

山地河川における多地点画像の特徴量の相互相関解析による濁りの発生、伝播の観測

○一倉夏帆*¹ 内田太郎*² 金澤瑛*³ 関根峻*⁴ 森みちる*¹*¹ 筑波大学大学院, *² 筑波大学生命環境系,*³ 国土技術政策総合研究所(現 土木研究所), *⁴ (一財) 砂防・地すべり技術センター

1. 背景

出水中の濁りの発生源や伝播経路、伝播にかかった時間などの濁り流出過程を明らかにすることは山地河川の細粒土砂の挙動を理解する上で重要な要素の1つである。細粒土砂の流出源・過程の推定には、土砂と水量とのヒステリシスループの向きが有効な指標となっている。ヒステリシスの向きから、出水中に土砂は山地斜面や支川から流入したり、枯渇したり、拡散・希釈されるなどと流出過程が推定されてきた。しかし、山地流域の複数地点において濁りを観測することで流出過程を直接的に観測した研究は限られている。例えば^{1, 2}。また、濁りの流出過程は流域が大きくなり、流下距離が長くなるほど複雑になると考えられているが^{*1, 3}、流域が大きいほど直接的なプロセス解明のためには多くの観測地点が必要である。しかし、従来の濁りの観測手法である濁度計は、コスト面の問題から多地点運用が困難である。

本研究では、山地斜面や支川、河床堆積物など様々な濁りの発生源が想定される、比較的大きい山地流域を対象に、タイムラプスカメラを用いて濁りの多地点観測を実施した。また、相互相関解析によって時系列グラフの波形の類似度を定量化し、濁りの発生源や伝播特性を明らかにすることを目的とした。

2. 手法

観測対象流域は山梨県北杜市に位置する富士川水系大武川とした(図1)。流域面積は73.3 km²、流路延長は16.4 kmである。河川撮影は本川沿い9地点で実施した(表1)。タイムラプスカメラはSecuSTATIONのSC-MB68(5200×3900, 96dpi)、SC-ML68(3264×2448, 96 dpi)、SC-MW68(8704×4896, 180 dpi)を使用した。ホワイトバランスは自動で調整した。撮影間隔は1分もしくは5分とした。

河川表面から、流れが安定している部分を解析領域としてカメラごと、出水ごとに矩形に切り出した。OpenCVを用いて解析領域内の画素値を抽出し、以下の式からRGB単位ベクトル(r, g, b)を求めた:

$$r = \frac{\bar{R}}{\sqrt{\bar{R}^2 + \bar{G}^2 + \bar{B}^2}}, g = \frac{\bar{G}}{\sqrt{\bar{R}^2 + \bar{G}^2 + \bar{B}^2}}, b = \frac{\bar{B}}{\sqrt{\bar{R}^2 + \bar{G}^2 + \bar{B}^2}}$$

ただし、 $\bar{R}$, $\bar{G}$, $\bar{B}$ はそれぞれ R, G, B の解析領域内の平均値である。RGB単位ベクトル R 成分値(r)は濁度の上昇に伴い上昇するとわかっている^{*4}。ある地点の r の時系列波形と、その上下流の r 波形の類似度(相互相関係数)を以下の式から求めた:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\sum_{i=0}^{n-\tau} \{r_{up\ i+\tau} - \bar{r}_{up}\} \cdot \{r_{down\ i} - \bar{r}_{down}\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-\tau} \{r_{up\ i} - \bar{r}_{up}\}^2 \times \sum_{k=1}^n \{r_{down\ i} - \bar{r}_{down}\}^2}}$$

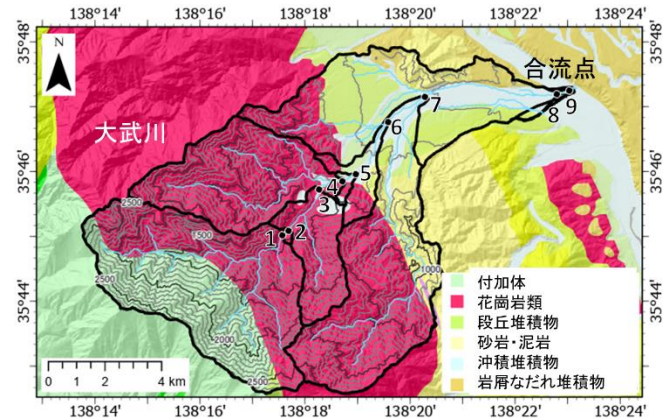


図1. 流域図 *サイトIDはHを省略した。

表1. 観測サイトの概要

ID	流域面積 (km ²)	合流点からの 流路延長(km)	標高 (m)
H1	21.3	10.5	911
H2	21.5	10.2	893
H3	26.2	8.8	810
H4	37.6	8.0	746
H5	37.9	7.5	731
H6	39.8	5.7	653
H7	57.2	4.4	606
H8	72.2	0.6	501
H9	72.6	0.2	493

表2. 解析対象イベント

ID	イベント開始時 刻	総雨量 (mm)	最大時間雨 量(mm/h)
1	2022/7/3 23時	17	7
2	2022/9/19 19時	39	11
3	2023/6/22 6時	88	13

ただし、 $r_{up\ i}, r_{down\ i}$ は上下流それぞれの i 番目のデータ、 τ はラグタイムである。また、以下の式を用いて有意検定を実施した^{*5}:

$$\rho_{\alpha}(\tau) = \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}}(v(\tau))}{\sqrt{v(\tau) + t_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(v(\tau))}}, v(\tau) = \frac{N - |\tau| - 2}{m}$$

ただし、 v は有効自由度、 α は有意水準、 $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ は t 分布の逆関数、 N はデータ数、 m は有効自由度の補正係数である。なお、本研究では、有意検定における有効自由度の補正は $1/m = 1, 1/4$ とした。さらに、 r 波形の類似度が高いときのラグタイムとして、相互相関係数が最大値×0.95以上となるラグタイムの平均を求めた。さらにラグタイムを距離で割って単位流下距離当たりのラグタイム(比ラグタイム)を求めた。

解析対象イベントは総雨量が異なる3つのイベントとした(表2)。

3. 結果と考察

図2に各イベントの r の時系列グラフを、図3に相互相関解析結果を示す。

イベント1では、 r のピークは下流に行くにつれなだらかになり、ピーク時刻は遅くなった(図2)。また、赤線で示すように、H8において濁りの発生はH7より早い時刻に観測され、H9では濁りの発生は2度観測された。これらは、濁り成分の支川からの流入やH7より下流の河床堆積物の巻き上げ等、複数の濁りの発生源があった影響と考えられる。図3より、イベント1では m の値に関わらず、ほとんどの区間の相互相関係数は有意であった。H1~H8間の相互相関係数はすべて0.6以上の値をとり、 r 波形の類似性が認められた。比ラグタイムはほとんどの区間で正の値であり、25~45 min/kmとばらつきが少なかった。以上の結果から、イベント1では濁りが約10 km区間を約25~45 min/kmで伝播したと考えられる。ただし、H3, 4, 7, 9では濁りの消失時刻が上流より早いことから(図2)、濁りは途中で消滅しており、発生した濁りの全量が下流へ伝播した訳ではないと考えられる。

イベント2では、濁りが発生している期間中に r の上昇が見られたが、明瞭な r 波形のピークは見られなかった(図2)。また、赤線で示すように、H4, 6, 8において濁りの発生は上流のサイトより早い時刻に観測された。図3より、イベント2ではH6, 7との組み合わせ区間を除き、ほとんどの区間で有意であった。また $m=4$ では $m=1$ の場合と比べて有意なプロットがわずかに減少した。相互相関係数は0.4~0.8であり、 r 波形の類似度はイベント1に比べると低かった。有意な類似波形の比ラグタイムは0に近い値をとった。これは、イベント2の r の時系列グラフに明瞭なピークがなく、長時間一定の値をとったことに起因すると考えられる。これは、連続的な濁りの発生による濁りの長期化や、濁度に対して r が飽和した可能性などが考えられ、今後の画像解析技術や相互相関解析技術の向上が必要であると考えられる。

イベント3では、H1で14-15時に発生した r のピークが下流に行くにつれ、なだらかになり、H6付近ではピーク波形が消失した(図2)。また、赤線で示すように、H4, 6, 8において濁りの発生は上流のサイトより早い時刻に観測された。図3より、イベント3ではサイト間距離が離れるほど(プロットが斜線から離れるほど)有意性が失われた。相互相関係数は0.4~0.8であり、一部区間で r 波形の類似度は高かった。有意な類似波形の比ラグタイムは、上流では正の値を、下流では0に近い値をとった。以上の結果から、上流域では発生した濁りが下流に伝播した可能性が考えられるが、下流域では、下流区間での濁りの発生など、場所によって複数の異なる発生、流出、消滅のプロセスが重なり合ったため、波形の類似度が低下した可能性が考えられる。

4. まとめ

タイムラプスカメラを用いた多地点観測によ

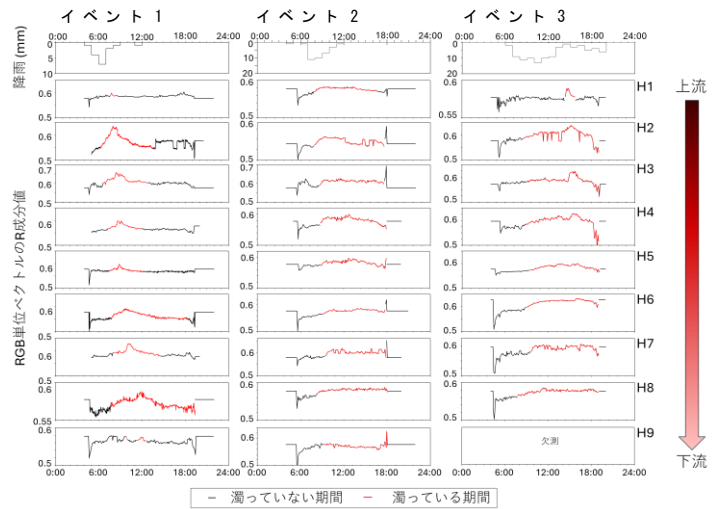


図2. RGB単位ベクトルR成分値(r)の時系列グラフ

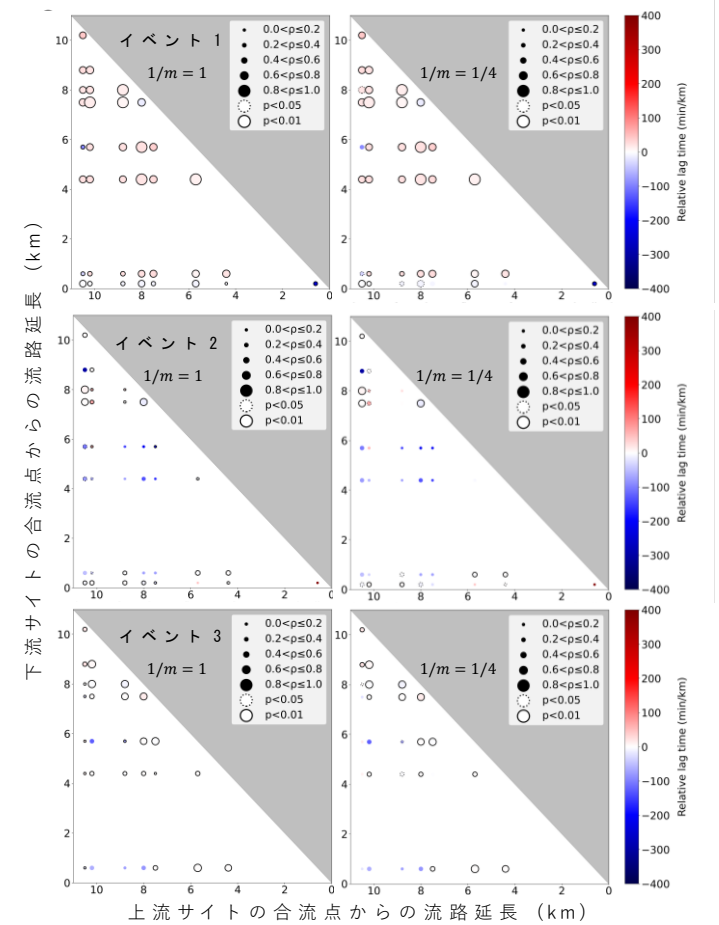


図3. 相互相関解析結果

り、出水時の濁りの発生源の空間分布に関する情報が得られる可能性が分かった。さらに、河川表面のRGB特徴量の時系列変化を相互相関によって解析することで、出水時に濁りは10 km以上伝播すると実証的に明らかにした。

参考文献 (1)谷ら(2012): 砂防学会誌, 65-3, (2)田村ら(2018): 砂防学会誌, 71-1, (3)倉茂(1996): 北海道大学地球物理学研究報告, 59 (4)五十嵐ら(2019): 砂防学会誌, 71-6, (5)Chao and Chung (2019): *Earth Space Sci*, 6-8