降雨のインパクトによる高濁度水発生と細粒土砂輸送に関する現地観測とモデル化

FIELD EXPERIMENT AND MODELING OF PRODUCTION OF SUSPENDED SEDIMENT DUE TO IMPACT OF RAINFALL AND ITS TRANSPORT

石田哲也¹・中山恵介²・丸谷靖幸³・大森未音⁴・菅原庸平³・

Ayinuer ABULIZI⁵・上野義勝⁶

Tetsuya ISHIDA, Keisuke NAKAYAMA, Yasuyuki MARUYA, Mio OMORI,
Yohei SUGAWARA, Ayinuer ABULIZI and Yoshikatsu UENO

¹正会員 国土交通省 北陸地方整備局 信濃川河川事務所 (〒940-0098 新潟県長岡市信濃1丁目5番30号)

²正会員 工博 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³学生会員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

⁴正会員 国土交通省 北海道開発局 網走開発建設部 (〒093-8544 北海道網走市新町2丁目6番1号)

⁵非会員 北見工業大学大学院 寒冷地・環境・エネルギー工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

⁶非会員 北海道オホーツク総合振興局東部森林室 (〒090-0018 北海道北見市青葉町2番10号)

In the previous studies, high turbidity is revealed to occur in Tokoro River and to affect social economical and environmental activity in Okhotsk area. Also, it is demonstrated that turbidity from fields is one of the most influential factors on high turbidity in Tokoro River. However, it is not clarified how high turbidity is provided from fields and forests areas. Therefore, this study attempted to understand the mechanisms of the occurrence of high turbidity and the role of fields and forests areas on the occurrence of high turbidity. In 2 hectares field and forest areas, SS concentration due to the impact of rainfall is investigated in 2009, which reveals that SS concentration is associated with rainfall intensity by using exponential function. Also, it is found that SS concentration in field tends to increase with rainfall intensity more rapidly than forest areas. The proposed equation for evaluating SS concentration is confirmed to have high applicability by using distributed hydrological model.

Key Words : High turbidity, Distributed hydrological model, Suspended solid

1. はじめに

北海道オホーツク地方を流れる常呂川は網走管内最大の流域面積を誇る河川であり、流域内に管内最大の人口(13万人)を持つだけでなく、鮭やマスの遡上、上流域での貴重な生物の生息が認められており、環境面から考えても重要な河川であると言える。さらに、陸域における栄養を沿岸域に与える役割も持ち、河口部周辺ではホタテの養殖が盛んである。市民の生活にも大きな影響を与えており、周辺市民の水源としての役割も持つ。

そのような重要な役割を持つ一方、平成13年9月の洪水時における河口からの濁水・土砂流出によると考えられている大量のホタテの斃死、平成19年6月の常呂川第

一頭首工口周辺における濁水の取水による北見市の水道断水など、社会的に大きなダメージも与える可能性が大きい河川であると言える。

上述の事故は、濁水・土砂によって発生した問題であるが、水質環境の面からみて、鮭が遡上する河川であるにもかかわらず、大腸菌群数が大きく、決して水質環境がよいとは言えない河川であり、改善すべき点が存在する。それらの問題を解決するためには、河道内における濁水・土砂・水質環境の流動を把握し再現するだけでは、十分な対策を講じることが困難であり、それらの発生源である、流域全体を対象とした対策を検討・提案する必要があると言える。

つまり、陸域から沿岸域までの土砂、水質環境を把握し、陸域の沿岸域へのインパクト、および沿岸域からの

図-1 研究対象流域(オロムシ川)の河道と標高の関係(図中の流域下流端における ORS_riverは水位、濁度の観測位置を示す)

図-2 研究対象流域(オロムシ川)の土地利用区分(図中の流域下流端における ORS_riverは水位、濁度の観測位置を示す)

陸域へのフィードバック¹⁾を理解する必要があると言える²⁾。特に寒冷地域に位置する常呂川では、融雪期における細粒土砂の発生、それによる生態系への影響が大きいと考えられる。北海道における事例を主として挙げたが、関連する問題として、沖縄周辺での細粒分土砂の沿岸域へ流出による問題が存在する。細粒分の土砂流出が、珊瑚を壊滅的な状態に追い込んでいる問題であり^{3),4)}、細粒分の土砂輸送に関わる問題は至急、解決されなくてはならない課題であると言える。

石田ら(2010)⁵⁾では、融雪期の高濁度水発生条件として、流域の採泥による粒度分布結果から64 μ m以下の細粒土砂が流域全域に分布しており、それらが下流端に運搬されている可能性を示し、融雪期による高濁度水の観測結果を基に、流域の斜面から一様に発生濁度を与えることで、流域下流端での濁度の観測結果を精度よく再現できることを示した。また、Ishidaら(2010)⁶⁾では、流域内の表層土壌の種類に着目し、採泥した表層土壌から化学組成分析を行い、類似性の評価により流域内のどの区域から流域下流端に細粒土砂がどの程度の割合で流出しているのかを評価し、表層土壌の違いにより細粒土砂の流出への寄与率が違うことを示した。

本研究では、流域における総合的な土砂輸送の把握、水質環境の維持・改善を目的とし、まずは常呂川で最も大きな問題であると考えられている高濁度水の発生要因の解明を目的として研究を行っている。これまでの高濁度水発生による災害を考慮して研究対象とした時期は、高濁度水の発生を確認出来た2009年、2010年の観測結果(融雪期を除く)である。その高濁度水の発生要因を検討するため、流域の土地利用区分によって細粒土砂の生産特性が違ふことを考慮することを目的に畑地と森林地の2箇所において高濁度発生の特徴を観測により解明し、分布型流出モデルを適用した。

2. 降雨による高濁度水の発生

本研究の目的が、細粒分土砂の発生要因解明であることから、土地利用の状態、表層土壌の状態などを詳細に検討し、解析を行う必要がある。常呂川流域では、それらの空間的な情報が、数km単位で分布している。そこで本研究では、詳細な表層土壌の土地利用などの空間分を考慮するため、流域面積29.3km²、流路延長9.7km、平均河床勾配1/43である、常呂川流域の小河川であるオロムシ川流域を研究対象とした(図-1)。

オロムシ川流域の土地利用区分は、森林80.7%、畑地15.7%であり、流域の土壌構成は、粗粒残積性の未熟土壌59.6%と黒ぼく土壌(a)32.6%が流域の大半を占めていて^{5),6)}、大半が森林(上流域)と畑地(下流域)で構成されている(図-2)。オロムシ川における細粒土砂の粒径は、63 μ m以下であり、流域全体が細粒土砂の生産場となる可能性が示されている^{5),6)}。

2009年9月9日から11月25日、2010年6月1日から7月20日までにオロムシ川下流端(図-1, 2)で計測した水位とSS濃度を示す(図-3)。その際、過去の調査で作成された水位流量曲線を用い、流量を計算した。また、SS濃度は、現地で採泥した土砂を用いて室内実験によってキャリブレーションを行い、計測器の観測結果(ppm)とSS濃度(mg/L)の関係式により計算されたSS濃度(mg/L)である。

オロムシ川における濁度水の発生・流出は、2009年から2010年の2年間の観測結果により、降雨によく反応して発生していた(図-3)。2年間の観測期間中で2009年10月9日には、SS濃度で15,000mg/L、2010年7月8日にはSS濃度で56,000mg/Lもの高濁度を観測した。このように、オロムシ川ではたびたび10,000mg/Lを超えるような超高

図-3 降雨(アメダス観測点:北見観測所),流量と濁度の関係
(a, b: 2009年, c, d: 2010年の観測結果), ((a), (b)
は計算対象区間を示す)

濁度を発生させる特徴があることが明らかになった(図-3)。

3. 森林と畑地における発生濁度の推定

オロムシ川は流域の大半を森林と畑地が占めていることから、森林と畑地における濁度の発生特性について明らかにするため、常呂川流域内の森林地と畑地において現地で観測を実施した。観測を行った森林地の流域面積は0.021km²、畑地の流域面積は0.019km²であり、流域下流端への流出時間はほとんど差がない小流域である。観測方法は、流域下流端に三角堰を設置し、三角堰(図-4)に流入してくる濁度と水位を計測した(写真-1)。濁度は、オロムシ川下流端での観測結果と同様に室内実験によって得られたキャリブレーション結果を用いてSS濃度を計算した。流出量は三角堰の公式を用いて計算した。森林地と畑地の観測期間はそれぞれ、森林地で2010年2月16日12時30分から7月8日11時30分、畑地で2010年4月9日10時50分から7月8日10時20分までである。また、森林地の観測結果は、データロガの電池の電力が不足したことにより、5月26日14時から6月3日17時まで欠測である。

森林地と畑地の観測サイトで把握できた状況として、畑地では土砂流出が活発で三角堰が土砂で堆積する現象

図-4 森林地と畑地に設置した三角堰(60°堰)の模式図

が確認されており(写真-2)、森林地では三角堰内に堆積している土砂が腐葉土を中心として非常に細かく、三角堰の水が乱されると同時に巻上りが発生する現象が確認された。特に畑地は森林地と比較して、細粒土砂の生産・流出が活発で、流出に伴う土砂流出により三角堰に土砂が堆積した後は、三角堰から堆積土砂を撤去しない限りSS濃度は観測されない状況が何度も確認された(写真-2)。森林地では、畑地のような土砂堆積による欠測はなかった。そのため、降雨によって生産・流出する細粒土砂の特性を把握するため、森林地と畑地の観測結果を比較する際に上述のような影響を考慮し、森林地で6降雨パターン、畑地で8降雨パターンの観測データを抽出した。

抽出された森林地と畑地の観測期間に計測されたSS濃度とアメダス観測点(北見観測所)における一連降雨期間中(降雨観測の前後24時間の無効雨が観測されている期間を1降雨パターンとした)の1時間あたりの降雨ピークとその同時刻におけるSS濃度を比較したところ、降雨ピークとSS濃度のピークがほぼ一致していた。森林地の降雨ピークとSS濃度の関係は、降雨ピークが5mm程度までSS濃度は増加傾向にあり、それ以降、ばらつきはあるものの降雨ピークが増加してもSS濃度の増加は小さくなり、降雨ピークの違いによるSS濃度の大きな差は見られなかった(表-1、図-5)。同様に、畑地の降雨ピークとSS濃度の関係は、降雨ピークが2mm程度までSS濃度は急激な増加傾向にあり、それ以降、ばらつきはあるものの降雨ピークの違いによるSS濃度の大きな差は見られなかった。一方で、森林地と畑地のSS濃度を比較すると、流域面積は同じであるが、森林地より畑地の方が同じ降雨ピークに対し、SS濃度は高い傾向にあった(表-1、図-5)。森林地と畑地で観測されたSS濃度の増加範囲における降雨ピークとSS濃度の違いは、森林地では樹木等による降雨の遮断効果が顕著であり、畑地では作物が育つまでは裸地で降雨の遮断効果がなく直接降雨を受けることが原因と考えられる。これら降雨ピークとその同時刻におけるSS濃度の関係から、降雨が大きくなるとSS濃度が大きくなり、ある程度の降雨以上になるとSS濃度が一

写真-1 森林地と畑地の三角堰の設置状況と観測サイトの状況(上：森林地，下：畑地)

写真-2 畑地に設置した三角堰の細粒土砂流入による土砂堆積状況

定になる特性が確認された(図-5)．そこで，降雨強度とSS濃度の関係を指数関数で近似した(図-5，式(1))．

$$SS_{cal} = SS_{max} \cdot (1 - \exp(-R_t/R_o)) \quad \dots (1)$$

ここで， SS_{cal} ：流出(発生)SS濃度(mg/L)， SS_{max} ：最大流出(発生)SS濃度(mg/L)， R_t ：雨量

表-1 降雨ピークとその同時刻に観測されたSS濃度(降雨はアメダス観測点(北見観測所))

No.	Location	Date	Rainfall (mm)	SS (mg/L)
1	Forest	2010/06/24 10:00	6.5	14,053
2	Forest	2010/06/24 11:00	2.5	11,598
3	Forest	2010/06/24 13:00	1.0	3,337
4	Forest	2010/07/04 19:00	1.5	3,043
5	Forest	2010/07/08 15:00	10.5	21,448
6	Forest	2010/07/08 16:00	5.0	17,954
7	Field	2010/04/29 11:00	1.0	5,794
8	Field	2010/04/29 12:00	1.0	5,135
9	Field	2010/04/29 13:00	0.5	4,289
10	Field	2010/06/21 02:00	1.5	10,739
11	Field	2010/06/21 20:00	2.5	22,070
12	Field	2010/06/21 21:00	3.0	18,815
13	Field	2010/06/22 15:00	2.0	22,534
14	Field	2010/07/08 15:00	10.5	24,264
15	Field	2010/07/08 16:00	5.0	30,729

図-5 降雨ピークとその同時刻に観測されたSS濃度の関係(降雨はアメダス観測点(北見観測所))

(mm/hr)， R_o ：発生限界雨量(mm/hr)
 畑地と森林地の SS_{max} と R_o はそれぞれ，森林地， $SS_{max} = 22,500 \text{ mg/L}$ ， $R_o = 4.5 \text{ mm/hr}$ ，畑地 $SS_{max} = 25,000 \text{ mg/L}$ ， $R_o = 1.5 \text{ mm/hr}$ である．式(1)によって計算された降雨とSS濃度の関係は，観測結果から抽出された降雨ピークとその同時刻のSS濃度の関係を十分に表現していると言える(図-5)．本モデルを利用して，森林地と畑地からの細粒土砂の流出を組み込んだ流出モデルを構築し，オロムシ川下流端でのSS濃度の再現計算を次章で試みた．

4．分布型流出モデルによる検討

オロムシ川下流端，森林地と畑地の観測結果により，降雨によって細粒分土砂が生産され，高濁度水が発生することが推測された．その現象の発生を検証するため，分布型流出モデルによる再現計算を行った．

(1) 分布型流出モデル

これまでの研究で、物理過程に基づいた分布型流出モデルが、流域からの流出、細粒分の土砂輸送、および水質を再現できることが示されている^{7),8),9),10)}。そこで本研究でも、過去の論文で示されたモデルと同様な仕組みのモデルを作成し、利用することとした。表面流にはキネマティック方程式、氾濫流には浅水流方程式、浸透流にはリチャーズの式に基づく不飽和浸透流方程式¹¹⁾、河道流にはキネマティック方程式を用いた。

計算に用いた流域モデルは100mメッシュ、計算時間間隔は10秒間隔とし、計算に用いる雨量はアメダス観測点北見観測所のデータを用いた。

高濁度水の再現計算を行う前に、流量に関するモデルの再現性の検討を行った。降雨の入力はアメダス観測点(北見観測所)の観測値を用いて流域内に一様に与え、再現計算は、2009年10月18日3時から10月19日16時(図-3(a)期間)における降雨による流量と2010年7月4日0時から7月5日11時(図-3(b)期間)における降雨による流量に対して行った(図-6)。その結果、細かな変動については検討の余地があるが、流量の再現としてはピークの再現も出来ており、良好な結果を得ることが出来た。今後、より再現性を向上するための工夫としては、流域内での空間分布を考慮した降雨を入力値として与えることにより、より最適な流出計算を行うことが考えられる。

(2) 降雨による高濁度水の再現と検討

前節において、オロムシ川流域における再現性が確認された分布型流出モデルを用いて、高濁度水の発生を再現計算を行った。SS濃度の計算には、流域表面からの細粒土砂の発生量を与えて、その発生量が全て下流端まで運搬されるものと仮定し、キネマティック方程式を利用して表面および河道における輸送を計算した。また、本研究では、SS濃度が極端に高い場合においても流体の性質は変化しないものと仮定して計算を行った。

上述のとおり、再現計算には流域表面における細粒土砂の発生量を与えなくてはならない。本研究対象としたオロムシ川は、畑地と森林地に大きく大別されるため、流域内の土地利用区分を畑地と森林地の2種類に分類して計算を行った。与えた発生量は、本研究で検討した降雨ピークとSS濃度の関係からモデル化した式(1)を用いて森林地と畑地のそれぞれの発生特性を考慮して降雨に応じてSS濃度を与えて計算を行った(図-7)。計算を行った期間は、流出モデルの再現性を検討した期間と同様である。

SS濃度の再現計算結果では、降雨によって表面流が発生する場合にSS濃度の反応はよく表現されていた。SS濃度のピークは概ね再現出来たが、減衰期やSS濃度がほとんど観測されていない場合にも、再現計算ではSS濃度が計算されている(図-6(a)、図-7(a))。また、再現計算結果の方が実際に観測された時間より2009年10月18日では

図-6 オロムシ川下流端での流量の再現計算結果
(再現期間：(a)2009/10/18 3:00 - 10/19 16:00
(b)2010/7/4 0:00 - 7/4 11:00)

図-7 オロムシ川下流端でのSS濃度の再現計算結果(再現期間：(a)2009/10/18 3:00 - 10/19 16:00
(b)2010/7/4 0:00 - 7/4 11:00)

1時間程度、2010年7月4日では3時間程度、SS濃度のピークが遅れて計算されていた。本研究では、高濁度の発生を対象としているためSS濃度は、斜面からのみ発生するものとし、河道内からは発生しないものとして計算を行った。即ち、本研究で行った計算では、降雨により斜面で表面流が発生した場合のみ、降雨に計算されたSS濃度が表面流とともに斜面から下流へ運搬されるものとして計算されるため、斜面で表面流が発生していない場合、SS濃度は下流へ運搬されない。そのため、降雨が観測されており、表面流が発生した場合にはSS濃度も発生すると計算されてしまう可能性がある(図-6(a)、図-7(a))。

本研究の再現計算は、流域内での雨量観測が実施されていないため、最も近傍で観測されていたアメダス観測点(北見観測所)の降雨データを用いている。そのため、実際の流域に降った雨と違いがあり、このことがSS濃度の再現計算に大きな影響を与えていると考えられる。また、本研究での再現計算では、発生するSS濃度は土地利

用区分による違いは表現するようにモデル化されているが、Ishidaら(2010)⁹⁾が示した表層土壌の違いによる細粒土砂の発生特性の違いは表現されていない。

本研究の検討により、土地利用区分を考慮してSS濃度のピークを再現することが可能であると明らかになった、今後は、土地利用区分による降雨とSS濃度のモデル式を適用するとともに、Ishidaら(2010)⁹⁾が示した表層土壌の違いによる細粒土砂の発生特性の違いを考慮した細粒土砂流出モデルを構築することにより、高濁度水の原因となる細粒土砂の流出をより精度よく再現できるものと考ええる。

5. まとめ

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) オロムシ川、森林地、畑地の全てで、降雨に伴い、流出、SS濃度ともによく反応しており、降雨ピーク時とほぼ同時に流出、SS濃度ともピークが出現していた。
- (2) 観測結果から、森林地と畑地の細粒土砂の生産・流出では、畑地の方が森林地に比べ非常に細粒土砂が生産・流出し易いことが明らかになった。
- (3) 高濁度の発生原因と考えられる細粒土砂の発生源として、森林地と畑地に着目して観測した結果から、森林地と畑地の細粒土砂の生産・流出は、森林地で5mm程度までSS濃度が増加傾向、畑地では2mm程度まで急激にSS濃度が増加傾向にあり、それ以降はSS濃度が一定の値になる傾向が確認された。
- (4) 森林地と畑地の観測結果により、時間降雨ピークと同時刻のSS濃度の関係から降雨によって発生するSS濃度の推定式を提案できた。
- (5) 分布型流出モデルによって、流域の流出を再現した結果、ピーク流量は十分な精度で再現することが出来た。
- (6) 提案された降雨によるSS濃度の推定式と流出の再現性が確認された分布型流出モデルを適用して、流域の土地利用区分(本研究では、森林地と畑地)に応じた計算を行うことで、オロムシ川下流端で観測されたSS濃度のピークを良好に再現することが出来た。

本研究で超高濁度水の発生場として考えられる森林地と畑地の現地観測結果により、土地利用区分による細粒土砂の生産の違いを明らかにし、SS濃度の推定式を提案した。今後は、地形特性を考慮した発生寄与率の違いに着目して検討を行い、超高濁度の発生のメカニズムを解明していく予定である。

謝辞：本研究を実施するために、畑地の観測場所を提供して下さった方、森林地の観測場所を提供していただいた北海道林業試験所の方々のご協力をいただきました。また、本研究は、河川整備基金及び国土交通省による助成により遂行されました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kline T. C., Goering J.J., Mathisen O. A., Poe P. H. and Parker P. L.: Recycling of elements transported upstream by runs of Pacific salmon: I. delta-15 N and delta-13 C evidence in Sashin Creek, southeastern Alaska, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol.47, pp.136-144, 1990.
- 2) 中山恵介, 大西健史, 堀松大志, 早川博, 岡部博一, 溝口勝巳, 常呂川における平水時の長期的な水質変化について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第64号, B-24, 2008.
- 3) 大澤和敏, 山口悟司, 池田駿介, 高椋恵, 農地における土砂流出抑制対策の比較試験, 水工学論文集, 第49巻, pp.1099-1104, 2005.
- 4) Osawa K, Ikeda S. and Yamaguchi S.: Field observation and WEPP application for sediment yield in an agricultural watershed, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, pp.1137-1146, 2005.
- 5) 石田哲也, 中山恵介, 大西健史, 夏井皓盛, 大森未音, アイヌルアブリズ, 丸谷靖幸, 岡田知也: 融雪期における黄濁土水発生機構と細粒土砂輸送, 水工学論文集, 第54巻, pp.433-438, 2010.
- 6) Ishida T, Nakayama K, Okada T, Maruya Y, Onishi K. and Omori M.: Suspended sediment transport in a river basin estimated by chemical composition analysis, Hydrological Research Letters, pp.55-59, 2010.
- 7) V'azquez RF, Feyen L, Feyen J and Refsgaard JC.: Effect of grid size on effective parameters and model performance of the MIKE-SHE code. Hydrological Processes, Vol.16, Iss.2, pp.355-372, 2002.
- 8) Alam M. J., Dutta D. and Nakayama K.: A catchment based approach of nutrient modeling in a river basin, the 12th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management (IWADIPCON 2008), 2008.
- 9) Dutta D. and Nakayama K.: Effects of Spatial Grid Resolution on River Flow and Surface Inundation Simulation by Physically Based Distributed Modeling Approach, Hydrological Processes, Vol.23, Iss.4, pp.534-545, 2009.
- 10) Alam Md. J., D. Dutta and K. Nakayama: Modeling Nutrient Saru River, Japan, the 7th Eco-Hydraulics, Topics 13 – Solute and Nutrient Transport and Exchange, No.30, pp.1-10, 2009.
- 11) 中山恵介, 伊藤哲, 藤田睦博, 斎藤大作: 融雪を考慮した山地流出モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.691/ II-57, pp.25-41, 2001.

(2010.9.30受付)