

信州大学農学部 AFC 手良沢山ステーション・野田ヶ沢における 土砂流出の実態

福山泰治郎・小野 裕・平松晋也

信州大学学術研究院農学系

要 約

信州大学農学部 AFC 手良沢山ステーション・野田ヶ沢流域 (37 ha) において水文観測および浮遊土砂濃度観測を行い、源頭部森林流域の水・土砂流出特性の解明を試みた。観測期間中、この流域では無降雨期間でも常に流出が見られた。降雨時の流出応答は非常に鋭敏で、花崗岩類を基盤とする流域特有の流出特性が確認された。浮遊土砂濃度は基底流出時 (平水時) には10~20 mg/L 程度を推移したが、降雨時には流出高にほぼ同期して増加した。流出高と浮遊土砂濃度を時系列で見ると、反時計回り (左回り) のループ (ヒステリシス) が見られ、水位が遞減し始めているにもかかわらず、浮遊土砂濃度が増加する出水イベントもあった。このことから、不安定土砂が生産・流出して河道に十分に供給されることにより、出水時に浮遊土砂濃度が即時に上昇するプロセスが推察された。現地踏査により、増水時に流路に面した斜面脚部が洗掘を受ける状況や、未舗装の作業道で降雨時に地表流が発生し、路面から流路に水と土砂が流入する状況が確認されており、これらの土砂生産源が流路への不安定土砂の供給に関与していると考えられた。

キーワード：手良沢山ステーション，野田ヶ沢，水文観測，浮遊土砂濃度

はじめに

山地河道は、流量変化が短時間に急激に生じることや、洪水時には礫を含め幅広い粒径の土砂が移動すること、それにとまって河床変動が激しいことなど、下流河川とは異なる特徴を有する。そのため、連続的に流量や流砂量 (流砂：粒径が細かい方からウォッシュロード・浮遊土砂・掃流土砂に分類される) を観測する場合、洪水による観測機材の流失、礫や流木の直撃や凍結による破損、土砂堆積による埋没、水位低下によりセンサーが水面上に出てしまうことなど、多くの困難をともなう。しかしながら、山地河道において平水時だけでなく洪水時も低水時にも連続して流量や流砂量を観測し、流域の流出特性 (降雨に対する流出の応答) や土砂動態を把握することは、総合的な土砂管理¹⁾ や、山地流域の持続的な保全・利用のために重要である。そこで本研究では、信州大学農学部 AFC 手良沢山ステーション・野田ヶ沢流域において、水文観測および浮遊土砂濃度観測を行い、流域の水・土砂流出特性の解明を試みた。

調査方法

1. 流域の概要

信州大学農学部 AFC 手良沢山ステーションの4林班、野田ヶ沢流域 (図1, 北緯35度52分, 東経138度2分) において観測を行った。流域面積は37.05 ha, 標高は1,000 m ~ 1,260 m, 地質は中生代白亜紀の新时期家花崗岩類 - 高遠花崗岩 (黒雲母花崗岩 - 花崗閃緑岩) である。植生はほぼ人工林で占められ、主な樹種はヒノキ, カラマツ, アカマツである。観測地点付近の年平均気温は8.8℃, 年降水量は1,492 mm (2008~2012年) である。流域内にはおおむね谷に沿って未舗装の作業道が整備されており、流域内の作業道の総延長は約2,450 m, 路網密度は66.1 m/ha である。

2. 水文観測

水位は、量水堰 (写真1(a), (b) 90°三角堰, 水路幅1,300 mm, 堰高 (ノッチ下水深) 350 mm) の越流水深を水位計 (ウイジン製, UIZ-GY200-LR) により計測し、10分間隔で記録した。なお、観測期間中に前述の水位計が故障したため、2016年5月16日16時50分以降はバックアップ用として併設した水位計 (Intech Instruments CO. LTD., WT-HR64K) で水位観測を継続した。得られた越流水深を「三角堰による流量の公式」(JIS B 8302-

受付日 2016年12月22日

受理日 2017年1月30日

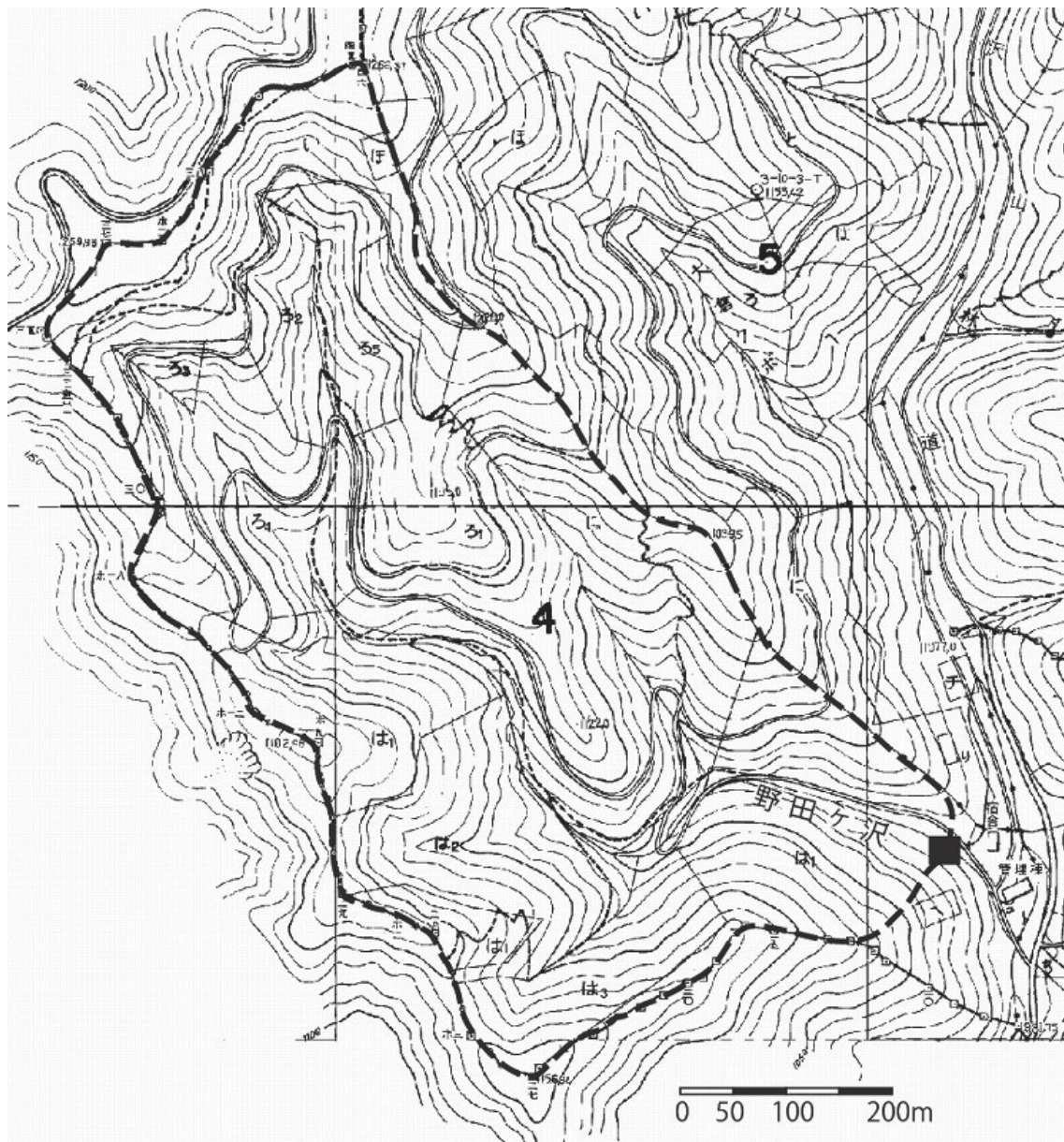


図1 野田ヶ沢流域地形図(5,000分の1地形図(信州大学農学部附属手良沢山演習林林班図)に加筆) 黒の破線が流域界, ■印が量水堰および濁度計の設置位置を示す。

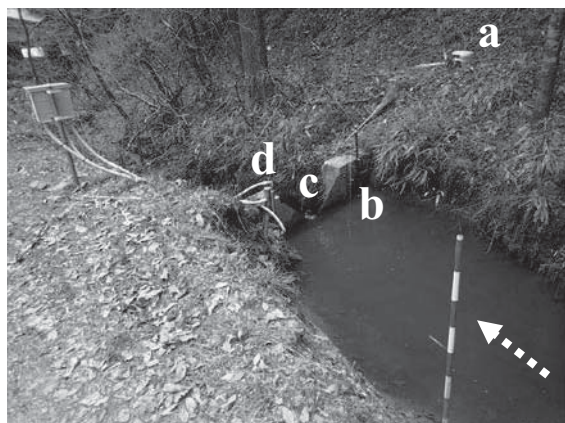


写真1(a) 量水堰および水位計・濁度計
a : 濁度計ロガーおよびバッテリー, b : 濁度計, c : 三角堰, d : 水位計



写真1(b) 量水堰(下流側から撮影)

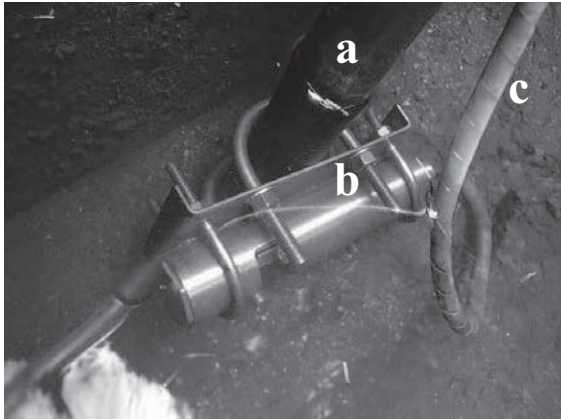


写真2 濁度計の設置状況

a：支柱， b：濁度計， c：電源・通信ケーブル

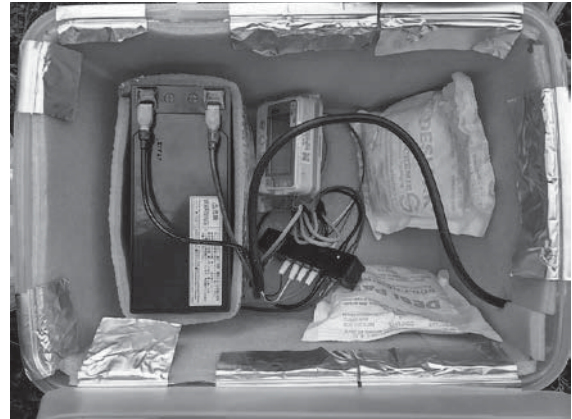


写真4 電圧ロガー・バッテリーの収納状況

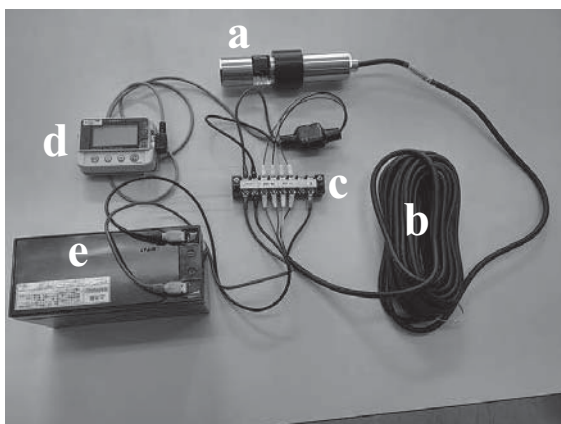


写真3(a) 電圧ロガー・バッテリー・濁度計の接続

a：濁度計， b：電源・通信ケーブル， c：端子台，
d：電圧ロガー， e：バッテリー

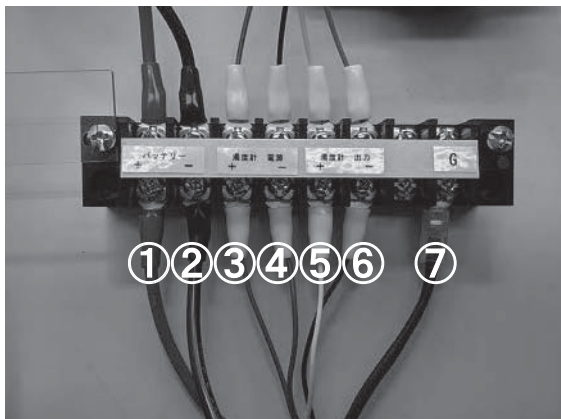


写真3(b) 端子台の配線状況（写真3(a)中のcを拡大）
①バッテリー（+）， ②バッテリー（-）， ③濁度計電源（+）， ④濁度計電源（-）， ⑤濁度計出力（+）， ⑥濁度計出力（-）， ⑦アース

1990)により流量に換算し，流量を流域面積で除して流出高を求めた。降雨量は，転倒ます型指示雨量計（中浅測器株式会社製，B-011 20）を用いて計測した。

3. 浮遊土砂濃度観測

浮遊土砂濃度は，ワイパー付きの透過光式濁度計（ウイジン製，UIZ-TC3000，外径32 mm・長さ163 mm）のステンレス製）を用いて計測し，5分間隔で電圧出力を記録した。濁度計は，量水堰の袖部上流側に立てた支柱に固定した（写真2）。濁度計の電源には，密封型鉛蓄電池（YUASA製，PE12V17）を用い，バッテリーと濁度計をつなぐ電源・通信ケーブルには動物等による損傷を防ぐために保護カバー（スパイラルチューブ）を巻き付けた。電圧ロガー（ウイジン製，UIZ-5042）は，バッテリーと濁度計に接続し（写真3(a)，(b)），バッテリー・吸湿剤とともに密封容器内に収納した（写真4）。密封容器の内壁とバッテリーには保温と遮光のためアルミマットを貼りつけた。電圧ロガーは，省電力のためにプレヒート時間30秒（計測時刻の30秒前から計測終了まで濁度計に電源を供給し，計測終了後は次の計測時刻まで電源をOFFとする）に設定した。記録された電圧出力を浮遊土砂濃度に換算するために，記録時刻に合わせて500 ml程度採水し，実験室に持ち帰り，事前に乾燥重量を測ったメンブレンフィルター（pore size 0.45 μm，ADVANTEC製，A045A047A）を用いてろ過した後，フィルターを乾燥・秤量して浮遊土砂量を求め，清水量で除して浮遊土砂濃度を求めた。電圧出力値と同時刻に実測した浮遊土砂濃度から次の換算式（式1）を導き，以降は同式により電圧出力値から浮遊土砂濃度を求めた。

$$T = 554.31 E - 565.7 \quad (1)$$

T：浮遊土砂濃度（mg/L），E：電圧（V）

なお，電圧出力の範囲は最大5 Vであるので，浮遊土砂濃度の計測限界は約2,200 mg/Lとなる。

表 1 各降雨イベントの流出高と浮遊土砂濃度のピーク時刻およびピーク値

降雨イベント							流出ピーク			浮遊土砂濃度ピーク		
No.	降雨期間		降雨量 (mm)				時刻		流出高 (mm/h)	時刻		浮遊土砂濃度 (mg/L)
1	05/04	02:00 ~ 05/04 07:00	17.5				05/04	04:20	0.100	05/04	03:50	886
2	05/06	17:00 ~ 05/07 10:00	3.0				*			*		
3	05/09	17:00 ~ 05/11 13:00	31.5				05/09	20:00	0.053	05/09	20:00	28
							05/10	20:30	0.097	05/10	20:40	962
							05/11	04:40	0.090	05/11	04:50	400
4	05/17	00:00 ~ 05/17 12:00	26.5				05/17	02:50	0.093	05/17	03:00	375
							05/17	05:30	0.089	05/17	05:30	846
							05/17	08:50	0.074	05/17	09:10	156
							*			*		
5	05/27	03:00 ~ 05/27 08:00	1.5				*			*		
6	05/29	23:00 ~ 05/30 23:00	14.5				05/30	01:50	0.051	05/30	01:50	43
7	06/05	01:00 ~ 06/05 07:00	3.0				06/05	04:40	0.040	06/05	04:30	15
8	06/09	12:00 ~ 06/09 13:00	3.5				06/09	12:50	0.044	06/09	13:00	21
9	06/12	23:00 ~ 06/13 14:00	22.5				06/13	05:20	0.064	06/13	05:20	159
10	06/14	17:00 ~ 06/15 01:00	9.0				06/14	17:30	0.119	**		
11	06/16	13:00 ~ 06/17 02:00	6.0				06/16	23:10	0.048	06/16	23:10	24
12	06/19	20:00 ~ 06/20 05:00	2.0				06/19	22:00	0.044	06/19	22:10	23
13	06/21	07:00 ~ 06/21 09:00	2.0				*			*		
14	06/23	00:00 ~ 06/23 14:00	21.00				06/23	03:30	0.082	06/23	03:40	748
15	06/24	16:00 ~ 06/26 01:00	22.0				06/25	02:20	0.087	06/25	02:00	804
16	06/28	00:00 ~ 06/28 11:00	21.0				06/28	03:10	0.082	06/28	03:10	370
17	06/29	16:00 ~ 06/30 09:00	4.0				*			*		
18	07/03	19:00 ~ 07/05 19:00	32.5				07/04	05:00	0.122	07/04	05:10	2,078
							07/04	15:00	0.264	**		
							07/05	18:00	0.119	**		
19	07/09	03:00 ~ 07/09 23:00	15.5				07/09	07:00	0.062	07/09	07:00	452
20	07/13	10:00 ~ 07/15 04:00	34.5				07/13	11:10	0.138	**		
21	07/17	12:00 ~ 07/17 12:00	0.5				*			*		
22	07/21	19:00 ~ 07/21 19:00	2.0				*			*		
23	07/23	04:00 ~ 07/23 06:00	1.0				*			*		
24	07/26	03:00 ~ 07/27 07:00	15.0				07/26	12:50	0.046	07/26	13:00	74
25	08/01	15:00 ~ 08/04 01:00	59.5				08/01	15:40	0.322	**		
							08/01	18:10	0.132	**		
							08/01	18:30	0.135	**		
							08/02	16:50	0.553	**		
26	08/05	14:00 ~ 08/05 23:00	7.0				08/05	22:10	0.098	08/05	22:40	1,680
27	08/15	11:00 ~ 08/15 15:00	3.0				*			*		
28	08/18	19:00 ~ 08/18 20:00	5.0				08/18	22:40	0.095	08/18	22:40	2,129
29	08/20	13:00 ~ 08/20 16:00	1.0				*			*		
30	08/22	21:00 ~ 08/23 17:00	2.5				*			*		
31	08/27	09:00 ~ 08/28 00:00	13.5				08/27	09:30	0.056	08/27	09:40	620
32	08/30	01:00 ~ 08/30 13:00	51.0				08/30	06:00	0.321	**		
							08/30	12:00	0.127	08/30	12:00	1,105
33	09/06	06:00 ~ 09/06 20:00	2.0				*			*		
34	09/08	03:00 ~ 09/08 21:00	15.0				09/08	12:10	0.079	09/08	12:20	1,308
							09/08	17:20	0.087	09/08	17:30	556
35	09/13	03:00 ~ 09/14 05:00	50.5				09/13	06:20	0.220	**		
							09/13	07:30	0.239	**		
							*			*		
36	09/15	06:00 ~ 09/15 06:00	0.5				*			*		
37	09/17	22:00 ~ 09/23 22:00	178.5				***			***		
38	09/26	07:00 ~ 09/26 07:00	0.5				***			***		
39	09/28	13:00 ~ 09/29 14:00	11.5				09/28	14:10	0.089	09/28	14:10	91
40	10/01	02:00 ~ 10/02 05:00	9.5				10/01	04:10	0.092	10/01	04:10	91
41	10/03	11:00 ~ 10/03 17:00	4.5				*			*		
42	10/05	19:00 ~ 10/06 00:00	8.0				10/05	22:10	0.087	****		
43	10/08	09:00 ~ 10/09 09:00	15.0				10/09	06:40	0.096	****		
44	10/17	04:00 ~ 10/17 11:00	33.0				10/17	10:00	0.165	****		
45	10/25	14:00 ~ 10/26 23:00	8.5				*			*		
46	10/28	13:00 ~ 10/29 03:00	18.0				10/28	21:00	0.086	10/28	22:20	105
47	11/01	05:00 ~ 11/01 07:00	3.0				11/01	06:50	0.061	11/01	07:10	26
48	11/08	16:00 ~ 11/09 01:00	10.0				11/08	22:20	0.064	11/08	22:40	51

* 降雨は観測されているものの流量や浮遊土砂濃度の変動が不明瞭なもの

** 濁度計の検出可能な範囲を超過し、記録されなかった期間があるもの

*** 土砂の堆積により、正常に計測されなかった期間

**** 電源の電圧低下により、計測されなかった期間

結果および考察

1. 解析対象期間における降雨の状況と降雨イベントの抽出

解析対象期間は、降雨量・流出高・浮遊土砂濃度のデータがすべて得られた期間（2016/4/29 14:20~2016/11/10 12:10）とした。なお、対象期間中には、浮遊土砂濃度のデータがいくつかの理由で欠測となっている期間が存在する。

上述した解析対象期間の総降雨量は822 mm、最大1時間雨量は21.5 mm（2016/8/2 17:00）、

最大3時間雨量は30 mm（2016/8/30 5:00~2016/8/30 7:00）、最大24時間雨量は69.5 mm（2016/9/19 22:00~2016/9/20 21:00）であった。解析対象期間から、前後に24時間以上継続する無降雨期間を持つ降雨を「降雨イベント」として抽出したところ、表1に示すように48の降雨イベントが抽出された。最大の降雨イベントは、総降雨量178.5 mm（2016/9/17 22:00~2016/9/23 22:00）だった。流出高・浮遊土砂濃度ともに欠測なく観測された降雨イベントは28回であった。

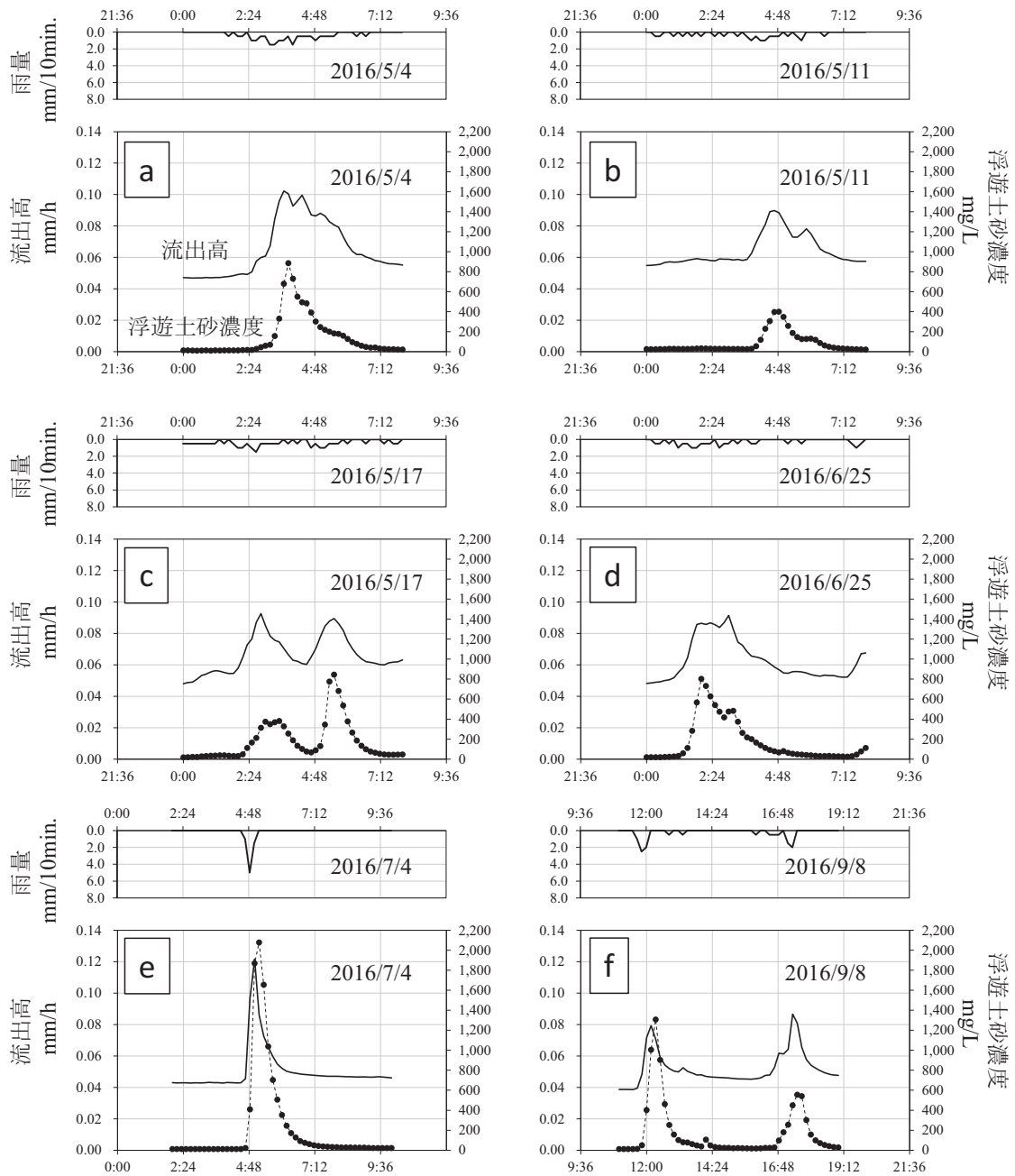


図2 降雨に対する流出高と浮遊土砂濃度の時間変化
実線は流出高を、点線は浮遊土砂濃度をそれぞれ示す。

2. 流出特性

流出は、解析対象期間を通じて無降雨期間でも途絶えることはなく、最も水位の低いときでも 0.033 mm/h (2016/8/1 13:00) の流出高が観測された。すべての降雨イベント時に流出高の変動や浮遊土砂濃度の変化が見られたわけではなく、3 mm 以上の降雨があったときに流出高の明瞭な変動や浮遊土砂濃度の変化が見られた。降雨観測期

間中最大の流出高は、0.553 mm/h (2016/8/2 16:50) である。

図 2 に降雨に対する流出高と浮遊土砂濃度の時間変化を示す。いずれのイベントでも降雨に対して流出は極めて鋭敏に反応し、降雨停止後は速やかに流出が低減した。1 時間雨量のピーク時刻に対する流出高 (1 時間間隔) のピーク時刻の遅れ時間は、ほとんどの降雨流出イベントで 0 時間 (最大 4 時間、

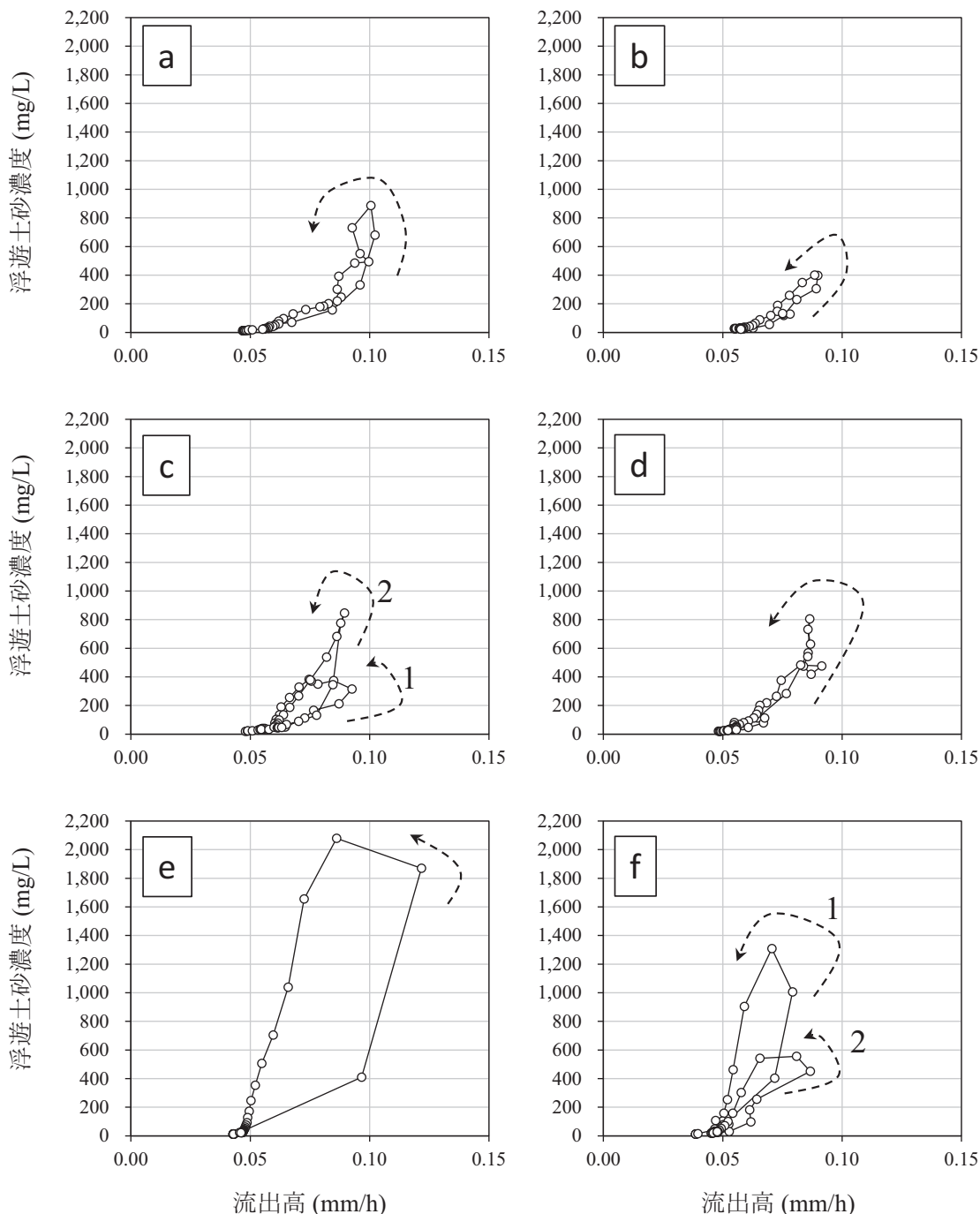


図 3 流出高と浮遊土砂濃度の関係

図中の a ~ f は図 2 の a ~ f のイベントと対応している。図中の点線の矢印と、c および f に付した数字は、流出高および浮遊土砂濃度の発生順を表す



写真5(a) 溪岸崩壊と不安定土砂の堆積



写真6 路面から流路に水と土砂が流れ込む経路



写真5(b) 溪岸崩壊



写真5(c) 溪岸侵食

平均0.23時間)であった。花崗岩を基盤とする流域では、本研究の対象流域と同様に、降雨に対する流出が極めて早いことがこれまでも報告されている。全国各地の地質の異なる流域で降雨流出特性を比較した研究では、花崗岩類に分類される6流域(流域面積0.011~3.1 km²)では降雨に対する応答が非常に早く、降雨ピークとほぼ同時に流出のピークが見られることが報告されている²⁾。

3. 浮遊土砂流出の特徴とその要因

観測期間中、基底流出時(平水時)の浮遊土砂濃

度は10~20 mg/L程度を推移し、最大の浮遊土砂濃度は2,198 mg/L(2016/8/30 7:00)であった。なお、浮遊土砂濃度の計測限界(約2,200 mg/L)の超過や、堆積土砂による濁度計の埋没により計測・記録されなかった降雨イベントもあるため、最大の浮遊土砂濃度は実際にはさらに高かったと考えられる。図2に示した降雨に対する流出高と浮遊土砂濃度の時間変化を見ると、浮遊土砂濃度の上昇傾向とピーク時刻は、どちらも流出高の時間変化にほぼ同期しており、流出高のピークに対する浮遊土砂濃度ピークの遅れ時間は、75%が0分もしくは10分であった。このように浮遊土砂濃度の時間変化が流出高の時間変化と同期しているのは、水位の上昇(掃流力の増加)に応じて土砂が流出していることを示唆しており、降雨時に細粒分を含む不安定土砂が速やかに供給されているためと考えられる。

次に、図2に示した6回の流出イベントについて、それぞれの流出高と、同時刻の浮遊土砂濃度をプロットし、時系列でつなげたものを図3に示す。図3 a~dのイベントでは、流出高の増加に対して浮遊土砂濃度が一様に増加・減減する傾向が見られるが、流出高と浮遊土砂濃度を時系列で見ると、両者の関係には図中に点線の矢印で示したように反時計回り(左回り)のループが見られる。このような、流出高と浮遊土砂濃度の間に見られるループ状の関係をヒステリシス(履歴現象)と言い、水位の上昇時と減減時とで流出高と浮遊土砂濃度の関係が異なる現象をいう。図3 e, fのイベントでは、明瞭な反時計回りのヒステリシスが見られる。図3 fのイベントには2回の水位変動が含まれているが(図中の点線の矢印に付した数字が水位変動の発生順を表す)、両者ともに反時計回りのヒステリシスを示している。これらのイベントでは、水位が減減し始めていにもかかわらず、浮遊土砂濃度は増加する状

況が見られる。これらの事実から、降雨流出イベント中にさらに不安定土砂が生産・流出して河道に供給され、イベント後半も生産された不安定土砂が流出し続ける状況が推察される。

霧ヶ峰・車山湿原の登山道を流路とする表面流出とそれともなう土砂流出を調査した既往研究では、流出ピークに至る前に流出土砂量が減少し始め、減水期には増水期と同程度の流量でも土砂量は顕著に少なくなる降雨流出イベントがあることを報告している。この時、流量と土砂量の間には時計回り（右回り）のヒステリシスが見られる。これは、流路（登山道）に存在する不安定土砂が出水中に流亡・減少することを示しており、登山道利用者の踏圧や攪乱により登山道で生産される不安定土砂量が、降雨流出時の流出土砂量を規定していると考えられている³⁾。本研究で対象とした野田ヶ沢は、流路工や護岸工等の構造物がほとんどない自然溪流で、流路に面した小規模な（幅 2 m, 高さ 0.6~1.5 m 程度）溪岸崩壊が見られる（写真 5(a)~(c)）。これらの溪岸崩壊地では、増水時に流路に面した斜面脚部が洗掘を受ける状況が確認されている。さらに、未舗装の作業道では、降雨のたびに地表流とそれともなう表面侵食が発生する状況が確認され、路面から流路に水と土砂が流れ込む経路が形成されている（写真 6）。このように、土砂生産源が流路付近に多数存在し、不安定土砂を河道内に供給し続けているために、流出高が浮遊土砂濃度を規定しているものと考えられる。

おわりに

AFC 手良沢山ステーション・野田ヶ沢における水文観測および浮遊土砂濃度の観測を通して、降雨時に速やかに流出高と浮遊土砂濃度が上昇することが確認された。流出高と浮遊土砂濃度の関係に反時計回りのヒステリシスが見られることや、流路付近

に土砂生産源が多数確認されることから、不安定土砂が河道内に常に供給されており、降雨流出時には水位の上昇に伴って速やかに浮遊土砂が流出する状況が生じていると考えられた。

流域からの流出土砂量をより正確に評価するためには、浮遊土砂濃度が計測限界を超過する場合でも正確に計測し続けるとともに、掃流砂（粒径が大きく掃流状態で流下する土砂）も観測する必要がある。また、対象流域では 11 月から 4 月にかけて最低気温が 0 度を下回り⁴⁾、溪岸や道路法面等における凍上融解作用による土砂生産が活発になると考えられることから、融雪期の出水イベントには、凍上融解作用により生産された不安定土砂が大量に流出することが予想されるため、融雪期の観測も重要と考えられる。さらに、流路に面した溪岸崩壊や、未舗装の作業道における表面侵食、作業道の横断排水にともなう洗掘など、流域内の土砂生産源における土砂生産過程や土砂生産量を明らかにする必要がある。

引用文献

- 1) 建設省河川局砂防部砂防課 (1998) 流砂系の総合的な土砂管理に向けて、総合土砂管理小委員会報告 (http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/_shinngikai/shinngikai/shingipast/980730.html, 2016年12月10日閲覧)
- 2) 栗原淳一・山越隆雄 (2005) 流出特性に基づいた土石流発生予測のための実効雨量に関する研究, 土木研究所成果報告書: 629-634 .
- 3) 福山泰治郎・平松晋也 (2015) 霧ヶ峰・車山湿原における登山道の水・土砂流出観測, 砂防学会誌 68(3): 53-56 .
- 4) 木下 渉・鈴木 純・小林 元 (2017) 信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター手良沢山ステーションにおける2016年の気象観測データ, 信州大学農学部 AFC 報告15: 印刷中.

Hydrological and suspended-sediment concentrations observation at a forested headwater catchment in Japanese Alps region, Nodagasawa watershed, Terasawayama Station, AFC

Taijiro FUKUYAMA, Hiroshi ONO and Shinya HIRAMATSU
Faculty of Agriculture, Shinshu University

To understand the rainfall-runoff process and sediment delivery process in headwater catchment, hydrological observation and the monitoring of suspended sediment concentrations (SSC) was conducted

at a forested headwater catchment in Japanese Alps region. The study site is Nodagasawa watershed (37 ha) within Terasawayama Station, Research Forest of Shinshu University, Japan. At this catchment, notably quick rainfall-runoff response was observed as with the runoff characteristics reported in other catchment underlain by granite. The suspended-sediment concentrations synchronized with the rising and falling of runoff. Between runoff and SSC in flood events, counter-clockwise hysteresis were often found. These hysteresis infer that the abundant unstable sediment was produced during rainfall event from several sediment sources (such as the riverbank collapse, road surface erosion) located on and around the channel.