

Webカメラによる簡易粉じん濃度測定法の適用

下村 康介¹・佐々木 雄紀²・進士 正人³

¹学生会員 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail:s015vf@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 鹿島建設株式会社 海外土木支店(〒319-1234 茨城県日立市大和田町 987-1)

E-mail:yukis@kajima.com

³正会員 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail:shinji@yamaguchi-u.ac.jp

トンネル坑内での作業に対し、厚生労働省ではガイドラインを設置し、粉じん濃度の管理の義務化を進めており、ますます施工中の粉じんの管理が厳しくなっている。従来、粉じん濃度計測には光散乱式デジタル粉じん計が一般的に使用されている。しかし、測定に時間がかかることや測定機毎に換算値を求める必要があることなどから、迅速かつ簡易に計測する方法が望まれている。

そこで、既往研究では坑内をフラッシュ撮影すると浮遊する粉じんが写真に白斑として撮影されることを利用し、動画像処理に基づく簡易粉じん濃度測定法を提案した。本研究では、既往研究で提案された動画像処理に基づく粉じん濃度測定法を現場適用することで、システムの適用性を検証した上で、より安価で簡易かつ高精度な測定を行うことのできる粉じん濃度測定法を提案する。

Key Words : Dust monitoring, Web camera, Video image processing, Feature value, Filming area

1. はじめに

トンネル建設時に発生する浮遊粉じんは、発破や機械掘削により地山そのものを掘削する際に発生する掘削粉じんと、掘削後、地山面に吹付けコンクリートを吹き付ける作業時に発生する吹き付け粉じんがある。これらの粉じんは、作業員の肺機能障害を引き起こす原因物質の一つとされている。そのため、厚生労働省では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対するガイドライン」(以下、“ガイドライン”と呼ぶ)を定め、電動ファン付き呼吸用保護具の着用と、デジタル粉じん計を用いた定期的な粉じん測定を管理者に義務付けた。このため、トンネル建設時の浮遊粉じん測定がますます厳格に実施されつつある¹⁾。

従来、粉じん濃度測定はローボリウムエアサンプラーと呼ばれる一定量の坑内空気をフィルターを通して吸引する装置が用いられる。そして、吸入前後のフィルター重量の増加量から浮遊粉じん量を測定する方法が最も精度が高い。しかし、この方法は吸引に一定時間を要し、その間の平均的な浮遊粉じん量しか求めることができない。そのため、計測器の測定管内に吸引した坑内空気にレーザー光を照射し、その中の粉じんの個数をカウントし、カウント数より浮遊粉じん量濃度に換算する光散乱光式デジタル粉じん計(以下、“デジタル粉じん計”と呼ぶ)が取扱いの簡易さもあり、トンネル建設工事全般で

使用されている。しかし、価格が高価で、正確な測定に時間もかかることからより安価で簡易な粉じん濃度測定方法が求められている。

トンネル坑内においてカメラのフラッシュ撮影を行うと、写真-1のトンネル坑内写真が写真-2のように坑内の浮遊粉じんがフラッシュに反射して白斑として撮影されることは以前から知られていた。



写真-1 坑内写真（フラッシュ無し）



写真-2 坑内写真（フラッシュ有り）

そこで、既往研究では補助光源を用いて撮影した動画に種々の動画像処理を行うことで簡易的に粉じん濃度測定を行うことを提案した。既往研究で提案された粉じん濃度測定法は従来の方法に比べて測定機器が安価で、粉じんの浮遊状況を動画として記録すると同時にその濃度を記録に残すことが可能である。

本研究では、動画像処理を用いた簡易粉じん濃度測定法の現場への適用性を検証し、より簡易的で正確に粉じん濃度を測定するための粒子抽出換算濃度法を提案した。

2. 動画像処理に基づく簡易粉じん濃度測定法²⁾

(1)基本原理

まず、既往研究で提案された動画像処理に基づく粉じん濃度測定法についてその概略を述べる。

トンネル坑内の暗環境下で、粉じんが浮遊している空間に対してフラッシュ撮影を行うと、浮遊粉じんが反射して白斑として撮影される。これは、カメラのフラッシュ光が $0.5\mu\text{m}$ 付近の波長域にピークを持つため、粒子の粒径が入射光の波長と同程度以上の大きさの粒子により起こるとされるミー散乱により $0.5\mu\text{m}$ ～数 μm 程度の浮遊粉じんがカメラに写ると考えられる。このことを利用して既往研究では、フラッシュ光の代替光源としてLEDライトを散乱光源としてネットワークカメラで撮影した浮遊粉じんの動画像に、時間差分処理、二値化処理、モルフロジー処理および領域分割といった動画像処理を行うことにより粉じん部分の抽出をする。図-1に粉じん散乱光動画像に画像処理を行うことで最終的に得られる特徴量を抽出した結果を示す。特徴量の抽出においては、画面内における粉じん散乱光部分面積および粉じん散乱光個数という異なる要素を掛けあわせることによって決定される値(以下、“特徴量”と呼ぶ)を採用することで、安定した特徴量を抽出する。そして、抽出した特徴量とデジタル粉じん計の相関図から線形近似式を得ることによって換算粉じん濃度としていた。図-2に既往研究で提案された動画像処理による簡易粉じん濃度測定手順を示す。

本研究では、デジタル粉じん計に比べ、安価で簡易である本手法を現場適用することで適用性を検証した。

3. 山岳トンネル工事現場への適用

既往研究で提案された粉じん濃度測定法の適用性を検証するため、吹き付けコンクリート作業中の現場に動画像撮影とデジタル粉じん計での粉じん濃度測定を合わせて実施した。適用現場では、ネットワーク環境の問題も

あり、また簡易的に粉じん濃度を測定することができるためUSB接続のWebカメラ(Logitech製)を用いてシステムの検証をすることとした。

(1)実験方法

既往研究で提案された手法は、光学レンズの解像度、フラッシュライトの光量・位置などの条件によって撮影される粉じん数が変化し得られる結果に影響を与える。そこで、写真-3のように光源の当たり方が変化しないようにWebカメラとリング上のLEDライトを固定した。また、暗環境下で撮影環境が変化しないように写真-4

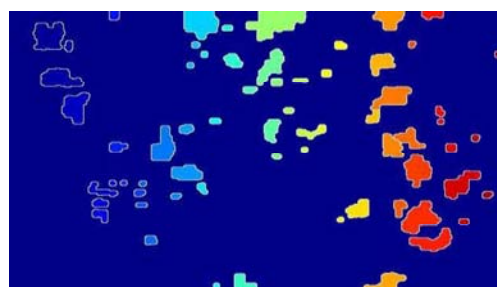


図-1 粉じん散乱光抽出結果

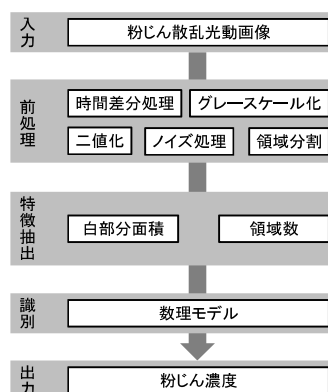


図-2 動画像処理による粉じん濃度測定手順



写真-3 粉じん散乱光取得部構成



写真-4 現場試験状況

のように作成した簡易な計測箱内で浮遊粉じんの撮影を行った。計測箱の寸法はL400×W280×H230(mm)である。計測箱の内部はつや消しペンキで塗装している。計測箱内でのWebカメラと壁面までの距離は25cmである。

トンネル坑内の動画撮影はデジタル粉じん計と同期させるため、1分間隔のデジタル粉じん計での計測に合わせ撮影を行い、合計63回データを採取した。撮影は切羽から90mの地点で床上1.3mの高さで実施した。

(2)実験結果

浮遊粉じんを撮影した動画像に画像処理を行い、既往研究で提案された特徴量と実験から得られたデジタル粉じん計による粉じん濃度(以下、“計測粉じん濃度”と呼ぶ)の相関図を図-3に示す。全体的に見ると多少のバラツキは見られるが3mg/m³以下に着目すると、特徴量と計測粉じん濃度は線形の関係にあるため、ある程度の相関がとれていることが分かる。また、図-4に粉じん散乱光個数と計測粉じん濃度との相関図を示す。式(1)より、3mg/m³以下に関してそれぞれ計測粉じん濃度との相関係数 ρ を求めることにより、本研究で用いる特徴量を決定する。

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

ここで、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 σ_x 、 σ_y はそれぞれ計測粉じん濃度 x と既往研究で提案された特徴量および粉じん散乱光個数 y の標本平均と標本標準偏差である。

既往研究で提案された特徴量と計測粉じん濃度の相関係数は0.89、それに対して粉じん散乱光個数と計測粉じん濃度の相関係数は0.92であった。すなわち、粉じん散乱光個数のみを用いた方が計測粉じん濃度との高い相関性を示すことが分かる。これらの結果およびガイドラインでの粉じん濃度の目標値が3mg/m³に設定されていることを踏まえて、本研究では3mg/m³以下をに着目し、粉じん散乱光個数のみを用いて定量的に粉じん濃度を測定する方法を提案する。

4. 簡易粉じん測定法

a)粒子抽出換算濃度法の提案

前節より、既往研究で提案された特徴量のうち粉じん散乱光個数のみを用いて粉じん濃度を換算できる可能性が得られた。そこで、デジタル粉じん計と同様の原理で粉じん濃度を算出することを考えた。そのためには、まず粉じんが撮影される領域を求める必要がある。そこで、

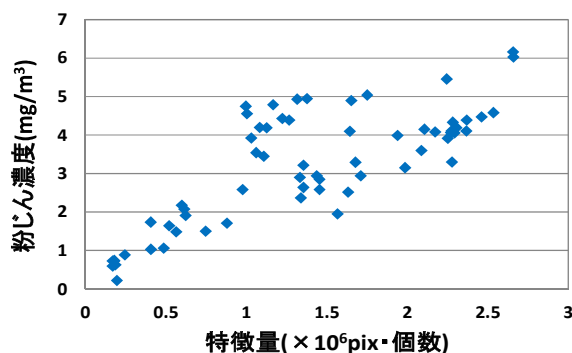


図-3 特徴量 - 粉じん濃度相関図

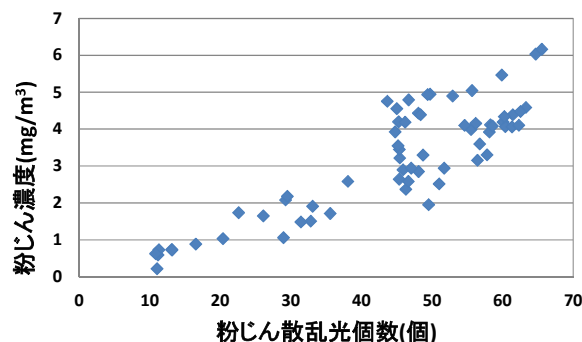


図-4 粉じん散乱光個数 - 粉じん濃度相関図

表-1 粉じん物性値

粉じんの物性	ポルトランドセメント
粉じん粒径	1.8 μ m
粉じんの単位体積質量	3.15 $\times 10^3$ mg/m ³

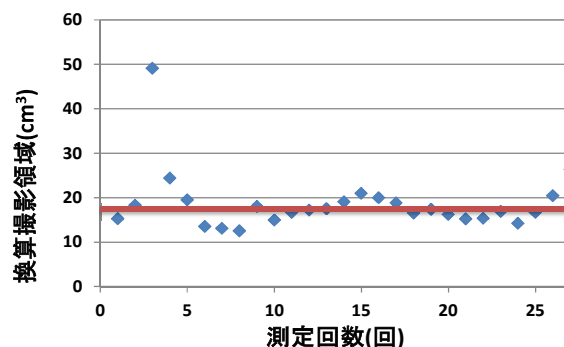


図-5 換算した撮影領域

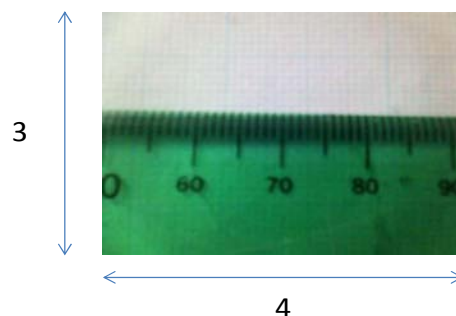


写真-5 ネットワークカメラによる定規の撮影

現場実験データを元に撮影領域を逆算することで本手法の可能性を検討した。撮影領域は、粉じん散乱光個数に粉じん一つ当たりの単位体積質量および体積を掛けあわせ、計測粉じん濃度で除すことで得られる。なお、現場実験では粉じんの物性を調査できなかったため、表 - 1 に示すように粉じんの物性値を仮定し撮影領域を逆算した。撮影領域の逆算結果を図 - 5 に示す。図 - 5 より逆算した撮影領域はほぼ 17.5cm^3 とある程度一定となっていることが分かる。このことから、撮影領域を特定することでより高精度な粉じん濃度測定が可能になると考えられる。

b)カメラの撮影範囲の検討

浮遊粉じんは、光が照射されることで光が散乱しカメラに写る。しかし、浮遊粉じんは $0.3\mu\text{m}\sim 7\mu\text{m}$ と極めて微小であるため、光による散乱が起こる位置はきわめてレンズ近傍である。室内実験により浮遊粉じんがレンズから写る範囲を検討した。まず、写真 - 5 のようにカメラの前に定規を置き、レンズと定規間の距離を 1cm 間隔で変えながらレンズ前方 1cm から 20cm まで撮影を行い、撮影範囲を明らかにした。

図 - 6 に、ネットワークカメラ(10-DATA製)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。実験で用いたネットワークカメラの写真サイズは 640×480 ピクセルであり、縦横比は $4:3$ となるので、被写体距離 $x(\text{cm})$ とネットワークカメラの撮影範囲 $S(\text{cm}^2)$ との関係は、次のように表すことができる。

$$S = 0.3273x^2 + 0.8104x - 0.1616(\text{cm}^2) \quad (2)$$

式(2)を積分することでネットワークカメラの撮影される領域は次のように表すことができる。

$$V = \int_1^{20} (0.3273x^2 + 0.8104x - 0.1616)dx(\text{cm}^3) \quad (3)$$

従って、被写体距離 $x(\text{cm})$ とネットワークカメラの撮影領域 $V(\text{cm}^3)$ との関係は図 - 7 のようになる。

c)粉じんの撮影領域

室内実験に用いた粉じん散乱光取得部の構成を図 - 8 に示す。リング状のLEDライトとネットワークカメラを固定したことにより、光源の当たり方が変化することがないため、安定して粉じん撮影を行うことができる。しかし、図 - 8 のような撮影器具では、光が浮遊粉じんに照射される範囲を特定することが難しい。そこで、光が照射されることで撮影される浮遊粉じんの撮影範囲を特定するための室内実験を行った。室内実験に用いた粉じんはインドのバンガロールで採取された粉じんを用いており、既往研究でその物性値が明らかにされている³⁾。

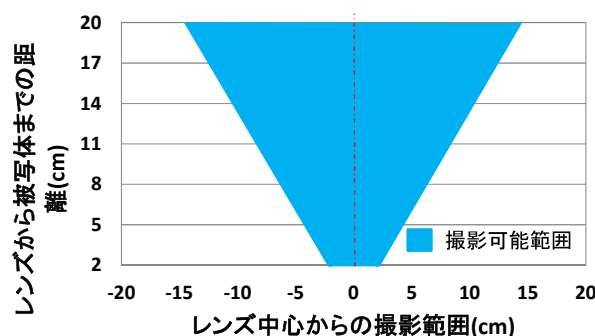


図 - 6 撮影範囲とレンズからの被写体との関係図

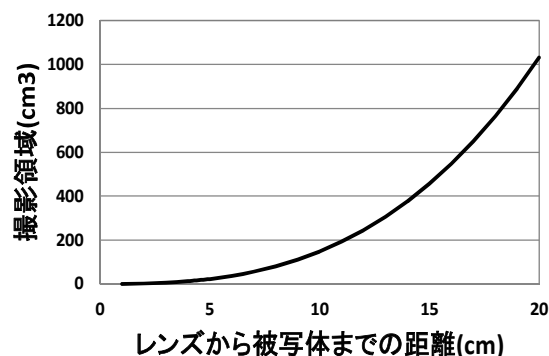


図 - 7 レンズからの被写体までの距離と撮影領域

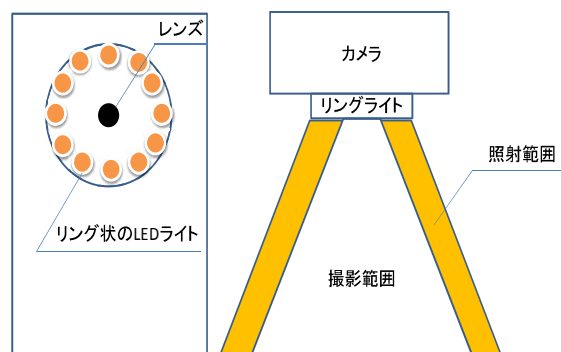


図 - 8 粉じん散乱光取得部構

表 - 2 粉じん物性値

粉じんの物性	花崗岩
粉じん粒径	$2.2\mu\text{m}$
粉じんの単位体積質量	$2.75 \times 10^9 \text{mg/m}^3$

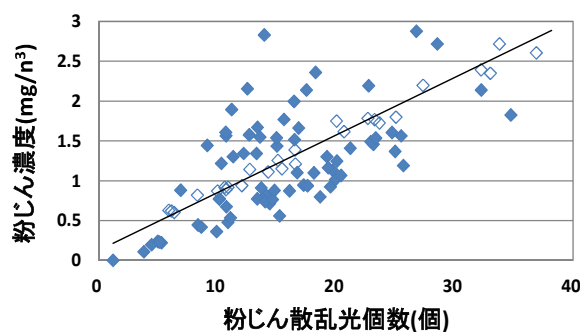


図 - 9 粉じん散乱光個数 - 粉じん濃度相関図

表-2に使用した粉じんの物性値を示す。撮影領域を特定する手順は以下のとおりである。

手順1)2章と同様に動画像処理により粉じん散乱光個数とデジタル粉じん計（柴田科学製）による粉じん濃度を同期することで、図-9のような相関図を作成する。

手順2)図-9に近似直線を引く。

手順3)四角のダイヤ印で示す、図-9中の近似直線上に位置するデータが信頼性の高いものであると仮定し、計23個の粉じん散乱光個数のデータとb)で求めた図-7を元に式(4)より各撮影距離における撮影領域ごとの換算粉じん濃度 y を算出する。

$$y(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{a(\text{個}) \times g_c(\text{mg}/\text{m}^3) \times v(\text{m}^3)}{V(\text{m}^3)} \quad (4)$$

ここで、 a 、 g_c 、 v 、 V は、それぞれ粉じん散乱光個数、花崗岩の単位体積質量、粉じん一つ当たりの体積、各撮影距離毎の換算撮影領域である。

手順4)換算粉じん濃度と計測粉じん濃度の関係から、相関性の高くなる撮影領域の値を粉じんが撮影される領域を特定する。

以上の結果から、レンズから前方1cm-4.7cmまでの範囲で浮遊粉じんは撮影され、その領域は式(3)より19.2cm³であることが分かった。

この撮影領域の値を用いて式(4)から得た換算粉じん濃度と計測粉じん濃度の相関図を図-10に示す。換算粉じん濃度と計測粉じん濃度の相関性を調べるため、式(5)から図-10の相関係数を求めた。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right) \quad (5)$$

ここで、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 σ_x 、 σ_y はそれぞれ計測粉じん濃度 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。

この結果、換算粉じん濃度と計測粉じん濃度の相関係数は0.73であり、一般的に0.8以上で高精度とされているため、精度はさほど高くない結果となった。この原因として、現場実験で得られた図-4の3mg/m³以下の値と室内実験で得られた図-9を比較すると、前者は線形な関係にあるが後者はバラツキが大きいことが挙げられる。これは、室内実験において現場と同様の浮遊粉じん状況の再現方法、また粉じん撮影領域の特定方法に関してさらに検討する必要があることが分かる。

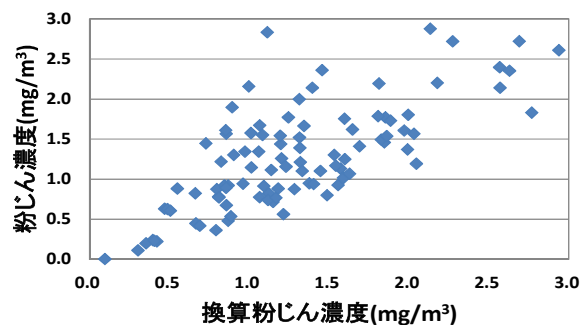


図-10 換算粉じん濃度 - 粉じん濃度相関図

5. 結論

本研究では、既往研究で提案された動画像処理に基づく簡易粉じん濃度測定法を現場に適用した。その結果、デジタル粉じん計による粉じん濃度と動画像処理による特徴量は、3mg/m³以下においては線形の関係にあるためある程度の相関関係が見られたが3mg/m³以上においては精度が落ちることが分かった。しかし、簡易な粉じん濃度測定法としては充分と考えられる。また、既往研究で提案された特徴量と粉じん散乱光個数のみを用いた結果を比較すると後者の方が計測粉じん濃度とより相関がとれていることがわかった。そこで、本研究では3mg/m³以下を扱い、粉じん散乱光個数のみを利用した粒子抽出換算濃度法を提案した。実験により粉じんの撮影される領域を特定することで、デジタル粉じん計と同様の原理で粉じん濃度を測定する本手法は、高精度な粉じん濃度測定が行えると期待したが、現状では室内実験の結果良い精度は得られなかった。

今後は、本研究で提案した評価法を再度室内実験を行う等で確立し、再度現場適用し精度の検討を行う必要がある。そして、既往研究で提案された簡易粉じん測定法と精度の比較を行いたい。

謝辞：本研究の遂行にあたって、現場計測のご協力を頂いた西松建設株式会社周参見トンネル出張所をはじめ、関係各位に深く感謝致します。

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、p.3, 2000.
- 2) 阿部玲子、佐々木雄紀、進士正人：ネットワークカメラの動画像処理に基づく定常時粉じん濃度測定法、土木学会論文集(F1)、投稿中。
- 3) 佐々木雄紀、阿部玲子、K.R.Shivananda、進士正人：バンガロールメトロ地下鉄開削工事における携帯電話を用いた簡易粉じん測定、トンネル工学報告集第22巻、I-16, pp.115-119, 2012.

(2013.9.2受付)

AN APPLICATION OF THE SIMPLE DUST MONITORING SYSTEM BY WEB CAMERA

Kosuke SHIMOMURA, Yuki SASAKI and Masato SHINJI

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 density for the safety of workers in the tunnel construction work. The “Digital dust indicator”(DDI) is the most accurate instrument for dust density measurements. However, DDI is also expensive.

In previous study, it was proposed that a “dust monitoring system”(DMS) by video image processing which measures the dust density from the video. In this study, the applicability of the DMS was inspected by field experiment. We propose more easier and highly accurate DMS by the result of field experiment.