

動画撮影を用いた粉じん濃度計測の適用検討

井出一貴 三浦俊彦

森野弘之

(東日本ロボティクスセンター)

Application Study of Dust Concentration Measurement Using Video Recording

Kazuki Ide

Toshihiko Miura

Hiroyuki Morino

Abstract

We are developed a system to measure the dust concentration in tunnel pits based on video recordings captured within the pits. The detection method employed background differencing and machine learning to identify dust and was compared with existing digital dust meters in laboratory tests. The results indicated that the detection accuracy was significantly influenced by background stability. To mitigate this, we enhanced the imaging system by installing a dark curtain plate in front of the camera lens, effectively suppressing background changes. This improvement was validated in laboratory tests, demonstrating reduced false detections owing to background variations and enhanced detection accuracy. After improvement, our system effectively captured fluctuations in dust particle counts under varying background conditions and showed a strong correlation with measurements from conventional digital dust meters.

概要

トンネル坑内の粉じん濃度を、坑内で撮影した動画に基づいて計測するシステムを開発している。筆者らはこれまでに粉じんを検出する方法として、背景差分や機械学習を用いた手法を使って、室内実験において既存デジタル粉じん計との比較を行った。その結果、検出精度は背景の変化に大きく依存することがわかった。そこでカメラレンズの前方に暗幕板を設置することにより、背景変化を抑える改良を今回新たに行った。改良した撮影装置を用いた室内実験により検証を行った結果、背景変化に起因する誤検出を抑え、粉じんの検出精度が向上することを確認した。改良した撮影装置による粉じん検出個数は、背景の変化する条件下でも粉じん計測個数の変化をとらえることができ、既存デジタル粉じん計の計測値との間に高い相関を示すことが明らかとなった。

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、掘削、ズリだし、コンクリート吹付け作業等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 $4\mu\text{m}$ 以下に分類されるレスピラブル粒子（微細で、吸入性粉じん）は体外に排出されず肺胞内に滞留し、「じん肺症」の原因となる¹⁾。そのため、防じんマスクや保護メガネ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。令和2年(2020年)にこのガイドラインの改正に伴い、トンネルの施工環境の基準が見直された。

ガイドラインの改正により、粉じん濃度測定はトンネル坑内の計6点の定点測定、個人サンプリングによる測定、車両系機械を用いた測定のいずれか、もし

くは複数の測定の組合せにより、半月以内に1回、定期的に行うこととされ、これまでより厳しい管理が求められるようになった。作業安全性のさらなる向上のため、坑内粉じんの計測が重要と考えられる。

現在の粉じん濃度計測手法は、質量濃度測定方法と相対濃度指示方法がある。前者は、試料空気を採取し、ろ過材に捕集した粉じんの質量をもとに粉じん濃度を算出する。これは、フィルターの回収や分析の試料採取後作業が必要で、リアルタイム計測は出来ない。一方後者は、建設現場での一般的な計測に使用されるデジタル粉じん計であり、リアルタイムによる計測が可能である。しかし、粉じんを機器内部に取り込むので、粉じん濃度の高いところや連続計測では内部が汚れ易くメンテナンス回数が多くなる。そこで計測機のメンテナンス手間の低減を図るため、機器内部に粉じんを取り込むことなく計測可能な手法としてデジタルカメラを利用する方法が提案されている³⁾。これは、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散乱の現象を利用

して粒子数をカウントし、粉じん濃度を推定する手法である。デジタルカメラとフラッシュ光源のみの機材で測定が可能であり簡便である一方で、粉じん濃度を把握するためには、撮影した画像から反射光の強度や粒子数をカウントするための後処理が必要となることから、リアルタイム性に欠けることが課題となっていた。

これまでに筆者らは、静止画で行っていた粉じん計測を動画像で行うことで、リアルタイムな粉じん濃度計測手法について検討を行った。また、粉じん撮影に適した装置とともに、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検出アルゴリズムを検討した⁴⁾。本システムで計測された粉じん検出個数は既存のデジタル粉じん計の計測値と高い相関を示すことを確認した。しかし、撮影時の背景の変化や機器の揺れが粉じん検出精度を低下させることがわかった。実際のトンネル現場では人の通過や照明による背景の変化や、さらに重機の通過による撮影装置の揺れが考えられるため、実用化のためにはこれらの課題の解決が不可欠である。

本報告では、トンネル現場で想定される機器の振動や背景の動きの影響を受けにくい計測システムを目指して撮影装置に加えた改良と、室内実験によりその性能を確認した結果と現場適用実験結果について述べる。

2. 動画像を用いた粉じん撮影装置について

2.1 粉じん撮影装置の概要

撮影装置を Fig. 1 に示す。動画取得から画像処理までのプロセスは、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 Jetson Nano に、カメラ、LED ライト、モニター、ガラスフィルターで構成されている。カメラには、昼夜両対応で解像度が高く (12 メガピクセル)、ピントを調整可能なものを採用した。カメラの仕様を Table 1 に示す。カメラは、マニュアルフォーカスのものを採用した。粉じんを撮影するためには照明が重要であり、リング状にした LED ライトを光源としてレンズフードの内側にセットし、中心に向かって光が照射されるように配置した。LED ライト筒には幅 3 mm のスリットを設けて照射範囲を絞りこみ、レンズ前方の粉じんに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。LED ライトの照射範囲にレンズのピントを合わせ、絞りを調節することで、粉じんを撮影することができる。また、レンズの防じんのためにガラスフィルターを設けている。本装置で撮影された粉じんの例を Fig. 2 に示す。人の通過や機器の揺れによる背景の変化がなければ、図のように粉じんを撮影することができる。

3. 動画像による粉じん検出方法の検討

粉じんを撮影した画像から、粉じんを検出する手法として、Fig. 3 に示す2種類の手法を用いている。同じ動

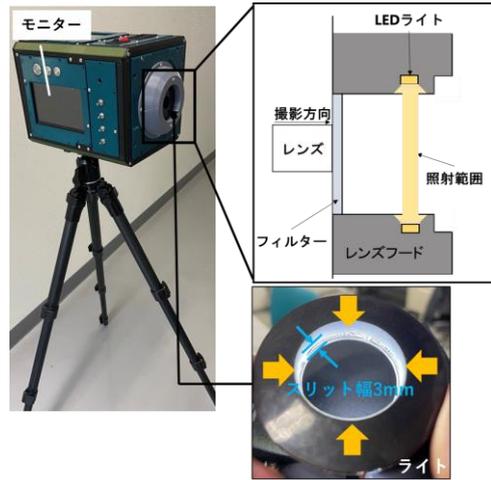


Fig. 1 撮影装置の概要
Outline of Photography Equipment

Table 1 撮影カメラの仕様
Photography Camera Specifications

静止画解像度	1230万画素
センサーの解像度	4056×3040 ピクセル
ピクセルサイズ	1.55 μm×1.55 μm
センサーサイズ	1/2.3 インチ

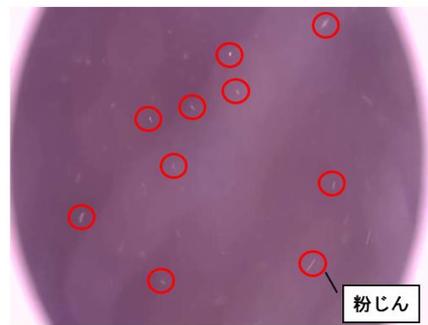


Fig. 2 撮影された粉じん
Photographed Dust

画像を用いて検出方法の違いによって検出できる個数やデジタル粉じん計による計測値との相関を調べた。

検出方法①は、動画像に写る粉じんが白色の円形状であることに着目し粉じんの個数をカウントする方法である。まず、動画像に前処理として背景差分 (入力画像と事前に取得した背景画像とを比較することで、事前に取得した背景画像には存在しない物体を抽出する処理) を行い、Mie 散乱により写った粉じんを抽出する。背景差分アルゴリズムには MOG2 (Mixture of Gaussian Distribution)⁵⁾ を採用した。MOG2では、ある画素における画素値の頻度分布は画像内に存在する各物体起因の正規分布を重ね合わせた混合正規分布に従うと仮定し、ある時間の画素値が背景起因の正規分布に属する場合は背景、

それ以外は前景と判断する。その正規分布が背景起因かどうかの判断は画素内に存在する時間を基準として、存在時間が短ければ前景、長ければ背景として二値画像化する。このアルゴリズムは、動いている物体を前景と判断するため、動的な場面に適している。次にエッジ検出を行い、画像の画素値を空間微分することで画素値が急激に変化している個所を特定し、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。

検出方法②は、動画に写る粉じんを機械学習により学習させて、粉じんの個数をカウントする方法である。本方法では、撮影した動画に前処理を行わず、動画に写り込む粉じんを学習データとして使用した。本方法では、深層学習の一つで高速に物体検出が可能なYOLO (You Only Look Once) v5⁶⁾を用いた。YOLO v5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。まず、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VoTT (Visual Object Tagging Tool) ⁷⁾を用いて、室内実験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て学習を行った。学習のパラメータとして、batch sizeを64、epoch数を200、重みには最も演算負荷の小さいYOLOv5sを設定した。ここでbatch sizeとは1回に処理する件数であり、epochとは学習回数である。上記のパラメータで学習を行い、mAP (mean Average Precision) で学習モデルの評価を行った⁸⁾。mAPとは、物体検出の性能を総合的に評価する際に用いられる指標である。mAPは学習中に算出されるPrecision (適合率)とRecall (再現率)を用いて計算され、値が1.0に近いほど学習モデルの性能が高い。Precisionは、モデルが検出した物体のうち、実際に正しいものである割合を示し、Recallは、実際の物体のうち、モデルが正しく検出した割合を示す。今回は130~150 epochが経過した時点でmAPの値は0.8を示し、高い検出性能であることを確認した。そのため、本研究では、200 epochまで学習したモデルを用いて検証を行った。背景差分では、背景画像が動かないことが前提となるが、撮影装置が揺れたり、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。そこで、背景変化の影響を抑えるために撮影領域の外にプラスチック製の暗幕板を設置し、車両や人員などの背景が写らないように改良した。暗幕板の設置状況を Fig. 4 に示す。

4. 粉じん計測室内実験

4.1 実験環境

半密閉されたアクリル円筒(直径35cm×長さ81cm)内に粉じんが浮遊する空間をつくり、撮影装置とデジタル粉じん計をセットして同時計測し、撮影装置の粉じん計

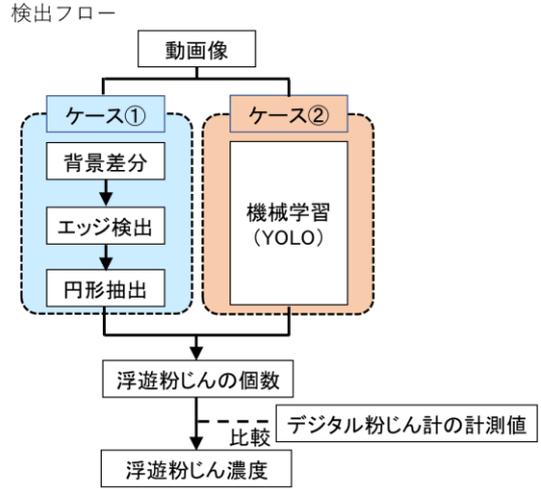


Fig. 3 粉じん濃度検出フロー
Dust Concentration Detection Flow

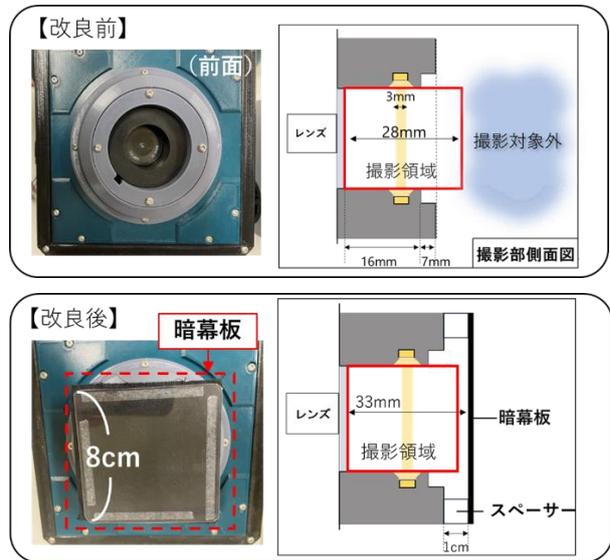


Fig. 4 暗幕板の設置状況
Installation of Dark Curtain Board

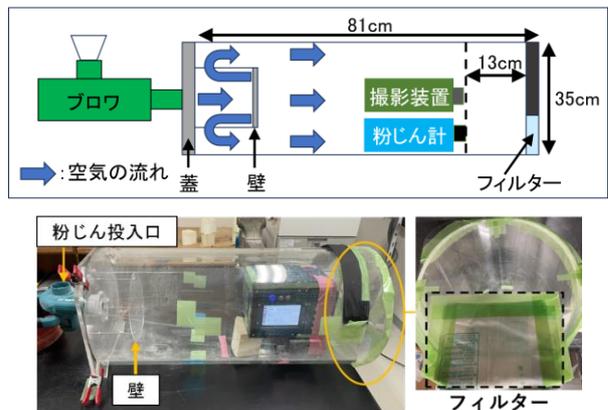


Fig. 5 実験装置の概要
Outline of Experimental Apparatus

測性能を検証した。模式図 (Fig. 5) に示すように、流入側には市販の電動ブロワをセットし、粉じん発生機構とした。ブロワの吸入口に粉じん物質を投入したのちに、ブロワを作動させてアクリル円筒内に粉じんを噴射する機構である。円筒内を均質な粉じん飛散環境とするため、流入孔の前方には壁を設けている。また、排気側にはフィルターをセットして集じんしている。粉じん計測地点は、粉じんに加え背景の変化が撮影可能な場所を選定した。撮影装置は円筒の出口側から13cmの地点にアクリル円筒の中心に設置した。なお、撮影方向は出口側のアクリル板の方向とした。デジタル粉じん計を検証機器として撮影装置下部に設置し、粉じんの撮影と粉じん濃度の計測を同時に行った。模擬粉じんにはコーンスターチを用いた。ブロワの吸気口にコーンスターチを約0.05 g投入したのちに、ブロワを1 秒間作動し粉じんを発生させた。

4.2 暗幕板の効果

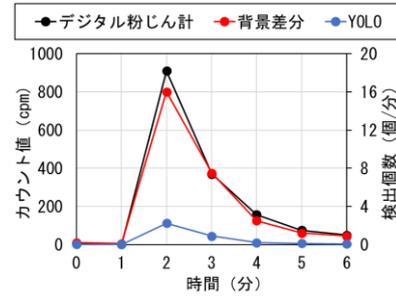
暗幕板の効果を確認するため、背景の変化と暗幕板の有無をパラメータとして実験を行った。Table 2に実験ケースを示す。背景の変動を与えたケースでは、アクリル円筒の外側（撮影領域側）を人が繰り返し通過することで背景の変化を与えた。すべての実験で計測開始から2分後に粉じんを噴射した。背景変化を与えた実験では、計測開始1分後から背景変化を与えた。つまり、1分時点の結果は粉じんのない環境における計測結果を、2分時点以降の計測は粉じんが飛散している環境による計測結果を示している。デジタル粉じん計の計測はカウント値 (cpm : counts per minutes) で表し、1分間あたりのカウント数を示す。動画像による方法の粉じんの検出個数は 30 fps (1秒間あたり30枚の画像) で撮影した動画像から得られた検出個数を1分間ごとに平均した値 (個/分) を示している。検出方法は前述した背景差分法と機械学習 (以下YOLOとする) による検出方法を使用した。Fig. 6 は、背景変化なしの暗幕板なし (ケース1) , 暗幕板あり (ケース2) での動画像からの検出個数 (個/分 : 右縦軸) とデジタル粉じん計での粉じんカウント値 (cpm : 左縦軸) の経時変化を示している。Fig. 6に示すように、デジタル粉じん計の値は噴射直後 (2分) にピークを迎え、その後、徐々に低下する。動画像による粉じん計測結果は、背景に変化のないケース1,2では、暗幕板の有無によらずデジタル粉じん計の計測値の変動に同期的な変化を示している。

Fig. 7は、動画像による粉じんの検出個数(個/分)とデジタル粉じん計による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を示している。相関図より,決定係数 R^2 は0.9 以上を示しており、動画像から検出した粉じん個数とデジタル粉じん計の値は検出方法によらず相関が高いことがわかる。動画像による方法は、背景が変化しなければ高精度で計測可能であるといえる。検出個数をカウント数に換算するための計数 (換算計数) は背景差分では約40~55,YOLOでは約220~410とケースによって違いがあった。

Table 2 実験ケース

Test Case		
ケース	背景の変動	暗幕板
1	なし	なし
2		あり
3	あり	なし
4		あり

ケース1：背景変動なし，暗幕板なし



ケース2：背景変動なし，暗幕板あり

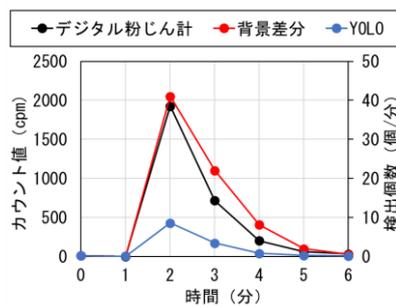
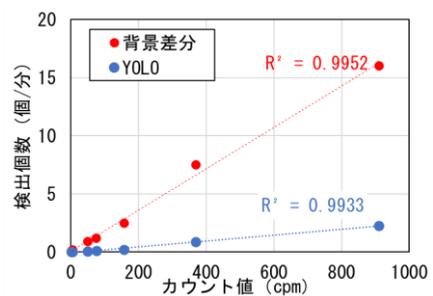


Fig. 6 測定試験の結果
Results of Measurement Test

ケース1：背景変動なし，暗幕板なし



ケース2：背景変動なし，暗幕板あり

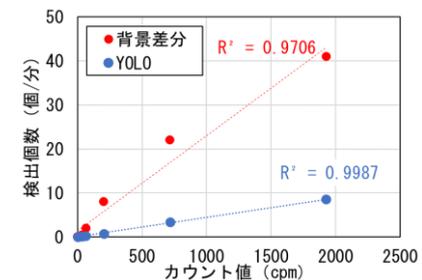


Fig. 7 粉じん検出個数の相関図
Correlation Chart of The Number of Dust Particles Detected

次に、撮影領域の背後を人が通過する背景変化ケースの計測結果をFig. 8に示す。経時変化のグラフより、暗幕板なしのケース3では、噴射前の背景が変動している時点（1分）でも値が上昇しており、誤検出が生じていることがわかる。一方で、暗幕板ありのケース4の場合は、動画による検出個数も粉じん計のカウントの上昇と同様の挙動を示した。つまり、暗幕板によって背景変化が抑制された結果、誤検出が避けられたといえる。Fig. 9に示す相関図より、暗幕板がない場合には決定係数 R^2 が 0.3（ケース3）であったのに対して、暗幕板を設置する（ケース4）ことによって 0.9 以上まで向上していることが確認できる。換算計数は背景差分では約20~35、YOLOでは約200~600とケースによって違いがあり値に幅があった。

トンネル施工中に動画の背景に何が写り込むかを制御することは困難である上に、坑内照明の変化や、観測中のカメラの移動の可能性を考えれば、暗幕板によって背景を一定の状態に保つことは、粉じん検出のために重要である。以上より、暗幕板の設置による改良によって、動画の背景変化に起因する誤検出を抑えることが可能となった。改良後の室内実験の結果では、どのケースでも検出個数と粉じん濃度の相関の決定係数 R^2 は0.9以上となり、相関が高い結果となった。

5. トンネル現場における適用事例

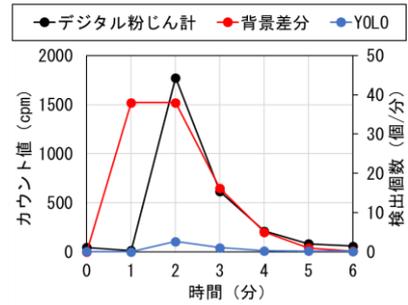
トンネル現場において改良した撮影装置を用いて測定を行い、検出方法や暗幕板の効果を検証する。

Fig. 10に現場における測定箇所および測定状況を示す。トンネル現場では、機械掘削を行っており、測定箇所はトンネル現場内で安全が確保できる切羽から約 80m の場所とした。撮影装置とデジタル粉じん計を並べて設置し、粉じんを測定した。掘削、ずり出し、吹付等一連の作業工程中に測定を行い、それぞれ比較を行った。測定中に粉じん濃度の高かった吹付工程の測定結果を Fig. 11に示す。粉じんの主体は吹付コンクリート由来の粉じんと考えられる。検出方法として、背景差分と YOLO を用いた場合は、いずれも決定係数が大きく、粉じん計の値との相関がみられた。YOLO も用いた検出方法では、検出個数自体は低い値であり、換算係数は 400~1200 であった。一方、背景差分による方法では、検出個数が多く、換算係数は約 120~150 であった。

Fig. 12 に暗幕板がない場合の測定結果を示す。横軸に測定時間を縦軸に検出個数を示す。背景差分で検出個数が一時的に増加しているのは車両通行によるものであり、誤検出が発生している。暗幕板がない場合には、粉じん撮影の背景が変化し、誤検出が起こることが現場実験でも確認できた。

現場実験の結果と室内実験による結果を比較すると現場実験の方が換算係数が上昇する傾向がみられ、粉じんの検出精度が低下していると考えられる。

ケース3：背景変動あり，暗幕板なし



ケース4：背景変動あり，暗幕板あり

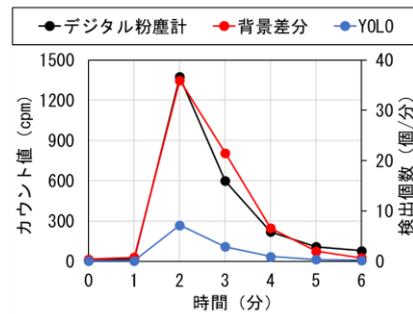
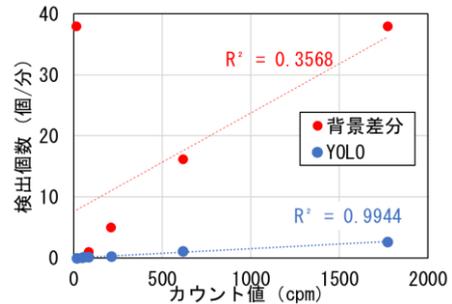


Fig. 8 測定試験の結果
Results of Measurement Test

ケース3：背景変動あり，暗幕板なし



ケース4：背景変動あり，暗幕板あり

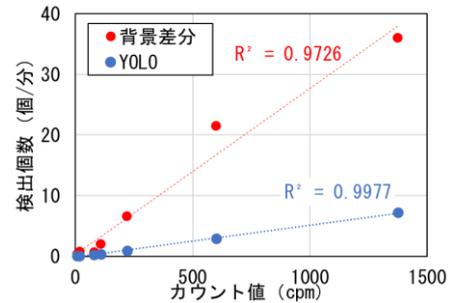


Fig. 9 粉じん検出個数の相関図
Correlation Chart of The Number of Dust Particles Detected

6. まとめ

動画撮影による粉じん濃度計測方法の検討を行い、暗幕板の設置による効果を室内実験、現場実験で検証した。得られた知見を以下に示す。

1) 新たに暗幕板を設置することにより、人や車両通過による揺れなどの背景変化に対して背景差分を利用した検出で誤検出が少なくなることがわかった。

2) 室内実験と現場実験では粉じん計によるカウント値は同程度であった。それに対し、動画像による粉じんの検出個数は背景差分、YOLOのどちらの方法でも現場実験の方が少なくなっており、換算係数が大きくなることがわかった。粉じんの種類や測定環境の明るさなどの要因が考えられるが、今後の検討課題となった。

3) YOLOは背景変動等の影響を受けにくいが見出し数が少なく、粉じん計のカウント値に換算した場合、1個あたりの誤差が大きくなる可能性がある。

動画像による方法は、簡便で既存の測定方法と相関はあるが、検出方法によって換算値が大きくなるなど課題もある。粉じんの種類による影響や撮影環境の検証を行い、本システムの現場適用に向けたシステムの開発を行う方針である。

謝辞

本研究の実施にあたり、西日本工業大学の林久資教授、山口大学の中島伸一郎教授並びにドボクリエイトの岸田展明氏より共同研究の開始時から多くのご協力を頂きました。加えて、田中亨昌氏、丸山祐太郎氏をはじめとする山口大学院創成科学研究科の皆様へ実験参加・協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 長浜文雄: じん肺症の肺機能—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) 田中亨昌, 林久資, 井出一貴, 岸田展明, 中島伸一郎, 進士正人: 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, トンネル工学報告集, Vol.32, No.1, pp.46-51, 2022.
- 5) Kaew Tra Kul Pong, P., Bowden, R.: An improved a daptive background mixture model for real-time tracking with shadow detection, in Video-Based Surveillance Systems, Springer Science + Business Media New York, pp.135-144, 2002.

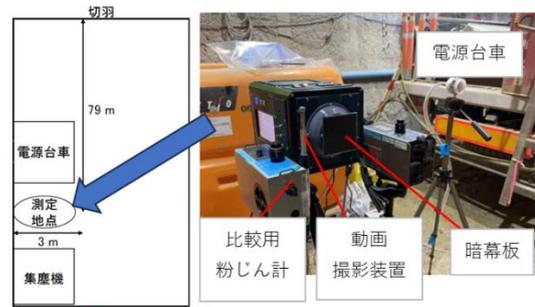


Fig. 10 現場における測定箇所・測定状況
Tunnel Site Measurement Location

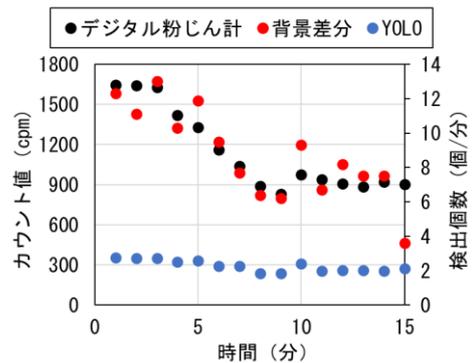


Fig. 11 測定結果 (暗幕板あり)
Measurement Results (With Dark Curtain Plate)

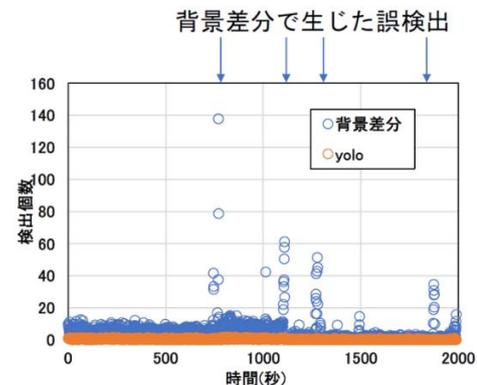


Fig. 12 測定結果 (暗幕板なし)
Measurement Results (Without Dark Curtain Plate)

- 6) Glenn Jocher et al, "ultralytics/yolov5", zenodo, 2022-02-22, <https://zenodo.org/records/6222936>, (参照 2022-08-10)
- 7) Microsoft, "Vott", Github, 2021-12-07, <https://github.com/Microsoft/VoTT>, (参照 2022-08-10)
- 8) Jonathan Hui, "mAP(mean Average Precision)for Object Detection", 2018-03-07, Medium, <https://jonathan-hui.medium.com/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173>, (参照 2022-08-10)