

カメラ動画像によるトンネル坑内粉じん濃度計測システムの開発に向けた実験的研究

田中 亨昌¹・林 久資²・井出 一貴³・岸田 展明⁴・
中島 伸一郎⁵・進士 正人⁶

¹ 学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)
E-mail: c026vew@yamaguchi-u.ac.jp

² 正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³ 正会員 株式会社大林組 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
E-mail: ide.kazuki@obayashi.co.jp

⁴ 正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)
E-mail: kishida@dobocreate.jp

⁵ 正会員 山口大学大学院准教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)
E-mail: nakasima@yamaguchi-u.ac.jp

⁶ フェロー会員 山口大学教授 (〒753-8511 山口県山口市吉田 1677-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

トンネル建設現場での坑内粉じん環境をリアルタイムかつハンドヘルドに測定する装置として、カメラの動画像を用いた粉じん計測システムを開発している。動画撮影時の光源に改良を加えたプロトタイプの撮影装置を制作し、室内模擬トンネルでの粉じん実験により計測精度を調査した。動画から粉じんを自動検出するアルゴリズムとして、背景差分法、機械学習法および両者を組み合わせた方法の3手法を検討した。実験の結果、動画像による粉じん検出結果は、いずれの検出アルゴリズムを用いた場合も、デジタル粉じん計による粉じん濃度の経時変化に同期した変化を示すことから、計測のリアルタイム性が良好であることが確認された。自動検出アルゴリズムによる粉じん個数の差異は、画像背景による誤検出や評価領域の体積のちがいに帰するものと推測した。

Key Words: tunnel dust, measurement of dust, work safety, auto detection, machine learning

1. はじめに

山岳トンネルの建設作業では、掘削、ズリだし、コンクリート吹付け作業の各工程において、粉じんが発生する。発生した粉じんの中でも、特に粒径4 μm 以下に分類されるレスピラブル粒子は、微細でかつ、吸入性粉じんのため、体外に排出されず肺胞内に滞留し、肺胞を充填することで「じん肺症」の原因となる¹⁾。そのため、粉じんマスクの着用や粉じん濃度の管理など、各工程で浮遊物質の管理を適切に行う必要がある。粉じんによる健康被害の防止を目的とした、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²⁾によれば、掘削等作業主任者は、各工程で空気中の粉じん濃度の測定等を実

施することとなっている。

現在行われている粉じん濃度測定はガイドラインで定められた6点での定点計測のみである。これではトンネル坑内全体や作業者の吸引する粉じん濃度を把握することは困難である。トンネル坑内で場所・時間を問わず、施工者がその場で粉じん濃度を簡便に測定することができれば、作業者への注意喚起や粉じん暴露量の低減、換気システムの最適化などの粉じん対策を行うことができ、作業環境の改善につながると考える。

また、現在行われている粉じん濃度計測手法は、ろ過捕集方法及び重量分析方法、相対濃度指示方法がある。前者はろ過材に捕集された粉じんの質量をもとに粉じん濃度を算出するが、フィルタの回収や分析等などの試料

空気採取後の作業が必要なことから、即時的な計測は困難である。後者は、光散乱式のデジタル粉じん計を用いた粉じん計測手法である。これは、粉じんを含む大気にレーザ光を当てて、その光の散乱強度から粉じん濃度を推定する仕組みであり、計器内部に吸気・排気しながら計測を行うことで、連続的・即時的に粉じん濃度を推定することが可能である。

これらに対し進士・岸田³⁾は、粉じん計測のさらなる小型化・低廉化を図るため、機械内部に大気を取り込むことなく計測可能な手法を提案した。これは、デジタルカメラを用いて坑内写真を撮影すると、浮遊粉じんにフラッシュ光が反射して白い円形として写り込む Mie 散乱⁴⁾の原理を援用し、反射光の強度や粒子数をカウントして粉じん濃度を推定する手法である。本手法の最大の利点は、粉じんを機械内部に取り込まないので吸排気機構が不要で小型化が可能であること、メンテナンスフリーであること、原理的にはデジカメとフラッシュ光源があればよいことである。

本研究は、進士・岸田³⁾のデジタルカメラを利用した粉じん濃度測定法をベースに、その技術的課題を解決することを目的とし、以下の3点に着目した。

- 進士・岸田³⁾は静止画像を用いたが、本研究では動画画像を用いることで、連続的な粉じん濃度計測を可能にする。
- 通常のデジカメ撮影の場合、計測精度は背景の明るさや景色に大きく左右され、高精度計測のためには背景に暗幕が必要であった。本研究では、フラッシュ光源や検出方法を工夫することで、背景問題を解決する。
- 動画画像からリアルタイムで粉じん濃度を推定するための計算アルゴリズムを開発する。

上記の3点に対し、本報告では、作成した撮影装置を用いて粉じんを撮影し、撮影した動画画像内に写る粉じんを画像処理や機械学習を用いて自動検出するシステムの検討を行った。模擬トンネル内において粉じん飛散時の本システムでの計測とデジタル粉じん計での計測を同時に行い、粉じんの検出数と濃度の相関を調べ、システムの有用性を比較・検討した。

2. 動画画像を用いた粉じん撮影装置の概要

本研究で試作した撮影装置を図-1に示す。周辺機器が多様で、動画取得から画像処理までのプロセスを、高い自由度で開発することが可能なコンピューティングプラットフォームとして Jetson Nano (NVIDIA 社) を採用し、一連の撮影システムを自作した。装置は小型コンピュータ (Jetson Nano) を中心に、カメラ、ライト、モニタ、



図-1 撮影装置

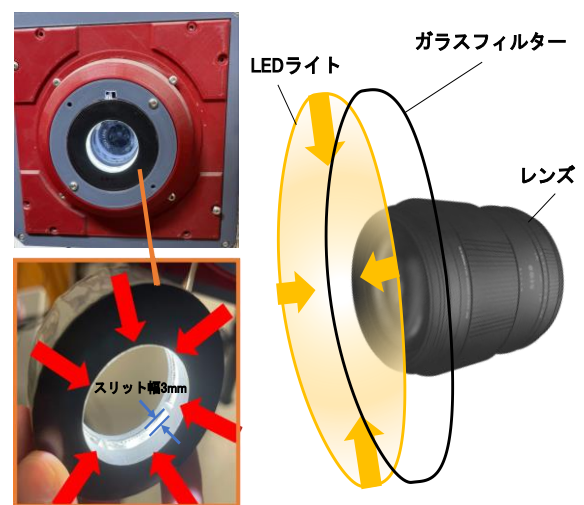


図-2 レンズとライトの照射方向および配置図

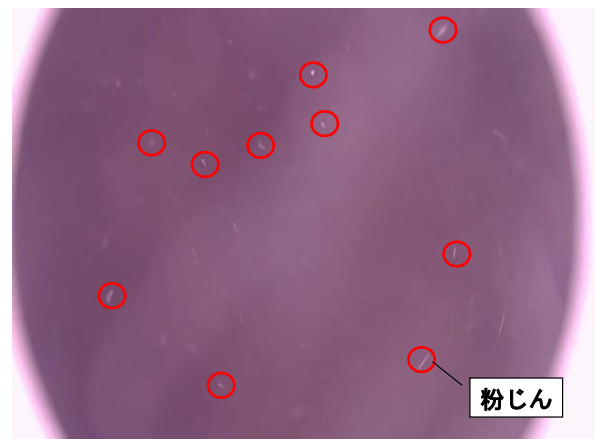


図-3 動画画像内に写る粉じん

ガラスフィルタで構成されている。カメラには、昼夜両対応で解像度が高く (12 メガピクセル)、焦点距離を調整可能なものを採用した。粉じんを鮮明に撮影可能な領域に焦点距離を合わせることで動画画像による連続的な粉じん撮影を可能にした。ライトにはテープ LED を用

いて、図-2 のように口径の中心方向に向け、撮影方向に対して垂直方向に照射したライトを設置した。ライト外枠には幅 3mm のスリットを設けて照射範囲を絞りこみ、レンズ前方に現れる粉じんを集光することによって、Mie 散乱した粉じんを撮影しやすくした。ライトの照射範囲にレンズの焦点距離を合わせることで、背景に依存することなく鮮明な粉じんを撮影することができる。ライトとレンズの間にはガラスフィルターを入れ、撮影方向側からの粉じんの侵入を防ぎ、コンピュータの故障を防ぐことが可能である。

本撮影装置による動画像に写った粉じんを図-3 に示す。30fps の設定で撮影を行うと、このように暗幕等を用いることなく粉じんを撮影することができる。次章では図-3 のように動画像に写り込んだ粉じんを自動的に検出する方法を検討する。

3. 動画像における粉じん検出方法の検討

前章で示した粉じんを撮影した動画像から、粉じんを自動的に検出する手法として、3ケースを比較した。それぞれのケースの粉じん検出フローを図-4に示す。

ケース①は、動画像に写り込む粉じんの形状が白色の円形状であることに着目して粉じんの個数をカウントする方法である。まず、撮影した動画像に前処理として背景差分を行い、入力画像と背景画像の差分を算出することで Mie 散乱により写った粉じんを抽出する。次にエッジ検出を行い、画像の画素値を微分することで画素値が急激に変化している箇所を特定し、写り込む粉じんの縁を抽出する。最後に円形抽出として、エッジ検出した中でもノイズなど粉じん以外のものを除いた円形のを粉じんとしてカウントする。

ケース②は、機械学習により動画像に写り込む粉じんを学習させて、粉じんの個数をカウントする方法である。今回は前処理などを行わずに、動画像に写り込む粉じんをそのまま学習させることで、機械学習の可能性を検討した。本研究では、深層学習の一つで高速に物体検出が可能なアプリケーションである YOLO (You Only Look Once)⁹⁾を用いた。YOLO は、画像の領域推定と物体の予測を一回の推測で同時に行うため高速に物体検出を行うことが可能である。はじめに、撮影した動画をフレームごとに分割した画像データから粉じんを切り出し、ラベル付け (アノテーション) を行った。Microsoft の VoTT⁹⁾を用いて、模擬トンネル実験施設で撮影した粉じんが写った画像から教師データを作成した。これを用いて学習したモデルで粉じんの検出を試みた。

ケース③は、上述したケース①と②を組み合わせ、粉じんを検出する方法である。まず、背景差分を行うこと

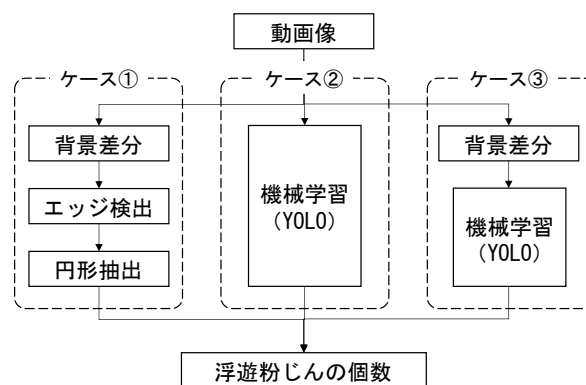


図-4 今回検討した検出フロー

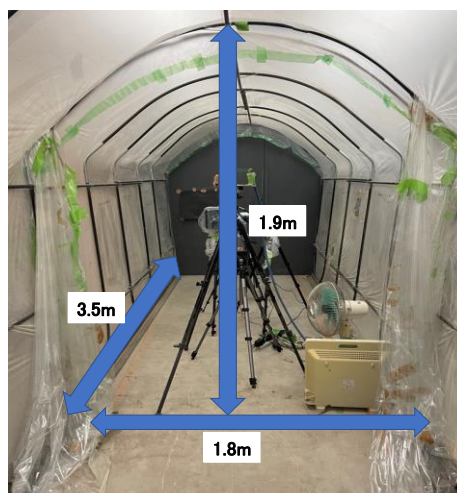


図-5 中規模室内トンネル施設

で入力画像と背景画像の差分を算出し、Mie 散乱により写った粉じんを抽出する。そして、抽出したことで二値化された粉じんを用いて、ラベル付け、教師データの作成を行った。それらで作成された学習モデルで検出を行った。ケース③の方法を用いれば、カメラの振動による動画像の揺れに伴う誤検知などを少なくできると考えた。

4. 粉じん計測精度の検証のための室内実験

(1) 実験施設

動画像による粉じん計測の精度を検証するため、室内模擬トンネルで粉じん実験を実施した。模擬トンネルは、図-5 に示す (独) 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所の中規模室内トンネル施設である。本施設は、室内に農業用ビニールハウスを組み立て、高さ 1.9m、幅 1.8m、奥行き 27m の空間を製作したもので「中規模室内トンネル施設」と称される。図-6 に中規模室内トンネルの平面図を示す。閉鎖空間内での大気中の粉じん濃度の変化を調べるために、中規模室内トンネルのうち切

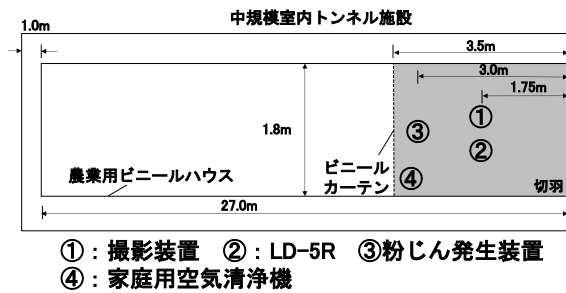


図-6 中規模室内トンネル施設 (平面図)

羽面に見立てた前方の 3.5 m をビニールカーテンで閉鎖し、実験を行った。粉じん計測地点は、トンネル奥行きおよび幅の中間地点の奥行き 1.75 m 地点、幅方向で中央に設置し (図-6 中の①と②) , 高さは 1 m とした。

撮影装置・デジタル粉じん計 LD-5R を図-7 のように配置した。トンネル建設時に一般に用いられる粉じん計測器であるデジタル粉じん計 LD-5R を検証機器とし、粉じんの撮影と粉じん濃度の計測を同時に行った。

模擬粉じんには、試験用の標準粉体である AC ダスト (ISO12103-1, A2, FINE) を用いた。この AC ダストは 176 μm 以下の粉じんが全体の 100%, 124.5 μm 以下が 100%, 88 μm 以下が 98.9%, 44 μm 以下が 91.5%, 22 μm 以下が 76%, 11 μm 以下が 59.5%, 5.50 μm 以下が 42.5%, 2.75 μm 以下が 23.3%, 1.38 μm 以下が 9.5%, 0.97 μm 以下が 5.5% の粒度特性を持つ⁷⁾⁸⁾。

粉じん発生は以下の方法で行った。高さ 1.6 m に設置したテーブル上に AC ダストを葉さじ 1 杯程度置き、エアコンプレッサで瞬間的に吹き飛ばした粉じんを、専用のターゲットに当てることで室内全体に広く拡散する方法である。粉じん発生装置は、図-6 のように模擬トンネル内の切羽から約 3 m 付近に設置した。室内の粉じん濃度を変化させるため、一定時間経過後には空気清浄機 (図-6 中の④) を作動し、粉じんの濃度を低減させた。

(2) 動画像による粉じん計測結果とデジタル粉じん計計測結果との比較

図-8 は、動画像から検出した粉じんの検出個数 (個/分) とデジタル粉じん計での粉じん濃度の粉じん発生時点からの経時変化を示している。デジタル粉じん計の計測値であるカウント値 (cpm) は 1 秒間隔で値が表示されるが、その単位は 1 分あたりの粉じん個数 cpm (counts per minute) である。動画像による方法での粉じんの検出個数は 30 fps で撮影した動画像から得られた検出個数を 1 分間隔で平均した。デジタル粉じん計は 1 秒間隔で計測したカウント値を 1 分間隔で平均した。デジタル粉じん計の結果より、粉じん濃度は実験開始から 10 分でピー



図-7 撮影装置とデジタル粉じん計 LD-5R および粉じん発生装置の配置図

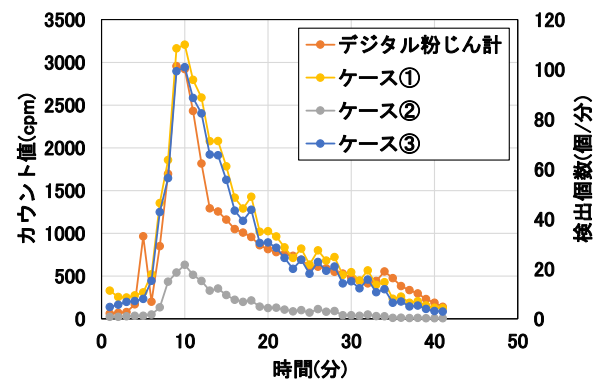


図-8 粉じん発生から収束までのデジタル粉じん計計測値と撮影動画から 3 手法で検出した粉じん検出個数の経時変化

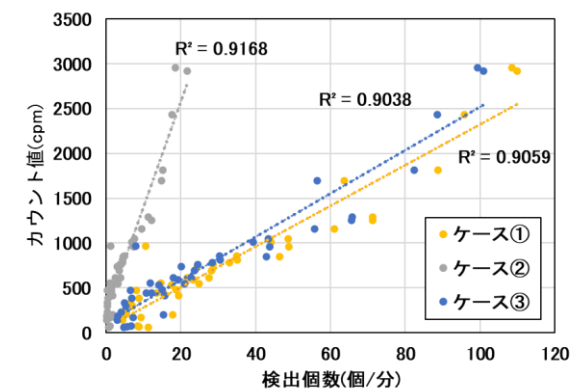


図-9 デジタル粉じん計計測値と撮影動画から 3 手法で検出した粉じん検出個数の相関関係図

クを迎え、その後、徐々に低下している。動画像による粉じん計測結果は、いずれの検出ケースの場合もデジタル粉じん計の計測値の変動に同期的であり、実験開始後 10 分でピークを示している。一方、検出個数について

は、検出ケースにより大きな差が表れた。ケース①とケース③では、実験開始後 10 分程度で測定値のピークの約 100 個/分から約 110 個/分の粉じんを検出した。さらにそのタイミングでは、デジタル粉じん計の値もピークとなり、約 3000cpm が得られた。このことから、デジタル粉じん計と同様にケース①とケース③では粉じん濃度が比較的高いタイミングでは、多くの粉じんを検出できていることが分かる。一方、ケース②では、デジタル粉じん計で比較的高い粉じん濃度が得られた実験開始約 10 分後に検出数のピークが見られるが、検出個数は約 20 個/分となり、ケース①や③の約 1/5 となった。機械学習によるケース②では検出個数が少なかった原因として、Mie 散乱により撮影した粉じんのうち、ピントから外れた地点の粉じんが、ピントが合致している粉じんに比べて薄く写り、YOLO による検出では粉じんと認識されず検出数が少なくなったと考えられる。それに対し、ケース①と③は背景差分を行うことで粉じんを明瞭に抽出することが可能となり、検出数がケース②と比べて多くなったと考えられる。

また、背景差分処理ののちに機械学習で粉じんを検出したケース③と機械学習に掛けないケース①とでは、前者のほうが総じて検出個数が少なめであることは注目すべき点である。背景差分では、背景画像が動かないことが前提となるが、カメラが揺れたり背景の景色や明るさが変化すれば、それらが差分画像に残り、粉じんとして誤検出される可能性がある。ケース③では機械学習を経ることでこのような誤検出が抑えられたものと推測される。実際のトンネル施工現場では、重機の通過によるカメラの揺れや人の通過による背景の変化などが生じるので、機械学習処理による誤検出軽減の効果は、制御された環境下で実施した今回の室内実験よりも顕著にあらわれると期待される。今後は、今回のケース①とケース③の結果を詳細に比較して、検出・不検出の原因を特定していくとともに、現場計測などを通して、誤検出対策を検討していく必要がある。

図-9 は、動画像に写り込む粉じんの検出個数(個/分)とデジタル粉じん計での粉じん濃度計測値であるカウント値(cpm)の 1 分間の計測結果の相関図である。図より、3 つの検出方法全てでデジタル粉じん計で計測したカウント値との決定係数 R^2 は線形近似をした結果 0.9 以上となり、検出個数と粉じん濃度の相関が高い結果となった。これは、動画像を用いた手法により、デジタル粉じん計計測値を十分な精度で評価可能であることを示唆している。現在のところ、定量的には 30 倍(ケース①と③)～150 倍(ケース②)の倍率差があるが、これは、評価する体積の問題であると考えている。今後は、評価体積を考慮した分析を実施していく予定である。

5. まとめおよび今後の課題

本報告では、模擬トンネル内において粉じん飛散時の本システムでの計測とデジタル粉じん計での計測を同時に行い、粉じんの検出数と濃度の相関を調べ、システムの有用性を比較・検討した。まず、動画像を用いた粉じんの撮影を暗幕等の背景を用いることなく行うことができた。また、動画像からリアルタイムで粉じん濃度を推定するための計算アルゴリズムとして、3 ケースを検討した。すべてのケースにおいてデジタル粉じん計の計測値であるカウント値の経時変化に同期的であり、両者の間に高い相関を得ることができた。

今後は、トンネル施工現場での粉じんの撮影とデジタル粉じん計での計測を行い、システムの開発を進めていきたい。

謝辞：本研究の遂行にあたって、実験に多大なるご協力を頂いた(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 大塚輝人氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 長浜文雄：じん肺症の肺機能一重症度分類に対する私案、日本胸部疾患学会雑誌, Vol.2, No.5-6, pp.319-326, 1965.
- 2) 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, pp.6-7, 2020.
- 3) 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.
- 4) Hecht, E.(尾崎義治, 朝倉利光 訳)：原著5版 ヘクト 光学 I—基礎と幾何光学一, p.167, 2018.
- 5) Ultralytics YOLOv5: doi.org/10.5281/zenodo.6222936, 閲覧日 2022/08/10.
- 6) microsoft VoTT: <https://github.com/Microsoft/VoTT/release>, 閲覧日 2022/08/10.
- 7) (一社)日本粉体工業技術協会：APPIE 標準粉体・AC ダスト説明書, pp.6-7, 2017.
- 8) (一社)日本粉体工業技術協会：ISO AC ダスト, https://appie.or.jp/introduction/organization/technical_center/testpowders/ac_dust/, 閲覧日 2022/08/16.

(2022. 8. 26 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MEASURING DUST CONCENTRATION IN TUNNELS USING VIDEO

Kyosuke TANAKA, Hisashi HAYASHI, Kazuki IDE, Noriaki KISHIDA,
Shinichiro NAKASHIMA and Masato SHINJI

This study is developing a video system for real-time monitoring of atmospheric dust concentration in tunnel construction. Three types of video processing algorithms for automatic dust particle counting were proposed in this study, namely, image background subtraction method, machine learning method and the combination of these two methods. The measurement performance of the proposed algorithms was investigated through the dusting experiment in laboratory. By comparing with the measurement result using the digital dust meter, it was found that our video system can measure dynamic increase and decrease of atmospheric dust concentration in any of the three algorithms. The numerical difference between the video system and the digital dust meter could be due to the difference of evaluated air volume and the brightness of image background.