

供給される土砂の粒径と濁水の色の違いに着目した 土砂移動現象を検知する画像認識技術の検討

IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGY FOCUSED ON THE DIFFERENCE
BETWEEN PARTICLE-SIZE AND TURBID WATER COLOR
AGAINST SEDIMENT SUPPLY AND DISCHARGE
TOWARD THE REALIZATION OF THE AUTO-SENSING OF SEDIMENT MOVEMENT

五十嵐 和秀¹・水谷 佑²・松本 定一³・池島 剛²
・井深 真治⁴・田中 健貴⁵・木下 篤彦⁶

Kazuhide IGARASHI, Tasuku MIZUTANI, Sadakazu MATSUMOTO, Tsuyoshi IKESHIMA,
Shinji IBUKA, Yasutaka TANAKA, and Atsuhiko KINOSHITA

¹正会員 日本工営株式会社 国土保全事業部 砂防部 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1-14-6)

²非会員 日本工営株式会社 大阪支店 (〒530-0047 大阪府大阪市北区西天満1-2-5)

³非会員 日本工営株式会社 名古屋支店 (〒461-0005 愛知県名古屋市東区東桜2-17-14)

⁴非会員 博士 (工学) 株式会社ブレインズ (〒158-0094 東京都世田谷区玉川2-27-8)

⁵正会員 国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-5302 奈良県五條市三在町1681)

⁶正会員 博士 (農学) 国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室
(〒158-0094 茨城県つくば市旭1番地)

In this report, we introduce a new method for automatically detecting flow-regime changes using unit vectors and the normal unit vector of RGB values from camera imagery. Although the method is still under development, it is expected to lead to further enhancement of the monitoring system for sediment disasters. From the results of a casestudy at the Uchinokawa river in Nachikatsuura, Japan, it is suggested that the RGB unit vectors may have eigenvalues according to different types of water color: e. g., clear water, turbid water, and debris flow color. It is also suggested that the RGB unit vectors can draw a curve among the unit vectors of pre and post-turbidity colors. Furthermore, even if the amount of solar radiation changes, the RGB unit vectors can indicate almost stable values.

Key Words : Image analysis technology, auto-sensing, stream-monitoring

1. はじめに

全国で毎年のように発生する土砂災害に対し、監視カメラの映像を自動解析し低コストで有効活用できれば、現場の監視体制の向上が期待される。山地河川では、水・土砂は掃流・土石流など多様な流下形態を呈し、夜間や悪天候時には映像の視認性低下が伴うなどの理由により、土砂移動を確実に検知する画像解析技術は現在まだ十分に確立されておらず、研究開発途上の段階である。一方で、掃流砂量計や濁度計を用いて、流域下流へ到達する細粒成分を多く含む土砂の変化量から、流域の崩壊・土石流発生を監視する手法が報告されている¹⁾。

本研究では、濁水の色の変化に着目して、流域上流に

おける土砂移動の発生を、カメラ画像から自動で把握する手法を検討した。那智川水系内の川(流砂量観測溪流)において、細粒成分を多く含む斜面土砂と、斜面土砂より比較的粗粒な溪床堆積物から採取した2種類の土砂を実際の供給土砂と想定して、人工的に濁水を発生させる溪流実験を実施した。溪流実験では、朝～夕の時間帯で日照条件を変えながら、2種類の土砂による濁水の流下状況をCCTVカメラで録画した。濁水の流下状況を撮影した動画から、オープンソース画像解析ライブラリ(OpenCV)を用いて、水面の画素のRGB値を抽出した。濁水発生前後の色情報の変化を、RGB値を用いて定量的に評価した。そして、斜面由来を想定した土砂を供給した場合と、溪床堆積物を供給した場合とで、それぞれの



図-1 検討対象箇所概要



図-2 CCTVカメラとLED照明

濁水のRGB値がどの程度違いがあるか比較検討した。続いて、実際の出水時におけるCCTV映像データを収集し、出水時における濁水のRGB値と、溪流実験における濁水のRGB値を比較検討した。また、RGB値を単位ベクトル化し、RGB輝度の合成ベクトルの大きさではなく方向を導くことで、日射量（光の強度）の影響軽減への有効性が報告されている²⁾³⁾。本研究においても、RGB値の単位ベクトルも用いて検討を実施した。

2. 溪流実験の概要

(1) 検討対象箇所

検討対象箇所は、那智川水系内の川（流域面積0.31 km²）とした。内の川は、2011年紀伊半島大水害で表層崩壊及び土石流により甚大な被害が発生した土石流危険渓流である。現在は、CCTVカメラ（イメージセンサ：1/2インチ 3板CCD、解像度：約38万px、最低被写体照度：0.001lux、オートホワイトバランス、オートアイリス）による溪流監視に加え、掃流砂量計・濁度計・水位計・流速計・雨量計などの観測機器が整備され、流砂量の観測も実施されている（図-1）。内の川のCCTVカメラは、1号砂防堰堤の左岸袖上に設置されており（図-2）、主に2号砂防堰堤の全景を下流側から撮影するようセットされている（図-3）。また、夜間監視中は、カメラ近傍に設置された照明（白色LED、250W×1灯）が点灯するようになっている。

(2) 実験概要

斜面由来を想定した土砂を供給した場合と、溪床堆積物を供給した場合で、それぞれの濁水のRGB値にどの程度違いがあるか比較検討するため、CCTV画角内で人工的に濁水が発生させる溪流実験を実施した（図4、図5）。



図-3 CCTVカメラの映像



図-4 斜面土砂を用いた溪流実験の状況



図-5 溪床土砂を用いた溪流実験の状況

撮影実験は2018年10月4日17時～18時、10月5日10時～12時に実施した。溪流実験は、1回の実験につき土砂を詰めた土嚢を3袋準備し、溪流の流水に混ぜて流下させ、斜面土砂・溪床土砂をそれぞれ2回づつの計4回実施した。溪流実験中のCCTVカメラの映像は、後日収集し、後述に示す解析に供した。

(2) 色情報による濁水の評価手法

図-6に画素情報抽出のイメージ図を示す。前庭保護工水通しの濁水映像の $(x_j - x_i) \times (y_l - y_k)$ の画素数からなる解析対象領域において、各画素のRGB値をオープンソース画像解析ライブラリ（OpenCV）で抽出し、式（1）～（4）に示す通り全画素で平均した。続いて、式（5）～（7）に示す通り、RGB値を単位ベクトル化した。各フレームの解析対象領域における色情報から、濁水発生時の特徴を整理した。

画像分野では、国際電気通信連合ITU-R BT.709-5⁴⁾に

より定められた係数を用いて、式 (8) に示すRGB値と輝度値Lの変換式が用いられている。これは人間の目の特性のB ($\lambda=435.8\text{nm}$) には反応しづらく、G ($\lambda=546.1\text{nm}$) には反応しやすいという性質に基づいており、これによって輝度値を調整して、映像を見やすくしている^{5),6)}。

(2) 画素情報と単位ベクトル

図-7に示すように、RGBをそれぞれ直交する一次独立のベクトルとすると、RGB空間は3次元ベクトル空間として表現できる。濁水には特有の反射光の波長帯 (色) があると考えられる。すなわち、光源条件、濁度や地質による違いはあるが、濁水には特有のRGB単位ベクトルが存在すると考えられる。この仮説に基づく、濁水発生前と濁水発生後の単位ベクトルの変化は図-4に示すようになり、濁度が変化に応じて単位ベクトルが連続的に変化することになる。本研究では、溪流実験による濁水と、実際の崩壊発生時に記録された濁水の映像を用いて、濁度の変化と濁水映像のRGB単位ベクトルの変化の関係について検討した。

$$\bar{R} = \frac{1}{(x_j - x_i) \cdot (y_l - y_k)} \sum_{x=x_i, y=y_k}^{x=x_j, y=y_l} R(x, y) \quad (1)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{(x_j - x_i) \cdot (y_l - y_k)} \sum_{x=x_i, y=y_k}^{x=x_j, y=y_l} G(x, y) \quad (2)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{(x_j - x_i) \cdot (y_l - y_k)} \sum_{x=x_i, y=y_k}^{x=x_j, y=y_l} B(x, y) \quad (3)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{(x_j - x_i) \cdot (y_l - y_k)} \sum_{x=x_i, y=y_k}^{x=x_j, y=y_l} L(x, y) \quad (4)$$

$$r = \bar{R} / \sqrt{(\bar{R}^2 + \bar{G}^2 + \bar{B}^2)} \quad (5)$$

$$g = \bar{G} / \sqrt{(\bar{R}^2 + \bar{G}^2 + \bar{B}^2)} \quad (6)$$

$$b = \bar{B} / \sqrt{(\bar{R}^2 + \bar{G}^2 + \bar{B}^2)} \quad (7)$$

$$L \equiv 0.298912 \times R + 0.586611 \times G + 0.114478 \times B \quad (8)$$

ここで、 x_i : x軸の*i*列目画素、 x_j : x軸の*j*列目画素、 y_k : y軸の*k*行目画素、 y_l : y軸の*l*行目画素、 \bar{R} : 解析対象領域のRの平均値、 \bar{G} : 解析対象領域のGの平均値、 \bar{B} : 解析対象領域のBの平均値、 \bar{L} : 解析対象領域のLの平均値、 r : RGB単位ベクトルのR成分、 g : RGB単位ベクトルのG成分、 b : RGB単位ベクトルのB成分である。

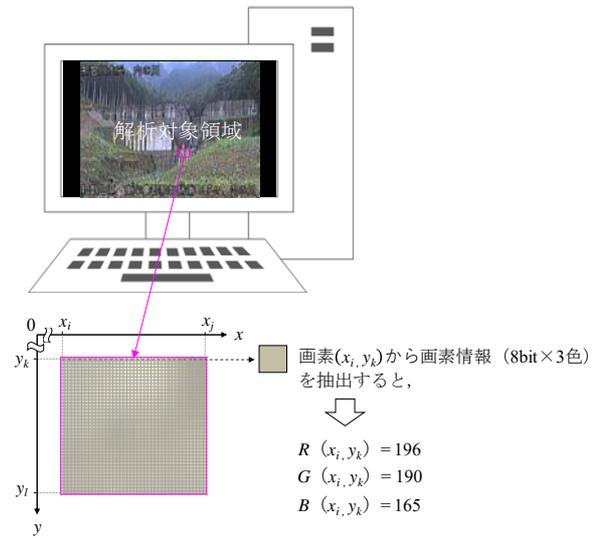


図-6 画素情報抽出イメージ

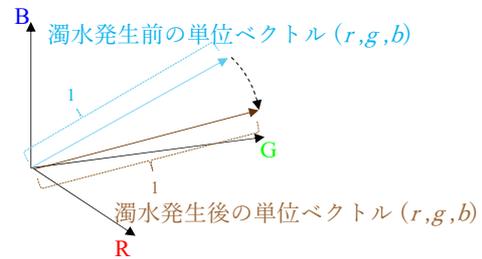


図-7 RGB単位ベクトルのイメージ

3. 結果

内の川における溪流実験時のCCTV映像を収集し、動画解析を実施した。砂防堰堤の前庭保護工の水通し前面に解析対象領域を指定し、解析対象領域内の画素ごとの輝度値とRGB値をそれぞれ8bit/チャンネルで抽出した。

それら各画素のRGB値と輝度値を式 (1) ~ (4) の通り平均し、フレーム毎に時系列で整理した。RGB単位ベクトルについても、式 (5) ~ (7) の通り同様にフレーム毎に時系列で整理した。

(1) 斜面土砂による濁水の解析結果

図-8と図-9に、収集した溪流実験中のCCTVカメラの記録映像を、図-10に斜面土砂を用いた溪流実験時の像から抽出した輝度値・RGB値および単位ベクトルのRGB成分の時系列変化を示す。溪流実験開始前の、16:49:00の動画開始から16:50:00頃までは、画像上に特に変化はなく、解析対象領域ではRGB値及び単位ベクトルは概ね一定値を示している。16:50:10頃に濁水が発生・流下すると、RGB値が(135,140,168)から(160,147,138)に変化した。そのうち、R値が135から160と最も大きな増加率119%を示した。16:50:15頃は、土砂供給の合間の土嚢袋交換時で、斜面土砂内の細粒成分が流れきり、比較的粗粒の残土が流下している状態である。16:50:25頃に再び斜面土砂が供給されると、RGB



図-8 斜面土砂を用いた溪流実験時の映像



図-11 溪床土砂を用いた溪流実験時の映像

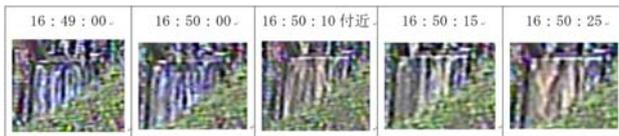


図-9 斜面土砂を用いた溪流実験時の映像キャプチャ

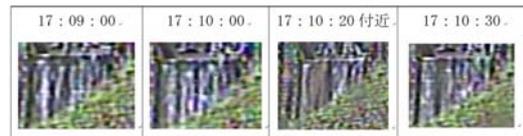


図-12 溪床土砂を用いた溪流実験時の映像キャプチャ

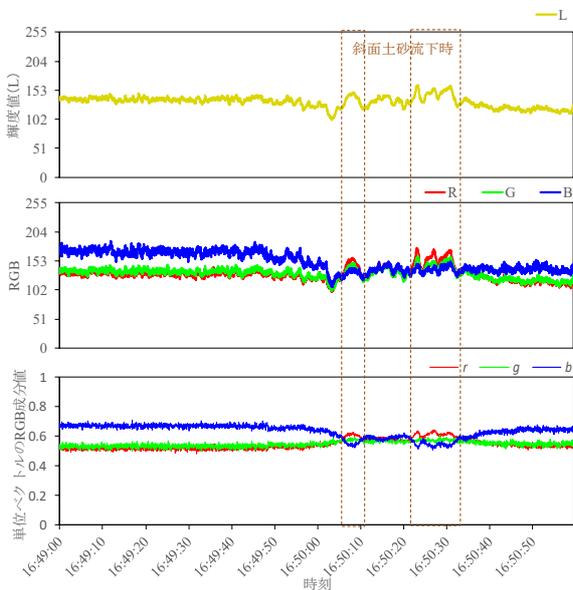


図-10 斜面土砂による濁水解析結果：輝度値（上）・RGB値（中）・単位ベクトルのRGB成分値（下）

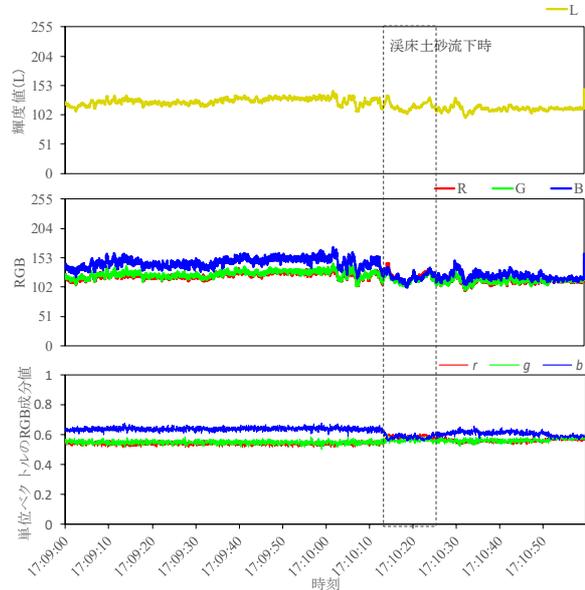


図-13 溪床土砂による濁水解析結果：輝度値（上）・RGB値（中）・単位ベクトルのRGB成分値（下）

値が (170,159,151) となり、R値が相対的に高い値を示した。

RGB単位ベクトルの成分をみると、日照条件による増減は軽減され、 rgb 値はそれぞれ0.4～0.8の範囲内に収まった。輝度値とRGB値は日照条件によって増減し、それだけでは濁水発生を判断することが難しいが、単位ベクトル化することにより、 rgb 値が濁水到達によって明確に変化することが確認できた。また、濁水発生時に $(r,g,b) = (0.613,0.573,0.544)$ となり、 r 値が相対的に高く次いで g 値が高い値を示した。

(2) 溪床土砂による濁水の解析結果

図-11と図-12に、収集した溪流実験中のCCTVカメラの記録映像を、図-13に溪床土砂を用いた溪流実験時の

画像から抽出した輝度値・RGB値および単位ベクトルのRGB成分の時系列変化を示す。溪流実験開始前の、17:09:00の動画開始から17:10:10頃までは、画像上に特に変化はなく、解析対象領域ではRGB値及び単位ベクトルは概ね一定値を示している。17:10:15頃に濁水が発生・流下すると、RGB値が (115,116,132) から (118,115,120) に変化した。RGB値がそれぞれ同程度の値を示し、グレースケールの特徴を呈した。溪流実験終了後の17:10:25頃以降は、RGB値はそれぞれ元の数値に戻った。

RGB単位ベクトルの成分をみると、 rgb 値はそれぞれ0.4～0.8の範囲内に収まった。濁水発生時に $(r,g,b) = (0.579,0.564,0.589)$ となり、 rgb 値は概ね同程度の値を示した。単位ベクトル化することにより、溪床土砂でも



図-14 2017年10月22日台風21号時の映像

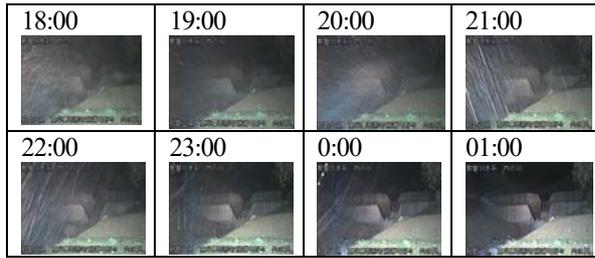


図-15 台風21号映像内の鮮明フレームのキャプチャ

rgb値が濁水到達によって明確に変化することが確認できた。

(3) 2017年10月22日台風21号時の解析結果

2017年10月22日には台風21号豪雨により、内の川上流域の斜面が拡大崩壊している。図-14に、収集した溪流実験中のCCTVカメラの記録映像フレームの1枚を示す。ほとんどのフレームが図-14に示すように、降雨線と照明反射の影響によって、溪流の状況を確認できない映像である。収集したCCTV映像には約108,000枚/1時間のフレームが含まれており、全フレームを確認すると、1万枚に数枚程度の確率（およそ10分間に数枚程度の確率）で、図-15に示すような鮮明な映像が含まれていることがわかった。なお、00:00頃以降は、台風21号による豪雨は治まり、動画のほぼすべてのフレームが内の川2号堰堤を鮮明な状態で映していた。

図-16に雨量、図-17に内の川の流砂量観測施設の水位と濁度の観測値を示す。22日夜の18時30頃～23時頃において、水位が最大60cm、濁度が最大6,000mg/lまで上昇していた。

図-18に鮮明なフレームのみを、図-19には00:00:00～00:10:00の全フレームの画像から抽出した輝度値・RGB値および単位ベクトルのRGB成分の時系列変化を示す（画像鮮明化処理未実施）。

RGB単位ベクトルの成分をみると、18:30頃～23:00頃にかけて、 r_g 値が相対的に大きく、 b 値が小さな値を示した。00:00以降、浮遊砂量は100mg/l未満に低下し、 $b > g \approx r$ となり、溪流実験開始前の土砂供給が無い時の rgb 値と同様の傾向を示した（図-10、図-13、図-19）。

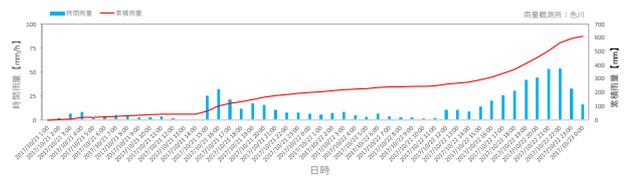


図-16 2017年10月22日台風21号時の雨量

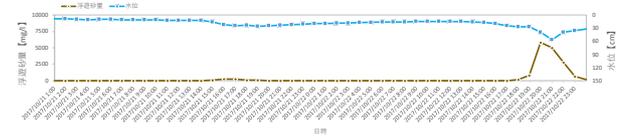


図-17 2017年10月22日台風21号時の水位と濁度

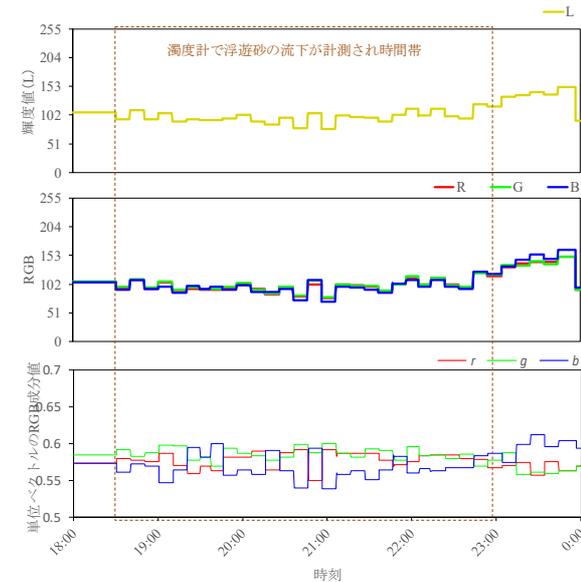


図-18 2017年10月22日台風21号時（18時～24時）の解析結果：輝度値（上）・RGB値（中）・単位ベクトルのRGB成分値（下）

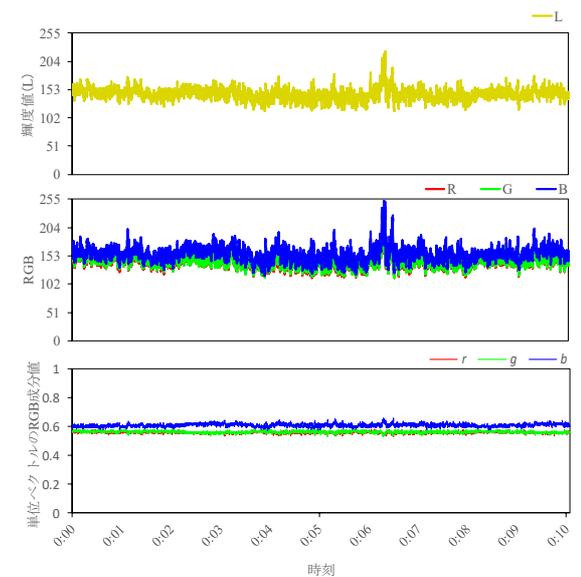


図-19 2017年10月22日台風21号時（0:00～0:10）の解析結果：輝度値（上）・RGB値（中）・単位ベクトルのRGB成分値（下）

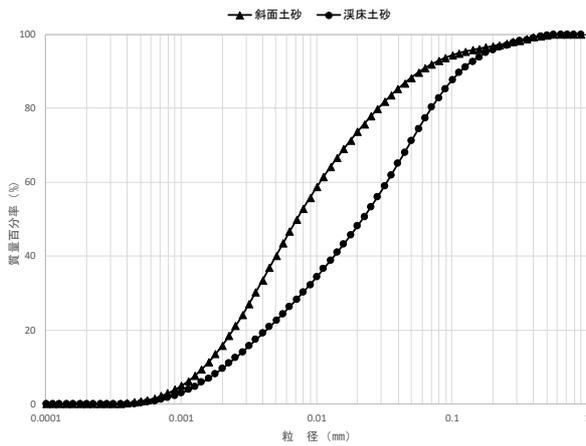


図-20 斜面土砂と溪床土砂による濁水の粒度分布

(4) 粒径分布の分析結果

図-20に、2018年10月4日に実施した溪流実験における粒度分析の結果を示す。斜面土砂の方が、溪床土砂よりも細粒成分を多く含む結果であった。掃流砂量計や濁度計を用いて、流域下流へ到達する細粒成分を多く含む土砂の変化量から、流域の崩壊・土石流発生を監視する手法の既往研究成果を支持する結果を得た。また、溪流実験結果から、斜面から細粒成分を多く含む土砂が供給されると、濁水面の画像は $R > G > B$ ($r > g > b$) となり、比較的粗粒な溪床土砂の二次移動であれば、濁水面の画像は $R \approx G \approx B$ ($r \approx g \approx b$) となることがわかった。

4. 考察

斜面土砂を用いた溪流実験の結果は、源頭部斜面の崩壊地を土砂生産源とする土石流を解析した事例²⁾と同様に、濁水の画像は $R > G > B$ となった。本研究結果から、内の川においても日光稲荷川や北海道黒岳沢川における土石流の事例^{2,3)}と同様に、濁水の検知に R 値が指標として有意であるという結果が得られた。さらに、 RGB を単位ベクトル化して得られた結果から、日照条件が異なる状況下でも流況変化検知精度を確保できる可能性が示された。

研究の解析では、解析対象領域を任意設定したが、水位変化を捉える目的や、流路変動が誤検知に与える影響を除外するには、砂防構造物水通しなどの溪床が安定し、横断面が平滑な場所を画角設定することが望ましいと考える。

また、白波の映り込みは、時系列で単位ベクトルに微動が認められたため、今回の解析結果にも少なからず影響を与えた可能性があり、 RGB 単位ベクトルの精度確保には白波の影響除去が必要となる。白波の影響を除去する方法は、画角内の白波が優占しない領域を解析対象領域に指定することや、輝度値が一定値以上高い画素を除去処理することが考えられる。

5. まとめ

斜面由来を想定した土砂を供給した場合と、溪床堆積物を供給した場合とで、色情報に明確な違いがあることを確認した。細粒成分を多く含む斜面土砂による濁水は、撮影時間帯により明るさの増減は多少あるものの、画像の目視観察で水面は茶系の色を呈し、解析による RGB 値は全て $R > G > B$ となった。一方、溪床堆積物による濁水は、目視観察で水面は灰色を呈し、 RGB 値は全て $R \approx G \approx B$ であった。実際に流域上流で斜面崩壊が発生した時のCCTV映像データの解析結果も、 RGB 値が $R > G > B$ となることが確認された。本研究により、画像から流域上流での斜面崩壊発生を把握する手法として、濁水の色情報が有効であることが示された。今回、2017年台風21号時における流出土砂の粒度分布は得られなかったが、実際の出水時に採取された流出土砂の粒度分布を分析するなどして、本研究結果を検証していくことが必要である。

今後は、考察で挙げた課題検証に加え、本手法を画像鮮明化処理後の映像へ適用、画像解析技術のリアルタイムでの運用、閾値の設定、検知精度の検証、カメラの機器による違いの検証を行っていく。将来的には、精度を高めて流況変化（水位・濁度の変化）の定量化と、カメラを用いた水位観測・濁度観測といった非接触型観測機器の開発を目指す。

参考文献

- 1) 筒井和男, 坂口武弘, 西岡恒志, 福田和寿, 山田慎吾, 島田徹, 渡辺隆吉, 田中健貴, 木下篤彦: 濁度成分の量と粒径に着目した流域内の崩壊監視手法に関する研究, 平成29年度砂防学会研究発表会概要集, pp.96-97, 2018.
- 2) 五十嵐和秀, 水谷佑, 高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明: 山地河川の濁りによる RGB 値に着目した土石流発生検知手法開発に向けた試み, 土木技術資料, Vol.59, No.6, 2017.
- 3) 五十嵐和秀, 水谷佑, 木下篤彦, 井深真治, 肥後明豪, 池島剛, 秋田寛己, 水野秀明: 画像の RGB 空間における濁水の立体分布と3次元ベクトル空間モデルを用いた流況変化検知手法の基礎的検討, 砂防学会誌, Vol.71, No.6, pp.28-34, 2019.
- 4) 国際電気通信連合: ITU-R BT.709-5, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-5-200204-S!!PDF-E.pdf, 2002. 参照 2019-1-25
- 5) 飯塚昌之・中嶋芳雄: 光の三原色: RGB を基準にした実用的なカラー変換式, 照明学会誌, Vol.84, No.6, pp.372-379, 2000.
- 6) アンシュダウン マーク・佐藤いまり・岡部孝弘・佐藤洋一: 人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-D, No.8, pp.2115-2125, 2007

(2019. 4. 2受付)