

## 論 文

# マイクロ繊維シートに捕集された 粉じんの画像解析による碎石飛散粉じん簡易 モニタリング法の基礎的検討<sup>※)</sup>

齊藤 貢<sup>※※)</sup> 大塚 尚寛<sup>※※※)</sup>

小林 大起<sup>※※※※)</sup> 津志田 匡史<sup>※※※※※)</sup>

## 1. はじめに

2011年に発生した東北太平洋沖地震による津波被害、2016年に発生した熊本地震、2017年7月の九州豪雨など近年続発している自然災害からの復旧・復興のため被災地での骨材需要が高まっている。また、2020年開催予定の東京オリンピック・パラリンピックに向けた社会基盤整備に伴い、これらの事業が行われる地域の骨材生産事業場においては、向こう数年間は多くの骨材需要が見込まれている。国土交通省が発表した「2017年度主要建設資材需要見通し」によると、2017年度の骨材需要は前年比で+4.1%の増加と予測されている<sup>1)</sup>。安全・安心な社会基盤を整備するためには、高品質の骨材を安定的に生産することが必要である。

戦後間もない頃の河川砂利中心であった骨材生産は、高度経済成長を過ぎると碎石・砕砂の生産量が増加し、近年は碎石・砕砂が骨材生産の大半を占めている。そのため、全国の骨材生産事業場では、製品の品質管理はもちろんのこと飛散粉じんなどの環境影響対策に配慮しながら生産することが必要となっている。2015年度に骨材資源工学会が実施した「骨材生産事業場の現状に関するアンケート」結果によると、碎石場における様々な生産工程から発生する飛散粉じん対策に苦慮している事業場が多いことが報告されている<sup>2)</sup>。復旧・復興等による社

会基盤整備事業に伴い骨材需要が増加すれば、骨材生産プラントや建設重機の稼働時間が延長され、製品運搬ダンプの運行台数の増加が予想される。その結果、骨材生産事業場から発生する飛散粉じん量の増加が懸念され、労働作業環境や近隣居住地域への影響を考えるとより一層の飛散粉じん対策が必要になる。

飛散粉じん対策を講じるには、骨材生産事業場から発生する飛散粉じん状況を把握することが前提となる。一般的な飛散粉じん測定は、環境影響評価などの降下ばいじん測定に用いられるダストジャーを用いた1ヶ月単位での定点観測や、敷地境界でデジタル粉じん計を用いた単発的な浮遊粒子状物質濃度測定 (JIS B 7954) を行っている程度であり、事業場内の様々な粉じん発生源近傍における飛散粉じん状況の定期的かつリアルタイム観測は現状では行われていない。

そこで本研究では、安価で多点同時に設置可能なマイクロ繊維シート捕集材 (以下、MFS) を利用した画像解析による碎石場の飛散粉じん簡易モニタリング法について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 碎石粉じんのモニタリング材の選定

碎石飛散粉じん量を評価するモニタリング材として、MFS (ポリエチレン・ポリプロピレン製、流動パラフ

※) 2018年1月31日受付 2018年10月23日受理

※※) 学術会員 理事 岩手大学理工学部システム創成工学科 准教授、博士 (工学)

※※※) フェロー会員 理事 岩手大学名誉教授 工学博士

※※※※) 東日本旅客鉄道株式会社

※※※※※) 東日本旅客鉄道株式会社

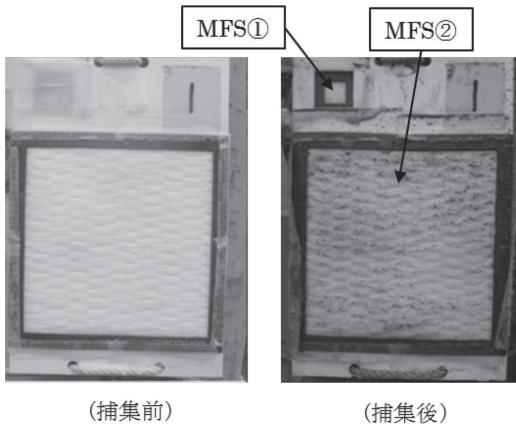


図1 MFSモニタリング材の様子

イン含)を用いた。

図1にMFSモニタリング材の飛散粉じん捕集前後の様子を示す。MFSは、簡易的な一般大気中粒子状物質(以下、PM)の有効な多点パッシブモニタリング材であり、MFS表面に捕集されたPM量は、一定期間中の大気中PM量の指標となることがわかっている<sup>3-5)</sup>。しかしながら、MFSモニタリング材の捕集PM量を測定するためには、PM捕集されたモニタリング材の質量が安定するまでの時間と精密天秤での秤量が必要となるため、既存の方法では砕石場現場でのリアルタイムモニタリングの実施・評価は困難である。そこで、MFSに捕集されたPM量を秤量せずに、MFS捕集面の撮影画像から捕集PM量を推定する方法の可能性について検討した。

## 2.2 画像解析方法

図1に示したMFSモニタリング材は、モニタリング期間中はカバーで覆いPM捕集のない1cm×1cm平方の画像解析基準面(MFS①)と、モニタリング期間中にPMを捕集する10cm×10cm平方のPM捕集面(MFS②)から構成されている。なお、画像解析の際にMFSと取付台との境が確認しやすくなるようMFS①およびMFS②それぞれに緑色の境界枠を設けた。

PM捕集後にMFS①のカバーを外した後、MFS①表面とMFS②表面を含むMFSモニタリング材全体を撮影し、パソコンに画像を保存した後に画像解析処理(モニタの画像解像度は:1280px×1024px)を行った。撮影画像は気象条件や撮影時刻により明るさが異なるため、画像解析ソフトウェアPhotoshop CS3(Adobe社)により撮

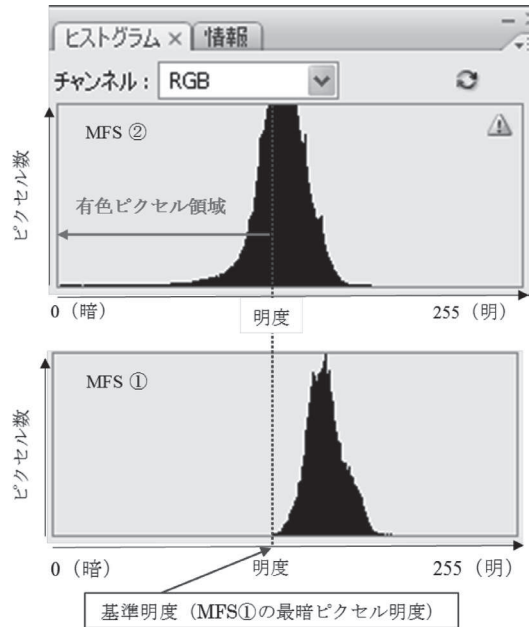


図2 明度ヒストグラムと有色ピクセルの概念図

影画像のMFS①の明度ヒストグラムを確認して画像の明度を一律に補正した。図2に明度ヒストグラムと有色ピクセルの概念図を示す。MFS①の明度ヒストグラムで最も暗いピクセル明度を基準明度として、MFS②の明度ヒストグラムでMFS①の基準明度よりも暗いピクセル領域を有色ピクセルと見なし、この領域内のピクセルをPM捕集のあるピクセルと判定した。MFS②の有色と判定したピクセル数を全ピクセル数で除した値の百分率を“有色ピクセル比”と定義した。有色ピクセル比を(1)式に示す。

$$\text{有色ピクセル比 (\%)} = \frac{\text{有色ピクセル数}}{\text{全ピクセル数}} \times 100 \quad (1)$$

なお、画像解析には、赤(R)、緑(G)、青(B)の光の三原色を混ぜて色を再現したRGB値(明度値:0-255)の加法混色ヒストグラムの他、R値(明度値:0-255)、G値(明度値:0-255)、B値(明度値:0-255)それぞれの単色ヒストグラムにおける有色ピクセル比を算出し、それぞれについて解析を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 撮影画素数の違いによる画像解析結果

砕石場現場における飛散粉じん状況のリアルタイムモ

ニタリングを考え、モニタリング材の撮影は汎用性の観点からデジタルカメラ（1400万画素）と携帯電話機（300万画素）とした。

砕石場現場でのモニタリング実験は、2013年7月、12月、2014年1月に岩手県内のA砕石場で行った。モニタリングは、破碎プラント付近や積み込みダンプ運搬路、製品ストックヤード付近など、砕石場内の7箇所にMFSモニタリング材を地上高さ約150cmに設置し、7日間のパッシブモニタリングを行った。モニタリング材回収時に、それぞれの設置地点でMFSモニタリング材全面に影の影響がないように撮影を行った。また、画像解析から得られる有色ピクセル比と捕集粉じん量を比較検討するために、MFS表面が乾燥した後に捕集粉じん量の算出を行った。

図3にそれぞれのカメラで撮影した画像の有色ピクセル比（RGB値）と捕集粉じん量の関係を示す。デジタルカメラで撮影した粉じん捕集面画像のピクセル数は、95,300～357,000px（平均：約221,100px）で、携帯電話カメラでは、109,300～247,700px（平均：約180,500px）であった。いずれのカメラの場合も画像サイズが一律ではないため画像解析に用いたピクセル数にばらつきはあるが、有色ピクセル比はピクセル数の相対比率で評価することから画像サイズを統一せずに解析した。デジタルカメラおよび携帯電話のカメラによる有色ピクセル比と捕集粉じん量の決定係数はそれぞれ $R^2=0.62$ であり、正の線形関係は見られたが、100%の有色ピクセル比となったデータについては捕集粉じん量のばらつきが大きい結果であった。一定量以上の捕集粉じん量がある場合は、

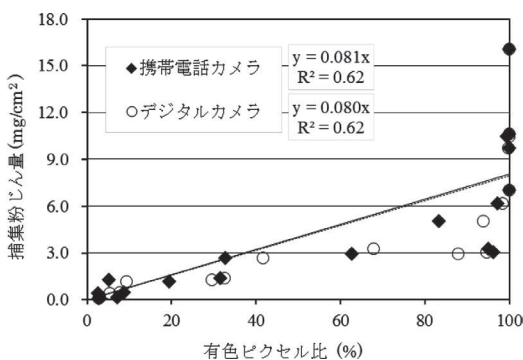


図3 撮影画素数の違いによる有色ピクセル比（RGB値）と捕集粉じん量の関係

MFS表面に直接吸着した粉じん層の上にさらに粉じんが重なって付着することで捕集粉じん量は増加するものの、画像上での有色ピクセル比は100%を超えることがないため相関関係が低くなったと推察される。そこで、有色ピクセル比が100%の有色ピクセル比となったモニタリングサンプルは、画像解析から捕集粉じん量を推定することが困難であると判断して、図4にそれらのデータを除外した有色ピクセル比と捕集粉じん量の関係を示す。デジタルカメラ撮影での有色ピクセル比と捕集粉じん量の決定係数は $R^2=0.77$ 、携帯電話での撮影では $R^2=0.83$ とそれぞれ高い相関関係が認められた。また、撮影画素数によらずそれぞれの一次回帰式の傾きがほぼ同じとなることから、画像解析結果に撮影画素数の違いによる影響はないと判断した。ただし、本実験結果から捕集面を覆い尽くす多量の粉じんが付着する場合には画像解析による捕集粉じん量の推定は困難であり、モニタリングに適用可能な有色ピクセル比の範囲があることが明らかとなった。

### 3.2 捕集PM粒径の違いによる画像解析結果

粒径の違いによる画像解析結果の検討は、RGB値の明度ヒストグラムがほぼ等しく粒径サイズの異なる活性炭と黒色プリンタナーを模擬PMとして行った。活性炭のPM粒径サイズは45～75 $\mu\text{m}$ 、プリンタナーのPM粒径サイズは30～45 $\mu\text{m}$ である。実験は、現場モニタリングと同じ設置条件となるようビニールフード（W700mm×D500mm×H500mm）内にMFSモニタリング材を垂直に設置し、ミニ扇風機を用いて模擬PMをフード内に飛散させてMFS表面に付着させ、MFS表面画

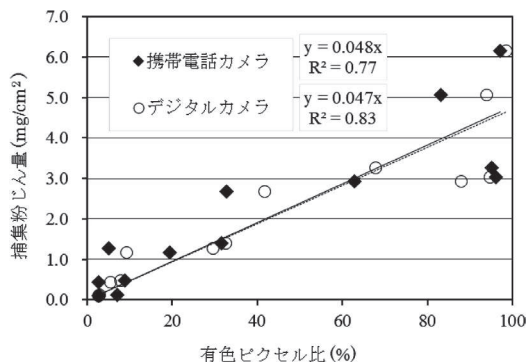


図4 撮影画素数の違いによる100%値を除外した有色ピクセル比（RGB値）と捕集粉じん量の関係

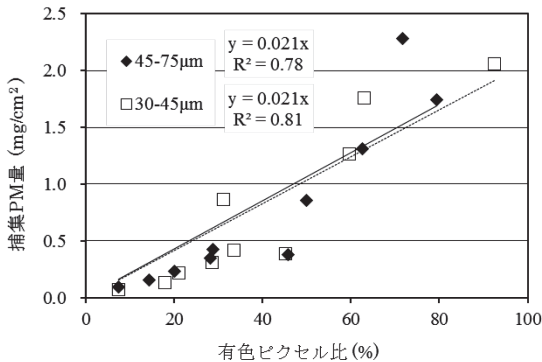


図5 粒径サイズの違いによる有色ピクセル比 (RGB値) と捕集PM量の関係

像撮影および捕集PM量の秤量を行い比較検討した。なお、画像撮影は、デジタルカメラ (1400万画素) とスマートフォン (1200万画素) で行った。

図5にスマートフォンで撮影した活性炭とプリンターでの捕集PM量と有色ピクセル比 (RGB値) の関係を示す。スマートフォンで撮影した画像の有色ピクセル比と捕集PM量は高い一次線形の関係を示し、異なるPM粒径においていずれも $y=0.021x$ と同じ一次回帰式を示した。一方で、デジタルカメラで撮影した画像の有色ピクセル比と捕集PM量についても高い一次線形の関係を示し、一次回帰式は、活性炭で $y=0.022x$ 、プリンターで $y=0.020x$ と、スマートフォンの結果と同様であった。このことから、有色ピクセル比を用いた画像解析結果は、捕集PMの粒径および撮影画素数による差はないことが明らかとなった。

### 3.3 PMの色彩の違いによる画像解析結果

PMの色彩の違いによる画像解析結果の検討は、PM粒径サイズを45~75 $\mu\text{m}$ に統一した白色、赤色、茶色、緑色のチョーク粉と黒色活性炭による5種類の模擬PMを用いて行った。実験方法は、3.2と同様の方法で行った。

図6に色彩の異なる模擬PMの有色ピクセル比 (RGB値) と捕集PM量の関係を示す。白色PMでは、多量の粒子をMFSに満遍なく散布した場合でも有色ピクセル比が10%未満で一次線形の関係が見られず、MFS表面に多量のPMが吸着しても画像解析からPM捕集量を推定することが困難な結果であった。一方、黒色PM、赤色PM、緑色PM、茶色PMでは、有色ピクセル比と捕集

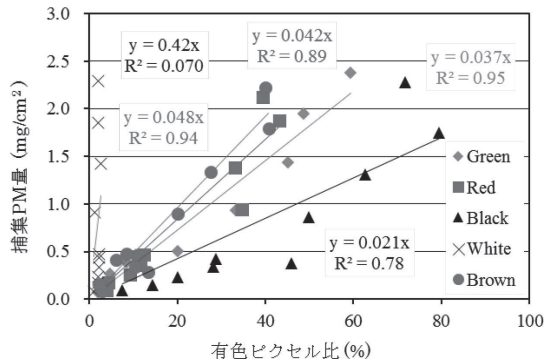


図6 PMの色彩の違いによる有色ピクセル比 (RGB値) と捕集PM量の関係

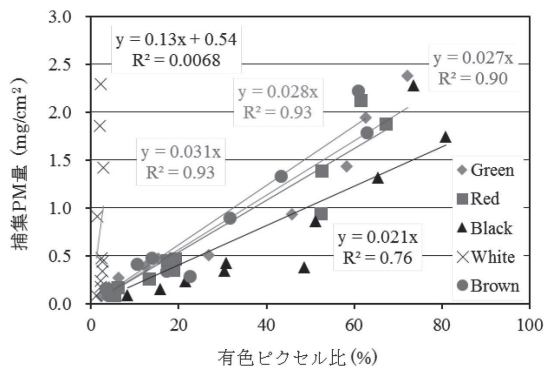


図7 PMの色彩の違いによる有色ピクセル比 (B値) と捕集PM量の関係

PM量に高い一次の相関関係が見られたため、捕集PM量の推定が可能であることが示唆された。

図7に色彩の異なる模擬PMの有色ピクセル比 (B値) と捕集PM量の関係を示す。白色PMでは、図6に示したRGB値の有色ピクセル比と同様に単色の有色ピクセル比と捕集PM量との間に一次線形の関係が見られず、B値による有色ピクセル比を用いても画像解析からPM捕集量が推定できない結果であった。一方で、黒色PM、赤色PM、緑色PM、茶色PMでは、B値による有色ピクセル比と捕集PM量に高い一次の相関関係が見られ、また、RGB値による有色ピクセル比に比べてB値による有色ピクセル比では模擬PMの色彩の違いに関わらず一次回帰式の傾きが類似となる結果が得られた。

図8に、白色を除く有色PMを一律の有色系PMと見なし、これらの有色ピクセル比と捕集PM量の関係を示す。両者の一次回帰式は $y=0.026x$ 、決定係数は $R^2=0.83$

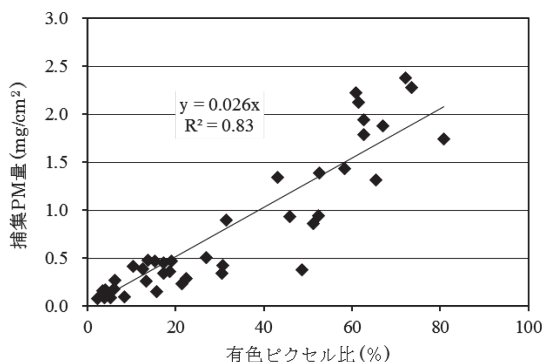


図8 色彩によらない有色ピクセル比 (B値) と捕集PM量の関係

と高い相関関係を示した。この結果から、岩種に左右されることなく様々な碎石場現場で共通の推定式を用いた画像解析によるモニタリング法の可能性が示唆された。

### 3.4 PMの階調の違いによる画像解析結果

3.3のPMの色彩の違いによる実験結果より、画像解析から白色系PM量の推定を行うのは困難である結果が得られた。碎石場現場での飛散粉じんモニタリングを想定した場合、飛散粉じんの多くが白色と黒色の中間色に岩石鉱物特有の色彩が混合された色彩であることが想定されるため、撮影画像からMFS表面に付着した粉じんが認知できる白色系粉じんのRGB値の限界を検討した。実験は、白色砥の粉(粒径: 45~75 $\mu$ m)に黒色塗料の分量を変化させた階調の異なる8種類の模擬PMを作成し、3.2と同様の方法で行った。

表1に階調の違いによる模擬PMの有色ピクセル比(RGB値)と捕集PM量の関係を示す。R値、G値、B値それぞれが160を超える白色度の高いPMの場合、有色

表1 PMの階調の違いによる有色ピクセル比 (RGB値) と捕集PM量の関係

	模擬PMの R,G,B 値	一回帰式	決定係数 (R <sup>2</sup> )
白 ↑ ↓ 黒	227, 225, 216	$y = -0.14x + 0.79$	0.37
	191, 187, 178	$y = 0.029x + 0.3$	0.17
	172, 170, 163	$y = 0.0078x + 1.3$	0.049
	166, 158, 149	$y = 0.030x$	0.77
	152, 147, 135	$y = 0.034x$	0.82
	130, 128, 118	$y = 0.036x$	0.63
	77, 75, 71	$y = 0.039x$	0.72
	53, 49, 51	$y = 0.027x$	0.70

ピクセル比と捕集PM量の間には正の線形関係が見られず、R値、G値、B値それぞれが150程度よりも小さい暗色値の場合に正の一次線形の関係が認められた。このことから、R値、G値、B値が160~150の間に白色のMFSモニタリング材と捕集PMが明確に画像認識される白色系粒子の明度限界値があり、MFSモニタリング材の画像解析を用いた捕集粉じんモニタリングが可能となる明度値の目安が示された。

### 3.5 画像解析から算出された推定PM量と実測粉じん量の検証

画像解析から算出された推定PM量が碎石場現場での簡易モニタリング結果として適用可能であるかを検証するため、碎石場現場モニタリングによる実測捕集粉じん量と推定PM量の比較により検証した。現場モニタリングは、2013年7月~2016年2月に岩手県内のA碎石場(岩種: 輝緑岩)で43回、岩手県内のB碎石場(岩種: 安山岩)で24回行った。図9に各碎石場におけるMFSモニタリング材の様子を示す。検証方法は、3.3の模擬PMを用いた色彩の違いによる検討実験から得られたRGB値、R値、G値、B値それぞれに対応する有色ピクセル比と捕集PM量との一次回帰式を用いて、碎石場現場で行ったモニタリングデータの画像解析による有色ピクセル比から推定PM量を算出し、重量測定した実測捕集粉じん量との関係を検証した。

A碎石場、B碎石場ともにRGB値の結果から算出した推定PM量と実測捕集粉じん量の間には1:1の関係は見られなかったが、R値、G値、B値それぞれの単色値から算出した推定PM量と実測捕集粉じん量の間には、それ

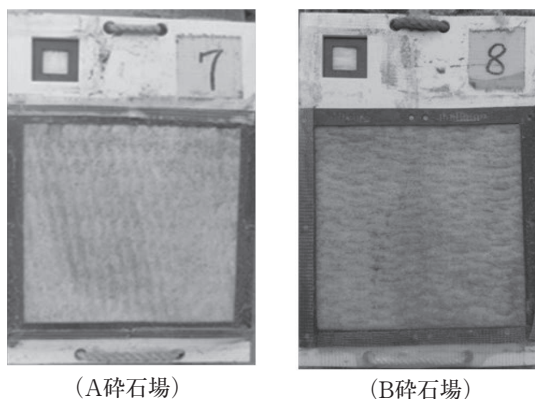


図9 各碎石場におけるMFSモニタリング材の様子

(134)

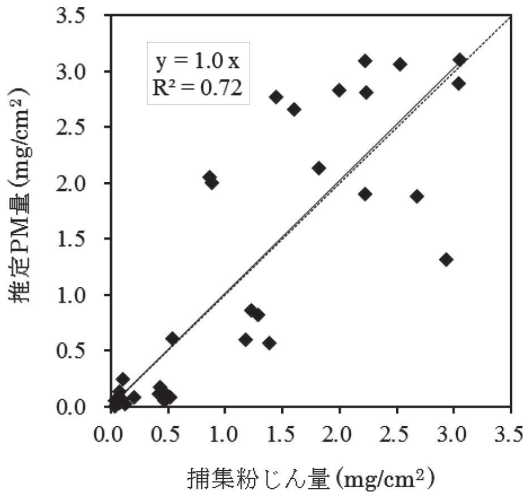


図10 A碎石場における推定PM量と実測捕集粉じん量の関係（緑色模擬PM（R値））

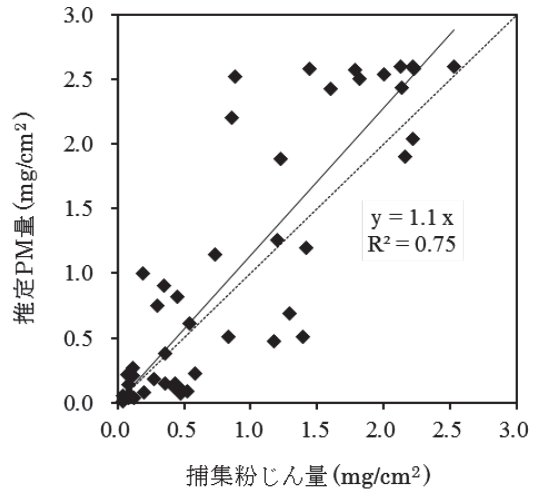


図12 推定PM量と実測捕集粉じん量の関係（B値）

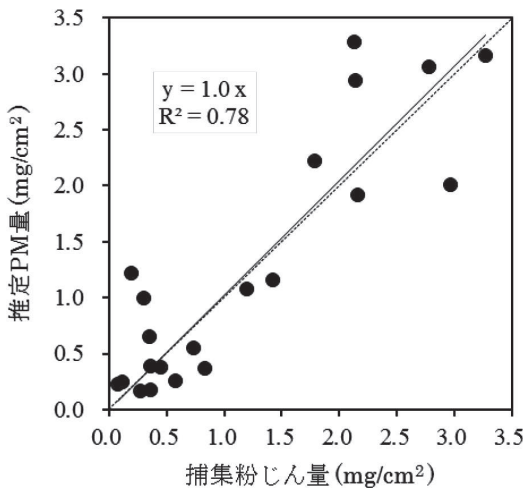


図11 B碎石場における推定PM量と実測捕集粉じん量の関係（赤色模擬PM（G値））

それぞれの碎石場において1:1の関係が見られた推定式パターンが確認された。

図10、図11にそれぞれの碎石場モニタリングデータにおいて推定PM量と実測捕集粉じん量の関係が1:1となった推定式パターンを示す。A碎石場では、緑色模擬PM（R値）の一次回帰式を用いて算出した推定式において決定係数 $R^2=0.72$ の高い相関関係を示し、B碎石場では、赤色模擬PM（G値）の一次回帰式を用いて算出した推定式で決定係数 $R^2=0.78$ の高い相関関係を示した。

本研究対象のA碎石場で捕集された粉じんは、緑色がかった薄灰色を呈しており、B碎石場で捕集された粉じんは、茶色がかった薄灰色であった。つまり、A碎石場では、飛散粉じんと類系の色相である緑色PMの補色となるR値を用いた場合が最適推定パターン、同様に、B碎石場では、飛散粉じんと類系の色相である赤色PMの補色となるG値を用いた場合が最適推定パターンとなり、飛散粉じんと類系色相の模擬PMの補色に近い単色値による一次回帰式を用いた場合に推定PM量の精度が高い結果となった。画像解析において、捕集PMを構成する色相の真逆になる色相成分値を見ることで、有色度が鮮明に抽出されたためと推察される。

図12に両碎石場モニタリングデータを図8に示したB値の一次回帰式から算出した推定PM量と実測捕集粉じん量の関係を示す。推定PM量は、実測捕集粉じん量の約1.1倍であり、決定係数 $R^2=0.75$ の高い相関関係であった。骨材利用される岩石から発生する粉じんは、一般的に中間色である灰色にわずかな赤みや黄み、緑みを帯びた色相である場合が多く、青みを帯びたものは殆どない。したがって、最適推定パターンとはいかないまでも、飛散粉じんを構成する色相成分にないB値による一次回帰式を用いることで、岩種に左右されないMFS捕集面の撮影画像から飛散粉じん量の推定が可能であることが示唆された。

#### 4. まとめ

本研究では、MFSを利用した画像解析による碎石場の飛散粉じん簡易モニタリング法について検討した。

得られた成果をまとめると、以下の通りである。

1. 有色ピクセル比による画像解析結果とMFSモニタリング材に捕集されるPM量の間には一次線形の関係が認められ、撮影画素数および捕集PM粒径サイズは画像解析結果に影響しないことが明らかとなった。
2. 模擬PMを用いたMFSモニタリング材の捕集面画像解析から、R値、G値、B値それぞれが150程度よりも小さい暗色値の場合に一次線形の関係が認められ、白色系粒子の明度限界値が示された。また、B値による有色ピクセル比を利用することで、岩種に左右されることなく様々な碎石場現場で共通の推定式を用いた画像解析によるモニタリング法の適用が示唆された。
3. 碎石場現場で行ったMFSモニタリング材の画像解析結果を用いた推定PM量の検証から、岩石から発生する粉じんと類系色相の模擬PMの補色に近い単色値による推定式を用いることで、MFS捕集面の撮影画像から飛散粉じん量の推定が可能であると考察された。

本モニタリング手法が碎石場における飛散粉じんの簡易なモニタリング法として確立するためには、様々な碎石場の飛散粉じんを用いた検証と、作業従事者の健康影響や周辺地域への環境影響を評価するモニタリング期間をどの程度に設定するかという課題が残されている。今後は、様々な碎石場で期間の異なる現場モニタリングデータを蓄積し、あらゆる碎石場に対応可能な碎石飛散粉じんモニタリングシステムの構築を図っていきたい。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費JP15K06634の助成を受けたものである。ここに記し、謝意を表す。また、モニタリング調査およびサンプル提供いただいた碎石事業者、本研究において実験および解析に協力いただいた佐々木龍之介氏（セントラルコンサルタント（株））、角美咲氏（東日本旅客鉄道（株））に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省HP：報道発表資料；平成29年度主要建設資材需要見通し、<http://www.mlit.go.jp/common/001192036.pdf>
- 2) 大塚尚寛、今井忠男、岩月栄治、村田 克、齊藤 貢：事業場の現状に関するアンケート調査による課題の抽出と今後の対応について、骨材資源、Vol.48, No.190, pp.68-84 (2016)
- 3) 齊藤貢、大塚尚寛：マイクロ繊維シートを用いた多点での簡易大気モニタリング法、大気環境学会誌、Vol.38, No.3, pp.162-171 (2003)
- 4) 松本文雄、齊藤貢、大塚尚寛：大気環境指標としてのマイクロ繊維シートモニタリング法の可能性と生活環境における大気中PAHsの環境リスク評価、日本リスク研究学会誌、Vol.2, No.3, pp.155-162 (2012)
- 5) Mitsugu Saito and Naohiro Otsuka：Visualization and evaluation of atmospheric particulate matter concentrations around the stockyards of tsunami disaster debris along the Pacific coast of the Tohoku region in Japan, Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety 2013, A1-05 (2013)