法である。本来繊維状物体であるにもかかわらずその周囲がぼんやりと明るいために偽繊維状物体と判定される場合あるいは対象物体付近に輝物体が存在するために偽繊維状物体と判定される場合があり、前者の場合にはこの割合が100%近い大きな値をとり、後者の場合のそれは比較的小さな値をとる場合があるため、基準範囲として、ここでは上限に60%、下限に10%の値を採用した。

3.7 アルゴリズムの妥当性の検証

3.7.1 AIAの提示画像を使用した検証

本システムで用いた計数アルゴリズムの妥当性を、AIA が提示している図 2-3 ～ 6 を用いて比較することにより検証した。これらの図を直接 CCD カメラにより撮影し、画像処理装置にデジタル画像として取り込んだ。本システムにおける処理結果と AIA が提示している計数値を比較し、両者がどれほど合致しているかをアルゴリズムの妥当性の判断基準とした。本システムで処理した結果を図 3-23 ～ 図 3-26 に示す。図中の右下の数字は AIA が示した計数値であり、左下の数字は本計数システムの計数値である。

(1) 単繊維の場合

図 2-3 を処理することにより、長さ $5\ \mu\text{m}$ 以上、幅 $3\ \mu\text{m}$ 未満、長さとの比 3 以上という AIA が定めた石綿の基本的な形状の特徴を、本アルゴリズムで認識できているか否かを確認することができる。なお、長さはカーブに沿って計測しなければならない。

図 3-23 にその結果を示す。AIA によれば A ～ R, W は 1 本と計数され、S ～ V は長さとの比が 3 以下と太いため、また、X は長さが $5\ \mu\text{m}$ 以下であるため計数は対象外となっている。T 以外の図形については、本システムでも AIA が示した計数値どおりに計数されている。T については肉眼観察からみるとその理由にやや疑問があり、1 本と計数する方が妥当だと思われる。

単繊維状のものは概ね良好な結果が得られており、本システムでは AIA の基準どおり基本的な石綿の形状の特徴は認識している。

(2) 枝分かれ繊維の場合

図 2-4 を処理することにより、本システムが枝分かれしている石綿を認識できるか否かを確認することができる。なお、1 つの繊維から枝分かれしたものは 1 本と計数しなければならない。

図 3-24 にその結果を示す。AIA に依れば A ～ P は全て 1 本と計数され、Q は長さとの比が 3 以下、R は長さが $5\ \mu\text{m}$ 以下であるため計数は対象外となっている。概ね枝分かれの石綿も認識され、計数できているものと思われる。しかし、G については、2 値化のしきい値の関係で枝の一部繊維が切断され、その修復処理では修復条件が満足されなかったため接続されず、本来 1 本と計数されるべきものが 2 本と計数されてしまっている。また、K, L のような枝の間隔が狭い場合は解像度の関係で潰されてしまう場合があるので、原画像のサンプリング時には注意を要する。

(3) 絡まった繊維の場合

図 2-5 を処理することにより、本システムが交差している石綿を 1 本ずつ認識できるか否かを確認することができる。なお、繊維が絡まって正確な数を読みとれない場合は、0 本と数える。

図 3-25 にその結果を示す。AIA に依れば A ~ G は各図中の右下に示す本数として計数され、H ~ L は正確な数が読みとれないとして計数は対象外となっている。本システムにおいては、比較的簡単な形状のものは正確に認識し、計数されている。しかし、B, D 等は AIA の計数値と一致していない。これらの原因の主なものは原画像の取り込み、2 値化のしきい値、スムージング処理等によるものである。また、G は AIA に依ると 1 本と計数されているが、図中の多数の穴は解像度の関係で潰されてしまい、見かけ上幅が大きくなり棄却された。

(4) 粒子が付着した繊維の場合

図 2-6 を処理することにより、本システムが直径 $3 \mu\text{m}$ 以上の粒子の付着を認識できるか否かを確認することができる。

図 3-26 にその結果を示す。AIA に依れば A ~ G, I ~ J, L ~ N は粒子付着が見受けられるが、いずれも直径が $3 \mu\text{m}$ 以下なので粒子付着が無いものとして計数されている。H, K は直径が $3 \mu\text{m}$ 以上の粒子が付着している石綿繊維のみ計数が棄却され、その他の石綿繊維は計数されている。また、O ~ X は直径が $3 \mu\text{m}$ 以上の粒子が付着しているため、計数は棄却されている。本システムにおいては概ね良好な結果が得られており、直径 $3 \mu\text{m}$ 以上の粒子の付着を認識し、計数から棄却している。しかし、J は付着粒子の直径が $3 \mu\text{m}$ 以上と判定され、AIA の計数値と異なった結果となった。また H, K において、本システムと AIA の計数値が異なった主原因は、解像度が低く交差・分岐処理が適切に行われなかったことにあり、粒子付着判定は正常に行われている。

























A  ① 1	B  ① 1	C  ① 1	D  ① 1	E  ① 1	F  ① 1
G  ① 1	H  ① 1	I  ① 1	J  ① 1	K  ① 1	L  ① 1
M  ① 1	N  ① 1	O  ① 1	P  ① 1	Q  ① 1	R  ① 1
S  ① 0	T  ① 0	U  ① 0	V  ① 0	W  ① 1	X  ① 0

図 3-23 石綿の判定例 (単繊維の場合)






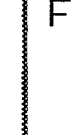





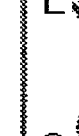






A  ① 1	B  ① 1	C  ① 1	D  ① 1	E  ① 1	F  ① 1
G  ② 1	H  ① 1	I  ① 1	J  ① 1	K  ① 1	L  ① 1
M  ① 1	N  ① 1	O  ① 1	P  ① 1	Q  ① 0	R  ① 0

図 3-24 石綿の判定例 (枝分かれした繊維の場合)

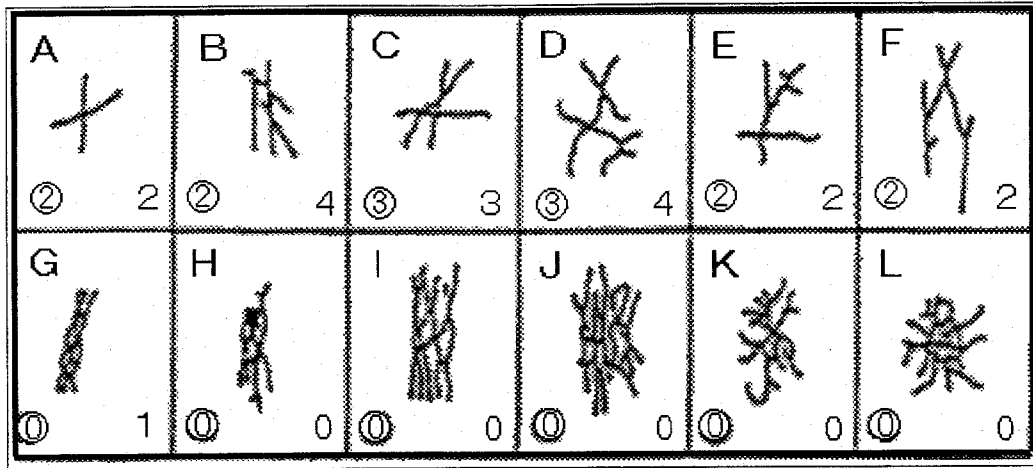


図 3-25 石綿の判定例（絡まっている繊維の場合）

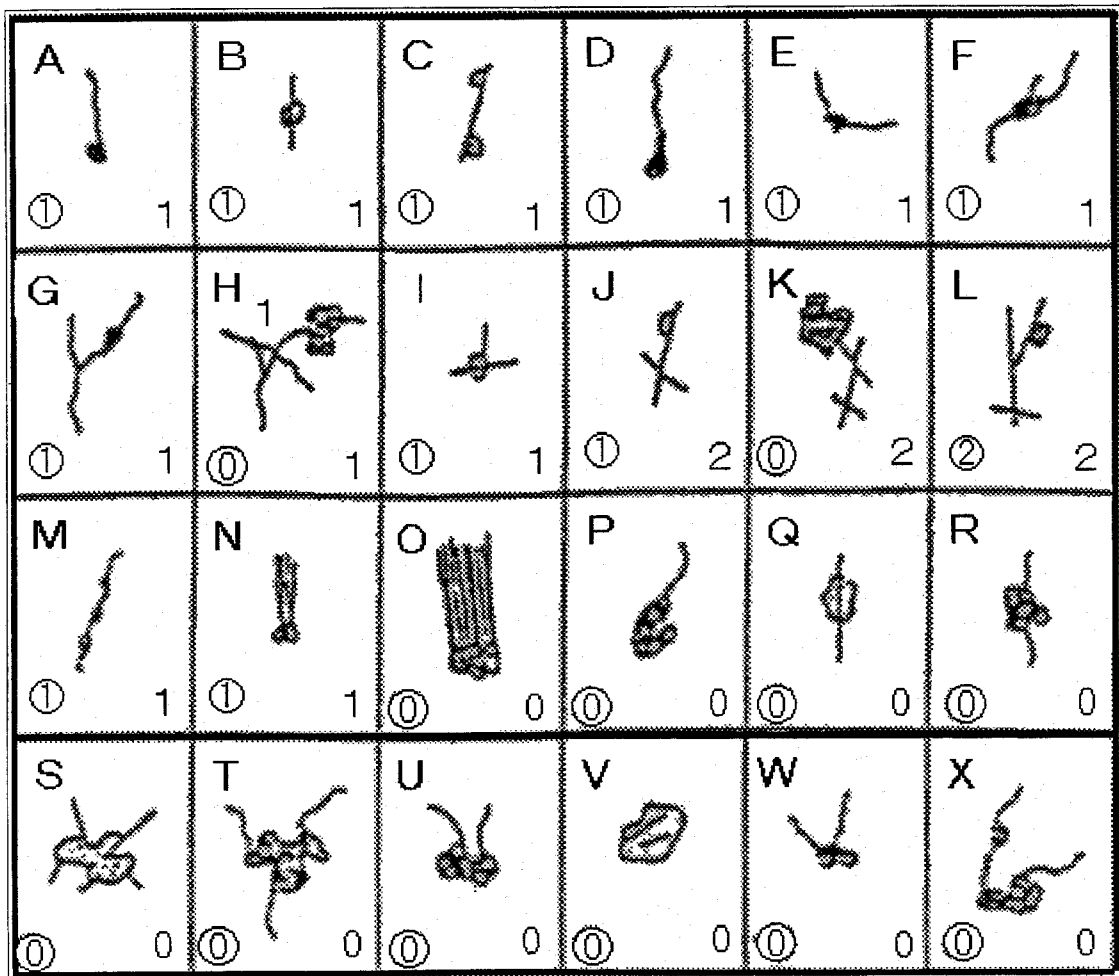


図 3-26 石綿の判定例（粒子が付着している繊維の場合）

3.7.2 自動計数と肉眼計数の比較検証

前項では、AIA が提示している図 2-3 ～ 6 を用いて、AFACS の計数アルゴリズムの妥当性を検証した。ここでは 2.3 節で述べた肉眼計数機関間のクロスチェックを AFACS にも適用し、肉眼計数機関の結果と比較することで AFACS の計数性能を検証する。

計数試料は肉眼計数と同じものを使用し、写真に示された領域を計数視野としたが、1 視野でまかないきれない場合は複数視野で計数した。顕微鏡の焦点は 1 視野ごとに最適と思われる焦点に合わせた。肉眼計数の検鏡倍率とは表示方法が異なるが、AFACS における倍率は 4.2 画素/ μm で行った。

(1) 計数値と一致度係数

図 3-27(A)に肉眼計数機関と AFACS の石綿繊維計数値を示す。AFACS の計数値は 159 本であり、AFACS を含めた計数値の幾何平均は 167 本となった。計数値だけをみると AFACS の計数値は計数値順に並べた中位値となり、肉眼計数のほぼ平均的な値をもつことがわかった。

図 3-27(B)に肉眼計数機関と AFACS の計数正解率を示す。ここで、判定 1 は AFACS を含めた過半数の計数機関が石綿と判断した対象物を真の石綿としたものであり、判定 2 は AIA が示した石綿判定基準を満足した対象物を真の石綿としたものである。真の石綿を石綿と判定した場合あるいは真の石綿でないものを石綿と判定しなかった場合に正解となり、全計数対象数に対する正解数を正解率とした。AFACS の判定 1、判定 2 における正解率はともに 70% となり、全計数機関の平均正解率は判定 1 の場合 77%、判定 2 の場合 65% となった。AFACS における判定 1 の正解率が比較的低いのは、計数基準を満足する対象物であっても太いものに対しては肉眼計数においてそのほとんどが棄却され、繊維幅 3 μm いっぱいまで計数する AFACS のみが石綿と判断するケースが多くあるためであり、正解率が低下する原因となっている。後者の値は原画像の質によるものと思われ、より画質の高い原画像を得ることができれば判定 2 における正解率はさらに向上する。

表 3-1 に肉眼計数機関および AFACS 相互間の一致石綿数と一致度係数を示す。一致石綿数と一致度係数は 2.3.3(1)で既に定義した。AFACS は計数機関 A、C、D と比較的一致度係数が高いが、正解率の場合と同様な理由によりその値自身は決して高いものではない。

(2) 鮮明度と計数

図 3-28 に AFACS の鮮明度と計数の関係を示す。AFACS の特徴は肉眼計数の場合のように計数者の主観にとらわれず、判定条件を満足するものは全て計数する点にあるが、鮮明度が低いものに対しては特徴量を正確に計測できない弱点がある。図 3-28 においても鮮明度の高い対象物に対してはほぼ正確に計数されているが、鮮明度が低下するにしたがって誤計数が生じてくる。特に、繊維幅が細く鮮明度が低いものほどその傾向が顕著である。また、計数領域近傍で鮮明な対象物に対する誤計数が若干見受けられるが、画像処理装置の解像度等の原因により繊維長が判断を誤ったためと思われる。したがって、本研究で構築した自動計数システムは顕微鏡像の鮮明度の影響を受けやすいといえる。

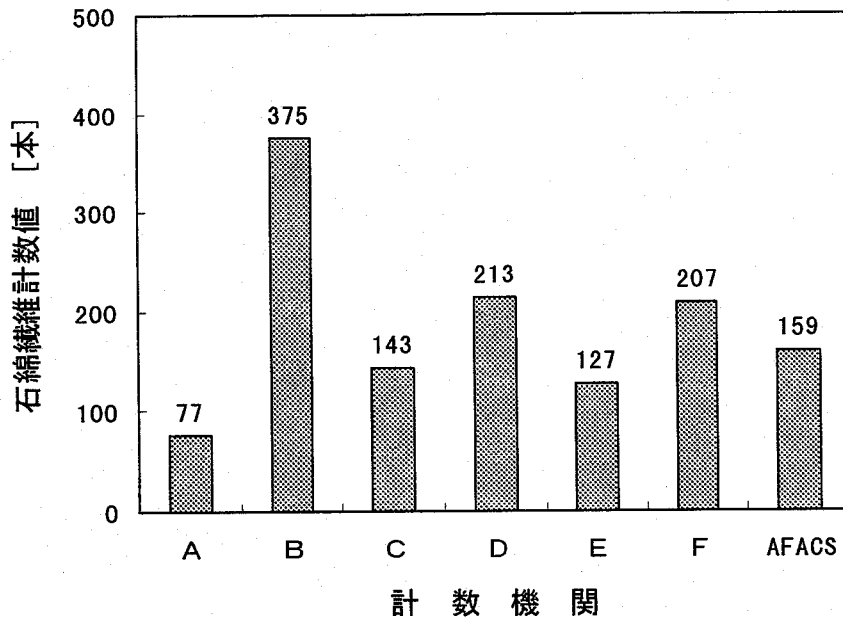


図 3-27 (A) 肉眼計数機関と AFACS の石綿繊維計数值

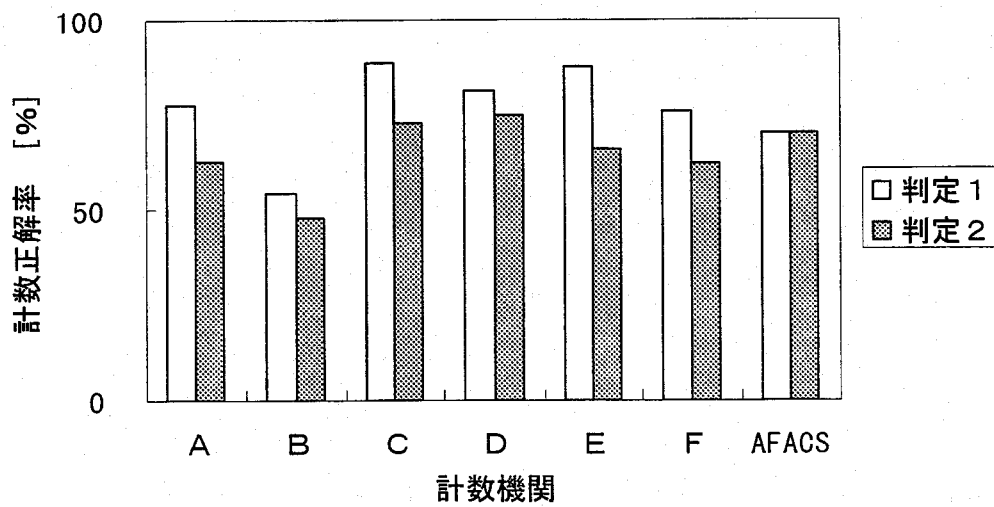


図 3-27 (B) 肉眼計数機関と AFACS の計数正解率

表 3-1 肉眼計数機関および AFACS 相互間の一致石綿数と一致度係数

計数機関		一致石綿数							
		A	B	C	D	E	F	AFACS	
		77	375	143	213	127	207	159	
一致度係数	A	77		49	52	67	45	47	62
	B	375	0.122		109	149	115	158	74
	C	143	0.310	0.267		119	90	96	76
	D	213	0.300	0.337	0.502		107	133	102
	E	127	0.283	0.287	0.500	0.459		101	62
	F	207	0.198	0.372	0.377	0.463	0.434		70
	AFACS	159	0.356	0.161	0.336	0.378	0.277	0.237	

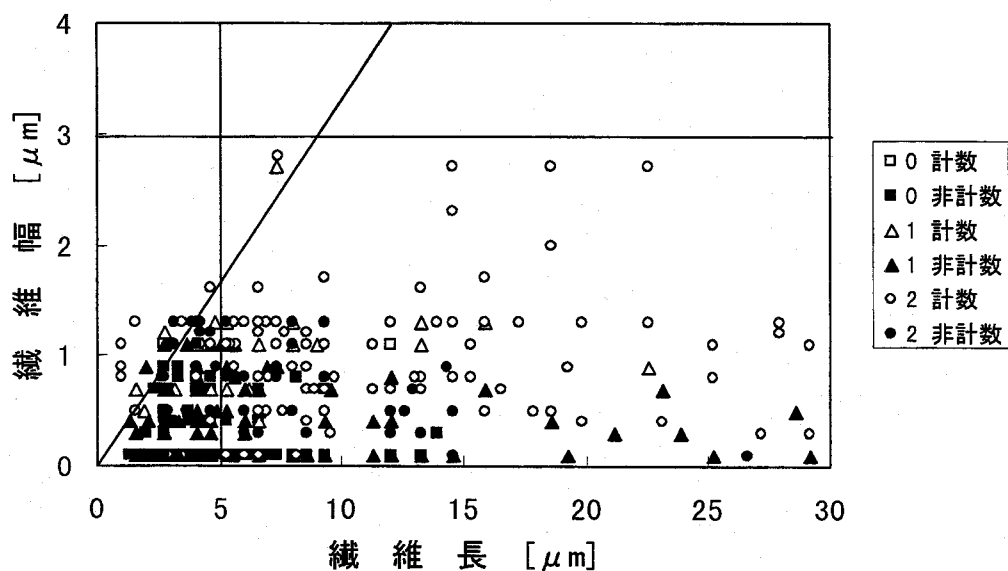


図 3-28 石綿の鮮明度と計数 (AFACS)

(3) 曲がり度と計数

図 3-29 に AFACS の曲がり度と計数の関係を示す。AFACS によるものでは細くて長い曲線状の対象物の数え落としがあるが、これは形状に原因があるよりはむしろ鮮明度や解像度に原因があると思われる。また、曲がり度が深さ方向に生じている場合、肉眼計数では顕微鏡の焦点の位置を逐次変えることにより対象物の全体像が把握できるが、自動計数における原画像のサンプリングでは画面のある位置に焦点を合わせているため、個々の対象物全てに焦点が合っているとは限らず、ある種の積分入力的なサンプリング方法を開発する必要がある。

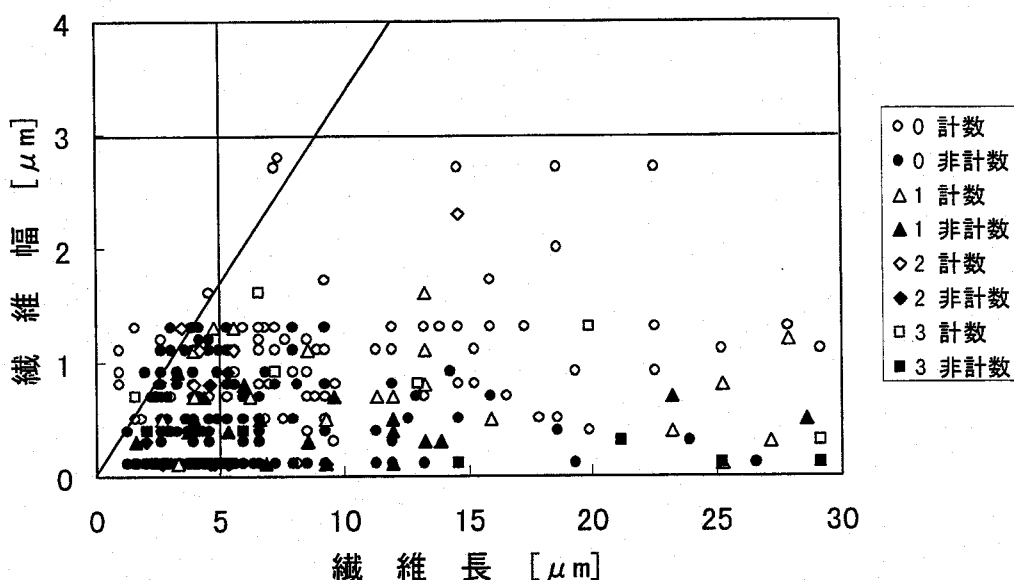


図 3-29 石綿の曲がり度と計数 (AFACS)

3.7.3 手動操作が自動計数結果に及ぼす影響

測定には誤差が必然的に伴い、石綿計数においても多岐にわたる誤差要因が存在する。ここでは、AFACS における手動操作による誤差要因が計数結果に及ぼす影響について考察を行う。

AFACS の手動操作には、位相差顕微鏡の①照明強度の選択、②焦点合わせ、③視野選択、が含まれる。これらの要素を総合した画像サンプリングの計数結果への人的影響を以下の手法で調べた。

被験者は、AFACS の操作経験や予備的知識をもたない者 4 名、操作の経験者 1 名の合計 5 名とした。前者 4 名には、あらかじめ手動操作の手順を記載した操作マニュアルを示すのみとし、個々の操作過程における判断は被験者に一任した。計数試料は大気中から捕集した粉じんを所定の手順により作製したものを用いた。AFACS が計数に適さない画像を自動判定し計数画像から除外するため、計数のための原画像をランダムに 120 画像サンプリングしたが、計数結果は 100 視野あたりの繊維数 (以下、基準化繊維数という) で

表示した。各被験者によりサンプリングされた画像を AFACS により計数した。

手動操作の計数結果に対する影響の程度については、被験者の計数値の分散と母集団の分散の差の統計的検定に対する有意水準を求めることにより調べた。ただし、フィルタの捕集面を位相差顕微鏡を用いてランダムに計数する場合、1 視野あたりの石綿繊維数の分布はポアソン分布をする^{19,20)}といわれており、本研究でもそれに従った。表 3-2 に被験者がサンプリングした原画像を AFACS により計数した結果を示す。表 3-3 に基準化繊維数の測定値とポアソン分布を仮定した母集団の平均と分散の推定値を示す。

次に、基準化繊維数の測定値と母集団がともに正規分布をしていると仮定したときの分散の差の有意水準を求める。大きさ N_1 と N_2 の 2 つの標本による母分散の比 σ_1^2 / σ_2^2 を 1 とする仮説 $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ に対し、対立仮説 $H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ とするとき、式 (3-11) で表される $T(s_1^2, s_2^2)$ の分布は自由度 (N_1-1, N_2-1) の F 分布に従う。

$$T(s_1^2, s_2^2) = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (3-11)$$

式 (3-11) に表 3-3 で示された値を代入すると、

$$T(s_1^2, s_2^2) = \frac{124.6}{110.4} = 1.1327 \quad (3-12)$$

となる。 $N_1 = N_2 = 5$ であるため、棄却域を R とすると $T(s_1^2, s_2^2) \in R$ となる有意水準 α は約 90% となった。つまり、棄却が生じるのは珍しいことでは無く、換言すれば仮説 $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ はほぼ正しいといえる。このことから、マニュアルどおりに操作すれば、手動操作による人的影響は計数結果へ大きな影響を及ぼさないことが分かった。

表 3-2 被験者がサンプリングした画像の計数結果

被験者	計数視野数	石綿繊維数	基準化繊維数
A	115	123	107.0
B	118	141	119.5
C	119	114	95.8
D	116	123	106.0
E	119	147	123.5

表 3-3 基準化繊維数の測定値と母集団の統計量

	平均	分散
測定値	$\bar{x}_1 = 110.4$	$s_1^2 = 124.6$
母集団	$\bar{x}_2 = 110.4$	$s_2^2 = 110.4$

3.8 まとめ

本章では、AFACS の構成、計数基準および計数過程のアルゴリズムについて述べた。ここでの計数基準は、作業環境中の石綿繊維濃度を測定するための協会法あるいはガイドブック法、また一般大気中の石綿繊維濃度を測定するためのマニュアル法などで採用されている AIA による基準に準拠し、本システムの計数アルゴリズムも出来るだけこの基準に沿うように記述した。したがって、一部の石綿繊維自動計数機器にみられる Amosite や Crocidolite など形状が針状であるもののみ計数が可能ということではなく、その使用量が最も多い Chrysotile などの曲線状のものまで計数が可能となった。

AFACS の計数アルゴリズムは、石綿繊維計数のために独自に開発した手法や判定方法を組み合わせ、その手順を新たに構成したものであるため、計数性能を何らかの形で評価する必要がある。そこで AFACS の計数性能を評価するために、AIA が示した①単繊維の場合、②枝分かれ繊維の場合、③絡み合った繊維の場合、④粒子付着のある場合、の4グループの計数要領図を用いて、AFACS の計数値と AIA の計数値を比較した。

この結果、数量的に大半を占める単繊維についてはほぼ正確に計数することが出来た。

また、枝分かれをもつ石綿繊維に対する処理も一部のものを除いて、正確に計数出来た。幹と枝が分岐する枝分かれ部は2値化により切断され易い箇所の一部であることは経験上分かっており、これらの領域が適切に処理されていることから、切断繊維の修復処理が有効に機能していることが分かった。

絡まっている石綿繊維に対する処理も一部のものを除いて、正確に計数出来た。ただし、内部に空間（穴状）が在るような絡まり方の繊維は、正しく計数されなかった。

粒子が付着している石綿繊維に対する処理も一部のものを除いて、正確に計数出来た。交差繊維の一部に直径 $3\ \mu\text{m}$ 以上の粒子が付着している場合に誤計数が見受けられたが、ともにその原因は粒子付着判定手法以外に起因していることがわかり、収縮手法が粒子付着判定に有効な方法であることが分かった。

さらに、AFACS の計数能力を検証するために、肉眼計数におけるクロスチェックを AFACS にも適用し、相互比較を行った。その結果、AIA の示した計数判定基準を満たす対象物を真の石綿とした場合の計数正解率は70%となった。また、AFACS の計数値は159本となり、肉眼計数機関を含めた7計数機関間で中位値（375～77本、幾何平均167本）となった。また、AFACS の手動操作が計数値に及ぼす影響を調べた結果、手順に従って画像をサンプリングすれば人的影響は計数結果に大きな影響は与えないことが分かった。

以上の結果を総合すると、画像処理手法を用いた AFACS の計数アルゴリズムは、一部の画像を除いてほぼ正確に計数が可能であり、十分実用化に耐えうる機能を有していると判断できた。

参考文献

- 1) 日本石綿協会編：石綿粉じん濃度測定要領, 日本石綿協会, pp.3-37(1984)
- 2) 栢野聡：石綿繊維濃度の自動計測のための試料調整法に関する研究, 大阪大学卒業論文(1990)
- 3) 阿南真一：一般大気環境に対する石綿繊維濃度測定のための新しい資料作成法に関する研究, 大阪大学卒業論文, pp.35-47(1991)
- 4) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人：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, Vol.10, No.4, pp.296-303(1995)
- 5) 尾崎弘, 谷口慶治, 小川秀夫：画像処理—その基礎から応用まで, 共立出版, pp.21-24(1983)
- 6) P.K. Sahoo, S. Soltani, A.K.C. Wong, and Y.C.Chen: A Survey of Thresholding Techniques, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol.41, pp.233-260(1988)
- 7) N. Otsu: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-9, No.1, pp.62-66(1979)
- 8) 馬場口登, 山田耕児, 黄瀬浩一, 手塚慶一：コネクショニストモデルによる画像2値化の実験的検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J73-DII, No.8, pp.1281-1287(1990)
- 9) J.S. Weszka, R.N. Nagel, and A. Rosenfeld: A Threshold Selection Technique, *IEEE Transaction on Computers*, Vol. C-23, pp.1322-1326(1974)
- 10) 鴨井伸一：石綿繊維の自動計数のための画像処理アルゴリズムに関する研究, 大阪大学卒業論文(1995)
- 11) 例えば, 青山宏, 川越正弘, 藤村是明, 平井成興：柔らかな情報表現のための線分表現法の研究—図形の視覚的印象を保存する線分近似, 電子技術総合研究所彙報, Vol.58, pp.919-927(1994)
- 12) 李志広, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 福村晃夫：交差点記述法による2値画像の輪郭追跡と復元, 電子通信学会論文集, Vol.65-D, No.10, pp.1203-1210(1982)
- 13) 田村秀行：多面的画像処理とそのソフトウェア・システムに関する研究, 電子技術総合研究所研究報告, No.835, pp.25-64(1984)
- 14) C.J. Hilditch: Linear Skeletons from Square Cupboards, in *Machine Intelligence IV* (Eds. by B. Meltzer and D. Michie), Edinburgh University Press, pp.403-420(1969)
- 15) 秋田興一郎, 久家秀樹：眼底画像における特徴箇所の検出と解析の方法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J64-D, pp.955-962(1981)
- 16) 例えば, 田村秀行：コンピュータ画像処理入門, 総研出版, p.73(1985)
- 17) 鴨井伸一, 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人：判別分析法による繊維状物体画像の修復, 電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会講演論文集, p.212(1995)
- 18) 例えば, 田村秀行監修：コンピュータ画像処理入門, 総研出版, pp.76-77(1985)
- 19) 日本石綿協会編：石綿粉じん濃度測定要領, 日本石綿協会, p.59(1984)

- 20) 本間克典：アスベスト濃度測定用位相差顕微鏡(PCM)法の精度，セミナー「アスベスト粒子の濃度測定」，エアロゾル研究協議会，p.3(1989)

第4章 微細粉じん除去および高繊維密度化試料作製法

4.1 はじめに

作業環境中の石綿繊維と一般環境中の石綿繊維の状態には、主として次のような差異がある。

- ①作業環境中で捕集した繊維状粒子はほぼすべて石綿繊維と考えられる¹⁾が、一般環境中で捕集した繊維状粒子はその大半が非石綿²⁾である。
- ②作業環境中の石綿繊維濃度に比べて、一般環境中の石綿繊維濃度は非常に低い値をとる^{3,4)}。

一般には、第2章で述べたように石綿判定は形状でのみ規定されており、計数視野中で判定条件を満足する対象物はすべて石綿繊維として計数される。したがって形状が石綿とよく似た非石綿繊維が含まれる場合には、あらかじめ非石綿繊維を除去する必要がある。また、一般環境中の石綿繊維濃度が低いため信頼性のある計数値を求めるには多量の捕集空気を必要とするので、捕集には長時間を要する。このことは、計数に不要な微細粉じんも多量に捕集する可能性があることを意味する。

このため、作業環境中の石綿濃度を測定するための試料作製法として用いられてきたメンブランフィルタを用いたろ過法（以下ろ過法という）を、そのまま一般環境中の石綿濃度測定のための試料作製法として採用するには問題がある。そこで、これらの問題を解決するために、慣性を利用する分級装置を用いたサンプリング法で粒子を捕集した後、熱と酸処理を併用する試料作製法（以下試料作製法という）を採用した。

本章では、一般環境中の石綿繊維濃度を測定するために採用した試料作製法について検討した。まず、4.2節で分級法の特徴、繊維状物質を回転だ円体と仮定した捕集理論および捕集の性能試験法について述べる。4.3節では、一般環境中に多数含まれる非石綿繊維、例えば、衣服や寝具等から発生する各種繊維を試料から除去する前処理法を検討するための準備として石綿の構造を明らかにするとともに、前処理としての熱および酸処理について述べる。4.4節では、実際に一般大気中の石綿繊維を計数するために、4.2、4.3節で求めた処理条件を考慮した試料作製の手順を述べる。

4.2 分級装置を用いたサンプリング法

4.2.1 分級法の特徴

ろ過法は、作業環境の石綿濃度を測定する目的で規定されたにもかかわらず、そのまま一般環境用にも用いられているため、かなり不具合な点がある。例えば、微細な粒子を高効率で捕集できるろ過法を一般環境に用いると、浮遊粉じんの大半を占める非石綿の微小粒子まで効率よく捕集してしまい、その結果、石綿の計数を妨害する粒子をふんだんに含んだ試料が得られる。また、石綿濃度が低いので、捕集空気流量を大きくし捕集時間を短縮しようとするれば、フィルタのろ過抵抗が大きくなり、フィルタの機械的強度に由来する

流量の制約を受ける。

以上の問題点を解消するために、カスケードインパクト法（以下インパクト法という）を用いた。インパクト法はろ過法と異なり、慣性力により分級捕集を行う集じん法である。その原理図を図 4-1 に示す。

含じん空気をノズルから捕集板に向かって吹付けると、慣性力の大きい粒子は捕集板に衝突し捕集され、慣性力の小さな微細粒子は空気流にのり、捕集板には衝突せず下流へ運ばれ捕集されない⁵⁻⁹⁾。そこで、ノズル直径を適切に設定することにより、適切な粒子の分離直径が得られる。

図 4-2 に、ろ過法とインパクト法の比較を示す。インパクト法は、以下のような特徴をもつ。

- ①空気抵抗がろ過法に比べて小さく、大きな捕集空気流量を得ることができ、捕集時間の短縮が図られる
- ②試料作製の前処理としての熱処理や化学処理が行える
- ③前処理後のろ過過程で、有効ろ過面積の小さなフィルタを用いることにより、石綿の面密度の高い試料を得ることができる

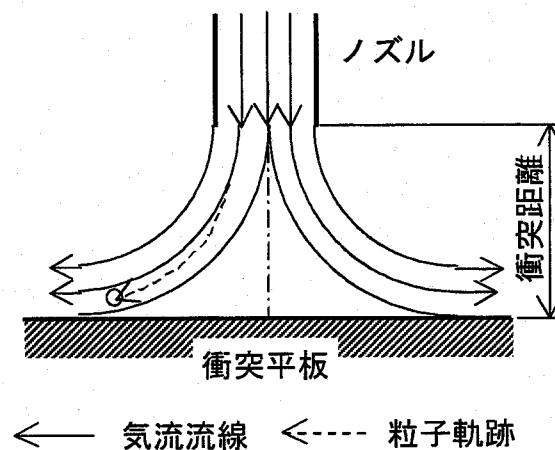


図 4-1 インパクトの原理図

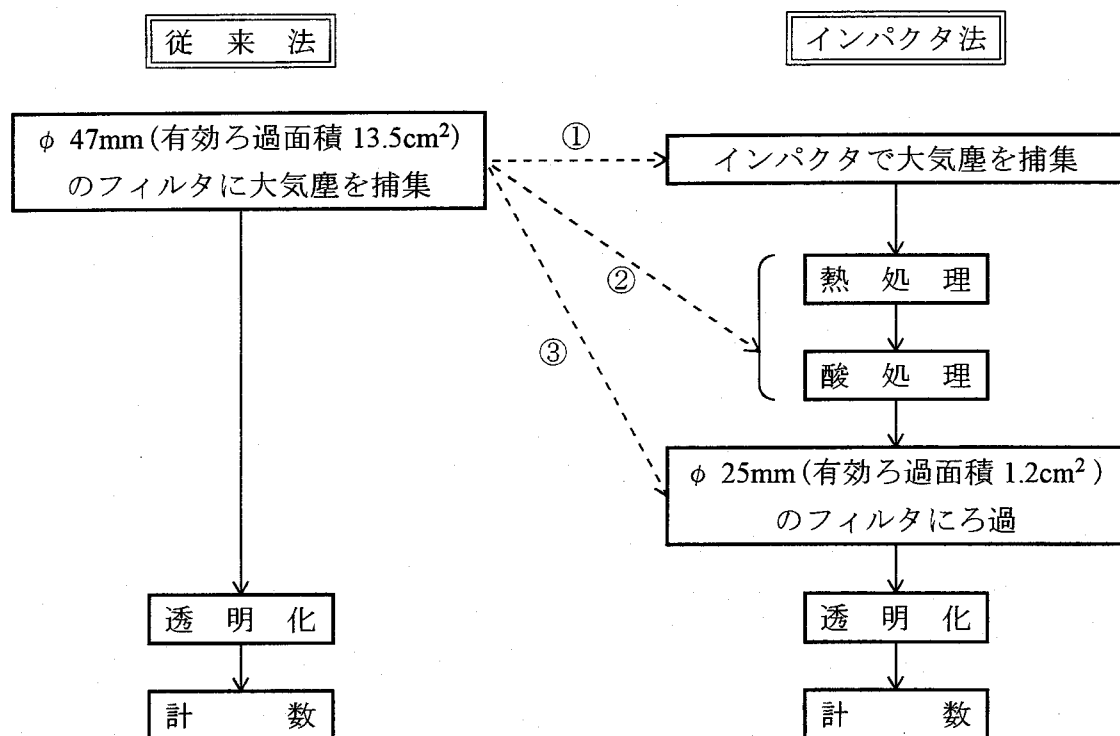


図 4-2 ろ過法とインパクト法の概要

4.2.2 分級装置の捕集理論

インパクトを石綿の捕集装置として使用する目的の一つに、計数を妨害するような微小粒子の捕集を妨げることにあり、そのためにはインパクトの適切な分離直径を正確に設定する必要がある。しかし、繊維状粒子の分離直径を正確に求める方法は今のところ見あたらず、繊維状粒子と運動特性が等価的な球状粒子の分離直径として見積もらざるを得ない。以下に、繊維状粒子に対するインパクトの分離直径の設定方法について述べる。

ここでは、繊維状粒子の運動を回転だ円体の運動と仮定して、近似的に解析する¹⁰⁾。インパクトの分離直径は慣性パラメータにより決まるので、まず球および回転だ円体の慣性パラメータを求める。インパクトの円形ノズルの形状が図 4-3 に示す形状であるとする、慣性パラメータ ϕ は、式(4-1)で表される。

$$\phi = \frac{u \times m \times B}{D} \quad (4-1)$$

ここで、 u ：代表風速、 m ：質量、 B ：移動度、 D ：代表長さを表す。

代表長さ D にノズル直径 D_c をとり、球および回転だ円体が図 4-4 に示すようなものとする、各々の移動度 B_s , B_{el} は、次式で表される¹⁰⁾。

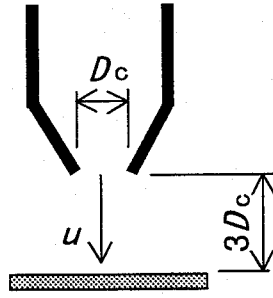


図 4-3 円形ノズルの形状

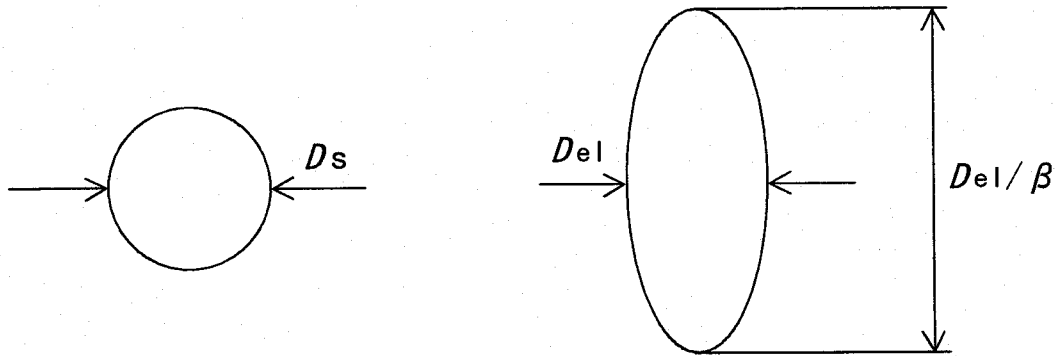


図 4-4 球および回転だ円体

$$B_s = \frac{C_s}{3 \pi \mu D_s} \quad (4-2)$$

$$B_{el} = \frac{C_{el}}{3 \pi \mu D_{el} \kappa} \quad (4-3)$$

$$\text{ただし, } \kappa = \frac{1}{3} \kappa_c + \frac{2}{3} \kappa_a \quad (4-4)$$

ここで、 C_s ：球のカニンガム補正係数 [-]、 C_{el} ：回転だ円体のカニンガム補正係数 [-]、 D_s ：球形粒子直径 [cm]、 D_{el} ：回転だ円体の横軸長 [cm]、 κ ：補正係数 [-]、 κ_c ： κ の回転軸方向成分 [-]、 κ_a ： κ の回転半径方向成分 [-]。なお、回転だ円体の流れに対する回転運動は、式(4-4)で示すように回転軸方向と回転半径方向が1：2の割合で運動すると仮定した。

球および回転だ円体の慣性パラメータ、質量を各々 ϕ_s [-]、 ϕ_{el} [-]、 m_s [g]、 m_{el} [g] とすると、球および回転だ円体の慣性パラメータの比は、式(4-5)で表される。

$$\frac{\phi_s}{\phi_{el}} = \frac{m_s B_s}{m_{el} B_{el}} = \frac{D_s^2 C_s}{D_{el}^2 C_{el}} \beta \kappa \quad (4-5)$$

石綿の計数則により、計数すべき繊維状粒子は、長さ5 μm以上、幅3 μm以下、長さ
と幅の比が3 : 1以上と規定されているので、繊維状粒子を長さ/直径(幅) = 3、つま
りβ = 1/3の回転だ円体とすると、κ_c = 1.40、κ_a = 1.73⁸⁾となり、式(4-4)より
κ = 1.62となる。β、κを式(4-5)に代入すれば、

$$\frac{\phi_s}{\phi_{el}} = 0.54 \frac{D_s^2 C_s}{D_{el}^2 C_{el}} \quad (4-6)$$

となる。ここで、回転だ円体のカニンガム補正係数 C_{el} は今のところ正確な値を見積もる
方法が見あたらないので、C_{el} = C_sと仮定する。

インパクトによる球と回転だ円体における分離効率の慣性パラメータへの依存性が、球
と回転だ円体とで等しいと考えれば、同一のインパクトを用いた分離限界直径の比はφ_s
/ φ_{el} = 1とおいて D_s² / D_{el}² = 1.85となる。画像の解像度から、インパクトの捕集限
界を半径0.25 μmの繊維に設定すれば、0.25 μm × 1.36 = 0.34 μmとなり、半
径0.34 μmの球に合わせてインパクトを設計すれば、半径0.25 μm以上、長さ/直
径 > 3の粒子はすべて捕集できることになる。

一方、インパクトの分離直径は慣性パラメータにより決まる。慣性パラメータと円形ノ
ズルの集じん率は、各々、次のような関係になる^{11,12)}。

$$\text{慣性パラメータ} \quad \phi = \frac{C \rho_p u D_p^2}{18 \mu D_c} \quad (4-7)$$

$$\text{円形ノズルの集じん率} \quad \Delta \eta = 3.80 \phi^{1/2} - 0.964 \quad (4-8)$$

したがって、Δη = 0.50に相当する分離直径 D_{P50} は、式(4-9)を解くことにより得ら
れる。

$$D_{P50}^2 + 0.10 \frac{\mu D_{P50}}{(\rho_{air} p_{air})^{1/2}} - 2.06 \frac{\mu D_c^3 p_{air}}{\rho_p Q_0 p_0} = 0 \quad (4-9)$$

ただし、μ : 空気の粘性係数 [g/cm·s]、ρ_{air} : 空気密度 [g/cm³]

p_{air} : 空気圧力 [gf/cm²]、ρ_p : 粒子密度 [g/cm³]

Q₀ : 流量 [cm³/s]、p₀ : 大気圧 [gf/cm²]

D_c : ノズル直径 [cm]

実際には、ノズル直径 D_c、流量 Q₀ および圧力 p_{air} の関係が未知であるため、ノズル直
径と流量を適当に設定し、圧力を測定することにより試行錯誤で求める必要がある。

4.2.3 分級装置の性能試験

インパクト法の特徴は、前述したように、ろ過法に比べて石綿の捕集面密度が高く、計
数の必要がない微小粒子が少ないことである。しかし、微小粒子の除去には適切な分離直

径を知る必要がある。例えば、分離直径を小さく見積もり過ぎると不必要な微小粒子まで捕集してしまうことになり、反対に大きく見積もり過ぎると計数すべき粒子を逃してしまうことになる。この分離直径を正確に見積もることは困難であり、さらにいくつかの仮定を含んで求めているので、実測によるインパクトの性能試験が必要になる。

本研究では、Chrysotile、比較的単純な形状のガラス繊維と大気塵に対するインパクトの性能試験を行った。

(1) 性能試験の概略

石綿やガラス繊維のエアロゾルをエアロゾル発生装置により定常的に発生させ、また大気塵は直接一般大気より吸引し、インパクト捕集装置でカバーガラス上に捕集した後、各段ごとに試料を作製し AFACS による自動計数を行った。またバックアップフィルタによりインパクトで捕集しきれなかった石綿を捕集し、肉眼計数により計数を行い、各段の捕集効率および総合捕集効率を求めた。ただし、一度捕集された粉じんが再飛散したり、捕集されている粉じんの上に衝突したため、はじかれて捕集されなかったりしたものを、後段のインパクトで再捕集するために、複数のインパクトを設けた。したがって、通常用いるカスケードインパクトと異なり、各段のインパクトの分離直径は同じになるように製作している。また、2段と4段のインパクト捕集装置を用いて、石綿捕集に必要な段数の見積りを行った。

(2) 性能試験の方法

定常的に石綿あるいはガラス繊維のエアロゾルを供給するために用いた、エアロゾル発生装置を図 4-5 に示す。懸濁液には、石綿あるいはガラス繊維をあらかじめ蒸留水中に超音波により十分分散させたものを用いた。性能試験には噴霧ノズル前方に設置した球と出口近傍に設置した邪魔板の2段で慣性衝突により大きな繊維や水滴を除去し、気流のついた浮遊繊維のみ供給した。湿ったエアロゾルと乾燥剤を通した乾燥空気とを混合瓶で混合させ、乾燥エアロゾルとして捕集装置に導く。ただし、空気はフィルタによりろ過した清浄空気を用いた。

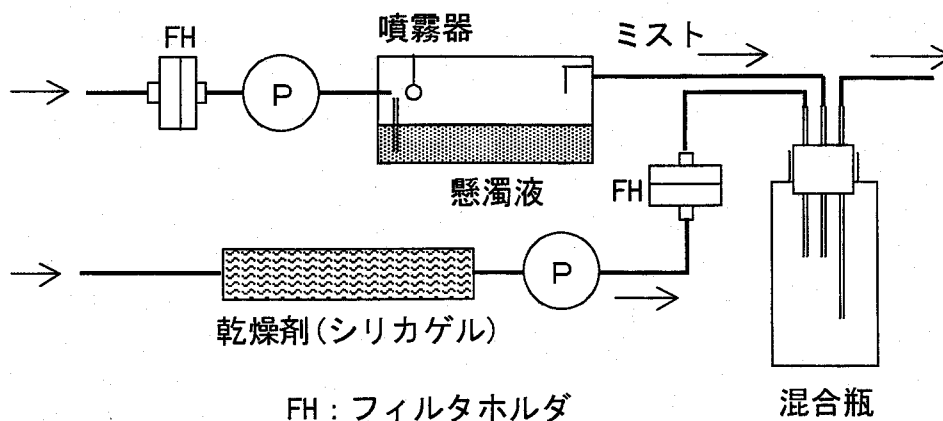


図 4-5 エアロゾル発生器

粒子発生の定常性を確認するために、混合瓶から出るエアロゾル粒子数をパーティクルカウンタを用いてモニタした結果、微小粒子においては±10%程度の変動を伴うものも見られたが、比較的大きな粒子はほぼ安定して供給されていることを確認した。図4-6にはChrysotileの、図4-7にはガラス繊維の粒子数のモニタ結果を示す。

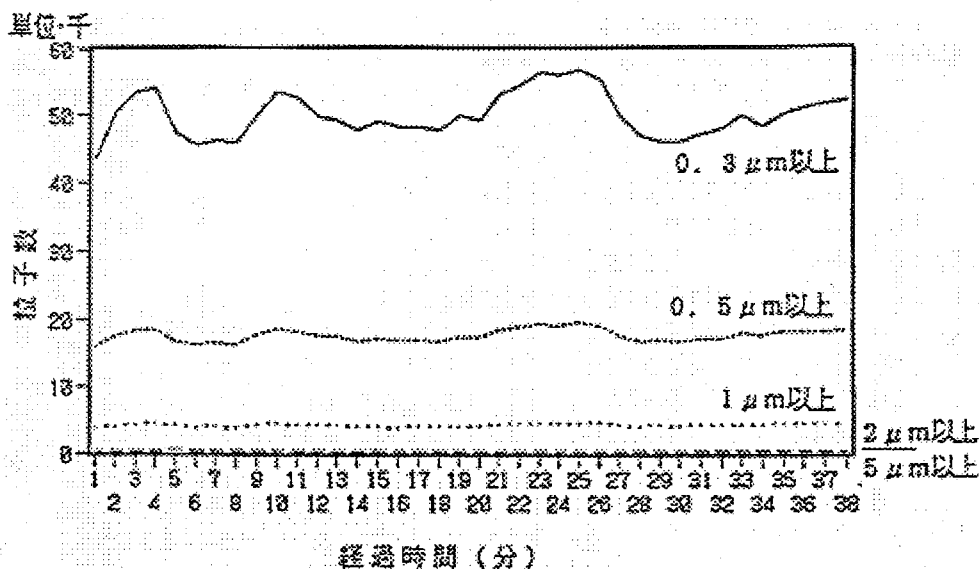


図4-6 モニタ結果 (Chrysotile)

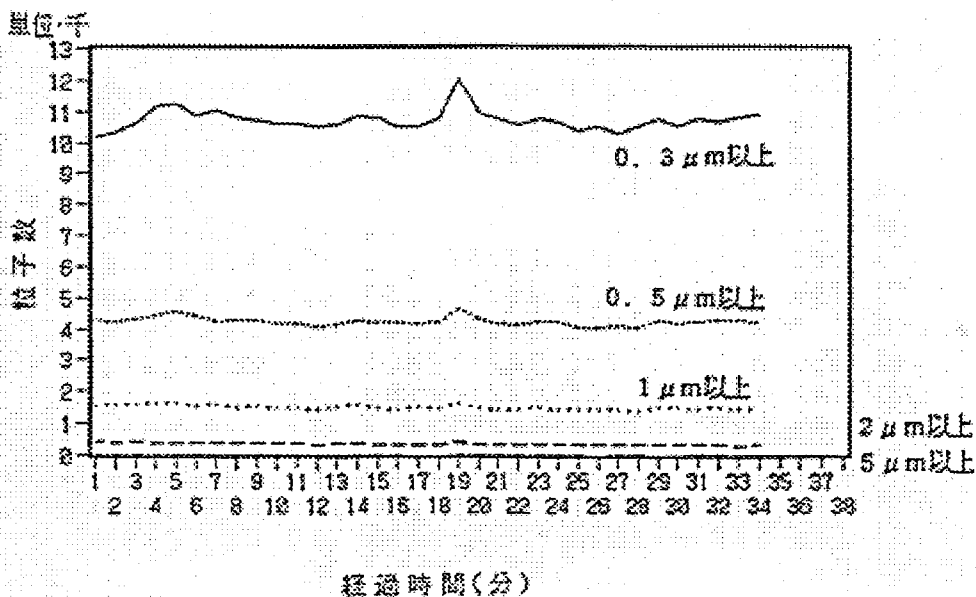


図4-7 モニタ結果 (ガラス繊維)

インパクトは捕集の段数を決定するため、本研究では2段（図 4-8 参照）と4段（図 4-9 参照）を用い、インパクト内の圧力は水銀マンノメータを用いて測定した。1段目のノズル入口からエアロゾルを含んだ空気が供給される。ノズルの前方には白色ワセリンを薄く塗布したカバーガラスが設置されており、繊維状のエアロゾルはこれに慣性衝突して捕集され、計数が不要な微小エアロゾルは気流にのり、捕集されず通過する。

通常、粉じんを捕集する場合はバックアップフィルタは用いないが、本実験では捕集しきれなかった石綿繊維を回収するため、インパクトを通過した空気は2経路に分け、それぞれバックアップフィルタで捕集した後、排出する。バックアップフィルタには、メンブランフィルタとろ過抵抗の少ないガラス繊維フィルタを用いた。メンブランフィルタを計数用に使用し、流量比で補正することにより、インパクトで捕集しきれなかった繊維数とした。

インパクトで捕集した粒子を、以下の手順で、計数に用いる試料として作製する。

- ①捕集後、新しいカバーガラスを載せ、粒子をサンドイッチ状に挟み、蓋付きガラス容器に入れる
- ②ガラス容器を電気炉で450℃、1時間加熱することにより、白色ワセリンを蒸発させ、除去する
- ③加熱したガラス容器を常温まで徐冷し、蒸留水で10倍に希釈したアルコール溶液を容器に少量入れ、超音波洗浄器に数分かけ、カバーガラス上の付着物をアルコール溶液中に取り出す
- ④このアルコール溶液を直径25mm、孔径0.8μmのメンブランフィルタで吸引ろ過する。ガラス容器内およびカバーガラスも蒸留水で洗浄し、同時にろ過する
- ⑤メンブランフィルタをシャーレに入れ、清浄な乾燥空気により乾燥させる
- ⑥乾燥後、アセトートリアセチン法により透明化を施す

(3)インパクト2段を使用した場合

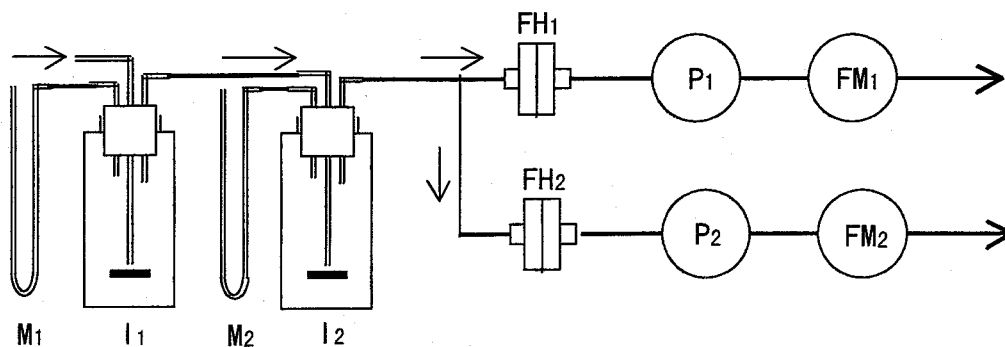
図 4-8 にインパクトを2段用いた捕集装置を示す。

インパクトの分離直径 D_{P50} は、式(4-9)により求める。ここで、各変数の値は、以下の値を用いた。ただし、 ρ_p は石綿の見かけの粒子密度が不明なので、 1 g/cm^3 と仮定した。

$$\mu = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{sec}, \quad Q_0 = 667 \text{ cm}^3/\text{sec}$$
$$p_0 = 760 \text{ mmHg} = 1033 \text{ gf/cm}^2, \quad \rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$$

○インパクト1段目

$$D_c = 0.175 \text{ cm}, \quad \rho_{\text{air}} = 1.01 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$
$$p_{\text{air}} = 632 \text{ mmHg} = 859 \text{ gf/cm}^2$$



I_1, I_2 : インパクト 1, 2 段目 M_1, M_2 : マノメータ
 FH_1, FH_2 : フィルタホルダ P_1, P_2 : ポンプ FM_1, FM_2 : 流量計

図 4-8 インパクトを 2 段用いた捕集装置

○インパクト 2 段目

$$D_c = 0.19 \text{ cm}, \quad \rho_{\text{air}} = 8.54 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{air}} = 532 \text{ mmHg} = 723 \text{ gf/cm}^2$$

分離直径は 1 段目, 2 段目ともに $D_{P50} = 0.41 \mu\text{m}$ となった。

捕集条件を表 4-1 に示す。流量①はメンブランフィルタ側, 流量②はガラスフィルタ側の流量を示す。捕集空気流量は $34 \sim 40 \text{ l/min}$, 捕集空気量は Chrysotile が $34 \sim 68 \text{ l}$, ガラス繊維が $70 \sim 140 \text{ l}$, 大気塵は $1080 \sim 1200 \text{ l}$ である。

表 4-2 にインパクト 1, 2 段目から得た試料およびバックアップフィルタの計数結果を示す。インパクト部の試料は, 直径 25 mm のフィルタを用い自動計数システムで計数した。バックアップフィルタは直径 47 mm のフィルタを用い, 捕集石綿繊維数が少ないため肉眼で計数を行った。

インパクト部のろ過フィルタの有効ろ過面積とバックアップフィルタの有効ろ過面積や自動計数と肉眼計数の視野面積が異なり, そのままの計数値では比較できないため, 本来の濃度の意味と異なるが, 便宜上, 計数値をその通過空気量で除した値を濃度として表した。

ここで, 直径 25 mm のフィルタの有効ろ過面積は 1.2 cm^2 , 直径 47 mm のフィルタの有効ろ過面積は 13.5 cm^2 , 自動計数の 1 視野当たりの面積は $1.13 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 肉眼計数の 1 視野当たりの面積は $7.069 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ である。

大気塵は, 捕集日時により塵埃濃度の変動が大きく, 試料番号 9 の値は他のものと異なっているが, それ以外は各試料ごとにほぼ近い値を示しており, 1 段目の濃度に対して 2 段目の濃度が Chrysotile では約 $35 \sim 50\%$, ガラス繊維では約 $24 \sim 38\%$, 大気塵では約 $46 \sim 70\%$ となった。バックアップフィルタの濃度は, 1 段目の濃度に対してク

表 4-1 捕集条件

対象試料	試料番号	捕集時間 (min)	流量① (l/min)	流量② (l/min)
Chrysotile	1	1	12	22
	2	1.5	12	22
	3	2	12	22
	4	2	12	22
ガラス繊維	5	2	13	22
	6	2	13	22
	7	4	13	22
大気塵	8	30	15	25
	9	30	13	23
	10	30	14	24

表 4-2 計数結果

対象試料	試料番号	インパクタ				バックアップフィルタ	
		1 段 目		2 段 目		本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)
		本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)	本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)		
Chrysotile	1	260	8.12×10^{-1}	92.5	2.89×10^{-1}	8 (41)	1.72×10^{-1}
	2	399	8.31×10^{-1}	139	2.89×10^{-1}	8 (41)	8.49×10^{-2}
	3	581	9.07×10^{-1}	287	4.48×10^{-1}	10 (51)	7.96×10^{-2}
	4	519	8.11×10^{-1}	220	3.44×10^{-1}	12 (61)	4.55×10^{-2}
ガラス繊維	5	496	7.53×10^{-1}	119	1.81×10^{-1}	8 (39)	5.88×10^{-2}
	6	438	6.65×10^{-1}	153	2.32×10^{-1}	6 (29)	4.41×10^{-2}
	7	802	6.08×10^{-1}	302	2.29×10^{-1}	11 (53)	4.04×10^{-2}
大気塵	8	576	5.10×10^{-2}	266	2.35×10^{-2}	15 (72)	6.37×10^{-3}
	9	159	1.56×10^{-2}	109	1.07×10^{-2}	14 (70)	6.86×10^{-3}
	10	490	4.57×10^{-2}	250	2.33×10^{-2}	13 (31)	5.91×10^{-3}

ただし、計数は 100 視野による。()内は補正值

リソタイルでは約6～21%，ガラス繊維では約7～8%，大気塵では約13～44%となった。

全体的に1段目の濃度に比べて2段目の濃度が高く，1段目では十分捕集しきれておらず，顕微鏡の観察によっても，2段目には繊維状物質の存在が確認され，再飛散していることがわかった。また，バックアップフィルタ上の石綿数が多く，補正後の値がかなり大きくなっている。

したがって，2段のインパクトでは繊維状物質を十分に捕集しきれず，インパクトの段数を増やす必要がある。

(4)インパクト4段を使用した場合

図4-9にインパクトを4段用いた捕集装置を示す。

分離直径 D_{P50} は2段の場合と同様にして求めた。

$$\mu = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{sec}, \quad Q_0 = 667 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$p_0 = 760 \text{ mmHg} = 1033 \text{ gf/cm}^2, \quad \rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$$

○インパクト1段目

$$D_c = 0.185 \text{ cm}, \quad \rho_{\text{air}} = 1.12 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$p_{\text{air}} = 707 \text{ mmHg} = 961 \text{ gf/cm}^2$$

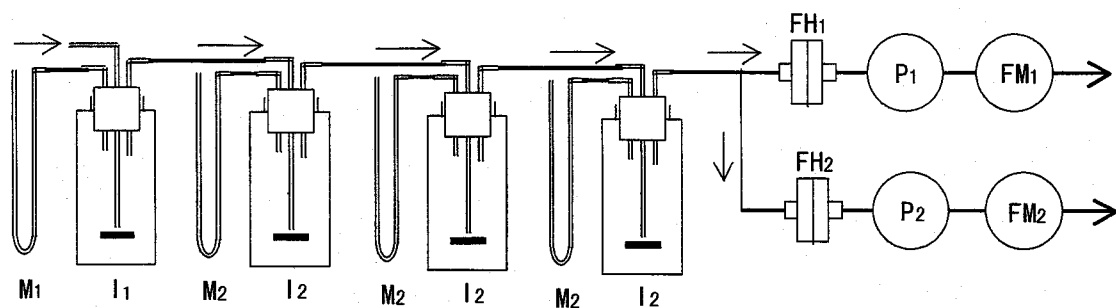
より， $D_{P50} = 0.49 \mu\text{m}$

○インパクト2段目

$$D_c = 0.185 \text{ cm}, \quad \rho_{\text{air}} = 1.08 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$p_{\text{air}} = 673 \text{ mmHg} = 915 \text{ gf/cm}^2$$

より， $D_{P50} = 0.48 \mu\text{m}$



I1：インパクト1段目 I2：インパクト2段目 I3：インパクト3段目 I4：インパクト4段目
M1, M2, M3, M4：マンメータ FH1, FH2：フィルタホルダ P1, P2：ポンプ FM1, FM2：流量計

図4-9 インパクトを4段用いた捕集装置

○インパクト 3 段目

$$D_c = 0.195 \text{ cm}, \quad \rho_{\text{air}} = 1.00 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$p_{\text{air}} = 626 \text{ mmHg} = 851 \text{ gf/cm}^2$$

$$\text{より, } D_{P50} = 0.49 \mu\text{m}$$

○インパクト 4 段目

$$D_c = 0.205 \text{ cm}, \quad \rho_{\text{air}} = 9.21 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

$$p_{\text{air}} = 576 \text{ mmHg} = 783 \text{ gf/cm}^2$$

$$\text{より, } D_{P50} = 0.51 \mu\text{m}$$

捕集条件を表 4-3 に示す。2 段の場合と同様、流量①はメンブランフィルタ側、流量②はガラスフィルタ側の流量を示す。捕集空気流量は 40 l/min、捕集空気量は Chrysotile が 40~80 l、ガラス繊維が 30~40 l、大気塵は 1200 l である。

表 4-4 にインパクト 1, 2, 3, 4 段目から得た試料およびバックアップフィルタの計数結果を示す。インパクト数を 4 段に増やした他は、ろ過に用いたフィルタや試料作製方法および結果の表示方法などは、2 段の場合と同様である。

1 段目の濃度に比べて 2 段目の濃度は、Chrysotile では約 30~68%、ガラス繊維では約 45~59%、大気塵では約 32~60% となり、平均では約 50% となった。3 段目の濃度は、Chrysotile では約 14~28%、ガラス繊維では約 17~31%、大気塵では約 14~20% となり、平均では約 21% となった。4 段目の濃度は、Chrysotile では約 6~15%、ガラス繊維では約 10~15%、大気塵では約 8~13% となり、

表 4-3 捕集条件

対象試料	試料番号	捕集時間 (min)	流量① (l/min)	流量② (l/min)
Chrysotile	1	1	15	25
	2	2	15	25
	3	2	15	25
	4	2	15	25
ガラス繊維	5	1	15	25
	6	1	15	25
	7	3/4	15	25
大気塵	8	30	15	25
	9	30	15	25
	10	30	15	25
	11	30	15	25

表 4-4 計数結果

対象試料	試料 番号	インパクト			
		1 段 目		2 段 目	
		本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)	本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)
Chrysotile	1	216.5	5.75×10^{-1}	103.5	2.75×10^{-1}
	2	425.5	5.65×10^{-1}	289.5	3.84×10^{-1}
	3	452.5	6.01×10^{-1}	133.5	1.77×10^{-1}
	4	491.5	6.52×10^{-1}	299.0	3.96×10^{-1}
ガラス繊維	5	378.0	1.00	171.0	4.54×10^{-1}
	6	348.0	9.24×10^{-1}	206.0	5.47×10^{-1}
	7	216.5	7.66×10^{-1}	106.0	3.75×10^{-1}
大気塵	8	274.0	2.42×10^{-2}	166.5	1.47×10^{-2}
	9	450.5	3.99×10^{-2}	222.5	1.97×10^{-2}
	10	446.5	3.95×10^{-2}	271.0	2.40×10^{-2}
	11	493.0	4.36×10^{-2}	156.5	1.38×10^{-2}

試料 番号	インパクト				バックアップフィルタ	
	3 段 目		4 段 目		本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)
	本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)	本数 (本)	濃 度 (本/cm ³)		
1	60.0	1.59×10^{-1}	31.5	8.36×10^{-2}	4(19)	5.04×10^{-2}
2	60.5	8.03×10^{-2}	27.0	3.58×10^{-2}	6(29)	3.85×10^{-2}
3	76.0	1.01×10^{-1}	47.5	6.31×10^{-2}	8(38)	5.04×10^{-2}
4	91.5	1.21×10^{-1}	56.0	7.43×10^{-2}	7(34)	4.51×10^{-2}
5	63.5	1.69×10^{-1}	36.0	9.56×10^{-2}	5(24)	6.37×10^{-2}
6	109.0	2.89×10^{-1}	53.5	1.42×10^{-1}	8(38)	1.01×10^{-1}
7	59.5	2.11×10^{-1}	32.5	1.15×10^{-1}	6(29)	1.03×10^{-1}
8	72.5	6.42×10^{-2}	35.5	3.14×10^{-3}	4(19)	1.68×10^{-3}
9	62.0	5.49×10^{-2}	35.0	3.10×10^{-3}	7(34)	3.01×10^{-3}
10	91.0	8.05×10^{-3}	64.5	5.71×10^{-3}	8(38)	3.36×10^{-3}
11	93.0	8.23×10^{-3}	43.0	3.81×10^{-3}	9(43)	3.81×10^{-3}

ただし、計数は 100 視野による。()内は補正值

平均では約12%となった。バックアップフィルタの濃度は、Chrysotileでは約7~9%、ガラス繊維では約6~13%、大気塵では約7~9%となり、平均では約8%となった。

4段の場合のバックアップフィルタの濃度は2段の場合のそれより低い値を示しており、インパクトの段数を増加させた効果が現れている。顕微鏡の観察によっても3段目、4段目の捕集繊維数は少ない。なお、バックアップフィルタにおける捕集繊維はあまり見あたらず、計数值そのものも小さな値となっているが、ここでの捕集条件による補正係数が4.8と大きく、そのため補正濃度値が大きな値となっている。(図4-10(a)~(e)参照)

次に、4段のインパクトでどの程度捕集できるかを試算する。2段目以降のインパクトの濃度とその前段の濃度を比較した結果、その比がほぼ1/2になっており、仮に同程度の性能を有するインパクトを無限段接続するとすれば、捕集できる繊維数 T_N [本] は、次のようになる。

$$\begin{aligned} T_N &= \frac{N}{1-r} && (r : \text{公比}) \\ &= 2N \end{aligned}$$

また、インパクトを4段用いた場合捕集できる繊維数 C_N [本] は、次のようになる。

$$C_N = N \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \right) = \frac{15}{8} N$$

したがって、インパクト4段で捕集できる割合は、

$$\frac{C_N}{T_N} = \frac{\frac{15}{8} N}{2N} = 0.9375$$

となる。

インパクトをこれ以上増やしても捕集繊維数はあまり増加せず、ポンプの動力や計数誤差なども総合的に判断して、インパクトを4段用いた捕集装置で十分と思われる。



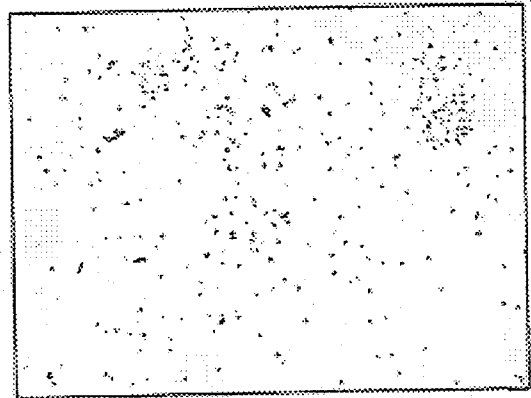
(a) 1 段目



(b) 2 段目



(c) 3 段目



(d) 4 段目



(e) バックアップフィルタ

図 4-10 インパクトタの各段の試料およびバックアップフィルタ (Chrysotile)

4.3 試料作製法¹³⁾

前節では、石綿として計数不要な微小粒子を除去でき、ろ過法と比較して捕集時の圧力損失が少なく処理空気流量が大きく設定できるインパクト法について述べた。本節では、一般環境における粒子捕集後の試料作製処理としての熱および酸処理について述べる。

4.1 節でも述べたが、一般環境は作業環境と異なり、空気中の繊維状物質の大部分が非石綿繊維である。この非石綿繊維には、合成繊維、植物性繊維、動物性繊維、鉱物性繊維などが多量に含まれる。そして、捕集した粉じんをそのまま計数すれば非石綿繊維を石綿と誤計数してしまう割合が増加するので、計数精度を上げるためにはこれらをあらかじめ除去する必要がある。

そこで、非石綿繊維を除去するため酸・アルカリ処理などの化学的処理の可能性の検討をあらかじめ行った結果、アルカリ処理は動物性繊維以外のものに対しほとんど影響がないことがわかった¹⁴⁾ので、化学的処理としては酸処理のみを採用することにした。ここでは比較的簡単な方法によりこれらの繊維状物質を除去する目的で、熱および酸処理を施した。

4.3.1 石綿の構造

図 4-11 に Amosite や Crocidolite など角閃石類の結晶構造模式図を示す。陽イオン層は二つのケイ酸塩の帯に挟まれた構造を呈し、外部表面は疎水性のケイ酸塩層をなす。このため端部を除いた陽イオン層はケイ酸塩層により十分保護されている¹⁵⁾。図 4-12 に同心円あるいはらせんの形状をもつ蛇紋石類の Chrysotile の結晶構造模式図を示す。Chrysotile は水酸化マグネシウム $Mg(OH)_2$ (brucite) 層と SiO_4 がつながったケイ酸層の 1 : 1 層とから構成される。 $Mg(OH)_2$ の結合周期が SiO_4 のそれより 5% 程度長いので、 $Mg(OH)_2$ 層が外側、 SiO_4 が内側の渦巻構造を呈し、この歪みを解消している。このため繊維の直径が $0.02 \sim 0.06 \mu m$ の中空 (数 10 \AA) 管状をしており、この形状の中心軸は繊維の長軸となる。表層 ($Mg(OH)_2$) は親水性を示し水に溶解するが、酸によっても除去される¹⁵⁾。図 4-13 に Chrysotile の電子顕微鏡写真と結晶構造模式図¹⁶⁾を示す。図中 A は Chrysotile 繊維を側面から見た格子像であり、B はそれを輪切りにして断面方向から見た格子像である。この写真から Chrysotile は 7.2 \AA の厚みの基本層 10 数枚が同心円状あるいはらせん状に巻いてできた中空管状形態の結晶であることがわかる。

表 4-5 に石綿の鉱物学的分類と理想的な化学構造式を示し¹⁷⁾、表 4-6 に石綿の化学組成を示す^{18,19)}。表 4-6 における化学組成は世界的に有名な鉱山の石綿についての分析値であるが、産地によりこの値は若干変動がある。しかし、商業的に採掘されている石綿はこれらの値から大きくずれることはない。また、表 4-7 に石綿の物理的性質を示す²⁰⁾。

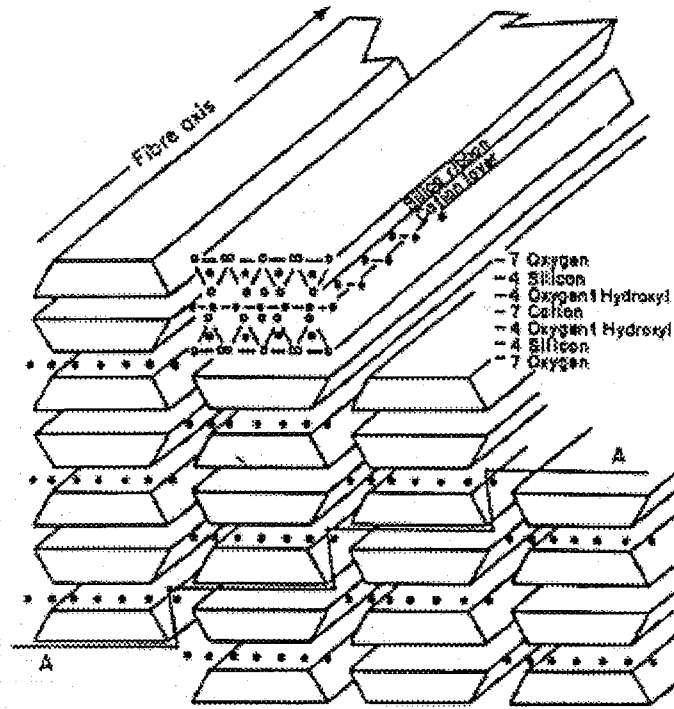


図 4-11 角閃石類の結晶構造模式図

(A.A. Hodgson: Chemistry and Physics of Asbestos から転載)

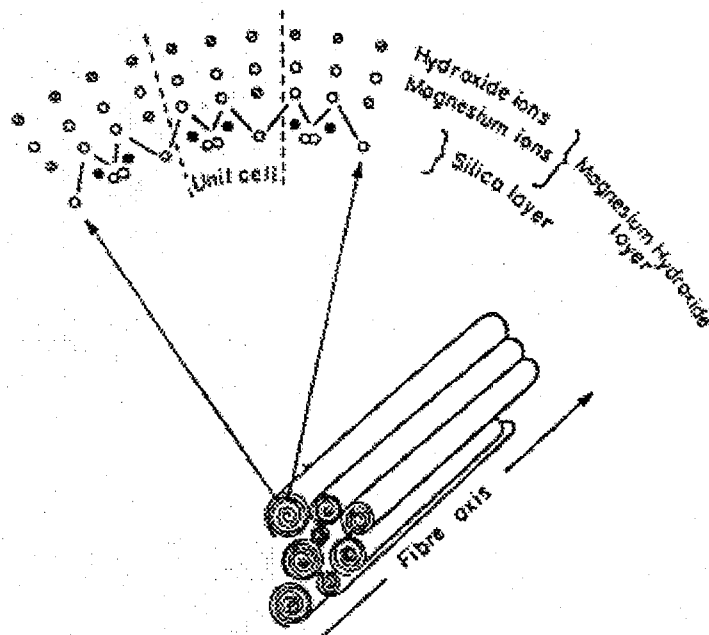


図 4-12 Chrysotile の結晶構造模式図

(A.A. Hodgson: Chemistry and Physics of Asbestos から転載)

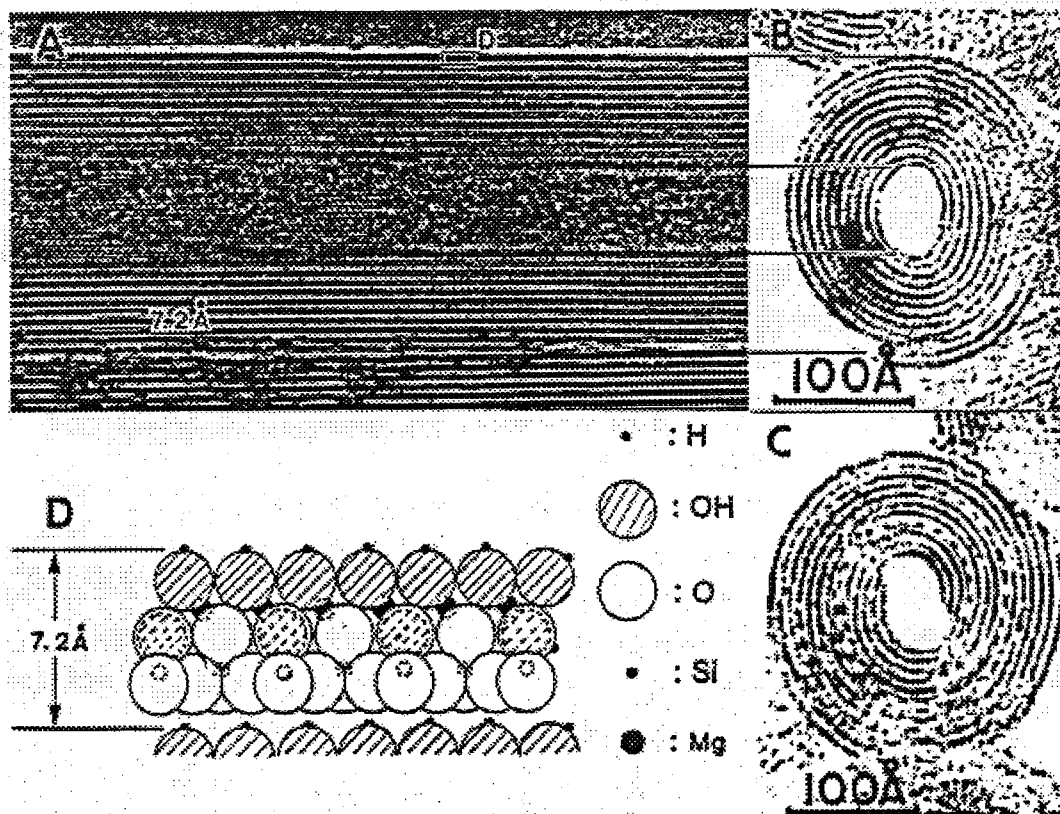


図 4-13 Chrysotile の電子顕微鏡写真と結晶構造模式図

(A.A. Hodgson: Chemistry and Physics of Asbestos から転載)

表 4-5 石綿の鉱物学的分類と化学構造式

石 綿 種	化 学 構 造 式	鉱 物 名
蛇 紋 石 族 (Serpentine group)		
クリソタイル(白石綿) (Chrysotile)	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	Chrysotile
角 閃 石 族 (Amphibole group)		
アモサイト(茶石綿) (Amosite)	$(Mg < Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2$	Cummingtonite-Gruerite
クロシドライト(青石綿) (Crocidolite)	$Na(Fe^{2+} > Mg)_3Fe_2^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$	Riebeckite

文献 17) より一部抜粋

表 4-6 石綿の化学組成 (単位[%])

	Chrysotile	Crocidolite	Amosite
SiO ₂	40.75	52.00	49.70
Al ₂ O ₃	3.37	—	0.40
Fe ₂ O ₃	0.44	16.05	0.03
FeO	0.28	17.65	39.70
MnO	0.03	trace	0.22
MgO	41.28	4.28	6.44
CaO	0.35	1.20	1.04
Na ₂ O	0.07	6.21	0.09
K ₂ O	0.04	0.06	0.63
H ₂ O ⁺	12.86	2.43	1.83
H ₂ O ⁻	0.78	0.26	0.09
Total	100.69	100.14	100.17

文献 18,19) より一部抜粋

表 4-7 石綿の物理的性質

	Chrysotile	Amosite	Crocidolite
硬 度	2.5-4.0	5.5-6.0	4
比 重	2.4-2.6	3.1-3.25	3.2-3.3
比 熱	0.266	0.193	0.201
抗張力 (kg/cm ²)	30,000	25,000	35,000
最大重量減温度 (°C)	982	871-982	649
ろ過性能	遅い	速い	速い
電 荷	陽	陰	陰
熔融点 (°C)	1521	1399	1193
紡糸性	良好	良	良
耐薬品性	不良	良	良
柔軟性	大	良	良
耐熱性	良好	良好	不良

日本化学技術情報センター：大気汚染物質レビュー「石綿」より一部抜粋

4.3.2 熱処理

インパクト法における捕集装置の捕集板には再飛散防止の目的で白色ワセリンを塗布しているため、試料作製時に熱処理を施しこれを除去している。したがって、改めて熱処理を施すものではなく、その一環として本処理を施す。

熱処理実験に供した繊維状物質として、我が国で使用されてきた石綿（Chrysotile, Amosite および Crocidolite）、非石綿繊維としては石綿繊維の代替物質であり断熱材に広く用いられている鉱物性繊維（ガラス繊維およびロックウール）、衣服・寝具などに用いられて一般家庭から多量に放出される合成繊維（66ナイロン、アクリルおよびポリエステル）、植物性繊維（綿および麻）、動物性繊維（絹、羊毛および人毛）を選んだ。

石綿類は300～600℃で機械的強度の低下がみられ、約800℃から構造に変化が生じ始める²¹⁾。ガラス繊維およびロックウールの軟化温度はそれぞれ約700℃、800℃である²²⁾。一方、66ナイロンは215℃で溶解、綿は150℃で分解、羊毛は300℃で炭化、絹は275～456℃で燃焼する²³⁾。石綿類の形状に変化がなく、非石綿繊維類を除去できるように加熱条件を考慮し、熱処理における加熱温度は450℃と決定した。また、時間を追って残さの状態を観察し、鉱物性以外の繊維をすべて除去することができた1hを加熱時間とした。

熱処理実験では、熱処理前後の変化を観察するため、スライドガラス上に細かく砕いた繊維状物質を極少量のせ、その上からカバーガラスを被せてクリップで固定する。加熱前に位相差顕微鏡により観察を行った後、電気炉で450℃、1h加熱した。その後、室温まで放冷し、位相差顕微鏡で再度観察することにより、熱処理前後の変化を調べた。

表 4-11 に示すように、日常生活から発生する種々の繊維状物質は鉱物性繊維に比べて耐熱性に乏しく、そのほとんどが熱処理により除去できた。一例として図 4-14 に66ナイロンの熱処理の結果を示す。ただし、図中における一直線の繊維状のものはスライドガラス面上の標本位置の確認のために、この図に限って付けた傷である。図 4-14 から66ナイロンが熱処理により除去されたことがわかる。しかし、断熱材として用いられるガラス繊維、ロックウールなどの鉱物性繊維は耐熱性に富むため、この程度の熱処理では除去できなかった。また、石綿類の加熱処理結果の一例として、図 4-15 に Chrysotile の熱処理結果を示す。なお、図 4-15 において中央部の繊維状物質が Chrysotile である。

石綿類は、本実験条件による熱処理では影響を受けないため、加熱処理は鉱物性繊維など、特に、耐熱性に富むもの以外の非石綿繊維に対する有効な除去処理法として使用できることが判明した。

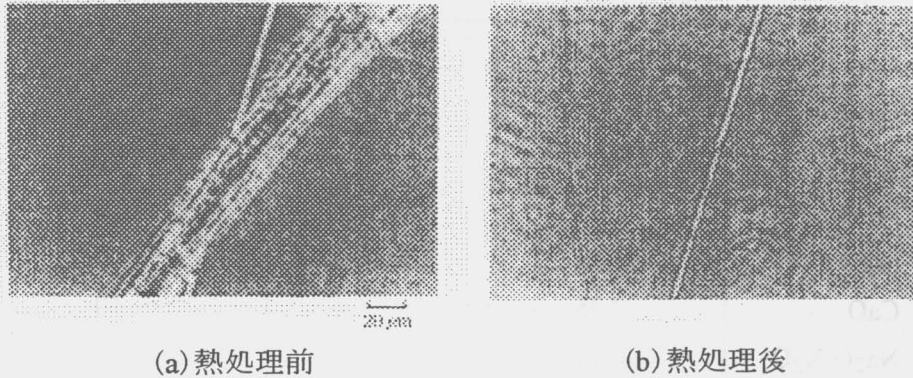


図 4-14 66ナイロンの熱処理

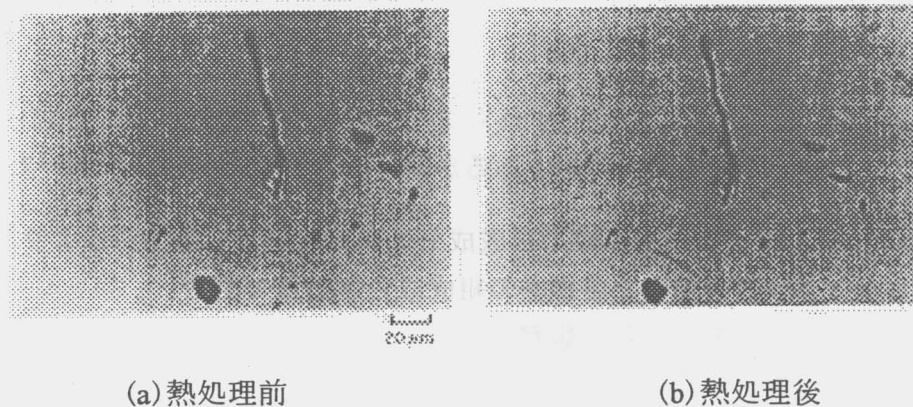


図 4-15 Chrysotile の熱処理

4.3.3 酸処理

通常、酸処理は塩酸などを用いて行われることが多い²⁴⁾が、ロックウールは除去できてもガラス繊維は残る。ここでは、断熱材として多量に使用されているガラス繊維も除去の対象としたのでフッ化水素酸を用いた。酸処理は安全性のため出来る限り低い濃度で処理することが望ましい。そこで、フッ化水素酸の使用濃度を25規定から順次下げて試みた結果、1規定のフッ化水素酸（以下1 N-HF と略記する）でもガラス繊維およびロックウールの除去が可能であったので、以下の酸処理には1 N-HF を用いた。

また、4.3.1 項で示したように、Amosite や Crocidolite などの角閃石類に属する石綿の最表部の層は蛇紋石類に属する Chrysotile より疎水性に富む¹⁵⁾ため耐薬品性に優れている。それ故、酸処理実験には耐薬品性が3種類の石綿の中で最も劣る Chrysotile を用いた。また、Chrysotile、ガラス繊維およびロックウールの組成の一例を表 4-8 に示す。

表 4-8 Chrysotile, ガラス繊維, ロックウールの組成例 (単位[%])

	Chrysotile [†]	ガラス繊維 ^{††}	ロックウール
SiO ₂	40.75	55 ~ 72	35 ~ 45
Al ₂ O ₃	3.37	1 ~ 7	10 ~ 20
Fe ₂ O ₃ , FeO	0.72	0 ~ 4	0 ~ 10
MgO	41.28	2 ~ 4	4 ~ 8
CaO	0.35	3 ~ 8	20 ~ 40
Na ₂ O, K ₂ O	0.11	10 ~ 18	—
H ₂ O	13.64		

注 † 環境庁: "石綿・ゼオライトのすべて"より抜粋

†† 日本化学会: "化学便覧"より抜粋

ここで, Chrysotile とガラス繊維がいずれもケイ酸化合物であるにもかかわらず, 1 N-HF によるガラス繊維のみの除去が可能であるか否かを以下の方法により調べた。

- ① 1 N-HF が Chrysotile とガラス繊維の組成成分に及ぼす影響を重量法により測定
- ② イオンクロマトグラフを用いた各繊維の組成成分溶出量の測定
- ③ 顕微鏡による各繊維の形状変化の観察

①の測定では, 50.0 mg の各繊維に, 1 N-HF 10 ml を加え, 設定時間に達すると溶液と残留物をフィルタでろ過分離する。酸化反応を停止させるために, 直ちに蒸留水 10 ml を加え, 十分水溶性の生成物を溶出させた後, 残留物と蒸留水をろ過分離する。乾燥後, 残留物の重量を測定し, 成分の溶出量を算出する。この操作を設定時間ごとに繰り返した。時間に対する処理後の繊維重量の減量割合を, 処理前の繊維重量に対する相対値で表示した測定結果を表 4-9 に示す。表よりガラス繊維に含まれる SiO₂ などは 1 N-HF と反応し, 水溶性物質に変わるものは数分のうちに溶出し, Chrysotile に含まれる同様な物質は, ガラス繊維よりは溶出に時間を要することがわかる。この差は, ガラス繊維は原子配列が不均一なガラス質であり, Chrysotile は層状ケイ酸塩構造をもつ, 結晶構造の違いから生じるものと考えられる。

②の測定では, 1 N-HF 10 ml 中に 50.0 mg の繊維を 30 min 間浸したものをフィルタにより吸引ろ過する。そのろ液を測定試料としてイオンクロマトグラフ (DIONEX 社製 DX-300) を用いて, SiF₆²⁻と Mg²⁺のイオン濃度を測定し, ケイ酸 (SiO₂) と酸化マグネシウム (MgO) の溶出量を各繊維ごとに算出した。ただし, SiF₆²⁻の分析条件として, 分離・ガードカラムは IonPac AS4A-SC, 溶離液は 1.8 mM Na₂CO₃/1.7 mM NaHCO₃ を流量 1.5 ml/min, サプレッサーは ASRS-I, 検出器は電気伝導度検出器とし²⁵⁾, Mg²⁺の分析条件として, 分離・ガードカラムは IonPac CS12, 溶離液は 20 mM メタンシルホン

表 4-9 酸処理による繊維重量の時間変化

対象繊維	処理時間 [min]	繊維重量		減量割合 [%]
		処理前 [mg]	処理後 [mg]	
Chrysotile	1.5	51.7	32.6	36.9
	2.5	45.2	28.1	37.8
	5.0	52.6	33.4	36.5
	10.0	50.3	29.0	42.3
	15.0	54.0	28.4	47.4
	30.0	50.2	25.5	49.2
	60.0	50.4	23.2	54.0
ガラス繊維	1.5	56.2	8.5	84.9
	2.5	51.1	6.1	88.1
	5.0	51.6	5.5	89.3
	10.0	53.8	5.7	89.4
	30.0	50.8	5.5	89.2

酸を流量 1.0 ml/min, サプレッサーは CSRS-I, 検出器は電気伝導度検出器とした²⁶⁾。通常, SiO_2 とフッ化水素酸 (HF) が反応すると, ヘキサフルオロケイ酸 (H_2SiF_6) が生成されるので, SiF_6^{2-} 量を測定することにより, 溶出した SiO_2 を算出することができる。しかし, 市販の HF には H_2SiF_6 が幾分含有されているため, あらかじめ HF 中の H_2SiF_6 を測定し, 各繊維から求めた H_2SiF_6 を補正する必要がある²⁷⁾。ところが, イオンクロマトグラフでは, 通常 F と SiF_6^{2-} の分離が困難であるため, 未反応 HF の F が SiF_6^{2-} に加算されて測定され, 正確な SiF_6^{2-} 値を求めることができない。そこで, あらかじめ塩化カリウム (KCl) を添加し, H_2SiF_6 を不溶性のヘキサフルオロケイ酸カリウム (K_2SiF_6) に変化させた²⁸⁾後, 減圧加熱し蒸発乾燥させることにより残留 HF と反応生成物の塩酸 (HCl) を気化除去し, F と SiF_6^{2-} の分離を行った。乾燥固化した K_2SiF_6 と過剰添加分の KCl に 50 ml の超純水を加え, 測定検体とした。一方, Mg^{2+} のイオン濃度は低いと予想されるので, 測定試料をそのまま測定検体とした。表 4-10(a)に SiO_2 , 表 4-10(b)に MgO の溶出量の測定結果を示す。表中の溶出比は, 試料重量に対する成分の溶出量割合を示す。ここでは, Mg^{2+} の溶出比算出のため MgO 換算とした。溶出比から, Chrysotile やガラス繊維に含まれる SiO_2 成分のほとんどが溶出しており, SiO_2 が大部分を占めるガラス繊維は溶解する。しかし, Chrysotile に含まれる Mg^{2+} はほとんど溶出しておらず, まだその結晶構造を維持していることが示唆される。

表 4-10(a) 酸処理による SiO₂ の溶出

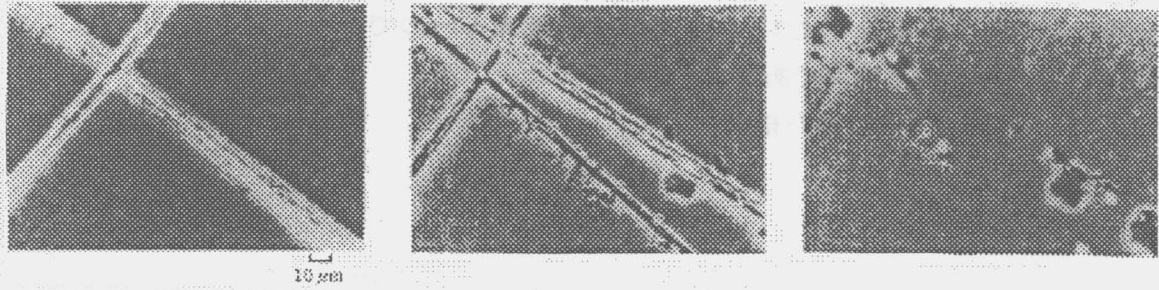
繊維名 または 溶液名	ろ過液の SiF ₆ ²⁻ 濃度 [ppm]	補正した H ₂ SiF ₆ 量 [mg]	溶出した SiO ₂ 量 [mg]	SiO ₂ の 溶出比 [%]
Chrysotile	17 570	5 630	23.5	47.0
ガラス繊維	20 130	8 220	34.3	68.6
1 規定 フッ化水素酸	12 020	—	—	—

表 4-10(b) 酸処理による MgO の溶出

繊維名 または 溶液名	ろ過液の Mg ²⁺ 濃度 [ppm]	溶出した MgO量 [mg]	MgOの 溶出比 [%]
Chrysotile	11.2	0.186	0.372
ガラス繊維	2.8	0.046	0.092
1 規定 フッ化水素酸	0.0	0.0	0.0

③では、酸処理による試料の時間的な形状変化を見るため、石綿、ロックウールおよびガラス繊維を乳鉢でできる限り細かく砕き、塩化ビニール製の検体板上に極少量のせ、1 N-HF を滴下し、顕微鏡下で形状の変化する状態を観察した。表 4-11 に酸処理の結果を示す。また、図 4-16 にロックウールの酸処理による変化を示す。図 4-16(a)は 1 N-HF の滴下直後、図 4-16(b)は 40 s 後、図 4-16(c)は 60 s 後のものであり、非繊維形状のフッ化物が生成されている。このことより、ロックウールは 1 min 以内の比較的短時間で除去できることがわかった。図 4-17 にガラス繊維の酸処理時間に対する変化を示す。図 4-17(a)は 1 N-HF の滴下直後、図 4-17(b)は 3 min 後、図 4-17(c)は 5 min 後のものであり、図より 1 N-HF の滴下後 3 min 間でその大半が、5 min 間で完全に除去されていることがわかる。図 4-18 に Chrysotile の酸処理時間に対する変化を示す。図 4-18(a)は 1 N-HF の滴下直後、図 4-18(b)は 5 min 後、図 4-18(c)は 15 min 後のものである。繊維が若干移動しているが、その形状に変化は見られない。

以上の結果を総合すると、ガラス繊維は組成成分の大半を占める SiO₂ が 1 N-HF により水溶性の H₂SiF₆ に変化し、水に溶出してもはやその形状を維持できなくなる。一方、Chrysotile 中の一部の SiO₂ はガラス繊維と同様に水に溶出し、一部の MgO は水に不溶な MgF₂ となるが、外見上形状に変化がないことから、この程度ではまだ Chrysotile の層状



(a) 酸の滴下直後

(b) 40 s 後

(c) 60 s 後

図 4-16 ロックウールの酸処理



(a) 酸の滴下直後

(b) 3 min 後

(c) 5 min 後

図 4-17 ガラス繊維の酸処理



(a) 酸の滴下直後

(b) 5 min 後

(c) 15 min 後

図 4-18 Chrysotile の酸処理

構造を維持しているものとする。

なお、ロックウールも組成成分からガラス繊維とほぼ同様な変化をされると考えられる。

これらのことから、1 N-HF による酸処理はロックウールやガラス繊維を溶解するが、石綿類には外見上影響を与えず、鉱物性非石綿繊維の一つであるロックウールおよびガラス繊維の除去に有効な処理であることがわかった。

表 4-11 に熱および酸処理の結果を示す。

表 4-11 熱および酸処理の結果

	繊維状物質	熱処理結果	酸処理結果
石 綿	Chrysotile	×	×
	Amosite	×	×
	Crocidolite	×	×
鉱物性	ガラス繊維	×	○
	ロックウール	×	○
合 成	66ナイロン	○	—
	アクリル	○	—
	ポリエステル	○	—
植物性	綿	○	—
	麻	○	—
動物性	絹	○	—
	羊毛	○	—
	人毛	○	—

注 ○：除去可，×：除去不可，—：対象外

4.4 試料作製手順

前節で求めた熱・酸処理条件を考慮した、一般大気に対する計数試料の作製手順を以下に述べる。

- ① 4段インパクト型捕集装置（捕集空気流量：40 l/min，捕集時間：30 min^{注1)}により白色ワセリンを薄く塗布したカバーガラス上に粉じんを捕集する
- ②新しいカバーガラスを①のカバーガラスに被せてサンドイッチ状に挟み、蓋付きガラス容器に入れる。
- ③ガラス容器を電気炉で450℃，1h加熱した後，室温まで放冷する
- ④熱処理されたカバーガラスを100 ml程度の蒸留水^{注2)}に入れ，超音波洗浄器に数分かけて，カバーガラス上の付着物を蒸留水中に取り出す
- ⑤ニトロセルロース・メンブランフィルタ（直径25 mm，孔径0.8 μm）により④を吸引ろ過する^{注3)}
- ⑥1N-HF 10 mlを加え，吸引せずにフィルタ上で5 min間保持する
- ⑦所定時間保持した後，吸引ろ過し，さらに50 ml程度の新しい蒸留水を加えて酸を洗い流す
- ⑧清浄空气中で乾燥させる
- ⑨アセトントリアセチン法により透明化し，計数試料とする

注1 捕集条件は必ずしもこの限りではなく，捕集時間は捕集空気量と捕集空気流量によって決まる。

注2 ここで用いる蒸留水は物理的な清浄さが要求されるため，あらかじめ酸処理に用いるフィルタと同等のもので5回繰り返しろ過したものをを用いた。

注3 フィルタホルダおよび吸引濾過器は樹脂製のものをを使用すること。

4.5 まとめ

一般大気は作業環境に比べて，

- ①非石綿の繊維状粒子が多く存在し，
- ②石綿繊維濃度が低い

ため，計数試料作製に従来から用いられているろ過法をそのまま一般大気に流用すると種々の不都合が生じることから，一般大気用の試料作製方法の開発が必要となる。これらの不都合を解消するため，捕集方法には慣性を利用して粉じんを捕集するインパクト方式を採用した。また，誤計数のもとになる各種繊維状物質の除去には，熱および酸処理を採用した。

インパクト方式は適切な分離直径を定めれば微細粒子を捕集せず，多くの空気量をサンプルすることができるため都合がよいが，繊維状粒子の分離直径を求める方法は無い。そこで，繊維状粒子を回転円体と仮定した捕集理論を適用して分離直径を求める手法を用いてインパクトを設計した。Chrysotile，ガラス繊維，大気塵によってこのインパクトの

性能試験を行った結果、各段の繊維状物質の捕集効率は約50%となり、4段直列接続のインパクタにより総合捕集効率が94%程度得られることがわかった。ここで用いたインパクタの捕集空気流量は通常のろ過法の4倍大きく設定することができ、捕集時間の短縮が可能となった。

一方、熱処理により、家庭から放出され一般大気中に多く存在する合成繊維、植物性繊維、動物性繊維などの繊維状物質のほとんどを除去することができた。また、低濃度フッ化水素酸を用いることにより鉱物性繊維の一種であるロックウールおよびガラス繊維などが除去できた。

参考文献

- 1) 森義明：環境中のアスベストのサンプリングと分析法，環境技術，Vol.17，pp.43-46 (1988)
- 2) 高尾真一，田上四郎，櫻井利彦：分析電子顕微鏡による環境中のアスベストに関する研究（第1報），大気汚染学会誌，Vol.24，pp.214-226 (1989)
- 3) 栗原崇：アスベスト汚染の現状と対策，公害と対策，Vol.25，pp.971-978 (1989)
- 4) 本間克典，白井忠：MPS-3型パーティクルサンプラーによるアスベスト粉じんの測定，第6回エアロゾル科学・技術研究討論会予稿集，pp.176-178 (1988)
- 5) S.C. Stern, H.W. Zeller, and A.I. Schekman: Collection Efficiency of Jet Impactors at Reduced Pressures, *Industr. & Engin. Chemistry Fundamentals*, Vol.1, pp.273-277 (1962)
- 6) T. Strand: Inviscid-Incompressible-Flow Theory of Normal and Slightly Oblique Impingement of a Static Round Jet on the Ground, *J. of Aircraft*, Vol.4, pp.466-472 (1967)
- 7) 金岡千嘉男：慣性法による粒径測定技術，エアロゾル研究，Vol.2，pp.176-182 (1987)
- 8) W.E. Ranz and J.B. Wong: Impaction of Dust and Smoke Particles, *Industr. & Engin. Chemistry*, Vol.44, pp.1371-1381 (1952)
- 9) R.I. Mitchell and J.M. Pilcher: Measuring Aerosol Particle Sizes in, *ibid.*, Vol.51, pp.1039-1042 (1959)
- 10) 高橋幹二：基礎エアロゾル工学，養賢堂，pp.21-25 (1972)
- 11) 井伊谷鋼一：集じん工学，日刊工業，p.34 (1980)
- 12) 吉田英人，増田弘昭，井伊谷鋼一：カスケードインパクトの分離径の計算，粉体工学研究会誌，Vol.13，pp.15-17 (1976)
- 13) 井上義雄，加賀昭和，山口克人：石綿繊維の自動計数システムの開発に関する研究—第2報—カスケードインパクト，熱処理および酸処理を用いた試料作製，空気調和・衛生工学会論文集，Vol.57，pp.23-34 (1995)
- 14) 栢野聡：石綿繊維濃度の自動計測のための試料調整法に関する研究，大阪大学卒業論文，pp.9-26 (1990)
- 15) A.A. Hodgson: Chemistry and Physics of Asbestos, In *Asbestos*, eds. by L. Michaels and S.S. Chissick, John Wiley & Sons, New York, pp.76-78 (1979)
- 16) 環境庁：石綿・ゼオライトのすべて，(財)日本環境衛生センター，p.13 (1987)
- 17) 同上，p.5
- 18) 同上，p.6
- 19) 15)，pp.79-81
- 20) 日本化学技術情報センター：大気汚染物質レビュー「石綿」，日本化学技術情報センター，p.5 (1984)
- 21) 功刀雅長：無機材料，共立出版，pp.250-255 (1980)
- 22) 日本化学会編：化学便覧応用編，丸善，p.337 (1965)

- 23) 同上, pp.762-764
- 24) 例えば, 藤長紀雄: アスベストの適正な処理と正確な測定を求めて—石綿の迅速定性定量方法, PPM, pp.32-41 (1988)
- 25) 日本ダイオネクス: イオンクロマトグラフ分析法概説, 日本ダイオネクス, p.Ⅱ1-3 (1994)
- 26) 同上, p.Ⅱ7-9
- 27) 新海重行: 水ガラス中の珪酸の定量法について, 分析化学, Vol.2, pp.364-365 (1953)
- 28) 中村時定: 弗化物殊に氷晶石又は螢石等の珪素の定量, 工業化学雑誌, Vol.43, pp.50-51 (1940)

第5章 大気環境における石綿繊維濃度の測定

5.1 はじめに

大気中の浮遊石綿の発生源は、他の汚染物質に比べて複雑であるといわれている¹⁾。その原因の一つに石綿製品の製造過程からの発生がある。捕集装置の設置が義務づけられてはいるが一部は大気中に排出されたり、一旦捕集装置で捕集された石綿の処理など直接生産に関係しない作業が、大きな排出源になることもある。

さらに、石綿製品の使用過程が発生源になる。石綿製品の加工や使用は摩擦、切断、研磨など石綿が気中に放出されやすい方法でなされる。例えば、石綿を含む建材などの現場での使用は切断を伴い、また自動車のブレーキライニングやブレーキパッド（以下、ブレーキ等という）などの摩擦材は大半が熱で変質されてしまうが、その一部は繊維状石綿として放出される²⁾。ブレーキ操作が頻繁に行われる交差点周辺や高速道路の料金所周辺の石綿濃度はバックグラウンド濃度の3～5倍に達しているとの報告もある³⁾。特に、わが国におけるモータリゼーションの発展は全国津々浦々にまで行き渡り、本来周囲に石綿の発生源がない地域の石綿濃度、いわゆる石綿のバックグラウンド濃度の引き上げに大きく寄与していると考えられる。

一方、石綿を扱う工場の内部や境界周辺部あるいは吹き付け石綿が使用されていた建築物の解体現場等の石綿濃度は、労働安全衛生法及び大気汚染防止法等により測定が義務づけられている。また、諸外国においては疫学的調査・研究も古くから行われている⁴⁾。しかし、それ以外の一般環境においては環境庁がモニタリング^{5,6)}を実施しているが、一般環境に対する測定例⁷⁻¹³⁾は国内外ともまだ少ないのが現状である。

そこで、本論文で提唱する石綿繊維の自動計数システム AFACS の一般環境への適用例として、対象を自動車のブレーキ等を発生源とする石綿に限定した実測を行った。この実測は、指向性を持たせた粉じん捕集装置により道路の風上・風下位置で同時にサンプリングを行い、その石綿濃度差からブレーキ等を発生源とする石綿を抽出しようとするものである。測定は気象条件（風向・風速）に影響されるので、数回にわたり実施した。

本章では、その実測例について述べる。計数試料は第4章で述べた方法により作成し、第3章で述べた画像処理手法を用いた自動計数システム AFACS により石綿繊維を計数した。なお、従来法と比較するため、メンブランフィルタを用いたろ過法に依る試料も併用した。

5.2 測定方法

5.2.1 測定地点の概要

測定は、大阪府道道祖本摂津線（以下、対象道路という）北端部付近で実施した。図5-1に測定地点周辺の、図5-2にその近傍の概要を示す。

測定地点は、大阪府茨木市と箕面市の境界付近で、大阪大学吹田キャンパスの北部に位置する。北部に東西方向に国道171号線（以下、国道という）が走る。対象道路と国道

の交差点（茨木市清水）から南方約30mの地点で、対象道路を挟み東西2箇所（東側測定点：茨木市豊川3丁目（図5-2①で示す）、西側測定点：茨木市西豊川町（図5-2②で示す））の歩道部で測定を行った。対象道路は幅員約17m、4車線を有し、国道と万博周回道路の連絡道路として幹線道路ではないが交通量は比較的多い。また、清水交差点は三叉路であり、南から進入する車両は全て右・左折するため徐行するので、比較的ブレーキ操作が多い箇所である。なお、当地域は典型的な大都市近郊住宅地であり、測定地点北側の国道沿いには総合病院や池が、北東から南東側には飲食店、書店、大型パチンコ店、駐車場が、西側には駐車場、畑地、住宅地が存在する。しかし、測定地点周辺には多量に石綿を発生する石綿工場やビルの解体現場はない。図5-3に測定地点北側、図5-4に測定地点東側、図5-5に測定地点南側および図5-6に測定地点西側の風景を示す。

5.2.2 測定日と気象状況

測定は、石綿濃度と風速、風向および交通量の関係を調べるため、風向変動の少ない日を選定した。また、交通量の多少による影響を調べるために平日2回（測定1、2）、休日1回（測定3）の昼間に実施した。

測定日は全て晴であり、実測中の平均風速は測定順に1.4、2.7、1.6 m/s、平均気温は15.1、15.7、9.2℃、平均湿度は27.6、36.3、36.5%であった。

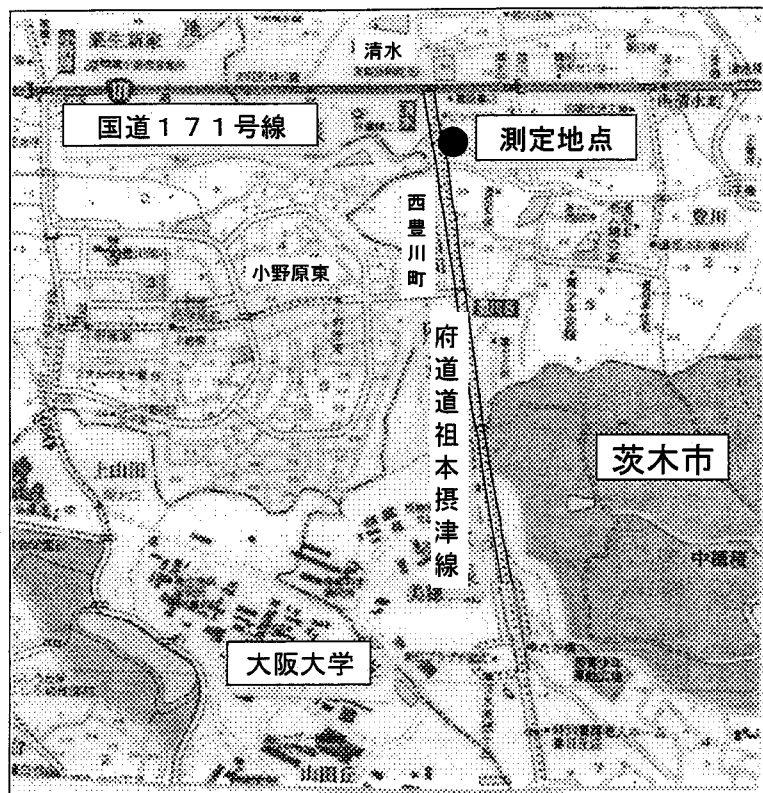


図 5-1 測定地点周辺の概要

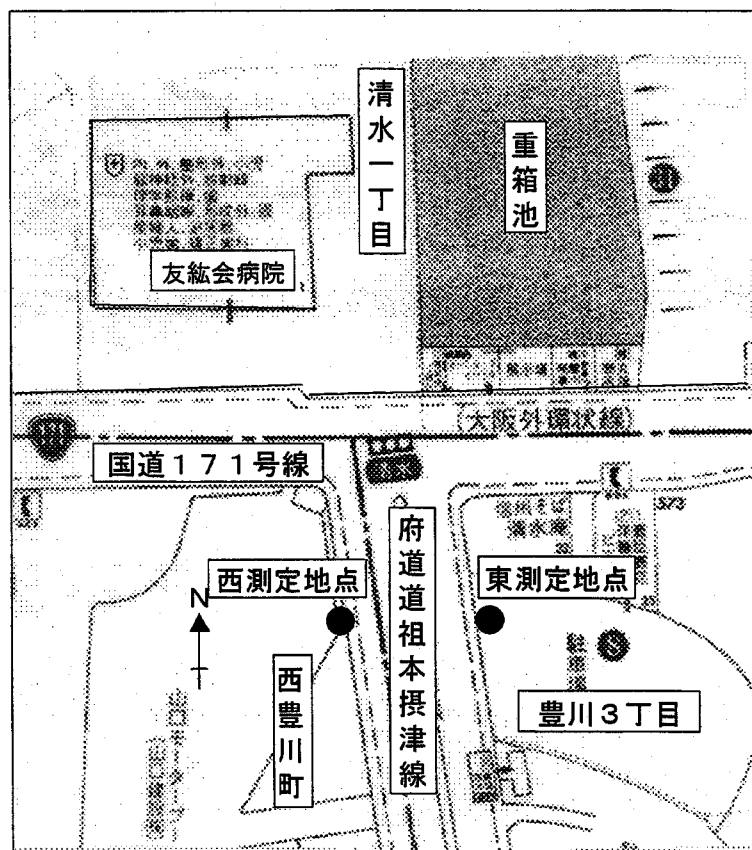


図 5-2 測定地点近傍の概要



図 5-3 測定地点北側

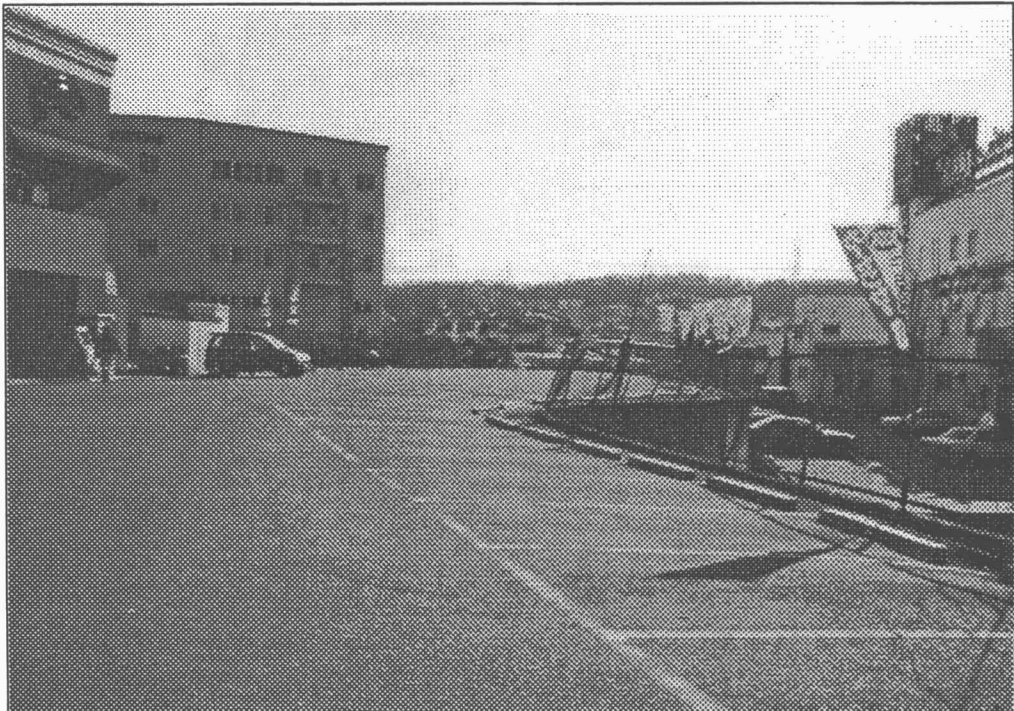


図 5-4 測定地点東側



图 5-5 测定地点南侧



图 5-6 测定地点西侧

5.2.3 石綿濃度測定

(1) 粉じん捕集装置

粉じん捕集には 4.2 節で示した 4 段カスケードインパクトを用いた捕集装置を使用した。吸引にはダイヤフラム式エアポンプ（イワキ製：AP240Z）を用い空気流量は 4.0 l/min、実捕集時間は 1 時間とした。なお、インパクト内の圧力は水銀 U 字管により測定した。捕集板には、あらかじめ除じんした白色ワセリンを薄く塗布した顕微鏡用カバーガラス（松浪硝子工業製：18 mm × 18 mm No.1）を用いた。図 5-7 に 4 段カスケードインパクトを用いた捕集装置を示す。

比較用試料は、同時にメンブランフィルタ法によりろ過捕集したものをを用い作製した。捕集方法は 2.2.1(3) に示したマニュアル法に準拠し、孔径 0.8 μm、フィルタ直径 47 mm の白色ニトロセルロース系メンブランフィルタ（東洋濾紙株式会社製：A080A047A）をオープンフェイス型フィルタホルダ（有効ろ過面積 13.5 cm²）に装着し、ダイヤフラム式エアポンプ（イワキ製 AP220ZN）により流量 1.0 l/min で 2 時間捕集した。図 5-8 にろ過法による捕集装置を示す。

(2) 試料作製

インパクト法を用いた場合 非石綿繊維を除去するため、前処理として 4.3 節で示した熱処理および酸処理を行った。熱処理では電気炉を用いて捕集粉じんを 450℃、90 min 加熱し、白色ワセリン、動・植物性および合成繊維を除去した。熱処理後の粉じんに 1 規定フッ化水素酸を用いて酸処理を行い、ガラス繊維やロックウールを除去した。石綿は孔径 0.8 μm、フィルタ直径 25 mm の白色ニトロセルロース系メンブランフィルタ（東洋濾紙株式会社製：A080A025A）とポリスルホン製のフィルタファンネル（Gelman Sciences 社製：有効ろ過面積 2.86 cm²）を用いてろ過捕集した。乾燥後、透明化を施し試料とした。なお、透明化はアセトン・トリアセチン法を採用した。

メンブランフィルタ法を用いた場合 5.2.3(1) で示したろ過法により集じんしたメンブランフィルタを二等分する。一方のフィルタをアセトン・トリアセチン法により透明化を施し、試料とした。他方は予備とする。

(3) 計数

自動計数 3.2 節で示す画像処理手法を用いた自動計数システム AFACS で、3.3 節の計数基準に従って計数した。計数すべき原画像は、位相差顕微鏡（ニコン製：XF-Ph-21）を用いて各試料ごとあらかじめ一定間隔で視野（ここでは 100 視野分）選択し、CCD カメラを通し画像メモリにデジタル画像として取り込み、グループ別に名前を付けて磁気ディスクに保存しておく。画像ごとの石綿繊維数とグループの総繊維数は計数結果としてファイルに記録され、全グループが計数されるまで繰り返し処理される。

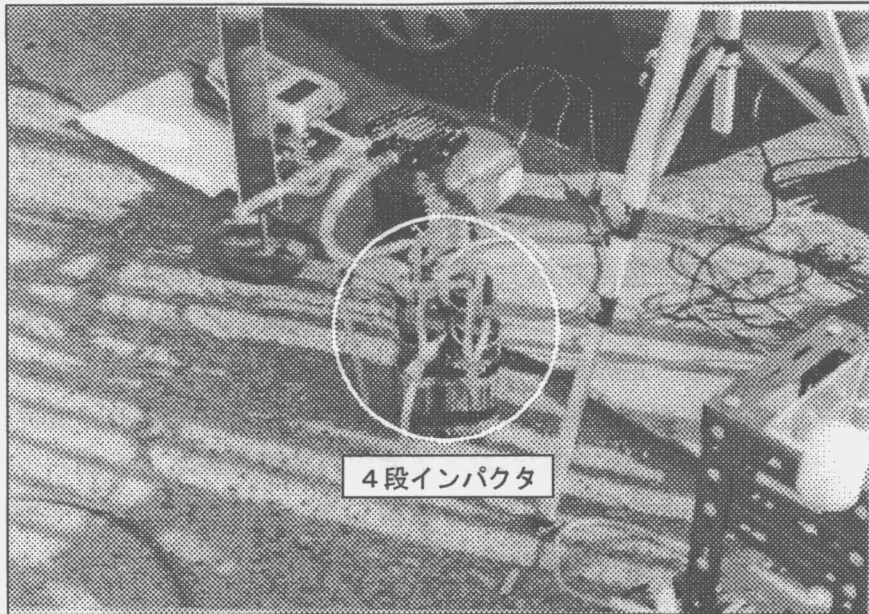


図 5-7 4段カスケードインパクト型捕集装置



図 5-8 ろ過型捕集装置

肉眼計数 肉眼計数は、自動計数と同じ位相差顕微鏡を用いて400倍の倍率で計数した。計数基準は、2.2.2 に示す AIA が定めた方法に準拠した。なお、計数視野は50視野とした。

5.2.4 風向風速測定

自動車のブレーキ等から発生する石綿濃度を測定するには、他の石綿の発生要素を除去する必要がある。そのため、道路の風上と風下の両側で濃度を測定し、その差から求める方法が考えられる。しかし、この方法は道路の両側に設置した捕集装置を風上と風下用に区別する必要があり、ある一定の風向時のみ捕集装置を作動させる工夫がいる。

本実験では、風上と風下側に1組ずつのサンプリング装置を設置し、風向計に指向性を持たせたスイッチ回路を設けて、風向が設定範囲内（基準風向±45度）の時のみ風上・風下用の捕集用ポンプが同時に作動するよう制御した。風向計のスイッチ回路は非接触型とし、30 cm/s 程度の微風速時の風向変動にも追従するように作製した。また、ポンプが作動する時間だけ作動する実捕集時間を測定するための時計を併設し、サンプリング時間はこの実捕集時間により決定した。図 5-9 に風向計を、図 5-10 に測定地点における測定装置の配置を示す。

風速はハンディタイプのデジタル風速計（日本科学工業製：クリモマスター 6511）により、毎秒1回のサンプリングで1分間の平均値をその測定開始時刻の風速とした。風向は風速測定時間内の最頻度風向をその時刻の風向とした。なお、風向・風速は15分ごとに測定した。

5.2.5 交通量測定

捕集期間中、測定対象道路を通行する車両をビデオ録画し、測定開始から30分ごとの車種別通過車両台数を計数し、1時間当たりの通過車両台数に換算した交通量を求めた。ブレーキ負荷は車体重量に依存すると考え、計数対象車種は小型車（乗用車および2トン未満の小型貨物車等）、大型車（マイクロバスを含むバスおよび2トン以上の貨物車等）、2輪車（軽車両を除く）の3分類とした。しかし、2輪車は全交通量の1%程度であり、また車両重量も自動車と比較してごく軽量であることから、ここでは無視することにした。

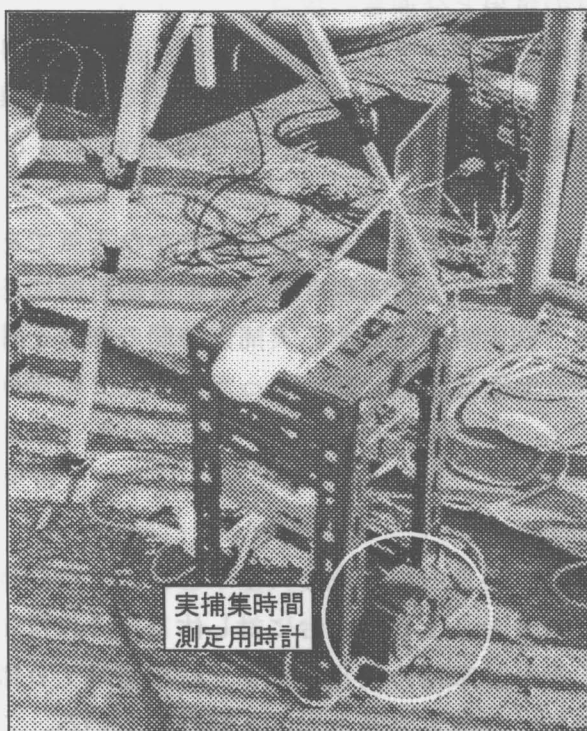


図 5-9 風速計

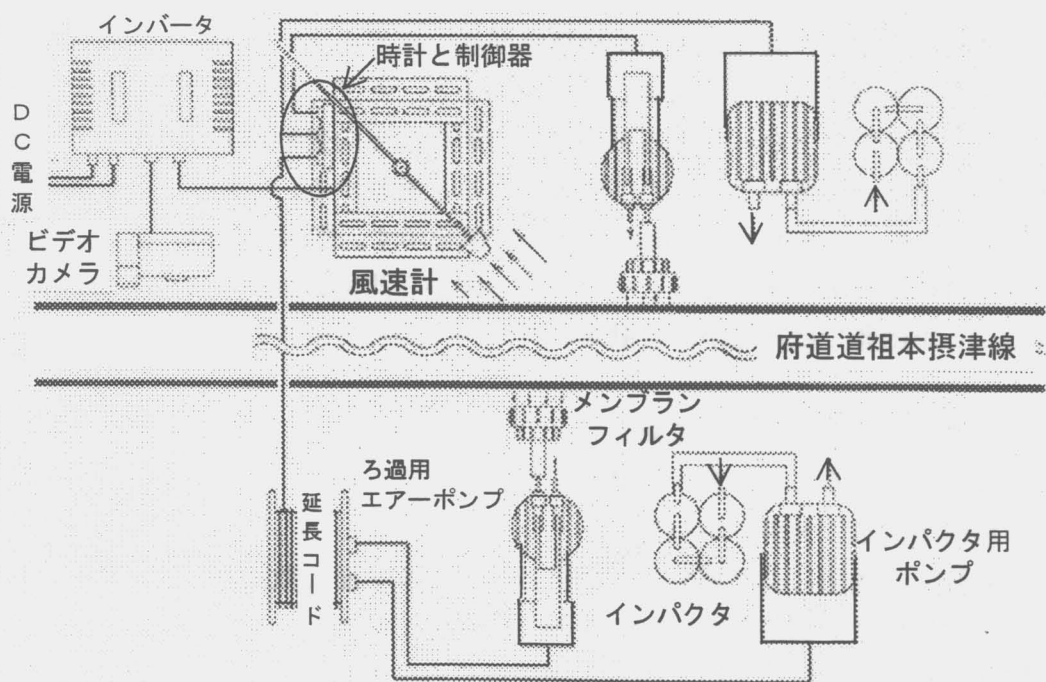


図 5-10 測定装置配置図

5.3 計数結果と考察

表 5-1 ~ 3 に各測定日の気象と交通量の数値データを示す。また、図 5-11 ~ 13 に各測定日における風速の時刻変化のグラフを、図 5-14 ~ 16 に各測定日における交通量の時刻変化のグラフを示す。測定 1 では、12時から17時まで測定を実施した。この間の平均風速 \bar{U} は 1.38 m/s、変動計数 CV (Coefficient of Variation) は 48.1% であった。同様に測定 2、3 のそれは各々 2.72 m/s、31.2%、1.66 m/s、38.9% となり、測定 2 がやや高い風速を示したが、他の 2 日はよく似た穏やかな天気であった。ただし、風向については、測定 1 の測定開始から 1 時間程度は、対象道路を横切る西よりの風が吹いたが、それ以降は北風に変化し、測定時間に対する実捕集時間の割合を捕集時間効率とすると、測定 1 のそれは 25~40% 程度と低い値になった。測定 2 の風向は測定中ほぼ西風で安定し、捕集時間効率も 66.7~80.0% と高い値を示した。測定 3 の風向は午前中の捕集時間効率が 80.0% と安定していたが、午後から主として西風であったが、風向変動が激しくなり捕集時間効率は 57.1~52.1% となった。

一方、交通量については、平日の小型車と大型車を合わせた交通量（以下自動車の交通量という）は平均が 1606 台、1668 台に対し休日のそれは 1505 台となり、目立った大きな差はない。しかし、車種の割合が平日では小型車 70 数%、大型車 20 数% に対し休日では小型車 98%、大型車 2% と大きく変化している。これは大都市近郊住宅街という地域的な影響が現れ、休日で大型車、特に営業用の大型貨物車、が平日の 1/10 に減少し、その分を補償するように休日のみ運転のマイカーが増加し、自動車の交通量としては平日と休日の差はみられなかった。時刻による交通量の変化をみると、平日の午前中は計測していないので不明であるが、昼食時に減少し、時間の経過と共に若干増加の傾向がある。休日は 10時から17時にかけてほぼ一定の増加がみらる。

表 5-4 に測定 1 ~ 3 の測定環境と石綿繊維濃度の結果を示す。図中の石綿濃度は、風下側と風上側の石綿繊維濃度の差を表したものである。ただし、測定 3 の 2 回目の測定における石綿濃度が負の値となっているが、この時間帯は風向変動が激しくなり風下側と風上側の濃度差がほとんど無くなったのが原因であると推察する。

図 5-17 に風速、交通量と石綿繊維濃度の関係を示す。同図は横軸に風速、奥行き方向に交通量、縦軸に石綿繊維濃度をとった。この図から測定回数が少なく定量的に明快な結果を得ることが困難ではあるが、自動車のブレーキから排出される石綿繊維の大気中濃度は、

①風速が増加するにしたがって減少し、

②交通量が増加するにしたがって増加する、

定性的な傾向があることが分かった。

また、同時にろ過法により捕集した試料は、フィルタ面に微細な非石綿粉じんが多量に存在したため、計数が出来なかった。このことから、従来から作業環境における石綿繊維濃度測定用試料作製に用いられているろ過法をそのまま一般大気中の石綿繊維濃度測定用試料作製に適用するには限界があることが分かった。

表 5-1 気象データと交通量データ (測定1: 平日)

時刻	風速 [m/s]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向	交通量 [台/h]		
					小型車	大型車	合計
12:00	1.73	12.4	36.6	西	1110	410	1520
12:15	0.44	12.3	33.8	北東			
12:30	0.81	13.1	33.6	北東			
12:45	2.23	13.6	33.0	西			
13:00	0.54	16.5	27.1	西	1030	314	1344
13:15	2.13	13.2	30.2	北西			
13:30	1.65	16.8	24.9	北			
13:45	1.96	14.6	27.0	北			
14:00	2.83	14.5	30.1	北	1176	458	1634
14:15	0.70	14.3	30.6	北			
14:30	1.55	15.8	25.0	北			
14:45	1.74	19.6	19.9	北			
15:00	1.45	17.7	21.9	北	1206	522	1728
15:15	0.96	15.2	24.7	北			
15:30	0.57	17.2	22.3	北			
15:45	2.19	15.8	25.9	北			
16:00	1.59	13.3	30.7	北	1320	484	1804
16:15	1.01	13.5	—	北			
16:30	0.98	14.7	26.5	北			
16:45	0.40	20.5	21.4	北			
17:00	1.53	13.2	27.1	北			
平均	1.38	15.1	27.6		1168	438	1606

表 5-2 気象データと交通量データ (測定 2 : 平日)

時刻	風速 [m/s]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向	交通量 [台/h]		
					小型車	大型車	合計
12:15	1.06	14.3	40.7	北			
12:30	2.40	16.2	37.7	北西	1220	250	1470
12:45	2.93	16.6	33.4	西			
13:00	3.25	13.9	42.7	西	1128	310	1438
13:15	3.88	17.9	34.6	西			
13:30	4.29	17.2	34.0	西	1266	438	1704
13:45	2.53	18.5	29.0	西			
14:00	3.40	18.3	31.8	西	1321	462	1783
14:15	3.72	17.8	31.6	西			
14:30	1.92	20.8	27.4	西	1329	589	1918
14:45	0.83	18.8	29.0	西			
15:00	2.82	16.7	33.2	西			
15:15	3.41	14.1	38.8	西			
15:30	2.95	14.8	36.8	西			
15:45	2.44	12.5	43.1	西			
16:00	1.84	12.1	43.2	西			
16:15	2.42	14.2	38.2	西	1320	342	1662
16:30	2.49	12.9	42.4	西	1450	252	1702
16:45	3.16	14.5	34.5	西			
17:00	2.67	11.4	44.5	西			
平均	2.72	15.7	36.3		1288	380	1668

表 5-3 気象データと交通量データ (測定 3 : 休日)

時刻	風速 [m/s]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向	交通量 [台/h]		
					小型車	大型車	合計
10:00	0.71	7.1	37.8	西	1082	22	1104
10:15	1.57	6.9	40.3	西			
10:30	2.49	7.8	36.2	西	1094	38	1132
10:45	1.10	7.6	39.9	西			
11:00	1.87	7.6	40.8	西	1146	36	1182
11:15	1.00	7.3	41.3	西			
11:30	1.32	8.4	39.5	西	1340	40	1380
11:45	1.89	7.0	43.5	西			
12:00	2.07	7.8	42.3	西	1269	27	1296
12:15	1.21	7.9	39.7	西			
12:30	1.69	8.9	37.4	西	1340	24	1364
12:45	1.62	9.4	35.6	西			
13:00	2.07	9.8	35.4	西	1404	38	1442
13:15	2.15	10.3	32.6	西			
13:30	1.76	10.6	33.8	西	1642	28	1670
13:45	2.44	9.4	36.8	西			
14:00	1.95	12.2	27.6	西	1589	51	1640
14:15	3.38	10.6	35.0	西			
14:30	1.51	12.3	29.3	西	1674	22	1696
14:45	2.60	11.7	29.4	西			
15:00	1.75	11.2	30.1	西	1760	22	1782
15:15	2.69	11.2	31.5	西			
15:30	1.09	9.9	34.6	西	1708	20	1728
15:45	0.91	7.8	34.9	西			
16:00	1.36	8.4	38.5	西	1746	27	1773
16:15	1.00	8.7	36.4	西			
16:30	0.97	8.9	37.9	西	1858	21	1879
16:45	1.15	8.8	37.3	西			
17:00	0.71	8.4	38.4	西			
平均	1.66	9.1	36.3		1475	30	1505

表 5-4 測定結果

測定回	測定時間	実捕集時間 [min]	風速 [m/s]	風向	交通量 [台/h]			石綿繊維濃度 [本/l]	
					小型	大型	合計		
測定 1	1	12:00-13:45	45	1.45	北	1075	369	1440	23.8
	2	14:05-17:00	45	1.37	北	1236	489	1725	29.4
平均				1.40		1172	444	1620	26.6
測定 2	1	12:30-14:00	60	3.24	西	1205	333	1538	1.7
	2	14:15-15:30	60	2.72	西	1306	469	1775	12.0
	3	15:45-17:00	60	2.50	西	1418	275	1693	6.1
平均				2.85		1310	359	1669	6.0
測定 3	1	10:00-11:15	60	1.55	西	1100	31	1131	6.0
	2	11:25-13:10	60	1.70	南西	1320	31	1351	4.0
	3	13:20-15:10	60	2.20	西	1625	33	1658	11.1
	4	15:20-17:15	30	0.94	南	1757	22	1779	6.7
平均				1.59		1451	29	1480	8.2

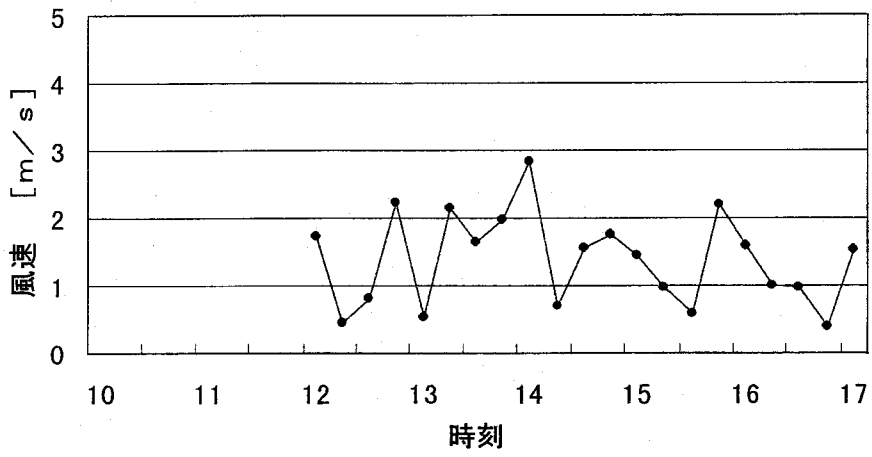


図 5-11 風速の時刻変化 (測定 1 : 平日)

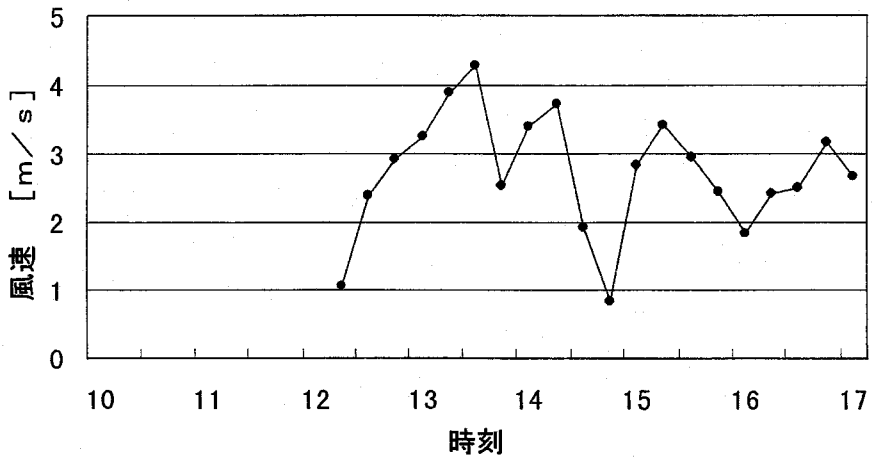


図 5-12 風速の時刻変化 (測定 2 : 平日)

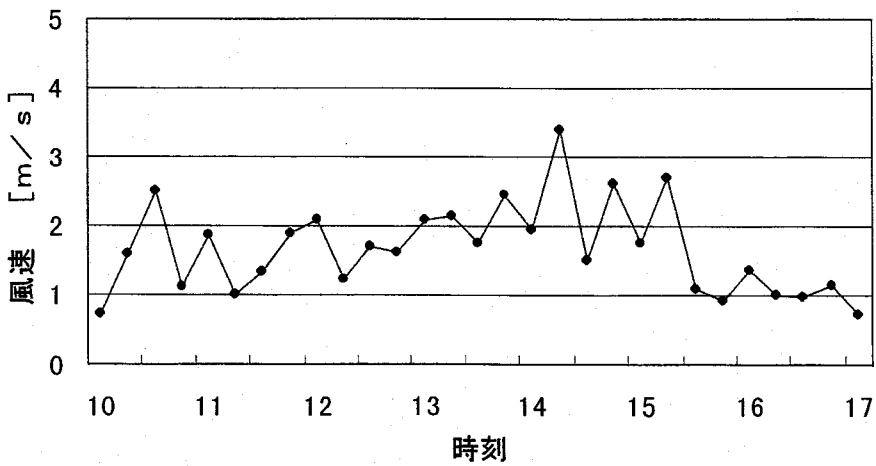


図 5-13 風速の時刻変化 (測定 3 : 休日)

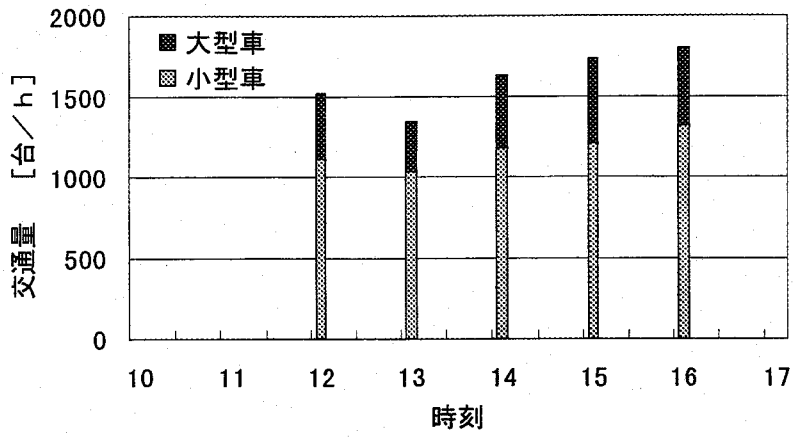


図 5-14 交通量の時刻変化 (測定 1 : 平日)

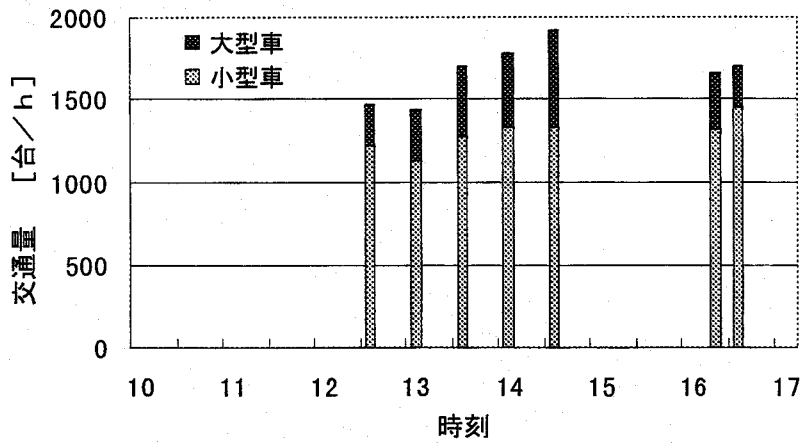


図 5-15 交通量の時刻変化 (測定 2 : 平日)

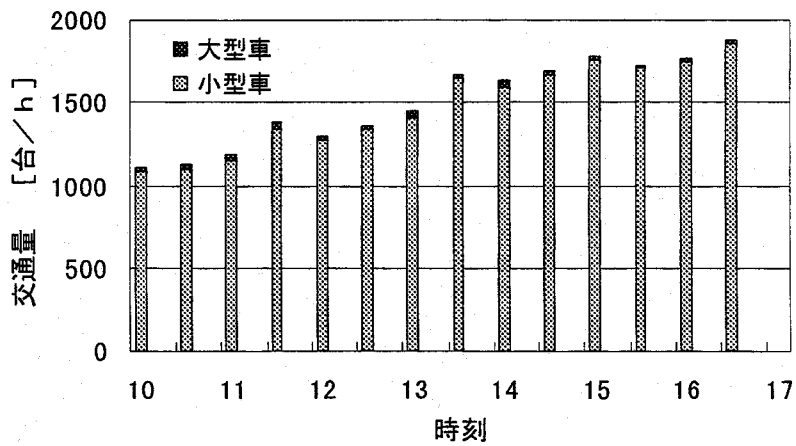


図 5-16 交通量の時刻変化 (測定 3 : 休日)

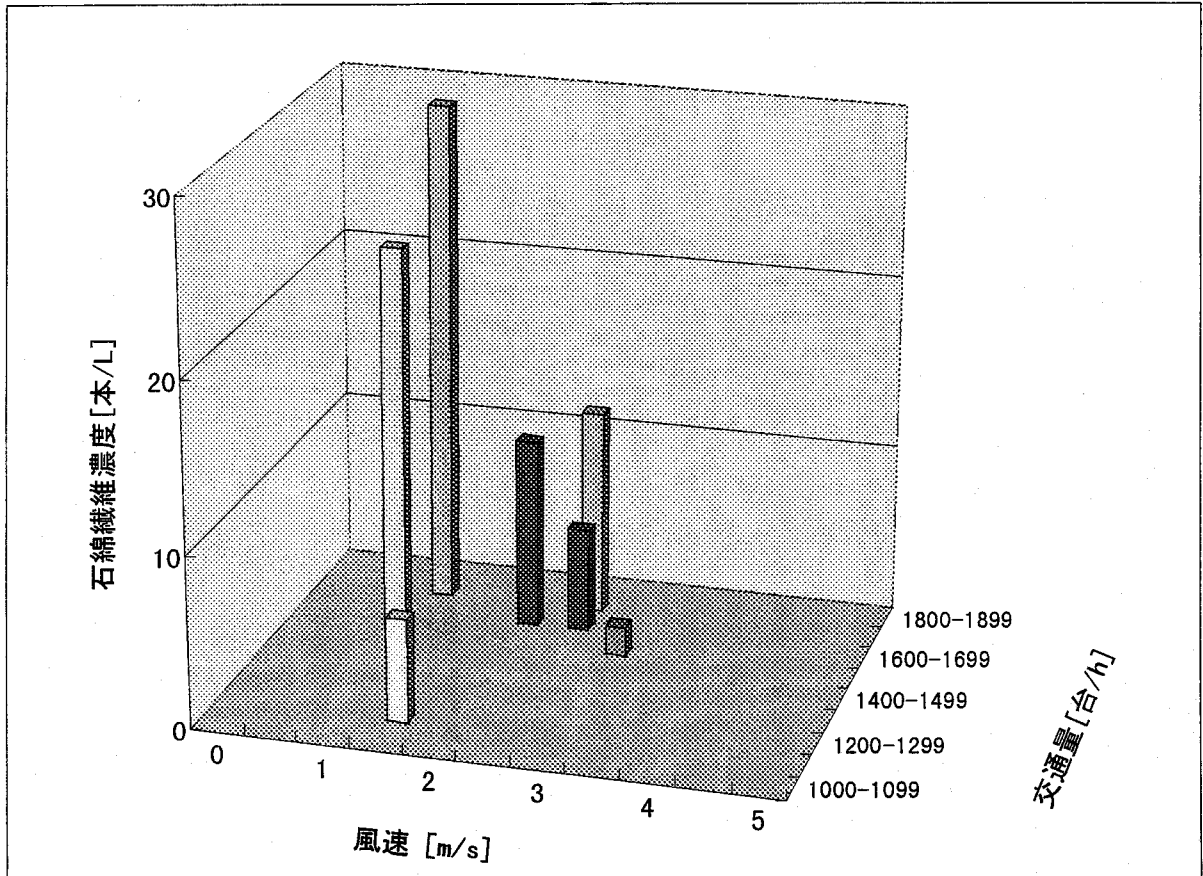


図 5-17 風速，交通量と石綿繊維濃度の関係

5.4 まとめ

本章では、AFACS およびインパクト法を用いた一般大気用試料作製法の有用性を調べることを目的として、自動車のブレーキから放出される石綿繊維の大気中濃度の実測を実施した。測定地点は、比較的ブレーキ操作を頻繁に行う必要がある国道171号線とT字に交差する大阪府道道祖本摂津線北詰とした。測定項目は自動車から放出された石綿繊維濃度、気象条件として風速、風向、および自動車の交通量とした。自動車以外から発生した石綿繊維を除去するため、目的道路の両側歩道に測定風向範囲のときのみ作動するように制御した捕集装置を1組ずつ設置し、風下側と風上側の石綿繊維濃度の差を求めた。試料作製には4段インパクト型捕集装置を用いることにより多量の空気量から微細粉じんを除去し、併せて熱および酸処理により一般大気に含まれる非石綿の繊維状物質を除去することにより、低濃度の石綿繊維を抽出した。併せて従来から用いられているろ過法による試料作製も行った。風速はハンディタイプのデジタル風速計により測定し、風向計は30 cm/s程度の風速の風向変動を捕捉できるものを作製し使用した。交通量はビデオカメラで測定地点を通過する車両を撮影した後、単位時間当たりの小型車、大型車に分類計数し車両数として交通量を測定した。測定日は平日2日、休日1日の昼間とした。

その結果、気象条件は測定中の平均風速が約1.4～2.7 m/s、一部の時間帯を除いて風向の変動も穏やかであった。平均交通量は1500～1670台/hであり、平日の小型車：大型車の割合は約75：25であったが、休日のそれは約92：2となり車種構成が大きく変わった。石綿繊維濃度は測定1～3の平均が各々26.6, 6.0, 8.2本/lとなった。風速、交通量と石綿繊維濃度の関係をみると、①風速の増加にしたがって石綿繊維濃度は減少し、②交通量の増加にしたがって石綿繊維濃度は増加する、ことが分かった。また、従来のろ過法による試料作製法を一般大気にそのまま適用するのには限界があることが確認され、インパクト法と熱・酸処理を併用する試料作成方法は一般大気用試料作製法として有用であることが分かった。

参考文献

- 1) 環境庁大気保全局大気規制課監修：アスベスト排出抑制マニュアル（増補版），ぎょうせい，p.53(1998)
- 2) 同上，pp.59-70
- 3) 木村菊二：アスベストと環境問題，労働の科学，Vol.42，pp.4-13(1987)
- 4) e.g.,Doll,R.: Mortality from Lung Cancer in Asbestos Workers, *Brit. J. Industr. Med.*, Vol.12, pp.81-86(1955)
- 5) 環境庁大気保全局大気規制課監修，アスベスト排出抑制マニュアル（増補版），ぎょうせい，pp.72-151(1998)
- 6) 環境庁：阪神・淡路大震災に伴う大気環境モニタリング調査等の実施結果について，環境庁，pp.1-13(1995)
- 7) 森義明，神浦俊一，寺南芳一，田中正宣：立地特性別アスベスト環境濃度調査，大阪市環科研報告，Vol.44，pp.24-28(1981)
- 8) 森義明，寺南芳一，岡本章良，神浦俊一，田中正宣：立地特性別アスベスト環境濃度調査（Ⅱ），大阪市環科研報告，Vol.44，pp.40-44(1981)
- 9) 高尾真一他：分析電子顕微鏡による環境中のアスベストに関する研究（第1報），大気汚染学会誌，Vol.24，pp.214-226(1989)
- 10) 斎藤貴：主要幹線道路における交通機関を発生源とするアスベスト粉じん濃度のモニタリング，資源環境対策，Vol.32，pp.1055-1059(1996)
- 11) e.g.,Alste,J. et al.:Airbone Asbestos in the Vicinity of a Freeway, *Atmos. Environment*, Vol.10, pp.583-589(1976)
- 12) P.F. Holt and D.K. Young: Asbestos Fibers in the Air of Towns, *Atmospheric Environment*, Vol.7, pp.481-483(1973)
- 13) L. Bruckman and R.A. Rubino: Monitored Asbestos Concentrations in Connecticut, *J. Air Pollution Control Association*, V.28, pp.1221-1226(1978)

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

近年、一般大気中における石綿濃度の規制も、低濃度・長期間ばく露に対する健康リスクの概念を導入する傾向にあることは、本論文の冒頭でも述べた。このように、大気中浮遊石綿粉じんの低い濃度範囲を対象として高精度でかつ安定的に測定するには、従来の作業環境、換言すれば比較的高濃度を対象としたサンプリング手法では困難であり、一般環境を対象とした新たなサンプリング手法の開発が必要となってきた。また、計数者のもつ計数基準に主観が大きく作用したり、肉体的負担が過大にかかるため計数結果が大きく変動する肉眼計数に代わり、計数結果の信頼性がより高い計数の自動化が要求されている。

本論文は、以上の観点から、大気中浮遊石綿粉じん濃度に対する一般環境に適したサンプリング法ならびに自動計数システムの開発は重要であると考え、サンプリング手法には慣性法を用いたカスケードインパクトによる捕集法を、計数試料作製には熱・酸処理を併用する方法を、また計数の自動化には画像処理手法を用いた自動計数システム AFACS を開発し、検討を行った結果をまとめたものである。以下に各章ごとの概略と成果を述べる。

第1章1節では本研究の背景として、石綿の現状を産業や医学的立場からみた「社会的な関わり」と労働環境や一般環境からみた「空気環境からの関わり」について述べた。2節では「作業環境」と「一般環境」における石綿の濃度測定法の現状を述べ、現在指摘されている測定法の問題点を明らかにすることにより、測定法の改良点を探った。3節では本論文の目的と構成について述べている。

第2章は、「作業環境測定法」の定めによる肉眼計数による石綿の濃度計測法の概要および肉眼計数機関間のクロスチェックについて述べた。第2節では、従来から石綿計数法として用いられてきたろ過法を用いた試料作製法、国際石綿協会 (AIA) が示す位相差顕微鏡 (PCM) を用いた肉眼計数法および石綿判定基準を紹介した。第3節では、複数の肉眼計数者間で同じ顕微鏡視野内の同じ対象物を同じように判定しているか否かを調べるため、各計数機関間のクロスチェックを行った結果を示した。その結果、計数値の最大と最小の比は約5:1となり、従来から指摘されている計数値の信頼性の欠如を確認した。さらに、計数条件を満たしているものを石綿とあるいは計数条件を満たしていないものを非石綿として正しく判定しているか否かを調べた。ここでは、真の石綿は不明なので、半数以上の機関が石綿と判定したものを真の石綿と見なした場合と対象物の写真を直接測定した結果が AIA の計数基準を満たしているものを真の石綿と見なした場合の2通りの正解率を求めた。その結果前者の正解率の平均は約78%、後者の正解率は約64%となった。また、2計数機関間において、どちらかの計数機関が石綿と判定した計数値に対する両者がともに石綿と判定した計数値の割合を一致度係数と定義し、各計数機関間の一致度係数を調べた結果、最大で高々約50%にしかならず、計数機関が異なれば必ずしも同じ対象物を石綿と判定し計数しているとは限らないことが明らかとなった。また、肉眼計

数では繊維の直径が過大評価される傾向があり計数者の主観が計数基準に大きく影響することが分かった。

第3章は、AFACS のハードとソフトの概要を示し、AIA が石綿判定要領として提示している図を用いて AFACS の性能評価結果について述べた。第2節では AFACS の機器構成を、第3節では AFACS が用いた計数基準を示した。第4節では AFACS のアルゴリズム全体を包括的に述べ、第5節では照明強度決定法や画像サンプリングなど AFACS の手動操作部分について述べている。第6節では AFACS の処理過程ごとのアルゴリズムについて、処理順を追って説明した。第7節では AFACS のアルゴリズムの妥当性と性能を AIA が示した単繊維、枝分かれ繊維、絡まった繊維、粒子が付着している繊維についての図を用いて調べ、評価した。その結果、出現頻度が低い極一部の繊維については誤計数が見受けられたが、大多分の繊維については妥当な計数値を示し、計数アルゴリズムは妥当であると判定した。また、第2章で行ったクロスチェックを AFACS にも適用した結果、石綿繊維の計数値は肉眼計数機関間の中位値となり、過半数の計数機関が計数した対象物を真の石綿とみなした場合と対象物の写真を直接測定した結果が AIA の計数基準を満たしているものを真の石綿と見なした場合の AFACS の正解率は共に約70%となった。以上の結果を総合して、AFACS は石綿の自動計数システムとしては十分な性能を有するものであると判定した。

第4章は、一般環境用としての試料作製方法について述べている。第2節ではろ過法に代わる慣性法を用いた粉じん捕集について、繊維状の石綿を回転だ円体と仮定しノズルの分離直径を求めるための捕集理論計算を試みた。理論計算の結果を用いて捕集装置を試作し、実験によって捕集効率を求めることにより、石綿粉じんの捕集装置を直列4段構成と決定した。この捕集装置は、処理空気流量を40 l/min に設定するよう設計したので従来のろ過法の処理空気流量に対して4倍の流量を有し、サンプリング時間を1/4に短縮できる。また、一般環境中に多量に存在し計数を妨害するような微小粒子を捕集しないように設計しているので、ろ過法に比べてクリアな試料を得ることが確認できた。第3節では、試料作製法について述べている。繊維状物質を石綿と判定してほぼ間違いない作業環境で用いられている計数基準をそのまま一般環境の場に適用するため、大気中に浮遊する非石綿繊維を予め除去した計数試料が要求される。そこで、石綿の耐熱性と耐酸性を考慮し、合成繊維や動植物繊維を熱処理により除去し、ガラス繊維やロックウールなど耐熱性を有する鉱物性繊維をフッ化水素酸による酸処理によって除去した。ただし、フッ化水素酸により除去されない鉱物質に関してはこの限りではない。また、処理後の粉じんをろ過面積の小さなフィルタに捕集することにより、試料中の石綿繊維の高密度化を図った。熱処理により石綿が破壊されていないかどうかは、熱処理前後の顕微鏡観察により、また酸処理のそれは顕微鏡観察、重量の変化およびイオンクロマトグラフによる流出成分の分析により調べた。その結果、石綿の形態は破壊されておらず、熱処理と酸処理は非石綿繊維を除去する手段としては有効であることを確認した。

第5章では、自動車のブレーキライニングやパッドから大気中へ放出される石綿を対象とした濃度の実測を行った結果を述べている。測定場所は大阪大学吹田キャンパス近郊の

交差点とし、道路の両側端にインパクト捕集装置を設置し、予め設定した風向時のみ捕集装置を作動させることにより道路の風上・風下における粉じん捕集を行った。自動車から放出される大気中の石綿濃度は、直接測定することが困難であるため、風下と風上における濃度差をとることにより求めた。また、石綿濃度以外に通過車両数と風速を測定し、それらの相互関係を求めた結果、風速が大きいほど濃度が低く、通過車両が多いほど濃度が増加する一般的な知見を得た。同時にろ過法を用いた試料も作製したが、計数試料には不適當なものとなり計数はできなかった。

以上、本研究で得られた結果を述べた。従来から作業環境用に用いられてきたろ過法による試料作製法を石綿濃度が低い一般環境用にそのまま援用するには無理があり、一般環境用に向けた新たな手法を開発する必要性を指摘し、その手法の一つとしてカスケードインパクトによる捕集装置と熱・酸処理を併用した試料作製法を提案し、実用可能であることを示した。この方法は一般環境用のみならず作業環境用としても用いることができ、必要がなければ酸処理を省略することも可能である。この方法の特徴は大きな空気流量を設定できることにあり、吸引ポンプの容量が許せばさらに大きくすることも可能である。また、石綿の自動計数システムにおいては過去いくつかの手法が用いられてきたが、従来からの肉眼計数による計数データからの継続を考慮すると、肉眼計数の計数基準に準拠できる画像処理手法を用いるのが最適であると考え、マイコン支援による AFACS を開発し、その実用性を示した。近年の技術の進歩によりマイコンや画像処理ボードは十年ほど前のミニコンより高速で作動し、また価格の低下が著しく、計数自動化システムの導入は年を追って容易になってきている。

6.2 今後の課題および展望

インパクトを用いた捕集装置は、大気環境での実測に供する機会が多いと思われ、金属製で堅牢かつ小型・軽量化を図る必要がある。また多段ノズルの圧力損失に十分対応できる大流量吸引ポンプの小型化も重要な改良要素である。

一方、AFACS に限らず画像処理を用いた自動計数システム一般には、質の良い画像を得ることができるか否かが画像の解析処理に大きく影響を及ぼす。特に、AFACS においては顕微鏡像を対象としているため、顕微鏡の被写体深度が浅く、焦点の合う距離が非常に短いため、稀に深さ方向に波打った繊維状物質は位置によってぼけた画質の悪いものになる。これを防止するには、深さ方向に数断面、つまり三次元的な画像から計数画像を作製する必要がある。その他、ハード・ソフト両面からの計数精度向上のためのシステムアップも必要であるが、今後の課題とする。

Appendices

Appendix A 2値化しきい値選択法の比較

以下に、正規分布法、判別分析法およびニューラルネットワーク法の概略を述べ、その性能を比較検討する¹⁾。

A.1 2値化しきい値選択法の概略

A.1.1 正規分布法

正規分布法の概略は第3章3.6.2に述べているので、ここでは省略する。

A.1.2 判別分析法²⁾

しきい値 k で分割するとき、しきい値のよさを判別分析で用いられる規準（分離度） η を導入して評価し、評価量を最大とするしきい値を最適しきい値とする考え方に基づく。 η はクラス間分散 σ_B^2 と全分散 σ_T^2 の比で表され、 k_{\max} を最大輝度とすると式(A-1)により定義される。

$$\eta(k) = \frac{\sigma_B^2(k)}{\sigma_T^2} \quad (\text{A-1})$$

ただし、 $0 < k < k_{\max}$

σ_T^2 はしきい値とは無関係に画像により一定値をとるため、 η は $\sigma_B^2(k)$ により一義的に決まる。画像の全平均輝度を μ_T 、輝度 k までの輝度分布の0, 1次モーメントを各々 $\omega(k)$ 、 $\mu(k)$ とすると、 $\sigma_B^2(k)$ は式(A-2)で求められる。

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k) [1 - \omega(k)]} \quad (\text{A-2})$$

したがって、 $\sigma_B^2(k)$ が最大となる k は η に最大値を与えるため、その k が判別分析法を用いた場合の最適しきい値 k_{DA} となり、式(A-3)で与えられる。

$$k_{DA} = \max_{1 \leq k < k_{\max}} \sigma_B^2(k) \quad (\text{A-3})$$

ここで、 $\max(f(x))$ は $f(x)$ を最大にする x を返す関数とする。

A.1.3 ニューラルネットワーク法

ニューラルネットワーク法は、ニューロンに相当する各ユニット間の結合方法や学習方法により、いろいろなモデルが考案されている。本論文では、図 A-1 に示す階層ネットワークの一つである入力層、隠れ層、出力層からなる3層パーセプトロン (Perceptron)

により構成したモデル³⁾を用いた。なお、学習の負担を軽減させるため、入力層の各ユニット k に輝度 k を対応させ、以下の方法で求めた値 $p^*(k)$ を入力信号 $i(k)$ とした。

まず、式(A-4)で示すように、2値化対象画像の輝度 k に対する度数分布 $n(k)$ （輝度が k である画素の数）の最大度数 n_{\max} に対する相対度数 $p(k)$ を求める。

$$p(k) = \frac{n(k)}{n_{\max}} \quad (\text{A-4})$$

次に、最大相対度数 p_{\max} に対応する輝度を $k_{p_{\max}}$ とし、あらかじめ任意に設定した基準輝度 k^* に合わせるための分布の横方向のシフト量 Δk を、

$$\Delta k = k^* - k_{p_{\max}} \quad (\text{A-5})$$

で求める。 $p(k)$ と Δk を用いると、最大相対度数を示す輝度を k^* に合わせた相対度数分布 $p^*(k)$ は、式(A-6)で求まる

$$p^*(k) = p(k - \Delta k) \quad (\text{A-6})$$

出力層のユニットも同様に、出力ユニット k に輝度 k を対応させ、出力層からの出力 $o_{\max}(k)$ のうち、最大出力 o_{\max} を示す出力ユニットに対応する輝度を最適しい値 k_{NN} とした。

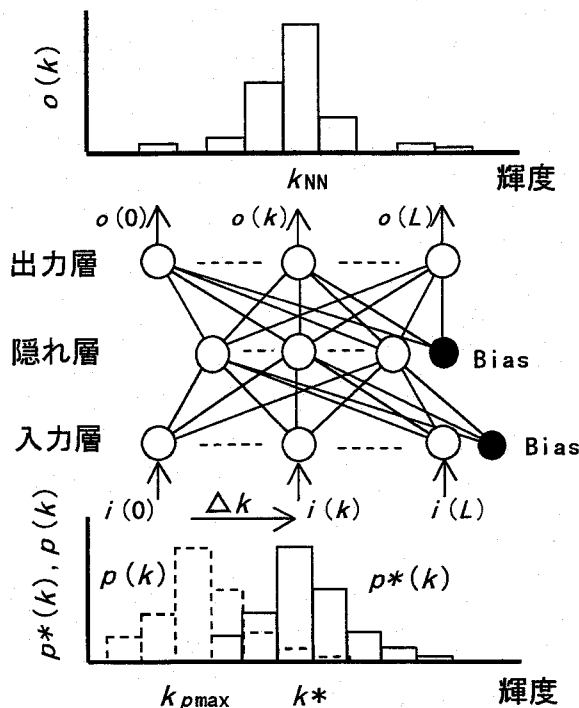


図 A-1 3層パーセプトロンモデル

本論文では、学習画像に対しあらかじめ試行錯誤により2値化処理を行い、2値画像上で発生するごま塩雑音の程度や繊維状粒子の切断状態などを考慮することにより、教師信号 k_T を主観により決め、学習時にはそのしきい値に対応するユニットに1、その他のユニットに0を与えた。学習には、誤差逆伝搬法 (Back Propagation) ⁴⁾ を用いた。

A.2 しきい値選択性能の比較検討

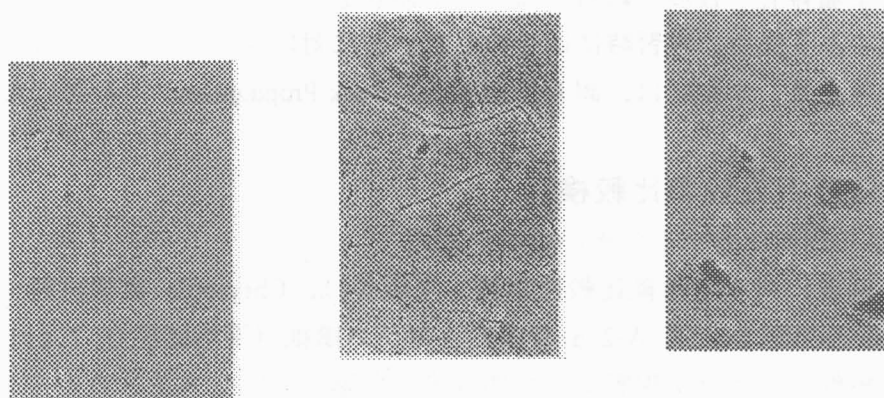
A.2.1 繊維状粒子画像に対するしきい値選択能力

繊維状粒子画像に対する性能比較に準備した画像は、Chrysotile 標準試料 (日本作業環境測定協会製, JAWE121, 図 A-2(a)参照) とガラス繊維 (平均直径 $0.7 \mu\text{m}$, 図 A-2(b)参照) の顕微鏡像から各々7視野分、照明強度3段階の合計 $2 \times 7 \times 3 = 42$ 枚である。この内5視野分 $2 \times 5 \times 3 = 30$ 枚をニューラルネットワーク法の学習用画像として、また $2 \times 2 \times 3 = 12$ 枚を性能比較用画像として用いた。

ニューラルネットワーク法では、入力層、隠れ層、出力層のユニット数をそれぞれ64, 10, 64としたモデルを採用した。学習の収束判定は出力誤差の自乗和で行い、判定基準は0.01とした。また、収束性は画像内容、教師信号、隠れ層のユニット数等に依存するが、ここで用いた画像では隠れ層のユニット数が5以下のときは学習を30,000回繰り返しても収束せず、10以上のときは15,000~18,000回の学習で収束した。

学習における教師信号 k_T と同じ方法で選択した性能比較用画像に対する最適しきい値 k_{DT} と正規分布法、判別分析法、ニューラルネットワーク法から得られた各最適しきい値 k_{ND} , k_{DA} , k_{NN} を表 A-1 に示す。同表中の最適しきい値は、値が低いほど対象物は太く抽出され、背景部にノイズが多く発生する。反対に値が高いほど対象物は細くなり、切断される可能性が高くなる。 k_{ND} は一部において k_{DT} より若干高めの値となり、対象物が切断される場合も見受けられるが、大部分は安定的にほぼ妥当な2値画像を与えており、細い繊維状粒子を含む顕微鏡画像などの2値化しきい値選択法としては十分有効であることが分かった。 k_{DA} は全ての性能比較用画像に対して k_{DT} より低めの値をとり過ぎた。ここで対象としたような背景の面積に対する対象物の面積割合が小さな画像に対しては、汎用性が高いといわれている判別分析法では、対象物の認識漏れが少ないように作用し、結果的に背景部にノイズが多く発生した。 k_{NN} は全性能比較用画像に対して k_{DT} に対する差が1以内となり、最もよい結果が得られた。

一例として、図 A-3 に示すような繊維状粒子を含む原画像に正規分布法、判別分析法、ニューラルネットワーク法を適用し、得られたそれぞれの最適しきい値により2値化した結果を図 A-4(a)~(c) に示す。各2値画像には、比較しやすいように原画像と同様繊維状対象物が黒く、背景が白くなるように反転処理を施した。



(a) Chrysotile

(b) Grass Fiber

(c) Carbon Fiber

図 A-2 繊維状粒子の顕微鏡像

表 A-1 繊維状粒子画像の比較用画像に対する最適しきい値と正規分布法、判別分析法、ニューラルネットワーク法から得られた最適しきい値

画像番号	正規分布法 k_{ND}	判別分析法 k_{DA}	ニューラル ネットワーク法 k_{NN}	最適しきい値 k_{DT}
1	17	11	15	16
2	18	13	17	17
3	20	16	20	21
4	20	13	17	16
5	18	12	16	16
6	22	16	22	21
7	18	12	16	16
8	20	15	19	19
9	21	17	21	20
10	20	14	18	17
11	16	11	16	15
12	18	14	18	17

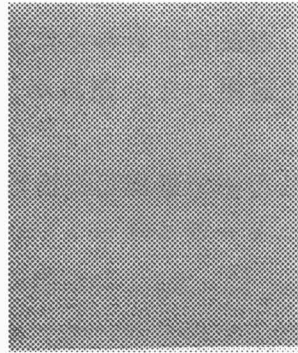
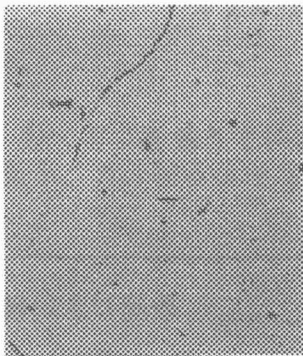
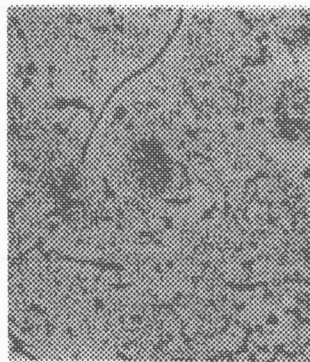


図 A-3 不鮮明な繊維状粒子を含む原画像



(a) 正規分布法



(b) 判別分析法



(c) ニューラルネットワーク法

図 A-4 図 A-3 の 2 値画像

A.2.2 繊維状粒子と不透明粒子混在画像に対するしきい値選択能力

繊維状粒子と不透明粒子混在画像に対する性能比較に準備した画像は、Chrysotile 標準試料と炭素繊維（東洋紡績製，KF-1500，図 A-2(c)参照）が混在した顕微鏡像から 10 視野分，照明強度 3 段階の合計 $10 \times 3 = 30$ 枚である。この内 5 視野分 $7 \times 3 = 21$ 枚をニューラルネットワーク法の学習用画像として，また $3 \times 3 = 9$ 枚を性能比較用画像として用いた。

ニューラルネットワーク法では，教師信号を与えた 21 枚の画像により学習させた結果を，性能比較用未学習画像 9 枚に適用した。隠れ層のユニット数や収束判定条件は，A.2.1 の場合と同様とした。

学習における教師信号 k_T と同じ方法で選択した性能比較用画像に対する最適しきい値 k_{DT} と正規分布法，判別分析法，ニューラルネットワーク法から得られた各最適しきい値 k_{ND} ， k_{DA} ， k_{NN} を表 A-2 に示す。 k_{ND} は，A.2.1 の画像に比べて不透明粒子が存在した分，抽出対象粒子の画素数が多くなったことにより， k_{DT} より高いしきい値が得られた画像もあるが，多くの画像に対しほぼ妥当なしきい値が得られている。このことより，正規分布法は低コントラストの繊維状粒子に不透明粒子が多少混入しても，十分有効に働くことが分かった。 k_{DA} は性能比較用画像 9 枚中 1 枚だけがほぼ最適なしきい値を得ることができたが，5 枚は k_{DT} に比べて高い値をとり過ぎ，不透明粒子は抽出できているが細い低コントラストの繊維状粒子は抽出できなかつた。また，3 枚のテスト画像に対しては低しきい値をとり過ぎたため繊維が太くなり過ぎ，背景部のノイズも多い結果となった。 k_{NN} は A.2.1 と同様，全画像についてほぼ最適なしきい値を得ることができた。

表 A-2 繊維状粒子と不透明粒子混在画像の比較用画像に対する最適しきい値と正規分布法，判別分析法，ニューラルネットワーク法から得られた最適しきい値

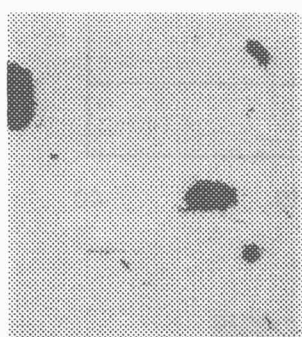
画像番号	正規分布法 k_{ND}	判別分析法 k_{DA}	ニューラル ネットワーク法 k_{NN}	最適しきい値 k_{DT}
1	22	29	24	24
2	23	28	24	24
3	26	31	26	26
4	46	47	48	48
5	45	42	48	48
6	48	44	50	50
7	22	16	22	21
8	24	32	24	23
9	25	33	25	24

ここで、再学習の必要性を確認するために、A.2.1 の学習結果をそのまま、ここでのテスト画像に適用し k_{NN} を推定した。その結果、9枚すべてのテスト画像に対し、再学習した場合より1～2程度低いしきい値が得られた。しかも、出力層のユニットからの最大出力値と2番目に大きな出力値を比較するとその差は小さくなっており、しきい値選択における安定性は低下していた。このように、対象画像の特徴が変化したときには、学習用画像に変化した特徴を含む画像を加えた再学習が必要となるが、再学習の必要性の判断基準は明確でない。

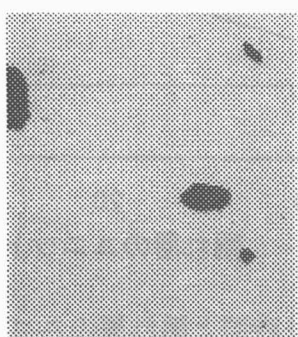
図 A-5 に示す原画像を、正規分布法、判別分析法、およびニューラルネットワーク法から得た最適しきい値を用いて2値化した結果をそれぞれ図 A-6(a)～(c)に示す



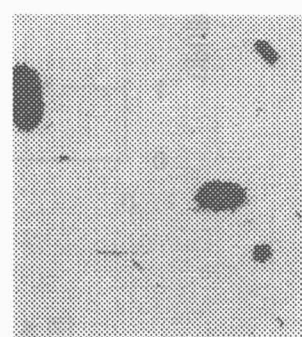
図 A-5 不鮮明な繊維状粒子と炭素繊維を含む原画像



(a) 正規分布法



(b) 判別分析法



(c) ニューラルネットワーク法

図 A-6 図 A-5 の2値画像

A.3 処理時間

実際の自動計数には、最適なしきい値が得られる条件の他にしきい値選択に要する時間も重要な要素の一つになる。

AFACSでは、マイクロコンピュータ (CPU: i486DX, 6.6 MHz) により支援される512画素×512画素、256階調の画像処理装置を用いており、正規分布法および判別分析法による2値化しきい値選択には1画像あたり1秒程度の処理時間を要し、ニューラルネットワーク法ではほぼ瞬時に処理された。ただし、ニューラルネットワーク法は各層のユニット間の結合強度を学習によりあらかじめ求めておく必要がある。上述の学習に要したワークステーション (22.8 Mflops) のCPU時間と隠れ層のユニット数の関係を図A-7に示す。隠れ層のユニット数が10の場合の学習時間は学習回数が18,000に対し5.635秒を要した。

また、ニューラルネットワーク法には、学習に多大な時間を要する他に、①教師情報が必要、②最適な学習回数が明確でない (過学習の可能性がある)、③入力情報が大きく変わる時は再学習が必要、などの問題点がある。

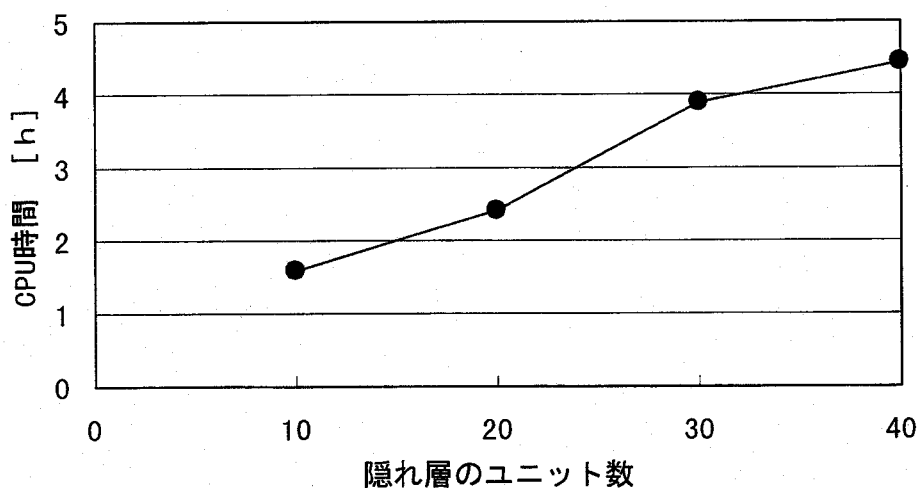


図 A-7 CPU 時間と隠れ層のユニット数の関係

Appendix B 非線形関数の最小自乗法

本論文では、解析対象とする2値画像を得るために正規分布法を用いている。正規分布法は、原画像をシェーディング補正した画像において背景領域部のヒストグラムを正規分布形に仮定し、最適しきい値を求めている。正規分布形のパラメータは、ヒストグラムデータから最小自乗法⁵⁾を用いて決定した。以下にその決定方法について述べる。

ヒストグラムは式(B-1)の関数形をしているものとする。

$$y = a \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (\text{B-1})$$

ただし、 y は輝度 x における画素数、 x は輝度、 a は最大画素数、 μ は最大画素数を与える輝度、 σ は標準偏差。

式(B-1)のパラメータ a 、 σ 、 μ の決定には、関数が非線形であるため反復補正が必要となる。 a 、 σ 、 μ の真値は、

$$\begin{aligned} a &= a_0 + \Delta a \\ \sigma &= \sigma_0 + \Delta \sigma \\ \mu &= \mu_0 + \Delta \mu \end{aligned} \quad (\text{B-2})$$

で与えられる。ここで、 a_0 、 σ_0 、 μ_0 は初期値、 Δa 、 $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \mu$ は補正值であり、問題は Δa 、 $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \mu$ を求めることになる。 y を a 、 σ 、 μ の関数と考えると、

$$y = f(a, \sigma, \mu) = f(a_0 + \Delta a, \sigma_0 + \Delta \sigma, \mu_0 + \Delta \mu) \quad (\text{B-3})$$

y を (a_0, σ_0, μ_0) 周りでテーラー級数展開すると、

$$y = f(a_0, \sigma_0, \mu_0) + \Delta a \left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)_0 + \Delta \sigma \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right)_0 + \Delta \mu \left(\frac{\partial f}{\partial \mu}\right)_0 + \dots \quad (\text{B-4})$$

式(B-1)より

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial a} &= \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma} &= \frac{a(x - \mu)^2}{\sigma^3} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ \frac{\partial f}{\partial \mu} &= \frac{a(x - \mu)}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \end{aligned} \quad (\text{B-5})$$

となる。

$$E = \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \text{とおき、式(4)の第4項までとると、}$$

$$y = f(a_0, \sigma_0, \mu_0) + \Delta a E + \Delta \sigma \frac{a_0}{\sigma_0^3} (x - \mu_0)^2 E + \Delta \mu \frac{a_0}{\sigma_0^2} (x - \mu_0) E \quad (\text{B-6})$$

式(B-6)は、 Δa , $\Delta \sigma$, $\Delta \mu$ に関して線形であり、 Δa , $\Delta \sigma$, $\Delta \mu$ を求める最小自乗法が直接適用できる。誤差を $d = Y - y$, 誤差の総和を ε で表すと、最小にすべき関数は、

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \sum d_k^2 = \sum (Y_k - y_k)^2 \\ &= \sum \left\{ Y_k - f_k(a_0, \sigma_0, \mu_0) - \Delta a E_k - \Delta \sigma \frac{a_0}{\sigma_0^3} (x_k - \mu_0)^2 E_k \right. \\ &\quad \left. - \Delta \mu \frac{a_0}{\sigma_0^2} (x_k - \mu_0) E_k \right\} \end{aligned} \quad (\text{B-7})$$

ただし、 $\sum = \sum_{k=1}^N$ とする。

であり、 ε^2 を最小にするには、

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Delta a} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Delta \sigma} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Delta \mu} = 0 \quad \text{の条件を満足すればよい。}$$

すなわち、式(B-8)で表される Δa , $\Delta \sigma$, $\Delta \mu$ についての正規方程式を解けばよいことになる。

$$\begin{aligned} \sum E_k d_k^* &= \Delta a \sum E_k^2 + \Delta \sigma \frac{a_0}{\sigma_0^3} \sum (x_k - \mu_0)^2 E_k^2 + \Delta \mu \frac{a_0}{\sigma_0^2} \sum (x_k - \mu_0) E_k^2 \\ \sum (x_k - \mu_0)^2 E_k d_k^* &= \Delta a \sum (x_k - \mu_0)^2 E_k^2 + \Delta \sigma \frac{a_0}{\sigma_0^3} \sum (x_k - \mu_0)^4 E_k^2 \\ &\quad + \Delta \mu \frac{a_0}{\sigma_0^2} \sum (x_k - \mu_0)^3 E_k^2 \\ \sum (x_k - \mu_0) E_k d_k^* &= \Delta a \sum (x_k - \mu_0) E_k^2 + \Delta \sigma \frac{a_0}{\sigma_0^3} \sum (x_k - \mu_0)^3 E_k^2 \\ &\quad + \Delta \mu \frac{a_0}{\sigma_0^2} \sum (x_k - \mu_0)^2 E_k^2 \end{aligned} \quad (\text{B-8})$$

$$\text{ただし、} d_k^* = Y_k - f_k(a_0, \sigma_0, \mu_0) = Y_k - a_0 \exp \left\{ - \frac{(x_k - \mu_0)^2}{2 \sigma_0^2} \right\}$$

Δa , $\Delta \sigma$, $\Delta \mu$ を補正子とし、 $|\Delta a/a|$, $|\Delta \sigma/\sigma|$, $|\Delta \mu/\mu|$ が条件以下になるまで反復計算する。

Appendix C 判別分析法を用いた修復判定

判別分析は、ある測定値が与えられたとき、その測定値が G_1 , G_2 のどちらのグループに属するかを判別するための手法であり、よく検査結果からのガン患者か否かの診断を例にして説明される。判別分析法の詳細は多変量解析の専門書に譲ることにし、ここでは判別分析法を2値化により切断された繊維状物質の修復判定に用いた手法の概略を述べるに留める。また、①経験的に判定条件のしきい値を決めた場合（経験的しきい値選択法）、②各条件のしきい値を変化させ、誤りが最小時のしきい値に決めた場合（最小誤りしきい値選択法）、③判別分析法を用いた場合（判別分析判定法）、の3通りの修復判定法を誤判別率を用いて評価した結果を示す。

まず、2つのセグメントを修復（連結）するか否かの判別条件を求めるため、つまり人間が2つのセグメントが元々1本であったかどうかをどのように判断をしているのかを探るため、70枚の画像を用いて主観的な判断結果を記録した。また、このような判断をする場合、人間は両セグメント間の角度・幅比・距離の3条件を主たる判断材料にするであろうと考え、これらの測定値も併せて記録した。図 C-1 にその内の角度・距離条件と人間の判断の関係を示す。○は人間が連結と判断した場合のもので、×は連結の必要はないと判断したものである。x 軸には両セグメントの内最も近い端点間距離を、y 軸には式(C-1)で定義した非滑らかさ指標 ϕ を採用している。

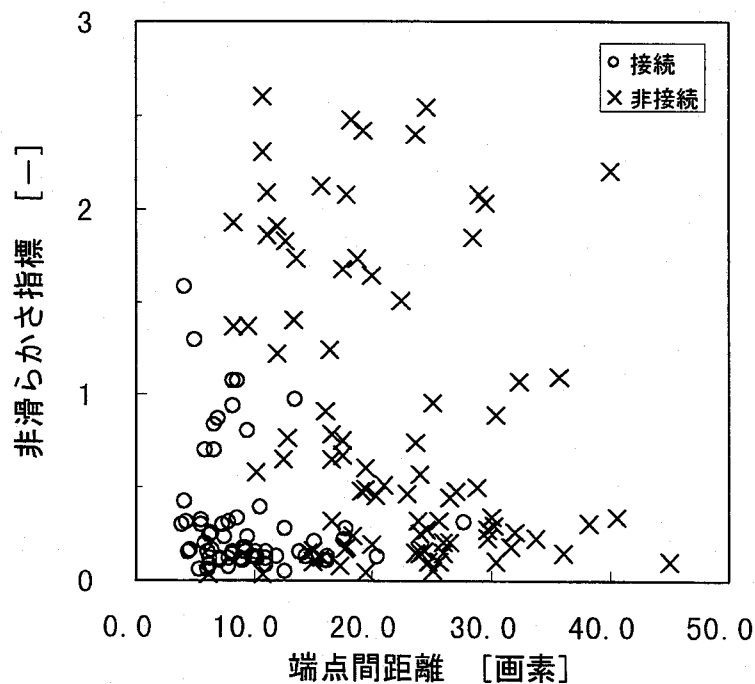


図 C-1 セグメント間の角度指標と距離指標の分布

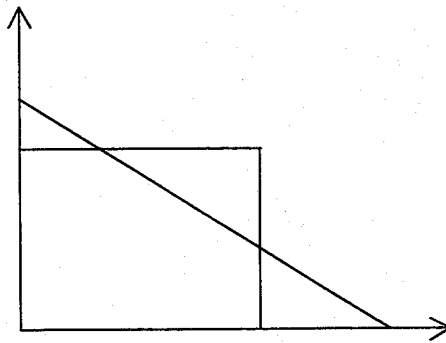


図 C-2 領域分割

$$\phi = 4 - \gamma = \cos \beta - \cos \alpha + 2 \quad (\text{C-1})$$

ここで、 γ 、 α 、 β は式(3-3)で定義された滑らかさ指標と両セグメントの位置関係を示す角度である。 $\phi = 0$ のときは一直線関係にあり、 ϕ が大きくなるにしたがって両セグメントのなす角度は大きくなる。

図 C-2 に示すように、しきい値処理では、各条件にしきい値を設定して各条件を満足する領域、すなわち x 、 y 軸とそれに平行な直線に囲まれた長方形内部領域と外部領域をそれぞれ連結領域と連結不可領域に分ける。一方、判別分析法では、多変数の線形判別関数を定義し、これがあるしきい値を越えるか否かで連結の判定を行う。図 C-2 では、斜線と x 、 y 軸で囲まれた領域の内側か外側かにより判定を行うことになる。

C.1 修復判定法

C.1.1 経験的しきい値選択法

この方法は、判定条件のしきい値に経験的な値を用いた方法であり、式(C-2)～(C-4)に示す3条件をすべて満たせば連結可とした。

$$\text{角度条件} \quad \alpha < \theta \text{ かつ } \pi - \beta > \theta \quad (\text{C-2})$$

$$\text{幅比条件} \quad \max(w_1/w_2, w_2/w_1) < r \quad (\text{C-3})$$

$$\text{距離条件} \quad d < d_0 \quad (\text{C-4})$$

ここで、 w_1 、 w_2 は両セグメントの幅、 d_0 は両セグメントの最短端点間距離。

判定のしきい値は、 $\theta = 30^\circ$ 、 $r = 2$ 、 $d_0 = 10$ 画素とした。

C.1.2 最小誤りしきい値選択法

この方法は、式(C-2)～(C-4)で用いる判定しきい値を、 θ は0から90°まで0.1°刻み、 r は0.5から5.0まで0.01刻み、 d_0 は5から30画素まで0.1画素刻みで変化させ、人間が連結可否判定を行った端点のデータに対して判定を行い、人間の判定に対し誤判別率が最小になるしきい値の組み合わせとした。ここでの判定のしきい値は、 $\theta = 73^\circ$ 、 $r = 3$ 、 $d_0 = 17$ 画素とした。

C.1.3 判別分析判定法

判別分析法の入力変量としては、上述した角度変量、幅比変量および距離変量を採用した。角度変量には式(C-1)で定義した非滑らかさ指標 ϕ を、幅比変量には式(C-5)で定義する R を用いた

$$R = \max(w_1/w_2, w_2/w_1) \quad (\text{C-5})$$

ただし、 w_1 、 w_2 は両セグメントの幅（繊維直径）。

距離変量については、人間の判断を調べると端点間距離が判定に影響しているだけでなく、セグメント長も関与していることが分かった。つまり長いセグメントと短いセグメントでは異なった端点間距離で判定しており、距離変量を両セグメント長 l_1 、 l_2 と端点間距離 d を用いて定義する必要がある。本論文では、式(C-6)～(C-8)で定義される距離変量 L の有効性を、判別分析のグループ間分離の良さを表す指標であるマハラノビスの距離 (Mahalanobis' distance)⁶⁾ により評価した。その結果を表 C-3 に示す。マハラノビスの距離が大きいほどグループ間分離が良く、誤差の少ない判定が行える。

$$L = \frac{2d}{l_1 + l_2} \quad (\text{C-6})$$

$$L = \frac{d}{(l_1 \cdot l_2)^{1/2}} \quad (\text{C-7})$$

$$L = \frac{d}{(l_1 \cdot l_2)^n} \quad (\text{C-8})$$

表 C-3 からセグメント長の算術平均より幾何平均を用いた方が分離がよいことが分かる。さらに最適なべき数が存在することが示唆されたので、べき数に対するマハラノビスの距離を求めてグラフ化したのが図 C-3 である。このように、距離変量には、人間の判断データが与えられた場合、最も大きなマハラノビスの距離をもつべき数を求めて、それを使うことにした。本論文で使用した人間の判断データから $n = 0.1875$ を得て、距離変量 L を式(C-9)とした。

$$L = \frac{d}{(l_1 \cdot l_2)^{0.1875}} \quad (\text{C-9})$$

以上から、切断繊維の修復の可否を判定する線形判別関数 z は式(3-6)に示すように、式(C-10)で表わされる。

$$z = a_1 \gamma + a_2 R + a_3 L + a_0 \quad (\text{C-10})$$

次に、式(C-10)の係数 $a_0 \sim a_3$ を求める方法⁷⁾を以下に示す。 G_1 と G_2 の2群に分ける線形判別関数 z は一般に式(C-11)で表されるものとする。

表 C-3 距離変量の定義式とマハラノビスの距離

Lの定義式	マハラノビスの距離
$\frac{2d}{l_1 + l_2}$	0.9596
$\frac{d}{(l_1 \cdot l_2)^{1/2}}$	1.4054
$\frac{d}{(l_1 \cdot l_2)^{0.1875}}$	2.0771

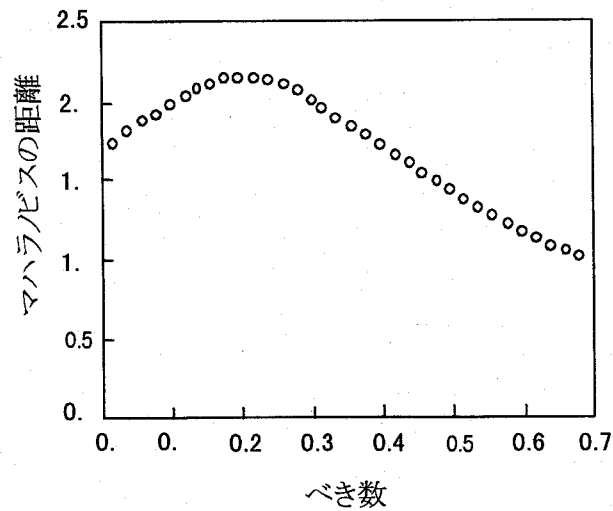


図 C-3 べき数とマハラノビスの距離の関係

$$z = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p + a_0 \quad (\text{C-11})$$

ただし、 x_p は変量とする。

式(C-12)で表される連立1次方程式を $a_0 \sim a_p$ について解けばよい。

$$\begin{aligned} s_{11}a_1 + s_{12}a_2 + \dots + s_{1p}a_p &= \bar{x}_1^{(1)} - \bar{x}_1^{(2)} \\ s_{21}a_1 + s_{22}a_2 + \dots + s_{2p}a_p &= \bar{x}_2^{(1)} - \bar{x}_2^{(2)} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (\text{C-12})$$

$$\begin{aligned} s_{p1}a_1 + s_{p2}a_2 + \dots + s_{pp}a_p &= \bar{x}_p^{(1)} - \bar{x}_p^{(2)} \\ a_0 &= - \frac{(a_1 \bar{x}_1^{(1)} + \dots + a_p \bar{x}_p^{(1)}) + (a_1 \bar{x}_1^{(2)} + \dots + a_p \bar{x}_p^{(2)})}{2} \end{aligned} \quad (\text{C-13})$$

ただし,

$$s_{ij} = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} \left\{ \sum_{k=1}^{n_1} (x_{ik}^{(1)} - \bar{x}_i^{(1)}) (x_{jk}^{(1)} - \bar{x}_j^{(1)}) + \sum_{k=1}^{n_2} (x_{ik}^{(2)} - \bar{x}_i^{(2)}) (x_{jk}^{(2)} - \bar{x}_j^{(2)}) \right\} \quad (C-14)$$

G_1 群					G_2 群				
	x_1	x_2	...	x_p		x_1	x_2	...	x_p
1	$x_{11}^{(1)}$	$x_{21}^{(1)}$	...	$x_{p1}^{(1)}$	1	$x_{11}^{(2)}$	$x_{21}^{(2)}$	...	$x_{p1}^{(2)}$
2	$x_{12}^{(1)}$	$x_{22}^{(1)}$	...	$x_{p2}^{(1)}$	2	$x_{12}^{(2)}$	$x_{22}^{(2)}$	...	$x_{p2}^{(2)}$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
n_1	$x_{1n_1}^{(1)}$	$x_{2n_1}^{(1)}$	...	$x_{pn_1}^{(1)}$	n_1	$x_{1n_1}^{(2)}$	$x_{2n_1}^{(2)}$	...	$x_{pn_1}^{(2)}$
平均	$\bar{x}_1^{(1)}$	$\bar{x}_2^{(1)}$	...	$\bar{x}_p^{(1)}$	平均	$\bar{x}_1^{(2)}$	$\bar{x}_2^{(2)}$	...	$\bar{x}_p^{(2)}$

C.2 修復判定法の評価結果

上記3種類の修復判定法の評価方法として、誤判別率を採用した。ここで、誤判別率は3種類の方法のどれか1つでも誤判別をしたデータ数に対する誤判別数の割合とし、誤判別数はERR1で表す連結すべきなのに連結しなかった誤り数とERR2で表す連結すべきでないのに連結した誤り数の和とした。表C-4に各修復判定法の誤判別率を示す。

判別分析法は、経験的しきい値選択法に比べ誤判別率が約4割にまで減少したが、誤判別数がERR2に偏る傾向がある。

表 C-4 修復判定法と誤判別率

	ERR1	ERR2	誤判別率	備考
経験的しきい値	0.730 (65)	0.011 (1)	0.742 (66)	$\theta = 30^\circ$ $r = 2$ $d_0 = 10$ 画素
最小誤りしきい値	0.202 (18)	0.180 (16)	0.382 (34)	$\theta = 73^\circ$ $r = 3$ $d_0 = 17$ 画素
判別分析	0.079 (7)	0.202 (18)	0.281 (25)	

総誤判別数 = 89

() は誤判別数

参考文献

- 1) 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，Vol.10, pp.296-303 (1995)
- 2) N. Otsu: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-9, pp.62-66 (1979)
- 3) 例えば，麻生英樹：ニューラルネットワーク情報処理－コネクショニズム入門あるいは柔らかな記号に向けて－，産業図書，pp.10-18 (1988)
- 4) D.E. Rumelhart et al.: Learning Representations by Back-Propagating Errors, *Nature*, Vol.323, pp.533-536 (1986)
- 5) R.W. Southworth et al.: 電子計算機のための数学Ⅱ－数値解析－（岩田倫典訳），共立出版，pp.449-452 (1968)
- 6) 例えば，河口至商：多変量解析入門Ⅰ，森北出版，pp.79-91 (1973)
- 7) 有馬哲他：多変量解析のはなし，東京図書，pp.127-166 (1987)

本論文に関連する発表論文

- 1) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 前畑典之: 石綿繊維の自動計数システムの開発に関する研究—第1報マイコンを用いた簡易計数システムの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, No.51, pp.93-102(1993)
- 2) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 石綿繊維の自動計数システムの開発に関する研究—第2報カスケードインパクト, 熱処理および酸処理を用いた試料作成, 空気調和・衛生工学会論文集, No.57, pp.23-33(1995)
- 3) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 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, Vol.10, pp.296-303(1995)
- 4) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 石綿繊維の自動計数と肉眼計数間のクロスチェック, エアロゾル研究, (印刷中)
- 5) Y. Inoue, A. Kaga, K. Yamaguchi, and S. Kamoi: Development of an Automatic System for Counting Asbestos Fibers Using Image Processing, *Particulate Science and Technology*, (in printing)

口頭発表

- 1) 前畑典之, 加賀昭和, 井上義雄, 吉川暲: エアロゾル形状の自動判別法に関する研究—その1石綿繊維の自動計数, 空気調和・衛生工学会昭和62年度近畿支部特別講演会・学術研究発表会講演論文集, pp.121-124(1988)
- 2) 前畑典之, 加賀昭和, 井上義雄, 吉川暲: 石綿の自動計数, 第6回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.161-163(1988)
- 3) 吉川暲, 加賀昭和, 井上義雄, 前畑典之: 石綿繊維の自動計数, 空気調和・衛生工学会昭和63年度近畿支部学術研究発表会講演論文集, pp.51-54(1989)
- 4) 前畑典之, 栢野聡, 井上義雄, 加賀昭和, 吉川暲: 石綿の自動計数—その2—, 第7回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.14-16(1989)
- 5) 吉川暲, 加賀昭和, 井上義雄, 前畑典之, 栢野聡: 石綿繊維の自動計数—その2— 一般塵の除去処理—, 空気調和・衛生工学会平成元年度近畿支部学術研究発表会講演論文集, pp.75-78(1990)
- 6) A. Kaga, Y. Inoue, and A. Yoshikawa: Automatic Counting of Asbestos Fibers, *Proceedings of the 3rd International Aerosol Conference in Kyoto*, pp.486-489(1990)
- 7) 吉川暲, 山口克人, 加賀昭和, 井上義雄, 阿南真一: 石綿繊維の自動計数—その3— 大気環境適用のための試料作成法—, 空気調和・衛生工学会平成2年度近畿支部学術研究発表会講演論文集, pp.71-74(1991)
- 8) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 阿南真一: 石綿の自動計数—その3—, 第8回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.31-33(1991)

- 9) 立原誠一, 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 石綿繊維の自動計数に関する研究, (財)大阪科学技術センター第8回ソフトウェアコンファレンス論文集, pp.285-288 (1992)
- 10) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 中西重二: 石綿繊維の自動計数, 日本労働衛生工学会第32回学会講演抄録集, pp.35-36 (1992)
- 11) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 中西重二: 石綿繊維計数基準の計数者間の比較, 日本労働衛生工学会第32回学会講演抄録集, pp.37-38 (1992)
- 12) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 中西重二: 石綿繊維計数基準の計数者間の比較, 空気調和・衛生工学会平成4年度近畿支部学術研究発表会講演論文集, pp.157-160 (1993)
- 13) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 石綿の自動計数システムにおける2値化しきい値選択法の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集Ⅲ, pp.109-112 (1993)
- 14) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 画像処理手法を用いた石綿繊維の自動計数システムの開発—インパクトを用いた大気用試料作成法について, 第34回大気汚染学会講演要旨集, p.249 (1993)
- 15) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 繊維状粒子画像の画像処理における2値化しきい値選択法の比較, 第11回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.140-142 (1994)
- 16) 鴨井伸一, 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 石綿繊維の自動計測アルゴリズムに関する研究, 空気調和・衛生工学会平成6年度近畿支部学術研究発表会講演論文集, pp.149-152 (1995)
- 17) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 鴨井伸一: 画像処理を用いた石綿繊維の自動計数—2値化により切断された繊維画像の修復法—, 第12回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.181-183 (1995)
- 18) 鴨井伸一, 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 判別分析法による繊維状物体画像の修復, 電子情報通信学会 1995年情報・システムソサイエティ大会講演論文集, p.212 (1995)
- 19) 眞山崇, 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: インパクト法を用いたアスベストの野外計測, 空気調和・衛生工学会平成7年度近畿支部学術研究発表会講演論文集, pp.113-116 (1996)
- 20) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 眞山崇: 画像処理手法を用いた石綿繊維の自動計数—自動車のブレーキから放出された石綿の実測—, 第13回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.197-199 (1996)
- 21) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 鴨井伸一: 繊維状粒子の自動計数システムの開発に関する研究, 日本機械学会第7回環境工学総合シンポジウム'97講演論文集, pp.5-8 (1997)
- 22) 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 石綿繊維計数のクロスチェック, 第14回エアロゾル科学・技術研究討論会講演論文集, pp.105-107 (1997)
- 23) 大脇哲生, 井上義雄, 加賀昭和, 山口克人: 繊維状粒子の自動計数システムアルゴリ

ズムの改善, 空気調和・衛生工学会平成8年度近畿支部学術研究発表会講演論文集,
pp.115-118(1997)

文部省科学研究費補助金(一般研究(C))研究成果報告書

井上義雄, 加賀昭和, 山口克人, 中西重二: 位相差顕微鏡画像のマイコン処理による大気
中石綿繊維の無人計数システムの開発, 研究課題番号: 03650473, 平成5年3月(1993)

解 説

井上義雄: エアロゾル粒子の形状評価, エアロゾル研究, Vol.11, pp.183-188(1996)

謝 辞

石綿の計測に関する研究は、1987年大阪大学環境工学科研究棟の吹き付け石綿問題に端を発し、それ以降、除去処理が行われるまで毎年定期的に室内気中濃度が測定され、その測定法に興味をもったことから始めた。本論文は、特に、一般環境における濃度計測法に注目し、その研究成果をまとめたものである。

本研究の遂行と本論文をまとめる機会を与えて下さいました大阪大学大学院工学研究科山口克人教授に謹んで御礼申し上げます。山口先生には、大阪大学に奉職以来長年にわたりご指導、ご鞭撻を賜りました。また、常々ことあるごとに研究に対する心構えや考え方など研究を行う者のあるべき姿についてご教示いただきました。ここに、重ねて深甚なる謝意を表します。

大阪大学大学院工学研究科 加賀昭和助教授には、本研究は元より研究全般にわたり直接のご指導ならびにご助言を賜りました。さらに、遅々として進まぬ研究に対し、常に筆者を叱咤激励し暖かく導いていただきました。心より感謝の意を表します。

大阪大学大学院工学研究科 笹田剛史教授、辻裕教授には、本研究に対するご理解と専門的立場から数々のご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学名誉教授 吉川暉先生には、ご在職中はもとより退官されてからも公私にわたりご指導ならびに多大のご理解とご配慮を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

大阪大学大学院工学研究科 近藤明助手には、本研究に関する有意義な討論と助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたって、実験、解析および冬場の実測においてたいへんお世話になった前畑典之（現三菱電機）、栢野聡（現松下電産）、阿南真一（現松下電工）、立原誠一（現大成建設）、関本暁（現朝日工業社）、鴨井伸一（現CRC総合研究所）、眞山崇（現鹿島建設）、大脇哲生（現八千代エンジニアリング）の諸氏には、改めてお礼申し上げます。

また、研究室の院生・学生諸氏には、実測の折りに多大なご協力をいただきました。ここに記して、深く御礼申し上げます。

なお、学会の討論ならびに投稿論文の査読を通して、本研究に有益なご意見を賜りました関係学会の諸先生方に感謝の意を表します。

