

デジタルカメラを用いたトンネル坑内での
簡易粉じん濃度測定法

Method for measuring dust concentration in tunnel
by means of digital camera

平成 23 年 3 月

岸田 展明

Noriaki Kishida

山口大学大学院 理工学研究科

学位論文の要旨

トンネル建設工事では、近年の技術進歩や作業方法の改良により改善はみられるものの、施工中の粉じんの発生によるじん肺症の危険性は依然として高い。作業環境の粉じん濃度を抑制することがじん肺症予防に根本的な効果があることから、作業環境の状況を把握する指標として、粉じん濃度測定が重要となる。そこで、トンネル建設工事を対象として、「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」が改正され、その対策の1つとして、粉じん濃度測定が義務化された。粉じん濃度の測定機器には、光散乱式デジタル粉じん計が利用されているが、価格が高価なこと、同位置で継続的に10分以上の測定を行わなければならないことなどがあり、より簡単で安価な粉じん濃度を測定する方法が望まれていた。

この問題を解決するために、本論文では、一般に市販されているコンパクトデジタルカメラのフラッシュ機能を利用した粉じん濃度測定法を提案した。本測定方法は、トンネル坑内のような閉空間において、カメラでフラッシュ撮影を行うと、フラッシュ光が浮遊粉じんなどに反射して白斑として撮影される現象を利用した測定方法である。加えて、デジタルカメラは、撮影したその場で画像を確認できること、画像自体もデジタル化されており画像処理しやすいことなどのデジタルカメラの特有の性能向上と販売価格の低下により、メリットを有する。その上、粉じんの浮遊状況画像としても利用できる特徴を有する。本論文の測定位置は、ガイドラインに基づき、最も安定して粉じん濃度が高くなる吹付け作業時の切羽からトンネル坑口に向かって50m地点とした。提案にあたって、まず、測定対象の粉じんの実態を調査するため、トンネル坑内で浮遊する粉じんを採取し、走査型電子顕微鏡で表面形状を観察した。そして、電子顕微鏡に付属するエネルギー分散型X線分析装置で、粉じんの表面成分を分析した。その結果、作業工程と成分分析の結果からセメント成分の粉じんが多数浮遊していることを明らかにした。この結果に基づき、デジタルカメラでフラッシュ撮影した画像に写る粉じんの個数を粉じん濃度に換算する散乱光計数による測定法並びに、より簡便にデジタルカメラで粉じん濃度を換算するために、デジタルカメラでフラッシュ撮影した画像の輝度とデジタル粉じん計での粉じん濃度との関係を人工知能により学習させることにより、粉じん濃度に換算するANNを用いた画像処理による測定法を提案した。

そして、より簡便な方法であるANNを用いた画像処理による測定法の有用性を確認するために、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、本測定法で測定した粉じん濃度とデジタル粉じん計で測定した粉じん濃度とを比較した。その結果、お互いに高い相関性が認められ、その有用性が確認できた。

本研究で得られて結論を各章ごとに要約する。

【第1章 序論】

本章では、環境測定技術としての粉じん濃度測定方法の現状を整理し、特に建設現場で必要とされる技術は、より簡易に粉じん濃度を測定できる技術であること明らかにした。そして、トンネル坑内のような暗い閉空間での迅速で簡単な測定方法として、本研究で提案するデジタルカメラを利用した粉じん濃度測定方法の粉じん濃度測定法の中での位置づけを示すとともに、論文の構成と概要を説明した。

【第2章 吹付けコンクリート作業中に浮遊する粉じんの実態調査】

本章では、吹付けコンクリート作業時にトンネル坑内で採取した浮遊粉じんの形態、成分を電子顕微鏡で分析し、浮遊粉じんの大部分がセメント成分に極めて類似していることを確認した。そして、ガイドラインで規定されている地点での粉じんの粒度分布状況を明らかにした。

【第3章 デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定方法の開発】

本章では、デジタルカメラによるフラッシュ撮影画像を利用した粉じん濃度測定法を提案した。すなわち、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内で、粉じん濃度との関係性を検討するために、デジタル粉じん計での測定と同期させながらフラッシュ撮影を行い、粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集した。次に、フラッシュ撮影した画像に記録された散乱光の数を計数し、粉じん濃度に換算する測定法（散乱光計数による測定法）を提案した。この測定法は、第2章において明らかにした粒度分布とフラッシュ撮影画像の計数値からデジタルカメラに撮影された粉じんの重さを求め、あらかじめ調べておいたデジタルカメラで粉じんが撮影できる空間で除することで、粉じん濃度を測定する方法である。次に、フラッシュ撮影した画像に粉じんの散乱光が多く写れば写るほど、画像は明るく輝度が高くなることを利用し、粉じん濃度に換算する測定法（画像処理による測定法）を提案した。

【第4章 画像処理による粉じん濃度測定方法へのニューラルネットワークの適用】

本章では、第3章で提案した画像処理による測定法の精度向上と更なる実用化を目指し、人間の刺激と反応に関する脳神経組織の働きを数学的に模擬したコンピュータアルゴリズムであるニューラルネットワークを用いた粉じん濃度測定方法を提案した。その際、フラッシュ光の照射角度の違いによる輝度の変化が粉じん濃度測定精度に大きく影響を与えることが分かったため、画像全体の輝度の変化を極力除去する画像処理を行ったうえでニューラルネットワークを適用する方法（ANNを用いた画像処理による測定法）を新たに考案した。

【第5章 現場適用実験】

本章では、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタルカメラでのフラッシュ撮影を行い、ANNを用いた画像処理による測定法の有用性を検証した。その結果、デジタ粉じん計との高い相関性が認められ、その有用性が確認できた。

【第6章 結論】

本章では、本研究で得られた知見と課題を整理し、本論文の結論とした。

ABSTRACT

In the tunnel construction work, a possibility to get the pneumoconiosis by breathing dust is not so low. The dust concentration measurement is important for the prevention of the pneumoconiosis. The guideline of dust control for tunnel construction works, published by the Ministry of Health, Labor and Welfare of Japan, dictates that the employer has a management duty to control the suspended dust concentration for the safety of workers in the tunnel construction work. Generally, the dust concentration measurement has done by the digital dust indicator. But the cost of this indicator is expensive and its measurement time is taken long. The more simple and convenient method for measuring the dust concentration is expected.

In this paper, the method for measuring the dust concentration by means of the compact digital camera was proposed. This method uses the photography taken with flashlight. When high intensity light is radiated in a dark space, the light is scattered by the dust particles when the particle size is same or bigger than the wavelength of the incident light. Based on the guideline, the dust concentration at the location of 50 m from the tunnel face was measured.

The particle size distribution and the component of the suspended dust during sprayed concrete work in the tunnel construction were surveyed using an electron microscope. From this experiment, the chemical composition of the suspended dust was almost similar to the composition of the Portland cement.

The objective of this study is that the methods for measuring the dust concentration by means of digital camera are suggested. These methods use a photograph taken with flashlight. First, the photography connected with the dust concentration during sprayed concrete work in the tunnel was collected. Next, the two types methods for measuring the dust concentration by means of digital camera were proposed. One of the methods calculates the dust concentration from the count value of dust. This method uses the particle size distribution surveyed in Chapter 2 and the density of the Portland cement. The other method converts the brightness value of the photography to the dust concentration by image processing.

This paper consists of 6 chapters, and the main content of each chapter is as follows:

[Chapter 1: Introduction]

In this chapter, the present measurement methods of the dust concentration in the

tunnel construction work were arranged. And it was made clear that the simple dust concentration measurement was needed in a tunnel construction work. In this study, the simple methods for measuring the dust concentration by means of digital camera are suggested. In addition, I explained constitution and the summary of this paper.

[Chapter 2: The investigation of suspended dust during sprayed concrete work]

In this chapter, I surveyed the particle size distribution and the component of the suspended dust which floated during sprayed concrete work in the tunnel construction with an electron microscope. From the analysis, the chemical composition of the suspended dust was almost similar to the composition of the Portland cement. And The particle size distribution at the location prescribed in the guideline have emerged from this investigation.

[Chapter 3: The development of the method for measuring the dust concentration by means of digital camera]

In this chapter, the two types methods for measuring the dust concentration by means of digital camera were proposed. These methods use a photograph taken with flashlight. First, the photography connected with the dust concentration during sprayed concrete work in the tunnel was collected. Then, one of the methods calculates the dust concentration from the count value of dust. This method uses the particle size distribution surveyed in Chapter 2 and the density of the Portland cement. The other method converts the brightness value of the photography to the dust concentration by image processing.

[Chapter 4: The improvement of the method for measuring the dust concentration by image processing]

In this chapter, the methods for measuring the dust concentration by the image processing suggested with Chapter 3 were improved. And the methods for measuring the dust concentration by means of the neural network were suggested. The neural network is the computer algorithm that simulated human stimulation and reaction about the cerebral nerve organization. It was made clear that a change of the brightness by the difference of the irradiation angle of the flash light affects the dust concentration. Therefore I performed image processing to remove a change of the brightness of the whole image as much as possible. The procedure to apply a neural network is devised.

[Chapter 5: Field application test]

In this chapter, the field application test was executed during the sprayed concrete work in the tunnel construction. And the effectiveness of proposed two methods was verified.

[Chapter 6: Conclusion]

This chapter summarizes the study results obtained from Chapters 2 to 5.

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 粉じんによる健康障害	3
1.3 粉じん濃度測定法	7
1.3.1 粉じん濃度測定 of 歴史	7
1.3.2 各種粉じん濃度測定法の概要	9
1.4 既往研究と本研究の位置づけ	13
1.5 本研究の適用範囲	14
1.6 本研究の目的	15
1.7 本論文の構成	16
参考文献	19
第2章 吹付けコンクリート作業中に浮遊する粉じんの実態調査	21
2.1 はじめに	21
2.2 吹付けコンクリート	22
2.2.1 吹付け方式	22
2.2.2 使用材料	23
2.3 エネルギー分散型X線分析装置付き走査型電子顕微鏡	26
2.3.1 走査型電子顕微鏡	26
2.3.2 X線微量分析による元素分析	27
2.4 実験方法	28
2.4.1 現場概要	28
2.4.2 粉じんの採取方法	29
2.4.3 SEM/EDXによる分析方法	29
2.5 実験結果	30
2.5.1 表面形状の観察と元素分析	30
2.5.2 粒度分布	33
2.6 まとめ	39
参考文献	40

第3章	デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法の開発	43
3.1	はじめに	43
3.2	測定原理	44
3.3	本研究で使用するデジタルカメラと撮影方法	44
3.3.1	デジタルカメラ	45
3.3.2	ブラックパネル	48
3.3.3	フラッシュ撮影画像	48
3.4	散乱光数の計数による粉じん濃度測定法	50
3.4.1	概要	50
3.4.2	デジタルカメラの浮遊粉じん撮影範囲	51
3.5	画像処理による粉じん濃度測定法	58
3.5.1	概要	58
3.5.2	測定手順	58
3.6	本章で提案した二種類の測定法の有用性の検証	60
3.7	まとめ	62
	参考文献	64
第4章	画像処理による粉じん濃度測定法への ニューラルネットワークの適用	65
4.1	はじめに	65
4.2	フラッシュ撮影時に使用するデジタルカメラ	65
4.3	画像処理による粉じん濃度測定法の改良	68
4.3.1	前処理	69
4.3.2	識別と後処理	71
4.4	ANNを用いた画像処理による測定法の有用性の検証	76
4.4.1	実験概要	76
4.4.2	ブラックパネルの小型化	76
4.4.3	ANN構造の決定方法	77
4.4.4	ANNの学習と評価方法	79
4.4.5	実験結果	79
4.5	まとめ	85
	参考文献	86
第5章	現場適用実験	87
5.1	はじめに	87
5.2	実験方法	87

5.2.1	現場実験概要	87
5.2.2	散乱光計数による測定法の測定手順	89
5.2.3	ANN を用いた画像処理による測定法の測定手順	89
5.3	実験結果	90
5.3.1	粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像	90
5.3.2	ANN の構造	95
5.3.3	散乱光計数による測定法と ANN を用いた画像処理による 測定法の比較	97
5.4	まとめ	98
	参考文献	99
第 6 章	結論	101
6.1	本研究のまとめ	101
6.2	今後の課題と展望	103

第1章 序論

1.1 本研究の背景

トンネルを建設するためには、山岳工法、シールド工法、開削工法の3種類がある。これらの施工法は、トンネルの立地条件、特に地形・地質条件に応じて選定される。山岳トンネル工法は、文字通り山岳部にトンネルを掘るために適したトンネル施工法である。山岳トンネル工法（NATM）は、上部に地山を残しながら、図1-1に示すように、発破あるいは機械により掘削したのち、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工などの支保工で地山を支え、最後に場所打ちコンクリートによる覆工を打設して完成する¹⁾。この工法は、山岳地のトンネルばかりではなく、海底トンネルや、都市部のトンネルなどでも採用されるため、山岳トンネル工法で建設されたトンネルを山岳工法トンネルと呼ぶ場合もある²⁾。

山岳トンネル工法では、掘削、ずり出し、吹付けコンクリート等のほぼすべての作業工程において、粉じんが発生する。発生した粉じんは、坑内環境を悪化させ、作業員の健康を損なう原因となるため、近年、多くのじん肺訴訟が起き、社会問題となっていた。しかし、現在では、図1-2に示すように、粉じん障害防止に関する関係者の取組みや、

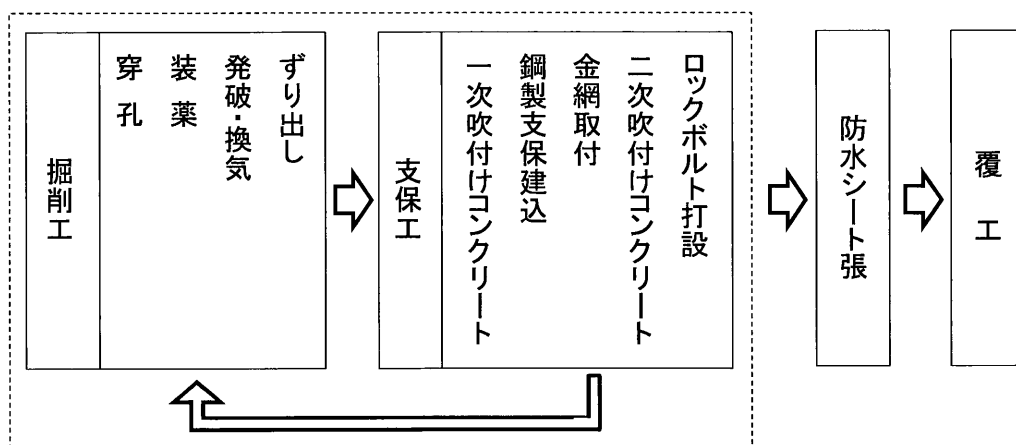


図1-1 山岳トンネル工法発破掘削（補助ベンチ付き全断面）の作業工程¹⁾

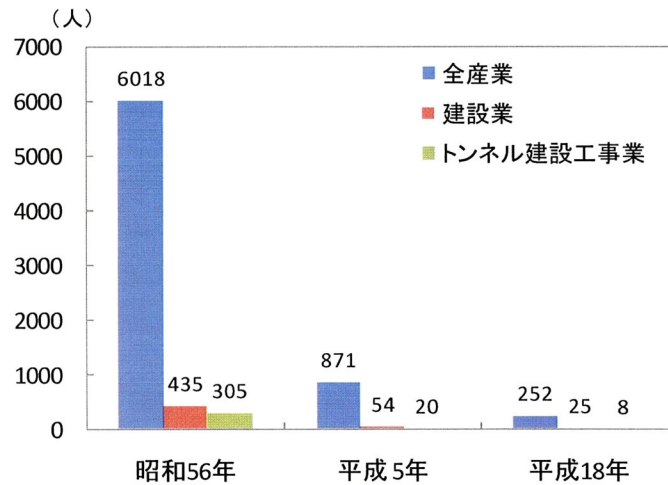


図 1-2 じん肺新規有所見者数の推移³⁾

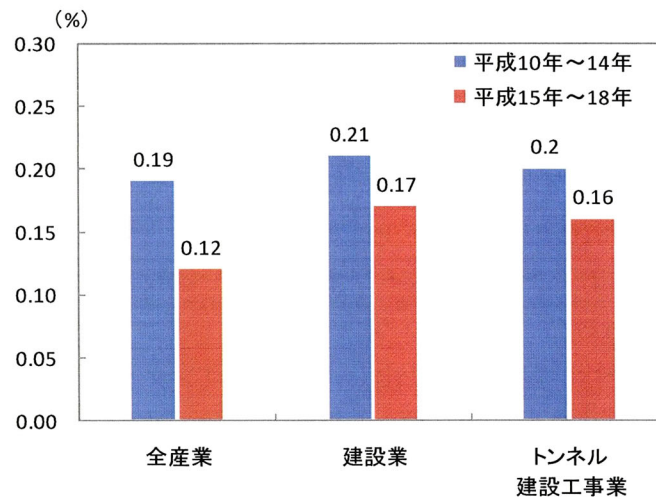


図 1-3 じん肺新規有所見者発生率の比較³⁾

施工技術，換気技術の進歩等により，トンネル工事におけるじん肺症の発生数は，大幅に減少してきている．それでも，図 1-3 に示すように，近年の技術進歩や作業方法の改善を行っても，粉じんの発生を完全に抑制することは難しく，なおも一定の粉じんがトンネル工事において発生し，それによると考えられるじん肺症発症へのリスクは完全に低減できていないのが現状である³⁾．

厚生労働省では，このような状況からトンネル建設工事における粉じん障害防止対策を強化するものとして，平成 19 年 12 月に粉じん障害防止規則の改正を行い，換気装置による換気の実施，空気中の粉じん濃度の測定，電動ファン付き呼吸用保護具の使用⁴⁾，発破終了後の措置等について義務付けを行った．これに伴い，平成 12 年に策定された「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」（以下，本文中では“ガ

イドライン”と略称する)が改正された。この改正により、トンネル掘削作業中の粉じん濃度は、掘削切羽からトンネル坑口に向かって50m地点で光散乱式デジタル粉じん計で測定し、その粉じん濃度を $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下とする目標レベルが設定された⁵⁾。

現在、トンネル建設現場では、この粉じん濃度目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下を達成するために、使用材料の工夫などの発生源対策、ならびに換気設備や集じん設備による粉じん発生量の低減や除去方法などの対策が講じられている。具体的には、吹付けコンクリートへの粉じん抑制剤の添加や石炭灰の混合によって、吹付けコンクリート作業における粉じん発生自体を抑制する方法等が考案され実施されている。また、発生後の粉じん処理には、電気集じん機の使用⁶⁾やエアーカーテン⁷⁾などにより切羽付近の粉じん拡散を抑えて、局所換気により粉じんを隔離・収集する方法などが行われている⁸⁾。また、作業員個々の保護としては、吹付け機の遠隔操作や電動ファン付き防塵マスクの使用などの対策が実施されている。

1.2 粉じんによる健康障害

空気中には、自動車の排ガス、自動車がまきあげる道路上の砂ぼこり、風により遠くから運ばれてくる砂じん、火山灰、工場等から排出される煙、灰、すす等さまざまな粉じんが浮遊している⁹⁾。その粉じんを長期間にわたって吸入することにより起こる肺の機能障害にじん肺症があり、じん肺法により「粉じんを吸入することによって肺に生じた繊維増殖性変化を主体とする疾患」と定義されている。

呼吸器の構造を図1-4に示す。この図に示すように、吸入された空気は、気管、気管支、細気管支を通して肺胞と呼ばれる袋状の器官に達し、その周囲を囲むように走っている毛細血管の中に酸素が溶けこんでいく。二酸化炭素は、逆に毛細血管の中を流れている血液から肺胞の中に出てくる。

空気とともに吸引された粉じん粒子はその粒径の違いにより異なる部位で沈着する。吸入された空気に含まれる粒子の部位別の沈着率を図1-5に示す。この図から、一般的には粒径が $10\mu\text{m}$ 以上の大きな粉じんは、鼻腔や咽喉部に付着し、食道を通して飲み込まれたり、たんとして体外に排出される。 $5\mu\text{m}$ 付近の粉じんの多くは、上部呼吸気道に沈着し、気管支の粘液で覆われた絨毛に付着し、絨毛運動によって、咽喉部へ戻され、たんじ交じって体外へ排出されたり、一部は食道を通して消化器官に入る。しかし、粉じんの吸入量が多い場合や絨毛運動の機能が低下している場合などで、除去できなかった粉じんは、肺胞まで到達し、肺胞に沈着する¹⁰⁾。肺胞への沈着率が高くじん肺症を起こしやすい粉じんの粒径は $1\sim 2\mu\text{m}$ が最も顕著であるとされている。これより粒径が小さくなると沈着率は減少するが、粒径が $0.4\mu\text{m}$ 以下になると再び沈着率が増加すると言

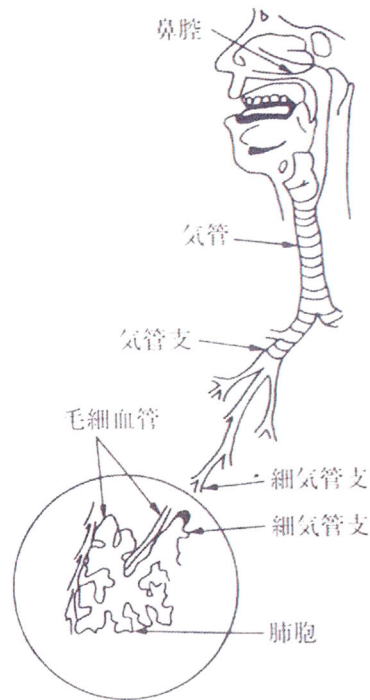


図 1-4 人の呼吸器の構造¹⁰⁾

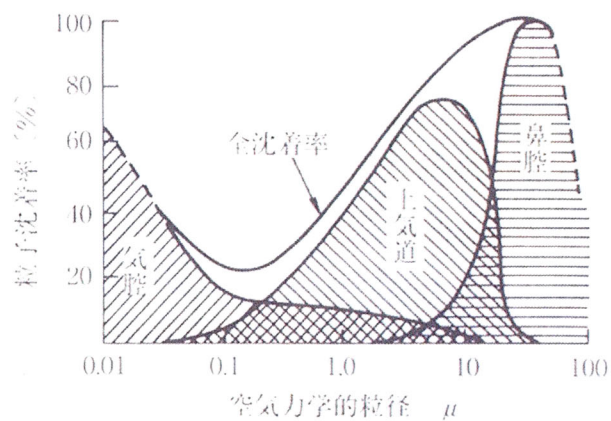


図 1-5 粒子の粒度別呼吸器内全沈着率と部位別沈着率¹¹⁾

われている¹¹⁾。

図 1-6 に粉じんの侵入経路を示す。肺胞内に沈着した難溶性の粉じん粒子は、喰細胞にとりこまれ、肺の血管や気管支周囲の肺間質に侵入し、リンパ腺に運ばれ蓄積する。その後、0.5~1.0mm を超える繊維結節が発生する¹²⁾。加えて、難溶性の粒子は、肺胞内が無気流・無繊毛のため、体外に排出されにくいいため、体内滞留時間は極めて長く、有害作用は長期にわたって持続する。一方、可溶性の粉じん粒子は、肺胞内で溶解して毛細血管に溶出し、一部はリンパ液や喰細胞を介して化学物質と親和性の強い臓器に蓄積し、その後徐々に排せつされる。

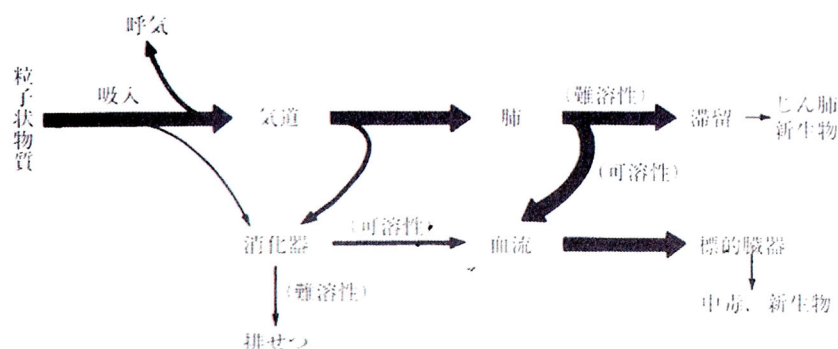


図 1-6 粉じんの侵入経路¹³⁾

表 1-1 じん肺症の種類¹⁴⁾

起因物質	じん肺症の種類		発生現場
遊離けい酸	けい肺	典型	約30%以上の遊離けい酸じん発生職場、金属鉱山、石工、耐火れんが、硝子工場など
		非典型	約20%以下の遊離けい酸じん発生職場、鋳物など
		急進	サンドブラスト、けい石粉碎など多量発じん職場など
けい酸化合物	石綿肺		石綿の開綿、紡績、石綿ストレートの製造など
	滑石肺		滑石粉碎職場、ゴム工場など
	ろう石肺		るつぼ工場、その他産業
	けい藻土肺		けい藻土工場、採掘
アルミニウムとアルミニウム化合物	アルミニウム肺		アルミ粉製造工場、その他
	アルミナ肺		アルミ再製工場、アルミ製造
鉄化合物	溶接じん肺		各種産業の溶接
	硫化焼鋳肺		焼鋳運搬、処理
	硫化鋳肺		硫化鋳山、硫安工場など
炭素	黒鉛肺		黒鉛工場、電極工場、黒鉛の採鋳
	炭素肺		製墨工場、カーボンブラック工場
	活性炭肺		活性炭製造工場
	炭鋳肺		炭鋳の採炭職場

わが国の法規制ではじん肺症の対象となる粉じんの種類は、土石、岩石、鋳物、研磨材、ガラスまたはほうろうの原料、陶磁器の原料、耐火物、けい藻土、滑石、クレー、炭素、セメント、アルミニウム、砂、炉、煙道、煙突内に堆積した鋳さい、灰、金属溶射、アール溶接、フライアッシュ、石綿、染土などがある。また、粉じんが発生する作業の形態としては、粉碎、ふるい分け、炉への投入、積み込みや積み下ろし、袋詰め、かき落とし、その他いわゆる鋳物性粉じんが発散する作業などがある。じん肺症の種類

表 1-2 粉じんの許容濃度¹⁵⁾I. 吸入性結晶質シリカ^{#,w,*}許容濃度 0.03 mg/m³

II. 各種粉じん

	粉じんの種類	許容濃度 (mg/m ³)	
		吸入性粉じん*	総粉じん**
第1種粉じん	滑石, ろう石, アルミニウム, アルミナ, 珪藻土, 硫化鉍, 硫化焼鉍, ベントナイト, カオリナイト, 活性炭, 黒鉛	0.5	2
第2種粉じん	遊離けい酸10%未満の鉍物性粉じん, 酸化鉄, カーボンブラック, 石炭, 酸化亜鉛, 二酸化チタン, ポートランドセメント, 大理石, 線香材料粉じん, 穀粉, 綿じん, 木粉, 草粉, コルク粉, ベークライト	1	4
第3種粉じん	石灰石 [†] , その他の無機及び有機粉じん	2	8

* 吸入性粉じん：以下に示す分粒特性を有する分粒装置を通過した粒子を吸入性粉じんとする

$$P = 1 - D^2/D_0^2 \quad (D \leq D_0), \quad P = 0 \quad (D > D_0)$$

ここに, P:透過率, D:粉じんの相対沈降径(μm), D₀:7.07μmただし, 吸入性結晶質シリカは以下の捕集率R(d_{ae})で捕集された粒子の質量濃度である.

$$R(d_{ae}) = 0.5[1 + \exp(-0.06d_{ae}) \cdot \{1 - F(x)\}]$$

d_{ae}: 空気動力学粒子径(μm), F(x): 標準正規ランダム変数の累積確率関数x = ln(d_{ae}/Γ)/ln(Σ), ln 自然対数, Γ=4.25μm, Σ=1.5

** 総粉じん：捕集器の入り口における流速を0.5~0.8m/sとして捕集した粉じんを総粉じんとする.

† 石綿繊維および1%以上の結晶質シリカを含まないこと.

‡ 発がん以外の健康影響を指標として許容濃度が示されている物質.

を起因物質により分類すると表 1-1 のようになる。粉じんの健康への影響には、肺胞まで進入してじん肺症を引き起こす恐れのある粉じん（以下、吸入性粉じん）の測定が重要である。吸入性粉じんの種類とその粉じんの濃度の関係は、粉じんの許容濃度として日本産業衛生学会より明らかにされており、日本産業衛生学会が示す粉じんの許容濃度を表 1-2 に示す。肺への機能障害が強い遊離けい酸を含んだ粉じんは、その遊離けい酸が粉じんに占める割合が 10%を超えた場合、表 1-2 に示された吸入性粉じんの計算式より求めるため、粉じん中の遊離けい酸含有率が高くなるほど許容濃度は小さく厳しくなるようになっている。言い換えれば、遊離けい酸を多く含む粉じんほど人に対して有害ということになる¹⁶⁾。

1.3 粉じん濃度測定法

1.3.1 粉じん濃度測定¹⁷⁾の歴史

粉じん濃度を測定する場合、環境中の空気を吸引するポンプ、粉じんを捕集するためのろ紙、ろ紙に捕集された粉じん量を正確に秤量するための天秤などが揃わなければ、粉じん濃度 (mg/m^3) を求めることはできない。現在のように、 0.01mg まで秤量できるような電子天秤も、 $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒子を 95%以上捕集できるようなろ紙もなかった時代では、その時代のそれぞれの技術レベルに合った粉じん濃度測定器が開発されていた。

粉じん濃度が測定され始めた最初は、労働衛生の分野ではなく、気象学の分野で、それも 19 世紀の末頃からであった。1922 年、L.Greenburg が発明したインピンジャーによる方法が古く、米国では、1970 年頃まで粒子数濃度を測定するための標準的な方法として用いられていた。精度の良い天秤と捕集率の高いろ紙がなかったものの、ろ紙を用いた質量濃度測定は古くから行われていた。しかし、1930 年代の粉じん濃度は、一定空気中に何個の粉じんが存在するかを測定する粒子数濃度測定法であり、その単位も“個/c.c.”であった。当時、質量濃度の測定に適したろ紙はなかったものの、高価ではあったが光学顕微鏡があったので、粉じんの数を光学顕微鏡で数える方法によって粉じん濃度を測定していた。ただ、粉じんの粒子数濃度の場合、個数を人の目によって数えるため、熟練者と初心者の違いが粉じん濃度に大きな影響を与えるため、人によって環境濃度が大きく作用されるといった状況が生じる。そこで、測定者の熟練者と初心者の差がなくいずれの人が行っても同じ測定結果の得られる粉じん濃度測定器の開発が望まれた。

そうした状況を受けて開発されたかどうかは定かではないが、ドイツのライツ社により、空気中の浮遊粉じんの量によって、その散乱光（チンダル現象）の強さが異なることを利用したチンダルメーターが製造された。その後、日本では 1958 年に興により、光散乱を利用した相対濃度計が開発され、改良を施されながらデジタル粉じん計として現在に至っている。

また、同じ相対濃度粉じん計の中では、光散乱方式のデジタル粉じん計の他に、光吸収方式の原理を利用した相対濃度粉じん計の開発も試みられ、1954 年に三浦、木村により、光吸収の原理を利用した労研式ろ紙塵埃計が開発された¹⁸⁾。その後、科学技術が進むに従って、ピエゾバランス（電子天秤）¹⁹⁾、 β 線²⁰⁾およびレーザーなどを用いた粉じん濃度測定器も開発されている。

質量濃度測定法は、1950 年代に入り、主として、核爆発に由来する大気中の放射性粒子を監視するため、および大気汚染の監視のためなどに用いられていた。当時のろ紙は、粉じん捕集のための専用のろ紙ではなく、セルローズ繊維製ろ紙や、化学分析の定量用のろ紙を用いていた。吸入ポンプや粉じん測定用としてのろ紙の開発も進み、質量

濃度測定が行えるようになったのは、1960年代の後半からのようである。また、粒径別に粉じん濃度が測れるようになったのは、1970年代前半からである。粉じんとじん肺症との関係から Hatch らが、粉じんの粒径とじん肺症の関わりあいに関する研究論文を發表している。そうした研究論文を受けて、英国 (British Medical Research Council) では、分粒特性として表 1-3 (a) に示すような分粒特性を規定し、その特性にて補修した粉じんを吸入性粉じんとした。また、米国 (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 以下“ACGIH”と略称する) は表 1-3 (b) に示すような分粒特性を規定し、その特性にて捕集した粉じんを吸入性粉じんとした。

英国と米国の分粒特性の関係をそれぞれ図 1-7 に示す。そうした特性に合う分粒装置として、英国では多段型の分粒装置²¹⁾、米国ではナイロンサイクロン型の分粒装置²²⁾

表 1-3 英国と米国における分級特性¹⁷⁾

(a) 英国における吸入性粉じんの標準

(b) 米国における吸入性粉じんの標準

粒径 (μm)	分粒装置の捕集率 (%)
2.2	10
3.2	20
3.9	30
4.5	40
5.0	50
5.5	60
5.9	70
6.3	80
6.7	90
≥ 7.1	100

粒径 (μm)	分粒装置の捕集率 (%)
2.0	10
2.5	25
3.5	50
5.0	75
≥ 10	100

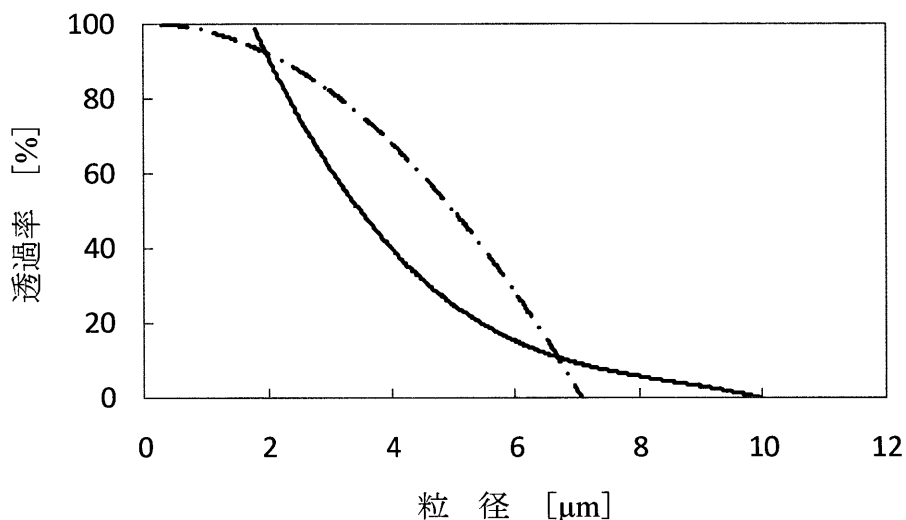


図 1-7 英国と米国の分粒特性の比較¹⁷⁾

を採用した。わが国は、日本産業衛生学会から、粉じんに関する許容濃度の勧告が行われ、測定対象の粉じん粒径範囲を「環境中に浮遊する粉じんのうち、およそ $5\mu\text{m}$ 以下の粒子について、濃度測定を行う」と規定した。そのため、日本では、英国と同様な分粒特性の分粒装置を用いることになった。その分粒特性は、以下に示すとおりである。

日本産業衛生学会が定期した許容濃度に示された吸入性粉じんの定義は、「“P=1-D2/D02” の分粒特性を持った分粒装置で、ろ紙上に捕集された粉じんを吸入性粉じんとする」と定義し、すなわち、粒径 $5\mu\text{m}$ の粉じんに対して 50%カットする分粒装置で捕集するとした。

1993年に欧州規格委員会（CEN）によって、「粒子の吸入、並びに沈着による影響及び許容度などは、個人によって大きく異なる。それにも関わらず、サンプリングの目的が健康に関するものであれば、サンプリングする浮遊粉じん中の粒径領域について、一定の取り決めを行う必要がある」との理由から、吸入性粉じんを捕集するための分粒装置の分粒特性を、「 $4\mu\text{m}$, 50%カット」の基準とすることが採択され、欧州基準（EN481）となった。この欧州基準は、ドイツ工業規格（DIN）により運営されている CEN/TC137 の「作業環境評価技術委員会」によりまとめられ、正式投票により 18ヶ国で採択された。その後、ISO7708²³⁾や米国（ACGIH）でもこの欧州基準を採択し、現在に至っている。こうした流れを受けて、我が国においても、粉じん測定について、その管理濃度の変更及び吸入性粉じんの分粒特性の変更について検討を行ない、2005年に規則改正が行われ、分粒装置について「 $4\mu\text{m}$, 50%カット」の基準を採用することになった。

1.3.2 各種粉じん濃度測定法の概要²⁴⁾

粉じん濃度測定法には、粉じんの粒子数濃度を測定する粒子数濃度測定法、光の散乱や吸収を利用した相対濃度測定法、および、ろ紙を用いて空気中の粉じんの質量を求め質量濃度測定法の3種類がある。トンネル工事における粉じん濃度測定には、相対濃度測定法での測定が義務付けられている。そこで、以下に相対濃度測定法について述べるとともに、個数濃度測定法と質量濃度測定法の概要を示す。

(1) 相対濃度測定法

相対濃度とは、粉じんの絶対濃度（質量濃度あるいは個数濃度）と1対1の関係にある物理量のこと、相対濃度の数値は絶対濃度だけでなく、当該粉じんの粒径分布、比重、光学的性質、形態などの影響を受ける。相対濃度計は、通常、1～2分で粉じん濃度を測定することができ、取り扱いが簡単で、特別な熟練を必要とせず、取り扱い上の個人差がすくない。また、電池を内蔵し、交流電源を必要としないものが多いなどの特徴を有する。相対濃度計には、光散乱方式、光吸収方式、圧電天秤方式、 β 線吸収方式などがある。以下に光散乱方式と圧電天秤方式の測定機器の概要を示す。

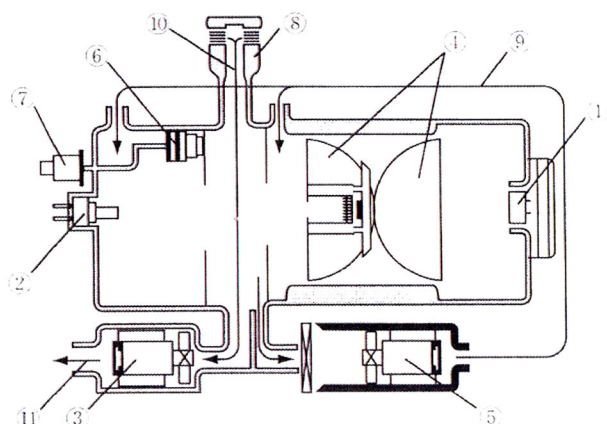
i) 光散乱方式の測定機器

空気中に浮遊している粒子に光を照射すると粒子によって光は散乱される。散乱光の強さは、光学系と粒子の物性が一定であれば粉じん濃度に比例する。散乱光の強さを測定し、その値から粉じんの濃度を求める方式である。この方式の測定機器としては、白熱球を光源とした粉じん計 P-5 型, 3411 型, レーザーを光源とした粉じん計 LD-1 型, LD-3K 型, LD-3K2 型, LD-2 型, 3423 型, 3451 型などがある。体系的な粉じん計として、LD-3K2 型について、その測定原理と構造について述べる。

測定原理としては、従来の粉じん計と同様、暗箱中の浮遊粉じんに光を照射したとき、粉じんの系が同じなら粉じんによる光散乱量は質量濃度に比例することを利用して



写真 1-1 光散乱式デジタル粉じん計 (LD-3K2) ²⁵⁾



- | | | |
|---------------|--------------|------|
| ① フォトダイオード | ⑥ 標準散乱板 | ⑪ 排気 |
| ② レーザーダイオード | ⑦ 感度合わせ切替えノブ | |
| ③ 吸引用ファンモーター | ⑧ 採気口 | |
| ④ レンズ | ⑨ パージエア経路 | |
| ⑤ パージ用ファンモーター | ⑩ 試料空気経路 | |

図 1-8 光散乱式デジタル粉じん計 (LD-3K2) の内部構造 ²⁶⁾

る。LD-3K2の外観を写真1-1に示し、その内部構造を図1-8に示す。周囲の光をさえぎり、風向風速の影響を抑えかつ落下粉じんの侵入を防止するため、側方から吸気する吸引口があり、吸入用ファンで吸引された試料空気の流れは、エアースリットで仕切られた光散乱部でレーザー光と直角に交差するようになっている。一方、フィルターとファンの組み合わせで作られた清浄空気は、パージエアーとして光学系を保護するとともに、分離管で試料空気と分離されるようになっているので、採気口をキャップで塞ぐと光散乱部は数秒でパージエアーで満たされる。この状態で零点調整と感度合わせを行う。校正粒子はラテックスである。

ii) 圧電天秤（ピエゾバランス）方式の測定機器

圧電結晶板が一定の周波数で振動しているとき、結晶板の質量が変化すると、変化量に比例した周波数の変化が起こる。この現象を利用して粉じんの質量濃度を測定する方式である。この方式の測定機器としては、ピエゾバランス粉じん計3521型があり、その測定原理と構造を示す。

測定原理としては、AT型の水素板を厚みせん段モードで振動させておき、その表面に電気集じん法によって粉じんを捕集し、周波数の変化から粉じんの相対濃度を求めようとするものである。写真1-2にピエゾバランス粉じん計3521型の外観を示し、図1-9には、その内部構造の概略を示す。吸引ポンプを作動させ試料空気を入口から一定流量（1 l/min）で吸引し、慣性衝突分離方式の分粒装置（インパクター）を通過し、粒子は静電捕集部に入る。

静電捕集部で粒子はコロナ放電によって荷電され、受感部上に捕集される。1回の測



写真1-2 ピエゾバランス粉じん計 (3521) ¹⁹⁾

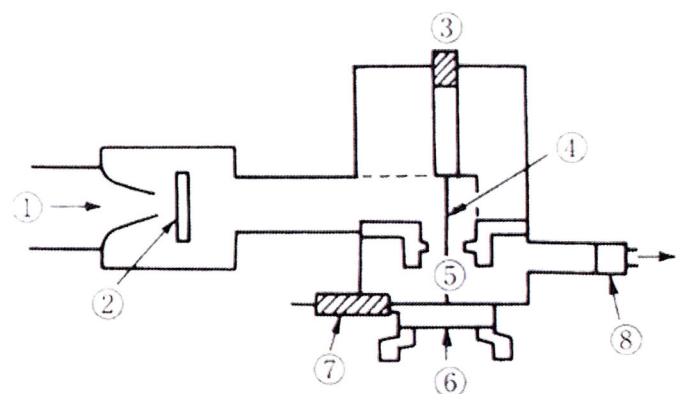
定時間は24秒あるいは120秒にセットすることができる。測定時間を24秒としたときは2秒ごとに、また120秒としたときには10秒ごとに初期周波数からの変化がデジタル表示される。所定の測定時間が経過すると変化した周波数に一定の係数が乗じられ、表示器に mg/m^3 に換算された数値が表示されるようになっている。結晶素子（水晶）上の堆積物 $1\mu\text{g}$ 周波数変化量は約180Hzである。なお、表示器に表示された値は、直接当該粉じんの質量を示すものではなく、質量濃度との併行測定によって得られた質量濃度変換係数を乗じて質量濃度を求めなければならない。受感部上に付着した粉じんは、スポンジに洗剤を含浸させた清浄装置で洗浄除去することができる。校正粒子は溶接ヒュームである²⁷⁾。

(2) 個数濃度測定法

一定量の空気中の粉じん粒子をガラス板に付着させ、光学顕微鏡を用いて、その粉じん粒子の個数を計数する方法で、労研式塵埃計、粉研式コニメーター等がその代表である。

i) 労研式塵埃計

労研式塵埃計は給湿管、吸引ポンプおよび吸着装置の3部分からできている。給湿管は長さ15cm、直径4.5cmの円管で、内部に素焼きの円管が挿入されている。素焼きを湿らすことで円管内空気の湿度を飽和状態にする。この状態で、一定空気を円管内に導入した後、ポンプを急速に引くことにより、長さ10mm、幅0.1mmのスリットを通過した粉じんが吸着部分に衝突・付着する。付着した粉塵の粒子数を生物顕微鏡を用い斜光法で400倍にて直接検鏡する²⁸⁾。



- | | |
|------------|-------------|
| ①：試料空気の吸入口 | ⑤：コロナ放電空間 |
| ②：インパクター | ⑥：受感部(センサー) |
| ③：高圧電源接結部 | ⑦：受感部洗浄装置 |
| ④：放電電極 | ⑧：吸引ポンプ |

図1-9 ピエゾバランス粉じん計(3521)の内部構造²⁷⁾

(3) 質量濃度測定法

空気中から粉じんをろ紙などを用いて捕集，秤量することにより空気中の質量濃度を求める方法で，以下に示す方式がある．

i) 重力沈降方式

粉じんを含んだ空気が水平動する間に沈降速度の大きな粗大粒子のみが重力沈降して，微細な粒子は気流と共に水平移動する．この原理により，吸入性粉じんより大きい粗大粒子を除くのが重力沈降方式である．この方式の測定機器としては，多段型分粒装置付ローボリウムサンプラー，113A 等がある．

ii) 慣性衝突方式

空気中に浮遊する粒子は，空気の流れの方向と同じ方向，同じ速度で移動している．この空気の流れが急に変化すると粒子は，その粒子の質量に応じた慣性力を持ち，粒径が大きい場合は，気流の流れから外れてしまう．この原理を利用して，粒子を含んだ気流を衝突板に吹き付け，大きい粒子を衝突板上に捕集し，小さな粒子（吸引性粉じん）をろ紙上に捕集するのが慣性衝突方式である．この方式の測定機器としては，労研式 T・R サンプラー²⁹⁾，ハイボリウムエアサンプラー，アンダセンサンプラー等がある．

iii) 遠心力方式

空気中で浮遊し円運動している粒子は，遠心力のために円運動の中心から遠ざかるような力を受ける．そのため，大きな粒子は比較的捕集されやすく，小さな粒子は比較的捕集され難い．この原理を利用して粉じんを分離するのが遠心力方式であり，この方式の測定機器としては，ナイロンサイクロン³⁰⁾等がある．

1.4 既往研究と本研究の位置づけ

これまでに述べた通り，人々は，古くから粉じんによる健康障害に苦しんできた．しかし，浮遊している粉じんは，とても小さく目視することができない．そこで，粉じんの危険性を測る方法として，粉じんを捕集する方法，その濃度の測定する方法に関する研究が行われてきた．しかし，これまで開発されてきた粉じん濃度測定器は，いずれも専門知識を有する技術者が使用する測定器であり，取り扱いが全般に面倒で，かつ高価な点で問題があった．そこで，本研究では，より簡単で安価な粉じん濃度の測定方法として，デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法を提案する．既存研究における本研究の位置づけを図 1-10 に示す．

すなわち、本研究は、相対濃度測定法の一つで、粉じんに対し、明るい光を照射した場合の粉じんの散乱光を利用する。同様の原理に基づく測定方式には、光散乱式デジタル粉じん計があり、トンネル坑内の粉じん濃度を測定する方法として、ガイドラインにおいて、光散乱式デジタル粉じん計による測定が規定されている。また、この現象を利用して浮遊粉じんが多く発生する作業空間を暗くし、対象に強い光を照射することで浮遊粉じんの発生状況をカメラで画像として記録する方法も提案されている³¹⁾。その他には、散乱光を撮影した画像から散乱光強度、輝度を解析し、粉じんの個数、濃度及び粒径を測定する方法が研究されている。

本研究は、市販されているコンパクトデジタルカメラ（以下、“デジタルカメラ”と略称する）のフラッシュ機能を使用し、フラッシュ光を粉じんに照射し、その散乱光を画像として記録する。そのため、これまでの粉じん濃度測定器に比べて、取り扱いが容易でかつ安価である。

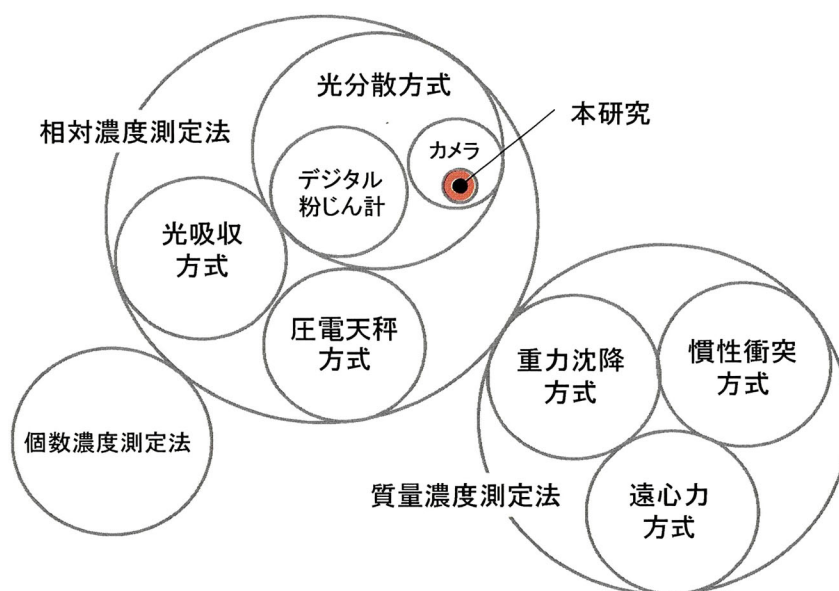


図 1-10 粉じん濃度測定法における本研究の位置づけ

1.5 本研究の適用範囲

山岳トンネル工法での建設工事が行われているトンネル坑内での粉じん濃度測定結果の一例を図 1-11 に示す。この図から、トンネル坑内作業で粉じん濃度が高い作業は爆薬を発破して切羽の岩石を破壊する発破作業であることがわかる。しかし、この間、

坑内作業は、一時中断し、発破直後から速やかに換気作業が実施されるため作業員への健康被害は軽微と考えられる。一方、同図中に示す吹付けコンクリート作業中は、長時間粉じん濃度が高い状態が続くことがわかる³²⁾。そのため、トンネル坑内での作業工程の中で、吹付けコンクリート作業が最も健康に悪影響を及ぼすと考えられる。

そこで、本研究では、吹付けコンクリート作業中の粉じん濃度を主な対象とし、デジタルカメラを使用した簡易的な粉じん濃度測定法の開発を目的とした研究を行う。

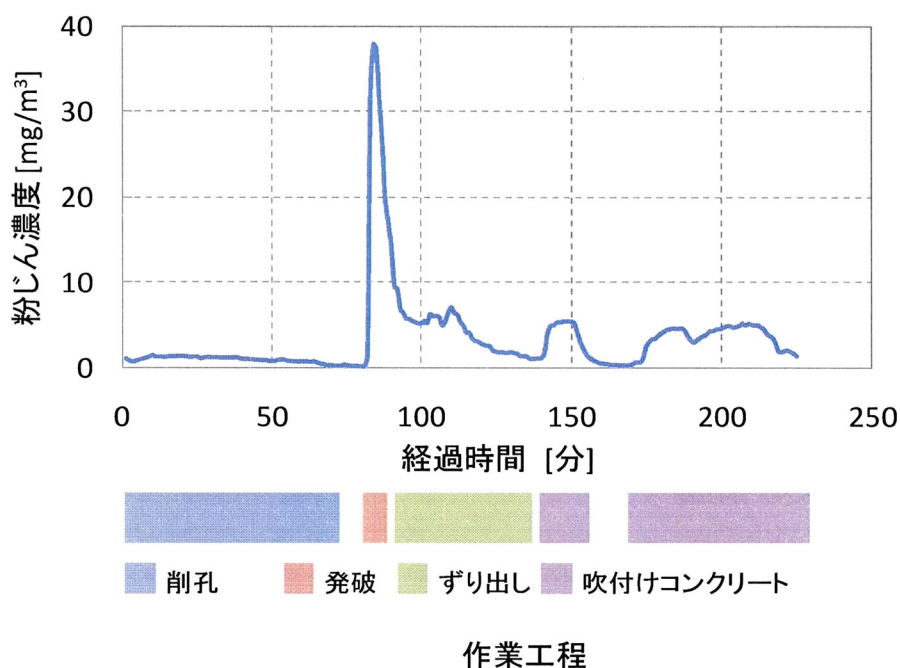


図 1-11 トンネル坑内作業中の粉じん濃度測定例

1.6 本研究の目的

これまで述べたように、近年のトンネル建設技術の進歩や作業方法の改善にも関わらず、粉じんの発生を十分抑制することはできず、トンネル坑内でのじん肺症の発症リスクをコントロールできていないのが現状である。そのため、粉じん濃度測定的重要性が増しているだけでなく、粉じん濃度が低く保たれている状況を確認するためにも、より簡便で安価な粉じん濃度測定方法が望まれている。

この問題を解決するために、本研究では、一般に市販されているコンパクトデジタルカメラのフラッシュ機能を利用した粉じん濃度測定法を提案する。本測定法は、トンネル坑内のような閉空間において、カメラでフラッシュ撮影を行うと、フラッシュ光が浮遊粉じんなどに反射して白斑として撮影される現象を利用した測定方法である。加えて、

デジタルカメラは、撮影したその場で画像を確認できること、画像自体もデジタル化されており画像処理しやすいことなどのデジタルカメラの特有の性能向上と、販売価格の低下によりメリットを有する。その上、粉じんの浮遊状況画像としても利用できる。

トンネル坑内で吹付けコンクリート作業時に浮遊する粉じんは、吹付けコンクリートの普通ポルトランドセメント成分であると考えられているが、未確認であった。そこで、浮遊粉じんが主に普通ポルトランドセメント成分であることを確認し、粉じん濃度測定法の開発に利用するため、本研究で測定対象とした吹付けコンクリート作業中に、トンネル坑内を浮遊する粉じんを採取し、浮遊する粉じんの形状、成分、粒度分布を調査する。

次に、デジタルカメラを使用した粉じん濃度測定方法を開発するために、本研究で対象とする吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタル粉じん計による粉じん濃度測定と同期させながら、フラッシュ撮影画像を収集する。そして、粉じん濃度とフラッシュ撮影画像をもとに粉じん濃度測定法の開発を行い、簡便で安価なデジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法を提案する。

1.7 本論文の構成

本論文は、第1章から第6章で構成した。各章の概要は以下に示すとおりである。

【第1章 序論】

本章では、トンネル坑内での粉じん濃度測定方法の現状を整理し、建設現場に必要とされる技術が、簡易に粉じん濃度を測定できる技術であることを明らかにする。そして、本研究では、より迅速で簡単な測定方法として、デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法の提案することを示し、論文の構成と概要を説明する。

【第2章 吹付けコンクリート作業中に浮遊する粉じんの実態調査】

本章では、吹付けコンクリート作業時にトンネル坑内を浮遊する粉じんの形態、成分を電子顕微鏡で分析し、浮遊粉じんの大部分がセメント成分に極めて類似していることを確認するとともに、トンネル坑内を浮遊する粉じんの粒度分布状況を明らかにする。

【第3章 デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法の開発】

本章では、実態調査に基づき、デジタルカメラによるフラッシュ撮影画像を利用した粉じん濃度測定法を提案する。すなわち、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内で、粉じん濃度との関係性を検討するために、デジタル粉じん計での測定と同期させながら

フラッシュ撮影を行い、粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集する。次に、フラッシュ撮影した画像に記録された散乱光を計数し、粉じん濃度に換算する測定法を提案する。この測定法は、第2章において明らかにした粒度分布とフラッシュ撮影画像の計数値からデジタルカメラに撮影された粉じんの重さを求め、あらかじめ調べておいたデジタルカメラで粉じんが撮影できる空間で除することで、粉じん濃度を測定する方法である。次に、フラッシュ撮影した画像に粉じんの散乱光が多く写れば写るほど、画像は明るく輝度値が高くなることを利用し、粉じん濃度に換算する測定法を提案する。

【第4章 画像処理による粉じん濃度測定法へのニューラルネットワークの適用】

本章では、第3章で提案した画像処理による粉じん濃度測定方法の精度向上と更なる実用化を目指し、人間の刺激と反応に関する脳神経組織の働きを数学的に模擬したコンピュータアルゴリズムであるニューラルネットワークを用いた粉じん濃度測定方法を提案する。その際、フラッシュ光の照射角度の違いによる輝度の変化が粉じん濃度測定精度に大きく影響を与えるため、画像全体の輝度の変化を極力除去する画像処理を行ったうえでニューラルネットワークを適用する手順を新たに追加する。

【第5章 現場適用実験】

本章では、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタルカメラでのフラッシュ撮影を行い、本研究で提案する2つの粉じん濃度測定法の有用性を検証する。

【第6章 結論】

本章では、本研究で得られた知見と課題を整理し、本論文の結論とする。

図1-12に本論文の構成を示す。

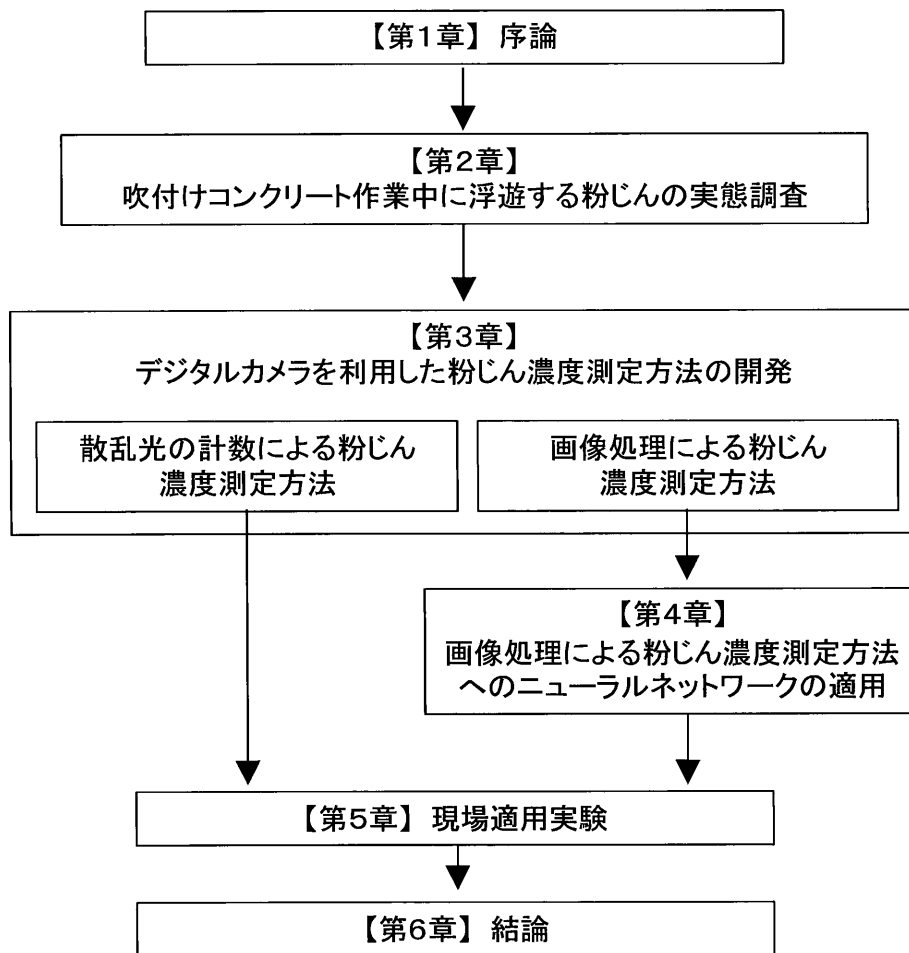


図 1-12 本論文の構成

参考文献

- 1) 土木施工研究会：改訂4版 土木施工の実際と解説，p.519，2006.
- 2) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ24 山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで，地盤工学会，p.2，2007.
- 3) 厚生労働省：ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン，p.2，2008.
- 4) 木村菊二，山田比路史，円城寺 隆治：電動ファン付き呼吸用保護具の性能に関する実験的研究(第2報)，産業衛生学雑誌，Vol.44，p.422，2002.
- 5) 厚生労働省：ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン，p.8，2008.
- 6) 鈴木直也，東孝弘，小俣 雅史：道路トンネルにおける側面設置式電気集じん機の性能評価，日本機械学会2004年度年次大会講演論文集，pp.421-422，2004.
- 7) 萩原智寿，山田謙二，反り目好男ほか：新しいトンネル掘削方法の取組み(その2) 一切羽集じん換気方式による粉じんガイドラインの達成実績一，土木学会第57回年次学術講演会，2002.
- 8) 前掲2)，p.116.
- 9) 名古屋俊士：おもしろい粉のはなし，日刊工業新聞社，p.9，1993.
- 10) 吉井千春，森本泰夫，城戸優光：溶接工肺—溶接ヒュームによる肺障害—，エアロゾル研究，Vol.20，No.3，pp.238-242，2005.
- 11) 名古屋俊士：粉じんの健康影響とその最近動向について，セイフティダイジェスト，Vol.55，No.4，pp.12-19，2009.
- 12) 日本作業環境測定協会：新訂 作業環境測定のための労働衛生の知識，日本作業環境測定協会，p.25，2005.
- 13) 佐野辰雄：粉塵による障害，Vol.12，No.3，p.173，1966.
- 14) 前掲12)，p.47.
- 15) 日本産業衛生学会：許容濃度等の勧告(2009年度)，産業衛生雑誌，Vol.51，pp.98-123，2009.
- 16) 名古屋俊士：おもしろい粉のはなし，日刊工業新聞社，pp.199-203，1993.
- 17) 名古屋俊士：粉じん濃度測定の変遷(その2)，骨材資源，No.87，pp.184-186，1990.
- 18) 石川知福，江田周三：労研式塵埃計，醫科器械學雑誌，Vol.13，No.6，pp.294-298，1935.
- 19) 上山幸司，横山辰巳：ピエゾバランス式粉じん計MODEL3521について，作業環境，Vol.26，No.5，pp.26-30，2005.
- 20) 本間克典： β 線吸収式粉じん質量濃度計GCA 101-1およびGCA 201の特性評価，産業医学，Vol.22，No.6，pp.627，1980.

- 21) 明星敏彦：作業環境測定基準に基づく吸入性粉じんとロウポリウムサンプラ用多段分粒装置の性能評価，産業衛生学雑誌，Vol.47，No.6，pp.239-245，2005.
- 22) 池森亀鶴：サイクロン型乾式分級器による粉，粒体の分級，日本機械学会誌，Vol.59，No.446，pp.197-201，1956.
- 23) ISO 7708：Air quality—*Particle size fraction definitions for health-related sampling*，1995.
- 24) 前掲 17)，PP.186-193.
- 25) 柴田科学：柴田科学総合カタログ 2009/2010年版，p.29，柴田科学，2009.
- 26) 日本作業環境測定協会編，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，p.56，2005.
- 27) 前掲 26)，p.59.
- 28) 石川知福，江田周三：労研式塵埃計の構造と該器による塵埃計数法，醫科器械學雜誌，Vol.14，No.4，pp.152-159，1936.
- 29) 保利一，黒木孝一，葉山勝美ほか：溶接作業現場における環境および個人曝露粉じんの測定，産業医科大学雑誌，Vol.17，No.4，pp.247-259，1995.
- 30) 本間克典：粉じん用個人サンプラーに用いられる 10mm ナイロンサイクロンと T.R. 捕集器の差異について，産業医学，Vol.23，No.7，p.819，1981.
- 31) Health and Safety Executive: *The dust lamp -A simple tool for observing the presence of airborne particles-*，Methods for the determination of hazardous substances, Vol.82, pp.1-12, HSE Books UK, 1997.
- 32) 岸田展明，進士正人：トンネル坑内に浮遊する粉じん物性の時系列変化の一事例，トンネル工学報告集，pp.267-271，2010.

第2章

吹付けコンクリート作業中に浮遊する粉じんの の実態調査

2.1 はじめに

山岳トンネル工法は、文字通り山岳部にトンネルを掘るためのトンネル施工法で、近代のトンネル工法としては、最も一般的に用いられている施工法である。山岳トンネルの施工は、上部に地山を残しながら、発破あるいは機械により地山を掘削したのち、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工などの支保工で地山を支え、最後に場所打ちコンクリートによる覆工を打設して完成する。この工法では、切羽付近において掘削、ずり積み、ずり運搬、吹付けコンクリート等のほぼすべての作業時に、粉じんが発生する。

これらの作業において発生する粉じんの成分は、発破時に発生する岩石の微粉で、吹付けコンクリート、覆工作業に伴うセメント粉じん、ディーゼル機関を使用するずり積み込み機械・ずり運搬車などからの排出に伴うばい煙（カーボン類）と称される浮遊粒



写真 2-1 吹付けコンクリート作業の状況

子状物質などがある。本研究が主に対象とする、写真 2-1 に示す吹付けコンクリート作業における粉じんは、普通ポルトランドセメントの主成分である石灰石と考えられている¹⁾。

本章では、本研究で対象とする吹付けコンクリート作業時に切羽から 50m 位置を浮遊する粉じんの形状、成分を走査型電子顕微鏡で分析し、浮遊する粉じんが普通ポルトランドセメントであることを確認するとともに、トンネル坑内の粒度分布の変化を調査するために、切羽から 50~150m 区間を 20m おきに粒度分布を測定した。

まず、吹付けコンクリート作業時にトンネル坑内において、切羽から 50~150m 区間を 20m おきに、ローボリウムサンプラーを用いて浮遊粉じんを採取する。次に、ローボリウムサンプラーでフィルタに捕集した粉じんの形状を電子顕微鏡で観察するとともに、粉じんの粒度分布を求める。また、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 以下、“SEM”と略称する。)に付属するエネルギー分散型 X 線分析装置 (Energy Dispersive X-ray microanalysis, 以下、“EDX”と略称する。)を使い、粉じんの表面成分を分析する^{2,3,4)}

2.2 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートとは、圧縮空気によって新鮮なコンクリートを地山面に吹き付けることによって、地山と支保工を密着させるとともに、吹付け後速やかに強度を発揮して地山表面に薄い膜を形成するとともに地山自身をそれ以上緩めないために実施される⁵⁾。施工面の形状や傾きのいかんを問わず型枠を用いることなく、広い面に迅速にコンクリート膜を施工することができる。早期に施工された吹付けコンクリートは、地山の初期の緩みを抑え、肌落ちなどを制御でき、他の切羽作業の安全性を向上させる効果がある⁶⁾。近年、靱性と引張強度を期待できる繊維補強コンクリート^{7,8)}や、吹付け後、早期に高い強度を発現する高強度吹付けコンクリート^{9,10)}なども用いられている。

2.2.1 吹付け方式¹¹⁾

吹付け方式は、吹付け機へ投入されるコンクリート材料の状態により、図 2-1 に示すように、乾式と湿式に大別される。乾式は、水を含まないドライミックスのコンクリート材料を吹付け機に投入し、圧縮空気によってノズルまで搬送して、ノズル近傍で水を添加し吹き付ける方式である。乾式は吹付け機からノズルまでの圧送距離を長く取れること、施工可能な配合に制約が少ないこと、コンクリートを練り混ぜてから吹き付けるまでの時間が長く取れることなどの長所があるが、施工能力が小さく、粉じんやリバウンドが多い。湿式は、現場プラントなどであらかじめ練り上げたフレッシュコンクリー

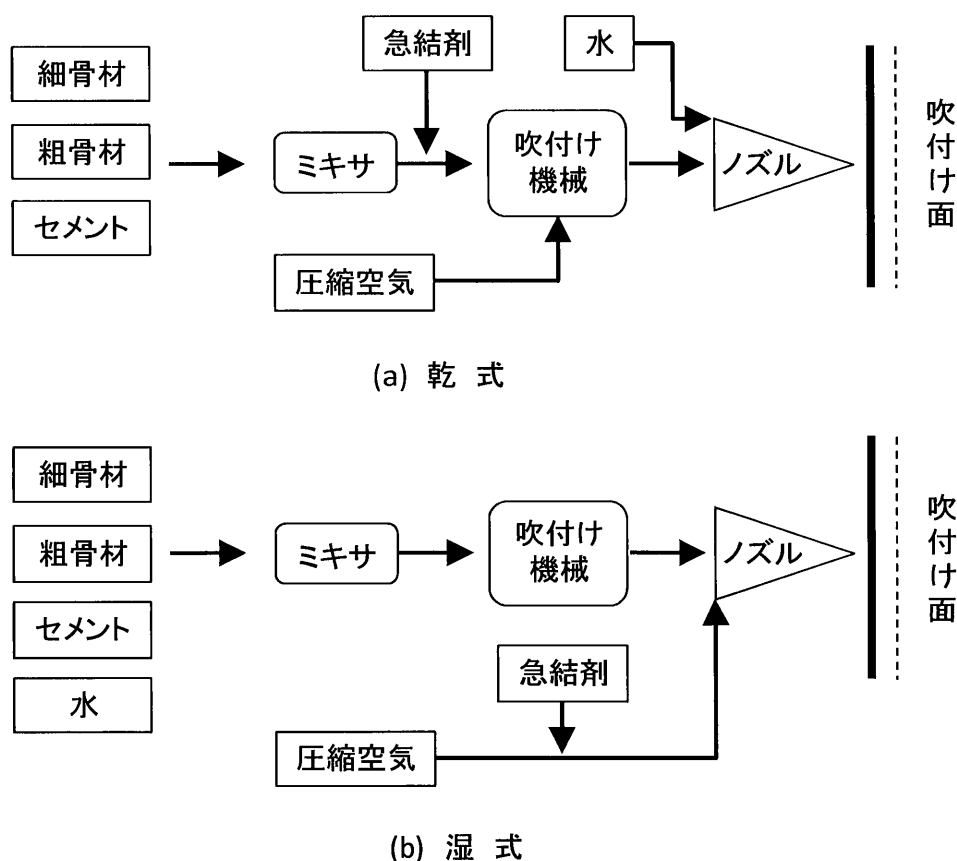


図 2-1 吹付け方式の一般的系統図¹¹⁾

トを吹付け機に投入し、圧縮空気またはポンプで搬送して、ノズルから急結剤と混合しながら吹き付ける方式である。一般に、湿式は、乾式と比較して、粉じんやリバウンドが少なく、吹き付けられたコンクリートの品質は安定しているが、吹付け機からノズルまでの圧送距離が短く、機械設備の規模が大きくなる。また、あらかじめ練り上げたフレッシュコンクリートを用いるため、乾式よりも吹き付けるまでの時間の制約が大きい。近年の山岳トンネルの吹付け方式では湿式による施工が大半を占めている。本研究で実験を行ったトンネル工事においても、湿式が適用されている。

2.2.2 使用材料¹²⁾

(1) セメント¹³⁾

JIS に規定されている土木建築工事用のセメントのうち現在、生産・使用されているものを図 2-2 に示す。ポルトランドセメントは今日最も一般的なセメントで、表 2-1 にポルトランドセメントの主成分を示す。石灰石（主成分は CaO ）と粘土質原料（主成分は Al_2O_3 と SiO_2 であって、少量の Fe_2O_3 を含む）の他、粘土質原料中の SiO_2 分が不足する場合にはけい石、 Fe_2O_3 が不足する場合には鉄さいなどが用いられる。これら比率を

変えることにより、目的とする特性を与えている。また、ポルトランドセメントの中で普通ポルトランドセメントが最も一般的に使われている。

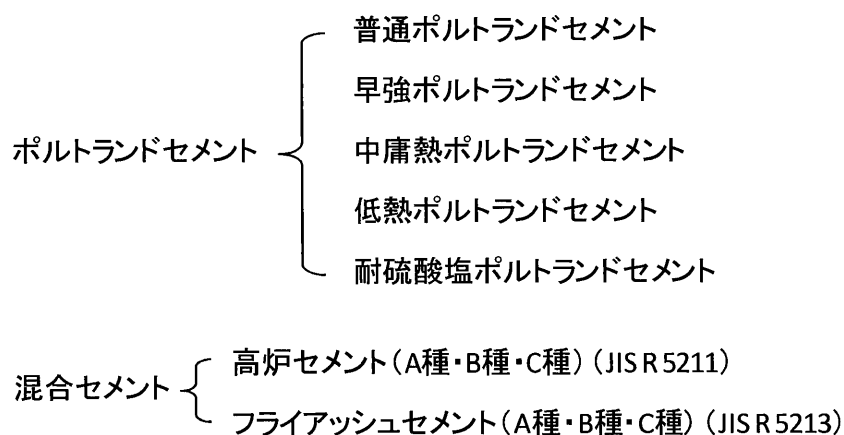


図 2-2 セメントの種類¹³⁾

表 2-1 ポルトランドセメントの主成分¹³⁾

成分名
酸化カルシウム (CaO)
二酸化ケイ素 (SiO ₂)
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)
酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃)
三酸化硫黄 (SO ₃)

(2) 骨材¹⁴⁾

コンクリート用材料としての砂、砂利を総称して骨材という。骨材は、増量材や充填材として用いられ、その粒径によって、粗骨材と細骨材に区分される。

粗骨材：5mm ふるいに重量で 85%以上とどまる骨材

細骨材：10mm ふるいを全て通過し、5mm ふるいを重量で 85%以上通過する骨材

リバウンドの低減やホース内での閉塞防止などのため、骨材の最大寸法は 15mm 程度のものが使用されている。JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」による試験結果を図 2-3 に示す。

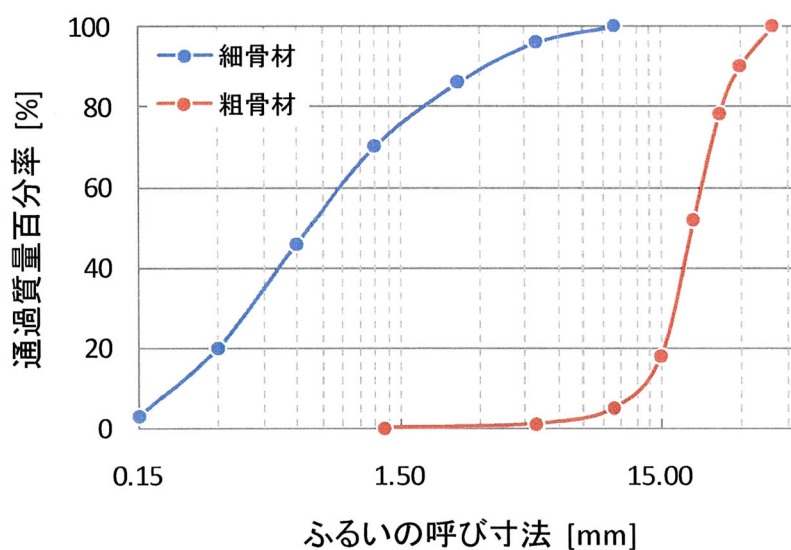


図 2-3 骨材の粒度曲線の例¹⁴⁾

(3) 急結剤¹⁵⁾

急結剤は、表 2-2 に示すものを主成分としており、セメントの凝結時間を著しく短縮し、超早期の強度発現作用を有している。トンネル工事では、吹き付けられたコンクリートの自重によるはく離を防止を目的として使用される。急結性セメント鋳物系（カルシウムアルミネート系）¹⁶⁾、超急硬性セメント鋳物系（カルシウムサルホアミネート系）、アルカリフリー液体急結材、低アルカリ液体急結材などがあり、吹き付けコンクリートには、急結性セメント鋳物系の急結剤が一般的に使用されている。

表 2-2 急結剤の主成分の例¹⁵⁾

成分名
炭酸ソーダ (Na_2CO_3)
アルミン酸ソーダ (NaAlO_2)
けい酸ソーダ (Na_2SiO_2)
塩化第二鉄 (FeCl_3)
塩化アルミニウム (AlCl_3)

(4) 石炭灰（フライアッシュ）

石炭灰は、石炭火力発電所などで微粉炭を燃焼したあとその残留物として発生する。集じん装置で集められたいわゆるフライアッシュとボイラー底部で回収される溶結状の石炭灰を砕いたクリンカとに大別される¹⁷⁾。写真2-2にフライアッシュのSEM画像、表2-3にフライアッシュの化学組成を示す。フライアッシュの品質は、JIS A 6201によってI～IVの4つの等級が規定されており、本実験現場ではフライアッシュII種を使用している。

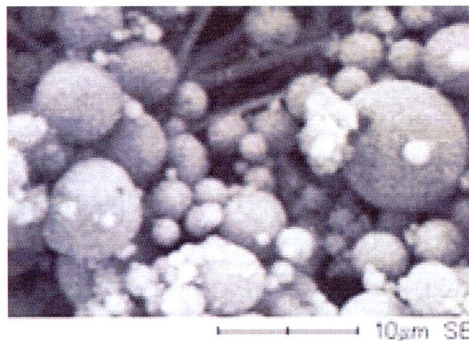


写真2-2 フライアッシュのSEM画像¹⁷⁾

表2-3 フライアッシュの主成分¹⁷⁾

成分名
二酸化ケイ素 (SiO ₂)
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)
酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃)
酸化カルシウム (CaO)
酸化マグネシウム (MgO)
三酸化硫黄 (SO ₃)
炭素 (C)

2.3 エネルギー分散型X線分析装置付き走査型電子顕微鏡

2.3.1 走査型電子顕微鏡

表面構造を立体的に観察できるSEMは、試料の前処理が比較的簡便なことに加え、コンピューターも含めた工学技術の発達に伴って性能が格段に向上し、操作や調整が容

易になったことから、多くの研究者に利用されている。SEM は、真空に近い状態のチャンバー内において電子線を試料上で走査させることによって、像を形成する。特徴としては、焦点深度が光学顕微鏡に比べて著しく、凹凸の激しい試料表面であっても、ほぼ全面に焦点があり、立体感のある形態観察ができる¹⁸⁾。EDX を取り付けた SEM を写真 2-3 に示す。この装置を使用することによって、微小部位の元素分析が可能となる。

2.3.2 X線微量分析による元素分析¹⁹⁾

電子顕微鏡で試料に電子線を照射すると、試料表層に含まれる原子から励起された電子が飛び出して、元素の種類に応じたエネルギー状態の X 線が発生する。X 線微量分析では、この X 線を解析して、試料表層の元素組成を推定する。具体的には、X 線のパルスを検出器で捕捉し、一定時間内に生じたパルスをカウントする。特に、エネルギー分散型検出器を用いた方式は、一定時間、波高別にパルスをカウントすることでスペクトルを作成し、スペクトル内のピークから複数の主要構成元素を同定できる²⁰⁾。SEM に装着した場合、観察している微小部位の構成元素を数分間で同定することができる。

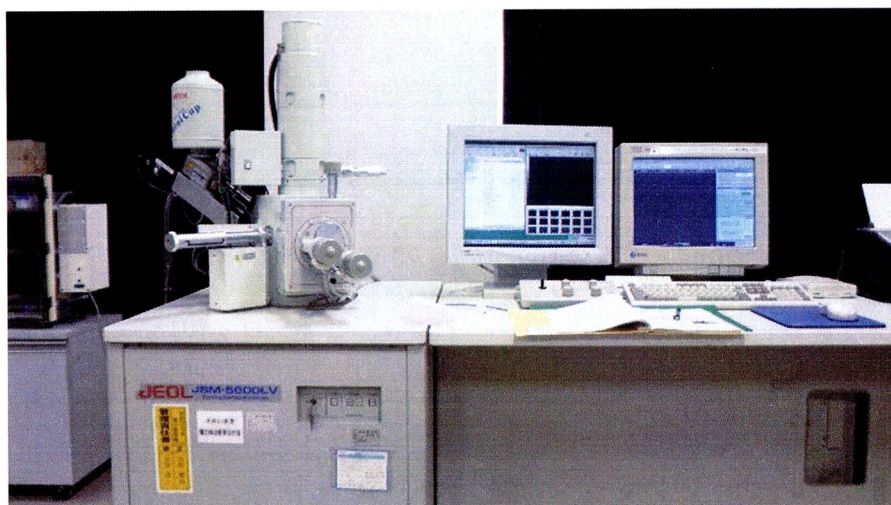


写真 2-3 エネルギー分散型 X 線分析装置付き走査電子顕微鏡

2.4 実験方法

2.4.1 現場概要

実験は、山岳工法発破掘削（補助ベンチ付全断面）により建設中の総延長約2kmの2車線道路トンネルで実施された。図2-4に主要建設設備の配置図を示す。図に示すとおり、トンネル建設時の換気システムとしては坑外に設置した送風機（2100m³/min）から切羽に送風し、移動式台車に積載した電気集じん機（2400m³/min）で集じんする。吹付けコンクリート作業の吹付け方式は湿式²¹⁾で、ポンプ圧送式の一体型吹付けシステムを用いている。また、吹付け時の粉じんの発生抑制効果を期待し、吹付けコンクリートには石炭灰を添加している。吹付けコンクリートの配合を表2-4示す。

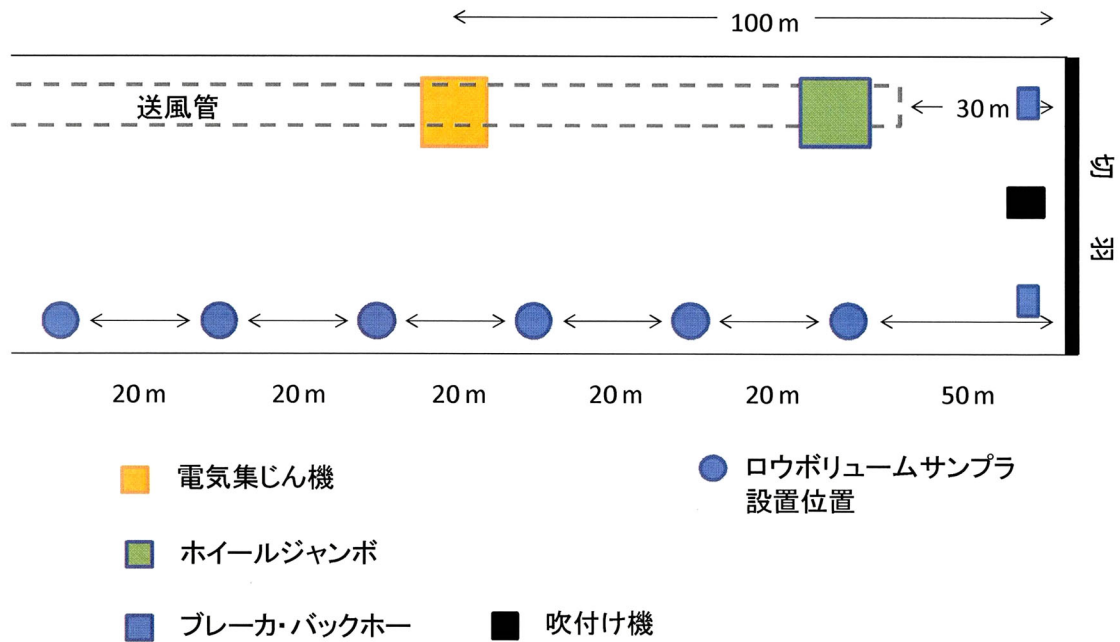


図2-4 トンネル坑内の建設設備と測定機器配置

表2-4 吹付けコンクリートの配合

水セメント比 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水	結合材		細骨材		粗骨材
				セメント	石炭灰	細骨材	石炭灰	
68.2	51.5	60	221	324	36	907	69	696

2.4.2 粉じんの採取方法

浮遊粉じんの採取は、吹付けコンクリート作業時に、ローボリウムサンプラー（柴田科学製“LV-40BR”）を用いて行い、各測定点につき3回の浮遊粉じんの採取を行った。写真2-4にローボリウムサンプラーによる浮遊粉じんの採取状況を示す。ローボリウムサンプラーは、20 L/minの吸引量で、0.5m³の空気をガラス繊維フィルター（柴田科学製“T60A20”，以下“フィルター”）に通過させ粉じんを採取した。また、採取配置は図2-5に示すように切羽からトンネル坑口に向かって50m地点における床上1.3mの位置にローボリウムサンプラーを設置して、浮遊粉じんを採取した。

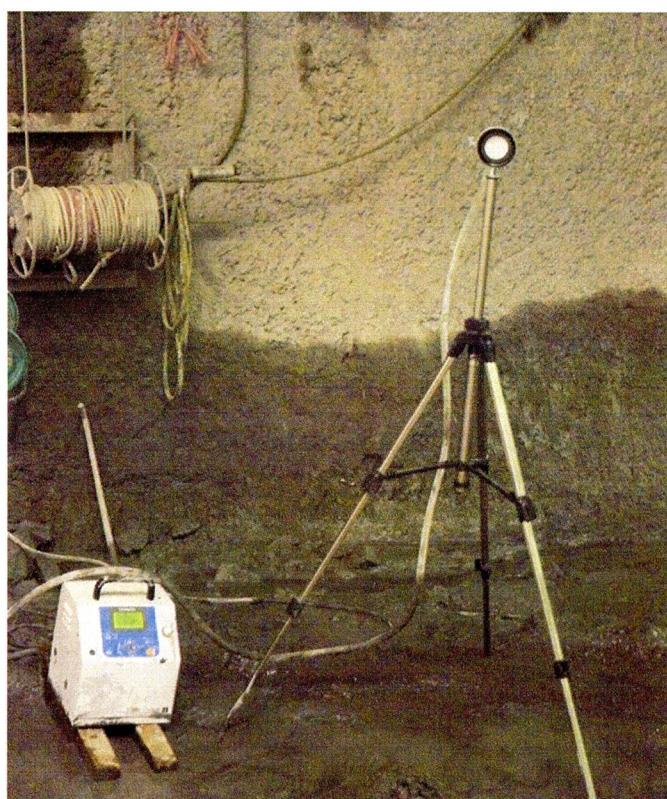


写真2-4 ローボリウムサンプラーでの浮遊粉じんの採集状況

2.4.3 SEM/EDX による分析方法

低真空走査型電子顕微鏡（日本電子製“JSM-5600LV”）にエネルギー分散型 X 線分析装置（日本電子製“JED-2200”）を装着したものをを用いた。分析する際、ローボリウムサンプラーで粉じんを捕集したフィルターは、導電性テープが張り付けられたアルミ製試料台に固定した後に金蒸着を施した。観察時の加速電圧は 15Kv、元素分析時の加速電圧は 25Kv とした。フィルターによっては元素分析時に照射する電子線の影響で損傷をうけることがあるため、そのような場合には適宜電流値を下げる等の調整を行った。

(1) 表面形状の観察と構成元素分析

表面形状は、倍率 2000 倍に拡大した粉じんの表面写真 ($65 \times 47.5 \mu\text{m}$) から、その中の任意に選んだ 2 箇所を観察し、SEM に組み込まれた EDX を用いて、電子線照射領域を粒子 1 個程度の大きさに絞り込み、マトリックスの影響をできるだけ排除した状態で元素分析を行う。また、得られた EDX スペクトルから ZAF 法²²⁾により定量分析を行い、構成元素単体の質量パーセントを調査する。

(2) 粒度分布の算出方法

粒度分布は、積算分布と頻度分布によって表す。積算分布と頻度分布は、以下に示す手順で求める。

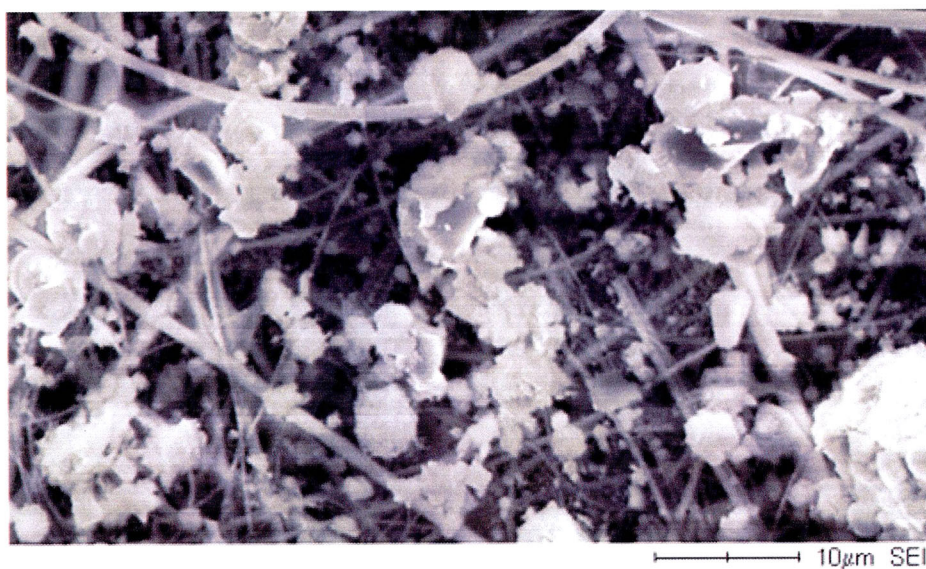
- 1) 元素分析と同様、粉じんの表面写真 ($65 \times 47.5 \mu\text{m}$) から任意に 3 箇所を選択し、一定方向の粉じんの粒子径をそれぞれの画像あたり計 1000 個程度測定する。
- 2) 個数基準幾何平均粒径²³⁾を計測するとともに、粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 毎の粉じん粒子の累積から積算分布 F を求める。
- 3) 頻度分布 f は、積算分布 F を粒径で微分して求める。

2.5 実験結果

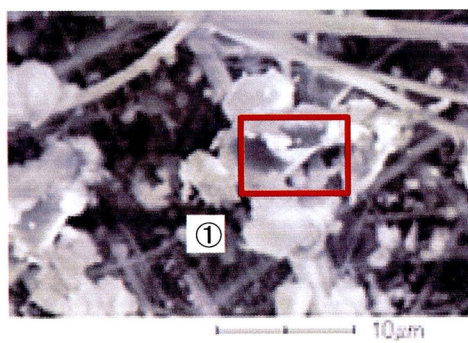
2.5.1 表面形状の観察と元素分析

実験で採取した吹付けコンクリート時の浮遊粉じんの SEM 画像と成分分析結果の一例を図 2-5 に示す。画像中の細長い繊維状のものはフィルターの繊維で、粒状のものが浮遊粉じんである。吹付けコンクリート作業時の浮遊粉じんの形状は、不定形のものが多く、ところどころに丸みを帯びた形状の粒状物質があることがわかる。これらの元素構成を比較すると、両方とも、ケイ素 (Si)、アルミニウム (Al)、カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg)、酸素 (O) が検出され、炭素 (C) は丸みを帯びた形状のものだけに存在している。吹付けコンクリートの使用材料のポルトランドセメントの主成分 (表 2-1) と類似していることから、不定形の粒状物質は、ポルトランドセメントであると考えられ、ケイ素 (Si) は二酸化ケイ素 (SiO_2)、アルミニウム (Al) は酸化アルミニウム (Al_2O_3)、カルシウム (Ca) は酸化カルシウム (CaO)、マグネシウム (Mg) は酸化マグネシウム (MgO) の構成元素で、酸素 (O) は、これらの化合物に含まれて酸素であると考えられる。また、丸みを帯びた粒状物質には、炭素が含まれていることから、表 2-3 に示すフライアッシュの主成分と一致する。そして、写真 2-2 からフライアッシュは球形であることから形状も類似していることがわかる。

したがって、吹付けコンクリート作業中の浮遊粉じんには、普通ポルトランドセメントとフライアッシュが含まれており、その大部分は普通ポルトランドセメントであると思われる。



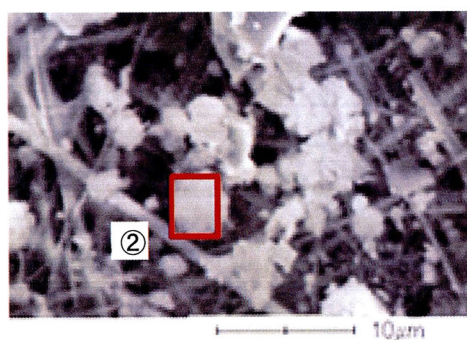
(a) 電子顕微鏡写真



(b) ①の電子顕微鏡写真

元素	質量%
C	
O	46.5
Na	
Al	13.3
Ca	1.1
Si	37.5
S	
Mg	1.2
K	
Fe	

(c) ①の元素構成



(d) ②の電子顕微鏡写真

元素	質量%
C	4.7
O	44.5
Na	
Al	14.7
Ca	0.8
Si	34.5
S	
Mg	0.82
K	
Fe	

(e) ②の元素構成

図2-5 浮遊粉じんの成分分析結果 (吹付けコンクリート作業時)

2.5.2 粒度分布

写真 2-5, 写真 2-6 に採取した浮遊粉じんの表面写真の一部を示す。これらの写真から、積算分布を求めた。そして、図 2-6 に切羽から 50m 位置を浮遊する粉じんの積算分布を示す。粉じんの頻度分布は、対数正規分布が用いられることが多い²⁴⁾ことから、対数正規分布の適用を検討した。個数基準における対数正規分布の密度関数 $f(d_p)$ は次式で表される²⁵⁾。

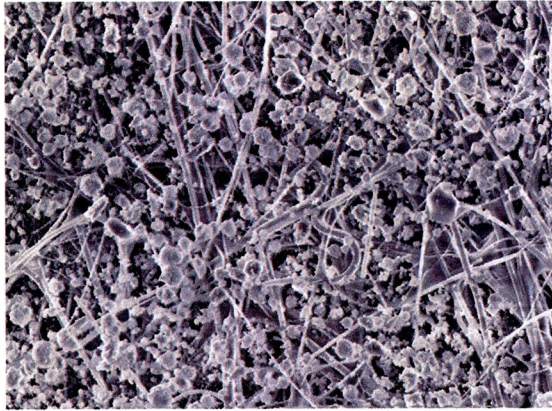
$$f(d_p) = \frac{1}{\log \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\log d_p - \log d_{p50})^2}{2 \log^2 \sigma} \right\} \quad (2-1)$$

$$\mu = D_{p50} \quad (2-2)$$

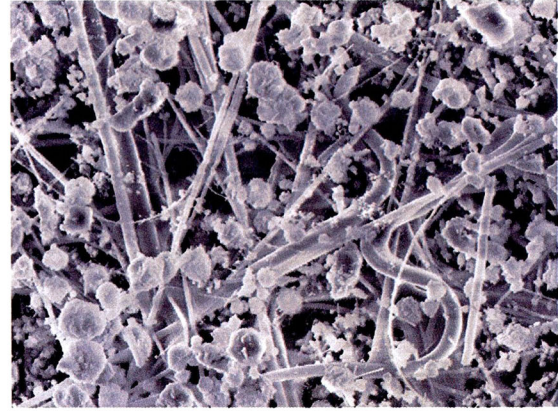
$$\sigma = \frac{\text{積算ふるい下84.13\%}}{D_{p50}} \quad (2-3)$$

図 2-7 に、図 2-6 の積算分布から求めた頻度分布とこれに対数正規分布を適用した図を示す。この図から、対数正規分布が粉じんの頻度分布をよく表現していることが確認できた。そこで、図 2-8, 図 2-9 にトンネルの切羽から 50, 70, 90, 110, 130, 150m 位置において、写真 2-5, 写真 2-6 から求めた積算分布と対数正規分布で近似した頻度分布を示す。

この結果から、切羽から 50m 位置を浮遊する粉じんは、幅広い範囲の粒径が浮遊しており、その中位径は、だいたい $1.8\mu\text{m}$ 程度であることがわかった。また、切羽から 70m 位置では、50m 位置と比較すると粒径の揃った粒子が多く浮遊しているがその中位径は、50m 位置とほぼ同程度であることがわかった。切羽から 90m 以降の粒度分布は、50m 位置と同様の分布を示した。

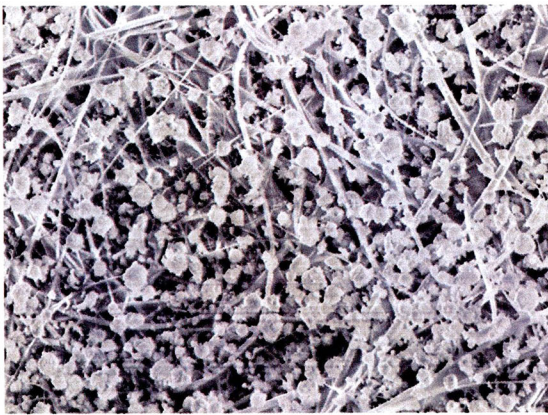


(a) 1000倍

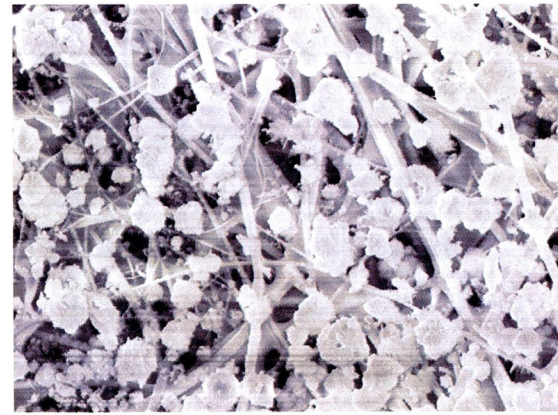


(b) 2000倍

(A) 切羽から50m

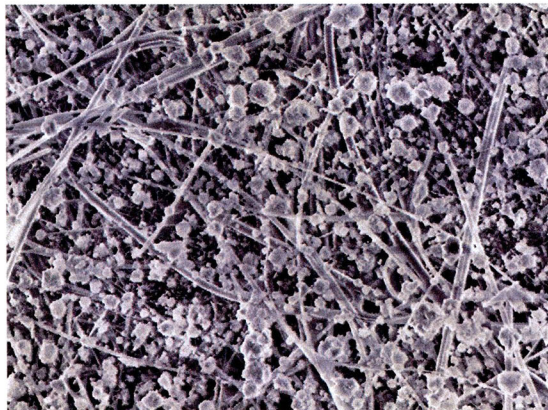


(a) 1000倍

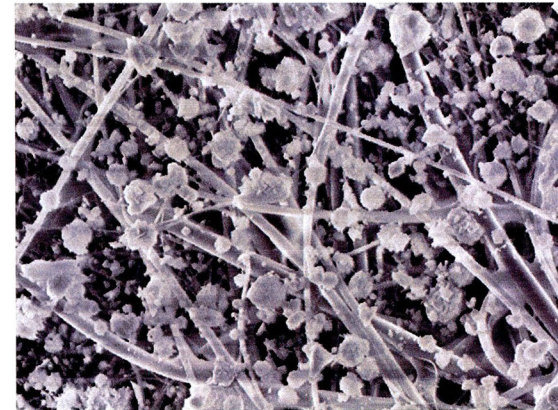


(b) 2000倍

(B) 切羽から70m



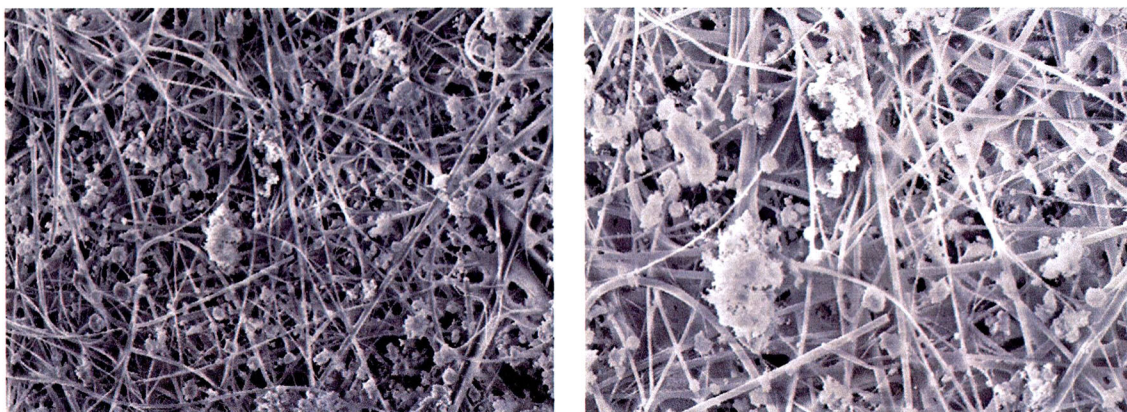
(a) 1000倍



(b) 2000倍

(C) 切羽から90m

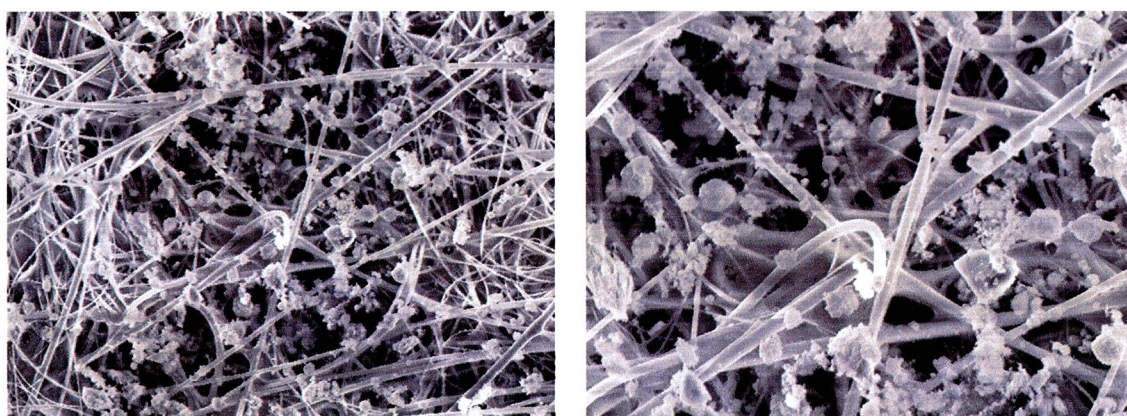
写真 2-5 吹付けコンクリート作業中に採取した浮遊粉じんの表面写真
(切羽から 50~90m)



(a) 1000倍

(b) 2000倍

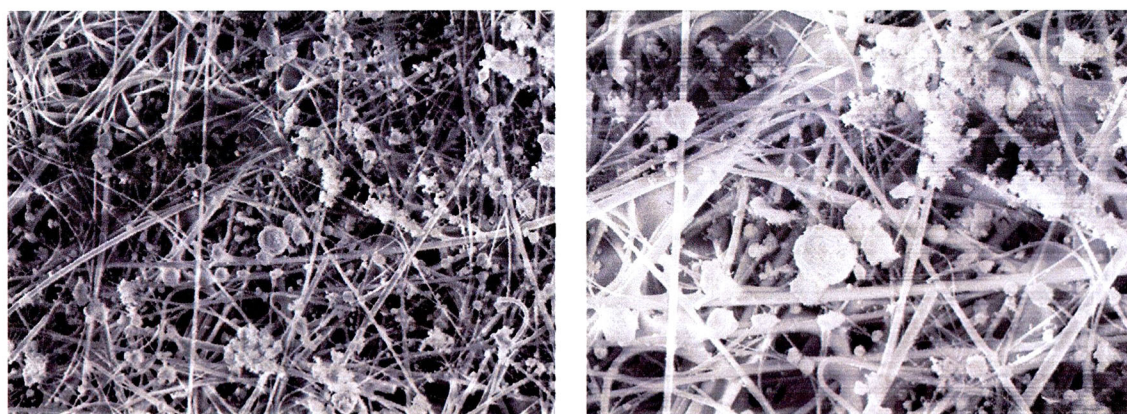
(A) 切羽から110m



(a) 1000倍

(b) 2000倍

(B) 切羽から130m



(a) 1000倍

(b) 2000倍

(C) 切羽から150m

写真 2-6 吹付けコンクリート作業中に採取した浮遊粉じんの表面写真
(切羽から 110～150m)

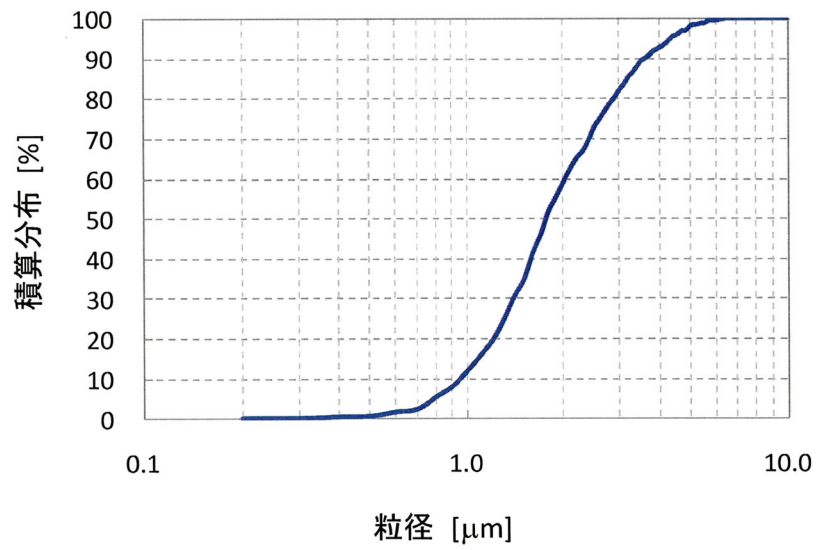


図 2-6 積算分布

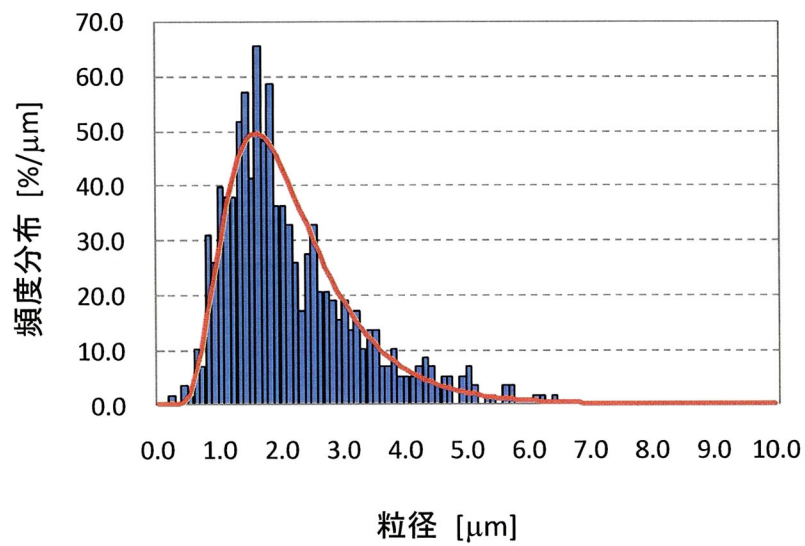
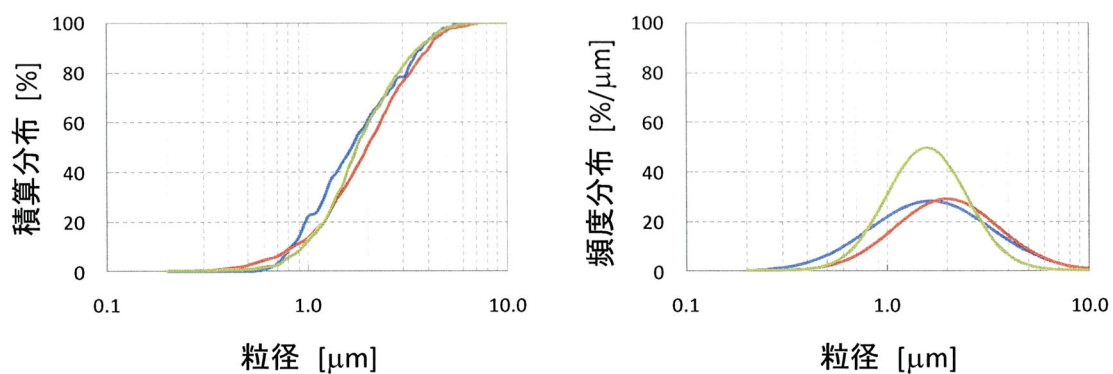
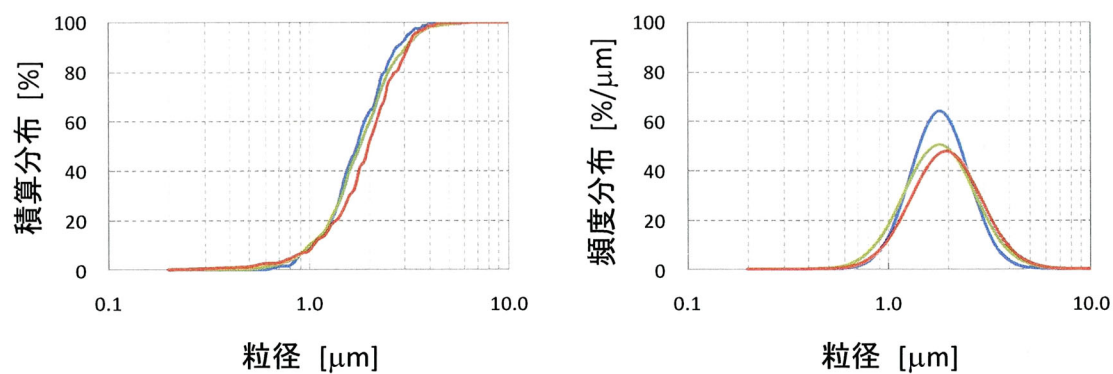


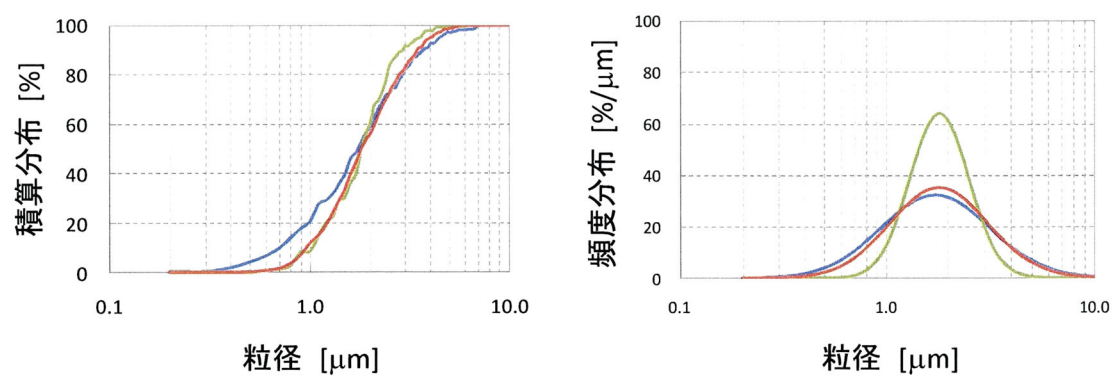
図 2-7 対数正規分布



(a) 切羽から50m位置

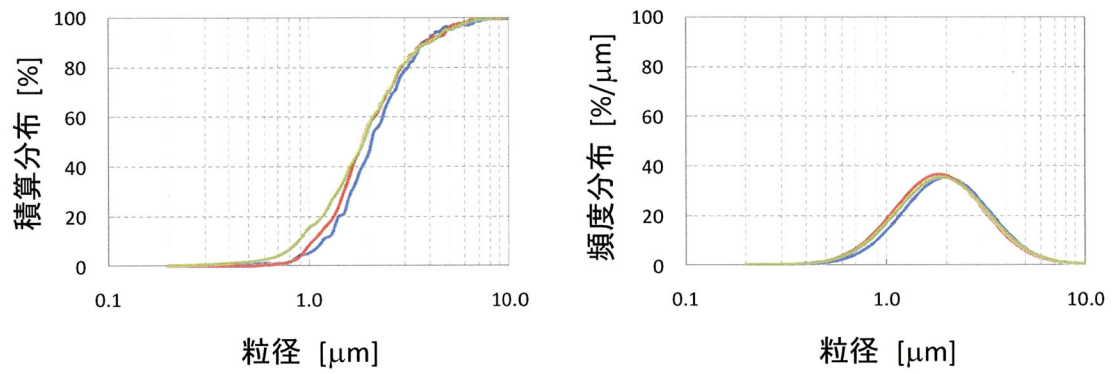


(b) 切羽から70m位置

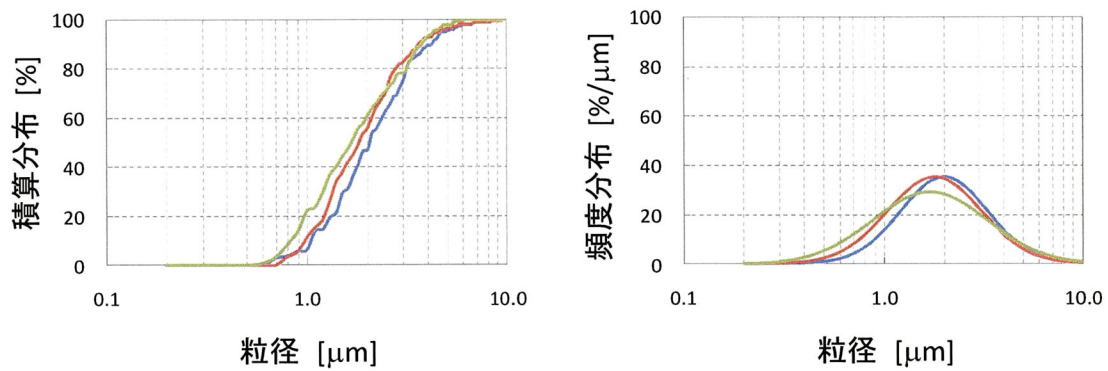


(c) 切羽から90m位置

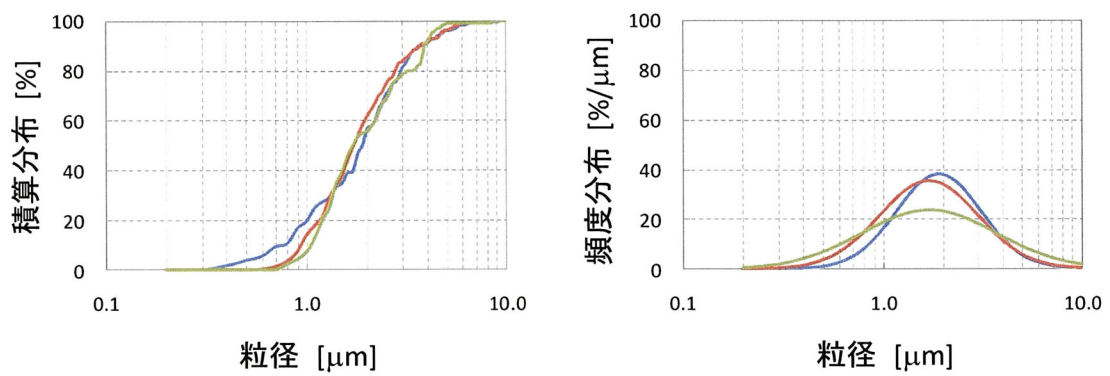
図 2-8 積算分布と頻度分布 (切羽から 50m, 70m, 90m)



(a) 切羽から110m位置



(b) 切羽から130m位置



(c) 切羽から150m位置

図 2-9 積算分布と頻度分布 (切羽から 110m, 130m, 150m)

2.6 まとめ

本章では、本研究で対象とする吹付けコンクリート作業時に切羽から 50m 位置を浮遊する粉じんの形状、成分を走査型電子顕微鏡で分析し、浮遊する粉じんが普通ポルトランドセメント成分であることを確認するとともに、トンネル坑内の粒度分布の変化を調査するために、切羽から 50~150m 区間を 20m おきに粒度分布を測定した。

その結果、吹付けコンクリート作業中に、切羽から 50m 位置を浮遊する粉じんのほとんどは普通ポルトランドセメント成分の粉じんで、その他、フライアッシュ成分の粉じんが確認された。

また、トンネル坑内を浮遊する粉じんの粒度分布については、切羽から 50m 位置を浮遊する粉じんは、幅広い範囲の粒径の粉じんが浮遊しており、その中位径は、 $1.8\mu\text{m}$ 程度であることがわかった。切羽から 50m 以降の粉じんの粒度分布は、切羽から 70m 位置で粒径の揃った粒子が多く浮遊していることがわかった。これは、送風口と集じん機の間位置することから、トンネル坑内の風速が弱まり、粒径が同程度の粒子が沈降したためと考えられる。また、この位置の中位径は 50m 位置と同程度であり、それ以降では、50m 位置と同様の粒度分布であることがわかった。

参考文献

- 1) 建設業労働災害防止協会：改訂 ずい道等建設工事における換気技術指針，pp.53-56，2005.
- 2) 君塚五郎，Wang Nai-San：走査型電子顕微鏡(SEM)と付属するエネルギー分散型 X 線分析装置(XEDS)を用いた、肺の線維性鉍物粒子検索のための Carbon Planchet 法，肺癌，Vol.25，No.6，p.801，1985.
- 3) 山田丸，岩板泰信，松木篤，他：大気エアロゾルの直接採集に基づく黄砂の大気化学的性質に関する研究:敦煌における気球観測，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-03-001，pp.105-115，2004.
- 4) 東川佳靖，笹松正昭，鈴木康弘：エネルギー分散型 X 線分析装置付き走査電子顕微鏡を用いる無機系抗菌剤含有単繊維の異同識別，分析化学，Vol.56，No.12．pp.1183-1186，2007.
- 5) 大塚浩司，外門正直，庄谷征美ほか：コンクリート工学[第2版]，p.9，朝倉書店，2007.
- 6) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 24 山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで，地盤工学会，p.4，2007.
- 7) 名知博司，山中新太郎，大津なほ子ほか：超高強度繊維補強コンクリート，建築雑誌，Vol.123，No.1582，pp.44-45，2008.
- 8) 井戸康浩，菊田繁美，梅本宗宏ほか：鋼繊維補強した超高強度コンクリートの基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集.A-1，pp.527-528，2008.
- 9) 金澤博，西恭彦，上塘祥二郎ほか：高性能初期高強度吹付けコンクリートを用いた新支保パターンに関する試験施工，トンネル工学報告集，Vol.15，pp.211-218，2005.
- 10) Pauli T.Syrjanen：*High strength shotcrete*，Second international symposium on sprayed concrete，pp.286-297，1996.
- 11) 小林一輔，和泉意登志，出頭圭三ほか：図解 コンクリート事典，オーム社，p.110，2002.
- 12) 小林一輔：最新コンクリート工学，森北出版，p.26，2000.
- 13) 前掲 12)，p.5.
- 14) 前掲 12)，p.30.
- 15) 前掲 12)，p.26.
- 16) 武広実，後藤誠史，井奥洪二ほか：カルシウムアルミネートを基材とした急結剤を含むポルトランドセメントの急結性能と水和反応，材料，Vol.49，No.2，pp.209-214，2000.
- 17) 前掲 12)，p.21.

-
- 18) 日本電子顕微鏡学会関東支部：走査電子顕微鏡の基礎と応用, p.3, 1985.
 - 19) 阿部淳, 森田茂紀, 安萍：作物研究における低真空走査電子顕微鏡と X 線微量分析の利用, 日本作物學會紀事, Vol.75, No.2, pp.217-219, 2006.
 - 20) 吉川年彦, 元山宗之, 渋谷政夫：生理病斑のマイクロビームアナリシス, 日本土壤肥料学会講演要旨集, No.29, pp.195-196, 1983.
 - 21) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 24 山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで, 地盤工学会, pp.93-94, 2007.
 - 22) 日本電子顕微鏡学会関東支部：走査電子顕微鏡の基礎と応用, pp.443-444, 1985.
 - 23) 粉体工学会：粉体の基礎物性, p.3, 丸善, 2005.
 - 24) 藤吉敏生：粉体工学の基礎, P.37, 丸善, 1992.
 - 25) 久保輝一郎, 神保元二, 水渡英二, 他：粉体 理論と応用, 丸善, P.449, 1979.

第 3 章

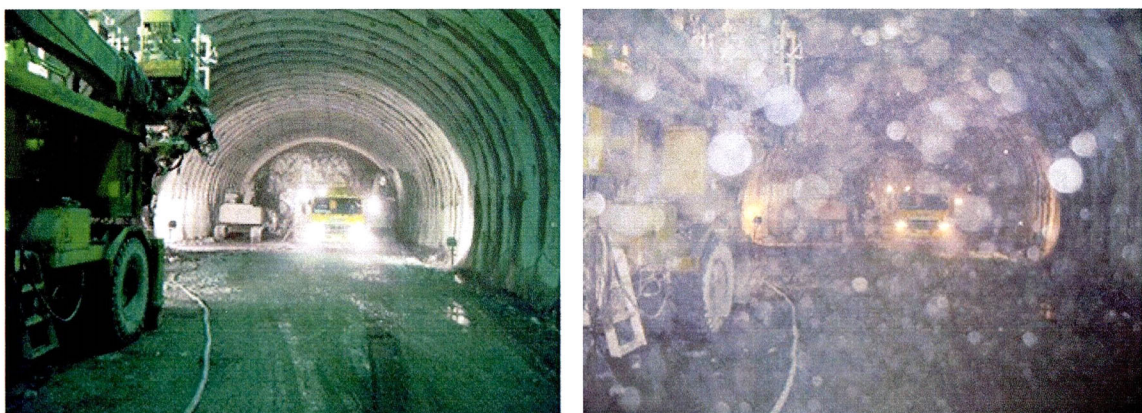
デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法の開発

3.1 はじめに

トンネル坑内のような閉空間において、カメラでフラッシュ撮影を行うと、坑内の浮遊粉じんなどがフラッシュに反射して写真 3-1 (a) のトンネル坑内写真が写真 3-1 (b) の写真のように白斑として撮影されることはアナログカメラの時代からトンネル技術者の中ではよく知られていた。しかし、白斑の正体は不明であった。デジタルカメラの時代となり、撮影したその場で画像を確認できること、画像自体もデジタル化されており画像処理しやすいことなどの急速な性能向上と販売価格の低下が生じた。そこで、デジタルカメラを利用して粉じん濃度が測定できれば、安価で簡単な粉じん濃度測定法が提案できると考えた。そこで、本章では、現場実験を基に、デジタルカメラによるフラッシュ撮影画像を利用した粉じん濃度測定法を提案する。

そのために、まず、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内で、粉じん濃度との相関性を検討するために、粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集する。

次に、フラッシュ撮影画像に記録された散乱光から粉じん濃度を測定出来ることを確



(a) フラッシュ無し

(b) フラッシュ有り

写真 3-1 フラッシュの有無による坑内写真の比較

認するために、画像に記録された散乱光を計数し、粉じん濃度に換算する方法（以下，“散乱光計数による測定法”とする）を提案する。この測定法は、第2章に述べた粉じんの粒度分布とフラッシュ撮影画像に記録された散乱光数から粉じんの質量を推定する。そして、あらかじめ求めておいたデジタルカメラで粉じんに散乱光が記録される空間で除することで、粉じん濃度を測定する方法である。

それに加えて、フラッシュ撮影画像に粉じんの散乱光が多く写れば写るほど、画像の輝度が高くなることを利用することで、画像処理によりフラッシュ撮影画像から粉じん濃度に換算するまでの過程を自動処理できる測定法（以下，“画像処理による測定法”）を提案する。

3.2 測定原理

一般に、カメラのフラッシュ光源の波長は $0.5\mu\text{m}$ 付近の波長域にピークを持つ¹⁾。トンネル坑内では、図2-7に示すとおり、 $0.5\mu\text{m}$ 程度以上の粉じんが多数浮遊していることから、Mie散乱²⁾により $0.5\mu\text{m}$ ～数 μm 程度の浮遊粉じんがカメラに写り、写真3-1(b)のような画像が撮影されると考えられる³⁾。ここで、散乱光強度、すなわちカメラに写る浮遊粉じんの明るさは、ほぼ粒子径の2乗に比例する。そして、カメラに撮影される浮遊粉じんの大きさは、実際の浮遊粉じんの大きさとは無関係にカメラの絞りによる回折現象によって直径が決まる。浮遊粉じんがカメラに写る領域はフラッシュの発光量に依存し、レンズの極めて近傍付近に限定されることがわかっている⁴⁾。

3.3 本研究で使用するデジタルカメラと撮影方法

本章での現場実験は、第2章の実験したトンネル建設現場と同じ現場で実施する。粉じんによる散乱光が記録されたフラッシュ撮影画像から粉じん濃度を測定する方法の開発を目的として、本論文で測定対象とした吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内の切羽から坑口に向かって50m地点において、床上1.3mの位置にデジタルカメラとデジタル粉じん計を写真2-2に示すように設置し、1分間隔のデジタル粉じん計の測定と同期させながらフラッシュ撮影を行った。これにより、お互いに同じ濃度の粉じんを測定するようにした。デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集する。なお、実験に使用するデジタル粉じん計の測定精度を表3-1に示す。



写真 3-2 デジタルカメラでのフラッシュ撮影方法

表 3-1 デジタル粉じん計の測定精度⁵⁾

デジタル粉じん計	LD-3K2
質量濃度変換係数	0.002 mg/m ³ /cpm
測定精度	校正粒子に対して±10%
測定感度	1CPM = 0.001 mg/m ³
測定範囲	0.001～10.00 mg/m ³

3.3.1 デジタルカメラ

本研究では、種々のデジタルカメラを利用したが、トンネル坑内で高濃度の粉じんが浮遊している環境下で使用するため、繰り返し粉じん濃度の測定に使用する事で、デジタルカメラが汚れなどにより機能低下し、粉じん濃度測定精度に影響を及ぼす恐れがある。そのため、本研究では、耐塵・耐水性を持つデジタルカメラを使用し、汚れるたびに水で洗浄することで対処することとした。耐塵・耐水性能を持ち、加えて市販されているコンパクトデジタルカメラとして、オリンパス製μ795SWを使用した。その仕様を表 3-2 に示す。ここで、本研究で使用したデジタルカメラの一覧を表 3-3 に示す。



写真 3-3 デジタルカメラ (μ795SW)

表 3-2 デジタルカメラの撮影パラメータ

デジタルカメラ	オリンパス μ795SW
記録画素数	3072×2304 ピクセル
レンズF値	F3.5
レンズの焦点距離	6.7 mm
ISO感度	100
フラッシュ	発光
ホワイトバランス	固定

表 3-3 本研究で使用したデジタルカメラ一覧

製品名	主な仕様			備考
	有効画素数	撮像素子	焦点距離 開放F値	
コンパクトデジタルカメラ				
CANON IXY DIGITAL 500	約 500 万画素	6.9 × 5.2 mm CCD	7.4-22.2 mm F 2.8-4.9	
IXY DIGITAL 1000	約 1000 万画素	6.9 × 5.2 mm CCD	7.7-23.1 mm F 2.8-4.9	
OLYMPUS μ 795SW	約 710 万画素	6.2 × 4.6 mm CCD	6.7-20.1 mm F 3.5-5.0	耐水・耐塵
FinePix F200EXR	約 1200 万画素	7.4 × 5.6 mm CCD	6.4-32.0 mm F 3.3-5.1	ノンフラッシュとフ ラッシュ撮影の2枚 を連続撮影できる
一眼レフデジタルカメラ				
PENTAX k-m smc PENTAX-DA L	約 1075 万画素	23.5 × 15.7 mm CCD	18-56 mm F 22-38	

3.3.2 ブラックパネル

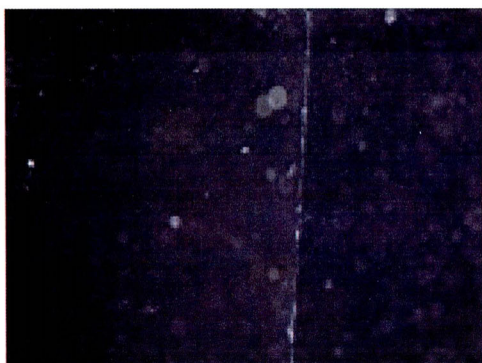
デジタルカメラでの粉じん濃度測定には、フラッシュ撮影の際、粉じんの散乱光のみを撮影するため、写真3-3に示すようにデジタルカメラの撮影方向にブラックパネルを設置し、フラッシュ撮影を行う。ブラックパネルの反射光が測定画像に及ぼす影響を考慮し、デジタルカメラとブラックパネルとの距離を3mとした。ブラックパネルの仕様を表3-4に示す。ブラックパネルのサイズは、撮影範囲全体を覆う大きさとし、塗料には、ブラックパネルによる反射光の影響を低減するために、黒色（ツヤ消しタイプ）の塗料を使用した。

表 3-4 ブラックパネルの仕様

サイズ	2.0×3.0 m
材質	発泡スチロール
塗料	合成樹脂塗料 黒色（ツヤ消しタイプ）

3.3.3 フラッシュ撮影画像

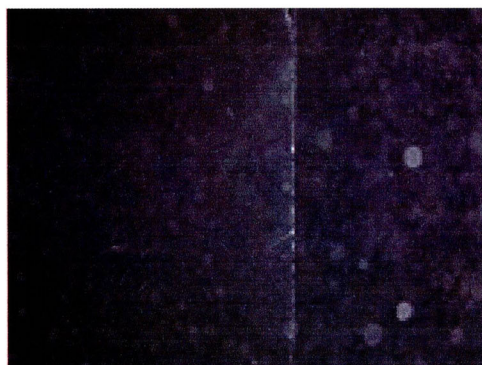
フラッシュ撮影画像とデジタル粉じん計での粉じん濃度の結果の一部を写真3-4に示す。この写真からわかるように、デジタル粉じん計による粉じん濃度が高くなるにつれて、浮遊粉じん数も増加していることがわかる。



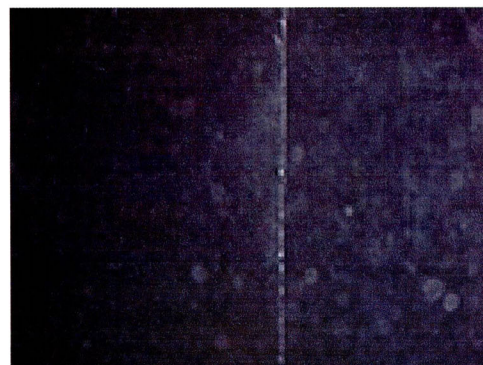
粉じん濃度 1.6 mg/m³



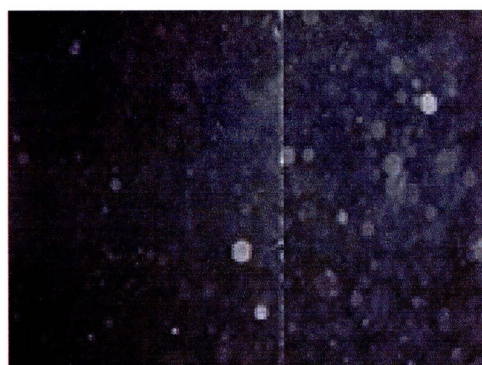
粉じん濃度 2.0 mg/m³



粉じん濃度 2.5 mg/m³



粉じん濃度 3.0 mg/m³



粉じん濃度 3.5 mg/m³



粉じん濃度 3.9 mg/m³

写真 3-4 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像

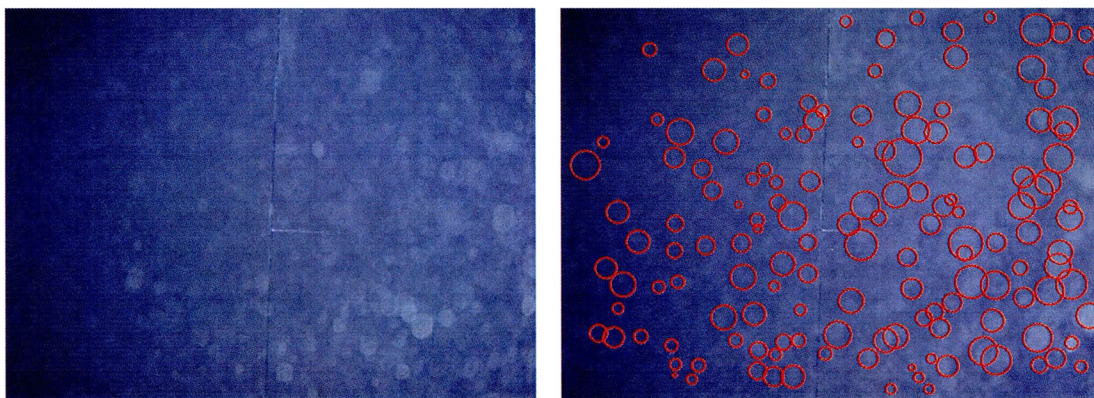
3.4 散乱光計数による測定法⁴⁾

3.4.1 概要

デジタルカメラでフラッシュ撮影した画像には、カメラの前方に浮遊している粉じんの散乱光が記録される。図 3-1 (a) にトンネル坑内でフラッシュ撮影した写真を示す。デジタル粉じん計は、相対的に粉じんの質量濃度を求める測定法である。そこで、本測定法は、写真 3-3 に示すように、ブラックパネルに向かって、フラッシュ撮影した画像に記録された粉じんによる散乱光を計数し、第 2 章で求めた粒度分布とセメントの単位体積質量から粉じんの質量を推定する。そして、粉じんが撮影された空間を把握することで、画像に記録された散乱光数を粉じん濃度に換算する。

図 3-2 に散乱光数の計数による測定法の粉じん濃度換算アルゴリズムの概略図を示す。粉じん濃度換算アルゴリズムの概要は以下の通りである。

- 1) フラッシュ撮影により画像に写った浮遊粉じんの個数を数える。
- 2) トンネル坑内で吹付け作業中に調査した図 2-8 の粉じんの粒度分布とカウントした散乱光数から各粒径ごとの個数を推定する。
- 3) 2.5.1 より浮遊粉じんは普通ポルトランドセメントであると考えられるため、その一般的な単位体積質量 3.15g/cm^3 を用いて質量に換算する。
- 4) 換算した浮遊粉じんの重さを 3.4.2 で述べるフラッシュ撮影により写る粉じんの空間で除して粉じん濃度に換算する。



(a) フラッシュ撮影画像

(b) 粉じんの計数例

図 3-1 フラッシュ撮影写真からの散乱光数の計数例

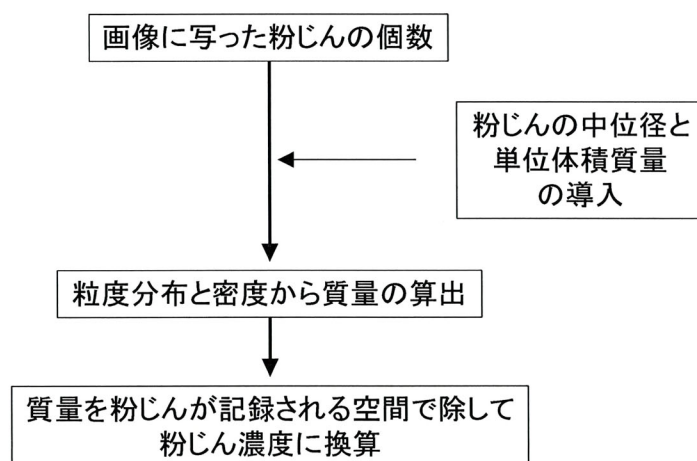


図 3-2 散乱光計数による測定法の粉じん濃度換算アルゴリズム

3.4.2 デジタルカメラの浮遊粉じん撮影範囲

散乱光計数による測定法で利用するため、フラッシュ撮影によって記録される粉じんが浮遊している範囲を求める。図 3-3 にフラッシュ撮影画像に記録される粉じんが浮遊している空間のイメージ図を示す。この空間は、デジタルカメラの撮影範囲だけでなく、フラッシュ光の照射する範囲も考慮する必要がある。本研究では、フラッシュ光の有効範囲は、写真の撮影範囲を基本に、散乱光が記録される粉じんが浮遊する区間を推定し、その区間の撮影範囲内を浮遊する粉じんの散乱光はすべて記録されると仮定し、図 3-3 に示す四角錐台の空間をフラッシュ撮影によって粉じんの散乱光が記録される空間と近似し、室内実験を考案し、それらの距離を推定した。

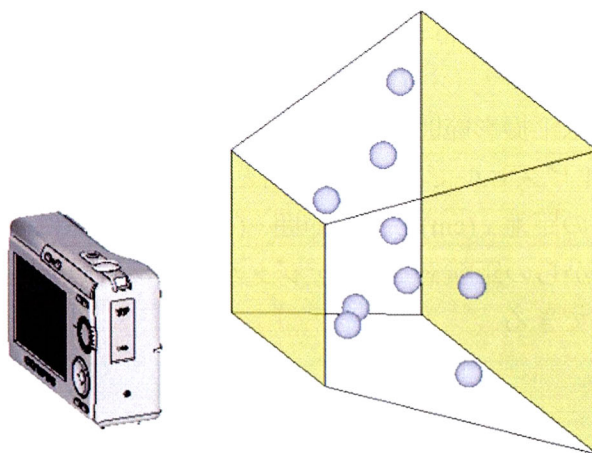
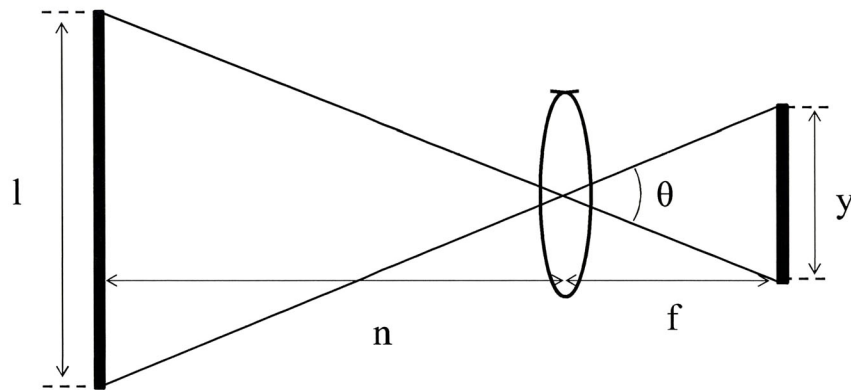


図 3-3 デジタルカメラでの浮遊粉じん撮影範囲のイメージ

(1) デジタルカメラの撮影空間

図 3-3 に撮像素子サイズと撮影範囲の関係図を示す。この図から撮像素子サイズと撮影領域の関係は、次のように表すことができる^{6,7)}

$$\frac{n}{l} = \frac{f}{y} \quad (3-1)$$



y: 撮像素子サイズ(mm) f: 焦点距離(mm)

n: レンズからの距離(cm) θ: 画角

l: 撮影範囲(cm)

図 3-4 デジタルカメラの撮像素子サイズと撮影領域の関係のモデル

表 3-3 から本研究に使用したデジタルカメラ（オリンパス製“μ795SW”）の撮像素子サイズ y は、1/2.33 型（6.2×4.6 mm）で、焦点距離 f は 6.7mm である。

図 3-5 に、デジタルカメラ（オリンパス製“μ795SW”）におけるレンズからの被写体距離とその位置での水平撮影範囲との関係を示す。実験で用いたデジタルカメラの画像サイズは 3072×2304 ピクセルであり、横方向と縦方向の撮影範囲の比は 1:1.3 となるので、カメラ前面からの距離 x (cm) と撮影範囲 s (cm²) との関係は、図 3-6 のようになる。従って、カメラ前面からの距離 x (cm) とデジタルカメラの撮影範囲 s (cm²) の関係は、次のように表すことができる。

$$s = 0.56x^2 + 1.46x + 0.96 \quad (3-2)$$

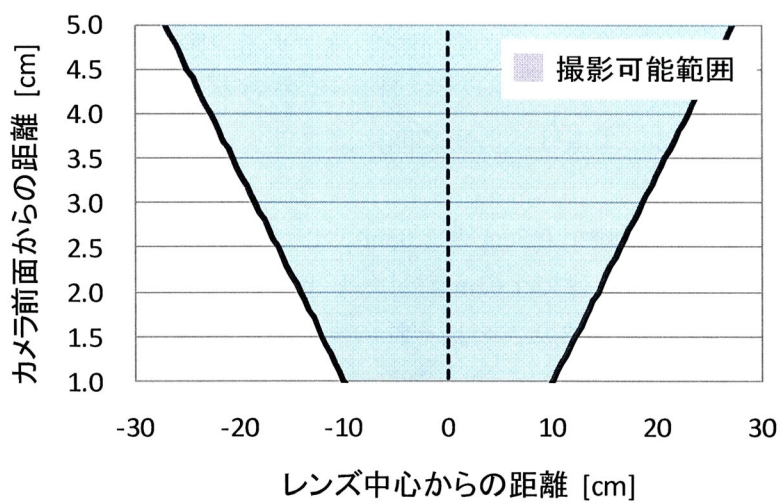


図 3-5 撮影範囲とレンズからの被写体距離との関係

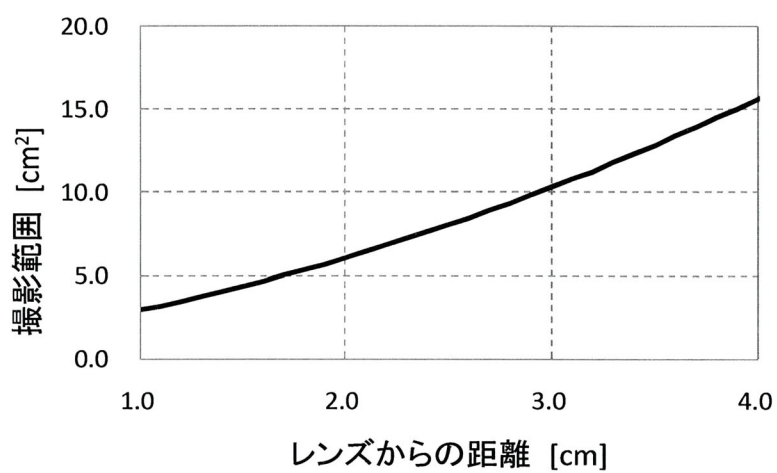


図 3-6 レンズからの距離と撮影範囲の関係

(2) フラッシュ光の有効範囲

フラッシュ撮影される浮遊粉じんの範囲を明確にする実験を考案した。すなわち、写真 3-5 に示すようにブラックパネルに正対し、ブラックパネルからの距離を 0.5cm ずつ距離を離してフラッシュ撮影し、撮影範囲内にフラッシュ光により粉じんが写り始める距離の特定を行った。

ブラックパネルからの距離を 0.5cm と 1.0cm とした時のフラッシュ画像を図 3-7 に示す。この図から、0.5cm と比べて 1.0cm 離れたときの方が写真に写るフラッシュ光が強くなっていることがわかる。また、それぞれの画像の中心線（図中の赤線）上の画素値の変化を比較した結果を図 3-8 に示す。なお、図中の画素値は、0 から 255 までの整数値で表され、0 が黒、255 が白で表現されている。この図から今回の実験で用いたカメラではレンズとフラッシュの位置に近い右側の領域が画素値が高く、より明るく撮影されること、また、0.5cm では画素値が最大値 255 まで到達していないことがわかる。これはブラックパネルとフラッシュ光との間隔が 0.5cm と近接しすぎているため、フラッシュ光が十分に到達していないことを表している。一方 1.0cm では画素値が最大値まで



写真 3-5 デジタルカメラとそれ正対するブラックパネル

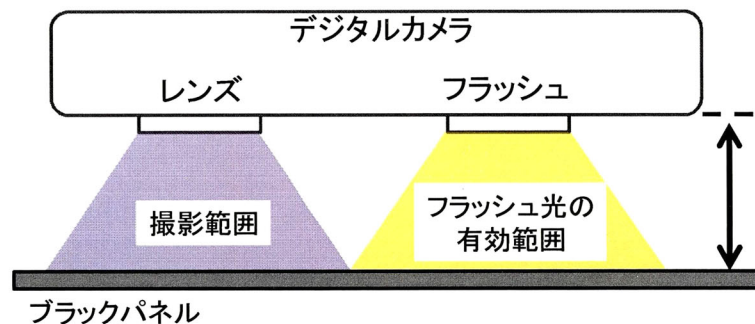


図 3-7 ブラックパネルをデジタルカメラ前方に設置するイメージ

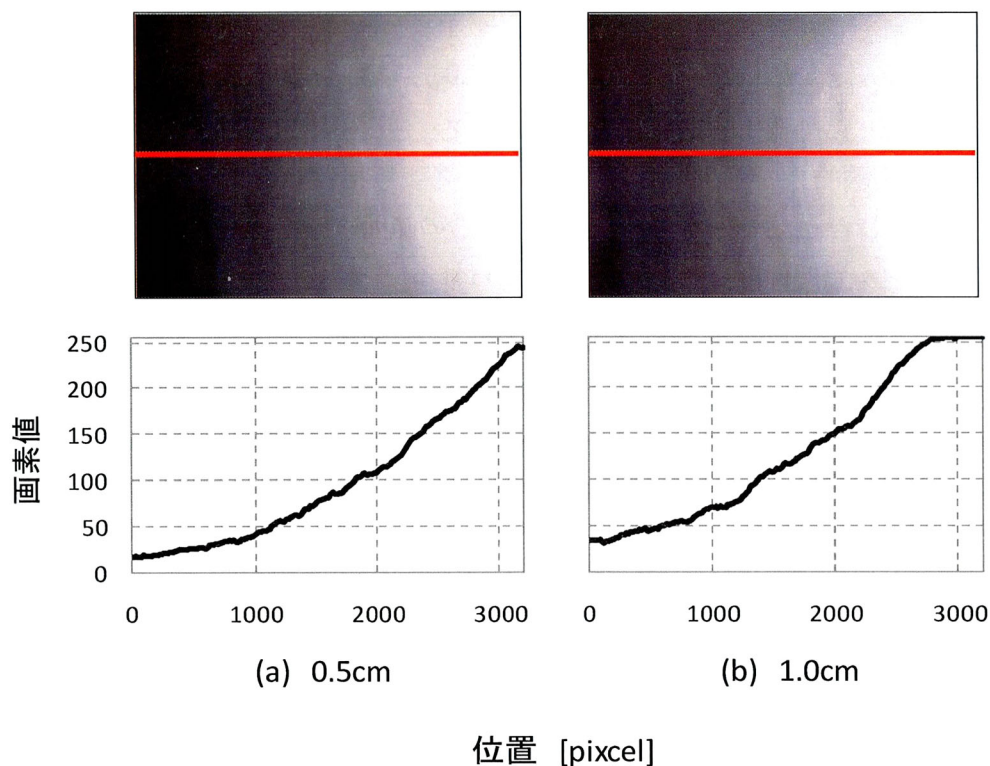


図 3-8 フラッシュ光とブラックパネルとデジタルカメラとの距離の比較

達していることから、フラッシュ光が撮影範囲に入射するためにはレンズから少なくとも 1.0cm 以上の距離が必要であることがわかる。

次に、浮遊粉じんが撮影できる限界を把握するために、フラッシュ光が画像に写る範囲をあえて制限した画像を撮影し浮遊粉じんの撮影可能距離を特定した。すなわち、カメラのレンズとフラッシュとの間で図 3-9 に示す様に遮光板を設置して 0.5cm～5.0cm

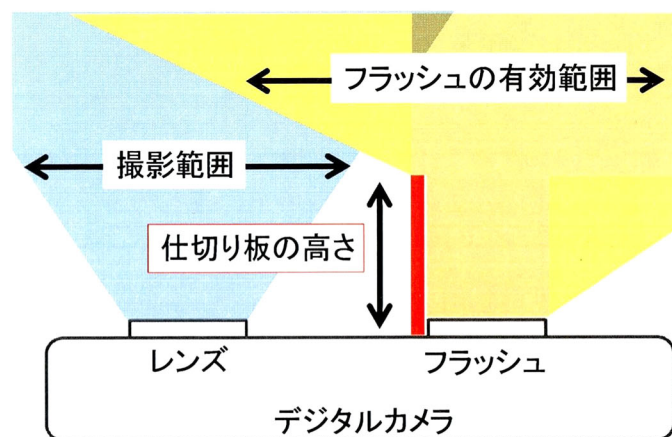


図 3-9 遮光板を取り付けたデジタルカメラのイメージ

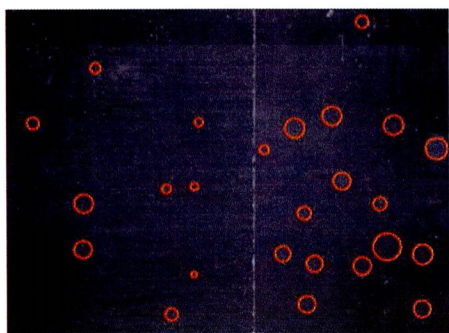
の範囲で高さを変えて、トンネル坑内で粉じんが浮遊している環境下でフラッシュ光の照射範囲を制御した。すなわち仕切り板の高さを変えることで、フラッシュ光の照射位置を変化させ、浮遊粉じんが写らない高さを求めた。この遮光板とフラッシュ光の照射範囲が浮遊粉じんの撮影可能距離と考えられる。

図 3-10 に実験結果を示す。この図からわかるように、レンズから前方に 4.0cm の領域までの画像に浮遊粉じんが写ることから、この範囲までが実験で用いたデジタルカメラのフラッシュ光で撮影される範囲と考えられる。

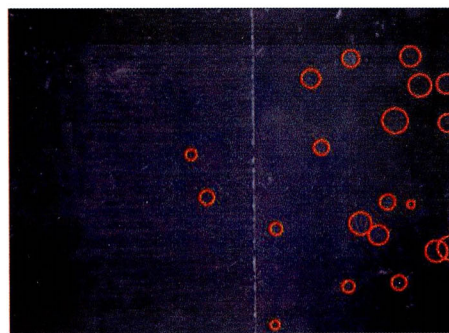
これより、カメラ前面から 1.0cm~4.0cm までの撮影範囲の体積 V を式(3-3)から算出する。

$$V = \int_1^4 (0.56x^2 + 1.46x + 0.96)dx = 24.5 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (3-3)$$

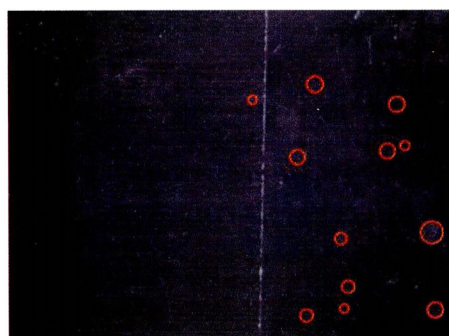
以上の結果から今回利用しているデジタルカメラによる浮遊粉じんの撮影範囲は 24.5cm^3 であることがわかった。なお、当然のことながらカメラの種類を変えると撮影範囲も変わるため、デジタルカメラ毎に撮影範囲をそれぞれ検討する必要がある。



(a) 遮光板高 0 cm



(b) 遮光板高 1 cm



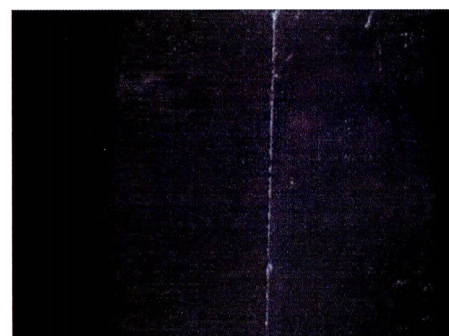
(c) 遮光板高 2 cm



(d) 遮光板高 3 cm



(e) 遮光板高 4 cm



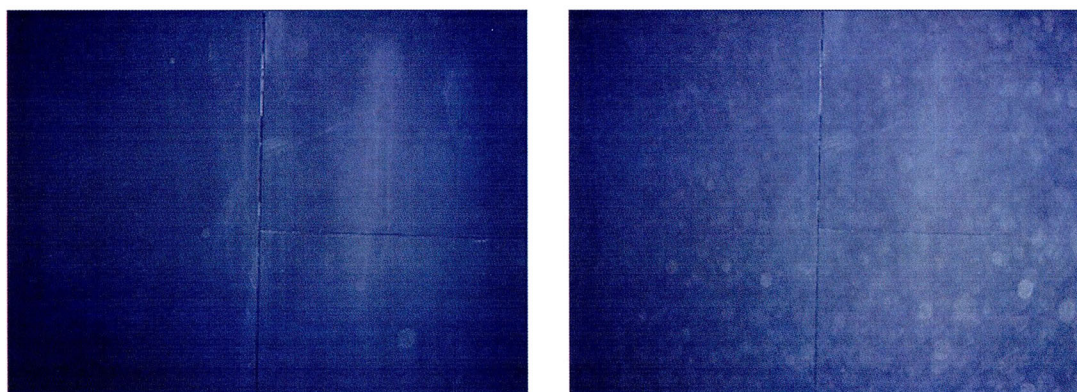
(f) 遮光板高 5 cm

図 3-10 仕切り板の高さを変えたときの浮遊粉じんの影響状況
(図では赤丸印で囲み粉じんを強調している)

3.5 画像処理による粉じん濃度測定法⁴⁾

3.5.1 概要

デジタルカメラでフラッシュ撮影した画像には、カメラの撮影方向に浮遊している粉じんの散乱光が記録される。写真3-6にトンネル坑内でフラッシュ撮影した画像を示す。写真3-6(a)は、粉じん濃度が 0.9 mg/m^3 時の画像で、写真3-6(b)の画像は、粉じん濃度が 6.6 mg/m^3 時の画像である。これらの画像から粉じん濃度が高いと、画像に粉じんの散乱光が多く撮影されるようになり、画像全体が明るく、白っぽくなることがわかる。このことを利用して、画像の輝度から粉じん濃度に換算する方法を検討する。



(a) 低粉じん濃度時(0.9 mg/m^3)

(b) 高粉じん濃度時(6.6 mg/m^3)

写真3-5 粉じん濃度の高低時のフラッシュ撮影画像の比較

3.5.2 測定手順

図3-11に画像処理による測定法の粉じん濃度換算アルゴリズムの概略図を示す。粉じん濃度換算アルゴリズムの概要は、以下の通りである。

- 1) カラー画像の各画素のRGB値(赤 r_{ij} , 緑 g_{ij} , 青 b_{ij})を、式(3-4)から最小値0を黒、最大値255を白とした256階調のグレースケール画像に変換⁸⁾し、 $n \times m$ 行列 a_{ij} を作成する。ここで、 $n \times m$ は画像のサイズである。

$$a_{ij} = 0.2989 \times r_{ij} + 0.5870 \times g_{ij} + 0.1140 \times b_{ij} \quad (3-4)$$

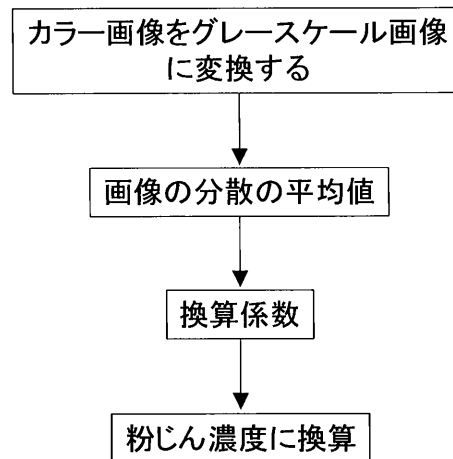


図 3-11 画像処理による測定法の粉じん濃度換算アルゴリズム

2) カメラ画像全体の画素値の平均 \bar{a} を求める。

$$\bar{a} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (3-5)$$

3) 平均値とそれぞれのマトリックスの成分値との差を用いて画像の分散の平均値 $\overline{\sigma^2}$ を求める。

$$\overline{\sigma^2} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{a} - a_{ij})^2 \quad (3-6)$$

4) デジタル粉じん計での粉じん濃度 V^{DF} と対応付けさせた複数枚のデジタル画像から求めた分散と粉じん濃度のそれぞれの平均から換算係数 K を求める。

$$K = \frac{\sum V_i^{DF}}{\sum \sigma_i^2} \quad (3-7)$$

換算係数は写る粉じんの形状や大きさ、つまりカメラの絞りの形状や焦点距離に依存する。

5) 換算係数 K を乗じて換算粉じん濃度 V を求める。

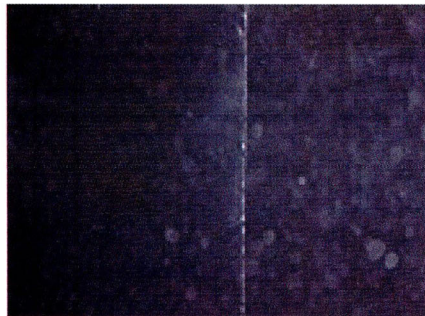
$$V = \overline{\sigma^2} \cdot K \quad (3-8)$$

3.6 本章で提案した二種類の粉じん濃度測定法の有用性の検証

本章で提案した二種類の粉じん濃度測定法を用いて、フラッシュ撮影画像から換算した粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度を比較する。図 3-12 にフラッシュ画像とそれぞれの画像から換算した粉じん濃度を示す。



デジタル粉じん計	2.0 mg/m ³
散乱光計数による測定法 (個数濃度 2.3×10^7 個/m ³)	2.2 mg/m ³
画像処理による測定法	2.1 mg/m ³



デジタル粉じん計	3.0 mg/m ³
散乱光計数による測定法 (個数濃度 2.8×10^7 個/m ³)	2.6 mg/m ³
画像処理による測定法	4.1 mg/m ³



デジタル粉じん計	3.9 mg/m ³
散乱光計数による測定法 (個数濃度 3.9×10^7 個/m ³)	3.6 mg/m ³
画像処理による測定法	2.9 mg/m ³

図 3-12 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像

デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度と本研究で提案する二種類の粉じん濃度測定法を用いて換算した粉じん濃度との相関図を図 3-13 に示す。

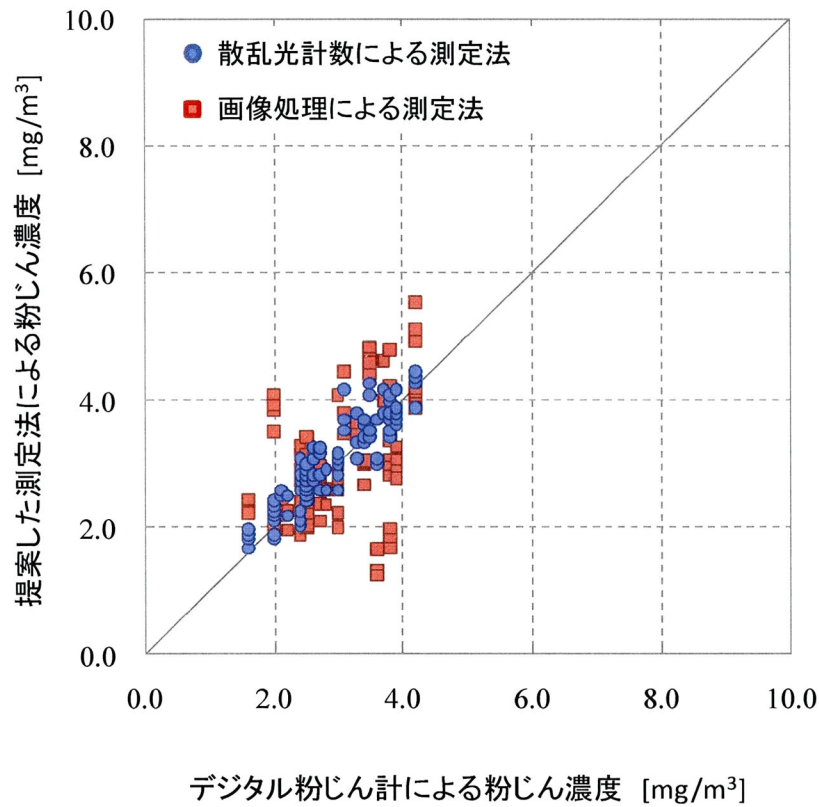


図 3-13 本研究で提案した測定法による粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度の相関図

次に、二種類の粉じん濃度換算手法の比較を行うため、デジタル粉じん計との相関係数を次式を用いて計算した。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right) \quad (3-9)$$

ここで、 \bar{x} 、 \bar{y} 、 σ_x 、 σ_y はそれぞれデジタル粉じん計を用いて計測した粉じん濃度 x と本研究で求めた換算粉じん濃度 y の標本平均と標本標準偏差である。

以上の結果から、散乱光数の計数による粉じん濃度測定法を用いて換算した粉じん濃度とデジタル粉じん計との相関係数は 0.91、それに対して、画像処理による粉じん濃度

測定法を用いて換算した粉じん濃度の相関係数は 0.42 であった。すなわち、散乱光数の計数による粉じん濃度測定法とデジタル粉じん計の粉じん濃度には高い相関性がみられた。このことから、本研究で用いたデジタルカメラでは、粉じんの撮影される空間を四角錐台と近似することができると考えられる。しかし、測定精度を向上させるためには、より厳密にフラッシュ光の有効範囲を調べる必要がある。また、デジタルカメラの機種によって、レンズやフラッシュの位置が異なることから、異なるデジタルカメラで、粉じんの散乱光が記録される空間を求める際には、その妥当性を検証する必要がある。

一方、画像処理による測定法は、散乱光が記録される粉じんが浮遊する空間の調査、散乱光数の計数が必要もなく、より簡便な測定法であるが、デジタル粉じん計との相関性は低い結果となった。この原因としては、ブラックパネルを人が支えることで、フラッシュ撮影毎に、ブラックパネルの傾きが異なり、その反射光の変化がフラッシュ撮影画像に影響を及ぼしていることが考えられる。また、粉じん濃度の高い環境下で、長時間使用するため、ブラックパネルが徐々に汚れてしまうことも原因の一つであると考えられる。

3.7 まとめ

フラッシュ撮影することでカメラの前方を浮遊する粉じんによる散乱光が記録される。本章では、この現象を利用して、フラッシュ撮影により、粉じん濃度を測定する方法の開発を行うことを目的として、本研究で測定対象とした吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタル粉じん計での測定と同期させて、デジタルカメラでフラッシュ撮影を行い、デジタル粉じん計による粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集した。そして、散乱光計数による測定法と画像処理による測定法の2種類の測定方法を提案した。散乱光計数による測定法は、フラッシュ撮影画像に散乱光として記録された粉じんの質量を推定し、その粉じんが画像に記録された範囲で除して粉じん濃度に換算する。また、画像処理による測定法は、より簡易的な方法として、粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を基にして、画像からデジタル粉じん計による粉じん濃度との関係性を見出し、粉じん濃度に換算する方法である。

本章で提案した2種類の粉じん濃度測定法の有効性を現場試験で検証するため、それぞれの測定法で、デジタル粉じん計による粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像から粉じん濃度に変換し、デジタル粉じん計との相関性を比較した。

その結果、散乱光計数による測定法は、デジタル粉じん計との高い相関が確認でき、フラッシュ撮影画像から粉じん濃度測定が可能であることが明らかになった。さらに、フ

フラッシュ撮影で記録される粉じんの浮遊する空間をより厳密に求めることで、更に、測定精度が向上する可能性がある。

また、画像処理による粉じん濃度測定法は、デジタル粉じん計との相関は低いものの、散乱光計数による測定法とは異なり、画像処理により、フラッシュ撮影画像から粉じん濃度を自動処理で換算できるため、粉じん濃度の測定精度の向上を検討することで、散乱光計数による測定法に比べて、より簡便な粉じん濃度測定法を提案することができる可能性が明らかになった。また、両測定法に共通して、カメラで撮影する際のフラッシュの発光量の影響を検討する必要がある。また、カメラの機種の違いによる粉じん濃度測定への影響をカメラ毎に比較検討する必要があることもわかった。

参考文献

- 1) 可視化情報学会：PIVハンドブック，pp.25-27，森北出版，2002.
- 2) Hecht, E. (尾崎義治，朝倉利光 訳)：光学I—基礎と幾何光学—，p.142，丸善，2008.
- 3) 小林浩一：光の物理 光はなぜ屈折，反射，散乱するのか，pp.169-179，東京大学出版会，2002
- 4) 進士正人，岸田展明：トンネル坑内におけるデジタルカメラを利用した簡易粉じん測定法，土木学会論文集 G, Vol. 66, No. 1, pp.1-8, 2010.
- 5) 厚生労働省：ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン，p.15, 2008.
- 6) 永田信一：図解 レンズがわかる本，p.152，日本実業出版社，2009.
- 7) 神崎洋治，西井美鷹：体系的に学び直す デジタルカメラのしくみ，pp.74-78，日経BP ソフトプレス，2007.
- 8) 貴家仁志：デジタル画像処理—画像信号処理入門—，p.11，昭晃堂，2008.

第4章

画像処理による測定法への ニューラルネットワークの適用

4.1 はじめに

第3章では、デジタルカメラでのフラッシュ撮影画像から粉じん濃度を測定する方法として、2種類の測定方法を提案した。散乱光計数による測定法は、デジタル粉じん計による粉じん濃度と高い相関関係が確認でき、フラッシュ撮影画像から粉じん濃度を測定することが可能であることが明らかとなった。しかし、粉じん濃度測定には、フラッシュ撮影で記録した粉じんの散乱光を手動で計数しなければならないため、粉じん濃度測定にたいへんな手間がかかってしまう課題があるため、より簡易な測定方法として、フラッシュ撮影画像を画像処理により粉じん濃度に換算する方法（画像処理による測定法）を考案した。しかし、画像処理による測定法は、フラッシュ撮影画像を自動処理で粉じん濃度に換算できるが、粉じんの散乱光計数による測定法と比較し、デジタル粉じん計による粉じん濃度との相関性が低い結果となった。

そこで、本章では、画像処理による測定法を改良し、ニューラルネットワーク（artificial neural network, 以下，“ANN”と略称する）を適用することで、デジタル粉じん計との相関性を向上させ、より有用性の高い粉じん濃度測定法（以下，“ANNを用いた画像処理による測定法”）の開発を目的として、撮影方法、画像処理方法について検討した。

4.2 フラッシュ撮影時に使用するデジタルカメラ

フラッシュ光の散乱によりカメラに記録される浮遊粉じんは、レンズの近傍に浮遊していることを3.4.2で明らかにしたように、より多くの浮遊粉じんを撮影するためには、より広角度で撮影する必要がある。そこで、表3-2に示すように、一眼レフデジタルカメラは、撮像素子のサイズが大きく、広角度で撮影することができる。また、フラッシュ撮影で記録される散乱光は、ピントがぼやけて撮影される。一眼レフデジタルカメラ

は、コンパクトデジタルカメラと比べて、被写界深度の調整に適している。これらのことから、本実験では、一眼レフデジタルカメラ（カメラは、“PENTAX 製 k-m”，レンズは，“PENTAX 製 smc PENTAX-DA L 18-55mmF3.5-5.6AL”）を使用することとする。しかし、一眼レフデジタルカメラは、写真 4-1 に示すように、レンズが前方に突き出しており、レンズの近傍を浮遊する粉じんにフラッシュ光が照射できず、写真 4-2 (b) に示すように、コンパクトデジタルカメラでは粉じんが撮影される場合でも、一眼レフデジタルカメラでは全体に霧がかかったような写真が撮影される場合があり、個別の浮遊粉じんを撮影しにくい。

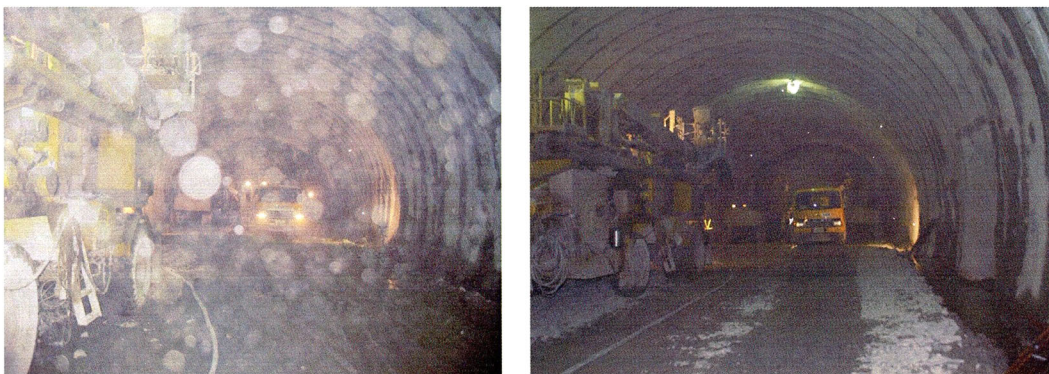
そこで、レンズ前面にリング状のオートマクロストロボ（“PENTAX 製 AF160FC”，以下，“リングフラッシュ”と呼ぶ）を取り付け、レンズの近傍にフラッシュ光が照射するよう工夫した一眼レフデジタルカメラを使用する（写真 4-3）。実験で使用した一眼レフデジタルカメラの撮影パラメータを表 4-1 に示す。リングフラッシュを取り付けた一眼レフデジタルカメラを使用することで、写真 4-4 に示すように、粉じんによる散乱光をより多く記録し、また、はっきりとした散乱光を記録することが可能となった。



(a) 前面

(b) 側面

写真 4-1 使用した一眼レフデジタルカメラ



(a) コンパクトデジタルカメラ

(b) 一眼レフデジタルカメラ

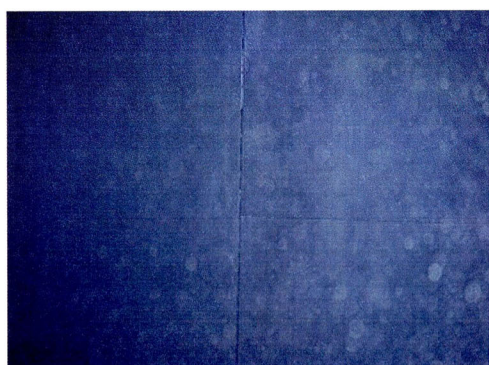
写真 4-2 フラッシュ撮影画像の比較



写真 4-3 リングフラッシュを取り付けた一眼レフデジタルカメラ

表 4-1 一眼レフデジタルカメラ及びリングフラッシュのパラメータ

デジタルカメラ	PENTAX k-m
レンズ	PENTAX smc PENTAX-DAL 18-55mmF3.5-5.6AL
リングフラッシュ	PENTAX AF160FC
記録画素数	3872×2592 ピクセル
レンズF値	F8.0
レンズの焦点距離	40 mm
ISO感度	800
フラッシュ	ガイドナンバー16 (ISO100・m)
ホワイトバランス	固定



(a) コンパクトデジタルカメラ



(b) リングフラッシュを取り付けた
一眼レフデジタルカメラ

写真 4-4 リングフラッシュの使用によるフラッシュ撮影画像の比較

4.3 画像処理による測定法の改良¹⁾

フラッシュ撮影画像から粉じん濃度に換算する過程を前処理、特徴抽出、識別、後処理に分けて、第3章で述べた画像処理による測定法と本章で提案するANNを用いた画像処理による測定法を比較した結果を図4-1に示す。前処理は、フラッシュ撮影画像の照明の平均強度に自動的に合わせたり、あるいは映像に閾値処理を施して背景差分を行うことで、有意な情報を失うことなく、以後の処理を簡単にする処理である。また、特徴抽出では、測定対象の形状や色などの特徴を数量化した「特徴量」と呼ばれる値の抽出を行う。識別では、特徴抽出によって得られた特徴量を用いて、対象物をカテゴリに割り当てる。後処理では、識別によって0~1の間で正規化して出力された値を変換し、最終的な結果を出力する。

本章では、画像処理による粉じん濃度測定法の精度向上目指し、人間の刺激と反応に関する脳神経組織の働きを数学的に模擬した人工知能であるANNを利用することで、精度向上を図る^{2,3,4)}。ANNには、非常に望ましい特性がいくつか存在する。たとえば生

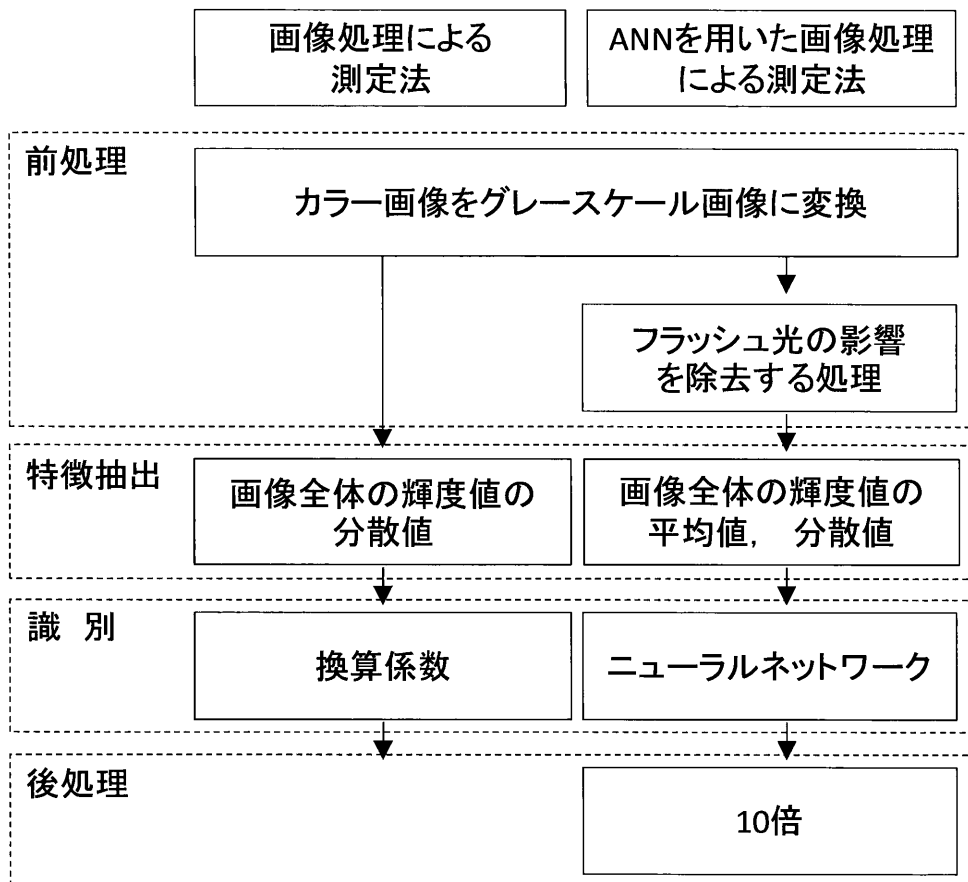


図4-1 画像処理による測定法の比較

物の脳のように極めて高い並列性を持ち、学習すること、つまり時間と共に振る舞いを改善することができ、入力が歪むなどのノイズに強く、未知の状況でも過去に学習した状況に類似していれば働き続けることができる汎化能力がある⁵⁾。また、前処理において、ブラックパネルによる反射光を除去する処理を適用する。これは、フラッシュ撮影によって記録される光は、主に粉じんによる散乱光と撮影方向に設置しているブラックパネルによる反射光である。しかし、粉じんによる散乱光に比べてブラックパネルによる反射光の影響が大きいことがわかったため、前処理として、ブラックパネルによる反射光を除去する処理を行う。

4.3.1 前処理

第3章では、カラー画像をグレースケール画像にそのまま変換した。しかし、図4-2に示すように、ブラックパネルの傾きによるフラッシュ光の照射角度の違いが、フラッシュ撮影画像の輝度に大きく影響することがわかった。そこで、本章では、フラッシュ光の照射角度の影響を除去できる画像処理を前処理として実施し、特徴量をより抽出しやすくする^{6,7)}。

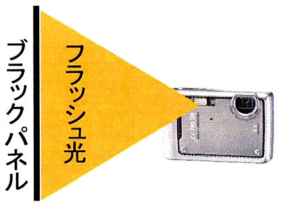

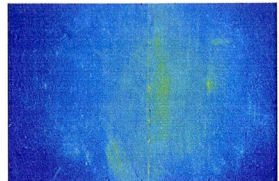
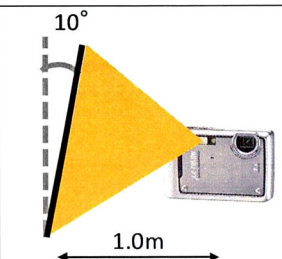
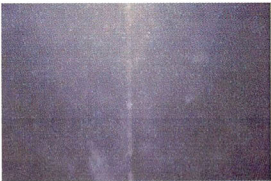
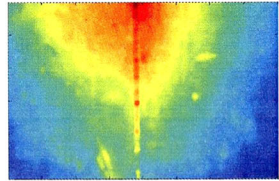
フラッシュ光の照射角度	撮影イメージ図	フラッシュ撮影画像	輝度の強度画像
0°			
10°			

図4-2 フラッシュ光の照射角度の影響

図4-3(a)にフラッシュ撮影時の原画像画像を示す。画像からわかるように、画像は全体がほぼグレーで一様、その中に淡白に粉じんが撮影されている。しかし、この画像をグレースケール画像に変換した図4-3(b)から明らかなように、輝度分布は画像中心部が高く、周辺部が低い分布を持つ。なお、この図では、カラー表示で強調して表現している。これはブラックパネルへのフラッシュ光照射の影響である。この画像をそのま

ま粉じん濃度測定に適用する場合、背景として利用しているブラックパネルに対するフラッシュ光の輝度が解析結果に影響を与えることがわかった。また、輝度の高い領域はブラックパネルとフラッシュ光との照射角度により、その位置や範囲が変化するため、フラッシュ光の照射角度の影響を低減する方法をあらたに考案する必要であった。

そこで、ブラックパネルに反射するフラッシュ光の影響を除去し、粉じんの反射光のみの輝度を抽出する。そのために、以下に述べる前処理を行い、ANN への入力データとした。

- 1) フラッシュ撮影されたカラー画像を式(3-4)からグレースケール画像に変換し、画素値を 0~255 の数値で表す。
- 2) 図 4-4 に示す様に、画像内に $m \times n$ ピクセルの小ブロックを作成する。その結果、画

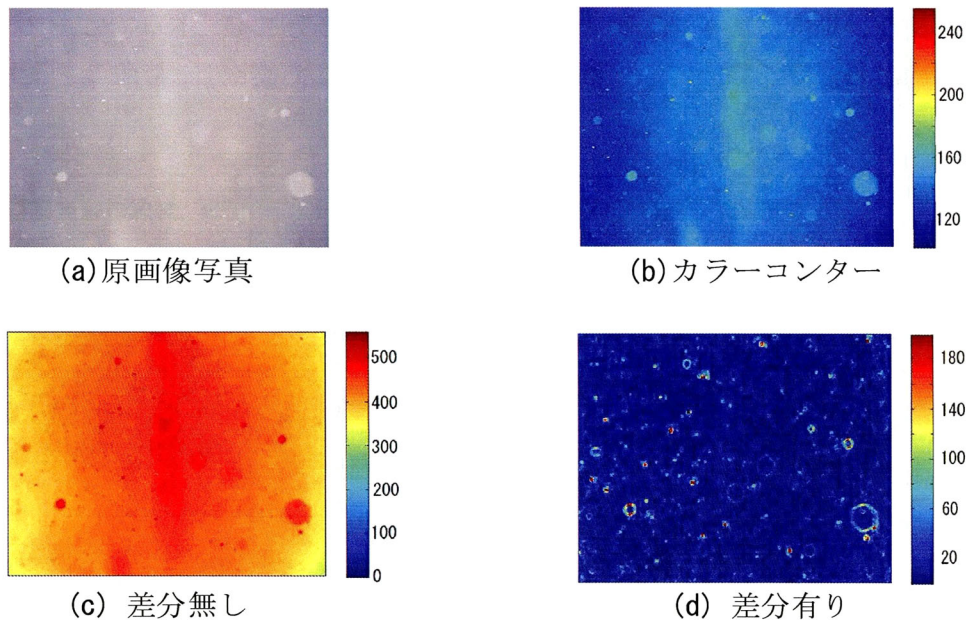


図 4-3 差分処理の有無の比較

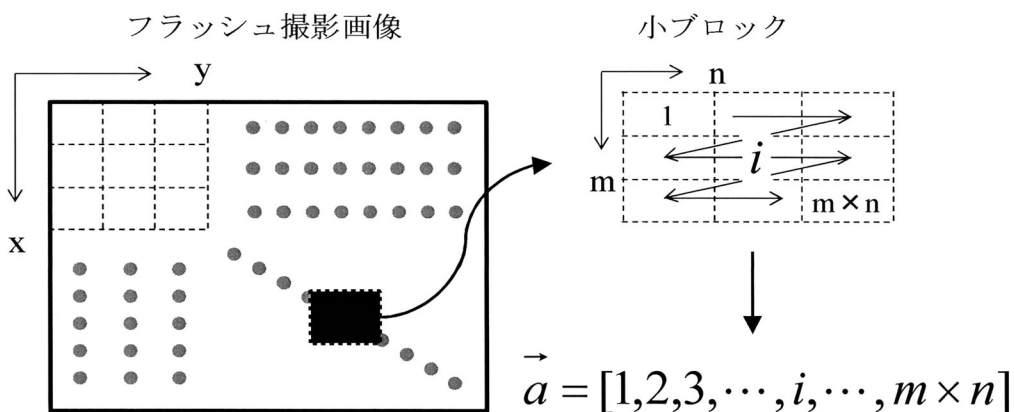


図 4-4 画像中の小ブロックと画像ベクトル

像全体は $k \times l$ 個の小ブロックの集合体となる。

- 3) それぞれの小ブロック内のピクセルの画素値を $m \times n$ 次元の画像ベクトルに変換する。
- 4) 図 4-5 に示す様に各画像ベクトル内の最小値 $\min(a)_j$ で、画像ベクトル成分を差分し、小ブロック j 毎にフラッシュ光による輝度分を除去する。

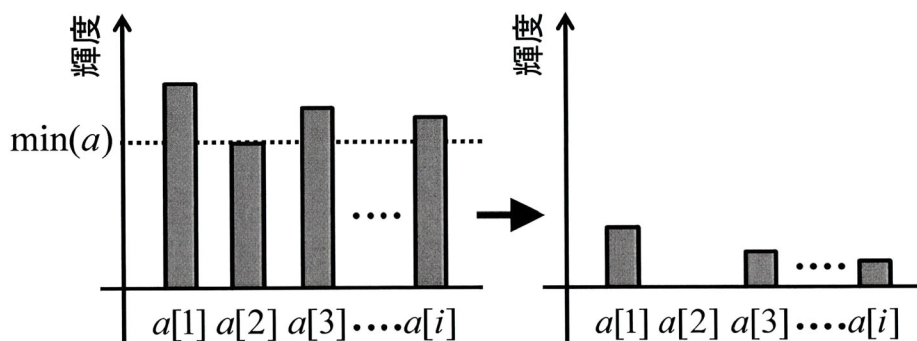


図 4-5 画像ベクトル成分と最小値差分

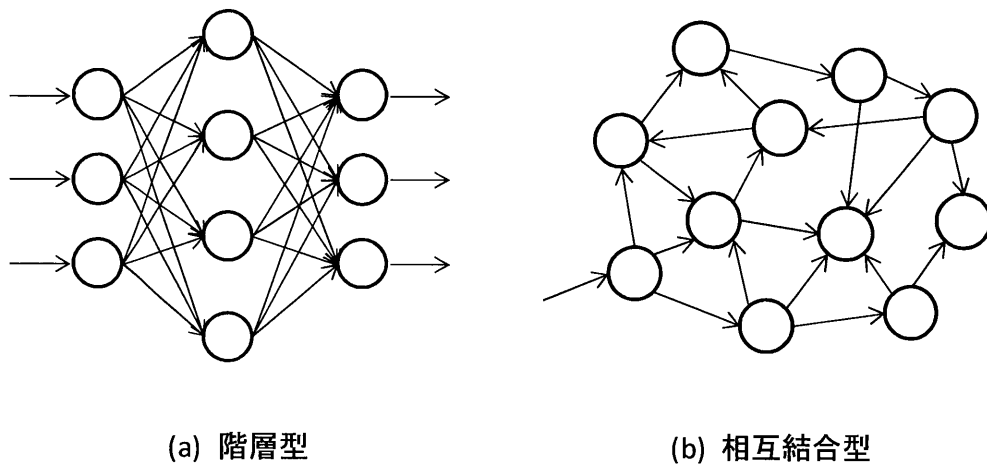
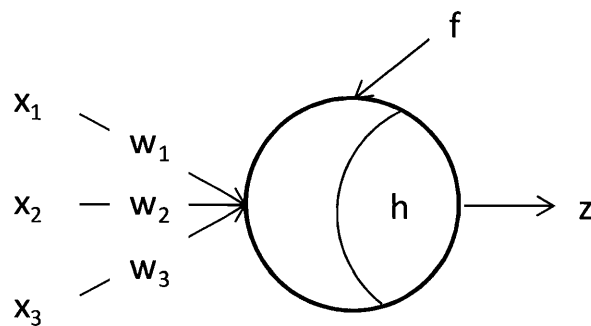
- 5) 小ブロック毎の画像ベクトルの大きさを式(4-1)を用いて算出し、小ブロック j の輝度とする。従って、画像全体は $k \times l$ 個の小ブロックの輝度の変化分布 $\left| \vec{a} \right|_{(j)}$ が得られる。

$$\left| \vec{a} \right|_{(j)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m \cdot n} \{a_i - \min(a)_j\}^2} \quad (4-1)$$

図 4-3(c) と (d) に、小ブロック化後に画像ベクトルの最小値で差分した結果と差分しない結果の比較を示す。この図からわかるように、差分することでフラッシュ光の輝度の影響を適切に除去できていることがわかる。

4.3.2 識別と後処理

第 3 章では、統計処理による換算係数を利用した。しかし、フラッシュ撮影画像は、複数の散乱光が重なり合い、散乱光の大きさも変化するため、粉じん濃度と散乱光の関係性が複雑である。そこで、人間の刺激と反応に関する脳神経組織の働きを数学的に模擬した人工知能である ANN を利用して、フラッシュ撮影画像と粉じん濃度との関係を表現する。以下に、ANN の概要を説明する。

図 4-6 ANN モデル⁸⁾図 4-7 ユニットのモデル¹²⁾

(1) 階層型

ANN は、多入力、単一出力のニューロン（以下，“ユニット”と呼ぶ）と呼ばれる機能素子から構成されている。多数のユニットによって構成されたネットワークで、さまざまなモデルがある、それらのモデルを大きく分けると、図 4-6 に示すように、階層型と相互結合型に分けることができる。

階層型では、ユニットが層状に配置され、各階層間は結合荷重をもつネットワークを介して結合しており、各層内での結合はない。また、ANN には学習機能があり、ネットワークを調節することで、入力パターンから望ましい出力パターンを出力することができる。しかし、その学習法である固定増分法では学習が不可能な場合があることが証明され⁹⁾、階層型が使用されることは少なくなっていった。それでも生体情報科学など脳を扱う分野などで地道な研究が続けられていた。そして、バックプロパゲーション（誤差逆伝播法）という学習法¹⁰⁾が考案され、現在、金融や証券など経済分野における予測、画像、音声などのパターン認識、ロボットやプラントの制御などで広く使われるように

なった¹¹⁾。

本研究では、バックプロパゲーションによる階層型の ANN を用いて、画像の画素値から粉じん濃度に変換するシステムを構築した。以下、階層型の ANN の原理とバックプロパゲーションについて述べる。

各ユニットの動作は式(4-2)によって決定され、それをモデル化したものが図 4-7 である。

$$z = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - h\right) \quad (4-2)$$

入力値 x_i に結合荷重 w_i が掛けられた値を、入力の数だけ総和をとり、そこから閾値(h)を引いた値がユニットの入力となることを示している。関数 f がユニット内の処理を規定し、その関数値がユニットの出力となり、0~1 の実数が出力される。そこで、後処理では、出力値を粉じん濃度に換算するために、出力値が 0 のとき、粉じん濃度を $0.0\text{mg}/\text{m}^3$ とし、出力値が 1 のとき、粉じん濃度が $10.0\text{mg}/\text{m}^3$ として、出力値を 0~ $10.0\text{mg}/\text{m}^3$ の粉じん濃度に変換する。

(2) バックプロパゲーション

ANN は、これを複数のユニットに拡張したもので、階層型とは、入力層、出力層、そして、これらの中に隠れ層と呼ばれる 1 層以上の中間層を入れて構成された ANN である (図 4-8)。階層型は、入力層に与えた信号 (パターン) が結合荷重によって変換

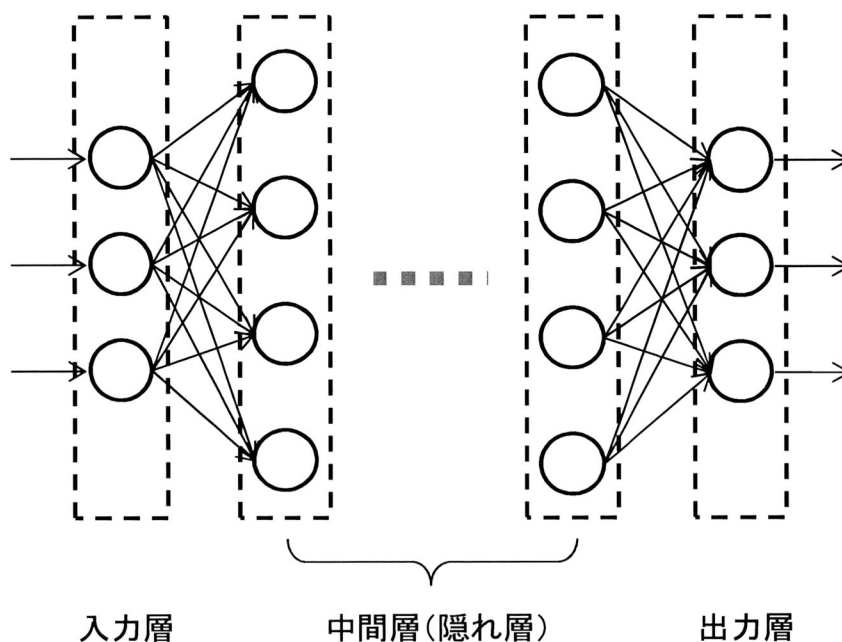
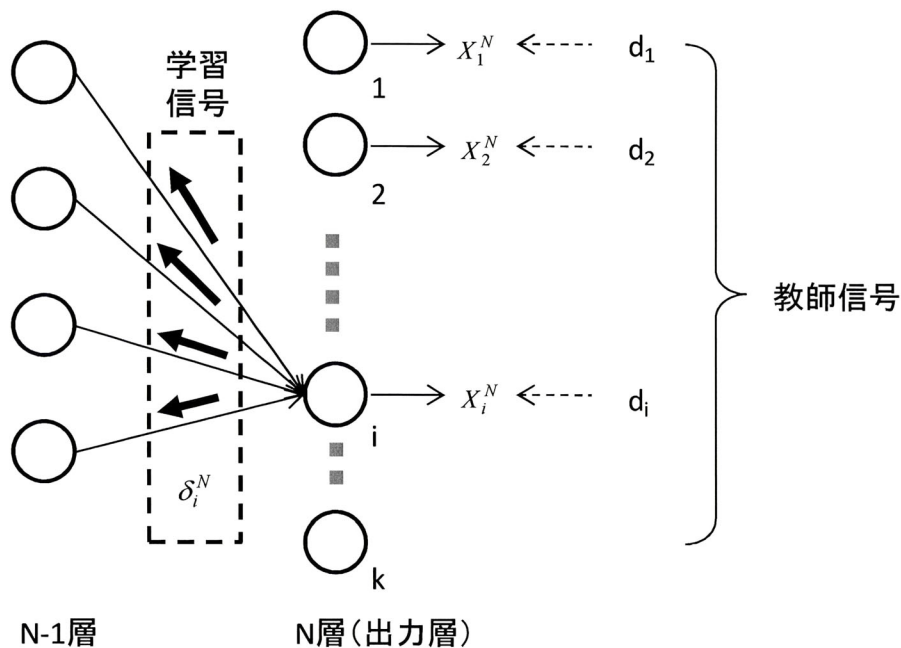


図 4-8 階層型ネットワーク¹³⁾

図 4-9 教師信号と学習信号¹⁴⁾

されながら出力層のユニットの値として出力される信号伝播を行う。しかしこれだけでは、ただ入力パターンから、ある決まった出力パターンが出力されるのみである。そこで、ANN には、入力パターンに対して望ましい出力ができるようにネットワークを調節する機能がある。その代表的なものに誤差逆伝播学習法がある。バックプロパゲーションは、出力パターンと望ましい出力パターンとの誤差を計算し、それを学習信号として入力層のほうへ伝播させながら結合荷重と閾値を調整することで、入力パターンから望ましい出力パターンを出力させることができる。望ましい出力パターンのことを教師信号と呼び、教師信号が存在する学習法を教師付き学習と呼ぶ。

学習信号の与え方は、出力層のユニットが戻す学習信号と、それより前段の層のユニットが戻す学習信号とは異なる。出力層のユニット i から戻される学習信号は、出力層からの出力値と教師信号を使い、式(4-3)で表される (図 4-9)。

$$\delta_i^N = (d_i - X_i^N) f'(u_i^N) \quad (4-3)$$

次に n 層のユニット i から $n-1$ 層のユニットへ向かって戻される学習信号 δ_i^n は次の式で求められる。

$$\delta_i^n = f'(u_i^n) \sum_k \delta_k^{n+1} W_{k,i}^{n+1,n} \quad (4-4)$$

つまり n 層のユニット i から $n+1$ 層へ結合している道を逆に伝わって、そのユニットに集まってくる $n+1$ 層からの学習信号は、結合荷重をかけられて合計されます。それと伝達関数の微分との積がとられて学習信号が計算される。そして、結合荷重の修正量は次の式で計算される。

$$\Delta W_{i,j}^{n,n-1}(t) = \eta \delta_i^n X_j^{n-1} + \alpha \Delta W_{i,j}^{n,n-1}(t-1) \quad (4-5)$$

$\Delta W_{i,j}^{n,n-1}(t)$ は $n-1$ 層のユニット j と n 層のユニット i の間の結合荷重に対する今回の趨勢量を示し、 $\Delta W_{i,j}^{n,n-1}(t-1)$ は前回の修正量を示す。つまり、ここでは、収束計算を繰り返していることから、今回を t で表すと前回は $t-1$ となる。 η は学習定数で収束の速さに関係するが、大きな値を与えたからといって学習が早く完了するとは限らない。 α は安定化定数で、前回の重みの修正量を使い、収束時の振動を抑える効果がある。 η 、 α はともに 1.0 以下の正実数の範囲で任意の値を与える。以上により、求められた修正量から次の式で結合荷重を修正する。

$$\Delta W_{i,j}^{n,n-1}(t+1) = W_{i,j}^{n,n-1}(t) + \Delta W_{i,j}^{n,n-1}(t) \quad (4-6)$$

閾値の修正については、前述したように各ユニットに対して、常に 1.0 を出力するユニットから閾値に相当する結合荷重をもって信号がきているとする。したがって、それに対する学習信号は式(4-3), (4-4)で求められたものを使い、修正量は式 (3-7) で $X_i^{n-1} \equiv 1$ と見なし、次の式を得ることができる。

$$\Delta h_i^n(t) = \eta \delta_i^n + \alpha \Delta h_i^n(t-1) \quad (4-7)$$

したがって、修正のための式は、

$$\Delta h_i^n(t+1) = h_i^n(t) + \Delta h_i^n(t) \quad (4-8)$$

以上の手順を繰り返すと、出力層から出力値と教師信号との誤差が小さくなっていく。このように、出力層の出力値と教師信号との誤差の自乗和の極小値を与える方法を最急降下法と呼ぶ。

4.4 ANNを用いた画像処理による測定法の有用性の検証

4.4.1 実験概要

本章で提案した方法で換算した粉じん濃度と、デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度の相関関係から精度向上を確認する。第2章、第3章で行った実験現場と同じトンネル建設現場で、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタル粉じん計での測定と同期させて、デジタルカメラでフラッシュ撮影を行い、デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集する。また、本実験で得られたフラッシュ撮影画像をもとに、ANNの層数と各層のユニット数を決定を行う。

4.4.2 ブラックパネルの小型化

ブラックパネルは、フラッシュ撮影画像に粉じんの散乱光のみを記録するために設置する。しかし、ブラックパネルを設置することで、ブラックパネルによるフラッシュ光の反射光がフラッシュ撮影画像に記録されてしまうため、第3章では、ブラックパネルをデジタルカメラから3m離して設置した、これにより、ブラックパネルによる反射光の影響が低減できたが、2×3mの大型のブラックパネルが必要であった。そこで、本実験では、より光の反射しにくい塗料を塗ったブラックパネルを利用した。その仕様を表4-2に示す。これにより、デジタルカメラとの距離を1.5mとすることができ、小型



写真 4-5 デジタルカメラでのフラッシュ撮影状況

表 4-2 ブラックパネルの仕様

サイズ	0.9×1.2 m
材質	発泡スチロール
塗料	水性エマルジョン系 黒色（ツヤ消しタイプ）

のブラックパネルが使用可能となった。

4.4.3 ANN 構造の決定方法

画像処理による粉じん濃度測定法で用いる ANN は、バックプロパゲーションによる階層型である。そのため、バックプロパゲーションを用いた学習を行うときは、ANN の構造やパラメータの値を決定する必要がある。しかし、ネットワークの大きさが過小であると十分に学習ができず、逆に課題があると個別パターンやノイズまで学習して汎化能力が減衰してしまう問題がある¹⁵⁾。対象とする問題に応じて構造やパラメータの調整を行う必要があり、設計理論が確立しているわけではない¹⁶⁾。バックプロパゲーションでは、最急降下法を用いて誤差関数の大域的最小値の検索を行う。この最急降下法は、本質的には局所的最小値を見つける方法であり、大域的最小値を見つける保証はない。

ANN の層数が多いほど、また各層のユニット数が多いほど、局所的最小値が多くなり、誤差関数の大域的最小値探索の際に局所的最小値に陥る可能性が高まる。しかしながら、一般に、層数が多く、ユニット数が多いほどパターン識別能力が高い。もともと、誤差関数の局所的最小値でも、大域的最小値に近いものであればパターン識別上あまり気にする必要がない。実際には、層数とユニット数は試行錯誤で決定されている。そこで、ANN の設定と学習を繰り返し、最適な層数と各層のユニット数を検討する。

(1) 入力層のユニット数と出力層のユニット数

入力層のユニット数は、文字、数字、画像などのパターン認識の場合は、各パターンの識別に必要な特徴ベクトルの次元数である。一般に、この次元数が大きいほどパターン識別能力は向上する。その反面、誤差関数の局所的最小値に陥る可能性は増してしまう。本研究では、フラッシュ撮影画像から算出したの 2 種類の特徴量を入力するため、ユニット数は、2 とする。また、出力層のユニット数は、出力パターン数であることから、本研究では、ユニット数を 1 とする。

(2) 中間層数と中間層のユニット数

中間層がない ANN では、単純パーセプトロンと同様、超平面での線形分離可能な問題しかパターン認識できない。しかし、中間層の層数を増に連れて、パターン分離能力が高まり、2 層では任意の特徴ベクトル空間でパターン分類が可能となる¹⁷⁾。これにより、学習の収束性は向上するが、逆に未学習の入力値に対する判別性能が低下してしまう恐れがある。

そこで、本研究では、中間層の数と中間層のユニット数を決定するために、中間層を 1~3 層について、中間層のユニット数を 1~10 まで少しずつ増やし、最適な構成を検討する。中間層は、図 4-10 に示すように、入力層側から H1, H2, H3 とする。中間層が 2 層の場合は、2 つの中間層のユニット数は同じでパターン識別されている例が多い¹⁸⁾

ため、同様に、H1 と H2 のユニット数は同数とする。中間層が3層の場合は、H1 と H3 のユニット数を同数として、ユニット数を検討する。

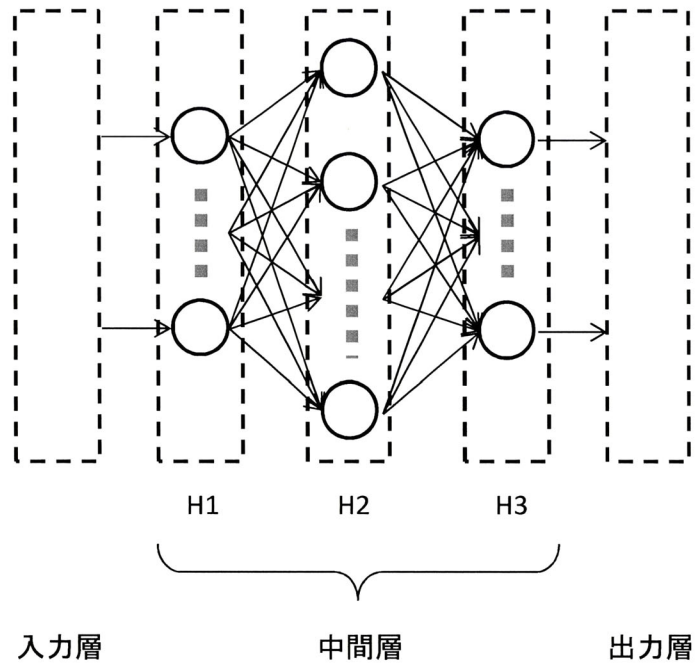


図 4-10 中間層が3層の ANN

4.4.4 ANNの学習と評価方法

撮影時のデジタル粉じん計測定した粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を測定データとする。図4-11に示すように、測定データを学習データとテストデータに分ける。そして、学習データによって学習したANNを用いて、テストデータを粉じん濃度に換算し、それに対応するデジタル粉じん計での粉じん濃度との相関係数を式(3-9)から算出し、本論文で提案するANNを用いた画像処理による測定法の評価を行う。

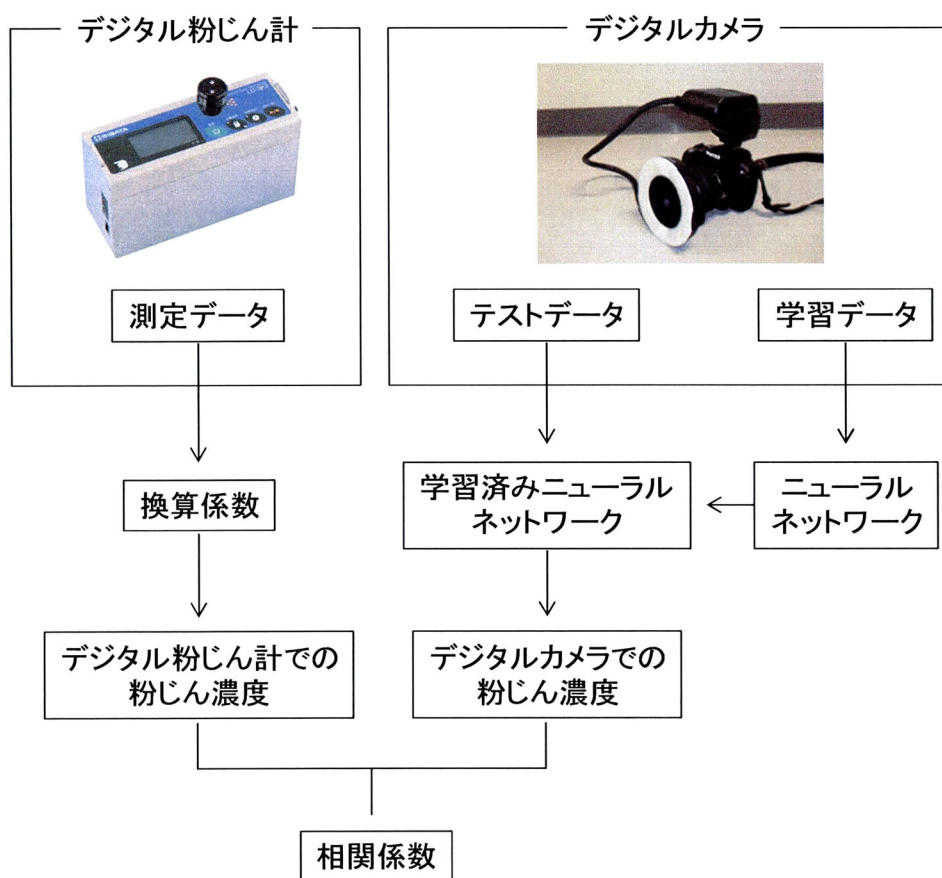
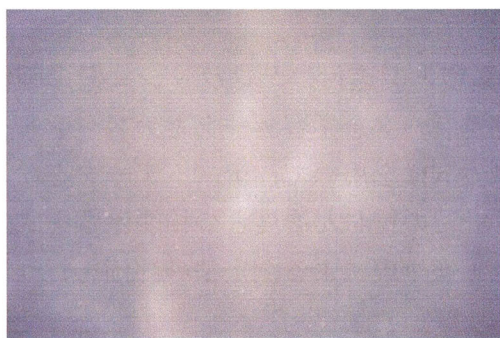


図4-11 ANNの学習と評価方法

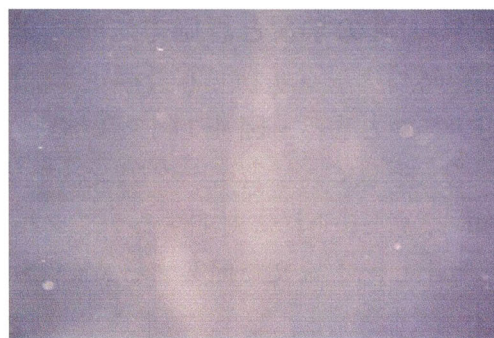
4.4.5 実験結果

(1) 粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像枚数

撮影時のデジタル粉じん計での粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像1枚を1データとする。写真4-5、写真4-6に粉じん濃度毎の代表的なフラッシュ撮影画像を示す。



粉じん濃度 1.1 mg/m³



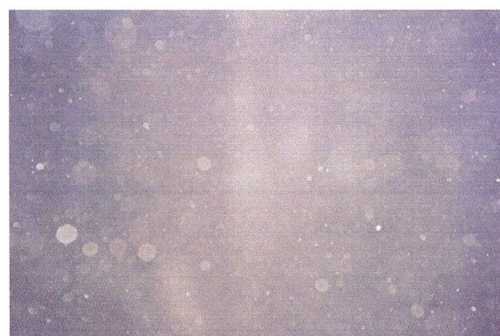
粉じん濃度 1.5 mg/m³



粉じん濃度 2.2 mg/m³



粉じん濃度 2.5 mg/m³

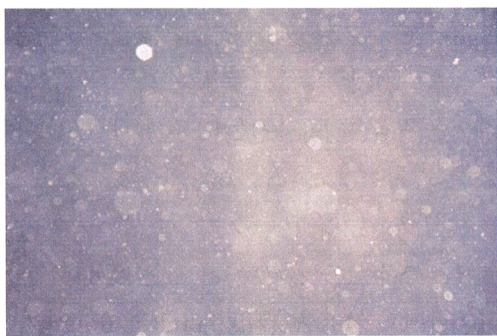


粉じん濃度 3.1 mg/m³



粉じん濃度 3.5 mg/m³

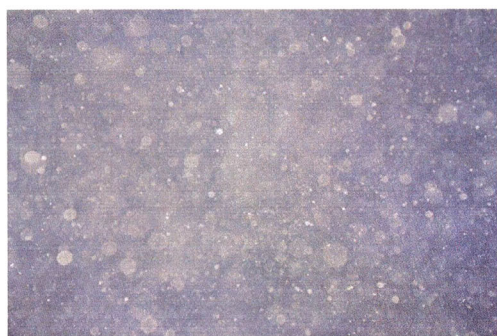
写真 4-5 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像
(粉じん濃度 1.1~3.5 mg/m³)



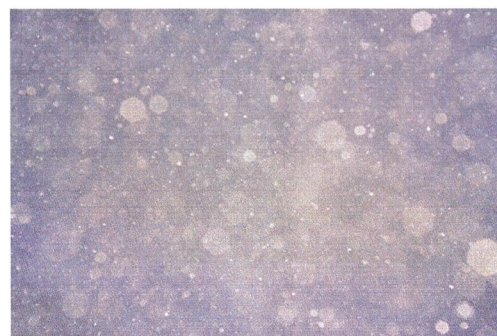
粉じん濃度 4.0 mg/m³



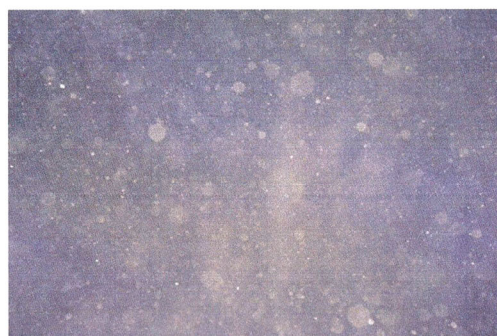
粉じん濃度 4.5 mg/m³



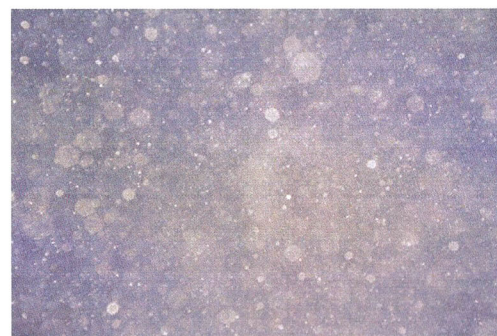
粉じん濃度 5.0 mg/m³



粉じん濃度 5.3 mg/m³



粉じん濃度 6.0 mg/m³



粉じん濃度 6.5 mg/m³

写真 4-6 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像
(粉じん濃度 4.0~6.5 mg/m³)

これらの写真から、粉じん濃度が高くなるに従って、フラッシュ撮影によって記録される粉じんが多くなり、画像全体が白っぽくなるのがわかる。実験では、計388の測定データを得た。全測定データの粉じん濃度別データ数を図4-12に示す。この図から1.0~8.0mg/m³までの範囲の測定データが得られたことがわかる。60データをテストデータとして、幅広い範囲から選択した。また、残りの328データは学習データとしてANNの構成の決定とその学習に使用した。図4-13にそれぞれの粉じん濃度別データ数を示す。この図から、学習に使用したデータの範囲は、粉じん濃度が0.0~8.0mg/m³であることから、本実験で構築したANNの測定範囲は、0.0~8.0mg/m³であると言える。

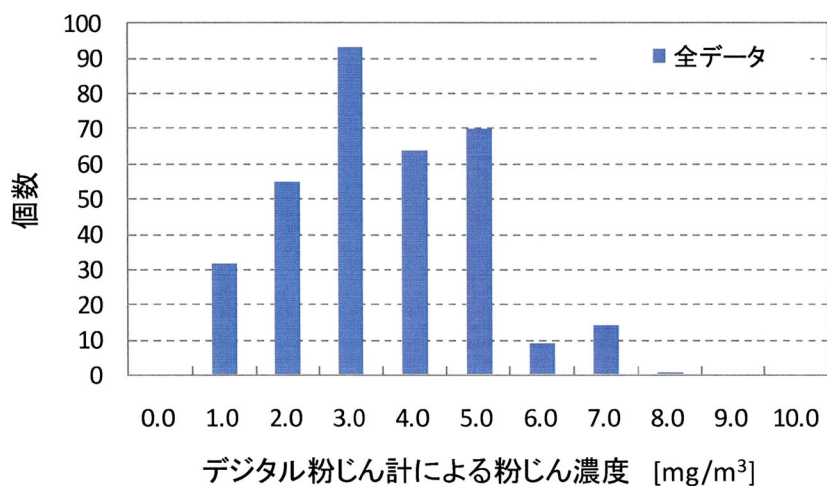


図4-12 全測定データの粉じん濃度別データ数

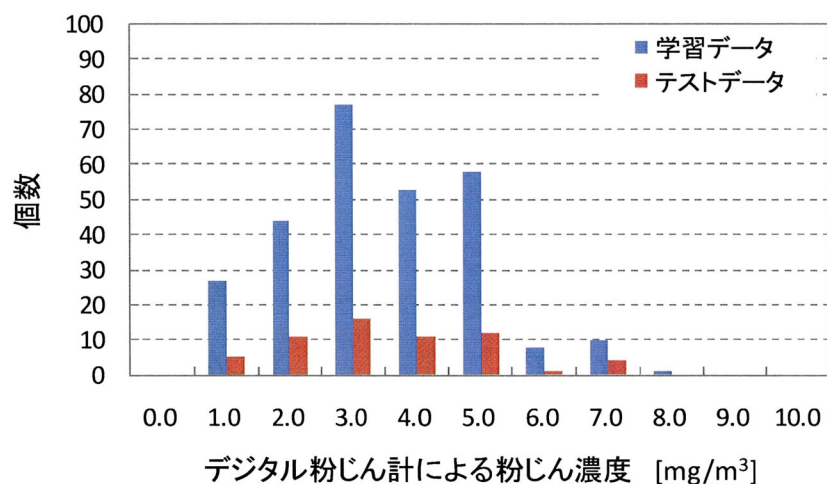


図4-13 学習データとテストデータの粉じん濃度別データ数

(2) ANNの構造の決定

中間層数と中間層のユニット数を決定するために、実験で得られた328の学習データを用いて、ANNを学習させたときの相関係数と、ANNのユニット数の関係を図4-14に示す。また、テストデータを学習させたANNに適用した場合の相関係数とユニット数を図4-15に示す。本実験では、中間層を1層で、中間層ユニット数が9としたときの学習データでの相関係数が最も高くなった。

従って、中間層を1層で、中間層ユニット数が9のANNを採用した。また、入力層は、画像の平均値と分散値を入力パターンとするためにユニット数を2とし、出力層は粉じん濃度を出力させるためユニット数を1とした。

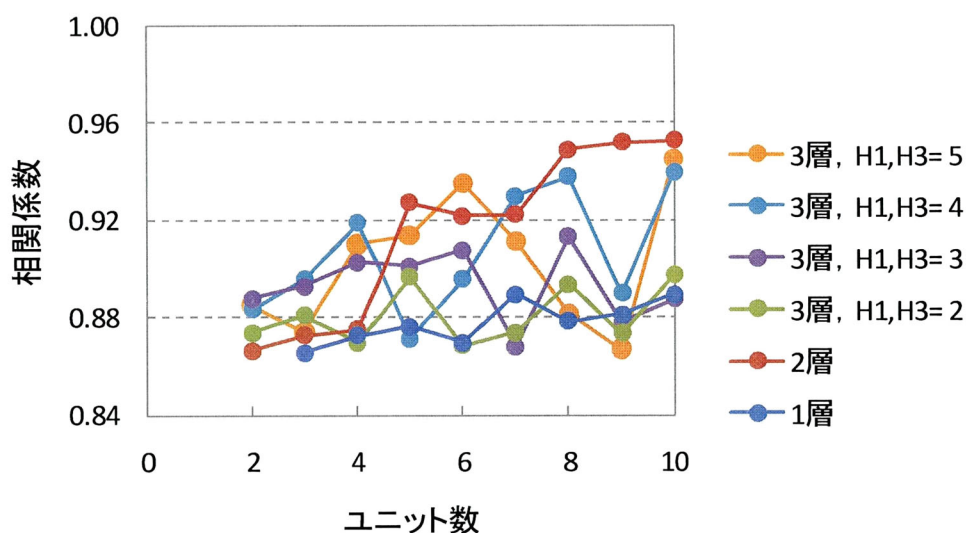


図4-14 中間層ユニット数と学習データでの相関係数

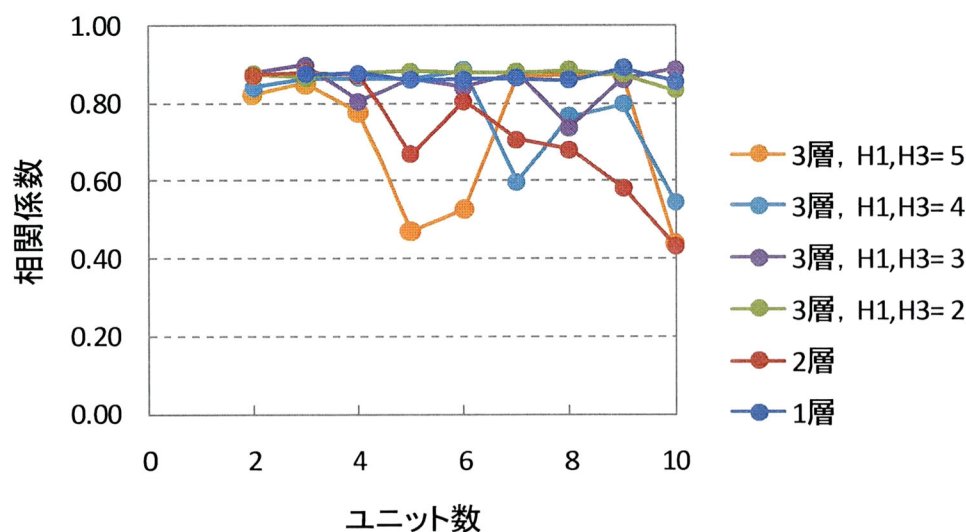


図4-15 中間層ユニット数とテストデータでの相関係数

(3) デジタル粉じん計での粉じん濃度との測定結果比較

学習させた ANN で、テストデータを粉じん濃度に換算した結果を図 4-16 に示す。この図から、粉じん濃度測定法と学習させたネットワークが精度よく粉じん濃度に換算出来ており、デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度との相関係数は、0.90 となり、高い相関関係が確認された。なお、参考までに、第3章で提案した画像処理による粉じん濃度測定法での相関係数は、0.01 と極めて低い結果であった。このことから、ANN を用いた画像処理による測定法の有用性を確認できた。

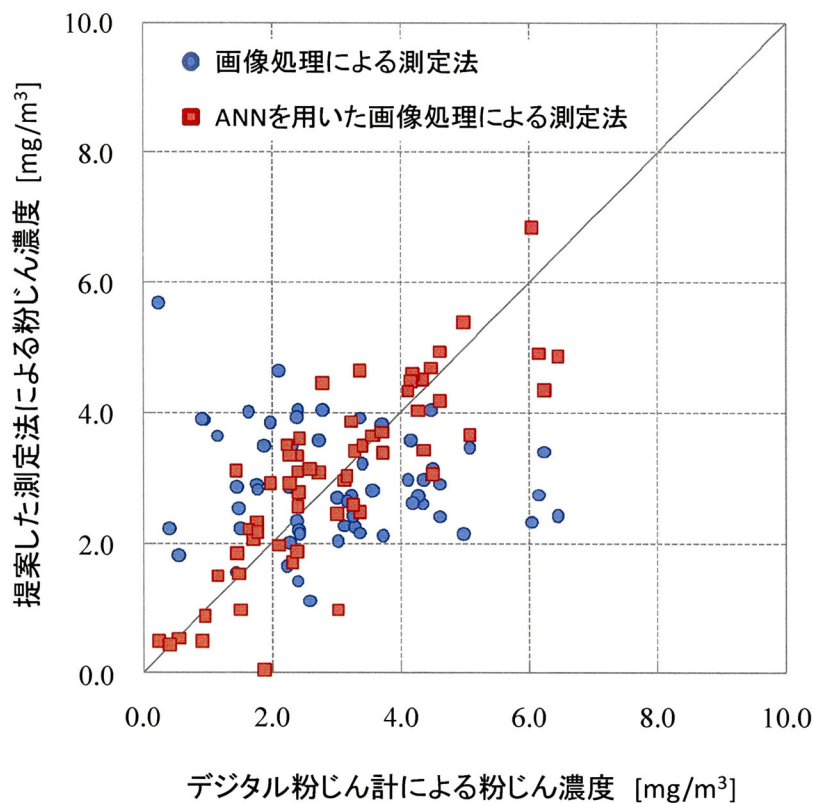


図 4-16 本研究で提案した測定法による粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度の相関図

4.5 まとめ

本章では、画像処理による測定法を改良し、粉じん濃度の測定精度を向上させることを目的として、撮影方法、画像処理方法について検討を行った。撮影方法の改良として、リングフラッシュを取り付けた一眼レフデジタルカメラを利用し、粉じんによる散乱光をより多く記録し、また、はっきりとした散乱光を記録することができるよう工夫するとともに、ブラックパネルについても小型化した。次に、フラッシュ撮影画像から粉じん濃度に換算する過程を前処理、特徴抽出、識別、後処理に分類した。そして、前処理として、フラッシュの影響を除去する処理を追加するとともに、識別に、ANN を適用した。

また、本章で ANN を用いた測定法の有用性を検討するために、本論文で測定対象とした吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタル粉じん計での測定と同期させて、デジタルカメラでフラッシュ撮影を行い、デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集した。得られたフラッシュ撮影画像を基に、画像処理による測定法で用いる ANN の層数と各層のユニット数を検討した。中間層数とユニット数を少しずつ変更した場合の学習時の相関係数を比較した。その結果、中間層を 1 層、両層のユニット数を 9 とした場合の相関係数は 0.90 となり、デジタル粉じん計との高い相関性が確認でき、また、デジタル粉じん計による粉じん濃度との相関性を向上できた。

参考文献

- 1) 進士正人, 岸田展明:ニューラルネットワークを利用したデジタルカメラによる粉じん濃度測定の実用化, 土木学会論文集 G, Vol. 66, No. 4, pp.194-200, 2010.
- 2) 西村晃一, 岸田悟, 渡部徹:ニューラルネットワークを用いた指紋照合システム, 電子情報通信学会技術研究報告.NLP 非線形問題, Vol.104, No.112, pp.1-4, 2004.
- 3) 田中章浩, 小林光, 岸田悟, 他:階層型ニューラルネットワークを用いた声紋による個人認証システムの構築, 電子情報通信学会技術研究報告.NC ニューロコンピューティング, Vol.107, No.542, pp.427-431, 2008.
- 4) 曾利仁, 安野卓:階層型ニューラルネットワークを用いた短時間先の簡易風速予測法, 津山工業高等専門学校紀要, Vol.49, pp.67-72, 2007.
- 5) R.Pfeifer, J.Bongard (細田耕, 石黒章夫 訳): 知の原理, p.38, 共立出版, 2008.
- 6) 岡部孝弘, 佐藤洋一:照明変化をともなう物体認識へのサポートベクターマシンの適用, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.SIG 5(CVIM 6), 2003.
- 7) 松山隆司, 和田俊和, 波部斉, 他:照明変化に頑健な背景差分, 電子情報通信学会論文誌. D-II, Vol.J84-D- II, No.10, pp.2201-2211, 2001.
- 8) 吉富康成:ニューラルネットワーク, p.10, 朝倉書店, 2002.
- 9) Marvin Minsky, Seymour Papert (斉藤正男 訳): パーセプトロン: パターン認識理論への道, p.105, 東京大学出版会, 1971.
- 10) D.E.Rumelhart, G.E.Hinton, R.J.Williams: Learning Internal Representations by Error Propagation, Parallel Distributed Processing, Vol.1, pp.318-362, 1986.
- 11) 田辺和俊: NEUROSIM/L によるニューラルネットワーク入門, p.55, 日刊工業新聞社, 2003.
- 12) 前掲 8), p7.
- 13) 前掲 8), p15.
- 14) 平野広美: C++と Java でつくるニューラルネットワーク, p.13, パーソナルメディア, 2008.
- 15) 前掲 8), pp.43-45.
- 16) R.P.Lippmann: An Introduction to Computing with Neural Nets, IEEE ASSP Magazine, Vol.4, pp.4-22, 1987.
- 17) 坂和正敏, 田中雅博:ニューロコンピューティング入門, pp.37-40, 森北出版, 1997.
- 18) 前掲 8), p.79.

第5章

現場適用実験

5.1 はじめに

第3章では、デジタルカメラを使用した簡易的な粉じん濃度測定方法として、散乱光計数による測定法と画像処理による測定法の2つの測定法を提案した。そして、第4章では、簡易な方法である画像処理による測定法の測定精度の向上を目的として、画像処理による測定法を改良し、ANNを用いた画像処理による測定法を提案した。

本章では、画像処理による粉じん濃度測定法で用いるニューラルネットワークの層数と各層のユニット数について検討するとともに、第3章で提案した散乱光計数による測定法と、同じく第3章で提案、第4章で改良したANNを用いた画像処理による測定法の有用性を確認することを目的として、第3章、第4章でフラッシュ撮影画像を収集したトンネル建設現場とは異なるトンネル建設現場において、散乱光計数による測定法とANNを用いた画像処理による測定法によって、それぞれ粉じん濃度を測定し、デジタル粉じん計による粉じん濃度との相関を検証するとともに、本研究で提案する2つの測定法の比較を行い、ANNを用いた画像処理による測定法の有用性を検証する。

5.2 実験方法¹⁾

5.2.1 現場実験概要

現場実験は、山岳工法発破掘削（補助ベンチ付全断面）により建設中の道路トンネルで実施した。吹付けコンクリート作業中の主要な換気設備の配置を図5-1に示す。図に示すとおり、トンネル建設時の換気システムとしては坑外に設置した送風機（2100m³/min）から切羽に送風し、移動式台車に積載した電気集じん機（2400m³/min）で集じんする。

第4章では、画像処理による粉じん濃度測定法の精度向上を目的として、リングフラッシュを取り付けた一眼レフデジタルカメラを使用するなどの検討を行った。本章では、

本研究で提案した測定法の有用性を検証するために、小型で安価なコンパクトデジタルカメラ（オリンパス製 μ 795SW）を使用した。デジタルカメラの撮影パラメータは、表 3-2 と同様である。

また、ブラックパネルは、第 4 章において、小型のパネルを作成したが、より多くのフラッシュ画像を収集するためには、長時間同じ姿勢で持ち続ける必要がある。そのため、本実験では、分解して持ち運びが可能なハンガーラックを利用してブラックパネルを固定し、人がパネルを持つ負担を軽減した。それにより、長時間の測定が可能とするとともに、パネルの揺れも抑制できるよう工夫した。パネルの設置位置は、カメラから 1.5m で、床上 1.3m の高さに設置した。デジタルカメラ、デジタル粉じん計も同様に床

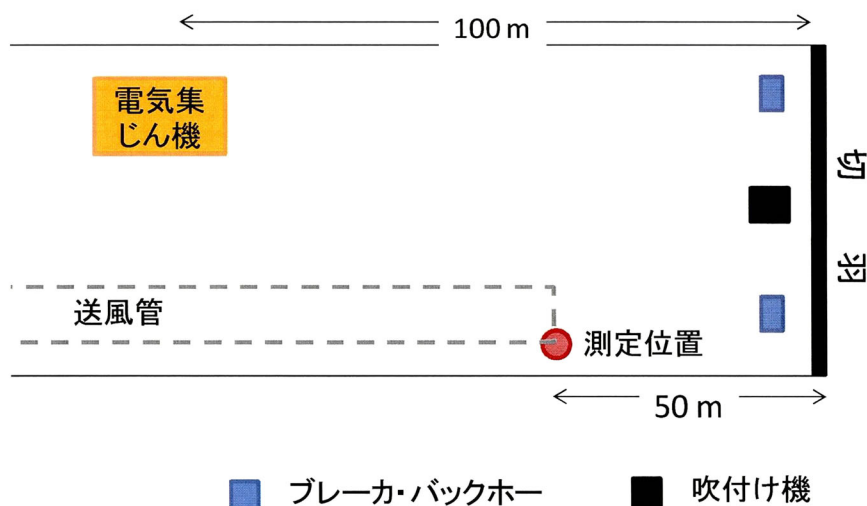


図 5-1 切羽周辺の建設設備と測定位置



写真 5-1 ブラックパネルとデジタルカメラでのフラッシュ撮影状況

上 1.3m の高さに設置し、1 分間隔のデジタル粉じん計の測定と同期させながらフラッシュ撮影を行った。これにより、お互いに同じ濃度の粉じんを測定するようにした。

5.2.2 散乱光計数による測定法の測定手順

散乱光計数による測定法の詳細は、第 3 章に述べたとおりである。測定手順の概略を以下に示す。

- 1) フラッシュ撮影画像に記録された粉じんの個数を計数する
- 2) 第 2 章で求めた浮遊粉じんの中位径 ($1.8\mu\text{m}$) とカウントした個数から、粉じんを球体とした場合の体積を算出する。
- 3) 2.5.1 より浮遊粉じんは主に普通ポルトランドセメント成分であるため、その一般的な単位体積質量 3.15 g/cm^3 を用いて質量に換算する。
- 4) 換算した浮遊粉じんの質量を 3.4.2 で明らかになった浮遊粉じんの撮影空間の体積で除して粉じん濃度に換算する。

5.2.3 ANN を用いた画像処理による測定法の測定手順

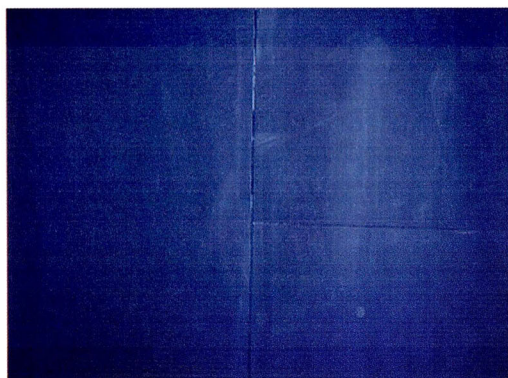
ANN を用いた画像処理による測定法は、より簡易的な方法として、粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を基にして、画像から粉じん濃度との関係性を見出し、粉じん濃度測定に利用できる特徴を探す。この特徴と粉じん濃度で学習させた ANN を用いて粉じん濃度に換算する。測定手順の概略を以下に示す。

- 1) フラッシュ撮影されたカラー画像をグレースケール画像に変換し、画素値を 1 ピクセルあたり 0~255 の数値に変換する
- 2) 図 4-4 に示す様に、画像内に $m \times n$ ピクセルの小ブロックを作成する。その結果、画像全体は $k \times l$ 個の小ブロックの集合体となる
- 3) それぞれ小ブロック内のピクセルの画素値を $m \times n$ 次元の画像ベクトルに変換する
- 4) 図 4-5 に示す様に各画像ベクトル内の最小値 $\min(a)_j$ で、画像ベクトル成分を差分し、小ブロック j 毎にフラッシュ光による輝度分を除去する
- 5) 小ブロック毎の画像ベクトルの大きさを式(4-1)を用いて算出し、小ブロック j の輝度とする。従って、画像全体は $k \times l$ 個の小ブロックの輝度の変化分布 $\left| a \right|_{(j)}$ が得られる
- 6) 輝度の変化分布 $\left| a \right|_{(j)}$ の平均値と分散値を算出する
- 7) 算出した平均値と分散値を入力パターンとして、ANN に入力し、出力値を粉じん濃度に換算する。

5.3 実験結果

5.3.1 粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像

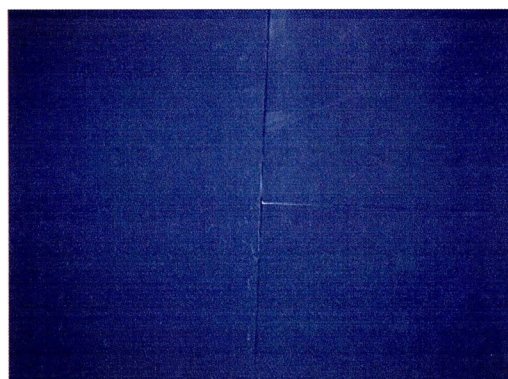
ANN は、データ数の多少に限らず学習を行うことができる。しかし、データ数が少なければ ANN の識別能力は低くなる¹⁾。撮影時のデジタル粉じん計での粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像 1 枚を 1 データとする。写真 5-2, 写真 5-3, 写真 5-4 に粉じん濃度毎の代表的なフラッシュ撮影画像を示す。



デジタル粉じん計 1.2 mg/m³

散乱光計数による測定法 1.3 mg/m³
(個数濃度 1.4 × 10⁷ 個/m³)

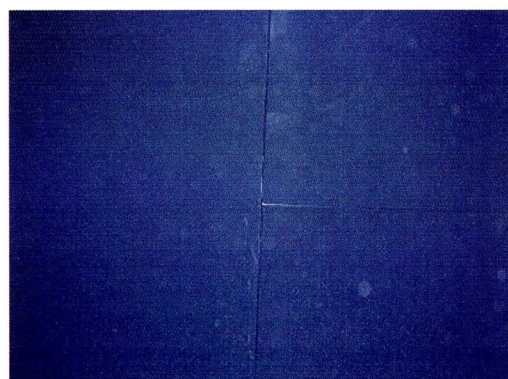
画像処理による測定法 0.9mg/m³



デジタル粉じん計 2.6 mg/m³

散乱光計数による測定法 2.1mg/m³
(個数濃度 2.3 × 10⁷ 個/m³)

画像処理による測定法 3.6mg/m³

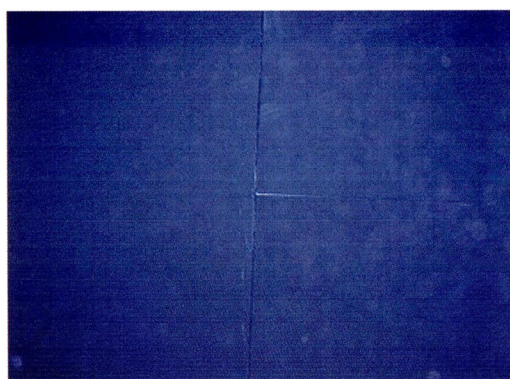


デジタル粉じん計 3.5mg/m³

散乱光計数による測定法 2.1mg/m³
(個数濃度 2.3 × 10⁷ 個/m³)

画像処理による測定法 4.7mg/m³

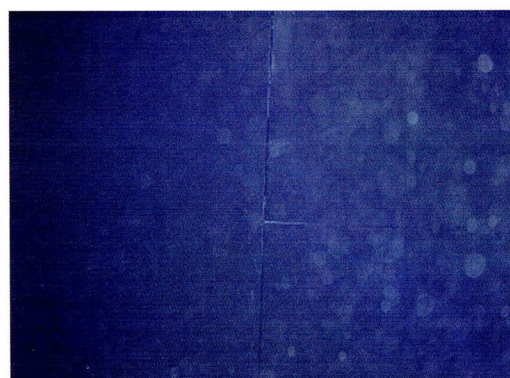
写真 5-2 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像 (粉じん濃度 1.2~3.5 mg/m³)



デジタル粉じん計 4.6mg/m³

散乱光計数による測定法 4.0 mg/m³
 (個数濃度 4.3×10^7 個/m³)

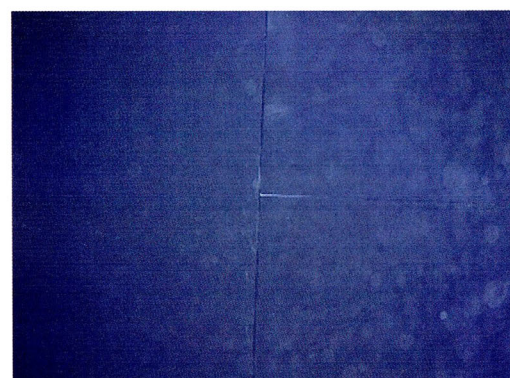
画像処理による測定法 4.0mg/m³



デジタル粉じん計 5.5mg/m³

散乱光計数による測定法 5.1mg/m³
 (個数濃度 5.4×10^7 個/m³)

画像処理による測定法 5.4mg/m³

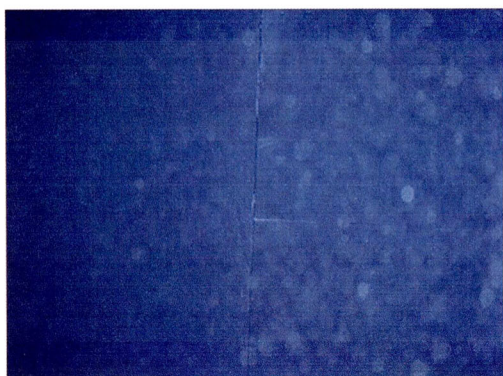


デジタル粉じん計 6.4mg/m³

散乱光計数による測定法 5.8mg/m³
 (個数濃度 6.9×10^7 個/m³)

画像処理による測定法 6.7mg/m³

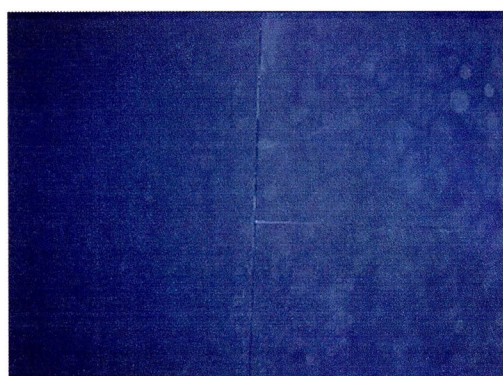
写真 5-3 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像 (粉じん濃度 4.6~6.4 mg/m³)



デジタル粉じん計 7.4mg/m³

散乱光計数による測定法 10.6 mg/m³
(個数濃度 11×10⁷ 個/m³)

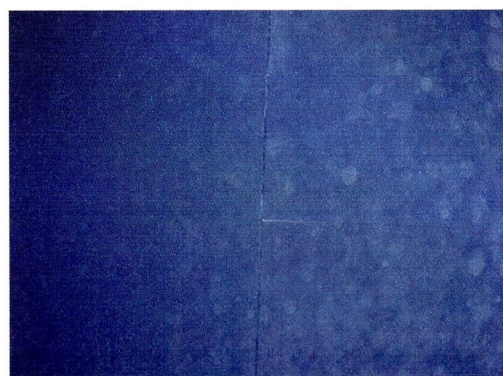
画像処理による測定法 7.9 mg/m³



デジタル粉じん計 8.4 mg/m³

散乱光計数による測定法 6.9mg/m³
(個数濃度 7.4×10⁷ 個/m³)

画像処理による測定法 8.3mg/m³



デジタル粉じん計 9.6 mg/m³

散乱光計数による測定法 8.9mg/m³
(個数濃度 9.5×10⁷ 個/m³)

画像処理による測定法 9.1mg/m³

写真 5-4 粉じん濃度を関連付けたフラッシュ撮影画像 (粉じん濃度 7.4~9.6 mg/m³)

これらの写真から、六角形の白斑が多数写っていることがわかる。これは、粉じんによる散乱光がピントがぼやけて撮影されたことを示している。また、粉じん濃度が高くなるに従って、フラッシュ撮影によって記録される粉じんが多くなり、それに伴い画像全体が白っぽくなることがわかる。実験では、計 142 の測定データを得た。図 5-2 に全測定データを粉じん濃度別にまとめた結果を示す。この図から 1.0~10.0 mg/m^3 までの広い範囲の測定データが得られたことがわかる。本論文で提案した 2 つの粉じん濃度測定法の有用性を検証するために、30 データをテストデータとして、図 5-3 に示すように、幅広い範囲から選択した。そして、残りの 112 データを学習データとして、ANN の学習とその構成の決定に使用した。

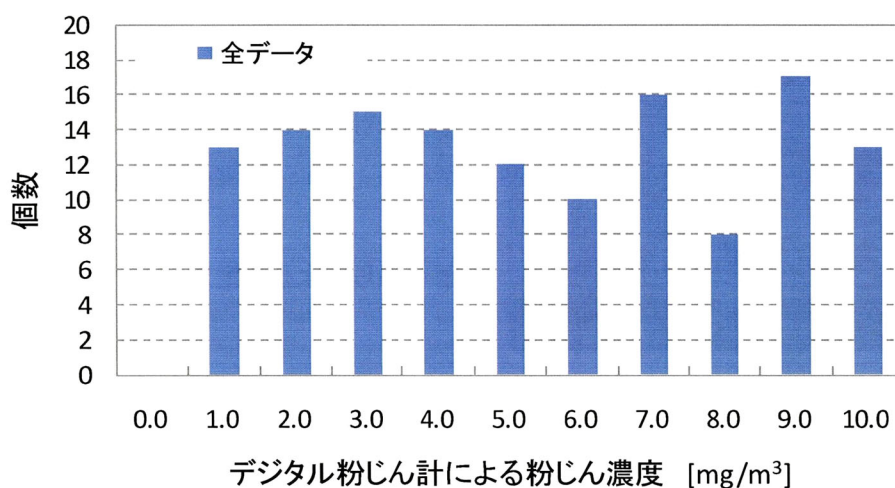


図 5-2 全測定データの粉じん濃度別データ数

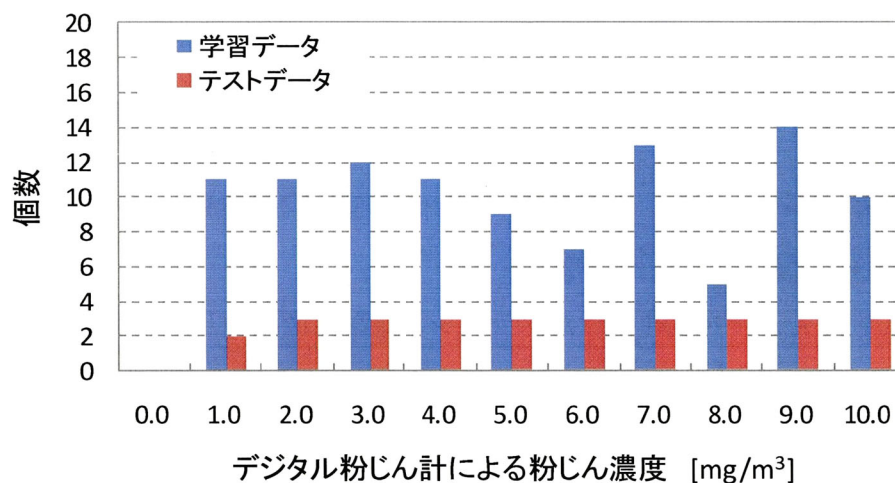


図 5-3 学習データとテストデータの粉じん濃度別データ数

5.3.2 ANNの構造

中間層数と中間層のユニット数を決定するために、実験で得られた112の学習データを用いて、ANNを学習させたときの相関係数と、ANNのユニット数の関係を図5-4に示す。また、テストデータを学習済みのANNに適用した場合の相関係数とユニット数を図5-5に示す。これらの図から、中間層を1層で、中間層ユニット数が9のときテストデータでの相関係数が最も高くなった。

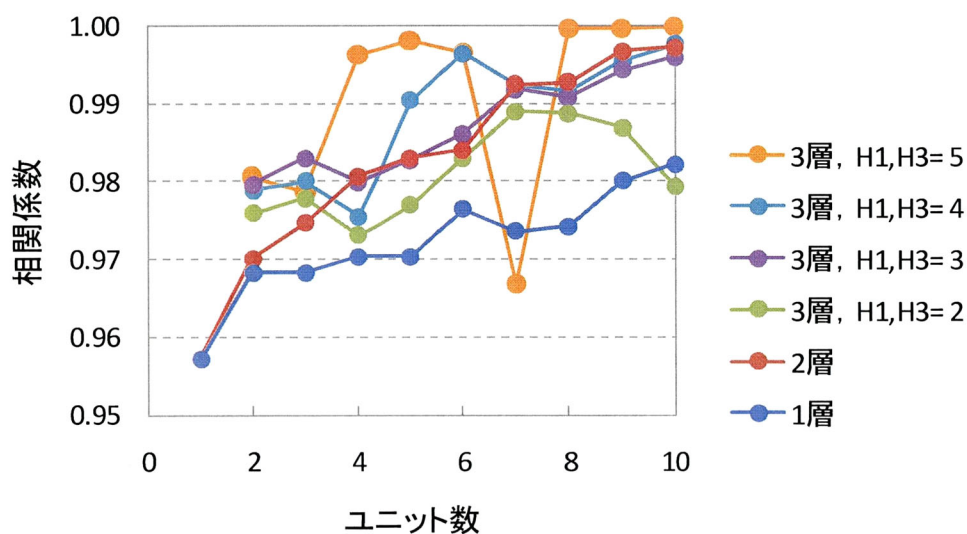


図5-4 中間層ユニット数と学習データでの相関係数

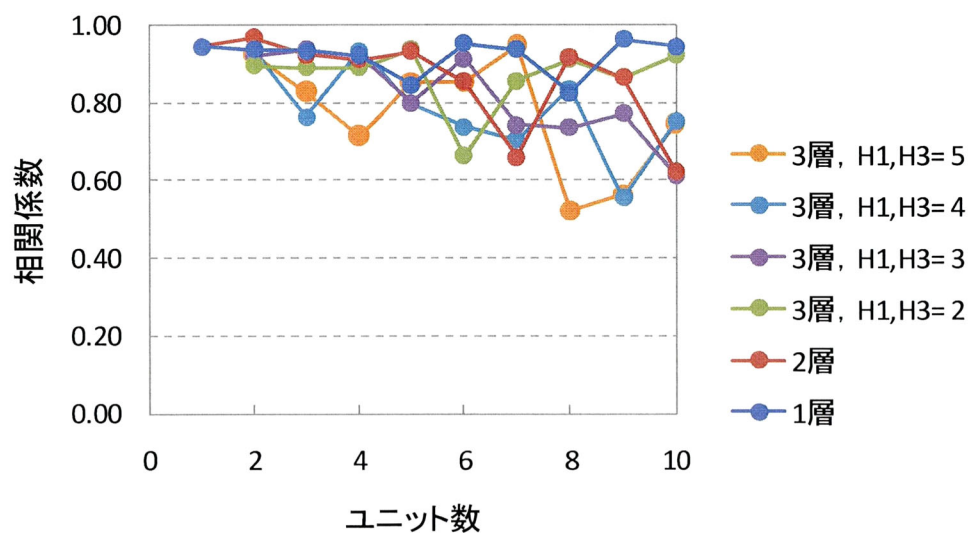


図5-5 中間層ユニット数とテストデータでの相関係数

従って、本実験では、中間層を1層で、両方の中間層ユニット数が9のANNを採用した。また、ANNの構成を図5-6に示す。入力層は、画像の平均値と分散値を入力パターンとするために、そのユニット数は2とし、出力層は、粉じん濃度を出力させるため、そのユニット数は1とした。

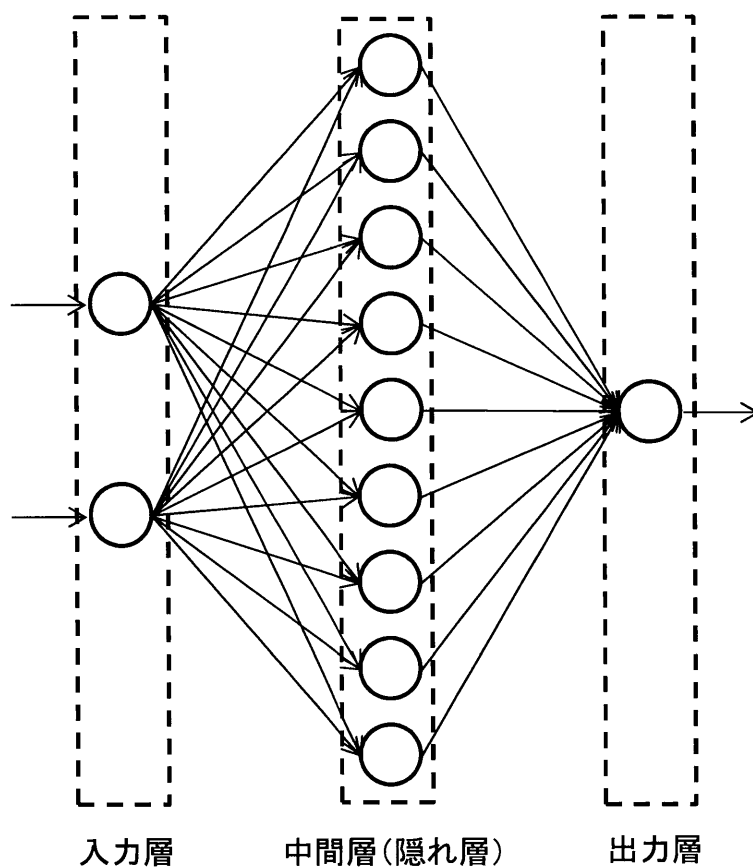


図5-6 本研究で用いるニューラルネットワークの構成

5.3.3 散乱光計数による測定法と ANN を用いた画像処理による測定法の比較

本研究で提案した散乱光計数による測定法と ANN を用いた画像処理による測定法によって、それぞれ換算した粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度を比較した結果を図 5-7 に示す。また、式(3-9) を用いてデジタル粉じん計との相関係数を算出した。その結果、デジタル粉じん計と散乱光計数による測定法の相関係数は、0.94、デジタル粉じん計と ANN を用いた画像処理による測定法の相関係数は、0.93 となり、本研究で提案した 2 つの測定法は、ともにデジタル粉じん計との高い相関が確認でき、画像処理による測定法は、ANN を利用することで散乱光計数による測定法とほぼ同程度まで粉じん計との相関を向上させることができた。

この結果、散乱光計数による測定法は、 $6\text{mg}/\text{m}^3$ までは高い相関性を示すが、これを超えると、ばらつきがみられるようになった。このことは、測定する粉じん濃度が $6\text{mg}/\text{m}^3$ を超えている場合、測定精度が低下すること示している。また、フラッシュ撮影画像には散乱光同士の重なり合いや輪郭のはっきりとしないものが多く記録される。そのため、散乱光数を自動で計数することが難しく、フラッシュ撮影画像から粉じんによる散乱光数を計数する過程は、現段階では手作業で行わなければならない課題を有する。

一方、ANN を用いた画像処理による測定法は、粉じん濃度が $8\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた場合、

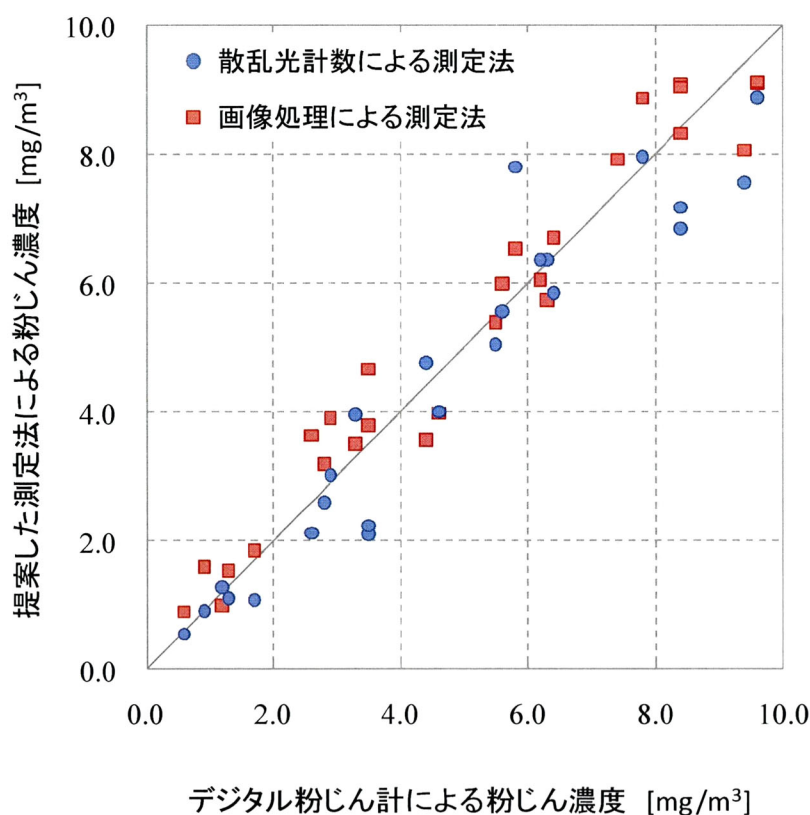


図 5-7 本研究で提案した測定法による粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度の相関図

ばらつきが大きくなり、 $8\text{mg}/\text{m}^3$ 以降で粉じん濃度測定精度が若干低下することを示している。また、本測定法に利用した ANN は、教師あり学習型ニューラルネットワークで、このニューラルネットワークは本質的に補間であるため、有限個の学習入出力関係を基に、学習入力と類似した未知入力に対して、出力を計算する²⁾。したがって、学習データの範囲外の未知データに対しては、換算精度が悪くなるため、適用に際し注意が必要である。

5.4 まとめ

本章では、第3章で提案した散乱光計数による測定法と、同じく第3章で提案、第4章で改良した ANN を用いた画像処理による測定法の有用性を確認することを目的として、第3章、第4章とは異なるトンネル建設現場において、現場実験を行った。実験方法は、これまでと同様に、デジタル粉じん計の測定と同期させながら、ブラックパネルに向かってフラッシュ撮影した画像から各測定法により粉じん濃度に換算した。本実験では、分解して持ち運びが可能なハンガーラックを利用してブラックパネルを固定し、人がパネルを持つ負担をなくし、長時間の安定した測定が可能とするとともに、パネルの揺れも抑制できるよう工夫した。

デジタル粉じん計による粉じん濃度との相関係数を比較した結果、散乱光計数による測定法では、相関係数は0.94、画像処理による粉じん濃度測定法では、相関係数は0.93となり、散乱光数の計数による粉じん濃度測定法の方が若干高くなったが、両測定法ともデジタル粉じん計との高い相関性を確認できた。ANN を用いた画像処理による測定法は、散乱光計数による測定法と同程度の高い相関性が得られたことから、画像処理による測定法を改良し、ANN を適用することにより、測定精度を向上させることができた。したがって、本研究で提案した2つの測定法は、異なるトンネル建設工事現場で適用した結果、デジタル粉じん計との高い相関性を確認することができた。

以上の結果から、散乱光計数による測定法は、吹付けコンクリート作業中で切羽から50m位置で測定を行った場合、第2章で調査した粉じんの物性を利用することができることがわかった。しかし、測定時の作業内容によって、浮遊する粉じんの物性も異なることが予想され、今後の適用にあたっては粉じんの物性を調査する必要がある。また、散乱光数は、散乱光同士の重なりや大きさの違いなどから、自動で計数することが難しいため、手作業での計数が必要となる。一方、ANN を用いた画像処理による測定法は、予め、測定時と同様の環境で撮影したフラッシュ撮影画像とそれに対応する粉じん濃度から ANN を学習させることで、容易に異なる作業内容にも対応できるため、より有用性が高い測定法であるといえる。

参考文献

- 1) 吉富康成：ニューラルネットワーク，p.22，朝倉書店，2002.
- 2) 田辺和俊：NEUROSIM/L によるニューラルネットワーク入門，p.79，日刊工業新聞社

第 6 章

結論

6.1 本研究のまとめ

トンネル建設工事では、近年の技術進歩や作業方法の改良により改善はみられるものの、施工中の粉じんの発生によるじん肺症の危険性は依然として高い。作業環境の粉じん濃度を抑制することがじん肺症予防に根本的な効果があることから、作業環境の状況を把握する指標として、粉じん濃度測定が重要となる。そこで、トンネル建設工事を対象として、「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」が改正され、その対策の 1 つとして、粉じん濃度測定が義務化された。粉じん濃度の測定機器には、光散乱式デジタル粉じん計が利用されているが、価格が高価なこと、同位置で継続的に 10 分以上の測定を行わなければならないことなどがあり、より簡単で安価な粉じん濃度を測定する方法が望まれていた。

この問題を解決するために、本論文では、一般に市販されているコンパクトデジタルカメラのフラッシュ機能を利用した粉じん濃度測定法を提案した。本測定方法は、トンネル坑内のような閉空間において、カメラでフラッシュ撮影を行うと、フラッシュ光が浮遊粉じんなどに反射して白斑として撮影される現象を利用した測定方法である。加えて、デジタルカメラは、撮影したその場で画像を確認できること、画像自体もデジタル化されており画像処理しやすいことなどのデジタルカメラの特有の性能向上と、販売価格の低下によりメリットを有する。その上、粉じんの浮遊状況画像としても利用できる特徴を有する。

測定方法の提案にあたって、まず、測定対象の粉じんの実態を調査するため、トンネル坑内で浮遊する粉じんを採取し、走査型電子顕微鏡で表面形状を観察した。そして、電子顕微鏡に付属するエネルギー分散型 X 線分析装置で、粉じんの表面成分を分析した。粉じんの採取位置は、ガイドラインに基づき、最も安定して粉じん濃度が高くなる吹付けコンクリート作業時の切羽から、トンネル坑口に向かって 50m 地点とした。その結果、作業工程と成分分析の結果から普通ポルトランドセメント成分の粉じんが多数浮遊していることが明らかになった。この結果に基づき、フラッシュ撮影画像に記録される散乱光数を計数して粉じん濃度に換算する散乱光計数による測定法を開発した。し

かし、本測定法は、散乱光を手作業で計数しなければならないため、より簡便な測定法として、画像処理によってフラッシュ撮影画像から粉じん濃度に換算する画像処理による測定法を開発した。それぞれの測定法により換算した粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度を比較した結果、散乱光計数による測定法はデジタル粉じん計と高い相関性が得られ、フラッシュ撮影画像から粉じん濃度を測定可能であることがわかったが、フラッシュ撮影画像から粉じん濃度に換算するまでの過程を手動で行わなければならない課題がある。逆に、自動的に処理できる画像処理による測定法は、デジタル粉じん計との相関性が低く、両測定法とも実用的とは言えなかった。そこで、自動処理ができ、粉じん濃度の測定精度を向上できる可能性がある画像処理による測定法を改良し、ANN を適用することで、粉じん濃度の測定精度の向上を図った。その結果、デジタル粉じん計との高い相関が得られた。

そして、散乱光計数による測定法と ANN を用いた画像処理による測定法を、測定法の開発のために測定データを採取したトンネル建設現場とは異なるトンネル建設現場に適用した。その結果、両測定法ともデジタル粉じん計との高い相関が得られ、ANN を用いた画像処理による測定法が散乱光計数による測定法と同程度まで測定精度を向上でき、その有用性が確認された。

本研究で得られた結論を各章ごとに要約する。

【第1章 序論】

本章では、トンネル坑内での粉じん濃度測定方法の現状を整理し、建設現場に必要とされる技術が、簡易に粉じん濃度を測定できる技術であること明らかにした。そして、本研究では、より迅速で簡単な測定方法として、デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法の提案することを示し、論文の構成と概要を説明した。

【第2章 吹付けコンクリート作業中に浮遊する粉じんの実態調査】

本章では、吹付けコンクリート作業時にトンネル坑内を浮遊する粉じんの形態、成分を電子顕微鏡で分析し、浮遊粉じんの大部分が普通ポルトセメント成分に類似していることを確認するとともに、切羽からの距離による粒度分布状況を明らかにした。

【第3章 デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定方法の開発】

本章では、現場実験に基づき、デジタルカメラによるフラッシュ撮影画像を利用した粉じん濃度測定法を提案した。測定法の開発に利用するため、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内で、デジタル粉じん計による粉じん濃度と関連付けたフラッシュ撮影画像を収集した。次に、フラッシュ撮影した画像に記録された散乱光を計数し、粉じん濃度に換算する測定法を提案した。この測定法は、第2章において明らかにした粒度分

布とフラッシュ撮影画像の計数値からデジタルカメラに撮影された粉じんの質量を求め、あらかじめ調べておいたデジタルカメラで粉じんが撮影できる空間で除することで、粉じん濃度を測定する方法である。次に、フラッシュ撮影した画像に粉じんの散乱光が多く写れば写るほど、画像は明るく輝度が高くなることを利用し、粉じん濃度に換算する測定法を提案した。

【第4章 画像処理による粉じん濃度測定法へニューラルネットワークの適用】

本章では、第3章で提案した画像処理による粉じん濃度測定方法の精度向上と更なる実用化を目指し、人間の刺激と反応に関する脳神経組織の働きを数学的に模擬したコンピュータアルゴリズムである ANN を用いた粉じん濃度測定方法を提案した。その際、フラッシュ光の照射角度の違いによる輝度の変化が粉じん濃度測定精度に大きく影響を与えるため、画像全体の輝度の変化を極力除去する画像処理を行ったうえで ANN を適用する手順を新たに追加した。

【第5章 現場適用実験】

本章では、測定法の開発を目的として測定データを採取したトンネル建設現場とは異なるトンネル建設現場に適用した。両測定法とも、お互いに高い相関性が認められ、その有用性が確認できた。特に、画像処理による粉じん濃度測定法は、画像処理により、粉じん濃度を推定するため、より将来性がある方法であることがわかった。

【第6章 結論】

本章では、本研究で得られた知見と課題を整理し、本論文の結論とした。

6.2 今後の課題と展望

(1) 測定環境の違いによる影響を検討

本論文では、散乱光計数による測定法と画像処理による測定法の2つの測定法を提案した。散乱光計数による測定法は、測定位置を浮遊する粉じんの単位体積質量、粒度分布を調べておく必要がある。また、画像処理による測定法は、予め、測定時と同じ環境で、デジタル粉じん計による測定と同期させながらフラッシュ撮影を行い、ANN を学習させる必要がある。そのため、本論文で提案した測定方法は、トンネル坑内の重機や換気設備の配置、測定場所、測定時のトンネル坑内での作業内容によって影響を受ける。そこで、今後、これらの要因が測定に及ぼす影響を検討する必要がある。

(2) 測定に使用する画像の最適枚数の検討

本論文で提案した粉じん濃度測定法の評価には、デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度を利用している。しかし、本論文で提案した方法は、デジタルカメラでレンズの極めて近傍付近を浮遊する粉じんを一瞬で記録する。それに対して、デジタル粉じん計は、機器内を1分間に通過する空気に含まれる粉じんを測定する。そのため、デジタルカメラでの測定した粉じん濃度と、デジタル粉じん計で測定した粉じん濃度との間に誤差が生じる。その誤差を可能な限り小さくし、実用的に安定した粉じん濃度測定を行うためには、必要とされるフラッシュ撮影画像の最適枚数の検討を行う必要がある。

(3) ブラックパネルを用いない測定方法の検討

デジタルカメラでフラッシュ撮影する際に、粉じんによる散乱光のみを画像に記録するため、カメラの撮影方向にブラックパネルを設置してフラッシュ撮影を行う。しかし、今後、実用化に向けてより簡単な粉じん濃度測定を行うために、撮影方向にブラックパネルを設置せずに、粉じんの散乱光を抽出する画像処理方法を検討する必要がある。

(4) カメラを搭載した携帯電話での粉じん濃度測定法の開発

本論文では、デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法を提案したが、現在市販されているデジタルカメラは、画像処理を行うことができないため、フラッシュ撮影画像を粉じん濃度に換算するには電子計算機を使用する必要がある。そこで、カメラが搭載されている携帯電話であれば、撮影から粉じん濃度に換算するまでの過程をすべて携帯電話で行うことができるため、撮影後すぐに粉じん濃度を確認できるようになる。

(5) トンネル坑内換気設備の配置の最適化

デジタルカメラは、デジタル粉じん計に比べて小型軽量で瞬時に粉じん濃度を測定することができる。そのため、高所などのデジタル粉じん計では測定が困難な場所での測定を行うことができる。また、トンネル坑内のある断面に対して、複数台のデジタルカメラで同時に撮影し、その断面内での粉じん濃度の分布状況を把握することで、トンネル坑内における換気設備の配置を最適化できるようになる。

謝辞

本論文は、山口大学大学院理工学研究科 進士正人教授のご指導のもと、研究成果をとりまとめたものです。進士先生には、指導教官として本研究の実施の機会を与えていただき、また、その遂行にあたって終始、ご指導を頂きました。心から感謝致します。

同研究科 清水則一教授、三池秀敏教授、河村圭准教授、山本浩一准教授には副査としてご助言いただくとともに本論文の細部にわたりご指導を頂きました。心から感謝致します。今後、博士という名に恥じない技術者になれるよう精進していきます。

本研究を遂行するにあたり、飛島建設株式会社 筒井隆規氏、平間昭信氏、松田浩朗氏、小原勝巳氏にご助言およびご協力頂きました。深く感謝致します。

本研究における実験実施にご協力いただいた飛島建設・フジタ・藤本工業・栗本特定建設工事小郡トンネル作業所、飛島建設株式会社西日本土木支社中四国土木事業部大万木トンネル作業所、並びに、飛島建設株式会社西日本土木支社九州事業部新津トンネル作業所の関係者各位に感謝致します。

本研究は、研究室の後輩達の協力の上に成し遂げたものです。渡部亮氏(宇部市役所)、樫本陽史氏(株式会社間組)、平野充剛氏(株式会社間組)に深く感謝致します。また、建設基礎工学講座在学学生、並びに、卒業生の諸氏に心から感謝致します。

最後に、経済的な面のみならず、精神的にも支えとなってくれた家族に心より感謝します。

