



Title	画像解析を用いた濁水監視による土石流検知手法に関する研究
Author(s)	五十嵐, 和秀
Citation	北海道大学. 博士(農学) 甲第15564号
Issue Date	2023-06-30
DOI	10.14943/doctoral.k15564
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/90220
Type	theses (doctoral)
File Information	IGARASHI_Kazuhide.pdf



[Instructions for use](#)

画像解析を用いた濁水監視による
土石流検知手法に関する研究

北海道大学 大学院農学院

環境資源学専攻 博士後期課程

五十嵐 和秀

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 土石流監視における現状と課題	1
1.2 目的	6
第 2 章 研究方法	11
2.1 研究の全体構成	11
2.2 研究対象地と現地観測・画像収集手法	14
2.3 画像解析手法の考察	29
第 3 章 画像の色情報と濁度の相関関係	39
3.1 濁水映像の特徴	39
3.2 CCTV 画角内の水位・濁度データの解析	42
3.3 濁り評価結果、画像と濁度との相関関係の検討	50
第 4 章 濁度と画像解析による土石流検知手法	75
4.1 土石流映像の特徴	75
4.2 稲荷川における土石流の評価結果、通常の濁りとの違い	77
4.3 黒岳沢川における土石流検知事例	84
4.4 土石流発生時の閾値設定	96
4.5 土石流の早期検知の可能性	99
4.6 土石流検知手法の提案	100
4.7 本研究成果の利用と課題	103
第 5 章 結論	106
摘要	108
謝辞	112
引用文献	113

第1章 序論

1.1. 土石流監視における現状と課題

1.1.1. 近年の土砂災害と溪流監視

近年の土砂災害発生件数は、2012年から2021年で平均1,450件/年の頻度で発生しており、増加傾向で推移してきている(国土交通省, 2022a)。これら多発する土砂災害や、複数溪流・広域に及ぶ土砂災害に対して、人的被害軽減及び住民避難情報への活用のため、効率的かつ高精度に溪流を監視する技術が求められている。

2005年以降、土石流等の土砂災害の発生予測には、土砂災害発生危険基準線(CL)に基づく土砂災害警戒情報と土砂災害に関するメッシュ情報が運用され、住民の警戒避難情報の判断材料とされてきている。降雨実績データの蓄積や予測精度向上により、土砂災害発生の見逃し・空振りが年々減少してきているものの、現在、土石流やがけ崩れが発生した際に土砂災害警戒情報が発令されていた割合(捕捉率)は96%と見逃しは少ないが、土砂災害警戒情報が発令されていた際に災害が発生した割合(的中率)は4.7%と空振りが多(国土交通省, 2021a)。実効雨量や土壌雨量指数を一律にした雨量指標では、崩壊発生の見逃し・空振りの軽減には限界があり、雨量と崩壊地の地下水位との関係性の解明が重要とされ(小杉ら, 2018)、崩壊や土石流の発生検知の確実性には溪流毎のリアルタイムな現地情報が必要不可欠である。

一方、河川の洪水氾濫においては、「避難勧告等に関するガイドライン」において、水位が急激に上昇する中小河川における避難指示等の判断には、「洪水警報の危険度分布(流域雨量指数の予測値)」等の水位上昇を予め判断できる「予測情報」と、水位計や監視カメラから得られる「現地情報」を組み合わせ活用するという新たな考え方が示され(内閣府, 2019a; 2019b)、避難指示等の精度向上に取り組まれている。

土石流等の土砂災害に対する避難指示等の判断材料は、現行では雨量情報等に基づく予測情報としての土砂災害警戒情報と土砂災害に関する

メッシュ情報であるが、本情報の的中率が 4.7%と低く空振りが多い現状において、土石流等の発生を確実に把握するためには、雨量情報だけではなく監視対象となる溪流の現地情報も重要である。土石災害に関する避難指示等の判断材料は、現行では土石災害警戒情報と土石災害に関するメッシュ情報のみであるが、上流での土石移動現象の発生情報や前兆現象などを把握するセンサー等による現地情報が加味されることにより、土石流等の土石災害に対する避難指示などに係る見逃しや空振りを補完した溪流監視体制強化が期待される。

1.1.2. これまでの土石流検知手法

土石移動現象を監視・観測するため、これまで様々なタイプのセンサーが開発されてきたが、例えば土石流を検知する機器として現在一般に普及しているのはワイヤーセンサーであり（山田ら，1998；国土交通省，2021b），地方自治体の地域防災計画にもワイヤーセンサーの配置計画が定められている（国土交通省，2022b）。ワイヤーセンサーは検知率の高さやコスト面で優れるが、断線後は再設置するまで繰り返し検知が不可能であり、土石流ピーク到達前の水位で切断されてしまうとピーク時の時間的・量的な評価が困難であるという欠点がある。表 1.1に、これまでに山地河川の土石流の検知や観測を行うために、開発・導入されてきたセンサーを整理した。土石流が発生するような山地河川では、接触型のセンサーは損傷のリスクが大きなデメリットとなり、非接触型のセンサーの方が有利である。近年では維持管理のし易さや効率化の観点からも、特に非接触型で繰り返し検知が可能なセンサーの開発が進められてきている（例えば，小川ら，2009）。

全国の溪流などには CCTV カメラが多数整備され、オンライン化による公開も進められ溪流監視の基盤が整えられてきている。現状、これら画像データは概ね目視利用に留まっており、土石流が発生した際には、後から映像を観て溪流の状況を確認する事例が多い。また、ワイヤーセンサーが動物にかじられて切られるなど（国土交通省，2014），土石流

検知センサーは作動時に誤検知かどうかの判別を要し，結局目視での確認が必要であったりする。溪流監視の多重化を図る目的で，監視カメラが併設されるケースも多い（Marcel *et al.*,2019）。

これら既存の CCTV や豊富な画像データをリソースとして，画像データの高度利用ができれば，土石流等の土砂移動現象に対して一層の監視体制強化が期待される。

表 1.1 既往の土石流検知センサーと観測機器等

機器名	概要	メリット	デメリット	引用文献	
ワイヤーセンサー	河道の横断面に設置されたワイヤーが切断されることで、土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> ・検知の確実性 ・低コスト ・設置が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・繰り返し検知不可 ・積雪、動物等による切断による誤検知 	国土交通省, 2014 山田ら, 2018 国土交通省, 2021	
ハネルセンサー	河道に吊るされた振り子型の棒が跳ね上げられることで、土石流の流下を検知する。水位・流速も把握する。	<ul style="list-style-type: none"> ・土石流検知に加え、水位と流速の計測が可能 ・連続検知が可能 ・維持管理が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・土石流の衝撃による機器損傷 ・大きい礫の衝突で水位や流速の計測値が大きな値を示す場合がある ・水位と流速の定量化にキャリブレーションが必要 	三輪, 2000 下田ら, 2002	
振動センサー	地盤を伝搬する土石流の振動を、振動計で捉えて土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触式による機器故障リスク低減 ・高い検知率 ・AIとの組み合わせにより検知率向上の報告がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・高価 ・土石流規模の推定が困難 	桜井ら, 2019	
超音波式水位・流速計	超音波が水面に反射して戻ってくる時間から距離を計測し水位に換算する。流速はドップラー式（機器をアーム設置の場合）で計測する。	<ul style="list-style-type: none"> ・水位や流速の定量評価が可能 ・流量を定量的に把握可能 ・非接触式による故障リスク低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動が計測値に影響する ・橋梁やアームへの取り付け設置が必要になり、計測ポイントが固定される ・偏流する流れに対し、観測点が外れる可能性がある ・流路が変化した場合は移設が必要になり、移設に労力がかかる 	小川ら, 2009 梅田ら, 2016	
光センサー	赤外線を河道の横断方向に放射し、土石流で光が遮られることによって土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触式による機器故障リスク低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・豪雨や霧、降灰等での誤検知が多い 	山田ら, 2018	
音響センサー	土石流流下時の音を、マイクروفフォンで捉えて土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触式による機器故障リスク低減 ・振動センサーと同様に、実測データを解析することで土石流の検知精度を高められる可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・土石流検知のトリガーレベルの設定が困難 	山田ら, 2018	
荷重センサー	荷重計を河床に設置し、土石流が流下した際の荷重を計測する。	<ul style="list-style-type: none"> ・土石流の荷重を定量評価が可能 ・別途計測される流量データと組み合わせることで、土砂量及び土砂濃度推定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・土砂が堆積すると、高い値を検出し続ける ・出水の規模を評価するには、別途水位データが必要 	大坂ら, 2013	
ニオイセンサー	土石流の前兆現象としてのニオイから、土石流発生を予知する。	<ul style="list-style-type: none"> ・前兆現象（ニオイ）から土石流発生を予知するための手法 ・非接触式による機器故障リスク低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・検知の不確実性 	土肥ら, 2019	
水位計	護岸や河床に設置されたセンサーで、水位を計測する。河川の洪水氾濫では、水位は避難情報の閾値に利用されている。	<ul style="list-style-type: none"> ・水位の定量評価、データ蓄積が可能 ・流量を定量的に把握可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・接触型機器の場合、故障リスクが高く、土石流検知用には不向き 	梅田ら, 2016	
濁度計	護岸に設置されたセンサーで、濁度を計測する。一般に近赤外線光が利用され、キャリブレーション試験により計測値を土砂濃度に換算する。	<ul style="list-style-type: none"> ・土砂濃度の定量評価が可能 ・別途計測される流量データと組み合わせることで、土砂量推定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・接触型の機器のため、機器が故障しやすい ・ゴミつまり、土砂堆積による高い値が検出され、異常値が多い ・高濁度帯のデータで頭打ちする事例がある 	水垣ら, 2020 川瀬ら, 2022	
画像解析	動体検知・流速	<ul style="list-style-type: none"> ・画像から、PIV(PTV)、Optical Flow、LSPIV・STIV等の手法により、動体検知や流速計測をする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既設のカメラを使用可能 ・動体検知により、土石流流下の検知が可能 ・流速の定量評価が可能 ・アルゴリズム改良やAIにより精度向上が進められている ・検出結果に対し、画像から目視による確認が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・低品質画像での精度低下 ・夜間降雨時の視認性の低い画像での精度低下 ・山地河川の射流への適用性が乏しい 	石井ら, 2011 井深ら, 2016 Fujita I, 2017 八木ら, 2019 藤田ら, 2020 いであ株式会社, 2021
	水位	<ul style="list-style-type: none"> ・水位標の画像から、WDIC等の手法により、水位を計測する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既設のカメラを使用可能 ・水位変化を捉えることが可能 ・水位の定量評価が可能 ・検出結果に対し、画像から目視による確認が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・低品質画像での精度低下 ・夜間降雨時の視認性の低い画像での精度低下 ・水位計（接触型・非接触型）が正常に稼動していれば、画像による水位計測の必要性は低い 	福田ら, 2016 松本ら, 2017 井深ら, 2018
	濁り	<ul style="list-style-type: none"> ・水面画像の色情報を用いて、濁水の色の变化から濁度変化を把握する。土砂流出や土石流流下を検知する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既設のカメラを使用可能 ・非接触により、故障リスクの低い濁度変化の把握 ・濁度計のデメリットをカバーすることで、濁度計の補完的利用が期待される ・溪流の濁度変化を捉えることで、水位・流速といった水理量情報に土砂濃度の情報を付与することで、多面的な土石流検知が期待される ・検出結果に対し、画像から目視による確認が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・低品質画像での精度低下 ・光源の色温度等の条件に影響を受ける ・夜間時の低照度画像では精度が低下 ・濁度計ほどの定量的な濁度評価は困難 ・地質の違いや撮影条件により、画像の色情報に違いが生じるため、現場ごとに詳細な確認を要する 	五十嵐ら, 2017・2019a・2019b

1.1.3. 土石流における濁水監視の意義

土砂供給源の下流で観測される濁度は、上流における崩壊等の土砂供給過程や移動過程を的確に表現し、土砂動態の指標として有効とされている（藤田ら，2003）。国土交通省の全国砂防事務所では、現在、砂防計画基準点及びその上流区間において流砂量観測が行われ、継続的な流砂観測データが得られ、将来的にこれら流砂観測データを活用した流域監視の検討が進められている。例えば、信濃川水系魚野川支川芋川では、地震や降雨起因の土砂移動現象に対して、経年的な流砂の変化が整理されてきており、下流河川と同様に山地河川でも、濁度は流量の二乗に比例する結果が報告されている（公益社団法人土木学会，2018；赤沼ら，2020）。流量規模が大きくなると濁度も比例して大きくなる場合、水位監視に加え濁度監視も重要な監視項目になり、土石流や土砂災害を引き起こすような土砂流出の土砂の量的な監視観測にも濁度の把握は重要である。山地河川においても濁度が流量の二乗に比例すると仮定した場合、平水時、中小出水時の濁り、土石流発生時の濁りにおいて、流量増加に伴って濁度も比例増加することが想定されるが、土石流流下に伴う一連の濁度変化は観測データに乏しく未だ不明な点が多い。流域下流の濁度観測により、観測点上流の土石流発生の有無や発生タイミングを概ね把握は可能であるが（田中ら，2015），土石流の発生箇所把握およびその早期検知のためには、上流域の土石流発生・流下区間を観測点にして濁水を監視する必要がある。

従来の接触型の濁度計による流砂量観測では、大規模出水時や経年的な外力作用等による機器の故障の他、ゴミ付着による高濁度値の誤検知、太陽光の入射により観測値がスパイク状に突出するノイズが発生するなどの課題があり、濁度が十分に観測できていない事例が多い（五十嵐ら，2021）。土石流のような巨礫を含む流れに対しては、接触型の濁度計は、観測が必要な時に機器が損傷してしまうリスクが高いため検知センサーとして非常に不利である。

そのため、非接触型によるカメラ画像から画像解析により濁度が把握できると、従来の接触型の濁度計との重畳化が図れてデータの品質確保となる他、土石流や土砂災害を引き起こすような土砂流出の土砂の量的な監視観測においても、非接触型の有効な手法の一つと期待される。

1.2. 目的

1.2.1. 画像解析による土石流検知手法についての研究・技術開発レビュー

近年、様々な分野で画像解析技術や AI といった新技術が導入されてきており、PIV 法を応用した LSPIV・STIV による河川表面流の水面波紋から流速分布を捉える手法 (Fujita, 2017; 藤田ら, 2020), 流下エリア推定や水位推定 (例えば, 福田ら, 2016; 石井ら, 2011; 松本ら, 2017) などが行われ、中流・下流域の都市河川においては、洪水の監視・観測を対象とした画像解析技術の開発が進み実用化がされている。また、砂防の山地河川においても、昼夜間映像における動体追跡技術や高精度距離検出 (例えば, 井深ら, 2016; 2017), 画像鮮明化処理 (例えば, 株式会社ブレインズ, 2022; 松本ら, 2017), 輝度差分映像による崩壊・土石流検知手法 (柴田ら, 2020) の開発や、砂防堰堤正面の映像から PIV 法により流下する土石流を捉える土石流検知アラートシステム (いであ株式会社, 2021) といった実用化も進められている (表 1.2)。画像解析によって土石流を検知するためには、水理量およびその変化量を画像情報からアルゴリズム化して評価する必要があるが、これまでの画像解析技術では中小出水と土石流の判別が困難であり、適切な閾値設定方法を確立するには至っていない。また、カメラ画角内での土石流の流下を捉える手法であるため、前兆現象を捉えられず避難のリードタイムを確保できないといった課題も残っている。画像解析の精度的課題には、台風の強風によるカメラの揺れ、濃霧等による誤検知やノイズの混入の影響が関係し、ハードウェアの改良による取得映像の品質向上の必要性が言われている (本田ら, 2006)。画像解析の精度は取得映像の品質にも

依存するため、検知精度には取得画像の品質に応じた限界があるが、カメラ自体の製品スペックによるところであり、画像解析技術とともに今後の発展が期待されるところである。

画像解析による水域の濁水評価は、これまでも試みられている。例えば、衛星画像から水質を評価する手法では、衛星画像の複数の波長帯バンドを使用して、河口海域海面の濁りの定性的・平面的な拡散状況を広域に捉える手法が報告されている（田中ら，2000；高山ら，2022）。Deep Learning を用いた手法では、河川の濁水画像を教師データとして、濁水の濃淡を3段階レベルで評価した事例が報告されているが（埜ら，2019），画像情報と濁度との対応関係を明らかに出来ていない。いずれの手法も画像データから濁度の定量評価には至っていない。

画像解析による濁度評価手法は、照明により光源を一定に揃えた条件のもと行った室内実験での検討例が近年報告されている。白色蛍光灯の均質な照明条件下における水中の懸濁物質の濃度に対し、画像の輝度と濁度に相関があると報告されている（伊原ら，2001；Darragh *et al.*,2018；Siti *al.*,2019；Inderdeep *al.*,2021）。濁水に照射された光の90°散乱光と透過光を2台のカメラ画像から解析することで、濃淡の濁水の計測範囲を広げつつ計測精度を上げる手法も開発されている（Yuanyang *al.*,2020）。畳み込みニューラルネットワークを用いた手法では、赤や茶系の色の懸濁物質に対し、赤・青・緑の単色LEDや、白色光といった色温度の異なる照明下で実験を行い、白色光が最も高い精度でカメラ画像から濁度評価が可能という結果も報告されている（Daniela *et al.*,2022）。これは茶系の懸濁物質の濁度評価には、複数の波長帯で構成される白色光と画像の色情報を用いて評価することが有効であることを示している。

自然光にみたてた様々な色温度の照明光において、光源の情報が物体表面の色・輝度と相関して対応することが言われている（北澤ら，2009）。これは屋外の自然光においても一定の光源条件において物体表面は一定の色を持ち、渓流水面の濁水の色であれば定量的な値で対応させられる可能性を示している。

しかしながら、光源条件が一定しない屋外の CCTV 等の監視カメラにおいては、光源条件を一定にして行う室内実験と同じ手法を適用できないため、未だ画像から濁度を定量評価する手法が確立されておらず、研究開発途上にある。

表 1.2 既往の画像解析による土石流および河川水理量把握適用例

	PIV(PTV)	Optical Flow	LSPIV・STIV	WDIC
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ particle image velocimetry 粒子画像流速測定法、一般に高密度粒子に適用。 ・ particle tracking velocimetry 粒子追跡法、一般に低密度粒子に適用。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Optical Flow 物体の特徴的な形状に対し、二次元速度ベクトル場を検出する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ large-scale particle image velocimetry/space-time image velocimetry 水面流速を計測する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ water-level digital image correlation 水際線を検出する。
	<ul style="list-style-type: none"> ・ フレーム毎の輝度分布に着目して、速度ベクトルを抽出する手法。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Lucas-Kanade法 画像上の任意の特徴点の動きを解析し追跡する手法。 ・ Horn-Schunck法 画像上の全てのピクセルに対して物体移動検出を行う手法。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ PIV(PTV)を応用した、河川の流速分布を計測する手法。 ・ 水面の波紋の動きに着目し、流速を把握する手法。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 画像相関法（統計処理）から水際線を検出し、水位を計測する手法。
適用例	<ul style="list-style-type: none"> ・ X-system DFx ((株)アラソフトウェア) ・ 土石流検知アラートシステム (いであ(株)) ・ 土石流検知、崩壊検知の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SparseToDense ・ Deep Flow 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 河川流量計測システム「KU-STIV」(Kobe University space-time image velocimetry)※2020年3月終了 ・ Hydro-STIV 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 河川流量計測システム「KU-STIV」(Kobe University space-time image velocimetry)※2020年3月終了 ・ Hydro-STIV
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎的技術として、各種解析処理にベースとして広く用いられている。 ・ 高速フーリエ変換(FFT)による高速演算の他、改良が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体の移動を高速に検出可能。 ・ 乱流への適用性があると報告されている。改良次第で、精度向上が期待される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 都市河川の流速計測に特化し、河川では実務化されているの技術である。 ・ 河川の流量計測も含めて試みられている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎的な技術で、各種解析処理にベースとして広く用いられている。 ・ 流速計測と伴わせることで、河川の流量計測も含めて試みられている。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 粒子を追跡することから、PIV単体では山地河川の流況変化（射流、土石流など）の検知には不向き。 ・ 照明条件の変化等、ロバスト性に欠ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水面に乱れがある場合、精確性に欠ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 河川の波紋などを追跡する技術で、常流には適用するが、射流への適用性は低い。 ・ 流木や巨礫などが混ざる流体への適用性が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水際検出に様々な処理方法（統計処理）があり、現場に合わせた検討を要する。

1.2.2. 本研究の目的

山地河川における画像解析を用いた土砂移動現象把握手法として、濁水の評価に色情報（RGB 値）を用いる手法（五十嵐ら，2017；2019a）がある。本手法は濁度の増加傾向を把握することで、既往の他の画像解析等による土石流検知手法と比べ、土石流の前兆現象としての濁水発生（谷山ら，1988；加藤ら，2008；国土交通省，2006）の早期検知という利点が期待される。色情報（RGB 値）を単位ベクトル化し、RGB 輝度の合成ベクトルの位置及び方向を導くことで、溪流の濁り検知だけでなく、日射量（光の強度）の影響軽減や、夜間映像への有効性が報告されている（五十嵐ら，2019b）。現在、画像解析による濁度評価手法は、室内実験での検討（例えば，Mullins *et al.*, 2018）が報告されているが、光源条件が一定しない屋外の CCTV 等の監視カメラでの成功事例は未だなく、研究開発途上である。

本研究で検討対象の 1 例とした黒岳沢川の映像データには、土石流に至らない中小出水の濁水，土石流フロント到達前の濁水，土石流の濁水の映像を含んでおり，これらの映像から年に幾度と発生する中小出水に伴う濁水と，数年から数十年に 1 度程度の確率で稀に発生する土石流に伴う濁水の違いを画像情報から明らかに出来れば，土石流検知において濁水が有効な指標の一つとなり，溪流水面画像から濁度変化を把握することは有効な溪流監視手法となる。

画像解析によって土石流を検知するためには，水理量およびその変化量を画像情報からアルゴリズム化して評価する必要がある。既往の画像解析では，水面の乱れや飛沫により土石流水位の正確な定量評価が困難で，流速や動体検知では中小出水と土石流の違いを明確に判別できず，土石流検知の閾値設定を確立するには至っていない。また，画像解析はカメラ画角内で土石流の流下を捉える手法であるため，水位・流速・動体からは土石流の前兆現象を捉えることができず，カメラ監視位置によっては土石流検知から避難までのリードタイムを確保することは困難で

ある。濁度を指標として土石流を検知することができれば、このリードタイム確保の可能性が期待され、水位等の指標と組み合わせることで土石流監視の重畳化も図れる。物理的な外力で損傷しやすい接触型の濁度計は土石流検知センサーとしての利用に不向きであり、本研究ではカメラ画像から非接触で濁りを把握する手法に着目した。

本研究では CCTV 等の画像データの流域監視等の高度利用を目的に、渓流水面画像の RGB 値及びその単位ベクトルを用いて、濁度評価と土石流検知手法を検討した。

第2章 研究方法

2.1. 研究の全体構成

研究フローを図 2.1に示す。

第 1 章では、近年の土砂災害と溪流監視の取り組みや、これまでの土石流監視のレビューを行い、既存の土石流検知センサーの概要やメリット・デメリットを整理した。また、近年の画像解析技術のレビューを行い、溪流監視への適用事例や課題を整理するとともに、土石流監視における濁水監視の意義と、カメラ画像から非接触で濁りを把握する重要性を整理し、本研究の目的を記載した。

第 2 章では、本研究で対象とした研究調査地の概要の他、中小出水時の映像、過去に発生した土石流等の CCTV 映像を収集整理した。収集した映像を通覧・確認の上、中小出水による濁水や土石流といった土砂移動現象の映像を抽出し、それらの特徴を整理するとともに後述する土石流検知手法の検討に供した。また、濁水の色情報を解析するにあたり、複数の色情報の指標のうち、画像解析による濁水監視と土石流検知に適した表現手法を考察し整理した。続いて、屋外で時々刻々と変化する日照条件に対応するため、色情報の RGB 値を単位ベクトル化する手法を用いて、濁度との相関関係や土石流発生 of 閾値を設定する考え方や方法を記載した。

第 3 章では、第 2 章で収集した画像から濁水映像の特徴を整理し、第 2 章で示した方法により、画像解析による濁度評価を行った。溪流水面の解析結果と、水位や濁度等の現地観測データとを比較し、画像の色情報と濁度との相関関係を明らかにした。

第 4 章では、第 2 章で収集した画像から土石流映像の特徴を整理し、第 3 章と同様に第 2 章で示した手法により、画像解析による土石流検知手法の検討を行った。黒岳沢川の 2 ヶ月間の画像データからは、中小出水による濁水、土石流フロント到達前の濁水、土石流による濁水を分析して、土石流発生/非発生の濁水を整理し、土石流フロント到達前の濁水

から土石流を検知する閾値を設定し、土石流検知手法をとりまとめた。それから、第3章と第4章の検討結果を踏まえて、濁度評価と土石流検知手法に関する考察を行った。さらに、本研究で得られた成果の妥当性を検討するとともに、全国の溪流監視へも展開していく上での提案事項や留意点を整理した。

第5章では、本研究の結論をとりまとめるとともに、第1章でレビューしたこれまでの土石流検知センサーに対し、本研究での画像から濁りを把握する土石流検知手法の優位性や適用範囲を踏まえ、本研究成果の運用方法（案）を提示した。

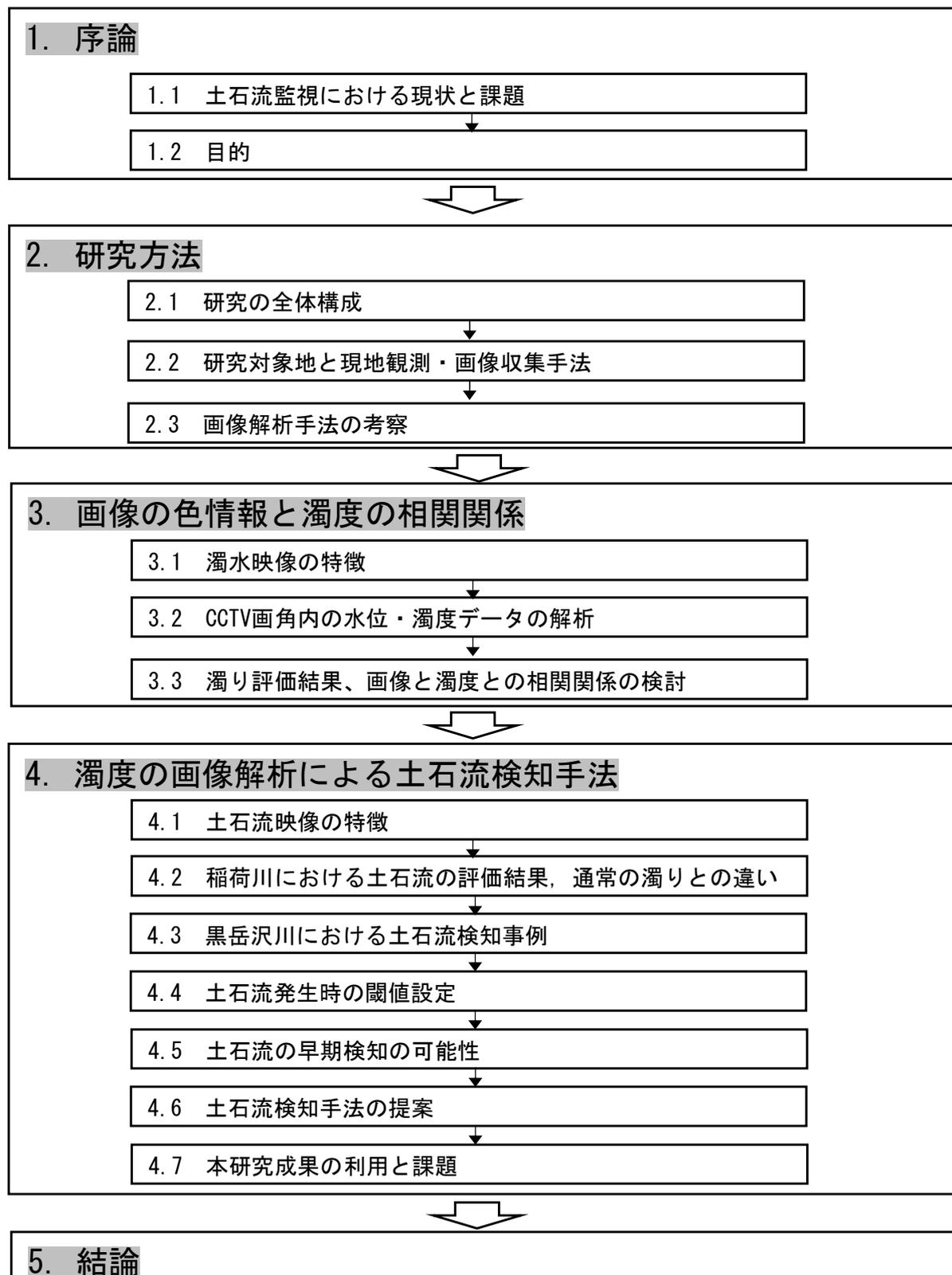


図 2.1 研究フロー

2.2. 研究対象地と現地観測・画像収集手法

2.2.1. 芋川

(1) 流域概要と監視観測機器

芋川は猿倉岳を源流にし，東山丘陵の緩斜面地帯を流下し魚野川に合流する。地質は砂岩・泥岩などからなり，明瞭な活褶曲構造と河成段丘を有する地形である。2004年新潟県中越地震で大規模な土砂生産があり，流域の末端付近に位置する竜光遊砂地では，2010年6月より流砂量観測が行われている（図 2.2）。芋川流域内には多量の移動可能土砂が残存し，出水の度に浮遊砂が観測されやすい溪流である。また，芋川流域には国土交通省湯沢砂防事務所所管の CCTV が多数整備されており，竜光遊砂地に配置されている CCTV は，濁度計周辺の水面を画角に含み，出水時の映像からも濁水の発生状況を視認することが可能である。なお，芋川は流域面積 38.4 km²，流路延長 17.2km であり，竜光遊砂地では河床勾配 1/150 と掃流区間となっている。この芋川では，中小出水時における水位計・濁度計の観測データと収集画像を使用して，後述する画像解析による濁度評価検討に供した。



図 2.2 信濃川水系魚野川支川芋川の概要

(2) 映像収集

竜光遊砂地下流の CCTV（イメージセンサ：1/2 インチ 3 板 CCD，解像度：約 38 万 px，30fps，最低被写体照度：0.009lux 以下，ホワイトバランス自動調整，オートアイリス，ハロゲン照明 500W×2 灯）を収集して，動画像の渓流水面の画素情報を解析・検討した。使用した CCTV 映像の期間は，近年で出水の規模が最も大きかった，2019 年 10 月 12 日～10 月 18 日の台風 19 号出水前後の 1 週間である（図 2.3，表 2.1）。

本研究は，日中の映像（06：00～17：00）のみを解析対象とした。夜間時の映像は，長時間露光やハロゲン照明の影響を別途考慮する必要がある，本研究では解析対象外とした。

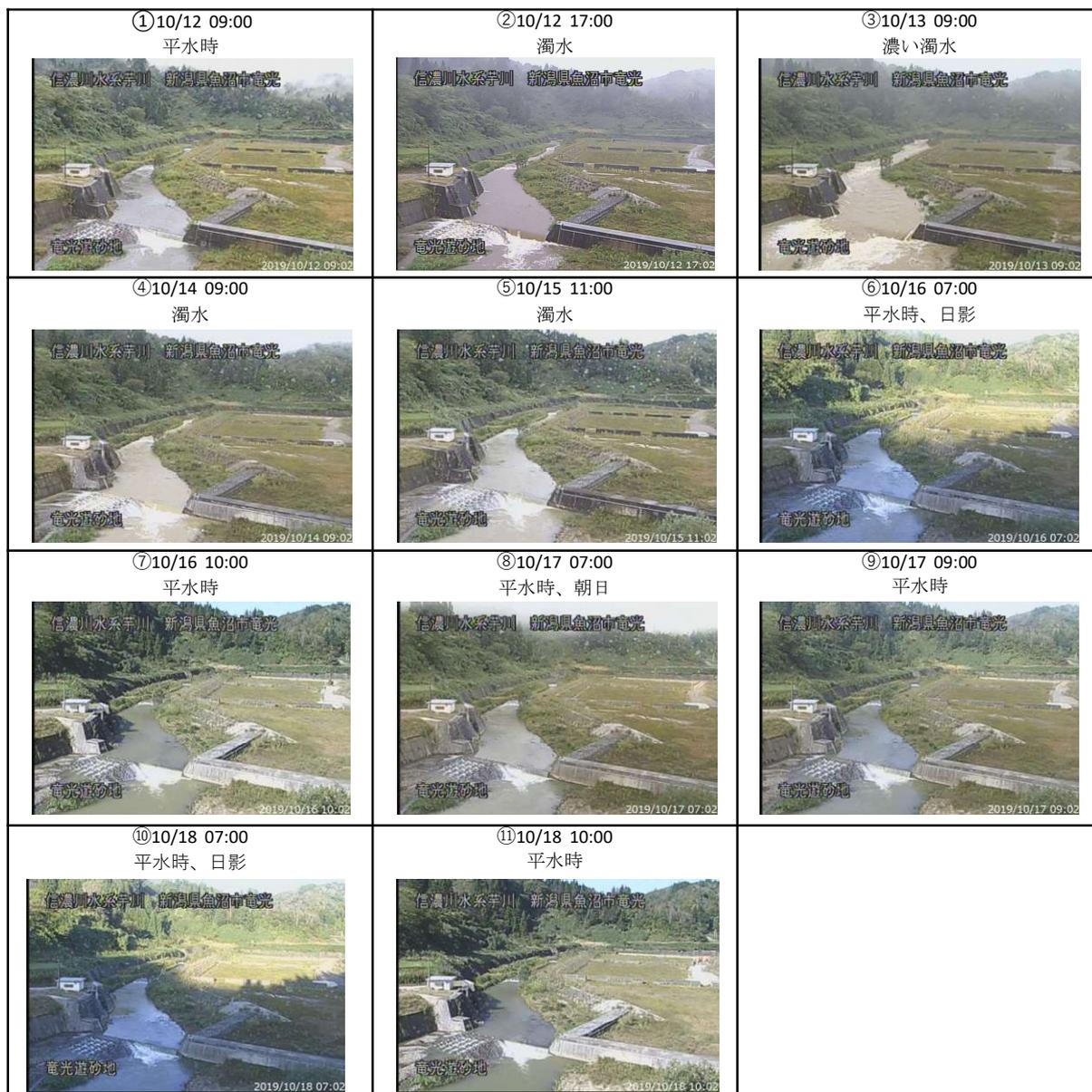


図 2.3 芋川の CCTV 画像（2019/10/12-10/18）

表 2.1 芋川の CCTV 画像（2019/10/12-10/18）

No.	年月日	時間	映像から見られる河川の特徴
①	2019/10/12	06:00-15:00	平水時，濁りなし。
②		15:00-17:00	濁りが発生。
③	2019/10/13	06:00-17:00	水位が増加し，終日濃く濁っている。
④	2019/10/14	06:00-17:00	水位が低下し，比較的濁りが収まる。
⑤	2019/10/15	06:00-17:00	前日14日よりさらに濁りが収まる。
⑥	2019/10/16	6:00-09:00	天候が回復する。水面が日影になる。
⑦		9:00-17:00	濁りは収まり，終日晴天が続く。
⑧	2019/10/17	6:00-07:30	水面に朝日が照らされる。
⑨		07:30-17:00	濁りは収まり，終日晴天が続く。
⑩	2019/10/18	6:00-09:00	水面が日影になる。
⑪		9:00-17:00	濁りは収まり，終日晴天が続く。

2.2.2. 稲荷川

(1) 流域概要と監視機器

図 2.4に利根川水系大谷川支流稲荷川の概要を示す。稲荷川は流域面積 12.4 km²，流路延長 9.8km，平均勾配 1/10 と土石流区間に位置する溪流である。栃木県の女峰山と赤薙山を源流にし，輝石安山岩等の火山岩が広く分布し風化が進んでいる。上流の荒廃地は大鹿落として代表されるように大規模崩壊跡地が分布し，活発な土砂生産源となっている。過去に幾度と土石流が発生し，1916年より直轄砂防事業が着手され砂防構造物が複数整備されている。近年では 2011年 9月の豪雨で土石流が記録されている。また，稲荷川は大谷川との合流点に流砂観測施設（山内観測所）が整備されている流砂観測溪流である。

図 2.5の稲荷川の最上流に位置する早川上流砂防堰堤には，日光砂防事務所所管の CCTV カメラが配置されている。

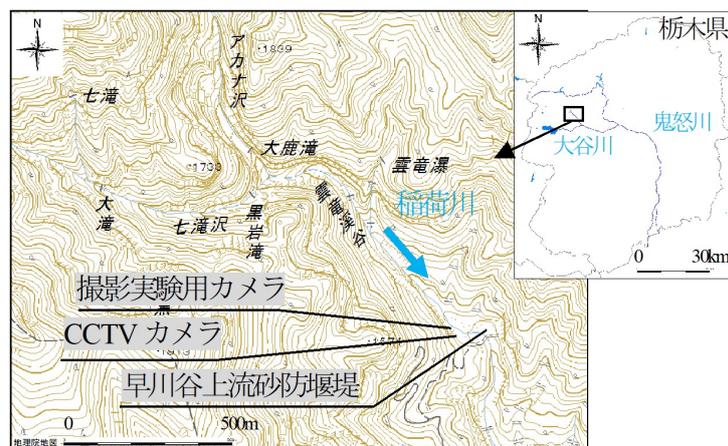


図 2.4 利根川水系稲荷川の概要



図 2.5 早川谷上流砂防堰堤

(2) 映像収集

1) CCTV の土石流映像

2011年9月2日に稲荷川で発生した土石流のCCTV映像（AM6:32:11～AM6:36:00, 30fps）を収集した。

収集したCCTV映像は、既に濁水が発生している（a）6:32:11から、（b）6:32:47頃に土石流フロントが到達し、その後CCTVカメラ付属のワイパーと照明が作動し、土石流が減衰する（d）6:36:00までの動画である（図2.6）。流木や巨礫の流下は映像からは視認できず、泥流型の土石流である（日光砂防事務所, 2011）。また、稲荷川上流は霧の多発地域であり、土石流発生時も霧がかかっていることがわかる。動画の特徴として、濁水の流れと土石流フロントの流下によって、流路に占める茶褐色の面積が増加し、水面の画像は時間とともに刻々と変化しているように見える。一方、流路外の岸壁などの部分には画像上大きな変化はなく、動画では終始ほとんど変化は見られない。

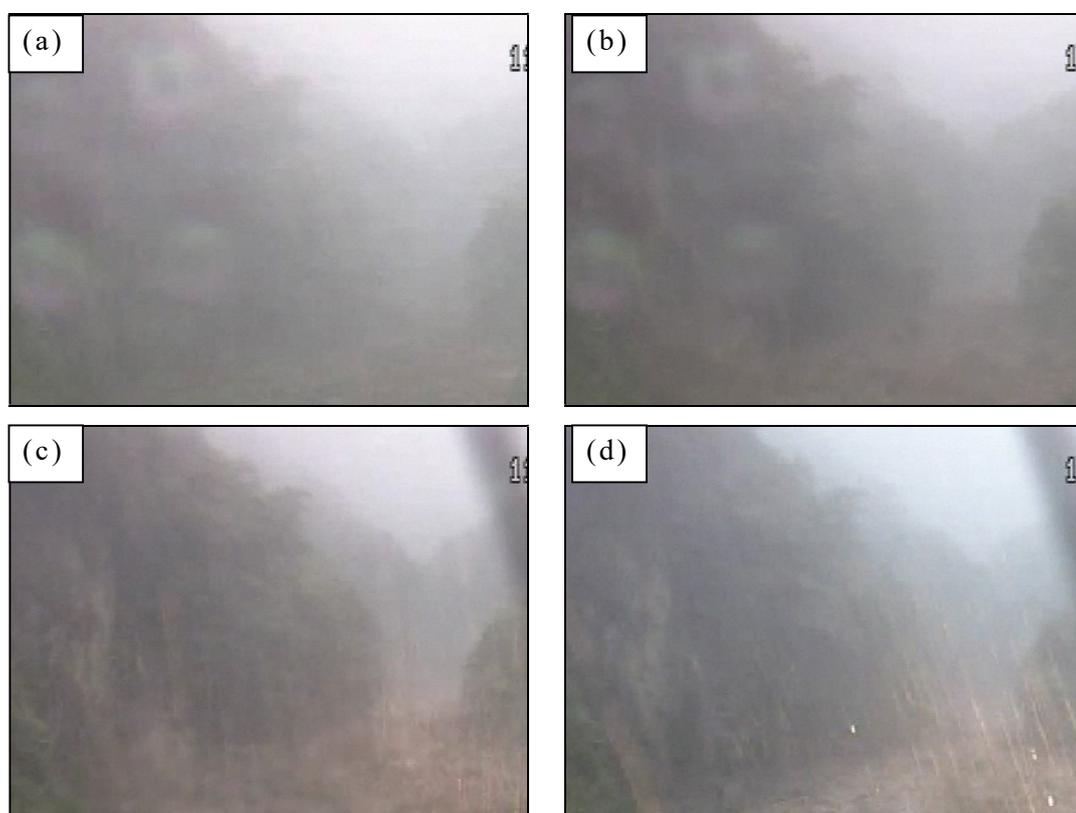


図 2.6 早川谷上流砂防堰堤 CCTV の土石流記録動画

2) 撮影実験用カメラ

稲荷川の CCTV カメラ近傍に設置された、撮影実験用カメラ（イメージセンサ：1/2 インチ 2MP CMOS Progressive Scan, 解像度：1920×1080px, カラー撮影時最低被写体照度：0.15lux, ホワイトバランス自動調整, 自動露出補正）の映像を収集した。山間地では夜間時に 0.15lux 以上の照度確保が困難なため、白色 LED（3W×6 本）を付け、夜間降雨時の映像も取得している。2016 年 9 月 14 日から撮影を開始し、2018 年 5 月まで映像データを取得・蓄積している。期間中、斜面から供給された土砂の濁りと考えられる茶色い濁りと、河床堆積物の二次移動と考えられる灰色の濁りを、昼間・夜間・降雨時・霧発生時など様々な環境条件下での映像を収集した。

本稿では、日照条件が画素情報に及ぼす影響に対して単位ベクトル化による影響軽減の程度を評価するため、複数回発生した濁水の中から、雲霧が発生せず昼間の濁水を捉えた、2016 年 11 月 4 日の映像データを扱った。



図 2.7 撮影実験用高感度カメラ

表 2.2 撮影実験用高感度カメラの設置期間

場所	年月日	状況
早川谷上流 砂防堰堤	2016/9/14	設置, 撮影開始
	2016/12/9	積雪対策のため設置箇所を調整
	2017/10/18	撮影終了, 撤去

図 2.8に 2016 年 11 月 4 日の映像データを示す。(a) 3:00 の夜間時は、照明を当てて濁水が発生していない水面を映している。(b) 10:30 は濁水発生前の状況で、(c) 12:15 は濁水発生時の映像である。(d) 12:30 と (e) 12:45 は徐々に濁りが収まっていく過程を抜粋した画像である。(f) 15:40 頃に夕日が水面を反射した影響で、溪流が濁っているように見える映像である。(g) 16:20 は、濁りが収まった後の日没前の映像である。

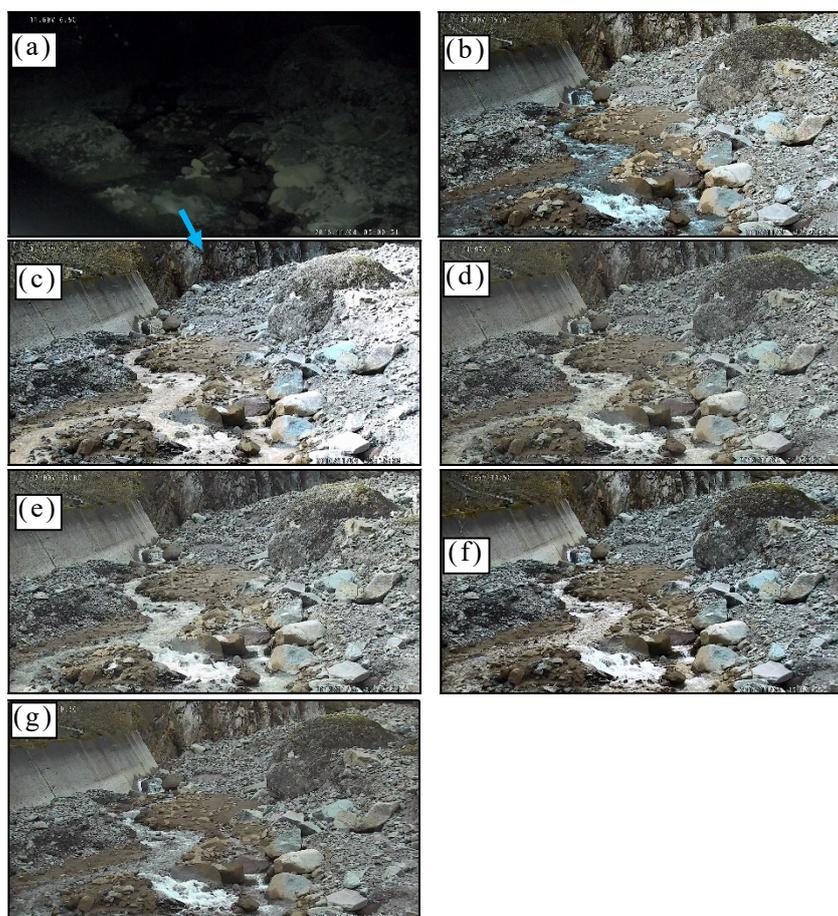


図 2.8 早川谷上流砂防堰堤の撮影実験用カメラ映像

(a)3:00 夜間照明時, (b)10:30 濁水発生前, (c)12:15 濁水発生時,
(d)12:30 濁水発生時, (e)12:45 濁水が収まりつつある時,
(f)15:40 夕日の反射, (g)16:20 濁水が収まった後

2.2.3. 内の川

(1) 流域概要と監視観測機器

図 2.9に那智川水系内の川の概要を示す。内の川は流域面積 0.31 km²，2011 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，ホワイトバランス自動調整，オートアイリス）による渓流監視に加え，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。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 2.10），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。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。



図 2.9 那智川水系内の川の概要



図 2.10 那智川水系内の川の CCTV（左）と LED 照明（右）

(2) 映像収集

1) 土砂を流す溪流実験時の映像

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、それぞれの溪流水面の色情報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を発生させる溪流実験を実施している（図 2.11，図 2.12，図 2.13）。土砂を流す溪流実験は 2018 年 10 月 4 日 17 時～18 時，10 月 5 日 10 時～12 時の 2 日間実施している。1 ケース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 ケースの計 4 ケース実施している。土砂流下時の状況が記録された CCTV カメラ映像を収集した（表 2.3）。



図 2.11 那智川水系内の川の CCTV

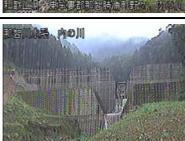


図 2.12 斜面土砂を用いた溪流実験の状況



図 2.13 溪床土砂を用いた溪流実験の状況

表 2.3 溪流実験時の映像一覧

No.	供給土砂の種類	採水日時		照度	CCTVキャプチャ	
				LUX	original	zoom, trimming
1	斜面土砂	2018/10/4 16:50	夕方	—		
2	斜面土砂	2018/10/4 17:00	夕方	1425.5		
3	溪床土砂	2018/10/4 17:10	夕方	666.5		
4	溪床土砂	2018/10/4 17:20	夕方	338.7		
5	斜面土砂	2018/10/5 10:20	朝～昼	—		
6	溪床土砂	2018/10/5 10:30	朝～昼	2132.5		
7	斜面土砂	2018/10/5 11:50	昼	—		
8	溪床土砂	2018/10/5 12:00	昼	6300		
9	—	2018/9/4 12:00	昼	—		
10	—	2017/10/22 19:00	夜間	—		

2) 2017年10月22日台風第21号の出水映像

2017年10月22日には台風第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2.14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2.14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2.15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、台風第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 2.14 2017年10月22日台風第21号時の映像

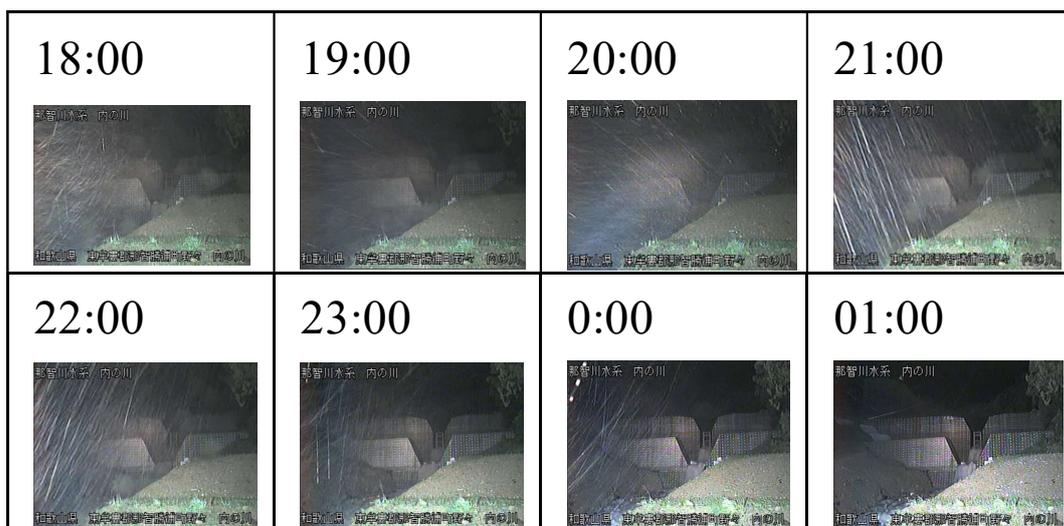


図 2.15 台風第21号映像内の鮮明フレームのキャプチャ

2.2.4. 黒岳沢川

(1) 流域概要と監視観測機器

図 2.16に研究調査対象地とした石狩川水系黒岳沢川の概要を示す。黒岳沢川は流域面積 4.8 km²，流路延長 4.3km，平均勾配 1/4 と土石流区間に位置する溪流である。大雪山黒岳を源流にし，扇状地の層雲峡温泉街を経て石狩川本川に合流する。地形地質は外輪山溶岩・凝灰岩類・粘板岩などからなり，温泉変質により脆弱な地質構造を有し，地すべり地形や崖錐・崩壊残土・溪床堆積物などが多くみられ，流域の大半が活発な土砂生産源となっている。過去に幾度と土石流が発生しており，下流の層雲峡温泉街や国道 39 号を保全対象に治山事業や砂防事業が進められ，治山・砂防構造物が複数整備されている。また，溪流沿いには溪流監視を目的に北海道開発局旭川開発建設部所管の CCTV が複数整備され，溪流谷出口付近の治山堰堤には北海道開発局旭川開発建設部の水位計が設置されている。

近年では 2016 年 8 月 23 日に土石流が発生し（図 2.17），CCTV 及び定点観測用インターバルカメラで当時の土石流映像の記録が残されている。

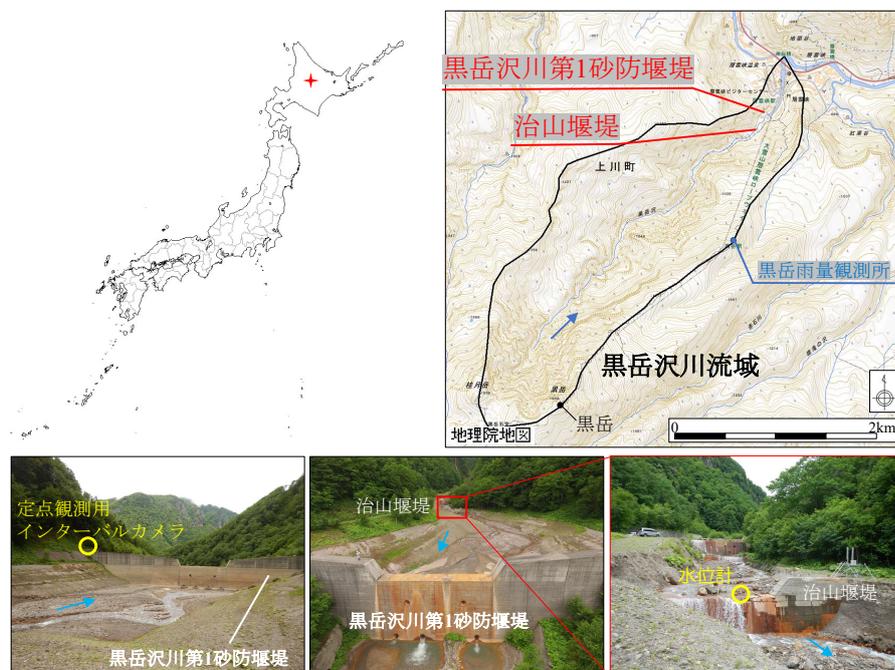


図 2.16 石狩川水系黒岳沢川の概要



図 2.17 黒岳沢川の土石流発生前後の写真

(2) 映像収集

黒岳沢川第 1 号砂防堰堤に設置された定点観測用インターバルカメラ（イメージセンサ：CMOS，解像度：約 130 万 px，1frame/10min）で撮影された映像を使用して解析・検討した。

黒岳沢川では，2016 年 8 月 23 日の台風 11 号豪雨により土石流が発生し，定点観測用インターバルカメラでは土石流の発生状況を映像で捉えられた。使用した映像の期間は，土石流が発生した 2016 年 8 月 23 日を含む，2016 年 6 月 24 日～8 月 23 日の 2 ヶ月間である（図 2.18）。夜間は照度不足のため映像取得がされず，取得できたのは早朝から日没までの映像のみであった。

映像の特徴として，平水時，小降雨に伴う濁り，中小出水による土砂流出，発生直前の濁りを含む土石流を一定画角で収めた 10 分等間隔の画像である。石礫型の土石流が，黒岳沢川第 1 号砂防堰堤の堆砂敷まで到達し，映像からは土石流フロントの流下状況が視認できる。

これらの画像の特徴から，色情報と濁度の相関性を踏まえて，土石流発生を捉える手法を検討した。

なお，土石流映像の記録が残されているのは 2016 年 8 月 23 日の土石流 1 事例のみである。黒岳沢川の CCTV でも同日の土石流映像を記録したが，土石流流下時の 4 分間程度の動画しか入手できなかったため，本研究では定点観測用インターバルカメラ映像を解析対象とした。黒岳沢川には濁度計が設置されていないため，画像解析による濁度の定量評価検証は出来ないことを予め記しておく。また，雨量・水位データから出水の有無を確認し，出水に伴う濁水の発生/非発生の判別は著者の目視画像判読により行った。



図 2.18 黒岳沢川の定点観測用カメラ映像

2.3. 画像解析手法の考察

画像の色を数値化した情報（以下、色情報という）を用いた濁り検知手法について記述する。

2.3.1. 色情報の指標化

濁水の色情報を解析するにあたり、RGB・HSV・XYZといった複数の表色手法のうち、画像解析による濁水監視と土石流検知に適した表現手法について検討した。

色彩理論に基づく、色の表現方法にはRGB、HSV、XYZ等の表色手法が存在する。人の目による色の見え方には、個人差が生じ、観察者によって色の見え方は異なる。そのため、色を定量的に評価するには、幾つかの条件や制約を設けて一般化する手法がとられている。いずれの手法も、色は空間的に表現され、円柱、円錐、多角錐、球、幾何形体など様々な形状や種類がある。

以下に、それら代表的な表色手法と、濁水検知の適用性についての検討を行った。

(1) RGB

R(赤)、G(緑)、B(青)による加法混法である。RGBは画像のデジタル情報として、一般に各チャンネル8bitのデジタルナンバーが使用される。全ての自然界の色を3色(RGB)の加法混合で表現することはできず、より多くの色を評価したい場合はXYZ規格化が必要になる。また、色情報とは分けて明るさや鮮やかさを検討する場合には、輝度情報の他、次のHSVで示す明度・彩度といった指標による評価が必要になる。

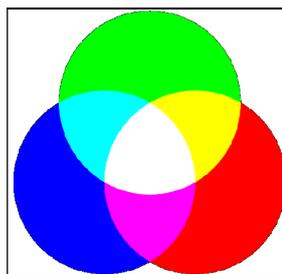


図 2.19 RGB 加法混合

(2) HSV

H（色相），S（彩度），V（明度）を円柱状に表現する手法である。これは，彩度（S）や明度（V）といった明るさや鮮やかさを示す情報と，色情報とを分離して表現する手法である。図 2.20の円柱上面の偏角を H（色相），円中心からの距離を S（彩度），高さを V（明度）と定義される。画像解析には，一般的に輝度情報がベースとなるため，色情報と輝度情報が分離された HSV 空間は，汎用性のある表色手法である。図 2.20からもわかる通り，高輝度の白や低輝度の黒，グレースケールは円柱上面の H（色相）ではなく，上下方向の V（明度）で評価する。

濁水の色を評価する際に，グレースケールに近い濁水を H（色相）で評価しようとするると，濁水の色は円中心付近に分布することになる。微細な色の変化や誤差に対して，偏角が大きく変化することになり，濁水と色の相関を得られにくい。

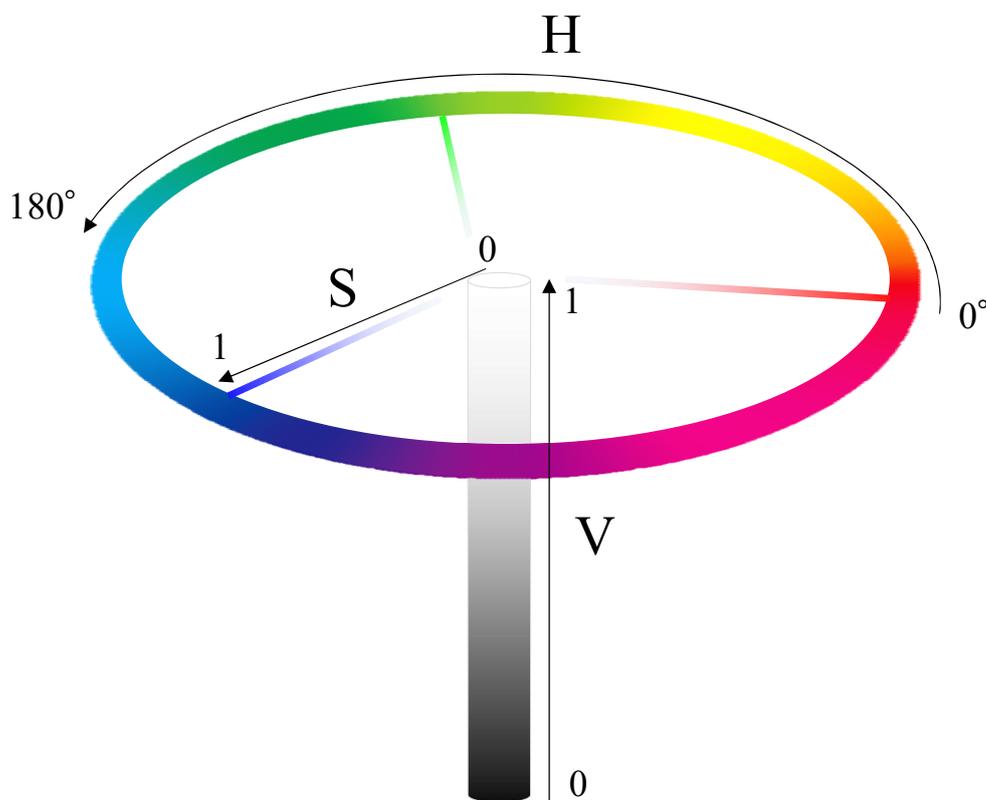


図 2.20 HSV 空間

(3) XYZ

RGB 値には三刺激値に負の値を含むため、広く色を評価する際には、国際電気通信連合 ITU-R BT 2380-0 に従って XYZ 規格化が必要となる。

流れに含まれる土砂量の推定の際に、濁水の色を広く評価しなければならない場合には、RGB 値を XYZ 規格化するなど考慮する必要がある。

自然光（D65 光）条件下では、下記式より規格化する。

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix}$$

以下の図は、後述する日光稲荷川の濁水の解析結果（RGB 値）を自然光（D65 光）で XYZ 規格化および単位ベクトル化し、濁水発生過程を 3 次元に図化したものである。バラつきが少なくなり、色をより原色に近づけて評価する際には有効である。ただし、屋外の自然光を XYZ 規格化するには、現地で計測した色温度の情報での設定が必要である。

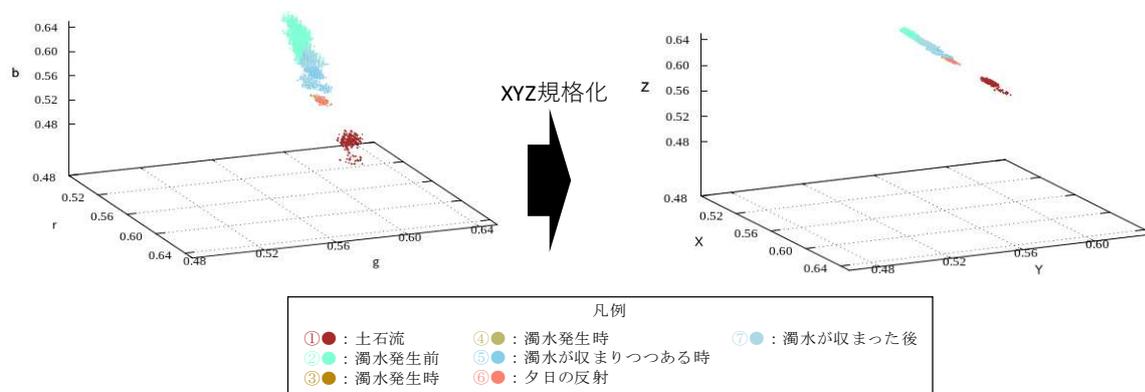


図 2.21 RGB の XYZ 規格化のイメージ

2.3.2. 色情報による濁り評価手法

前項をふまえ、濁り検知の指標（RGB, HSV, XYZ）のうち、XYZについては時々刻々と太陽光の光量に変化する屋外において、色温度に応じたXYZ規格化の係数を厳密に設定する必要があるため、まずはRGBを活用することとした。

まず、色情報（RGB値）単位ベクトルの抽出方法について述べる。図2.22に色情報抽出のイメージ図を示す。映像の $(x_j - x_i + 1) \times (y_l - y_k + 1)$ の画素数からなる解析対象領域において、各画素のRGB値及び輝度値(L)をオープンソース画像解析ライブラリ（OpenCV）で抽出し、式(1a)～(1d)に示す通り全画素で平均した。

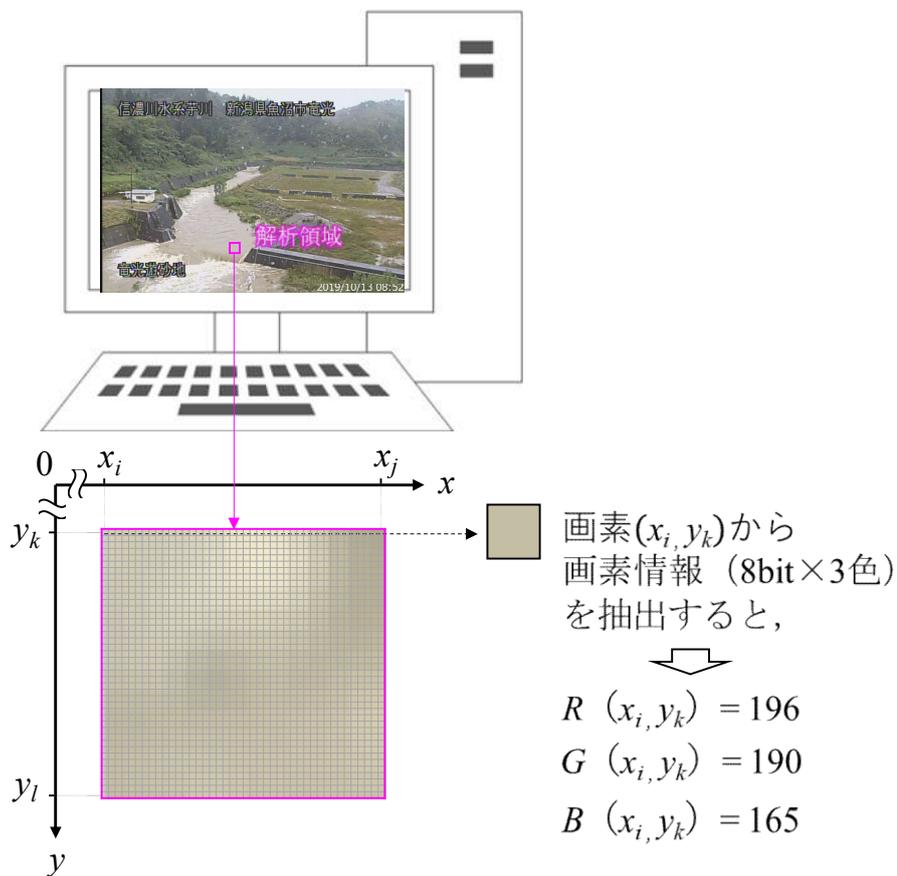


図 2.22 色情報の抽出イメージ

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

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

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

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

RGB において、若干の照度変化や水面の揺らぎによる輝度変化の影響を除外するため、RGB 値の大きさをそれぞれ相対的な大きさとして評価した、RGB ベクトルの単位ベクトルを検討した。式 (2a) ~ (2c) に示す通り、RGB 値を単位ベクトル化し、(r,g,b) を算出した。

また、画像分野では、規格により定められた係数を用いて、式 (3) に示す RGB 値と輝度値 L の変換式が用いられている (国際電気通信連合, 2002)。これは人間の目の特性の B (λ=435.8nm) には反応しづらく、G (λ=546.1nm) 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 (例えば、飯塚ら, 2000: アシュダウンら, 2007)。

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

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

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

$$L \equiv 0.298912 \times R + 0.586611 \times G + 0.114478 \times B \quad \dots\dots\dots(3)$$

図 2.23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。これは RGB 情報において、溪流の濁度変化に関連して変化する色相・彩度・明度といった情報を総括して評価し、屋外で時々刻々と変化する光の強さの影響は除外するために筆者らが考案した手法である（五十嵐ら，2019a）。また、色の違いで地質を区分する手法が報告されているように（例えば，遠藤ら，2019），濁水の色には溪流の地質の特徴が現れる。五十嵐ら（2019a）によると、光源条件、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し、濁度が増加するに応じて位置ベクトルが連続的に変化し、その変化に一定の方向ベクトルがあると報告されている（図 2.24）。本手法を用いて、芋川と内の川において濁度計測値と RGB 単位ベクトルとの相関関係を検討し、稲荷川と黒岳沢川では中小出水や土石流発生過程における濁りに対して RGB 単位ベクトルの連続性の検討を行い、本手法の濁度評価と土石流発生検知に対する有効性の検討を行った。

また、筆者らは、濁度変化過程における RGB 単位ベクトルの方向ベクトル (dr, dg, db) を法線ベクトルとする平面、すなわち式 (4) で表される濁度変化過程の近似直線が直行する平面を、濁度に応じて設定する手法を考案した。

前節で説明したように、濁度上昇に伴い RGB 位置ベクトルは半径 1 の球面に引かれた近似直線に沿って (dr, dg, db) の方向に変化する。ある濁度での RGB 位置ベクトルを $P(r, g, b)$ とすると、この位置ベクトルは濁度の変化に伴って $P_0(r_0, g_0, b_0)$ を通り、 (dr, dg, db) を法線ベクトルとする平面上にあるとすることができるので、式 (5) のように表現できる。このように濁度評価の指標を、任意の濁度に相当する RGB 平面（式 (5)）として設定した（図 2.25）。そして本手法を用いて、芋川においては濁度計測値との評価、稲荷川と黒岳沢川においては土石流発生の閾値設定としての適応性を検討した。

$$\frac{r - r_0}{dr} = \frac{g - g_0}{dg} = \frac{b - b_0}{db} \dots\dots\dots (4)$$

$$dr (r - r_0) + dg (g - g_0) + db (b - b_0) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

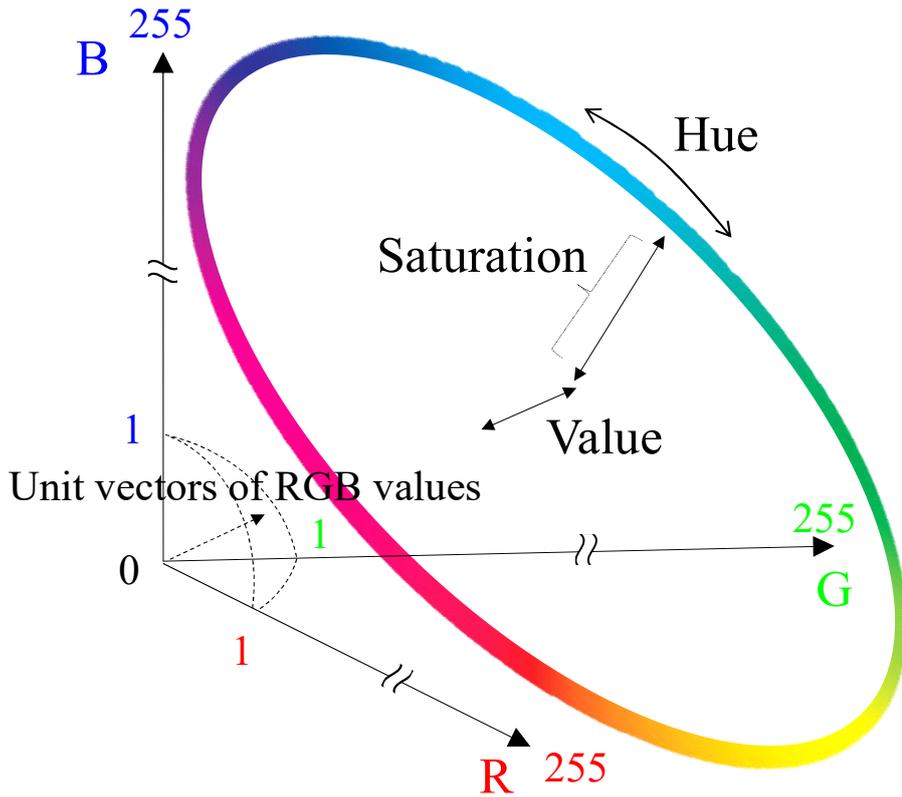


図 2.23 色情報 (RGB,HSV) とベクトル空間のイメージ

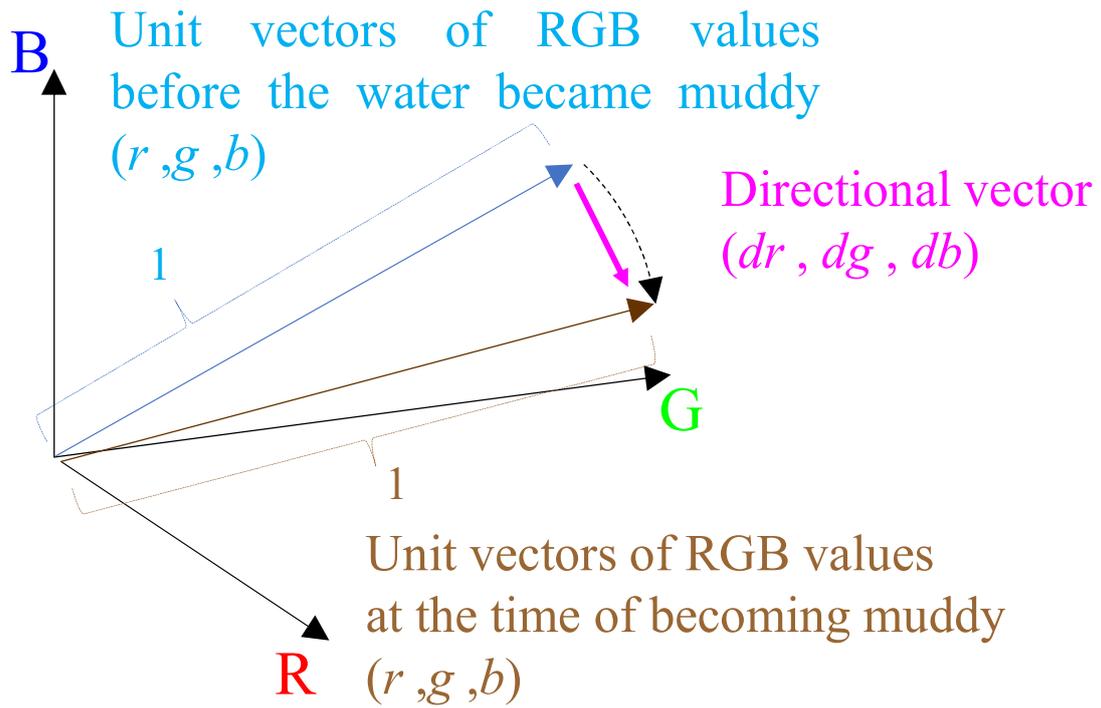


図 2.24 三次元ベクトル空間のイメージ

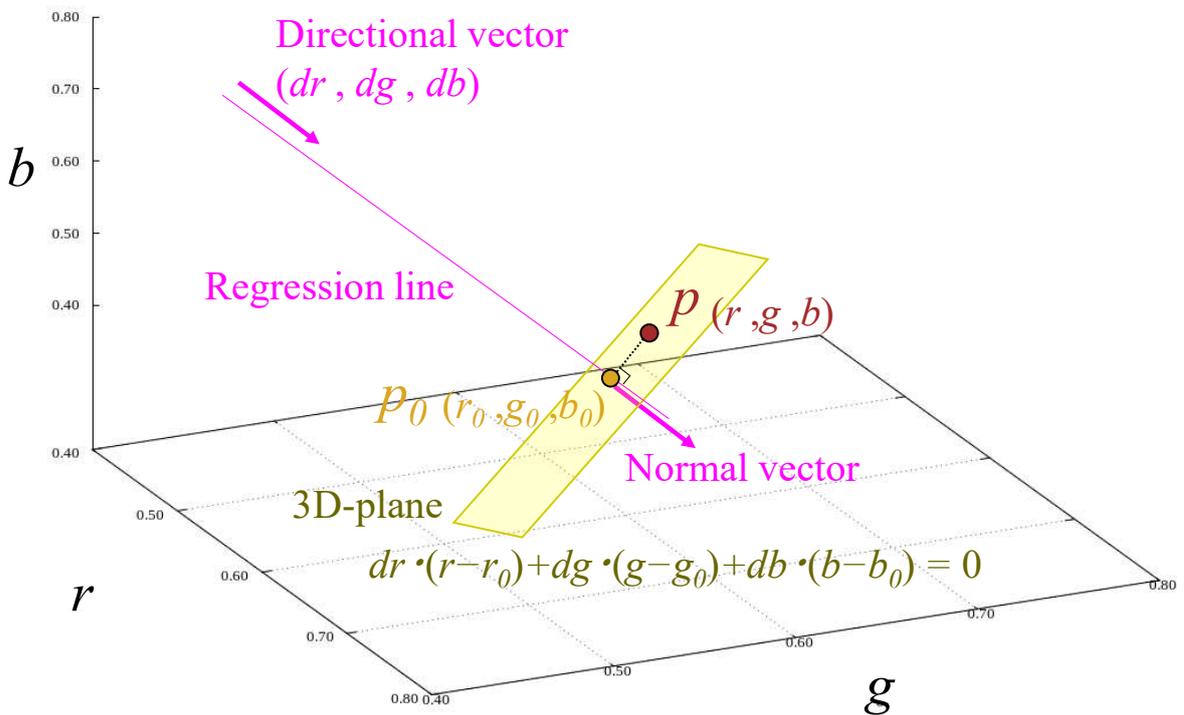


図 2.25 法線ベクトルと平面のイメージ

2.3.3. 濁水解析の解析領域指定

(1) 解析領域の指定方法

流路水面の色情報変化を濁度変化とみだてて評価するため、画素情報を抽出する解析領域は、表 2.4に示す点に留意して決定した。特に、図 2.26に示すような高輝度の白波は、ほとんど色を持たず色情報の変化を捉えにくいため、解析領域から除外するようにした。

表 2.4 解析領域指定の留意点

留意点	理由
・ 常に水が流れている領域	濁水発生前後の変化を連続的に捉えるため。
・ 白波や波紋による白飛びの影響が小さい領域	高輝度の画素が色情報へ及ぼす影響を避けるため。
・ 解析に資する十分な画素数を確保し、広くしすぎない	解析に用いる画素のサンプル数を確保する。画素数が多すぎると計算負荷が大きくなる。
・ 全フレームを同一領域で解析する	濁度変化を連続的に捉えるため。同一フレーム内でも、画素の位置で輝度情報に差異があるため。

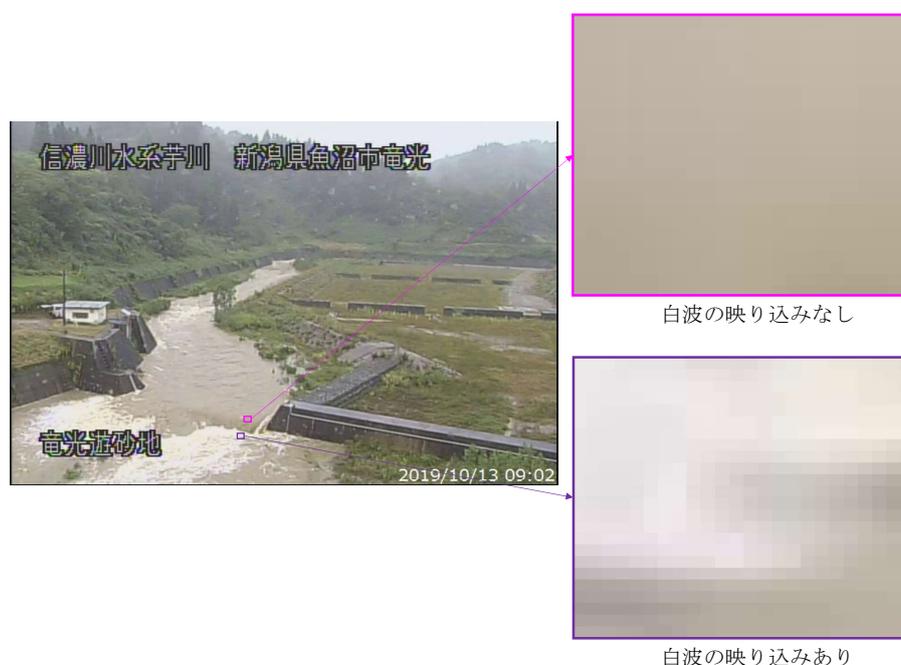


図 2.26 白波の映り込み例

(2) 解析領域の指定

前項の留意点を踏まえ、芋川・稲荷川・内の川・黒岳沢川において、解析領域は表 2.5の通り設定した。出水期間中は全フレームで同一領域になるように解析した。

表 2.5 解析領域の指定

溪流	解析領域	
芋川		
稲荷川		
内の川		
黒岳沢川		

第3章 画像の色情報と濁度の相関関係

山地河川において濁度は流量の二乗に比例するとされ、平水時、中小出水時の濁り、土石流発生時の濁りにおいて、流量増加に伴って濁度も比例増加することが想定される。年に幾度と発生する中小出水に伴う濁水と、数年から数十年に1度程度の確率で稀に発生する土石流に伴う濁水の違いを画像情報から明らかに出来れば、土石流検知において濁水が有効な指標の一つとなり、渓流水面画像から濁度変化を把握することは有効な溪流監視手法となる。

本研究では、カメラ画像から非接触で濁りを把握し、濁度を指標とした画像解析による土石流検知手法を検討する。この第3章では、中小出水時に取得された濁度データと画像データを基に、色情報と濁度の相関関係を検討した。

3.1. 濁水映像の特徴

3.1.1. 中小出水時に発生する濁水

芋川、稲荷川、内の川、黒岳沢川における平水時と濁水発生時の映像を表3.1に示す。

中小出水時に濁水が発生すると、渓流水面の色が変わり、目視でもその変化が確認できる。いずれの溪流においても、渓流水面の濁りは茶系を呈するようになる。出水規模に応じて渓流水の濁度は増減し、土砂本来が持つ色の濃淡が渓流水面にも表れる。つまり溪流の濁度変化に応じて、渓流水面に段階的な色の違いが生じることになる。表3.1の映像からも、濁水発生時において渓流水面の茶系の色に対し、濁水の濃淡の違いが視覚的に認められる。

内の川の映像には夜間降雨時の映像を含むが、LED白色照明の点灯時は溪流の状況が視認でき、濁水発生時には渓流水面が茶系の色を呈していることが確認できる。夜間降雨時でも、照明により明るさを確保できれば、溪流の濁水の発生状況を把握可能になる。

表 3.1 濁水発生時の映像

	平水時	濁水発生時（淡）	濁水発生時（濃）
芋川	 信濃川水系芋川 新潟県魚沼市電光 電光水砂池 2019/10/12 09:07	 信濃川水系芋川 新潟県魚沼市電光 電光水砂池 2019/10/12 17:07	 信濃川水系芋川 新潟県魚沼市電光 電光水砂池 2019/10/13 09:09
稲荷川			
内の川	 那智川水系 内の川 和歌山県 東牟婁郡智頭町高窪々 内の川	 那智川水系 内の川 和歌山県 東牟婁郡智頭町高窪々 内の川	 那智川水系 内の川 和歌山県 東牟婁郡智頭町高窪々 内の川
黒岳沢川			

3.1.2. 色恒常性による濁水の見え方の違い

屋外での画像取得条件下では、自然光が時々刻々と変化し、朝～昼～夕において光源の色温度条件が変化する。色恒常性という性質により、人の目は視覚内の物体に対し相対的な色の評価を行った見方を行うため（例えば、内川ら，2004），渓流水面外の周辺の色によって、渓流水面の色の捉え方が異なる現象が起こり得る。

以下の図は、極端な例ではあるが渓流水面外の周辺の色が異なる条件でのイメージである。それぞれの渓流の色が異なるように見えるが、渓流の水面は全て同じ色で RGB (127,127,127) のグレーである。人が目で渓流を監視する時、このような色の捉え方の差異が含まれるため、渓流水面の画像情報を定量評価することで、濁水の評価が確からしくなる。

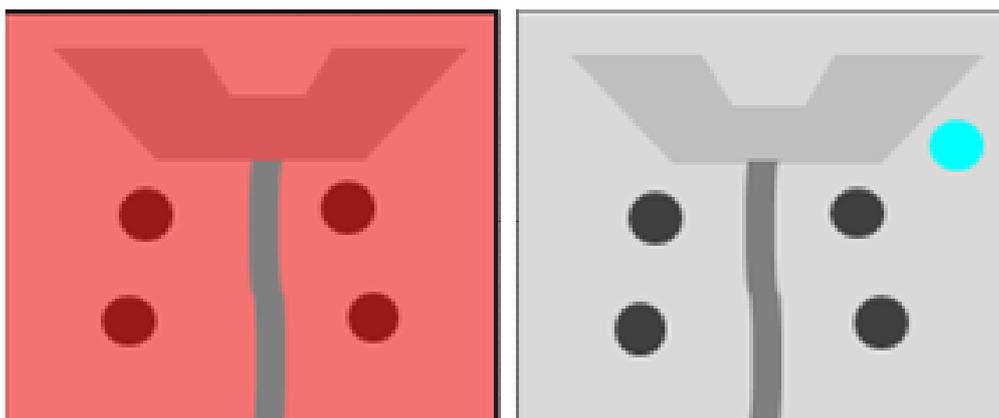


図 3.1 色温度が高い条件下で渓流が青系に見えるイメージ

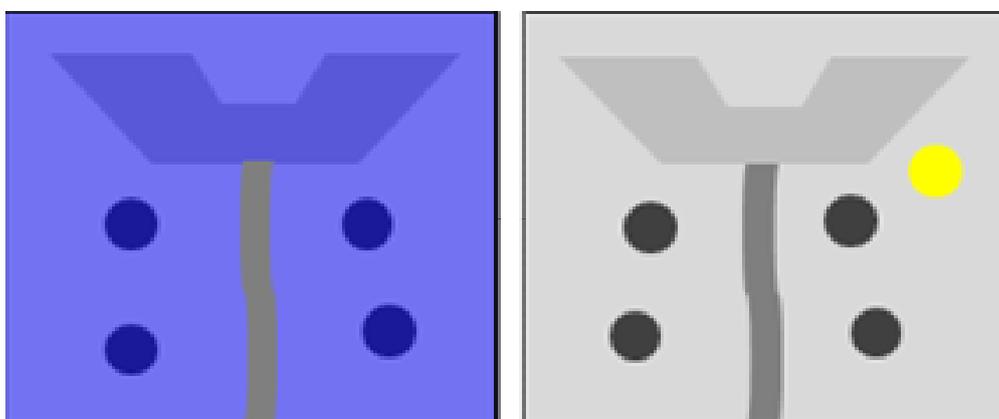


図 3.2 色温度が低い条件下で渓流が茶系に見えるイメージ

3.2. CCTV 画角内の水位・濁度データの解析

3.2.1. 芋川

使用した CCTV 映像の期間は、近年で出水の規模が最も大きかった、2019年10月12日～10月18日の台風第19号出水前後の1週間である(図3.3・図3.4)。この出水で濁度計は10月12日15時頃に値が検出され始め、13日深夜0時に最大濁度 $2.4 \times 10^{-4} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ を計測し、14日以降は徐々に減少していく。

本研究は、日中の映像(06:00～17:00)のみを解析対象とした。夜間時の映像は、長時間露光やハロゲン照明の影響を別途考慮する必要があり、本研究では解析対象外とした。

また、本研究では画像解析による出水時の濁度評価を行うにあたり、その比較のため、CCTV 画角内の水位計・濁度計のデータを使用した。なお、濁度計は式(6)に示す校正式を使用し、15分間隔で観測をしている。

$$C = 0.000952 \times V \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 C ：体積土砂濃度 (cm^3/cm^3)， V ：濁度計計測電圧 (V) である。濁度計はキャンベル社製の OBS-3+ を使用している。

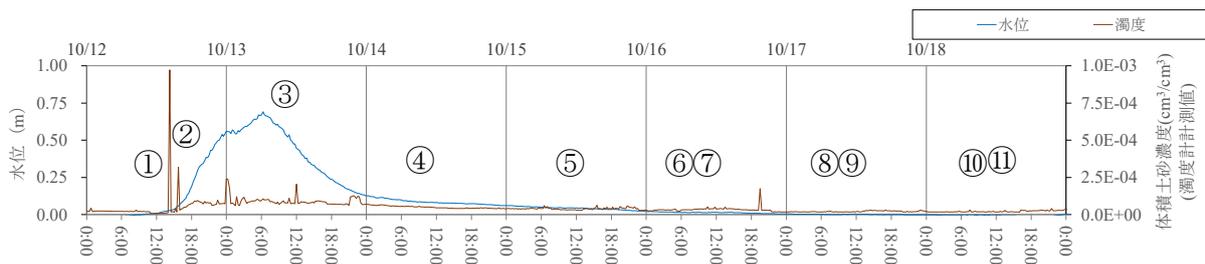


図 3.3 芋川の CCTV 画像と観測データ (2019/10/12-10/18)

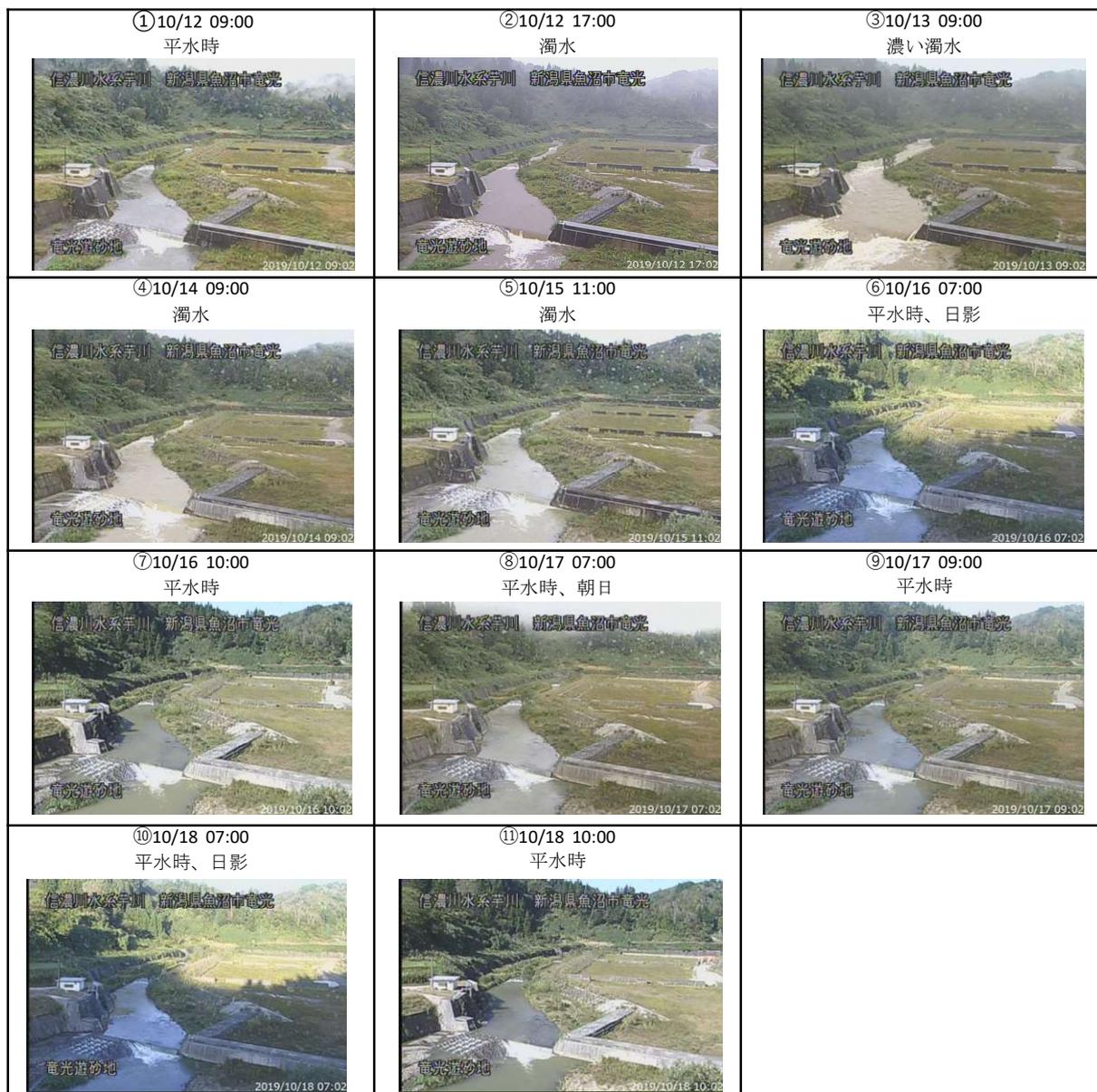


図 3.4 芋川の CCTV 画像 (2019/10/12-10/18)

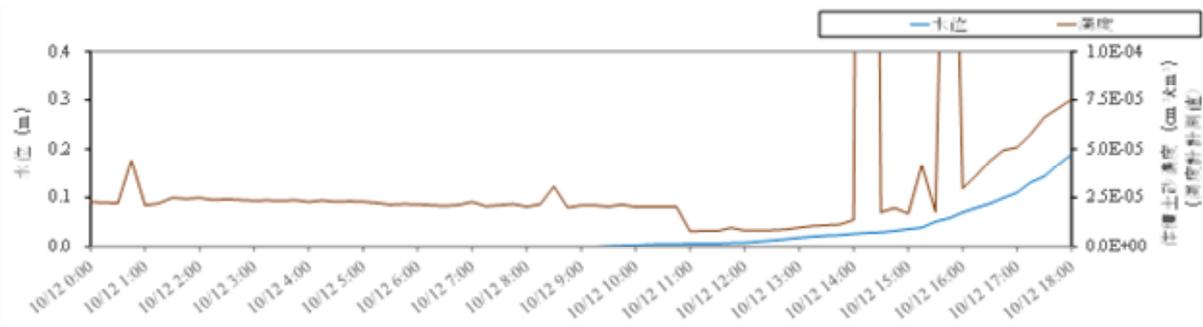


図 3.5 芋川の水位計・濁度計計測データ (2019/10/12)



図 3.6 芋川の CCTV 画像 (2019/10/12)

3.2.2. 内の川

(1) 溪流実験

土砂を流す溪流実験を実施した 2018 年 10 月 4 日（16:50～17:20）と 10 月 5 日（10:20～12:00）を含む CCTV 映像データを収集した。また、副堤の直下で濁水を採水し、試料分析に供して得られた SS 濃度分析結果を併記した。

粒度分析に供した濁水試料は、図 3.7に示す粒度分布であった。斜面土砂は中央粒径 0.008mm の粘土質シルトで、溪床土砂は中央粒径 0.025mm の砂混じりシルトであった。

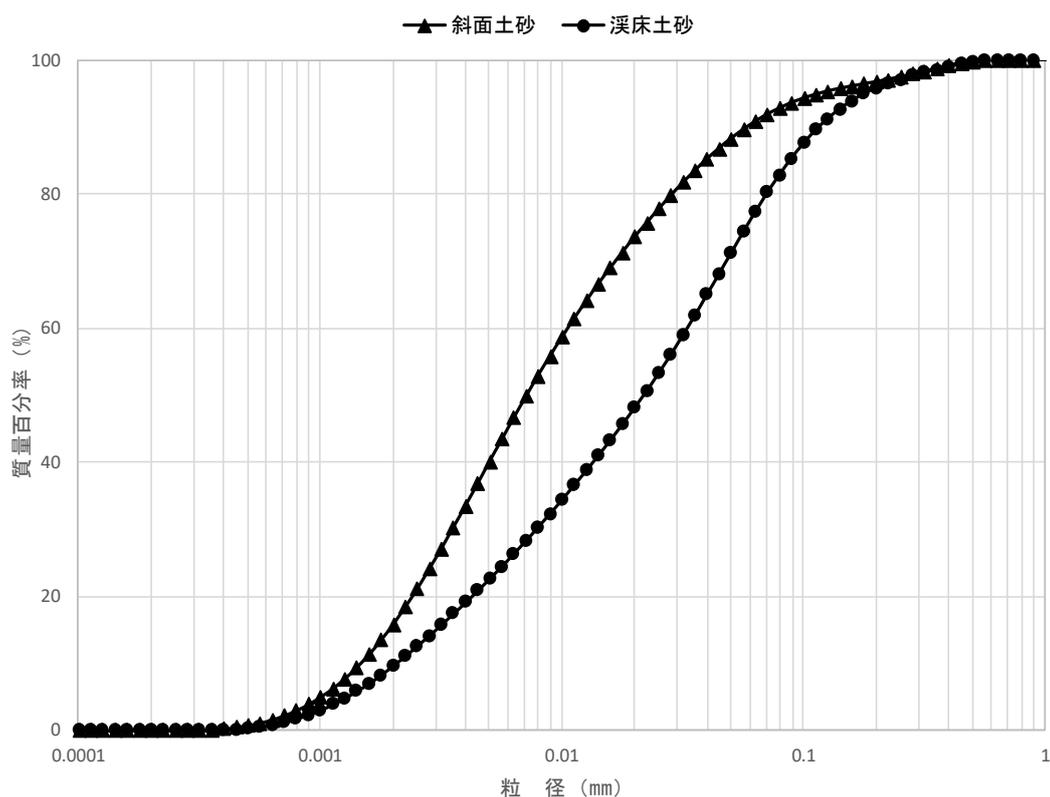
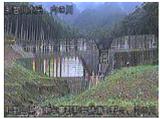


図 3.7 斜面土砂と溪床土砂による濁水の粒度分布

表 3.2 内の川の濁水発生時の映像と SS 分析結果

No.	供給土砂の種類	採水日時		照度	CCTVキャプチャ		SS分析	粒度分析
				LUX	original	zoom, trimming	mg/l	(レーザ)
1	斜面土砂	2018/10/4 16:50	夕方	-			3,020	実施
2	斜面土砂	2018/10/4 17:00	夕方	1425.5			2,980	実施
3	溪床土砂	2018/10/4 17:10	夕方	666.5			1,990	実施
4	溪床土砂	2018/10/4 17:20	夕方	338.7			2,040	実施
5	斜面土砂	2018/10/5 10:20	朝～昼	-			582	-
6	溪床土砂	2018/10/5 10:30	朝～昼	2132.5			546	-
7	斜面土砂	2018/10/5 11:50	昼	-			780	-
8	溪床土砂	2018/10/5 12:00	昼	6300			449	-
9	-	2018/9/4 12:00	昼	-			-	-
10	-	2017/10/22 19:00	夜間	-			-	-

(2) 2017年10月22日台風第21号

内の川において，2017年10月22日11:00～10月23日09:44のCCTV映像データを収集した。浮遊砂量が増加した10月22日20:00頃の映像（鮮明化処理未実施）を以下に示す。

時間雨量が最大50mm/hを超える豪雨により，画像が不鮮明で堰堤水通しの状況が視認しにくい映像である。

図3.8に雨量，図3.9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。

なお，内の川の濁度計による濁度計測値（NTU）と浮遊砂量（mg/l）は，式(7)に示す関係となっている。

$$C = 1.7383 \times C' - 96.586 \quad \dots\dots\dots$$

(7)

ここで，C：浮遊砂量（mg/l），C'：濁度計計測濁度（NTU）である。

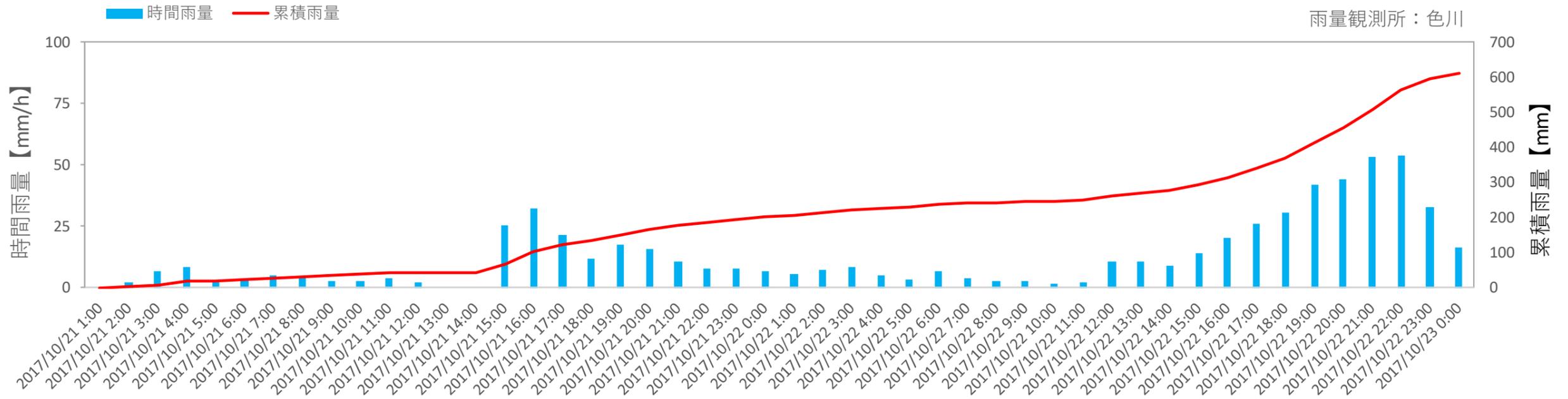


図 3.8 2017年10月22日台風第21号時の雨量

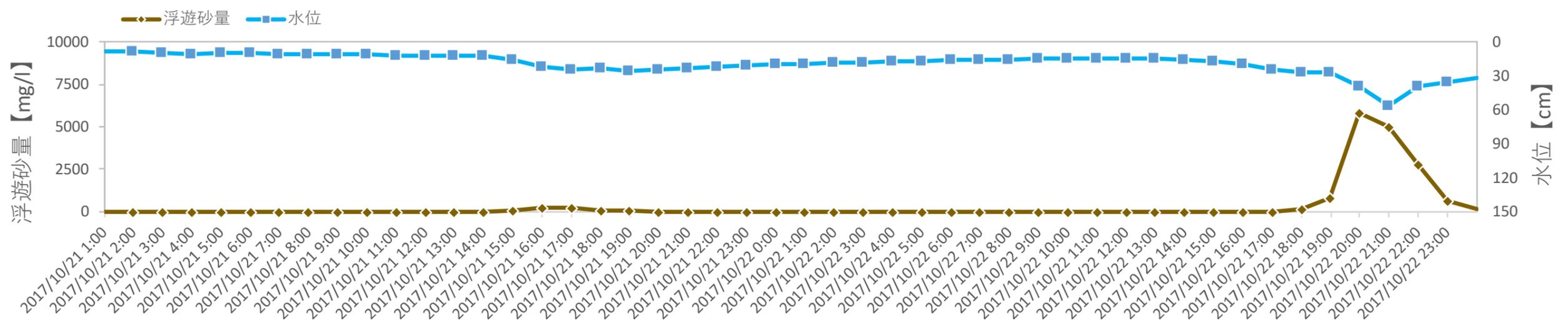


図 3.9 2017年10月22日台風第21号時の水位と浮遊砂量



図 3.10 2017年10月22日台風第21号時の豪雨時の夜間映像

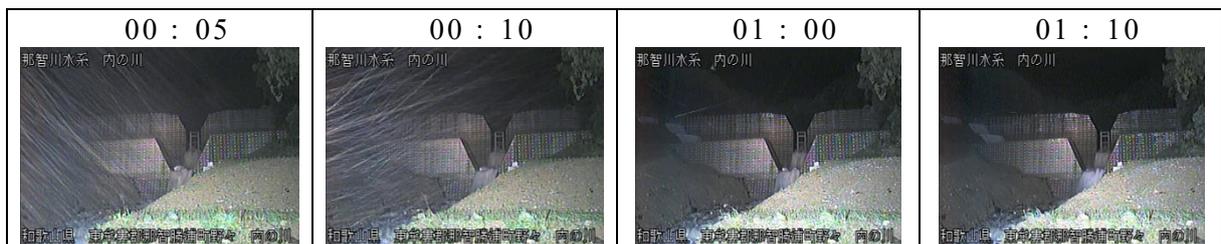


図 3.11 2017年10月23日台風第21号の豪雨終了後の夜間映像

3.3. 濁り評価結果，画像と濁度との相関関係の検討

3.3.1. 芋川

芋川の中小出水（2019年10月12日～18日）の画像から，前述の手法を用いて解析し，溪流表面の画素情報の時間的変化を分析した。芋川では画像解析結果と実測の濁度データを比較分析した。

(1) 濁水と画素情報の特徴（2019年10月の出水）

図 3.12に 2019年10月12日～18日の画像，図 3.13に流砂観測データ（水位・濁度），図 3.14に同時刻の映像データ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。他河川における既往報告事例（五十嵐ら，2017，2019a，2019b）と同様に，芋川においても濁水が発生すると水面は茶系を呈し，RGBのうちR値が相対的に高くなり，特に13日の濁水ではその傾向が顕著に表れた。16日以降は水位と濁度が12日午前中と同程度に低下すると，B値が相対的に高くR値は低くなり，RGB値も12日の濁水発生前と同様の状態に戻る傾向が認められた。また，16日と18日の水面が日影になる朝の時間帯では水面がやや暗い青みを帯び，輝度値Lが一時的に150以下へ低下し，B値が相対的に高くなる傾向が示された。17日の早朝に朝日が直射すると，水面の映像はやや茶系を帯び一時的にR値が相対的に高くなり，濁水発生時と類似する特徴が認められた。

RGBや輝度値Lは日照条件による輝度の時間変動が100～230程度ある一方で，RGB単位ベクトルの成分をみると rgb はそれぞれ0.42～0.75程度の変動で，12日～15日の曇天の濁水発生時間中に限ると0.53～0.62の範囲での変動に留まり，輝度変化の影響を軽減した解析値になっている。濁水発生前の12日09:00の濁度計計測値は $2.1 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ ，RGB単位ベクトルは $(r,g,b) = (0.573,0.564,0.595)$ と b 値が相対的に高く，次いで r 値が高い値を示し，濁水発生前の時間帯は概ね一定値を保った。濁水発生後の12日17:00の濁度計計測値は $5.1 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ ，RGB単位ベクトルは $(r,g,b) = (0.591,0.575,0.565)$ と r 値が相対的に高く，次い

で g 値が高い値を示し、茶系を呈する特徴を呈した。水位ピーク時の 13 日 06:15 の濁度計計測値は $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, RGB 単位ベクトルは $(r,g,b) = (0.606,0.577,0.548)$ となり, 12 日より r 値と g 値が増加し, b 値が低下した。水位が 0.1m 以下に低下した 14 日 09:00 の濁度計計測値は $5.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, RGB 単位ベクトルは $(r,g,b) = (0.592,0.581,0.558)$ となり, 12 日 17:00 の濁水と同程度の値に戻った。さらに水位が 0.05m 以下に低下した 15 日 09:00 の濁度計計測値は $3.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, RGB 単位ベクトルは $(r,g,b) = (0.576,0.576,0.581)$ となり, 14 日より r 値と g 値が低下し b 値が増加した。水位が 0.01m 以下に低下した 18 日 10:00 の濁度計計測値は $1.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, RGB 単位ベクトルは $(r,g,b) = (0.558,0.572,0.601)$ となり, 15 日よりさらに r 値と g 値が低下し b 値が増加した。

濁水が発生した日である 12 日の出水を細かく表示した結果を図 3.15 ~ 図 3.17 に示す。同 15 時ごろに濁度計により流砂が計測され始め, 体積土砂濃度が上昇している (図 3.16)。これは図 3.17 の r が相対的に大きくなる傾向と一致する。また図 3.16 では, 12 日 14:15 に $9.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (1 データのみ), 同 15:45 に $3.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (1 データのみ) でスパイク状に突出した値が出ているが, 14:12 と 15:42 およびその前後時間の溪流の状況や, 画像を解析した結果に大きな変化は認められず異常値と判断される (図 3.16, 図 3.17)。11:00 に濁度の低下が認められるが, 濁度計に付着した汚れが水位増加時に洗われたことによるものか詳細は不明である。

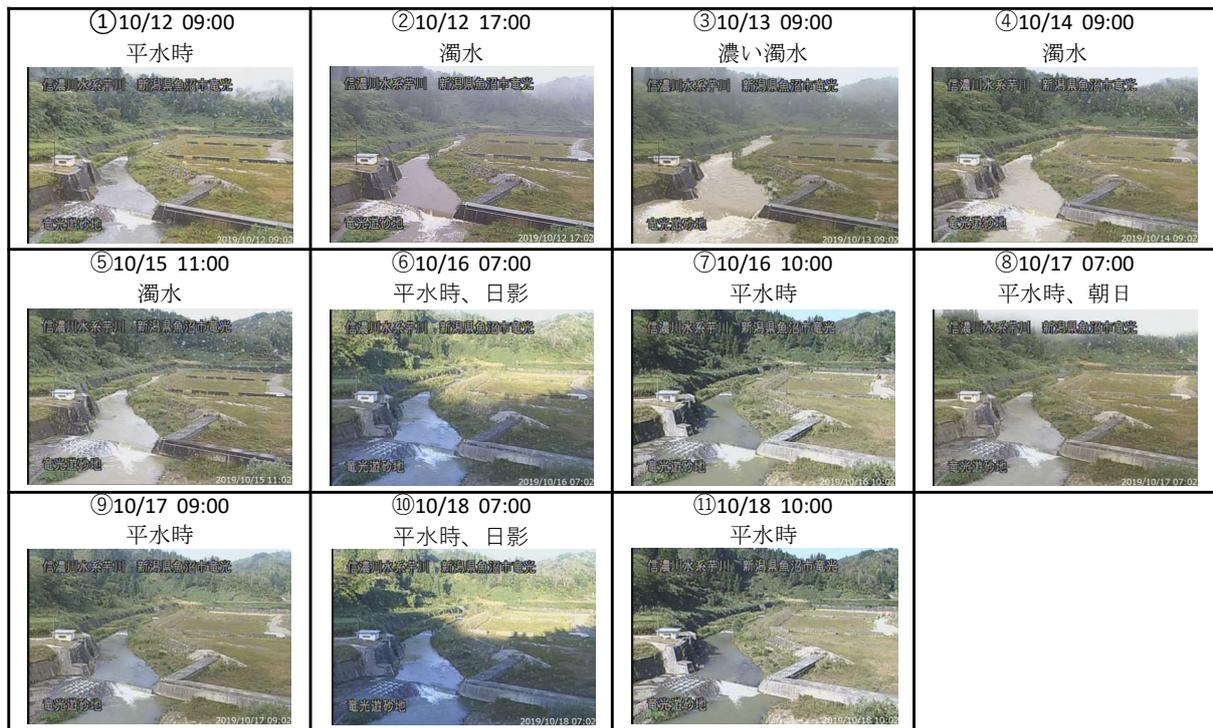


図 3.12 芋川の CCTV 映像

表 3.3 芋川の CCTV 映像の特徴

No.	年月日	時間	映像から見られる河川の特徴
①	2019/10/12	06:00-15:00	平水時，濁りなし。
②		15:00-17:00	濁りが発生。
③	2019/10/13	06:00-17:00	水位が増加し，終日濃く濁っている。
④	2019/10/14	06:00-17:00	水位が低下し，比較的濁りが収まる。
⑤	2019/10/15	06:00-17:00	前日14日よりさらに濁りが収まる。
⑥	2019/10/16	6:00-09:00	天候が回復する。水面が日影になる。
⑦		9:00-17:00	濁りは収まり，終日晴天が続く。
⑧	2019/10/17	6:00-07:30	水面に朝日が照らされる。
⑨		07:30-17:00	濁りは収まり，終日晴天が続く。
⑩	2019/10/18	6:00-09:00	水面が日影になる。
⑪		9:00-17:00	濁りは収まり，終日晴天が続く。

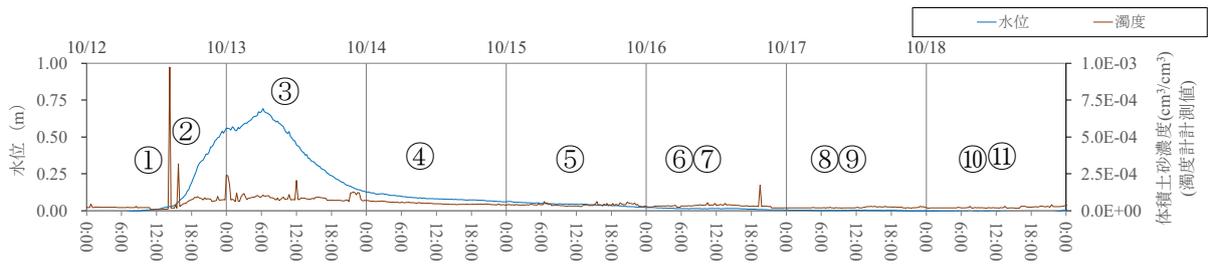


図 3.13 芋川の CCTV 画像と観測データ (2019/10/12-10/18)

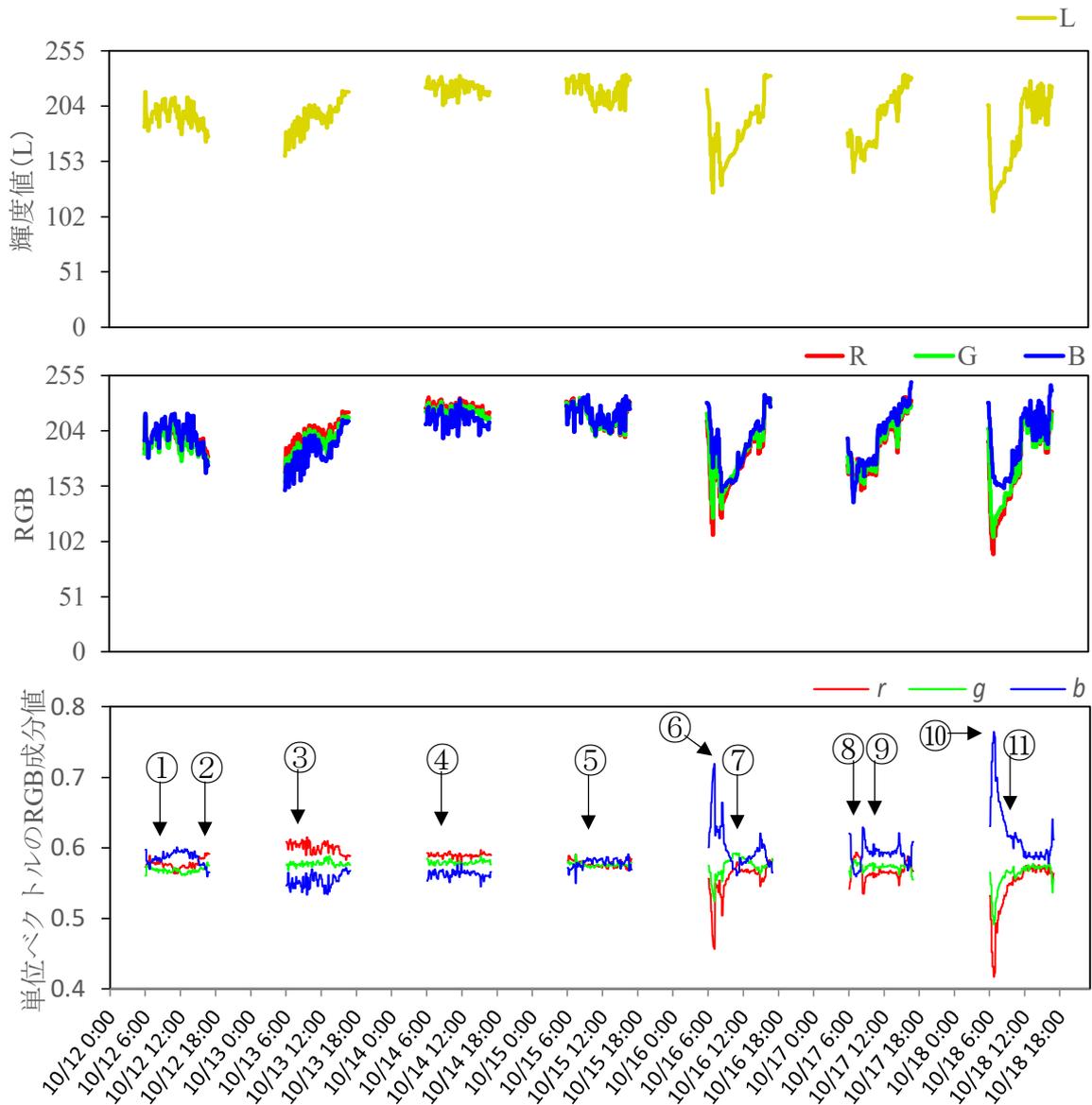


図 3.14 芋川 CCTV の輝度値 (上) ・ RGB 値 (中) ・ RGB 単位ベクトル (下) の時間変化 (2019/10/12-10/18)

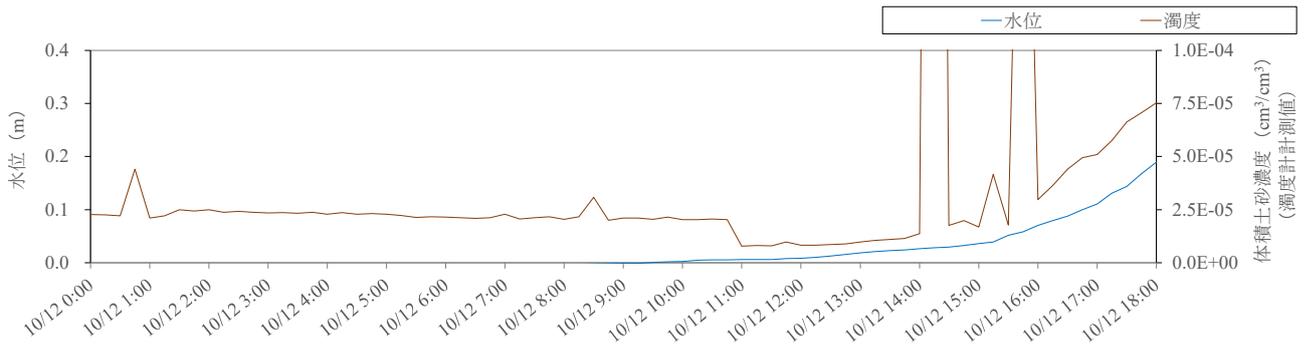


図 3.15 芋川の水位計・濁度計計測データ (2019/10/12)

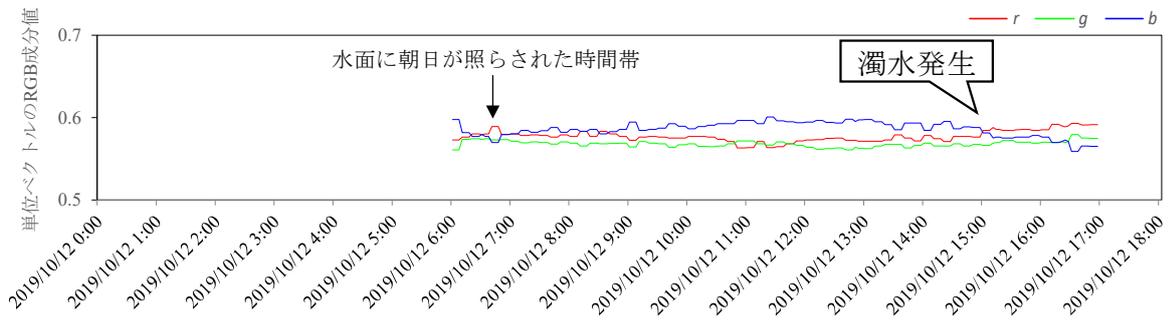


図 3.16 芋川の RGB 単位ベクトルの時間変化 (2019/10/12)



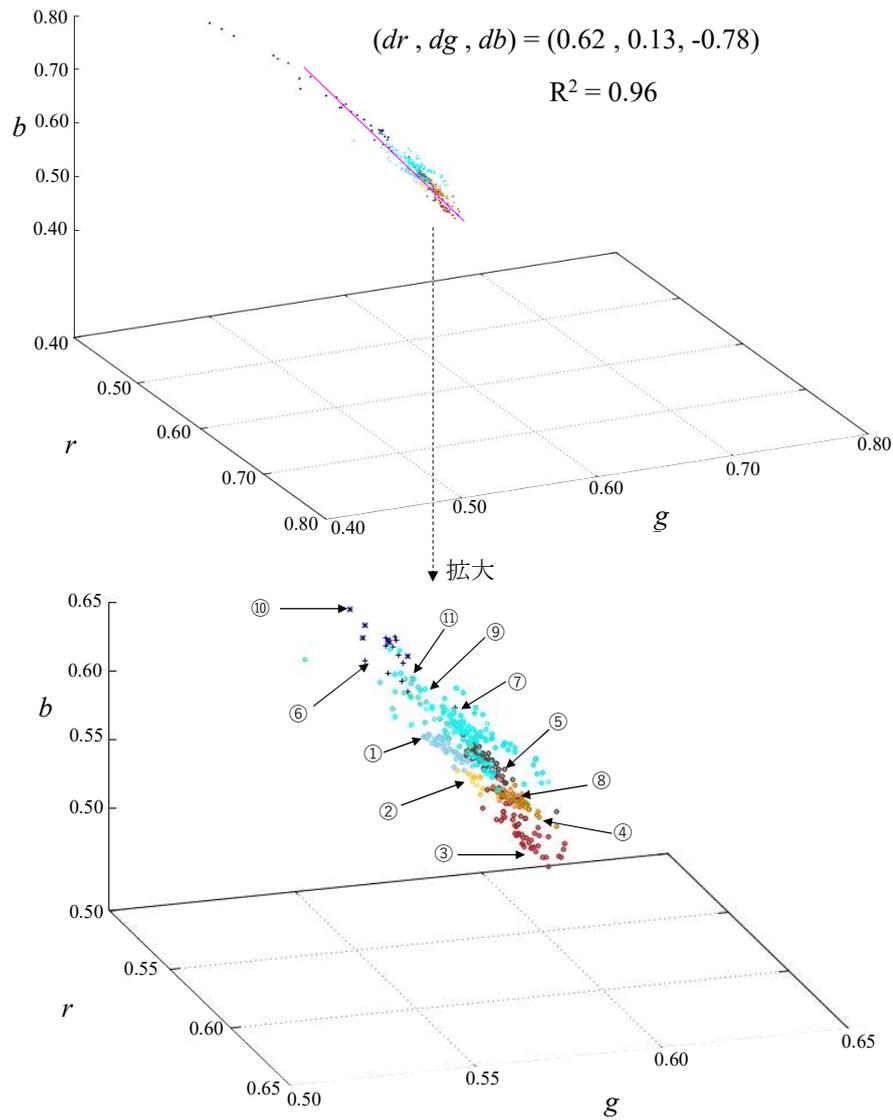
図 3.17 芋川の CCTV 画像 (2019/10/12)

(2) RGB 単位ベクトルを用いた濁水の立体分布と連続性

図 3.18に 2019 年 10 月 12 日～18 日の RGB 値の単位ベクトルを 3 次元立体表示させた図を示す。

10 月 12 日に着目すると、06:00～15:00 の濁水発生前では、 r 値が 0.56～0.58 と相対的に小さく、 b 値が 0.58～0.60 と相対的に大きい。15:00～17:00 の濁水発生後では、 r 値が 0.58～0.60 と増加し、 b 値が 0.56～0.58 と減少した。翌日 13 日 06:00～17:00 の最も高濁度の時間帯では、前日より r 値が 0.58～0.62 と増加し、 b 値が 0.53～0.57 とさらに減少した。翌々日の 14 日 06:00～17:00 の濁度が平均 $5.0 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 程度に低下した時間帯では、 r 値が 0.58～0.60 と低下し、 b 値が 0.55～0.58 と増加し、12 日 15:00～17:00 の位置の方向へ戻る値となった。15 日 06:00～17:00 の濁度が平均 $4.0 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 程度にさらに低下した時間帯では、 r 値が 0.57～0.59 に低下、 b 値が 0.55～0.59 に増加し、 g 値が 0.57～0.59 と (r,g,b) は同程度の値になった。17 日 07:30～17:00 と 18 日 09:00～17:00 の濁度が平均 $2.0 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 程度に低下した時間帯では、 r 値が 0.53～0.58 と低下し、 b 値が 0.57～0.64 と増加した。16 日と 18 日の水面が日影になる 06:00～17:00 の時間帯では、 r 値が 0.42～0.56 と低下し、 b 値が 0.60～0.77 と増加した。17 日 06:00～07:30 の朝日が照射する時間帯では、 r 値が 0.58～0.59、 g 値が 0.57～0.58、 b 値が 0.56～0.57 となり、12 日と 14 日の濁水発生時と重なる位置の分布となった。

全ての点群データは位置ベクトル (r,g,b) であり厳密には半径 1 とする単位球面上に分布するが、局所的には直線状に分布するものとし、最小二乗法により近似直線を算出し、濁水発生前から濁水発生時へ至る近似直線の方角ベクトル $(dr,dg,db) = (0.62,0.13,-0.78)$ を導出した。図 3.18 に示されるように、濁水発生前～濁水発生後の過程が、近似直線に沿って概ね連続する傾向で分布する結果が得られ、既往報告（五十嵐ら、2019a）と同様の傾向を示した。



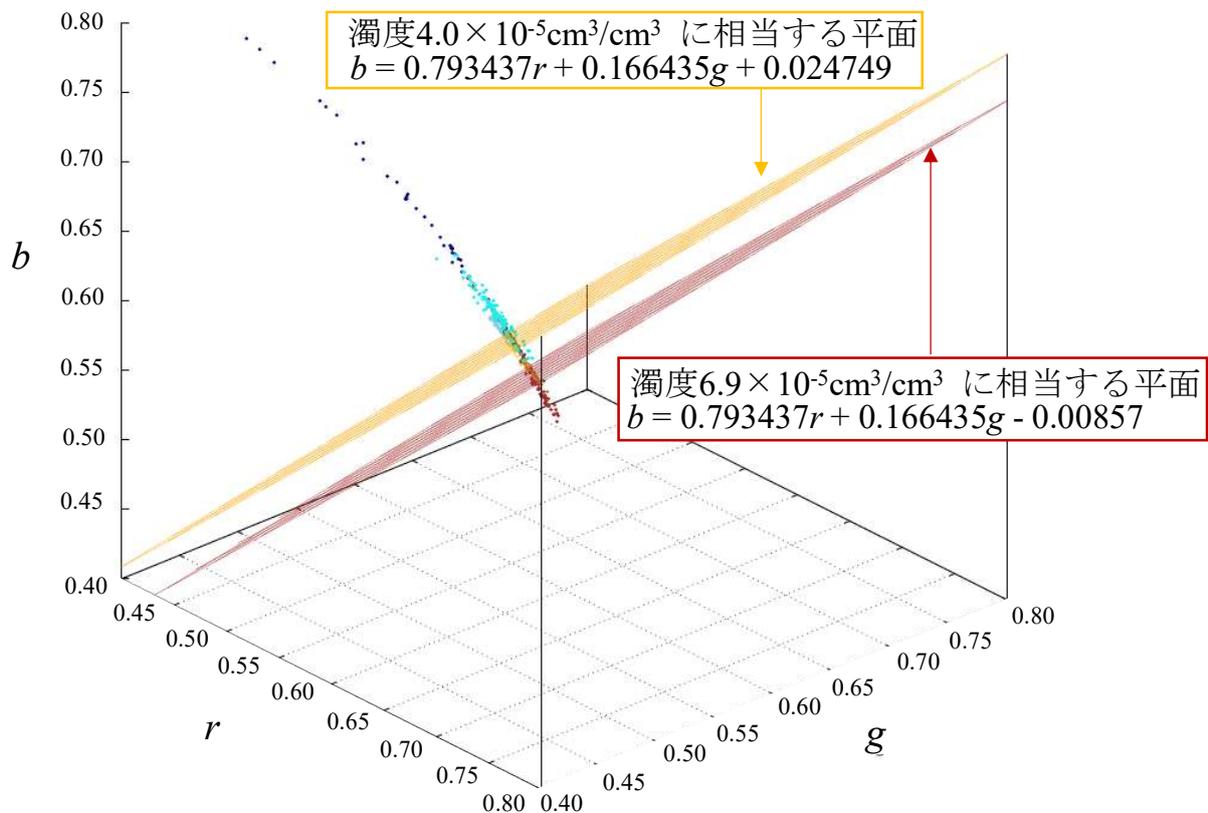
No.	年月日	時間	河川の状況	濁度 (cm^3/cm^3) ※濁度計計測値			凡例
				最小	最大	平均	
①	2019/10/12	06:00 - 15:00	平水時	0.000008	0.000023	0.000016	○
②		15:00 - 17:00	濁水	0.000017	0.000051	0.000033	○
③	2019/10/13	06:00 - 17:00	濁水	0.000069	0.000205	0.000094	○
④	2019/10/14	06:00 - 17:00	濁水	0.000043	0.000058	0.000049	○
⑤	2019/10/15	06:00 - 17:00	濁水	0.000031	0.000054	0.000038	○
⑥	2019/10/16	06:00 - 09:00	平水時、日影	0.000032	0.000038	0.000034	+
⑦		09:00 - 17:00	平水時	0.000033	0.000040	0.000038	○
⑧	2019/10/17	06:00 - 07:30	平水時、朝日	0.000019	0.000024	0.000022	▲
⑨		07:30 - 17:00	平水時	0.000018	0.000030	0.000023	○
⑩	2019/10/18	06:00 - 09:00	平水時、日影	0.000018	0.000030	0.000021	×
⑪		09:00 - 17:00	平水時	0.000017	0.000029	0.000020	○

図 3.18 芋川の RGB 単位ベクトルの 3 次元分布 (2019/10/12-10/18)

(図の点群を視覚的に見やすく表示させるため、凡例の指定色は任意に設定している。)

(3) 濁度評価

芋川における濁水発生前から濁水発生時へ至る近似直線の方向ベクトル $(dr, dg, db) = (0.62, 0.13, -0.78)$, 2019年10月12日の濁り開始時付近の濁度 $4.0 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ の位置ベクトル $(r, g, b) = (0.588, 0.569, 0.575)$, 2019年10月13日の濁度最小値 $6.9 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ の位置ベクトル $(r, g, b) = (0.598, 0.574, 0.559)$ から, 式(5)により求めた平面を図 3.19に図示する。濁度に応じて変動する位置ベクトル (r, g, b) の点群に対し, 直交する平面が作成できた。この平面は濁度に応じて段階的な設定が可能で, これら平面を境界にして位置ベクトル (r, g, b) から濁度が評価可能となる。また, 様々な濁度でキャリブレーションすることで, 位置ベクトル (r, g, b) と濁度との関係を細かく設定することも可能である。しかしながら, $4.0 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ の位置ベクトル $(0.588, 0.569, 0.575)$ と $6.9 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ の位置ベクトル $(0.598, 0.574, 0.559)$ から, 方向ベクトル $(0.62, 0.13, -0.78)$ を持つ近似直線にそれぞれ下した垂線との交点 p_0 同士の2点間距離は0.02829である。方向ベクトル $(0.62, 0.13, -0.78)$ に沿って, 8bitのRGB値が1変化するとき, 輝度値Lが100~255の範囲で0.004~0.010の移動距離になるため, この2点間距離0.02829に対し理論上は3~7段階の分解能, すなわち $4.0 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{cm}^3 \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 間隔の濁度評価になる。従って, 画像解析による濁度の定量的評価の精度は粗く, 大中小レベルでの定性的な濁度評価となる。なお, 土石流のような高濁度の流体を検知するにあたっての検討結果は, 第4章で記載している。



No.	年月日	時間	河川の状況	濁度 (cm ³ /cm ³) ※濁度計計測値			凡例
				最小	最大	平均	
①	2019/10/12	06:00 - 15:00	平水時	0.000008	0.000023	0.000016	○
②		15:00 - 17:00	濁水	0.000017	0.000051	0.000033	○
③	2019/10/13	06:00 - 17:00	濁水	0.000069	0.000205	0.000094	○
④	2019/10/14	06:00 - 17:00	濁水	0.000043	0.000058	0.000049	○
⑤	2019/10/15	06:00 - 17:00	濁水	0.000031	0.000054	0.000038	○
⑥	2019/10/16	06:00 - 09:00	平水時、日影	0.000032	0.000038	0.000034	+
⑦		09:00 - 17:00	平水時	0.000033	0.000040	0.000038	○
⑧	2019/10/17	06:00 - 07:30	平水時、朝日	0.000019	0.000024	0.000022	▲
⑨		07:30 - 17:00	平水時	0.000018	0.000030	0.000023	○
⑩	2019/10/18	06:00 - 09:00	平水時、日影	0.000018	0.000030	0.000021	×
⑪		09:00 - 17:00	平水時	0.000017	0.000029	0.000020	○

図 3.19 芋川の濁度指標となる平面の 3 次元表示

(図の点群を視覚的に見やすく表示させるため、凡例の指定色は任意に設定している。)

3.3.2. 内の川

(1) 斜面土砂による濁水の解析結果

図 3.20と図 3.21に、収集した溪流実験中の CCTV カメラの記録映像を、図 3.22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 3,020mg/l の斜面土砂が供給されると、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 2,980mg/l の斜面土砂が供給されると、RGB 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、 (r,g,b) 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。



図 3.20 斜面土砂を用いた溪流実験時の映像

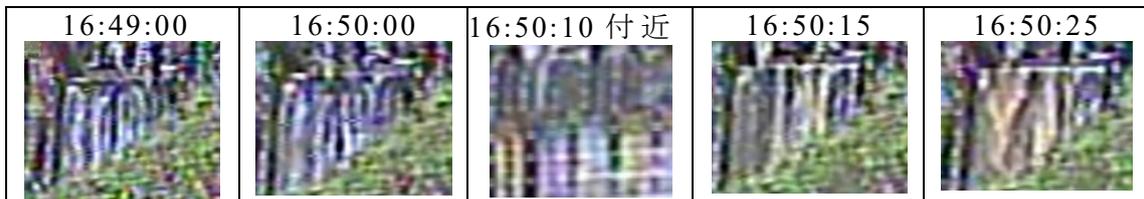


図 3.21 斜面土砂を用いた溪流実験時の映像キャプチャ

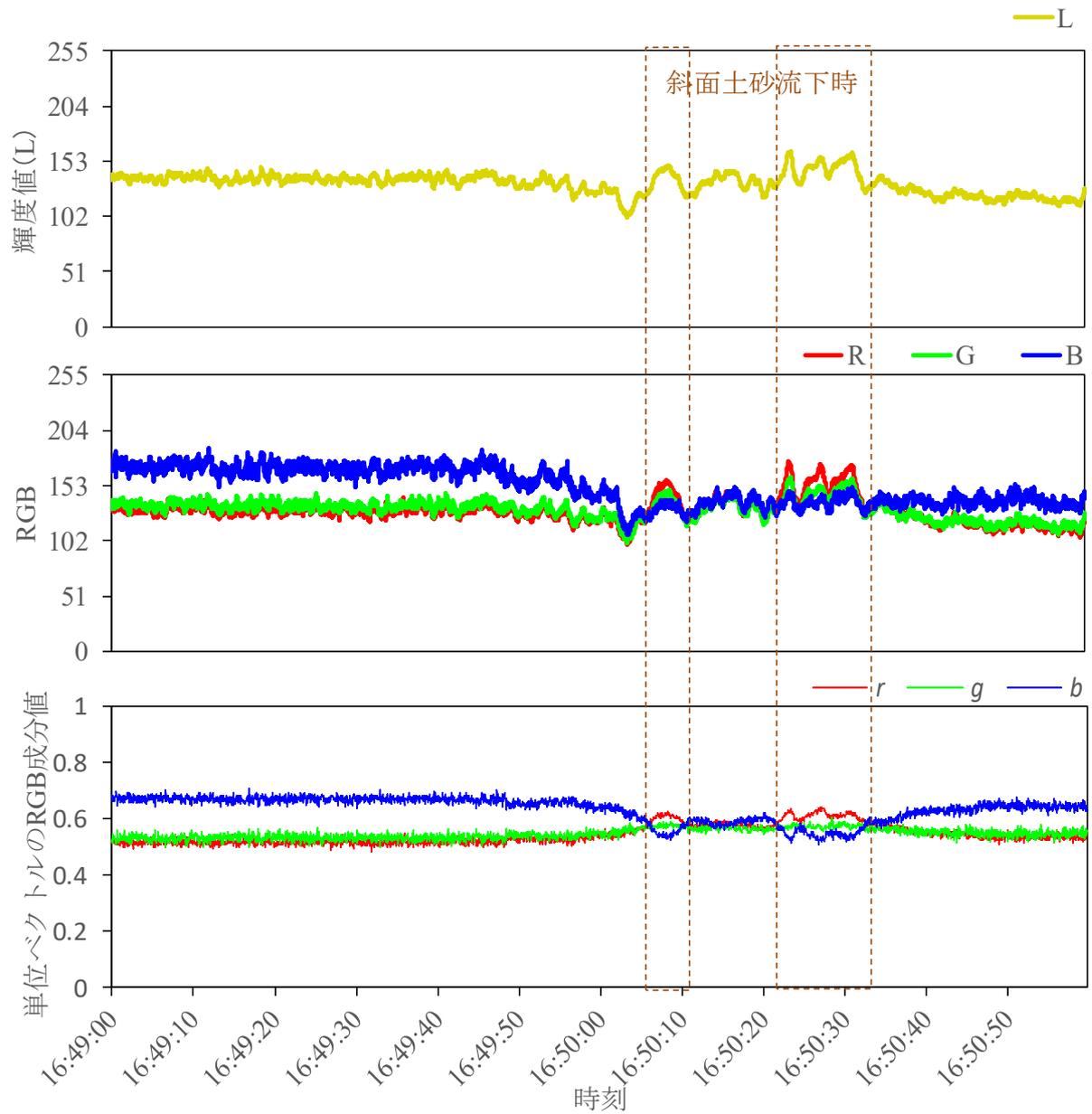


図 3.22 斜面土砂による濁水解析結果：輝度値（上）・RGB 値（中）・
単位ベクトルの RGB 成分値（下）

(2) 溪床土砂による濁水の解析結果

図 3.23と図 3.24に、収集した溪流実験中の CCTV カメラの記録映像を、図 3.25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 1,990mg/l の溪床土砂が供給されると、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 *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。



図 3.23 溪床土砂を用いた溪流実験時の映像

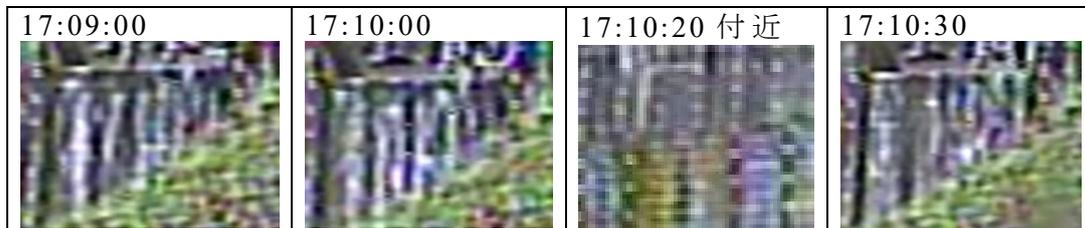


図 3.24 溪床土砂を用いた溪流実験時の映像キャプチャ

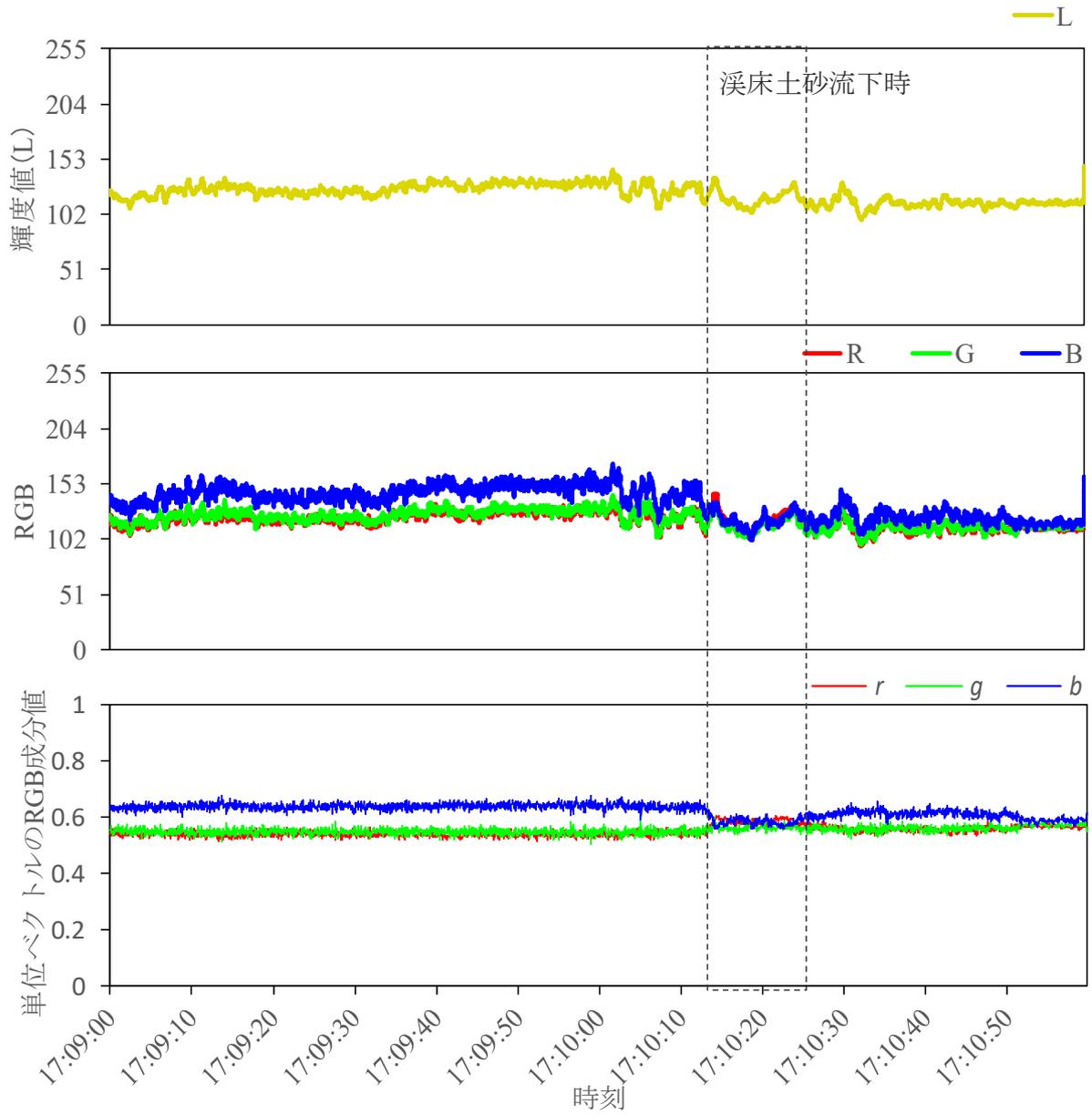


図 3.25 溪床土砂による濁水解析結果：輝度値（上）・RGB 値（中）・単位ベクトルの RGB 成分値（下）

(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3.26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3.26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3.27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3.28に雨量、図3.29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3.30に鮮明なフレームのみを、図3.31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、 rg 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、 $b > g \doteq r$ 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3.22、図3.25、図3.31）。

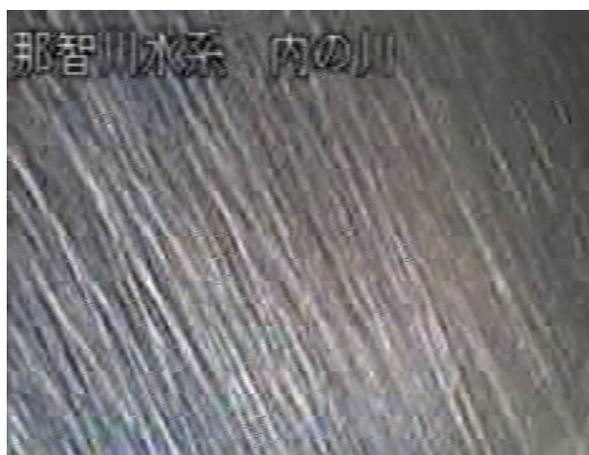


図 3.26 2017年10月22日台風21号時の映像

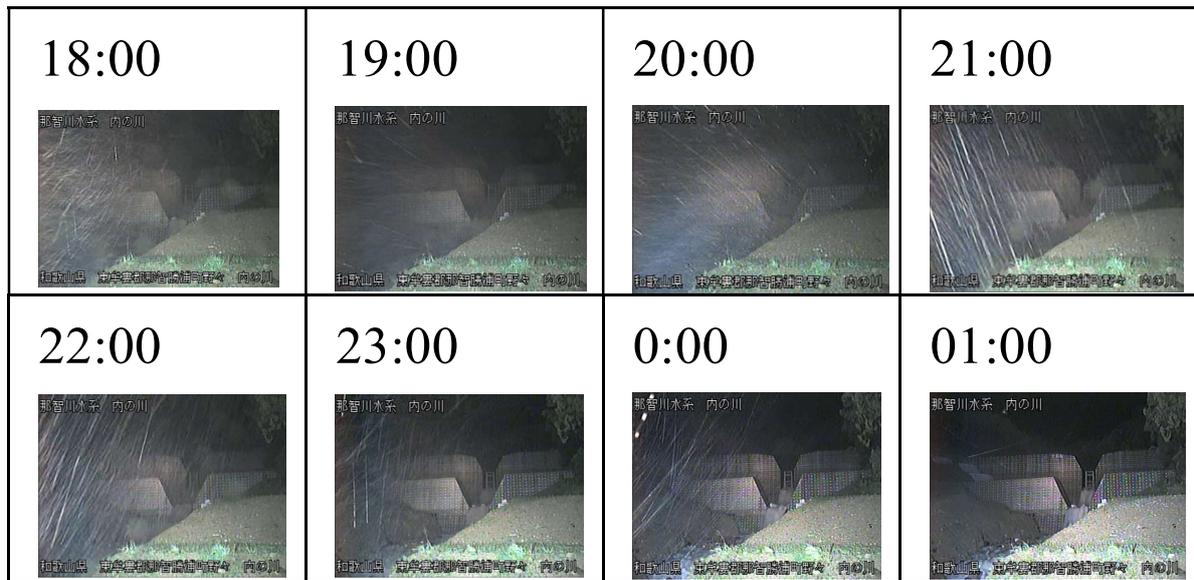


図 3.27 溪床土砂を用いた溪流実験時の映像

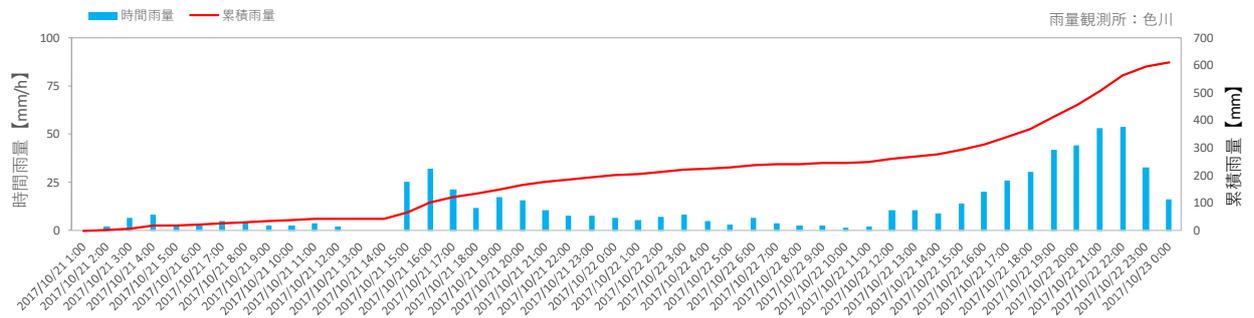


図 3.28 2017年10月22日台風21号時の雨量

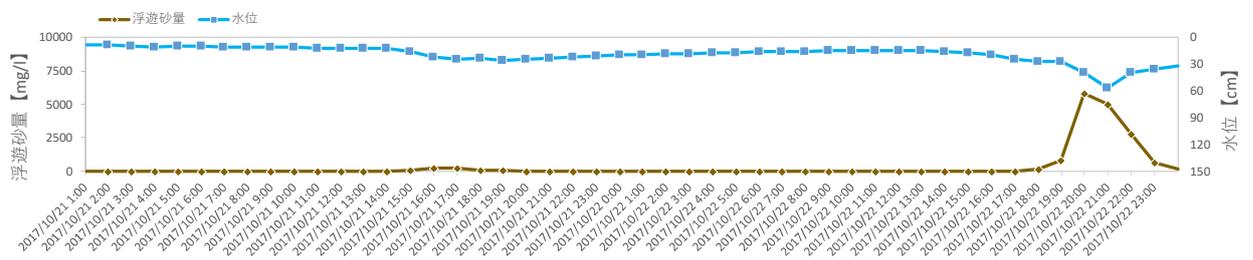


図 3.29 2017年10月22日台風21号時の水位と濁度

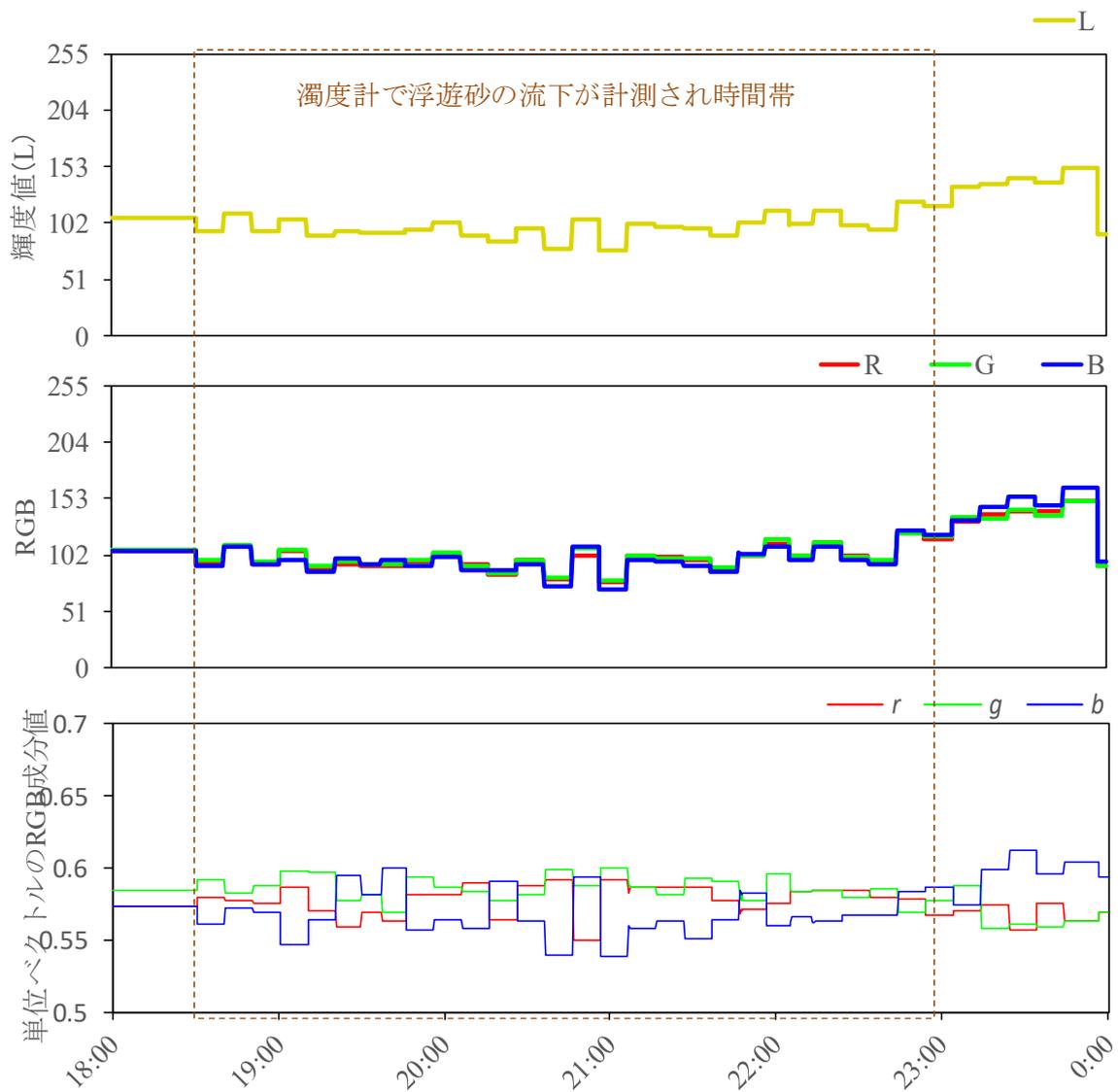


図 3.30 2017年10月22日台風21号時(18時~24時)の解析結果：
輝度値(上)・RGB値(中)・単位ベクトルのRGB成分値(下)

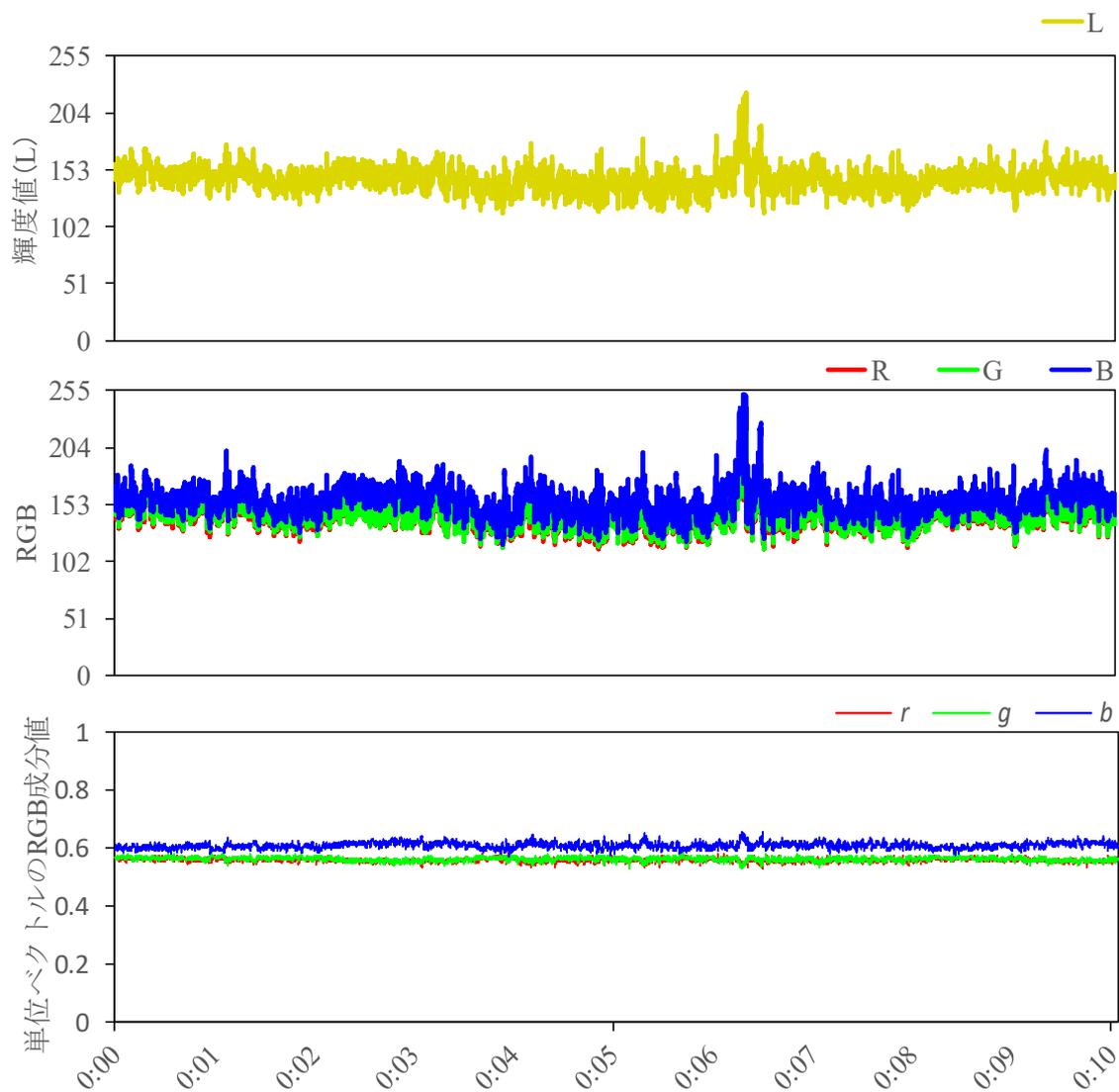


図 3.31 2017年10月22日台風21号時(0:00~0:10)の解析結果：輝度値(上)・RGB値(中)・単位ベクトルのRGB成分値(下)

(4) 粒径分布の分析結果

図 3.32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。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（藤田ら、2003；田中ら、2015）を支持する結果が得られた。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 $R \doteq G \doteq B$ ($r \doteq g \doteq b$) となった。

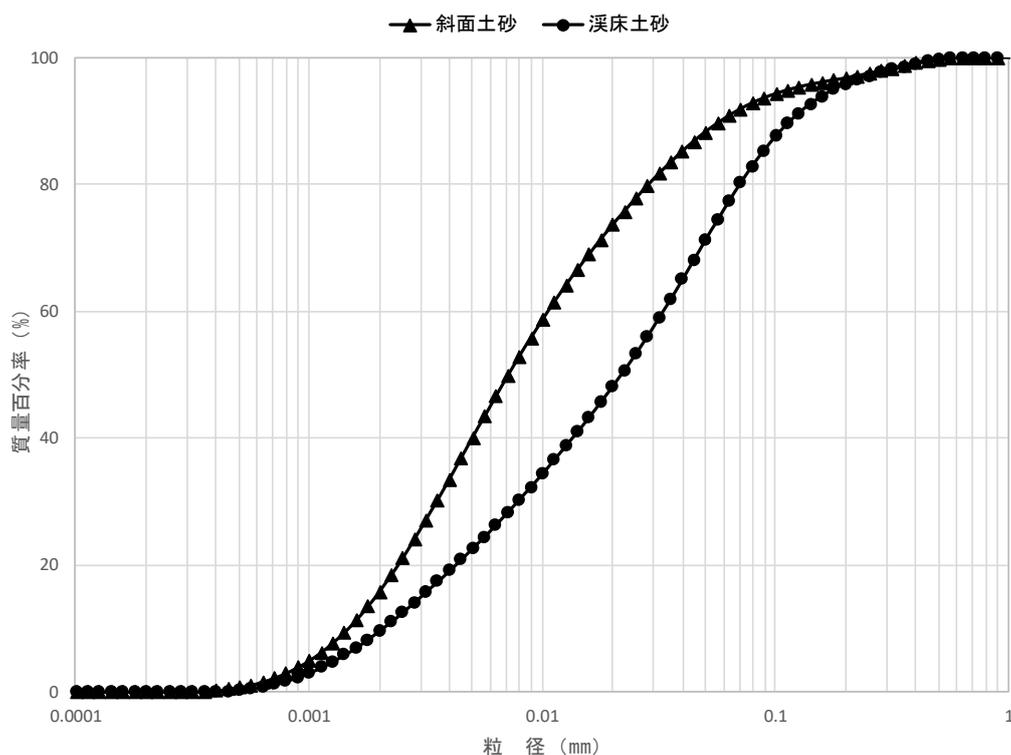


図 3.32 斜面土砂と溪床土砂による濁水の粒度分布

(5) RGB 単位ベクトルを用いた濁水の立体分布

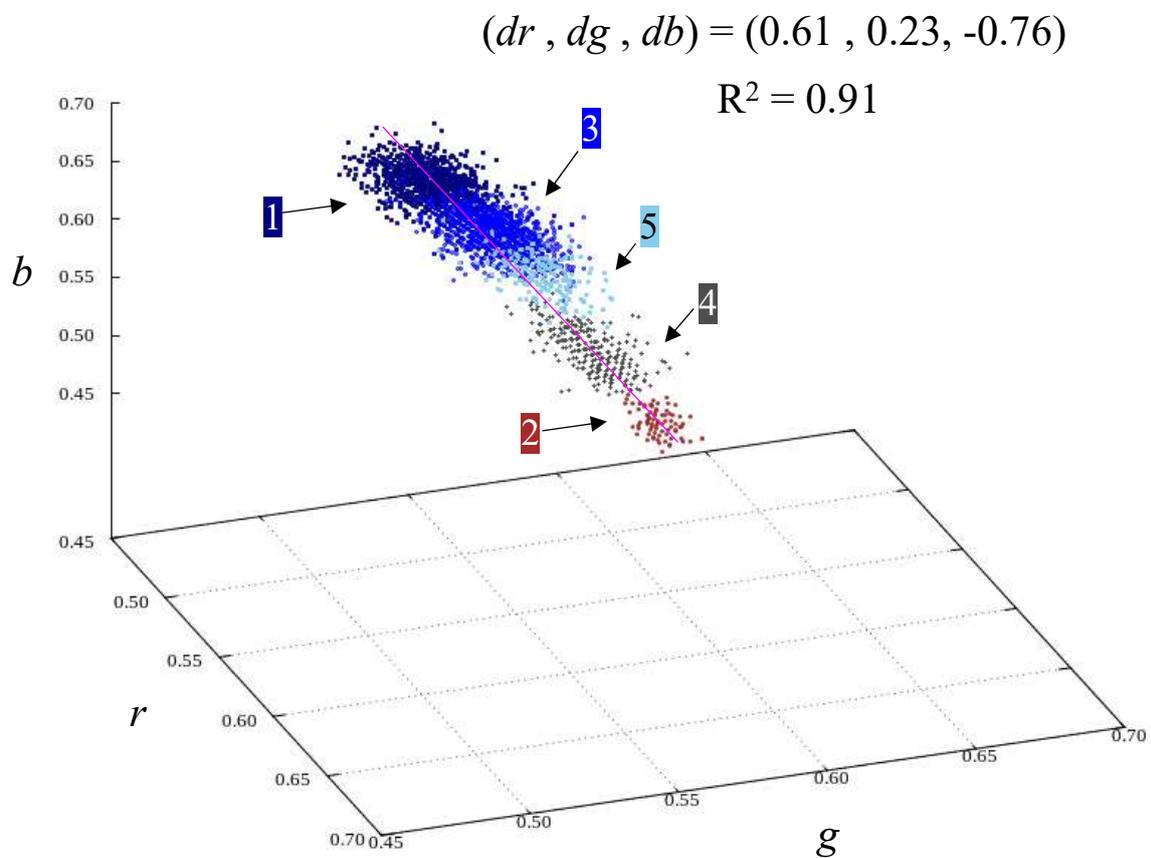
図 3.33・図 3.34・図 3.35に 2017 年 10 月 22 日～10 月 23 日及び 2018 年 10 月 4 日の RGB 値の単位ベクトルを 3 次元立体表示させた図を示す。

2018 年 10 月 4 日の溪流実験の結果に着目すると、16:49～16:50 の濁水発生前では、 r 値が 0.50～0.54 と相対的に小さく、 b 値が 0.64～0.69 と相対的に大きい。16:50 は平均して 3,000mg/l の斜面土砂が流下している時間帯で、 r 値が 0.60～0.62 と増加し、 b 値が 0.53～0.56 と減少した。16:50～17:10 は、斜面土砂内の細粒成分が徐々に流れきり、比較的粗粒の残土が流下している時間帯で、 r 値が 0.52～0.56 と減少し、 b 値が 0.61～0.68 と増加し、土砂投入前の位置ベクトルに戻る分布となった。17:10 の平均して 2,015mg/l の溪床土砂が流下している時間帯では、 r 値が 0.56～0.60、 g 値が 0.54～0.59、 b 値が 0.56～0.61 となり、 rgb それぞれが同程度の値になった。17:10 以降は、溪床土砂内の細粒成分が徐々に流れきり、16:50～17:10 の時間帯と同様に比較的粗粒の残土が流下している時間帯であるが、 r 値が 0.54～0.57 と減少し、 b 値が 0.59～0.64 と増加し、再び土砂投入前の位置ベクトルに戻る分布となった。

2017 年 10 月 22 日～23 日の台風第 21 号の夜間降雨時の濁水の結果に着目すると、22 日 18:30～23:00 の濁水発生時では、濁度計で最大 6,000mg/l ほどの流砂が計測され、 r 値が 0.55～0.59、 g 値が 0.58～0.60、 b 値が 0.56～0.59 となり、 b 値が大きくなるフレームも混じったが、相対的に rg 値が高い傾向を示した。23 日 00:00～00:10 の濁りが収まり、濁度計が 100mg/l 未満の値になると、 r 値が 0.55～0.57、 g 値が 0.55～0.58、 b 値が 0.58～0.63 となり、 rg 値が低下し b 値が増加した。

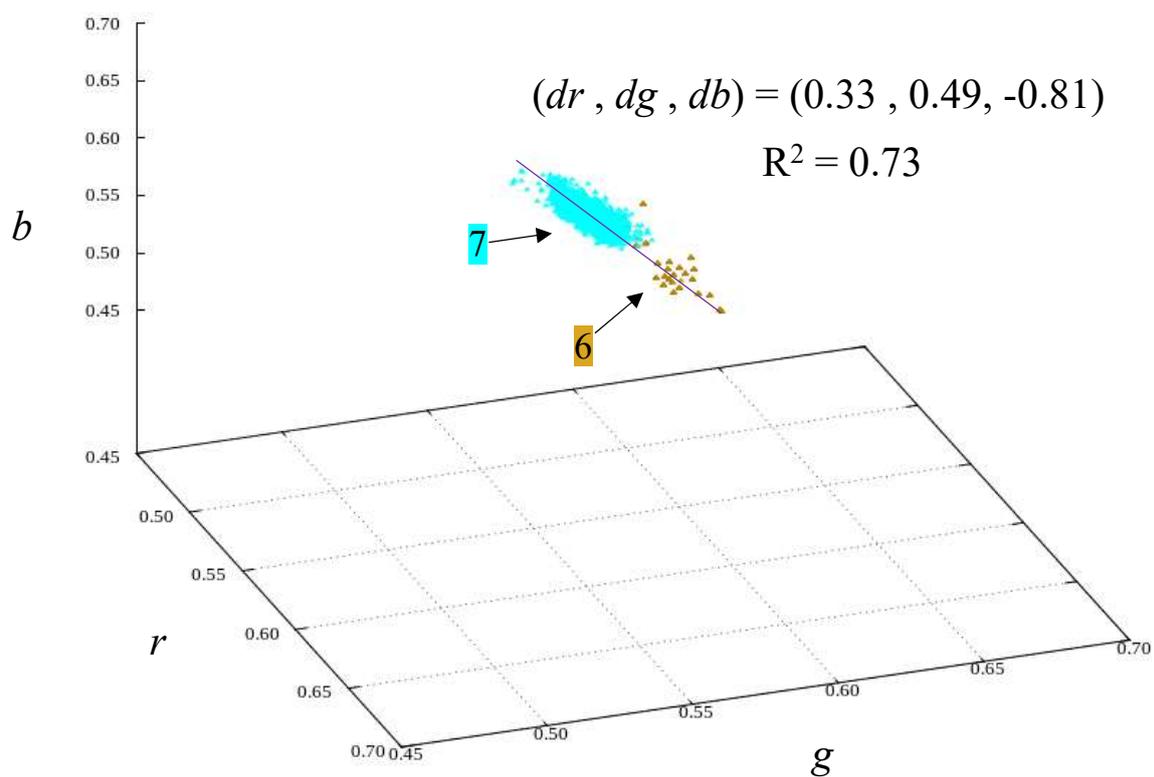
内の川においても芋川同様に、位置ベクトルの点群を局所的には直線状に分布するものとし、最小二乗法により近似直線を算出し、濁水発生前から濁水発生時へ至る近似直線の方法ベクトル (dr, dg, db) を導出した。2018 年 10 月 4 日の土砂を流す溪流実験では、 $(dr, dg, db) = (0.61, 0.23, -0.76)$ となり、2017 年 10 月 22 日～23 日の台風第 21 号の夜間降雨時の濁水で

は， $(dr, dg, db) = (0.33, 0.49, -0.81)$ となった。いずれも同一の CCTV と解析領域を使用しており，それらの違いは，日中の自然光か夜間の LED 照明であること，人為的に供給した土砂か上流から自然に流下してきた土砂かの違いのみである。



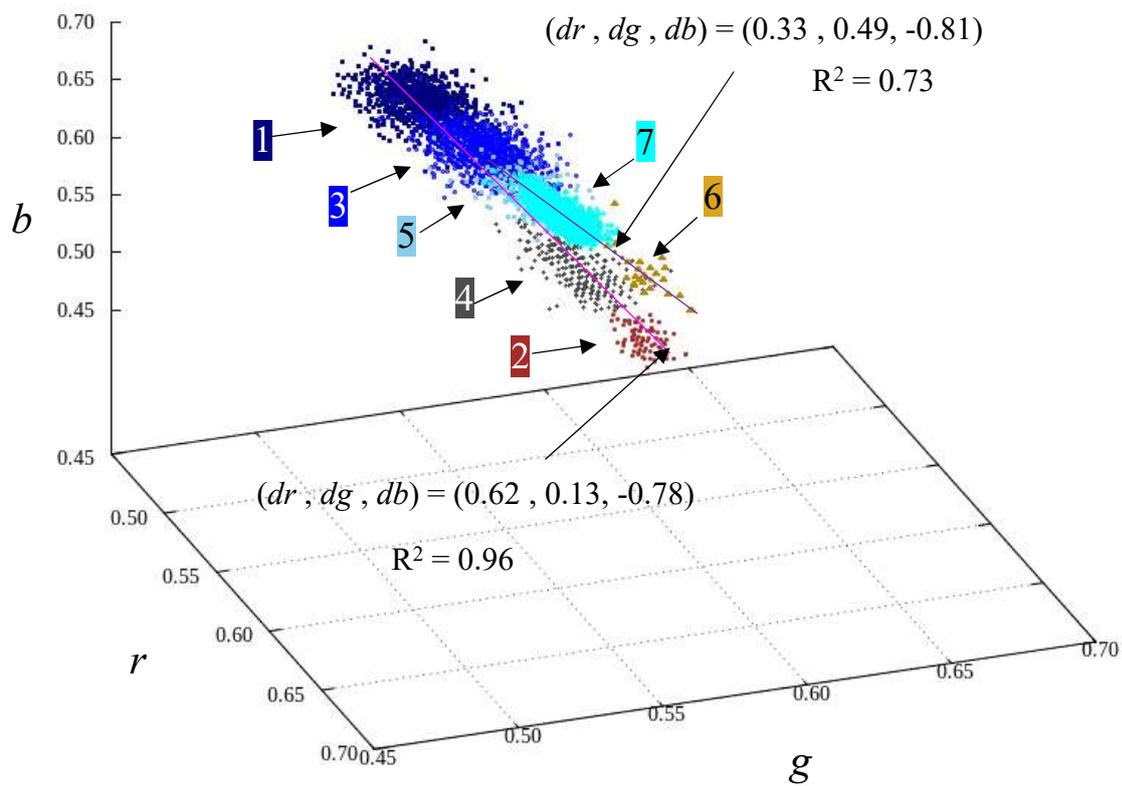
No.	年月日	時間	溪流の状況	浮遊砂量 (mg/l)		凡例
				直接採水	濁度計計測	
1	2018/10/4	16:49 - 16:50	平水時 (土砂投入前)	—	—	■
2		16:50	斜面土砂投入時	3,000	—	●
3		16:50 - 17:10	少量の残土流下 (溪流実験中)	—	—	■
4		17:10	溪床土砂投入時	2,015	—	+
5		17:10 -	少量の実験残土流下 (土砂投入後)	—	—	■

図 3.33 内の川の RGB 単位ベクトルの 3 次元分布 (2018/10/4)



No.	年月日	時間	溪流の状況	浮遊砂量 (mg/l)		凡例
				直接採水	濁度計計測	
6	2017/10/22	18:30 - 23:00	濁水発生 (夜間降雨時、照明点灯)	—	100 ~ 6,000	▲
7	2017/10/23	00:00 - 00:10	濁水が収まる (夜間、照明点灯)	—	~100	▲

図 3.34 夜間時における内の川の RGB 単位ベクトルの 3 次元分布
(2017/10/22-10/23)



No.	年月日	時間	溪流の状況	浮遊砂量 (mg/l)		凡例
				直接採水	濁度計計測	
1	2018/10/4	16:49 - 16:50	平水時 (土砂投入前)	—	—	■
2		16:50	斜面土砂投入時	3,000	—	●
3		16:50 - 17:10	少量の残土流下 (溪流実験中)	—	—	■
4		17:10	溪床土砂投入時	2,015	—	+
5		17:10 -	少量の実験残土流下 (土砂投入後)	—	—	■
6	2017/10/22	18:30 - 23:00	濁水発生 (夜間降雨時、照明点灯)	—	100~ 6,000	▲
7	2017/10/23	00:00 - 00:10	濁水が収まる (夜間、照明点灯)	—	~100	▲

図 3.35 内の川の RGB 単位ベクトルの 3 次元分布
(2017/10/22-10/23, 2018/10/4)

第4章 濁度の画像解析による土石流検知手法

4.1. 土石流映像の特徴

稲荷川と黒岳沢川における平水時と小規模出水時の濁水，土石流発生時の映像を表 4.1に示す。土石流発生時においても渓流水面の色は茶系を呈していることが確認できる。特に土石流フロントおよび土石流流下時の渓流水面の色は，小規模出水時の濁水の色と比較して，より土の色に近い印象を受ける。第4章で色情報と濁度の相関性を示したが，流れに含まれる土砂の量が多くなれば，土砂本来が持つ色の特徴が渓流水面に強く表れることになる。

表 4.1 土石流発生時の映像

	稲荷川	黒岳沢川
平水時		
濁水発生時(土石流非発生)		
土石流フロント		
土石流流下時		
土石流流下後	—	

4.2. 稲荷川における土石流の評価結果，通常の濁りとの違い

稲荷川で発生した土石流（2011年9月2日）と濁水（2016年11月4日）の動画から，水面に解析対象領域を指定し，前述の手法を用いて解析し，溪流表面の画素情報の時間的変化を分析した。さらに，画像解析結果から土石流発生に至らない小規模出水の濁水と，土石流発生時の特徴を分析した。

なお，解析対象領域は，濁りの色の変化を評価するため，高輝度の白波が極力映り込まない領域を指定した。

4.2.1. 濁水発生時の特徴

図 4.1に 2016年11月4日の映像データ，図 4.2に同映像データ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。0:00 の動画開始から 5:00 頃までの夜間時は，照明を当てて濁水発生前の水面を映しており，解析対象領域の輝度値および RGB 値はそれぞれ 10～20 程度であった。上空の雲の通過などで多少の変動はあるが，5:00 過ぎの夜明けから昼にかけては日射量の増加に伴い輝度値が増加し続け，昼過ぎから夕方にかけては日射量の減少に伴い輝度値の低下が認められた。濁水発生前の 12:00 頃は輝度値 133，RGB 値（125,138,140）であったが，(c) 12:15 頃に濁水が発生すると，輝度値 217，RGB 値（219,218,212）に増加した。そのうち，R 値が 125 から 219 と最も大きな増加率 175%を示した。(d) 12:30 頃～(e) 12:45 頃の濁水発生以降，徐々に濁りは収まり相対的な R 値は減少したが，(f) 15:40 頃に夕日が水面を反射した影響で相対的に R 値が上昇した。

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 $(r,g,b) = (0.584,0.582,0.567)$ ，夕日の反射では $(r,g,b) = (0.583,0.580,0.569)$ となり，ともに r 値が相

対的に高く次いで g 値が高い値を示した。濁水と夕日反射の判断は目視で難しい映像であったが、画素情報からも濁りと夕日の反射の特徴が類似した。0:00~5:00 頃と 17:00~0:00 頃の夜間では、単位ベクトル算出の RGB 値（輝度値）の絶対値が小さいため、単位ベクトルの各成分値は乱れたが、輝度値 100 以上の昼間については一定の値を確保できた。ここで、夜間~昼間~夜間の輝度値が急激に変化しているのは、現地におけるバッテリーやデータ記憶容量の制限により、15~20 分間隔で 10 秒間の撮影をしているためである。

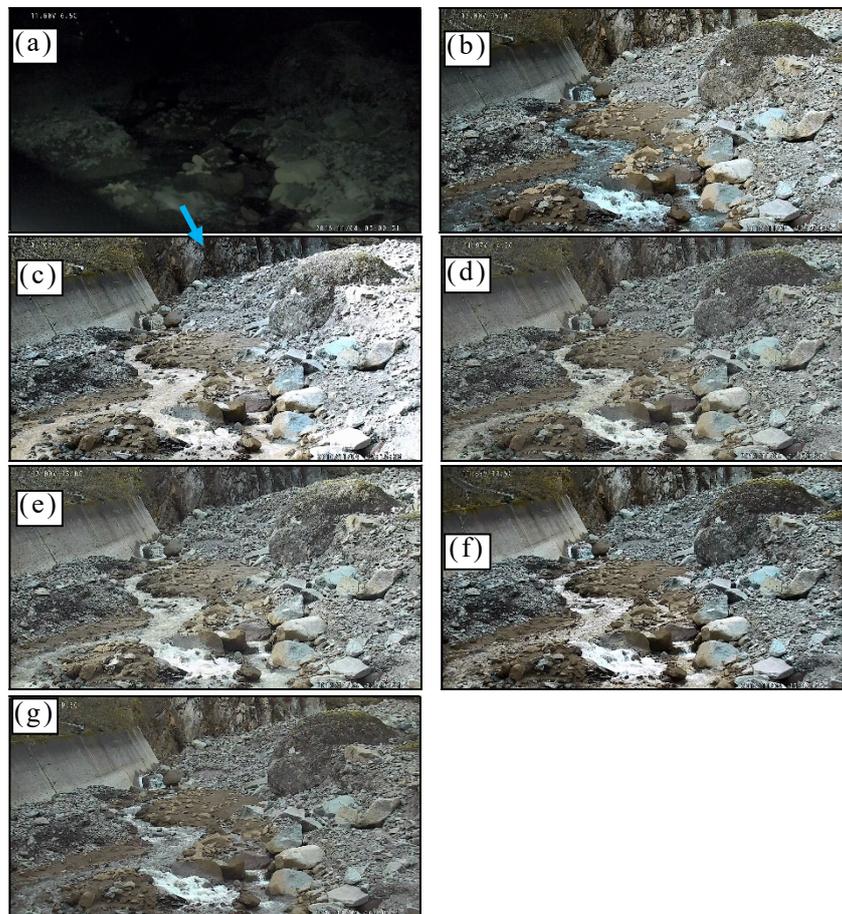


図 4.1 早川谷上流砂防堰堤の撮影実験用カメラ映像

(a)3:00 夜間照明時，(b)10:30 濁水発生前，(c)12:15 濁水発生時，
(d)12:30 濁水発生時，(e)12:45 濁水が収まりつつある時，
(f)15:40 夕日の反射，(g)16:20 濁水が収まった後

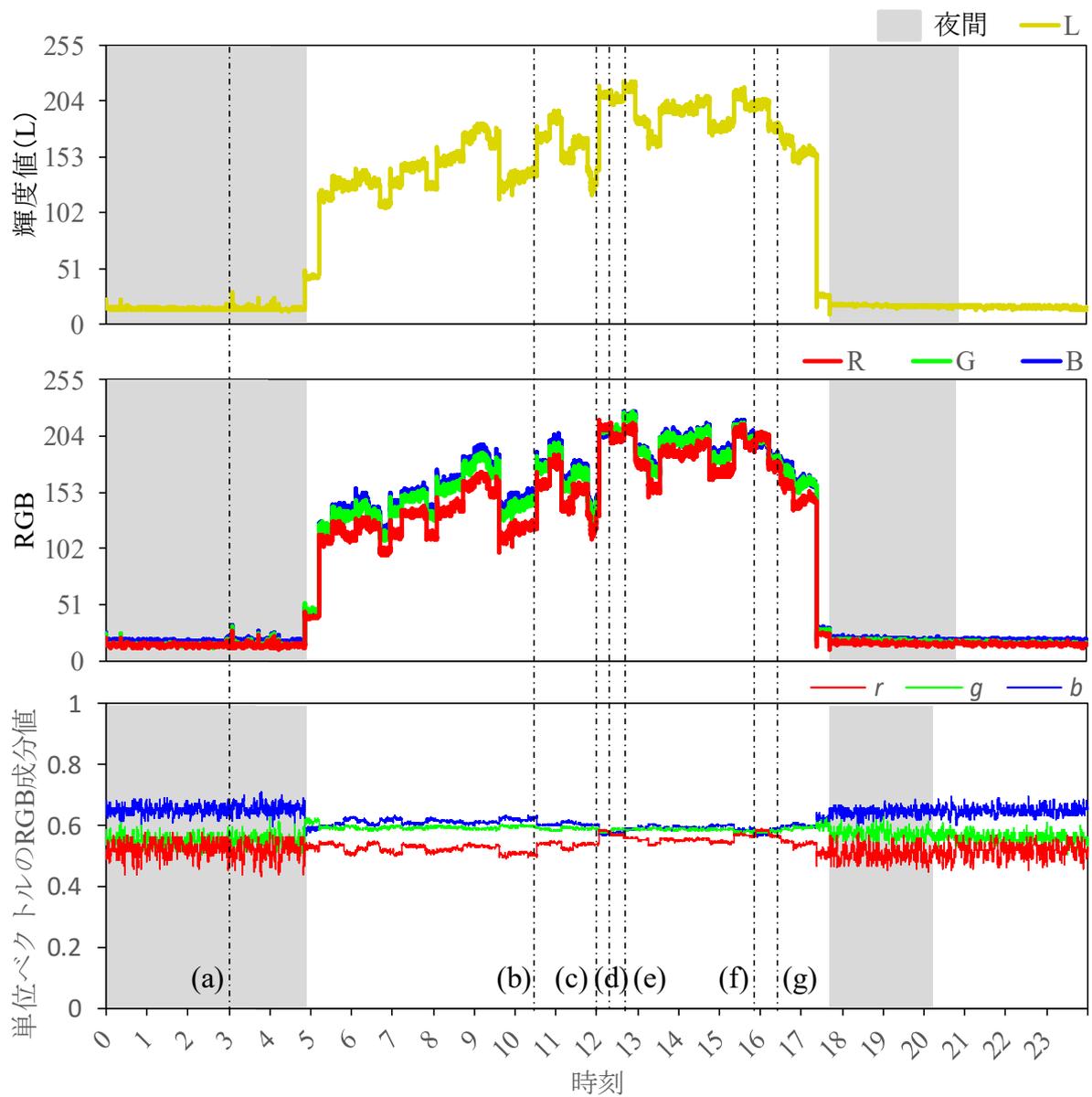


図 4.2 2016年11月4日の輝度値（上）・RGB値（中）・単位ベクトルのRGB成分値（下）の時間変化

4.2.2. 土石流による濁水と画素情報

図 4.3に 2011 年 9 月 2 日の土石流映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。(a) 6:32:11 の動画開始から解析対象領域では濁水が流下しており、(b) 6:32:47 頃に土石流の段波が到達すると水面の画素が乱れ、RGB 値および輝度値が 100～115 から 105～120 にそれぞれ 5 程度上昇した。(c) 6:32:50 以降は霧が薄れたことや照明とワイパーが作動したことで、輝度値は 20～140 の間を断続的に変動した。映像は常に濁水を映したもので、RGB のうち R 値が相対的に高い値を示した。

一方、RGB 単位ベクトルの成分をみると、 $(r,g,b) = (0.612,0.580,0.538)$ と r 値が相対的に高く、次いで b 値が高い値を示し、一連の映像の中でほぼ一定の値を保った。多少の霧がかかった映像でも、画像から溪流の状況が把握できれば、単位ベクトルで濁水の特徴を捉えることができた。なお、断続的なワイパーの映り込みについては、単位ベクトルにも反映されたが、ノイズとして除去処理することが技術的に可能である。

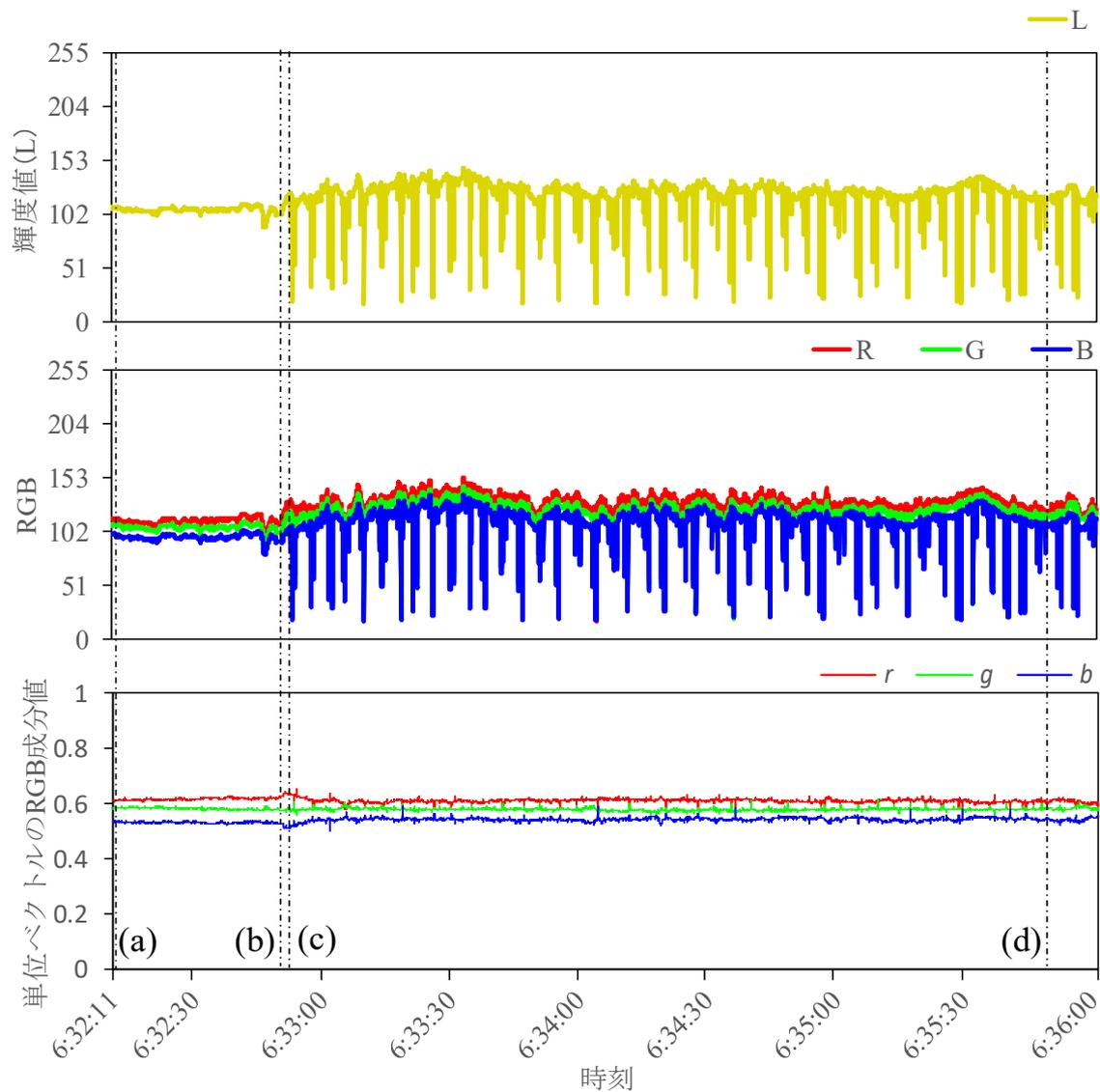


図 4.3 2011年9月2日土石流の輝度値（上）・RGB値（中）・単位ベクトルのRGB成分値（下）の時間変化

4.2.3. RGB 単位ベクトルを用いた濁水の立体分布

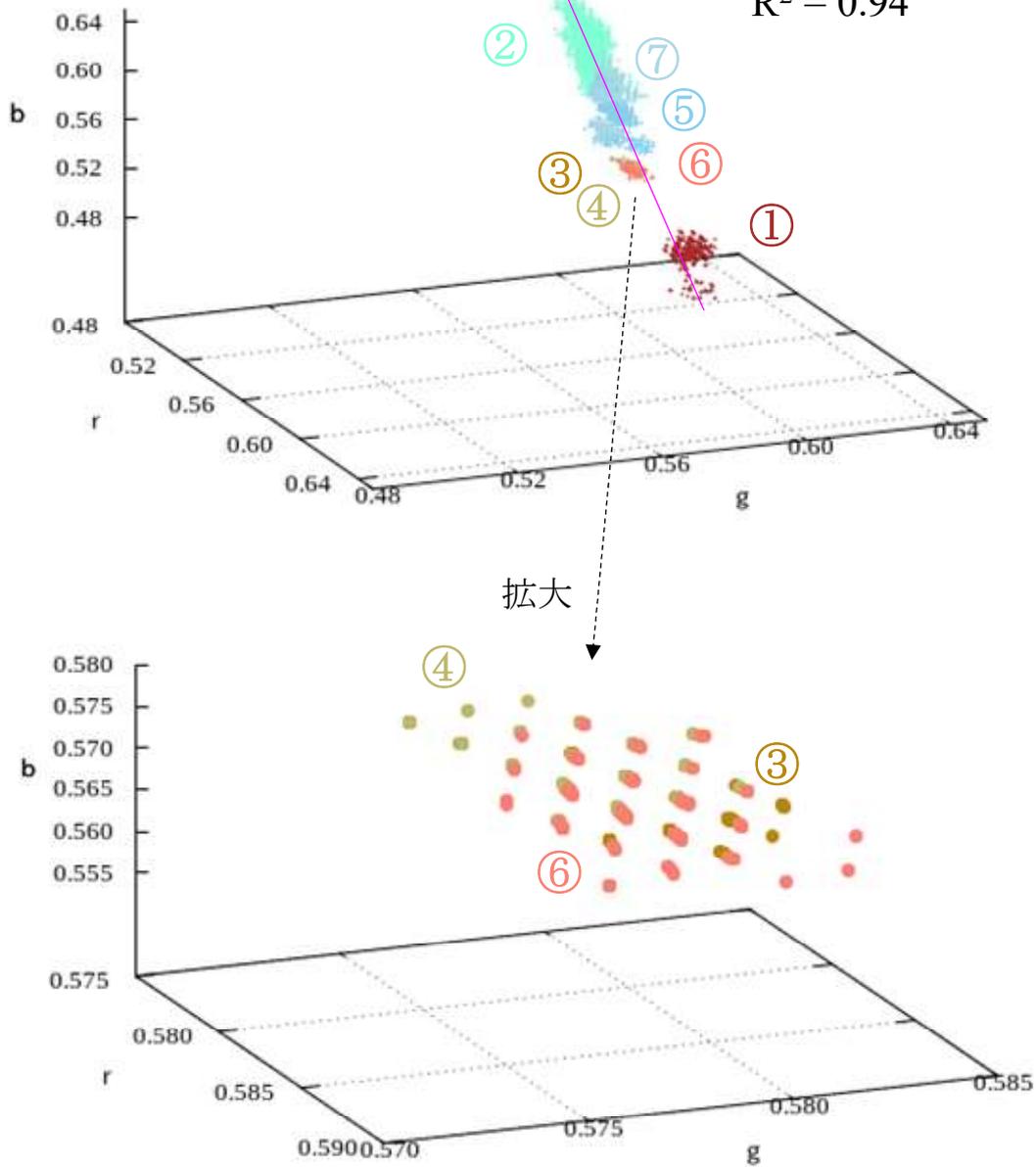
図 4.4に、2011年9月2日土石流と2016年11月4日流況変化時の映像データから得られた単位ベクトルのRGB成分の3次元分布図を示す。図 4.4の全ての点群データ (r,g,b) は厳密には単位球面上に分布している。本研究では点群データ (r,g,b) の分布状況を分かりやすく示すため、最小二乗法により近似直線を算出し、②濁水発生前から③④濁水発生時を通り、①土石流へ至る近似直線の方法ベクトル (dr,dg,db) を求め、図 4.4に示した。

2016年11月4日の点に着目すると、6:00~12:00の濁水発生前では、 r 値が0.50~0.54と相対的に小さく、 b 値が0.59~0.63と相対的に大きい。12:15~12:30の濁水発生時では、 r 値が0.58~0.59と相対的に増加し、 b 値が0.57~0.58と相対的に減少した。12:45以降の濁水が収まった後は濁水発生前の座標に戻りつつ、15:40~16:00の夕日反射時は、 r 値が0.58~0.59、 b 値が0.56~0.57となり濁水発生時の座標と重なった。一方、2011年9月2日土石流の点は、 r 値が0.61~0.64、 g 値が同程度、 b 値が0.51~0.54の範囲に分布し、2016年11月4日における濁りの曲線の延長上の座標に位置する結果となった。以上により、土石流と濁水におけるRGB値と単位ベクトル (r,g,b) は、 R 値および r 値が増加するという同じ特徴を有した。さらに、2011年9月2日土石流映像では調べられなかった日照条件の影響を、2016年11月4日における濁水映像で解析した結果、RGB値を単位ベクトル化した値 (r,g,b) が有効であるという結果を得た。

特に、これら流況変化時の点群データ (r,g,b) は、3次元ベクトル空間において直線状に分布することを近似でき、濁水発生前から濁水・土石流発生時において、方向ベクトルが $(0.72, -0.04, -0.69)$ となることが示された。

$$(dr, dg, db) = (0.72, -0.04, -0.69)$$

$$R^2 = 0.94$$



凡例	
① ●	: 2011年9月2日 6:32:11~6:32:50 土石流
② ●	: 2016年11月4日 6:00~12:00 濁水発生前
③ ●	: // 12:15 濁水発生時
④ ●	: // 12:30 濁水発生時
⑤ ●	: // 12:45~15:20 濁水が収まりつつある時
⑥ ●	: // 15:40~16:00 夕日の反射
⑦ ●	: // 16:20~17:00 濁水が収まった後
—	: 近似直線 ※点群データ (r, g, b) は球面に分布するが, 局所的には直線に近似できる。

図 4.4 土石流および濁水発生前～濁水発生後における, 単位ベクトルの RGB 成分の 3次元分布

4.3. 黒岳沢川における土石流検知事例

黒岳沢川で発生した中小出水による濁水（2016年6月24日～8月20日）と土石流（2016年8月23日）の画像から、前述の手法を用いて解析し、溪流表面の画素情報の時間的変化を分析した。これら中小出水及び土石流の解析結果から、土石流発生/非発生の濁水の違いを分析し土石流検知結果を整理した。

4.3.1. 現地観測データ

黒岳沢川では、取得した映像期間中の出水規模を示す観測データとして、近傍の黒岳雨量観測所と、映像画角内にある治山堰堤の水位計のデータを使用した（図 4.5・図 4.6）。

2016年6月と7月は最大で時間雨量16mm/h(2016年7月2日20時)、累積雨量は62mmの降雨で、降雨時に水位の微増と溪流の濁りは認められたものの大きな出水は観測されなかった。8月になると、17日に最大時間雨量25mm/h(2016年8月17日20時)と累積雨量148mm、水深が最大1.54m(2016年8月17日19:20)となる出水が観測され、21日には最大時間雨量18mm/h(2016年8月20日16時)と累積雨量81mm、水深が最大0.54m(2016年8月20日16:40)となる出水が観測された。20日以降、黒岳沢川第1号砂防堰堤の堆砂敷が湛水した影響で、水位データは常時0.5m以上計測されている。23日には最大時間雨量31mm/h(2016年8月23日07時)と累積雨量123mmが観測され、水深3.04m(2016年8月23日07:20)をピークとする土石流が発生した。



図 4.5 黒岳沢川の水位計設置箇所状況 (2016/6/24)



図 4.6 黒岳沢川の水位計設置箇所状況 (2016/8/24)

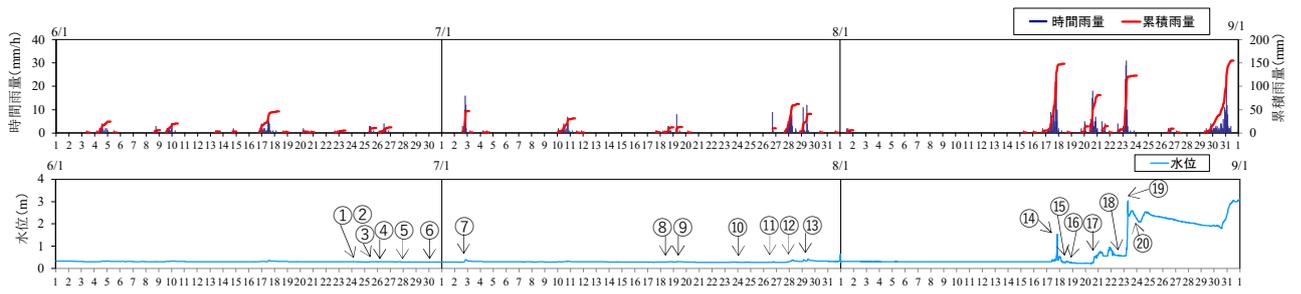


図 4.7 黒岳沢川の土石流発生前後の写真



図 4.8 黒岳沢川の定点観測用カメラ映像

4.3.2. 濁水と画素情報の特徴

図 4.9に 2016 年 6 月 24 日～8 月 23 日の映像データと 6 月 1 日～8 月 31 日の雨量・水位データ，図 4.10に 2016 年 6 月 24 日～8 月 23 日の定点観測用インターバルカメラ映像データ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。8 月後半に強い降雨が集中し 23 日には土石流が発生しており，図 4.9・図 4.10から 8 月後半を細かく表示したグラフを図 4.11・図 4.12に示す。ここで，定点観測用インターバルカメラでは夜間時は撮影されていないが，6 月 24 日の日没直後のような日没直後の暗い映像に対する解析は現時点不可能であるため，図 4.10と図 4.12の解析結果のグラフには含めていない。また，6 月 26 日の雨滴や 6 月 30 日の結露のような映像は，解析領域の濁り評価を行えないため，ノイズとして除去処理し，同様に図 4.10と図 4.12の解析結果のグラフには含めていない。

撮影期間中の一連の画像の解析結果を通して，黒岳沢川においても芋川と同様に，溪流が濁っていない状態のときは B 値が相対的に高く水面は青系を呈しているが，濁水が発生すると水面は茶系を呈し，RGB のうち R 値が相対的に高くなる傾向が確認された。また，6 月 28 日のような水面が日影になる時間帯では水面がやや暗い青みを帯び，輝度値 L が一時的に 100 以下へ低下し，B 値が相対的に高くなる傾向が示された。7 月 24 日のように早朝に朝日が直射する時間帯では，水面の映像はやや茶系を帯び，一時的に R 値が相対的に高くなる傾向が示された。

RGB や輝度値 L は日照条件による輝度の時間変動が 30～240 程度ある一方で，RGB 単位ベクトルの成分をみると rgb はそれぞれ 0.30～0.89 程度の変動で，晴天時に水面が一時的に日影になる時間帯を除くと 0.50～0.70 の範囲での変動に留まり，輝度変化とはあまり対応していない解析値になっている。

濁水が発生していない 6 月 24 日では，RGB 単位ベクトルは平均して $(r,g,b) = (0.568,0.525,0.634)$ と b 値が相対的に高く，次いで r 値が高

い値を示し、概ね一定値を保った。6月及び7月の濁水発生時では、RGB単位ベクトル (r,g,b) は平均して6月25日で $(0.591,0.562,0.578)$, 7月2日で $(0.592,0.564,0.575)$, 7月18日で $(0.597,0.559,0.575)$, 7月19日で $(0.591,0.558,0.583)$, 7月26日で $(0.602,0.557,0.571)$, 7月28日で $(0.606,0.557,0.568)$, 7月29日で $(0.601,0.552,0.578)$ となり、 r 値が相対的に高く、次いで b 値が高い値を示した。続いて8月は、8月17日の濁水発生時に $(0.597,0.557,0.577)$, 8月17日夜間の土砂流出後の8月18日の濁水発生時に $(0.594,0.560,0.578)$, 8月20日の濁水発生時に $(0.592,0.574,0.566)$ となった。8月23日の土石流では、水位0.92~0.97mで均衡した時間04:56~05:36が土石流フロント到達前の濁りで $(0.599,0.580,0.552)$ となった。水位1.07mからピーク水位3.04mまで急増した時間05:46~07:16を土石流フロント、ピーク水位3.04mの時間07:16(水位計データでは07:20)を土石流流量ピーク、ピーク水位到達後に2.44mまで水位が急低下した時間07:26~07:56を土石流フロント到達直後として、この時間帯05:46~07:56の土石流の濁りは $(0.615,0.578,0.535)$ となった。土石流流下後も砂防堰堤の湛水による影響で水位約2.4mで概ね一定の3時間08:06~10:56で $(0.621,0.569,0.539)$, さらにその後の3時間の11:06~13:56で $(0.620,0.578,0.530)$, またさらにその後の日没までの14:06~18:26で $(0.604,0.567,0.559)$ となった。黒岳沢川では、土石流に至らない中小出水の濁水では、RGB単位ベクトル (r,g,b) は $r>b>g$ となる傾向であったが、土石流フロント到達前の濁りは $r>g>b$ に転じ、土石流フロント到達時には $r>g>b$ の傾向で r が増加し b が減少した。

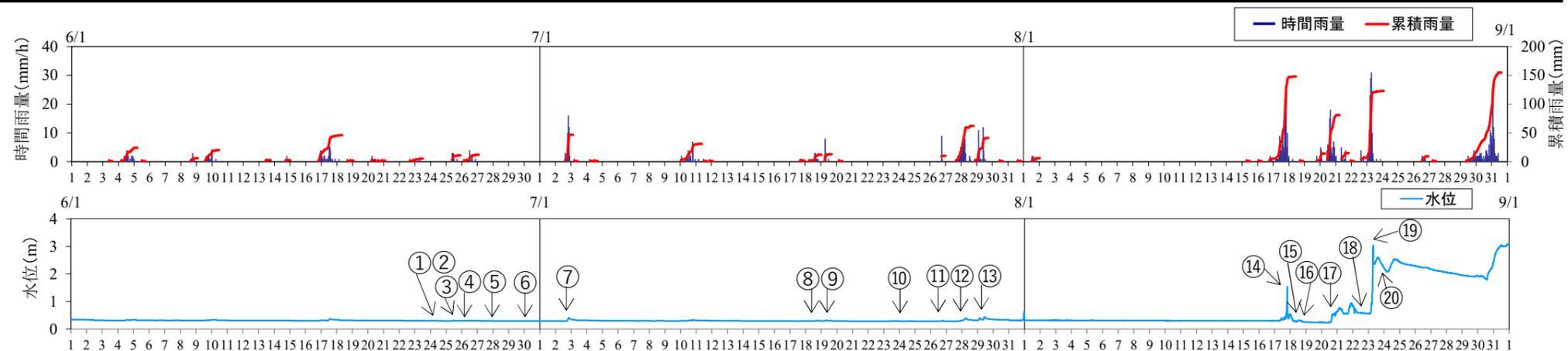


図 4.9 黒岳沢川の定点観測用インターバルカメラ画像と観測データ (2016/6-2016/8)

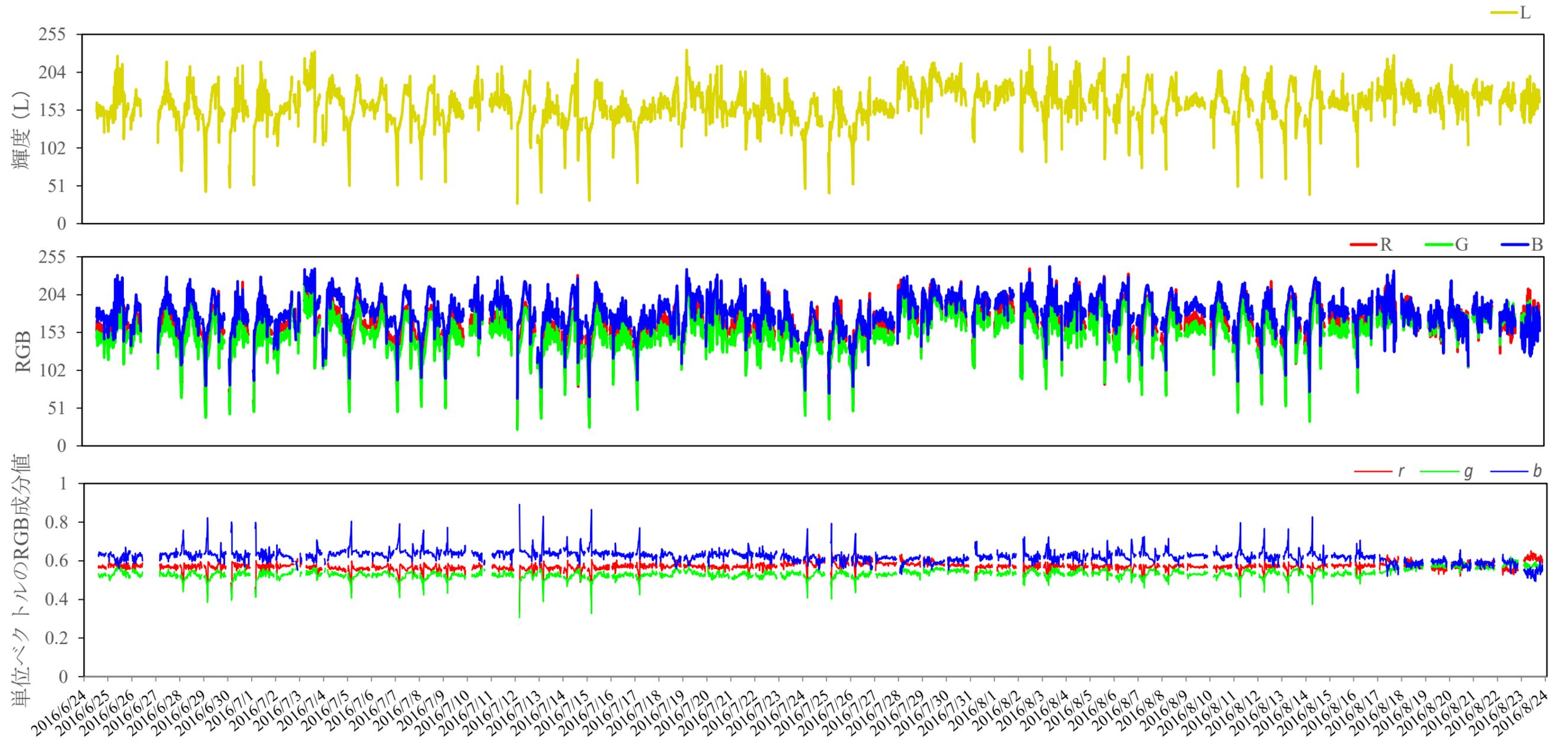


図 4.10 黒岳沢川の輝度値（上）・RGB 値（中）・RGB 単位ベクトル（下）の時間変化（2016/6/24-8/23）

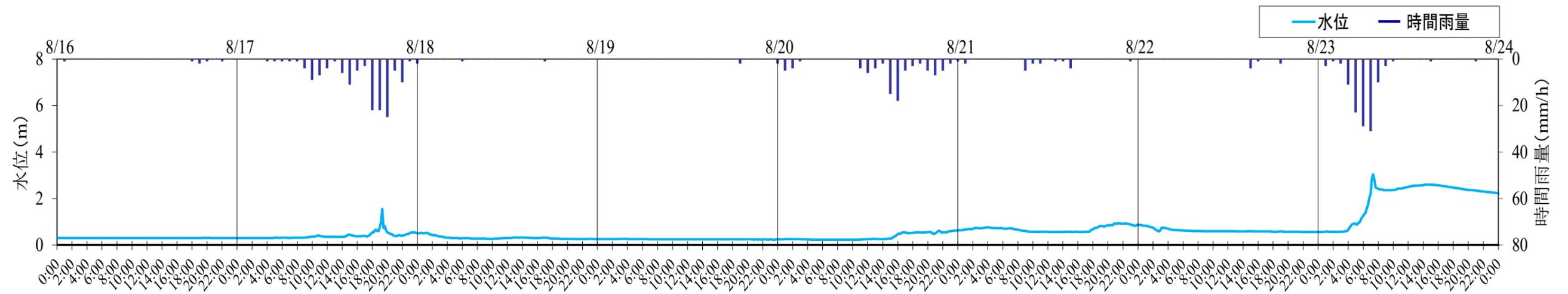


図 4.11 黒岳沢川の雨量と水位計計測データ (2016/8/16-8/23)

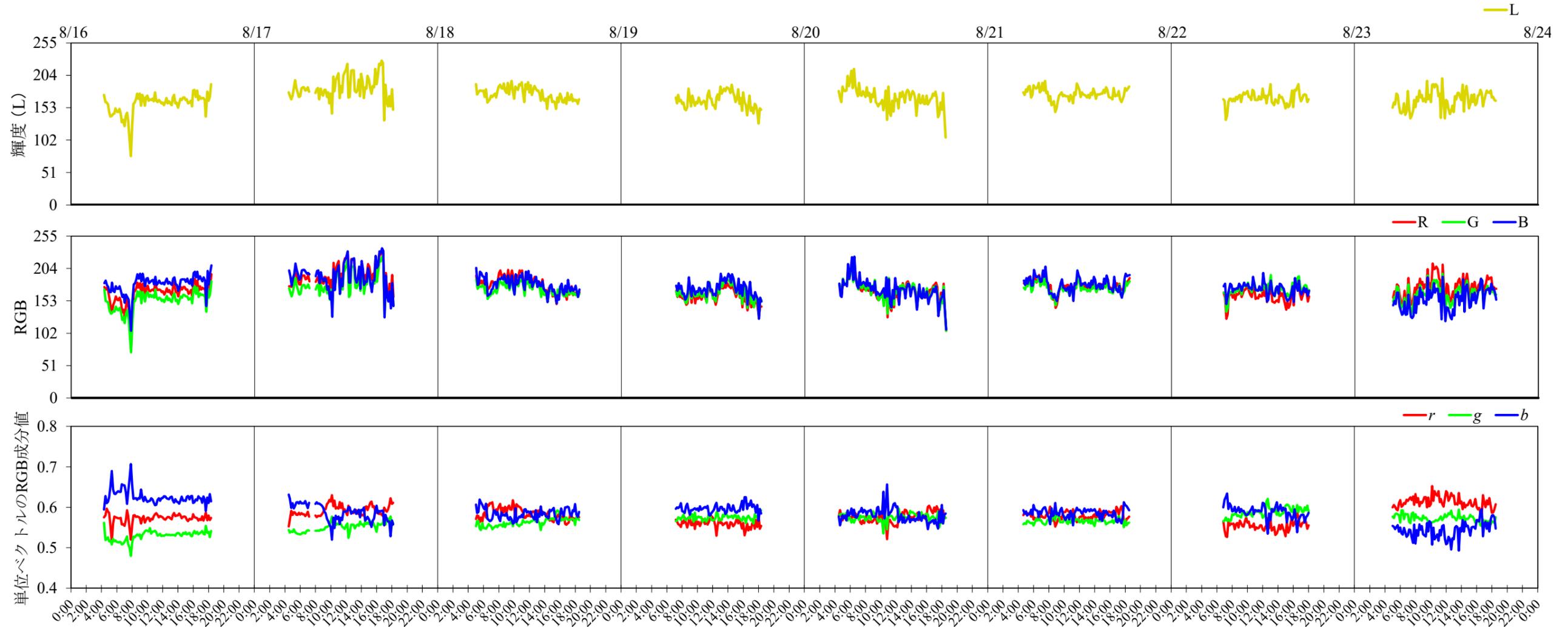


図 4.12 黒岳沢川の輝度値 (1 段) ・ RGB 値 (2 段) ・ RGB 単位ベクトル (3 段) の時間変化 (2016/8/16-8/23)

4.3.3. RGB 単位ベクトルを用いた濁水及び土石流の立体分布

図 4.13・表 4.2に 2016 年 6 月 24 日～8 月 23 日の RGB 値の単位ベクトルを 3 次元立体表示させた図を示す。

濁水非発生の期間に着目すると、6 月 24 日～8 月 17 日の水面が日影になる映像も含む時間帯では、 r 値が 0.40～0.60 と相対的に小さく、 g 値が 0.45～0.55、 b 値が 0.58～0.80 と相対的に大きな値の範囲で広く分布した。概ね r 値が 0.55 以下で b 値が 0.65 以上の領域は水面が日影になる点群であり、概ね r 値が 0.58 以上で b 値が 0.60 以下は茶色の濁水に遷移する領域の点群となっている。8 月 18 日～8 月 22 日の解析領域が湛水する時間帯では、 r 値が 0.52～0.60、 g 値が 0.54～0.62、 b 値が 0.54～0.66 と gb 値が相対的に大きな値の範囲で分布した。7 月 24 日～7 月 26 日の早朝に朝日が直射する時間帯では、 r 値が 0.61～0.65、 g 値が 0.50～0.52、 b 値が 0.57～0.61 と r 値が相対的に大きく g 値が相対的に小さな値の範囲で分布した。6 月 25 日～8 月 20 日の中小出水で濁水が発生した時間帯では、 r 値が 0.58～0.62、 g 値が 0.53～0.58、 b 値が 0.55～0.60 と rb 値が相対的に大きな値の範囲で分布した。8 月 17 日 09:10～18:10 に濁水が発生した時間帯では、 r 値が 0.58～0.62、 g 値が 0.54～0.57、 b 値が 0.53～0.60 となり、6 月 25 日～8 月 20 日の他の濁水と同様の範囲での分布であった。8 月 17 日夜間に比較的規模の大きな土砂流出があったと想定されるが、夜間時の画像がなく解析できなかった。8 月 23 日 04:56～05:36 の水位が均衡した土石流フロント到達前の時間帯では、 r 値が 0.59～0.61、 g 値が 0.57～0.58、 b 値が 0.54～0.56 と rg 値が相対的に大きな値の範囲で分布した。その後 05:46～07:56 の土石流フロントを含む土石流流下時の時間帯では、 r 値が 0.60～0.63、 g 値が 0.56～0.59、 b 値が 0.51～0.56 と rg 値が相対的に大きな値の範囲で分布し、土石流フロント到達前の濁りと比べ、 r 値が増加し b 値が低下した。さらにその後 08:06～18:26 の土石流流下後は、砂防堰堤の湛水による影響で濁水が滞留し、 r 値が 0.59～0.64、 g 値が 0.56～0.59、 b 値が 0.50～0.59 となり、05:46～07:56 の土石流流下時と重なる位置の分布となったが、12:00 以降は時間経過とともに、 rg

値が低下傾向、 b 値が増加傾向になった。

これら点群データから最小二乗法により近似直線を算出し、濁水発生前から濁水発生、土石流へ至る近似直線の方法ベクトル $(dr, dg, db) = (0.46, 0.43, -0.78)$ を導出した。図 4.13・表 4.2に示されるように、濁水発生前～濁水発生～土石流フロント到達前～土石流流下の過程が、近似直線に沿って概ね連続する傾向で分布する結果が得られた。また、8月18日～8月22日の湛水の時間帯や、7月24日～7月26日の早朝に朝日が直射する時間帯の時間帯は、近似直線から逸れて分布していることから、濁度変化過程及び土石流発生を評価する際のノイズとして扱える。

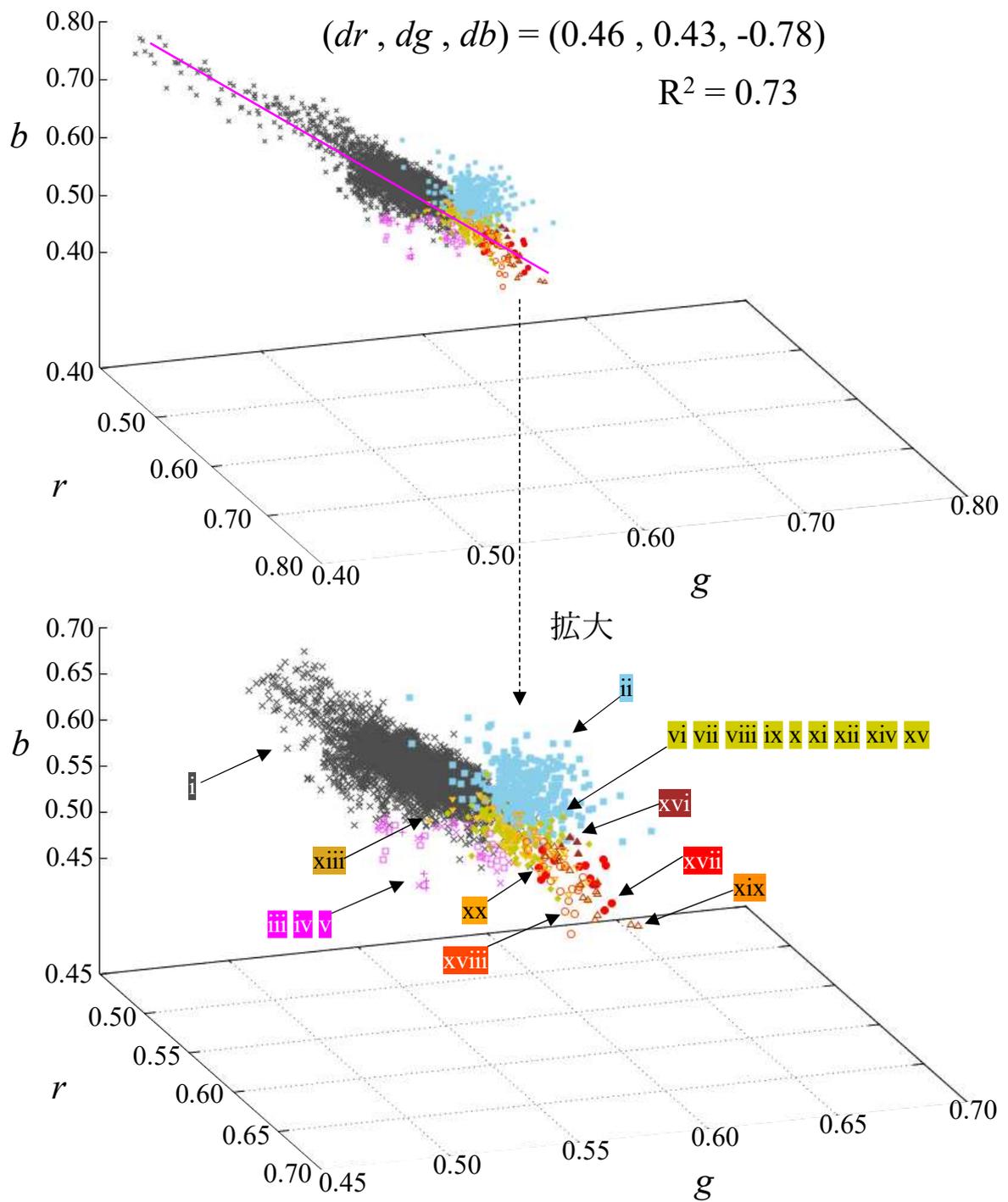


図 4.13 黒岳沢川の RGB 単位ベクトルの 3 次元分布 (2016/6/24-8/23)

表 4.2 黒岳沢川の RGB 単位ベクトルの 3 次元分布の凡例 (2016/6/24-8/23)

No.	年月日	時間	溪流の状況	凡例
i	2016/6/24 - 2016/8/17	03:20 - 20:30	平水時	×
ii	2016/8/18 - 2016/8/22	04:20 - 19:30	湛水	■
iii	2016/7/24	06:56 - 07:56	朝日	×
iv	2016/7/25	06:53 - 07:53	朝日	□
v	2016/7/26	06:59 - 07:59	朝日	+
vi	2016/6/25	10:25 - 11:15	濁水	◆
vii	2016/07/02	17:54 - 19:14	濁水	◆
viii	2016/7/18	14:57 - 16:17	濁水	◆
ix	2016/7/19	06:54 - 08:04	濁水	◆
x	2016/7/26	17:29 - 18:59	濁水	◆
xi	2016/7/28	04:18 - 07:18	濁水	◆
xii	2016/7/29	04:19 - 04:39 , 09:19 - 11:49	濁水	◆
xiii	2016/8/17	09:10 - 18:10	濁水、土砂流出	▼
xiv	2016/8/18	06:32 - 13:02	濁水	◆
xv	2016/8/20	16:00 - 18:10	濁水	◆
xvi	2016/8/23	04:56 - 05:36	土石流フロント到達前の濁り	▲
xvii	2016/8/23	05:46 - 07:56	土石流	●
xviii	2016/8/23	08:06 - 10:56	土石流到達後の濁水	○
xix	2016/8/23	11:06 - 13:56	土石流到達後の濁水	△
xx	2016/8/23	14:06 - 18:26	土石流到達後の濁水	▽

4.4. 土石流発生時の閾値設定

4.4.1. 稲荷川

稲荷川における，濁水発生前から濁水発生，土石流へ至る近似直線
方向ベクトル $(dr, dg, db) = (0.72, -0.04, -0.69)$ ，2011年9月2日 6:32:11
の土石流フロント到達前の位置ベクトル $(r, g, b) = (0.612, 0.580, 0.538)$
から，式(5)により求めた平面を図 4.14に図示する。稲荷川でも芋川と同
様に，溪流の濁りに応じて変動する位置ベクトル (r, g, b) の点群に対し，
直交する平面が作成できた。2016年11月4日に発生した濁水と，2011
年9月2日に発生した土石流を境界に，それぞれの位置ベクトル (r, g, b)
の点群を分割する平面となった。

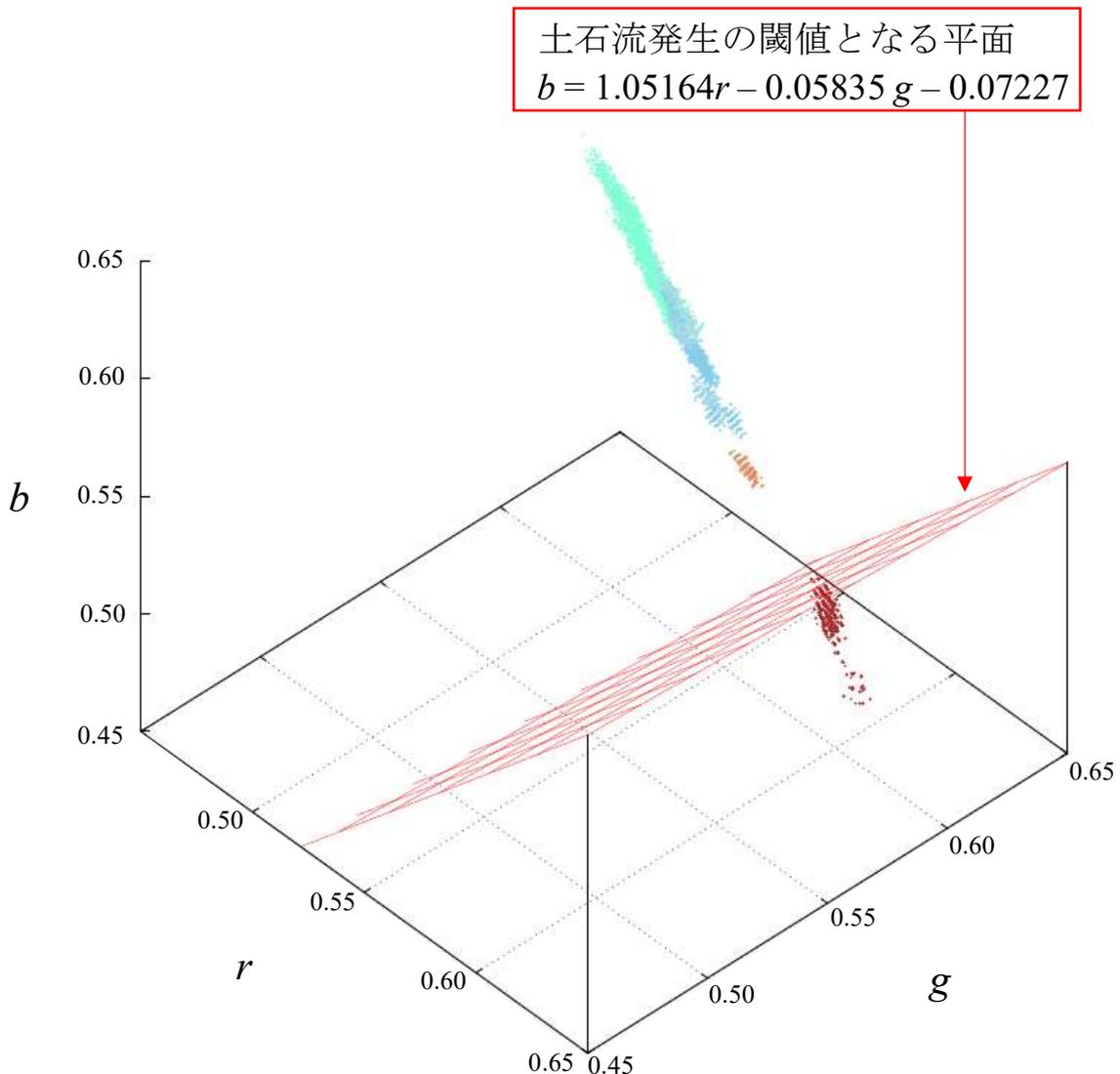


図 4.14 稲荷川における土石流発生時の閾値平面の3次元表示

4.4.1. 黒岳沢川

黒岳沢川における，濁水発生前から濁水発生，土石流へ至る近似直線
の方向ベクトル $(dr, dg, db) = (0.46, 0.43, -0.78)$ ，2016年8月23日04:56
の土石流フロント到達前の位置ベクトル $(r, g, b) = (0.600, 0.577, 0.554)$
から，式(5)により求めた平面を図4.15に図示する。黒岳沢川でも芋川と
同様に，溪流の濁りに応じて変動する位置ベクトル (r, g, b) の点群に対
し，直交する平面が作成できた。6月24日～8月20日の期間で発生した
中小出水による濁りと，8月23日に発生した土石流を境界に，それぞ
れの位置ベクトル (r, g, b) の点群を分割する平面となった。8月23日04:56
～05:36の土石流フロント到達前の濁りは，6月25日～8月20日の中小
出水の濁水と8月23日05:46～07:56の土石流の境界付近に分布し，同
05:46～07:56の土石流は，この平面から方向ベクトル $(dr, dg, db) =$
 $(0.46, 0.43, -0.78)$ に沿って延伸して分布することが確認できた。

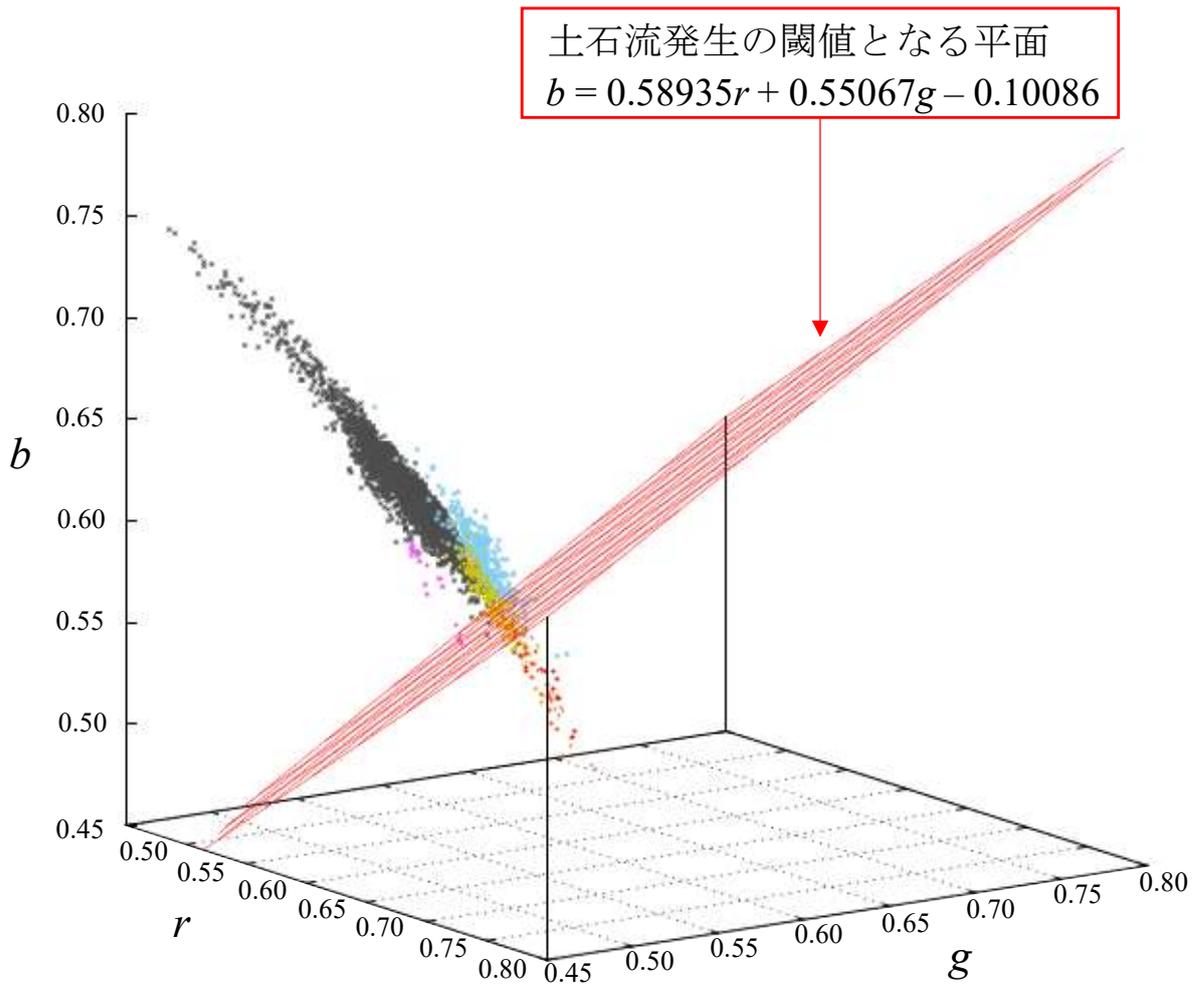


図 4.15 黒岳沢川における土石流発生の閾値平面の 3 次元表示

4.5. 土石流の早期検知の可能性

稲荷川と黒岳沢川において、中小出水による濁りと、土石流の映像を解析し、画像の RGB 値の単位ベクトル (r, g, b) を用いて、相関性の高い近似直線の方方向ベクトル (dr, dg, db) を導出した。

また、同手法により、芋川では大中小レベルでの濁度評価が可能であることが示され、内の川では濁度変化の連続性の他、夜間の照明点灯時でも、相関性の高い近似直線の方方向ベクトル (dr, dg, db) を導出した。

本研究では、稲荷川と黒岳沢川でのみ土石流映像を収集でき、土石流フロント到達前の濁りに対して、土石流検知の閾値の指標となる平面の式を導いた（表 4.3）。

他溪流においても、過去の記録映像や今後の映像を収集・蓄積し、土石流発生・非発生の単位ベクトル (r, g, b) や方方向ベクトル (dr, dg, db) を整理していくことで、土石流フロント到達前の平面の式が作成されることになる。

表 4.3 各溪流の濁度変化の方方向ベクトルと土石流フロント到達前の閾値

溪流		方方向ベクトル (dr, dg, db)	土石流フロント到達前の 平面の式	土石流発生日
稲荷川		$(0.72, -0.04, -0.69)$	$b = 1.05164r - 0.05835g - 0.07227$	2011年9月2日
黒岳沢川		$(0.46, 0.43, -0.78)$	$b = 0.58935r + 0.55067g - 0.10086$	2016年8月23日
芋川		$(0.62, 0.13, -0.78)$	—	—
内の川	昼間	$(0.61, 0.23, -0.76)$	—	(映像無し)
	夜間	$(0.33, 0.49, -0.81)$	—	(映像無し)

4.6. 土石流検知手法の提案

4.6.1. 画像による濁度の評価

芋川と内の川では，濁度計計測値と比較することで，画像解析による濁度評価の検討を行った。8bit/チャンネルの画素情報ではその分解能による制限はあるが，濁度を大中小程度の精度で定性的に評価ができ，また，芋川では濁度計がスパイク状に突出した値を画像解析結果から異常値として判別することもできた。これらのことから，カメラ画像から非接触で濁度変化を把握する本手法は，遠隔で溪流の濁水を監視するのに適した手法であることが確認でき，濁度計の異常値判定等の補完的利用や，画像から土砂流出等の監視を目的とした利用が有効と考えられる。

接触型濁度計の計測値には異常値の他に頭打ちの発生も報告されており（川瀬ら，2022），今後，濁度計計測値との比較に加え，出水時の直接採水による土砂濃度分析結果との比較を行い，画像解析による濁度評価の精度面においてさらなる検証も必要と考える。また，本来，RGB値には三刺激値に負の値を含むため，広く色を評価する際には，国際電気通信連合 ITU-R BT.2380-0 に従って XYZ 規格化が必要である。本研究で用いた映像は，屋外自然光の色温度条件を厳密に設定するための情報がないため，XYZ 規格化を行わず，オリジナル画像から濁度変化の評価を行った。しかし，濁度評価の精度を向上させるためには，濁水の色を広く評価し，濁水の RGB 単位ベクトル (r,g,b) を方向ベクトル (dr,dg,db) に沿って分布を広げさせる必要があり，XYZ 規格化が有効な方法と考えられる。

4.6.2. 土石流検知の適用性

黒岳沢川で検討することができた土石流映像は8月23日の一事例ではあるが、その発生に至る線形性を示す方向ベクトル (dr, dg, db) から、土石流フロント到達前の濁水を境界とする平面を設定することで、土石流発生検知の閾値設定方法を提示した。これは、収集映像による事後の解析ではあるが、8月23日07:20を流量ピークとする土石流に対し、直前の04:56~05:36の土石流フロント到達前の濁り、すなわち2時間程度前の前兆の濁りから土石流を予測・検知できたことを意味する。画像解析で土石流発生の前兆現象となった濁りの変化を検知指標にした本手法は、従来の土石流流下のタイミングを検知するような土石流検知手法と比べ、避難のリードタイム確保の観点でも有効であると考えられる。

稲荷川でも、2016年11月4日の濁水と、土石流が発生した2011年9月2日の2時期の映像から、中小出水による濁り、土石流フロント到達時の濁りの変化に対し、画像のRGB単位ベクトル (r, g, b) との線形相関を確認した。稲荷川における土石流も2011年9月2日の一事例ではあるが、その発生に至る線形性を示す方向ベクトル (dr, dg, db) から、黒岳沢川と同様に土石流発生点を境界とする平面を設定する手法により、土石流発生検知の閾値となる平面を提示した。この平面は濁度に応じて段階的な設定ができるため、その平面を境界にして位置ベクトル (r, g, b) の越境から土石流発生検知が可能となると考える。

黒岳沢川と稲荷川において、中小出水による濁水と土石流のRGB単位ベクトル (r, g, b) の変化が、半径1の球面上で連続して分布する結果が得られたため、それら点群を1本の直線で近似し、その近似直線の向きの方方向ベクトル (dr, dg, db) を導出した。RGB単位ベクトル (r, g, b) は半径1の球面上に分布するため、点群の近似直線は局所的に設定できるものとして扱っている。そのため、低濁度時のRGB単位ベクトル (r, g, b) と、土石流のような高濁度時のRGB単位ベクトル (r, g, b) の分布位置が離れていれば、それらの近似直線を個別に設定した場合、厳密にはそれ

それぞれの近似直線は異なる方向ベクトル (dr, dg, db) を持つと考えられる。本研究では、低濁度から高濁度に分布する RGB 単位ベクトル (r, g, b) の点群から総じて 1 本の近似直線を導出した場合に、同じ方向ベクトル (dr, dg, db) を持つものとしている。

また、低濁度と高濁度で分布する RGB 単位ベクトル (r, g, b) では、それぞれ濁度に対応する平面が等間隔でない可能性が考えられる。濁度に相当する平面や土石流の閾値平面の設定において、低濁度時と高濁度時における方向ベクトル (dr, dg, db) の違いと濁度に相当する平面の間隔の違いを厳密に設定できれば、土石流検知に対して一層の精度向上になると考えられる。それには、中小出水時と土石流流下時における実測の濁度データに基づいた検証が必要である。

芋川においては、式(5)の平面を濁度に応じて段階的な設定が可能であることを示したが、稲荷川と黒岳沢川には濁度計が設置されていないため、中小出水による濁りと土石流に対し濁度による定量的評価は実施できなかった。土石流流下に伴う一連の濁度データを入手し画像解析結果を比較検証することができれば、前述に示した解析の精度向上に加え、定量的な濁度評価に基づいた土石流検知の閾値設定が可能と考えられる。

4.7. 本研究成果の利用と課題

本研究結果から、芋川・内の川・稲荷川・黒岳沢川において、濁水の検知に画像の RGB 値を用いて色情報による評価が有効であるという結果が得られた。さらに、RGB 値を単位ベクトル化して溪流の濁りを評価した結果から、屋外の日照条件が異なる状況下でも濁度変化を定性的に捉えることができた。ホワイトバランス自動調整・自動露出補正の効いた条件や、カメラの機器による差異はあるものの、芋川・内の川・稲荷川・黒岳沢川の濁水や土石流の発生過程において、RGB 単位ベクトルの分布及び変化に一定の方向ベクトルが存在することが示せたことから、その他多様なカメラにも応用が利くと考える。黒岳沢川では安価かつ簡易的な定点観測用インターバルカメラでも、本研究で提案した土石流検知手法に対しての有効性が確認できたことから、より高品質な画像が取得可能なカメラでの活用が期待される。また、降雨時に雨滴や結露の影響で適正な濁度評価が行えない理由から解析対象外としたフレームがあったため、運用上はカメラのハウジングやワイパーなどの構造的な対策をした画像取得も必要である。

濁度変化を示す方向ベクトル (dr, dg, db) を持った近似直線に近似しない位置ベクトルは、濁度変化や土石流発生検知の対象外として設定することが考えられ、例えば、図 4.13の黒岳沢川における早朝の朝日による影響はノイズとして除外可能である。しかしながら図 3.18の芋川や図 4.4の稲荷川においては、朝日や夕日が出水時の濁水の RGB 単位ベクトル (r, g, b) の位置と重複し、ノイズとしての機械的な判別が困難である。季節や天候によっても、光源を構成する波長に違いが生じれば、光源の違いに対応して濁水の RGB 単位ベクトル (r, g, b) も変化すると考えられる。これらのようなケースでは、カメラ画角内に完全拡散反射するような白色版を設置するなどして白色点補正を行い、光源の違いが水面の色情報に与える影響を考慮した検討も必要と考える。ここで、芋川・稲荷川・黒岳沢川において、朝日・夕日による影響具合と方向ベクトル (dr, dg, db) の値に違いが表れたのは、カメラのホワイトバランス機能や

撮影方角等の画像取得条件に加え、地質による色の違い（遠藤，2019）も考えられる。濁度変化には地質の違いに応じて一定の方向ベクトル (dr, dg, db) が存在すると考えられ、溪流によって方向ベクトル (dr, dg, db) が一義的に決定されるかは、地質別に本手法の適用範囲や精度も整理しておく必要がある。そのため、本手法の実務化においては、方向ベクトル (dr, dg, db) と閾値の設定のため、事前に中小出水を含む映像での試行期間が箇所ごとに必要であり、場合によっては内の川のように人工的に土砂を流しての溪流実験で閾値設定をする方法も考えられる。

夜間時においては、芋川・稲荷川・黒岳沢川の映像では照度不足により溪流の状況を捉えることができず、濁水を解析できなかった。内の川では夜間照明時に輝度値 L を 100 以上に確保して濁水検知に成功しており、また日中の、芋川・内の川・稲荷川・黒岳沢川の全溪流において輝度値 L が概ね 100 以上で単位ベクトルが安定し濁りの評価ができたことから、照明で輝度値 L を一定値以上確保する等により、芋川・稲荷川・黒岳沢川でも夜間の濁り評価が可能となるものと考えられる。しかしながら、夜間降雨時の照明環境下では、雨滴等による照明の乱反射の影響といった画像取得条件における課題が残る。内の川のように夜間降雨時において鮮明な画像のみ抽出して処理したように、照明による雨滴等の反射グレア等のノイズの影響を除去するなど画像取得条件を改善すれば、夜間時でも画像から濁度を指標とした土石流監視が可能と考えられる。

内の川では、2017年10月22日～23日の台風第14号の夜間降雨時にLED白色照明が点灯した映像から、溪流の濁度変化に対し、昼間映像解析と同様に画像のRGB単位ベクトル (r, g, b) との線形相関を確認できた。しかしながら、この内の川における線形相関の近似直線の方向ベクトル (dr, dg, db) は、2018年10月4日の昼間で $(dr, dg, db) = (0.61, 0.23, -0.76)$ 、2017年10月22日～23日の夜間照明時で $(dr, dg, db) = (0.33, 0.49, -0.81)$ となった。同じCCTVで解析領域を統一して分析しており、これらの違いは、自然光とLED白色照明の色温度の差異によるものと考えられる。昼間と夜間照明時で近似直線の方向ベクトル (dr, dg, db) に違いがあるこ

とがわかり，昼間と夜間時における濁水監視には，これらの違いを留意しておく必要がある。

第5章 結論

本研究では、渓流水面画像の RGB 値の単位ベクトルを用いて、濁度評価と土石流検知手法の構築を試みた。本手法によって濁度の定性的評価と土石流検知が可能であることが示唆された。土石流発生を検知する閾値は、RGB 単位ベクトルが連続して近似分布する直線上に対して、直交する任意濁度に相当する平面を設定する手法を考案した。本手法により、黒岳沢川で 2016 年 8 月 23 日に発生した土石流の収集映像に対し事後解析を行い、土石流フロント到達前の濁りや土石流の濁りから土石流検知ができ、その有効性を確認した。同様に、稲荷川で 2011 年 9 月 2 日に発生した土石流に対しても、土石流到達時の濁りを検知できた結果から、その有効性を確認できた。

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、災害監視カメラシステムへの導入と試行、画像解析技術のリアルタイムでの運用、閾値の設定、検知精度の検証を行っていく。

最後に、画像から濁りを評価する本手法は、単体で土石流監視システムを構築するものとは想定していない。雨量や水位といった水文情報を観測する機器や、カメラから水位や動体等を捉える画像解析手法とを組み合わせて重畳化することで、検知精度の高い土石流監視システムとなるものとする。最後に、本研究テーマである「画像解析を用いた濁水監視による土石流検知手法」を、これまでの土石流検知センサーのメリット・デメリットを踏まえ比較し、それらを補い合う運用方法（案）を、表 5.1 に整理した。

表 5.1 既往の土石流検知センサーと組み合わせた運用方法（案）

機器名	概要	メリット	デメリット	画像解析を用いた濁水監視による土石流検知手法と組み合わせた今後の運用方法（案）
ワイヤーセンサー	河道の横断面に設置されたワイヤーが切断されることで、土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> 検知の確実性 低コスト 設置が容易 	<ul style="list-style-type: none"> 繰り返し検知不可 積雪、動物等による切断による誤検知 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットデメリットを補い合うので、必要に応じて組み合わせで運用
ハネルセンサー	河道に吊るされた振り子型の棒が跳ね上げられることで、土石流の流下を検知する。水位・流速も把握する。	<ul style="list-style-type: none"> 土石流検知に加え、水位と流速の計測が可能 連続検知が可能 維持管理が容易 	<ul style="list-style-type: none"> 土石流の衝撃による機器損傷 大きい礫の衝突で水位や流速の計測値が大きき値を示す場合がある 水位と流速の定量化にキャリブレーションが必要 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットが重複するので、既設カメラがあれば画像のみで運用
振動センサー	地盤を伝搬する土石流の振動を、振動計で捉えて土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> 非接触式による機器故障リスク低減 高い検知率 AIとの組み合わせにより検知率向上の報告がある 	<ul style="list-style-type: none"> 高価 土石流規模の推定が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 検知手法が異なり、画像解析とメリットデメリットを補い合うので、必要に応じて組み合わせで運用 監視目的や現地条件により、振動センサーと画像解析のいずれかを選択して運用
超音波式水位・流速計	超音波が水面に反射して戻ってくる時間から距離を計測し水位に換算する。流速はドップラー式（機器をアーム設置の場合）で計測する。	<ul style="list-style-type: none"> 水位や流速の定量評価が可能 流量を定量的に把握可能 非接触式による故障リスク低減 	<ul style="list-style-type: none"> 振動が計測値に影響する 橋梁やアームへの取り付け設置が必要になり、計測ポイントが固定される 偏流する流れに対し、観測点が外れる可能性がある 流路が変化した場合移設が必要になり、移設に労力がかかる 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットを補い合うので、必要に応じて組み合わせで運用 監視観測の目的や現地条件により、超音波式水位・流速計と画像解析のいずれかを選択して運用
光センサー	赤外線を河道の横断方向に放射し、土石流で光が遮られることによって土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> 非接触式による機器故障リスク低減 	<ul style="list-style-type: none"> 豪雨や霧、降灰等での誤検知が多い 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットが重複するので、既設カメラがあれば画像のみで運用
音響センサー	土石流流下時の音を、マイクで捉えて土石流の流下を検知する。	<ul style="list-style-type: none"> 非接触式による機器故障リスク低減 振動センサーと同様に、実測データを解析することで土石流の検知精度を高められる可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 土石流検知のトリガーレベルの設定が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットが重複するので、既設カメラがあれば画像のみで運用
荷重センサー	荷重計を河床に設置し、土石流が流下した際の荷重を計測する。	<ul style="list-style-type: none"> 土石流の荷重を定量評価が可能 別途計測される流量データと組み合わせることで、土砂量及び土砂濃度推定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 土砂が堆積すると、高い値を検出し続ける 出水の規模を評価するには、別途水位データが必要 	<ul style="list-style-type: none"> 検知手法が異なり、画像解析とメリットを補い合うので、監視観測の目的や現地条件により、必要に応じて組み合わせで運用
ニオイセンサー	土石流の前兆現象としてのニオイから、土石流発生を予測する。	<ul style="list-style-type: none"> 前兆現象（ニオイ）から土石流発生を予測するための手法 非接触式による機器故障リスク低減 	<ul style="list-style-type: none"> 検知の不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> 検知手法が異なり、監視観測の目的や現地条件により、必要に応じて組み合わせで運用
水位計	護岸や河床に設置されたセンサーで、水位を計測する。河川の洪水氾濫では、水位は避難情報の閾値に利用されている。	<ul style="list-style-type: none"> 水位の定量評価、データ蓄積が可能 流量を定量的に把握可能 	<ul style="list-style-type: none"> 接触型機器の場合、故障リスクが高く、土石流検知用には不向き 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットデメリットを補い合うので、必要に応じて組み合わせで運用
濁度計	護岸に設置されたセンサーで、濁度を計測する。一般に近赤外線光が利用され、キャリブレーション試験により計測値を土砂濃度に換算する。	<ul style="list-style-type: none"> 土砂濃度の定量評価が可能 別途計測される流量データと組み合わせることで、土砂量推定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 接触型の機器のため、機器が故障しやすい ゴミつまり、土砂堆積による高い値の検出され、異常値が多い 高濁度帯のデータで頭打ちする事例がある 	<ul style="list-style-type: none"> 画像解析とメリットデメリットを補い合うので、必要に応じて組み合わせで運用
画像解析	動体検知・流速	<ul style="list-style-type: none"> 既設のカメラを使用可能 動体検知により、土石流流下の検知が可能 流速の定量評価が可能 アルゴリズム改良やAIにより精度向上が進められている 検出結果に対し、画像から目視による確認が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 低品質画像での精度低下 夜間降雨時の視認性の低い画像での精度低下 山地河川の射流への適用性が乏しい 	<ul style="list-style-type: none"> 組み合わせで運用することで、土石流検知精度の向上が期待される
	水位	<ul style="list-style-type: none"> 既設のカメラを使用可能 水位変化を捉えることが可能 水位の定量評価が可能 検出結果に対し、画像から目視による確認が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 低品質画像での精度低下 夜間降雨時の視認性の低い画像での精度低下 水位計（接触型・非接触型）が正常に稼動していれば、画像による水位計測の必要性は低い 	<ul style="list-style-type: none"> 組み合わせで運用することで、土石流検知精度の向上が期待される
	濁り	<ul style="list-style-type: none"> 既設のカメラを使用可能 非接触により、故障リスクの低い濁度変化の把握 濁度計のデメリットをカバーすることで、濁度計の補完的利用が期待される 溪流の濁度変化を捉えることで、濁り・流速といった水理量情報に土砂濃度の情報を付与することで、多面的な土石流検知が期待される 検出結果に対し、画像から目視による確認が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 低品質画像での精度低下 光源の色温度等の条件に影響を受ける 夜間時の低照度画像では精度が低下 濁度計ほどの定量的な濁度評価は困難 地質の違いや撮影条件により、画像の色情報に違いが生じるため、現場ごとに詳細な確認を要する 	<p style="text-align: center;">-</p>

摘要

近年多発する土砂災害に対して、人的被害軽減及び住民避難情報への活用のため、効率的かつ高精度に溪流を監視する技術が求められている。全国の溪流などには CCTV カメラが多数整備され、オンライン化による公開も進められ溪流監視の基盤が整えられてきている。現状、これら画像データは概ね目視利用に留まっており、土石流が発生した際には、後から映像を観て溪流の状況を確認する事例が多い。溪流監視の多重化を図る目的で、監視カメラが併設されるケースも多い。これら既存の CCTV や豊富な画像データをリソースとして、土石流等の土砂移動現象に対して一層の監視体制強化が必要とされている。

近年の土砂災害と溪流監視の取り組みや、これまでの土石流監視についての技術開発成果や実績のレビューを行い、既存の土石流検知センサーの概要やメリット・デメリット、画像解析技術適用のメリットを整理した。例えば、土石流を検知する機器として現在一般に普及しているワイヤーセンサーは、検知率の高さやコスト面で優れるが、断線後は再設置するまで繰り返し検知が不可能であり、土石流ピーク到達前の水位で切断されてしまうとピーク時の時間的・量的な評価が困難であるという欠点がある。また、土石流が発生するような山地河川では、接触型のセンサーは損傷のリスクが大きなデメリットとなり、非接触型のセンサーの方が有利である。その上で、近年の画像解析技術のレビューを行い、溪流監視への適用事例や課題を整理するとともに、土石流監視における濁水監視の意義と、カメラ画像から非接触で濁りを把握する重要性を整理した。光源条件が一定しない屋外の CCTV 等の監視カメラにおいては、光源条件を一定にして行う室内実験と同じ手法を適用できないため、未だ画像から濁度の定量評価についての研究や技術開発はなされておらず、濁りを指標とした土石流検知手法は確立されていない。それらを踏まえ、溪流水面画像の RGB 値及びその単位ベクトルを用いて、CCTV 等の画像データを用いた非接触による濁度評価と土石流検知手法を提案することを研究目的とした。

本研究では、信濃川水系魚野川支流芋川、利根川水系大谷川支流稲荷川、那智川水系内の川、石狩川水系黒岳沢川を研究対象地とした。芋川では2019年10月の台風第19号豪雨に伴う中小出水の映像、稲荷川では2016年の中小出水と2011年9月の土石流の映像、内の川では2017年10月の台風第21号豪雨に伴う中小出水と2018年に実施した溪流実験時の映像、黒岳沢川では2016年の中小出水と土石流の映像を収集し、後述する濁度評価と土石流検知の検討に供した。また、濁水の色情報を解析するにあたり、複数の色情報の指標のうち、画像解析による濁水監視と土石流検知に適した表現手法を作成した。続いて、屋外で時々刻々と変化する日照条件に対応するため、色情報のRGB値を単位ベクトル化する手法を用いて、濁度との相関関係や土石流発生の閾値を設定する手法を作成した。

濁度の観測データがある芋川と内の川において、画像の色情報と濁度の相関関係を考察した。収集した画像から濁水映像の特徴を整理し、いずれの溪流においても、中小出水時に濁水が発生すると、溪流水面の濁りは茶系を呈することを確認した。また、収集した映像からも、濁水発生時において溪流水面の茶系の色に対し、濁水の濃淡の違いを視覚的に確認し、出水規模に応じて溪流水の濁度は増減し、土砂本来が持つ色の濃淡が溪流水面にも表れることになることを明らかにした。内の川では、夜間降雨時におけるLED白色照明の点灯時の映像から、濁水発生時に溪流水面が昼間と同様に茶系の色を呈することを確認した。夜間降雨時でも、照明により明るさを確保できれば、溪流の濁水の発生状況を把握可能になることが確認できた。次いで、画像解析による濁度評価手法により、溪流水面の解析結果と、水位や濁度等の現地観測データとを比較し、画像の色情報と濁度との相関関係を考察した。結果、芋川と内の川において、濁水発生に伴い水面が茶系を呈すると、RGBのうちR値が相対的に高くなり、高濁度になるほどその傾向が顕著に表れることがわかった。また、水位と濁度が出水前と同程度に低下すると、B値が相対的に高くR値は低くなり、RGB値も濁水発生前と同様の状態に戻る傾向が認められ

た。芋川においては、RGB や輝度値 L は日照条件による輝度の時間変動が 100~230 程度ある一方で、RGB 単位ベクトルの成分をみると rgb はそれぞれ 0.42~0.75 程度の変動で、曇天の濁水発生時間中に限ると 0.53~0.62 の範囲での変動に収まった。RGB 値を単位ベクトル化することで、日照の変化に伴う輝度変化の影響を軽減した解析値を得ることができた。また、濁水発生前から濁水発生時へ至る、方向ベクトル (dr, dg, db) を持つ近似直線と任意の濁度に相当する位置ベクトル (r, g, b) から、近似直線を直交する平面を導出した。この平面を濁度に応じて段階的な設定をすることで、平面を境界にして位置ベクトル (r, g, b) から濁度が評価可能となることを示した。

土石流映像を収集できた稲荷川と黒岳沢川において、収集した画像から土石流映像の特徴を整理し、土石流発生時においても、渓流水面の濁りは茶系を呈することを確認した。特に土石流フロントおよび土石流流下時の渓流水面の色は、中小出水時の濁水の色と比較して、土砂本来が持つ色の特徴が渓流水面に強く表れることを視覚的に確認した。画像解析により、稲荷川と黒岳沢川においても、中小出水時の濁水発生に伴い水面が茶系を呈すると、RGB のうち R 値が相対的に高くなり、濁度と画像の色情報との相関関係を確認した芋川と内の川と同様の傾向を示すことが明らかとなった。黒岳沢川の 2 ヶ月間の画像データからは、中小出水による濁水、土石流フロント到達前の濁水、土石流による濁水の画像を解析することで、RGB 単位ベクトルの連続的な変化から方向ベクトル $(dr, dg, db) = (0.46, 0.43, -0.78)$ を持つ近似直線を導出した。濁水発生前~濁水発生~土石流フロント到達前~土石流流下の過程が、近似直線に沿って連続する傾向で分布する結果が得られたことより、土石流フロント到達前の位置ベクトル $(r, g, b) = (0.600, 0.577, 0.554)$ と近似直線の方方向ベクトル $(dr, dg, db) = (0.46, 0.43, -0.78)$ から、この近似直線を直交する平面を導出した。結果、黒岳沢川で 6 月 24 日~8 月 20 日の期間で発生した中小出水による濁水と、8 月 23 日に発生した土石流を境界に、それぞれの位置ベクトル (r, g, b) の点群を分割する平面となった。黒岳

沢川で検討することができた土石流映像は 8 月 23 日の一事例，稲荷川で検討することができた土石流も 2011 年 9 月 2 日の一事例ではあるが，その発生に至る線形性を示す方向ベクトル (dr, dg, db) から，土石流フロント到達前の濁水を境界とする平面を設定することで，土石流発生検知の閾値設定が可能となる方法を提案できた。

本研究成果と，既存の雨量や水位といった水文情報，カメラの視覚的画像情報などを組み合わせて重畳化することで，現行よりも検知精度の高い土石流監視システムを構成できるようになると考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、多くの方々に多大なるご支援を頂いた。

北海道大学大学院農学研究院の山田孝教授には、博士後期過程の3年半に渡って、終始懇切な御指導を賜りますと共に、北海道外在住にも関わらず社会人博士として受け入れて下さったことに、深甚の謝意を表します。

北海道大学大学院農学研究院の丸谷知己名誉教授には、学部修士の4年間の御指導と、社会人になってからも砂防学に関して薫陶を受け続けた。北海道大学大学院農学研究院の中村太士教授と笠井美青准教授には副査を快く引き受けていただいた。北海道大学広域複合災害研究センターの山口真司特任教授と厚井高志准教授、北海道大学大学院農学研究院の桂真也助教にはゼミ発表や論文執筆に当って、貴重な御助言をいただいた。

九州大学大学院農学研究院の水野秀明准教授と、国土交通省国土技術政策総合研究所の木下篤彦主任研究官（現、国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム主任研究員）には、国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームへの出向期間中やその後の投稿論文執筆において、貴重な御助言をいただいた。

株式会社ブレインズの福田昌宏博士・井深真治博士・肥後明豪氏・浅野義知氏には、画像処理や解析における指導に多大な御助力をいただいた。

日本工営株式会社の先輩社員である水谷佑氏には、社内における画像解析の研究開発における協働、砂防技術者としての観点からの監視・観測の考え方や技術的課題への対応、論文執筆・投稿に至るまで、博士後期課程へ進学前から計6年間の長きにわたり御指導いただいた。日本工営株式会社の関係各位には、業務の傍ら研究を進めることに理解と協力を頂いた。

両親には、高校卒業後からの北海道大学農学部への進学支援から始まり、学部修士での研究の基礎を培った時期の多大なサポート、社会人研学生活への理解と応援等、温かく見守っていただいた。

ここに深く謝意を表します。

引用文献

- 赤沼隼一・長谷川真英・浅野保夫・檉田司紀・五十嵐和秀・松岡暁・麻生あすみ・菅沼健・伊藤隆郭（2020）：魚野川流域における流砂観測の取り組み，令和2年度砂防学会研究発表会概要集，pp.197-198
- アシュダウン マーク・佐藤いまり・岡部孝弘・佐藤洋一（2007）：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
- Daniela Lopez-Betancur・Ivan Moreno・Carlos Guerrero-Mendez・Tonatiuh Saucedo-Anaya・Efrén González・Carlos Bautista-Capetillo・Julián González-Trinidad（2022）：Convolutional Neural Network for Measurement of Suspended Solids and Turbidity, Measurement, Vol.199, pp.111218.
- Darragh Mullins, Derek Coburn, Louise Hannon, Edward Jones, Eoghan Clifford, Martin Glavin (2018) : A novel image processing-based system for turbidity measurement in domestic and industrial wastewater. Water Science and Technology, 77(5), 1469-1482
- 土肥聖平・土田孝・杉山実・田代広行・橋本涼太（2019）：土石流災害時のニオイの発生と土砂流出の時系列に関する研究，公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集，地盤と建設，Vol.37，No.1，pp.89-98
- 遠藤真哉・梶原倅・山野井徹（2019）：色の分析による表土の成因と区分－阿蘇火山地域を例に－，応用地質，Vol.60，No.5，pp.216～229
- Fujita I（2017）：Discharge Measurements of Snowmelt Flood by Space-Time Image Velocimetry during the Night Using Far-Infrared Camera, Water 9(4), 269
- 藤田一郎・渡辺健・井口真生子・長谷川誠（2020）：深層学習を用いた STIV 解析の高性能化，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.76 No.2
- 藤田正治・澤田豊明・水山高久（2003）：山地流域における濁度変化と土砂動態，水工学論文集，第47巻，pp.739-744
- 福田昌宏・井深真治・水谷佑・高原晃宙・木下篤彦・水野秀明（2016）：インターバルカメラの画像解析による山地溪流における水位・濁水計測，

- 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.102-103
- 埴翔一郎・藤田昌史・桑原祐史 (2019) : Deep Learning 応用による河川水の濁りを対象とした流況画像分類に基づく河川モニタリング, 土木学会論文集 G (環境), Vol.75, No.5, pp. I_297-I_306
- 本田健・安養寺信夫・山口恭史・木崎原康一・赤星綾香 (2006) : 映像解析手法を用いた土石流検知システムの現地実証試験, 平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.388-389
- 井深真治・福田昌宏・水谷佑・高原晃宙・木下篤彦・水野秀明 (2016) : 画像解析による動体追跡技術の土砂移動検知への適用, 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.290-291
- 井深真治・水谷佑・五十嵐和秀・高原晃宙・福田昌宏・池島剛・木下篤彦 (2017) : 高コントラスト被写体を用いた単眼カメラ画像解析による高精度距離検出, 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.724-725
- 井深真治・肥後明豪・福田昌宏・五十嵐和秀・水谷佑・松本定一・池島剛 (2018) : IoT とエッジコンピューティングを用いた画像計測による災害監視に対応した自律型高機能カメラの開発, 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.723-724
- いであ株式会社 (2021) : 令和 3 年度新技術・新工法説明会技術資料, pp.48-62
- 五十嵐和秀・水谷佑・高原晃宙・水野秀明 (2017) : 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, pp. 20-23
- 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 (2019a) : 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
- 五十嵐和秀・水谷佑・松本定一・池島剛・井深真治・田中健貴・木下篤彦 (2019b) : 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, 河川技術論文集, pp.187-192
- 五十嵐和秀・鈴木啓介・戸田満・松岡暁・麻生あすみ・伊藤隆郭 (2021) :

- 画像解析による浮遊砂量把握のための基礎的検討，令和3年度砂防学会研究発表会概要集，pp.59-60
- 伊原浩生・山口晴幸・増永和弘（2001）：デジタル画像を利用した濁度測定法の検討，第29回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，VII-36，pp. 884-885
- 飯塚昌之・中嶋芳雄（2000）：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
- Inderdeep Verma¹・Aditi Sharma・Khushi Upadhyay・Manjari（2021）：TURBIDITY DETECTION USING IMAGE PROCESSING，International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies，Vol.10，Issue 6，pp: 154-160
- 井上正之・井上誠喜（1997）：撮影時照明条件が異なる場合のCRT上での色再現，電子情報通信学会技術研究報告・IE，画像工学 96 (507)，39-44，1997-02-03
- 石井秀樹・森島成昭・松岡暁・川又憲二・濱中拓郎・木下篤彦（2011）：監視カメラの画像判読技術を用いた土石流の監視に関する検討，平成23年度砂防学会研究発表会概要集，pp.534-535
- 株式会社ブレインズ（2022）：一体型屋外監視カメラシステム，<https://www.brains.co.jp/contents.php?path=content/kenkyu/box.html>，参照2022-4-28
- 金澤瑛・木下篤彦・中谷洋明・山田拓・柴田俊・海原荘一・井深真治（2020）：防災用監視カメラを用いた降雨量推定手法の検討，令和2年度砂防学会研究発表会概要集，pp.683-684
- 加藤誠章・菊井稔宏・宮瀬将之・酒谷幸彦・西井洋史（2008）：前兆現象による土砂災害の発生危険度の評価手法について，砂防学会誌，Vol.60，No.6，pp.11-19
- 川瀬遼太・松岡暁・五十嵐和秀・橋本憲二・伊藤隆郭・木村詩穂・植野利康・赤澤史顕（2022）：富士川流域における流砂量観測の取り組み，令和4年度砂防学会研究発表会概要集，pp.637-638

北澤裕介・内川憲二（2009）：自然画像の色度・輝度分布とオプティマルカラーの関係，映像情報メディア学会技術報告，Vol.33，No.45，pp.77-80

国土交通省（2006）：土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会，
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/dosya_zencho.html，参照 2022-4-1.

国土交通省（2014）：太田川河川事務所記者発表・配付資料，「平成26年8月豪雨」による土石流被害箇所における土石流警報装置（ワイヤーセンサー）の誤警報について，
http://www.cgr.mlit.go.jp/hiroshima_seibu_sabo/gensui/pressrelease/pdf/dosyakeihou/20141105press-wiresensagokeihou.pdf，参照 2022-11-7.

国土交通省（2021a）：国等による洪水及び土砂災害に関する予報のあり方，洪水及び土砂災害の予報のあり方に関する検討会（第3回），資料5，
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kentoukai/arikata/part3/siryous_3.pdf，参照 2022-11-18.

国土交通省（2021b）：広島西部山系砂防事務所記者発表・配付資料，大雨により土石流が発生した広島市安佐南区・西区の3箇所において応急対策に着手します，
https://www.cgr.mlit.go.jp/hiroshima_seibu_sabo/press/pdf2021/20210903.pdf，参照 2022-9-28.

国土交通省（2022a）：令和3年の土砂災害，
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3doshasaigai.pdf>，参照 2022-4-28.

国土交通省（2022b）：国土交通省防災業務計画（令和4年6月修正）第16編地域防災計画の作成の基準，
<https://www.mlit.go.jp/saigai/bousaigyomukeikaku.html>，参照 2022-9-28.

国立研究開発法人土木研究所・日本工営株式会社・株式会社拓和・坂田電機株式会社（2012）：振動検知式土石流センサーを利用した土石流監視手法に関する共同研究報告書，共同研究報告書，第445号

国際電気通信連合（2002）：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, 参照 2022-4-28

国際電気通信連合（2015）：ITU-R BT.2380-0,

https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2380-2015-PDF-E.pdf,
参照 2022-4-28

小杉賢一郎・千野佑輝・正岡直也・中谷加奈・吉村元吾・菅原寛明・田中健貴（2018）：実効雨量を用いた基岩地下水位の変動解析，平成 29 年度大規模土砂災害対策研究機構年報，pp.46-49

公益社団法人土木学会（2018）：水理公式集（2018 年版），pp.296-298

栗木一郎（2015）：有彩色照明下における無彩色点の CIELAB 空間での線形性，映像情報メディア学会技術報告，Vol.39，No.43，pp.31-32

Marcel Hürlimann, Velio Coviello, Coraline Bel, Xiaojun Guo, Matteo Berti, Christoph Graf, Johannes Hübl, Shusuke Miyata, Joel B. Smith, Hsiao-Yuan Yin（2019）：Debris-flow monitoring and warning: Review and examples, Earth-Science Reviews, Elsevier, 199, pp.26.

松本定一・椎葉秀作・大森秀人・杉山和也・石井秀樹・森田威孝・流川遥平（2017）：天竜川上流域における CCTV 画像解析を活用した流域監視の検討，平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.216-217

三輪賢志（2000）：桜島における接触型土石流検知センサー（ハネルセンサー）による土石流観測について，砂防学会誌，Vol.53，No.4，pp.62-64

水垣滋・谷瀬敦・村山雅昭（2020）：河川における濁度計観測データの異常値処理手順，寒地土木研究所月報，第 802 号，pp.53-58

内閣府（2019a）：避難勧告等に関するガイドライン①（避難行動・情報伝達編）

内閣府（2019b）：避難勧告等に関するガイドライン②（発令基準・防災体制編）

小川達則・佐々木寿・能和幸範・青山裕（2009）：非接触センサの連続観測による土砂動態モニタリングの可能性，砂防学会誌，Vol.61，No.6，pp.27-30

- 大坂剛・高橋英一・國友優・山越隆雄・能和幸範・木佐洋志・石塚忠範・宇都宮玲・横山康二・水山高久（2013）：桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定，砂防学会誌，Vol.65，No.6，pp.46-50
- 桜井亘・泉山寛明・高原晃宙・倉島優一・叶嘉星・樋口哲也・小林健（2019）：AI（機械学習）を活用した土石流検知センサー，2019年度砂防学会研究発表会概要集，pp.307-308
- 柴田俊・小竹利明・山田拓・木下篤彦・中谷洋明・金澤瑛・海原荘一・井深真治（2020）：輝度の差分映像による斜面崩壊・土石流の検知と降雨・夜間の監視映像の鮮明化，第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.79-84
- 下田孝徳・上原良文・猿澤宗一郎・吉田三郎・古山剛（2002）：改良型土石流ハネルセンサーによる観測について，平成14年度砂防学会研究発表会概要集，pp.62-63
- Siti Nor Asyiqin Ramli, Khairunnisa Kadaruddin, Mohamad Faiz Zainuddin, Zulkifly Abbas（2019）：The Development of Low Cost Turbidimeter using Smartphone Camera and Image Processing, International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Vol.8, Issue 8S, pp: 420-424
- 高山百合子・大野剛・織田幸伸（2022）：衛星データを活用した濁り平面分布を初期値とした濁り拡散解析の検討，土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.78, No.2, pp. I_859-I_364
- 田中昌宏・三浦一彦・上田純広・池谷毅（2000）：衛星画像解析と数値シミュレーションによる海域濁度評価技術の開発，鹿島技術研究所年報，Vol.48, pp.115-120
- 田中健貴・内田太郎・蒲原潤一・桜井亘（2015）：近年の山地流域における流砂観測による成果と課題，土木技術資料，Vol.57, No.7, pp. 22-25
- 谷山勝幸・水山高久（1988）：土石流発生の前兆現象，砂防学会誌（新砂防），Vol.40, No.6, pp.31-32
- 梅田真吾・小澤剛・宮谷綾子・建部祐哉・松下俊樹・中島隆信（2016）：

- 水位観測データの高精度化・安定化のための施設設置に関わる暗黙知・技術の体系化, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp.61-66
- 内川恵二 (2004) : 色の恒常性と認識, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.5, pp.662-668
- 八木潤平・藤田一郎・谷昂二郎・東川真也 (2019) : 水面の大変形を伴う開水路乱流計測に対するオプティカルフロー法の適用, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, pp. I_661-I_666
- 山田孝・南哲行・水野秀明 (1998) : 土石流災害防止のためのセンサー開発の現状と今後の課題, 砂防学会誌, Vol.50, No.5, pp.60-64
- Yeon-joong Kim・Ichiro Fujita・Makoto Hasegawa・Jong-sung Yoon (2022) : Measurement of debris flow velocity in flume using normal image by space-time image velocimetry incorporated with machine learning, Measurement, Vol.199, pp.111218.
- Yuanyang Zhu・Pingping Cao・Sheng Liu・Ying Zheng・Chaoqun Huang (2020) : Development of a New Method for Turbidity Measurement Using Two NIR Digital Cameras, ACS Omega 2020, 5, pp.5421-5428