

建設現場における簡易粉じん測定法

※進士 正人

山口大学大学院 理工学研究科



トンネル建設工事では、施工粉じんの発生により、坑内で建設工事に従事する作業員が発生粉じんを吸引することでじん肺症を引き起こす危険性は依然として高いと言わざるを得ない。本研究では、トンネル坑内でフラッシュ撮影を行うと、粉じん濃度により白斑が撮影される現象を応用して、市販されているコンパクトデジタルカメラを使った小型で安価な粉じん濃度測定法の開発を行った。そして、本研究で提案する粉じん濃度測定法の汎用性を検証するために、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、フラッシュ撮影したデジタルカメラ写真から粉じん濃度を推定し、測定法の適用性を検証した。

テーマ 建設環境, 環境測定技術, 粉じん, トンネル

1. はじめに

トンネル建設工事に伴う粉じんの発生により、坑内で建設工事に従事する作業員が発生粉じんを吸引することでじん肺症を引き起こす危険性は依然として高いと言わざるを得ない。そのため、トンネル建設工事では、換気技術の開発や粉じんの発生をそのものを抑制する材料の開発などがこれまでも熱心に行われている。

作業環境で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ため、作業環境の状況を把握する指標として、粉じん濃度測定は極めて重要である。平成 20 年には、厚生労働省によるトンネル坑内の作業員を対象とした「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」¹⁾ (以下、本文中では“ガイドライン”と略称する) が改定され、光散乱式デジタル粉じん計での粉じん濃度測定が義務化されるなど、トンネル坑内の粉じん濃度測定の必要性が増々重要となってきている。加えて、粉じん濃度測定の重要性だけでなく、粉じん濃度が低く保たれている状態を確認するためにも、より簡易で安価な粉じん濃度測定法の開発が望まれている。

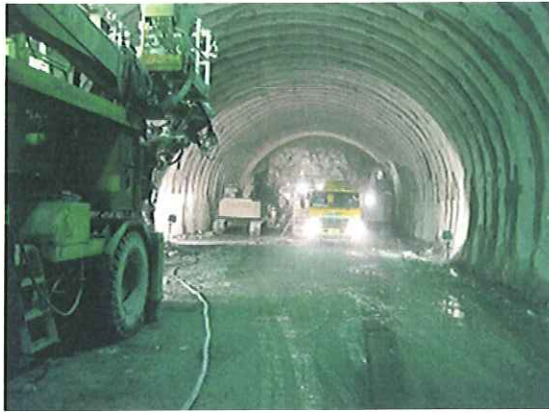
本研究では、より小型で安価な粉じん濃度測定法の開発を目的として、市販されているコンパクトデジタルカメラを使った粉じん濃度測定法を提案する。具体的には、デジタル粉じん計による粉じん濃度とコンパクトデジタルカメラによるフラッシュ撮影画像を関連づけ、それら撮影画像から粉じん濃度との関係性を見出し、粉じん濃度測定に利用できる特徴量を探す。この特徴量と粉じん濃度との相関性を学習機械として人工知能(ニューラルネットワーク)を用いて粉じん濃度に換算するアルゴリ

ズムを確立する。そして、本研究で提案する粉じん濃度測定法の汎用性を検証するために、吹付けコンクリート作業中のトンネル坑内において、デジタルカメラでフラッシュ撮影を行い、より簡易な粉じん濃度測定法の適用性を検証する。

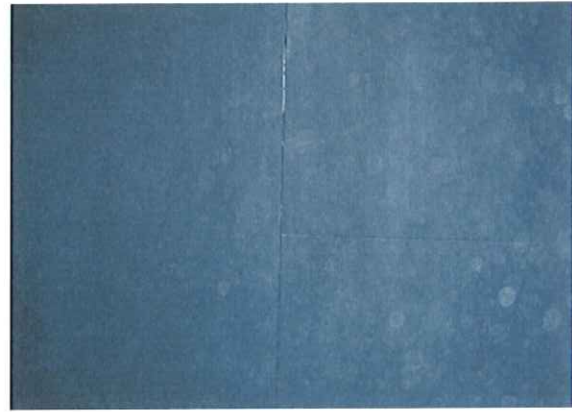
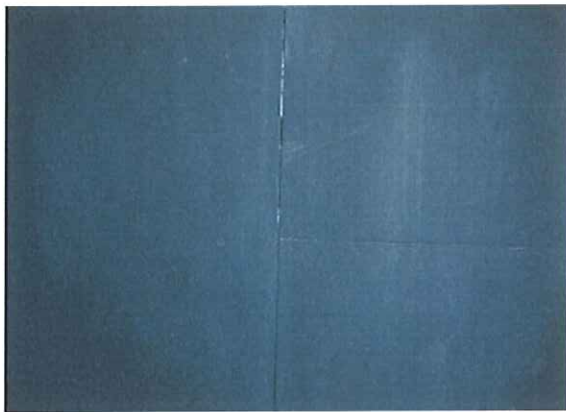
2. カメラを使った粉じん濃度測定法

粉じんが浮遊する暗い空間内でレーザー光などの強い光を照射すると、粒子の粒径が照射光の波長と同程度以上の大きさの粉じんにより「ミー散乱²⁾」が起これ、散乱光でキラキラと輝く浮遊粉じんが観測される。この現象は「チンダル現象」としてよく知られた現象であり、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たうえで、対象物に強い光を照射することで浮遊粉じんの発生状況を観測したり、カメラで粉じんの浮遊状況を写真に記録する方法が提案されている³⁾。光散乱式デジタル粉じん計もこの現象を利用しており、測定管内に吸引した空気にレーザー光を照射し、粉じんによる散乱光強さから粉じん濃度を換算している。

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-1(a)のトンネル坑内画像が写真-1(b)の画像のように白斑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た常識であった。そのため、トンネル技術者はフラッシュを使用しないできれいな坑内写真を撮影するテクニックを精進した。



(a) フラッシュ無し (b) フラッシュ有り
写真-1 フラッシュの有無による坑内写真の比較



(a) 低粉じん濃度時(0.9mg/m³)

(b) 高粉じん濃度時(6.6mg/m³)

写真-2 粉じん濃度が高低時のフラッシュ撮影画像の比較例

進士は、従来とは逆の発想で、デジタルカメラによるフラッシュ画像の白斑を画像処理し、その結果から粉じん濃度が測定できれば、より安価で簡単な粉じん濃度測定法となることに着想した⁴⁾。その上、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性能向上とカメラ本体の販売価格の低下により、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。そこで、本研究では、デジタルカメラなどのカメラ機能を用い、粉じんが浮遊する暗空間をフラッシュ撮影し、フラッシュ光による粉じんの散乱光を画像に記録し、その画像から粉じん濃度を測定する方法を開発する。

3. デジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法

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-2 にトンネル坑内でフラッシュ撮影した画像の一例を

示す。写真-2 (a)は、粉じん濃度が 0.9 mg/m³時の画像で、写真-2 (b)の画像は、粉じん濃度が 6.6 mg/m³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、すなわち、画像の輝度が高くなるのがわかる。これを利用し、フラッシュ撮影画像から抽出した輝度を粉じん濃度に換算する方法を考案した。本測定法のアルゴリズムを図-1 に示す。写真-2 からわかるように、フラッシュ撮影画像には記録された白斑が重なりあったり、粉じんの粒径がさまざまなことで輝度と粉じん濃度との関係は複雑となっている。したがって、粉じん濃度への換算には、人間の刺激と反応に関する脳神経組織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利用した。

ニューラルネットワークは、入力した多数の刺激（特徴量）による反応を経験として自動的に学習するため、定式化やモデル化が困難な事象の判別解析に適している。特に、ニューラルネットワークは学習時に与えた入出力値に誤差を含んでいる場合も許容誤差を適度に設定することにより、その範囲内でなめらかでかつ連続な入出力

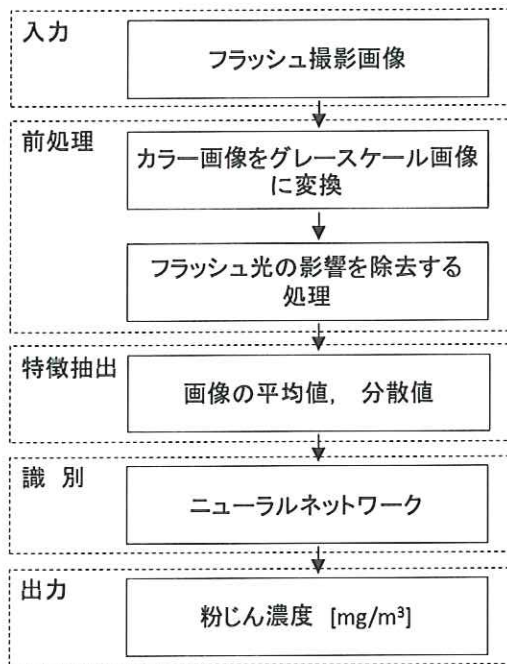


図-1 粉じん濃度換算アルゴリズム

関係が実現されるため、誤差に強いコンピュータアルゴリズムを構築できる特徴も有している⁹⁾。

4. 現場実験

(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）で施工している2車線道路トンネル内の吹付けコンクリート作業中に実施した。撮影方向の景色を除去し、粉じんの散乱光のみを画像に記録するために、写真-3に示すように、レンズから1.5mの位置に黒ペンキで塗色したブラックパネル（900×1,200mm）を設置し、それに向かってデジタルカメラ（Olympus製“μ795SW”）を路盤上1.3mの高さに設置しフラッシュ撮影した。それにより、粉じんのみが白く散乱した画像を撮影することが可能となった。

本研究で提案する粉じん測定法の適用性を比較するため、デジタルカメラでの撮影時点の粉じん濃度測定を目的に、光散乱式デジタル粉じん計（柴田科学製“LD-3K2”）をもちいて、1分間隔でデジタル粉じん計による粉じん濃度測定を実施すると同時にフラッシュ撮影を行い、合計142回のフラッシュ撮影画像とその時の粉じん濃度を測定した。

(2) 実験結果

a) 学習データとテストデータ



写真-3 フラッシュ撮影状況

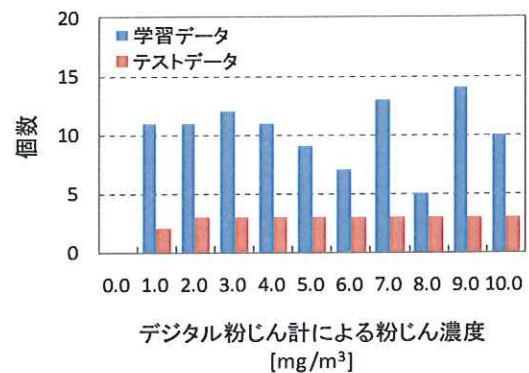


図-2 学習データとテストデータの粉じん濃度別データ数

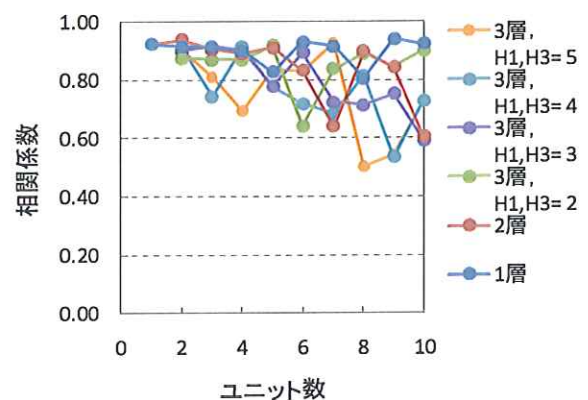


図-3 中間層ユニット数とテストデータでの相関係数

ニューラルネットワークの機能を精度よく発揮させるためには、ニューラルネットワークへの効果的な学習が重要である。そのため、学習のための入力データは、適用される粉じん濃度の範囲より広いことが望ましい⁹⁾。図-2に、本実験においてデジタル粉じん計で測定された粉じん濃度の頻度分布を示す。この図から、今回のガイドラインで基準値として定められており、高い測定精度が求められる3.0mg/m³前後に幅広くデータが採取でき

ており、ニューラルネットワークの学習に使用するデータとして十分に有用であることがわかる。

そこで、フラッシュ撮影画像343枚中273枚を粉じん濃度分類別に無作為抽出し、これらの画像ごとに求めた平均値、分散値と、撮影と同時に測定したデジタル粉じん計の粉じん濃度をニューラルネットワークに学習させた。

b) ニューラルネットワークによる学習

本研究で利用したニューラルネットワークは、階層型ニューラルネットワークモデルで、学習には誤差逆伝搬法を用いた。ニューラルネットワークは、最適な中間層数、ユニット数を決定する方法が確立されておらず、試行錯誤するしかない。そのため、学習データで学習したニューラルネットワークにテストデータを入力して算出した粉じん濃度と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することで、ニューラルネットワークの構造を決定した。その結果を図-3に示す。この図から、ニューラルネットワークの構造は、中間層数は1層、ユニット数は9とした場合に、相関係数が最も高く、0.93であった。

ニューラルネットワーク構築に用いていない残りの70枚を用いて、光散乱式デジタル粉じん計によって測定した粉じん濃度と本測定法で推定した粉じん濃度との相関図を図-4に示す。この図から、両者は良く相関が取れていることが確認でき、本測定法の有効性が検証できた。

5. まとめ

トンネル坑内において、フラッシュ撮影を行うとカメラ前方を浮遊する粉じんの散乱光が白斑として画像に記録される。この現象を利用して、市販のコンパクトデジタルカメラを用いた小型で安価な粉じん濃度測定方法を開発した。本測定法は、デジタルカメラでフラッシュ撮影した画像を処理し抽出した特徴量をニューラルネットワークに入力することで粉じん濃度に換算する方法で、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化することができる利点を有する。また、現場実験の結果、本手法とデジタル粉じん計による測定と高い相関が確認できた。したがって、市販のコンパクトデジタルカメラを利用することで、安価で簡便な粉じん濃度測定法を開発することができた。

今後は、動画像を利用することで、撮影方向に設置するブラックパネルを用いずに粉じんの散乱光を抽出できる方法を検討し、より、リアルタイムに粉じん濃度が測定可能な方法について検討していきたいと考えている。

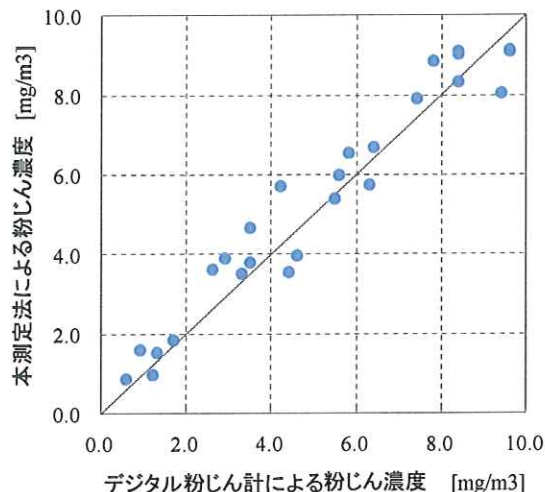


図-4 本測定法による粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度の相関性の比較

謝辞

本研究の遂行にあたって、元博士課程学生 岸田展明氏（現中電技術コンサルタント）に深く感謝いたします。また、現場実験に多大なるご協力を頂いた飛鳥建設株式会社 筒井隆規氏、平間昭信氏をはじめ、関係各位に深く感謝致します。なお、本研究は、科研費（19656107および21560486）の助成も合わせて受けたものである。

参考文献

- 1) 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，2008。
- 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) Health and Safety Executive: The Dust Lamp -A Simple Tool for Observing the Presence of Airborne Particles-, Methods for the Determination of Hazardous Substances, 82, pp.1-12, Health and Safety Executive Books UK, 1997。
- 4) 進士 正人：工業所有権 特願 2008-542992 「粉塵測定方法および粉塵測定装置」
- 5) 田辺 和俊：NEUROSIM/L によるニューラルネットワーク入門, p.70, 日刊工業新聞社, 2003。
- 6) 吉富 康成：ニューラルネットワーク, p.144, 朝倉書店, 2002。