

極端に大きな出水時の森林流域からの栄養塩流出： 2011年7月の高知県西部四万十川源流域における事例

篠宮佳樹^{1),*} 横山雄一²⁾

Nutrients Runoff from a Forested Catchment during an Extreme Storm Event: A Case Study of the Headwaters of the Shimanto River in the Western Part of Kochi Prefecture, Japan in July, 2011

Yoshiki SHINOMIYA^{1),*} and Yuichi YOKOYAMA²⁾

¹⁾ Forest Research and Management Organization, Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan

²⁾ Yonden Consultants Co., Inc., Kochi branch, 7-21 Azouno-Nakamachi, Kochi, Kochi 781-0013, Japan

Abstract

We investigated the loads of suspended solids (SS), total (TN) and dissolved (DN) nitrogen during an extreme storm event (total rainfall, 742 mm) on 18 and 19 July 2011 in a forested mountain headwater catchment of the Shimanto River in the western part of Kochi Prefecture, Japan. We compared the extreme storm event with the normal event (total rainfall, below 100 mm) and the storm event (total rainfall, 100 – 300 mm). The experimental catchment (73 ha) has an underlayer of sandstone and is mainly covered with a secondary forest that comprises evergreen trees. Samples of streamwater were collected every two hours using an automatic water sampler during six events (total rainfall, 44 – 742 mm). The load of TN during the extreme storm event was about 5 kg ha⁻¹ event⁻¹, which is similar to the domestic average annual TN load (4.9 kg ha⁻¹ yr⁻¹). The proportion of DN to TN in the specific cumulative load decreased sharply from 97% – 99% in the normal event and 77% – 97% in the storm event to 5% in the extreme storm event phase. The results clearly show that the load of particulate nitrogen was markedly greater than the load of DN during the extreme storm event.

Keywords: Forest; Storm flood event; Streamwater; Total nitrogen; Dissolved nitrogen

1. はじめに

源流部に位置する森林には清浄な水を安定的に下流域の都市・農村や海域に供給することが期待される。ところが近年、気候変動により豪雨の発生頻度の増加が指摘され、気象庁からは例えば日雨量 200 mm 以上の降雨の発生頻度が年々増加していることが発表されている¹⁾。実際、2011 年 8 月末～9 月上旬に台風 12 号により紀伊半島の広い範囲で 1000 mm を超える雨が降り、アメダス観測点「上北山」では 72 時間雨量が 1652.5 mm と、それまでの 72 時間雨量の最高値を大幅に更新した²⁾。2014 年 8 月上旬、台風 12 号の北上に伴い四国山地中央部のアメダス観測点「繁藤」で総雨量 1383 mm、アメダス観測点「本山」で 1204 mm など、1 回で 1000 mm を超す降雨が発生した²⁾。つまり、我が国はこれまでの想定を超えた大雨が発生する可能性に直面している。降水量の増加や豪雨の頻度が高くなると、河川では懸濁物質の流出

増加が指摘されており^{3, 4)}、すなわち栄養塩の流出増加や水質の悪化が懸念される。極端な水文現象の影響を理解することは、気候変動が流域内での堆積物や栄養塩などの動態にどのように影響するかを理解するために必要である⁵⁾。それゆえ、極端現象が水環境に及ぼす影響を予測するための基礎情報を早急に収集する必要がある。

河川における事例であるが、記録的豪雨や猛烈な台風の影響が懸念されるなか、流出負荷量を高精度で評価する意義は大きいとして、淀川におけるスーパー台風による出水時の負荷量が報告されている⁶⁾。森林流域に関しては、これまで台風などの大規模出水時の渓流水の水質変動に関する報告⁷⁻¹²⁾ などがあるが、これらは主要溶存成分に関するものであった。出水時の栄養塩流出量は年間の総流出量のかなりの比率を占めることから、出水時データの重要性が指摘されているが^{13, 14)}、出水時データの採取は労力と困難を伴うため、データそのものの蓄積が進んでいない¹⁵⁾。しかし、森林流域で大きな出水時の

1) 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

2) 株式会社四電技術コンサルタント高知支店 〒781-0013 高知県高知市薊野中町 7-21

* 連絡先: sinomiya@affrc.go.jp

懸濁物質 (SS), 全窒素 (TN), 溶存態窒素 (DN) など栄養塩流出量を網羅的に扱った報告が2件ある^{11, 16)}。前者¹¹⁾は総降水量156~209 mmの、後者¹⁶⁾は総降水量44~398 mmの降雨が対象であった。著者らは、高知県の森林流域で2011年7月に発生した総雨量700 mmを超える非常に大規模な出水時のSS, TN, DN濃度の変動を把握することができた。既往の観測を超える規模の出水時のSS, TN, DNなどの栄養塩流出を定量し、その特性を明らかにできれば、極端現象が水環境に及ぼす影響を評価する際の基礎情報として有用であると考えた。

以上のことから、本研究では既往報告を超える大規模な出水時における森林流域からのSS, TN, DNの流出特性について明らかにする。

2. 研究方法

2.1 試験流域の概要

調査は高知県高岡郡津野町の森林流域 (N33° 23', E133° 02') で実施した (Fig. 1)。流域面積は73 ha, 標高は470~830 mの範囲にあり, 起伏比が0.33, 斜面の平均傾斜が27°, 地質は四万十北帯の堆積岩 (砂岩) である。植生は, 流域の85%がシイ・カシ等の常緑樹の二次林で, 残りはスギ (*Cryptomeria japonica*)・ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 人工林である。下層植生はヤブニッケイ (*Cinnamomum japonicum*), サカキ (*Cleyera japonica*) などである。アメダス観測点「船戸」(試験流域より北東へ約5 km)の年降水量は3329 mmである。気象観測値は気象庁ウェブサイト¹⁷⁾より引用した, 1981~2010年の平年値 ($n=30$) である。

2.2 流量, 雨量の測定

流量の観測のため, 林道の橋下に流量堰を設け, 自記水位計 (コーナーシステム製, KADEC-MIZU) で水位を計測した。水位は10分間隔で記録し, 実測水位より水位-流量曲線を用いて流量を算定した (Fig. 2)。流量堰

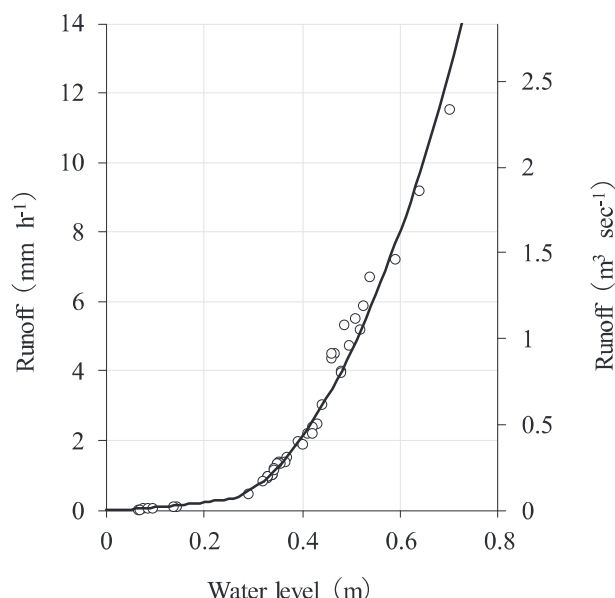


Fig. 2 The relationship between water level and runoff. Open circles represent observed datasets.

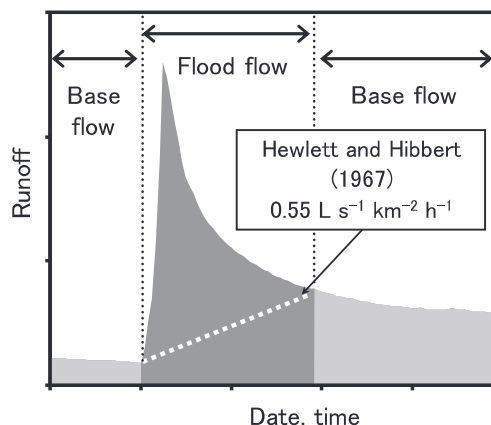


Fig. 3 Separation of stormflow and baseflow.

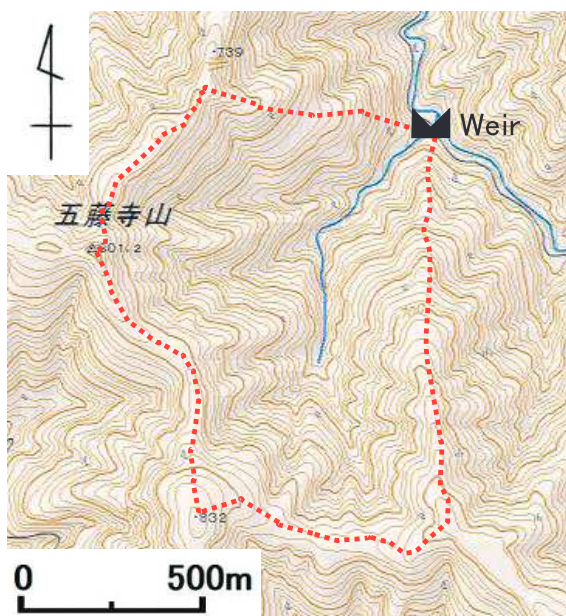


Fig. 1 Location of the experimental site. This figure is based on the map presented by Geospatial Information Authority of Japan.

は複合断面になっており, 水位25 cmまではパーシャルフリユーム (9インチ型) として, それ以上は矩形断面として流量換算した。大規模な出水時では, 堰のオーバーフロー, 堰周辺の土砂堆積などにより流量の欠測が生じやすい¹⁸⁾。本流域では出水時も土砂が排出可能な複合断面であったため, 大規模な出水時でも流量を観測できた。直接流出量の算定にあたり, 流出水量増加開始時から基底流出の上昇率 ($0.55 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ h}^{-1}$)¹⁹⁾を加算した流量と実測流量が一致するまでの期間を直接流出発生期間とし, 期間内の積算流量を1出水の累加比流量とした (Fig. 3)。この流出分離方法は, 森林からなる15小流域の200水年のデータから経験的に定義された基底流出の上昇をもって, 流量を直接流出と基底流出に分離するものである。方法が簡単であり, 他の流域とも容易に比較できる点で, 大変有用であり, 国内外で適用例も多い²⁰⁻²²⁾。累加負荷量を算出する際にも, 2つの独立した降雨イベントが合体しにくくなるという利点もある。流量堰付近で転倒桁式自記雨量計を設置し, 林外雨量を測定した。調査は2010年8月から2012年12月まで行った。

2.3 採水方法及び分析方法

調査期間中、定期的（毎月1回）に渓流水を採水した。定期採水は原則として降雨中、出水直後を避けた。自動採水装置（ISCO製、model6700）により、出水時に2時間間隔（流量逋減時は適宜変更）で渓流水を連続採水した。出水観測にあたり、降雨イベント開始前から当該降雨イベントの直接流出が消滅するまで連続して採水するように努めた。渓流水を研究室に冷蔵状態で送付した後、攪拌して少量（概ね100 mL）の渓流水を分取し、TN、DN濃度をペルオキシ二硫酸カリウムによる紫外吸光度法で測定した。未ろ過試料をペルオキシ二硫酸カリウムにより分解し、分光光度計（SHIMAZU製、UV1240）で分析した結果をTN濃度、メンブランフィルター（0.45 μm）でろ過してから自動分析装置（ダイアインストルメンツ製、FI-N50）によって得られた結果をDN濃度とした。残りの試料水（平均0.8 L、最小0.6～最大1.1 L）を用いてSS濃度（桐山製作所、ガラス繊維フィルターSS47、0.5 μm）を測定した。

なお、平水時、TNのほとんどは溶存態であり^{11, 13, 23)}、実際に最初に採取できた出水の渓流水（ $n=18$ ）についてSS濃度とPN濃度（粒子態窒素濃度、TN濃度からDN濃度を差し引いた値）との関係を調べたところ、SS濃度 9.0 mg L^{-1} 未満の試料では、PNは検出されなかった。これらのことから、TN濃度はSS濃度 $\geq 10 \text{ mg L}^{-1}$ の試料について測定した。実際には、試料水の濁り具合を観察して判断したが、SS濃度 $\geq 10 \text{ mg L}^{-1}$ 、かつTN濃度が未測定であった試料については、DN濃度にPN*濃度（粒子態窒素に相当する）を加えたものをTN濃度とした。補正として加えるPN*濃度はTN濃度を実測した試料（ $n=50$ ）より得られた、SS濃度とPN/TN比（TN濃度に対するPN濃度の比）との関係（Fig. 4）を基に回帰推定した。SS濃度とPN/TN比との関係についてSS濃度が増加するとPN/TN比は上昇する傾向がみられた。つまり、SS濃度が増えるとTNに占める粒子態窒素の割合が増え、溶存態窒素の割合は低下した。SS濃度が概ね 1000 mg L^{-1} 付近でPN/TN比はほぼ100%になり、それ以降は一定となる。そのため、SS濃度が 2000 mg L^{-1} 以上のデータを除く $n=48$ で解析した。使用した回帰推定式を次に示す。

$$PN^* = \frac{(0.1669 \cdot \ln(C_{SS}) - 0.2459)}{(1.2459 - 0.1669 \cdot \ln(C_{SS}))} \cdot C_{DN} \quad (R^2 = 0.86) \quad (1)$$

ここで、PN*、補正として加えた濃度（ mg L^{-1} ）； C_{SS} 、SS濃度（ mg L^{-1} ）； C_{DN} 、DN濃度（ mg L^{-1} ）である。ただし、 $0 < \text{PN}/\text{TN} \text{ 比} < 1$ であることから、 C_{SS} は $4.364 \sim 1748 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$ の範囲しか成立しない。結果として、SS

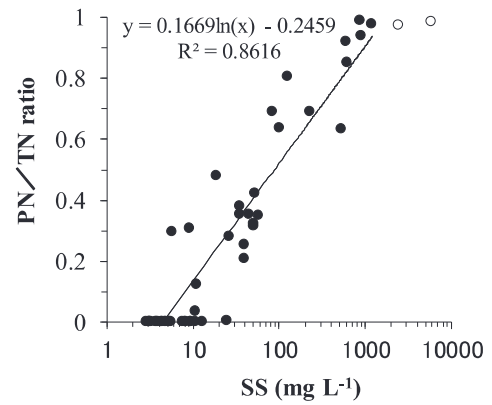


Fig. 4 The relationship between SS concentration and PN/TN ratio.

Two open circles represent datasets excluded for calculating the regression equation.

濃度 $\geq 10 \text{ mg L}^{-1}$ 、かつTN濃度が未測定であった試料の全て（30試料）に対してTN濃度を補正した。

2.4 降雨イベントの概要

出水の観測を行った、6降雨イベントの概要をTable 1に示す。降雨イベントの番号は降雨規模の小さい方から大きい方へ昇順に付与した。これらは総降水量 $44 \sim 742 \text{ mm}$ 、平均降雨強度 $2.5 \sim 16.5 \text{ mm h}^{-1}$ 、最大降雨強度 $9.5 \sim 45.5 \text{ mm h}^{-1}$ 、前5日間の先行雨量 $2.0 \sim 53.0 \text{ mm}$ である。いずれの降雨イベントでも降雨前2日間にまとまった降雨はなく、先行水分状況が明らかに湿潤ということはない。アメダス観測点「船戸」（試験流域より北東へ約5 km）の記録によると、2011年7月19日の日降水量は 543.5 mm で、同観測所の第二位の記録となっており¹⁷⁾、降雨イベント⑥は記録的な大雨であったと理解できる。考察にあたり、総降水量 100 mm 未満の出水を“出水”（Table 1の①、②が該当）、総降水量 $100 \sim 300 \text{ mm}$ の出水を“大出水”（Table 1の③、④、⑤が該当）、本報で着目した非常に規模の大きい降雨イベント（Table 1の⑥が該当）の出水を“極端出水”と定義する。

2.5 累加比負荷量の算定

1時間ごとに流量と濃度の積を、直接流出の発生した期間にあわせて積算したものを累加比負荷量とした。実測濃度のない時間帯の濃度は、前及び後に隣接する採水データの間までの期間を代表するとした（但し、丁度中間に位置する場合は隣接する前後のデータの平均値を用いた）。

なお、イベント⑥では、2011年7月18日12時より自動採水器を起動した。従って、降雨開始当初2011年7月

Table 1 Rainfall events characteristics.

The number of event	Date	Total rainfall	Average rainfall intensity	Maximum rainfall intensity	Antecedent rainfall within 5 days	Direct runoff	Direct runoff ratio
No.		mm	mm h^{-1}	mm h^{-1}	mm	mm	%
①	2011/5/11-12	44.0	2.9	11.0	36.0	13.5	30.7
②	2010/10/8-9	77.5	2.5	9.5	28.0	22.7	29.3
③	2011/9/2-3	133.0	4.6	11.5	6.5	24.1	18.1
④	2012/8/1-5	142.0	4.7	19.0	2.0	45.9	32.3
⑤	2011/5/26-29	210.5	2.5	18.5	53.0	83.9	39.9
⑥	2011/7/18-19	741.5	16.5	45.5	5.5	361.4	48.7

17日23時から7月18日12時までの13時間渓流水を採水できなかったため、SS, TN, DN濃度に欠測が生じた(流量は欠測なし)。しかし、降雨継続時間(45時間)に対して71%(32時間)は採水できたこと、流量ピーク付近を採水できたこと、SS, TN, DN濃度に欠測が生じた期間の累加比流量は全体の累加比流量の1.1%であることから、当該降雨による流出の主要部分は把握できたと考え、考察を行った。DN累加比負荷量に関して、観測された最大濃度を降雨開始時から欠測期間終了まで代用して算出したとしても、欠測期間を全く考慮しない場合のDN累加比負荷量の1.07倍と大きく変わらないこと、TN累加比負荷量と比較して大小関係は変わらないことから、DNについても欠測期間を考慮しない場合を累加比負荷量とした。以上の通り、イベント⑥のSS, TN, DNの累加比負荷量に関して欠測期間は加味されておらず、過小評価となっている。

2.6 年間の流出負荷量の算定

年間のSS, TN, DNの流出負荷量を、出水時流出負荷量と平水時流出負荷量とを合算することにより算出した。出水時について、観測されている場合は実測値を適用し、観測されていない場合は $\Sigma L - \Sigma Q$ 法により算出した。

$$\Sigma L = a(\Sigma Q)^b \quad (2)$$

ここで、 ΣL , 累加比負荷量 ($g\ ha^{-1}$) ; ΣQ , 累加比流量 (mm) ; a, b , パラメータである。総降水量が10 mm以上の降雨で発生した出水を対象に、 $\Sigma L - \Sigma Q$ 法を適用した。平水時の流出負荷量は定期調査時の濃度と観測された流量を用いて1時間単位で積算した。その際、濃度は前後の採水時の中間までの期間を代表するとした。SSとTNに関して、 $\Sigma L - \Sigma Q$ 法を6イベントで回帰すると、イベント⑤のデータで過大評価になる傾向がみられた。そのため、 $\Sigma L - \Sigma Q$ 法を6データで回帰する方法をMethod A、 $\Sigma L - \Sigma Q$ 法を“極端出水”(イベント⑥)を除く5データで回帰し、それ以降は線形補間する方法をMethod Bとし、2つの方法で年間流出負荷量を算定した。DNに関する回帰式は、6データでもよく適合していると考えられたため、Method Bによる算出は行わなかった。本調査地では例年降雪があるが、降雪量は多くないため、雪に関する特定の取扱いを行わなかった。

2.7 “極端出水”のSSの粒径組成および強熱減量

“極端出水”で採取されたSSのうち、1試料(2011年7月19日4:00採取、SS濃度 $5982\ mg\ L^{-1}$ 、SS重量3.88g)について、SS濃度の計測が終了した後、ろ紙から剥がし、2 mm, 0.212 mm, 0.063 mmのフルイを用いて水洗で4つに分画して粒径組成を算出した。最大直径は自動採水器のストレーナーの円孔の直径(9 mm)とした。その後、それぞれの画分を電気炉に投入して強熱減量($540\ ^\circ C$, 1時間)を測定した。

3. 結果

3.1 調査期間中の気象, 水文, 水質

試験流域付近で観測した2011年の年雨量は3991 mm, 2012年は4134 mmであった。試験流域の年流量は2011年2371 mm, 2012年2978 mmであった。年流出率はそれぞれ59%, 72%であった。森林流域の場合、年雨量から年流量を差し引いた水量は年消失量と呼ばれ、流域外

への水漏れがなければ、蒸発散量に等しいと解釈される²⁴⁾。本流域の年消失量(2011年1620 mm, 2012年1156 mm)は、文献²⁵⁾に示されている高知県の年蒸発散量($886\ mm\ yr^{-1}$)に比べて多い。このことから、本流域では、流域内での深部浸透や流域界を超える流出等が起きている可能性がある。

2010年8月~2012年11月の平水時(定期調査時)の渓流水($n=27$)のSS濃度, DN濃度の平均はそれぞれ $1.9\ mg\ L^{-1}$, $0.24\ mg\ L^{-1}$ であった。北海道, 福島県, 千葉県, 茨城県の森林流域の平水時(無降雨日)のSS濃度(平均値)はそれぞれ $1.5\sim 5.6\ mg\ L^{-1}$ ²⁶⁾, $2.1\ mg\ L^{-1}$ ²⁷⁾, $1.5\ mg\ L^{-1}$ ²⁸⁾, $1.3\ mg\ L^{-1}$ ²⁹⁾であった。DN濃度に関して、三重県の3つの森林流域の平水時の平均値は $0.23\ mg\ L^{-1}$, $0.13\ mg\ L^{-1}$, $0.22\ mg\ L^{-1}$ ¹¹⁾であった。滋賀県の5つの森林流域の定期採水時の年平均値は $0.15\sim 0.40\ mg\ L^{-1}$ ¹³⁾, 岡山県北部の森林流域の定期採水時(無雪期)の平均値は約 $0.2\ mg\ L^{-1}$ ³⁰⁾であった。平水時のSS濃度, DN濃度は、本流域と先行研究でほぼ同じであったことから、本流域は特異ではなく、一般的な森林流域であると考えられる。

3.2 出水, 大出水におけるSS, TN, DN濃度の変動

“出水”に関して、イベント①のSS濃度は流量ピーク付近で最大($35\ mg\ L^{-1}$)を示し、それ以外の時間は $10\ mg\ L^{-1}$ 未満だった(Fig. 5)。SS濃度最大の時、TN濃度は $0.52\ mg\ L^{-1}$ を示した(このときDN濃度は $0.32\ mg\ L^{-1}$ で、溶存態の割合は62%)。DN濃度は降雨直前で $0.24\ mg\ L^{-1}$ を示し、流量の増加に伴って上昇し、流

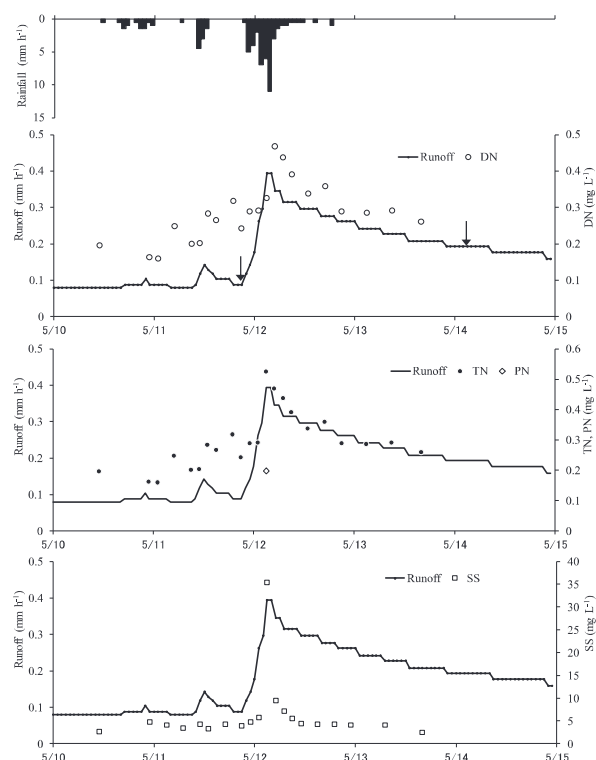


Fig. 5 Temporal variation in rainfall, runoff and nutrients concentration of stream water during “normal event (event ①)”.

Two black arrows represent the begin (left) and the end (right) of the cumulative specific runoff.

量ピーク付近で最大 (0.47 mg L^{-1}) に達し、流量の通減に伴い低下して降雨前の濃度レベルに戻った。渓流水のDNの主な構成成分と考えられる $\text{NO}_3^{-11, 13}$ の事例を参考にすると、“出水 (イベント①, ②)” に関して、既往の報告^{7, 8)} とほぼ同じ様な変動 (流量増加とともに濃度は上昇、流量通減とともに濃度は低下) が認められた。イベント②は1時間降雨強度の大きくなった時間帯が2つあり、流量ピークが2つ観察されたことがイベント①と異なる。SS濃度、DN濃度の最大値はそれぞれ、 13 mg L^{-1} 、 0.41 mg L^{-1} であった (DN濃度最大の時、SS濃度は 10 mg L^{-1} 未満であったため、PN補正は実施せず、TN濃度はDN濃度と等しいとした)。

“大出水 (イベント⑤)” の最大流量は、 2.3 mm h^{-1} で、降雨開始前の流量に比べて約23倍増加した。SS濃度は流量の増加に伴って上昇し、流量ピーク付近で観測中の最高濃度 (85 mg L^{-1}) に達した。降雨終了直後の比較的流量が多い期間であっても降雨前とほぼ同程度にまで急低下した。TN濃度は、流量の増加に伴って上昇し、流量ピーク付近で最高濃度 (0.91 mg L^{-1}) に達した (このときDN濃度は 0.28 mg L^{-1} で、溶存態の割合は31%)。TN濃度は流量の低下に伴い急激に低下した。イベント⑤のDN濃度も流量増加が続いている途中 (流量ピークの7時間前) で最高濃度 (0.34 mg L^{-1}) を示した。最大流量に達する前にDN濃度が減少しはじめた (イベント③, ④も同様)。DN濃度は降雨終了から3日後の6月1日には 0.05 mg L^{-1} まで低下した。降雨前のDN濃度 (0.17 mg L^{-1}) に比べて明らかに低く、その後、渓流水のDN

濃度が降雨前より低い状態が降雨終了以降1週間程度続いた (Fig. 6)。

他の“大出水 (イベント③, ④)” では、最大流量はイベント③, ④の順にそれぞれ 0.7 mm h^{-1} 、 0.8 mm h^{-1} で、降雨開始前の流量に比べてそれぞれ約8倍、約5倍増加した。SSの最大濃度は、流量ピーク付近で 51 mg L^{-1} 、 53 mg L^{-1} を、TNの最大濃度も流量ピーク付近で 0.90 mg L^{-1} 、 0.89 mg L^{-1} を示した。DN濃度は、イベント③では流量の増加に伴って上昇し、最大流量の7時間前に最大濃度 (0.65 mg L^{-1}) に達し、流量の通減に伴い低下した。イベント④のDN濃度は流量増加が続いている途中 (最初の流量ピークの8時間前) で最高濃度 (0.63 mg L^{-1}) を示した。イベント④のDN濃度は、最大流量に達する前に減少しはじめ、降雨終了から2日後の8月4日には 0.20 mg L^{-1} まで低下し、イベント⑤と同様に降雨前のDN濃度 (0.32 mg L^{-1}) に比べてやや低下する兆候がみられた。

3.3 極端出水におけるSS, TN, DN濃度の変動

“極端出水” における雨量、流量、SS濃度、TN濃度、DN濃度の時間変化を Fig. 7 に示す。“極端出水” では、流量は雨量の増加に伴って増加し始め、降雨強度のピーク付近から少し遅れて観測中の最大流量 (14.7 mm h^{-1}) に達した。“極端出水” の開始前の流量が 0.14 mm h^{-1} であったので、105倍上昇したことになる。

“極端出水” の直前 (2011年7月15日10:30) の渓流水のSS濃度は 3.1 mg L^{-1} で、流量の増加に伴ってSS濃度は急激に上昇し、最大流量の直前 (5時間前) で観測

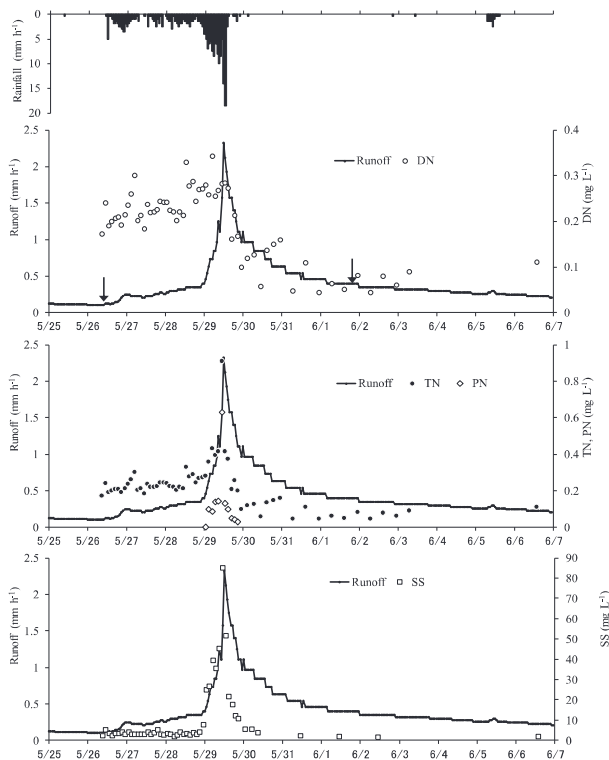


Fig. 6 Temporal variation in rainfall, runoff and nutrients concentration of stream water during “storm event (event ⑤)”. Two black arrows represent the begin (left) and the end (right) of the cumulative specific runoff.

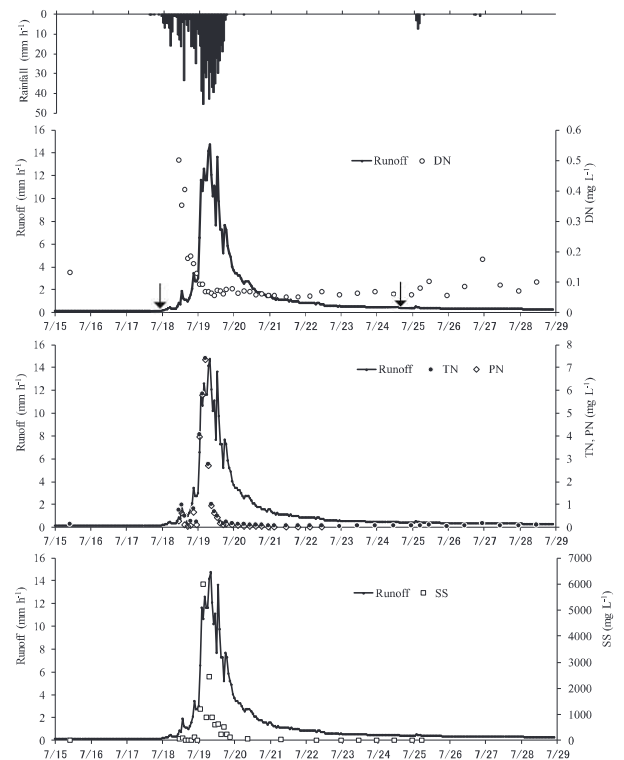


Fig. 7 Temporal variation in rainfall, runoff and nutrients concentration of stream water during “extremely storm event (event ⑥)”. Two black arrows represent the begin (left) and the end (right) of the cumulative specific runoff.

中の最大濃度 (5982 mg L⁻¹) に達した。その後、降雨終了直後から、急激に低下した。

“極端出水”の直前の渓流水は、SS濃度が低く、TN濃度は大部分が溶存態であったと考えられる。TN濃度は流量の増加に伴って上昇し、最大流量の直前(3時間前)で観測中の最大濃度(7.39 mg L⁻¹)に達した。この値は降雨開始前の57倍、平水時(0.24 mg L⁻¹)の31倍であった。降雨終了後、まだ比較的流量が多い期間であっても降雨前とほぼ同程度にまで急激に低下した。

“極端出水”の直前の渓流水のDN濃度は0.13 mg L⁻¹であった。欠測のため、降雨開始から13時間(7月18日12時まで)の変化は不明だが、降雨イベント①~⑤の観測結果を参考にすると、流量増加に伴ってDN濃度は上昇を始めたと推定される。降雨開始から13時間後のDN濃度は0.50 mg L⁻¹で、観測した範囲では最も高かった。流量が最大(2011年7月19日8時)のとき、DN濃度は0.07 mg L⁻¹を示し、SSやTNより早い段階で低下していた。DN濃度は降雨終了の2日後(7月21日)に0.05 mg L⁻¹まで低下し、降雨前のDN濃度(0.13 mg L⁻¹)より低い状態が降雨終了後6日間は続いた。

3.4 SS, TN, DNの累加比負荷量

SS, TN, DNの累比流量と累加比負荷量との関係をFig. 8に示す。“極端出水”のSS累加比負荷量は3108 kg ha⁻¹と、“大出水”の1.8~11.7 kg ha⁻¹と比べて極端に多く、“大出水”の平均値(降雨イベント③~⑤)の528倍であった。“極端出水”のTN累加比負荷量は約5.2 kg ha⁻¹で、“大出水”の0.11~0.19 kg ha⁻¹と比べて非常に多く、“大出水”の平均値に対して35倍であった。一方、“極端出水”のDN累加比負荷量は0.28 kg ha⁻¹で、“大出水”の平均値(0.13 kg ha⁻¹)に対して約2.1倍と、SSやTNに比べてあまり増加しなかった。

3.5 SS, TN, DNの年間流出負荷量

年間のSS, TN, DNの流出負荷量を算出するため、観測値のない出水時の負荷量は(2)式にTable 2に示した係数を適用して回帰推定した。“極端出水”が発生した2011年のSS, TN, DNの年間流出負荷量を推定した結果(Method Bによる結果は括弧内に表示), それぞれ5607 (7270) kg ha⁻¹ yr⁻¹, 13.7 (15.8) kg ha⁻¹ yr⁻¹, 4.2 kg ha⁻¹ yr⁻¹であった(Table 3)。アメダス観測点「船戸」において、2011年、2012年の年降水量(それぞれ4006 mm, 4087 mm)¹⁷⁾は平年値(3329 mm)¹⁷⁾より多かったことから、著者らが観測した年は平年よりも多雨であったと理解できる。

3.6 “極端出水”のSSの粒径組成および強熱減量

最大のSS濃度を記録した試料(イベント⑥)の2011年7月19日4:00)の粒径組成および強熱減量の測定結果

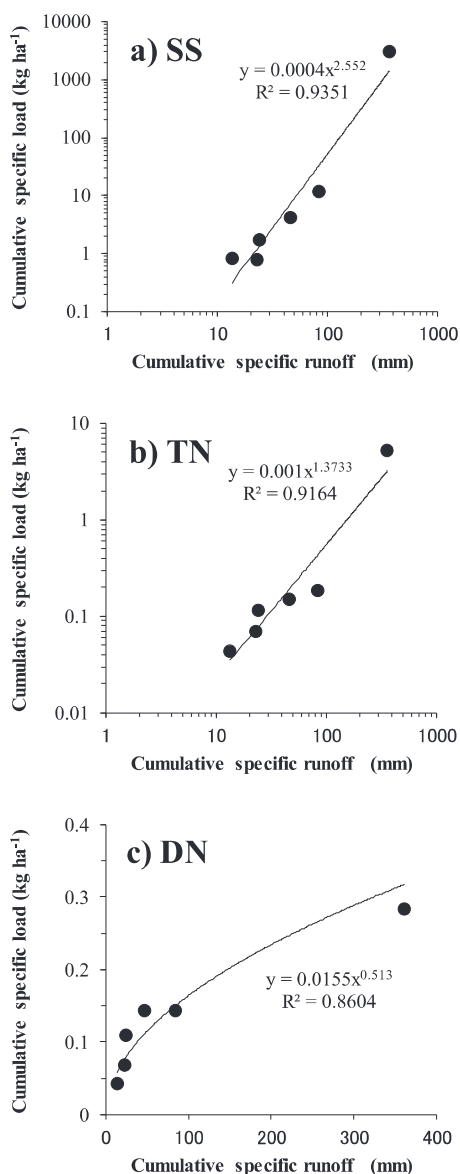


Fig. 8 The relationships (a) between the cumulative specific runoff and the cumulative specific load of SS, (b) between the cumulative specific runoff and the cumulative specific load of total nitrogen and (c) between the cumulative specific runoff and the cumulative specific load of dissolved nitrogen.

Table 2 Parameter values of the $\Sigma L - \Sigma Q$ ($\Sigma L = a(\Sigma Q)^b$) method.

SS			TN			DN		
a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
4.11×10^{-4}	2.55	0.935	9.89×10^{-4}	1.37	0.916	15.5	0.513	0.860

Table 3 Annual SS, TN and DN loads estimated by the $\Sigma L - \Sigma Q$ method.

Year	Annual loads			Proportion of loads during flood event to the annual loads			
	SS	TN	DN	SS	TN	DN	
	kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	%	%	%	
Method A	2011	5607	13.7	4.2	99.6	87.3	58.4
	2012	7097	16.2	6.0	99.6	83.2	55.1
Method B	2011	7270	15.8	—	99.7	88.9	—
	2012	10327	22.2	—	99.7	87.8	—

を、それぞれ Fig. 9, Fig. 10 に示す。採取された時間帯は、1時間当たりの最大降雨強度 (45.5 mm h⁻¹) を記録した直後で、流量はピークに達する5時間前であった。SSの粒径組成は、0.212~2 mm が圧倒的に多く、全体の83%を占めた。0.063~0.212 mm が10%、0.5~63 μm が4%、2~9 mm が3%であった。SS試料の有機成分の含有率は12%と、大部分が無機物が占めていた。画分ごとでみると、0.5~63 μm, 0.063~0.212 mm, 0.212~2 mm の各画分の有機成分の含有率はそれぞれ16%, 10%, 10%、2~9 mm 画分のみ75%であった。

3.7 SS濃度とPN濃度との関係

SS濃度とPN濃度との関係 (n=50) を Fig. 11 に示す。全体としてはSS濃度が大きくなるとPN濃度も大きくなる関係がみられた。詳細にみると、SS濃度が128 mg L⁻¹ (n=41) 以下の範囲の相関係数は0.95と高かった。SS濃度がそれより大きい範囲では、SS濃度が530 mg L⁻¹の時、PN濃度が0.11 mg L⁻¹、SS濃度が890 mg L⁻¹の時、PN濃度が7.32 mg L⁻¹の実測値が観察され、同程度のSS

濃度に対してPN濃度の変化が大きく、相関係数は0.73へ低下した (n=50)。SS濃度に対してPN濃度の低いデータは“極端出水”の主に流量通過過程で採取されたものであった。以上の通り、SS濃度が概ね100 mg L⁻¹を超えない範囲ではSS濃度とPN濃度との相関は高いが、SS濃度が概ね100 mg L⁻¹を超えるとPN濃度の変動が大きかった。

4. 考察

4.1 “極端出水”のSS, TN, DN濃度の比較

“極端出水”におけるSS濃度は、流量ピークの直前で観測中の最大濃度、5982 mg L⁻¹を示した。これは、国内の森林流域で大規模な出水時 (総降水量156~411 mm) に観測された最大値、120~814 mg L⁻¹ (28), 約200~650 mg L⁻¹ (11), 約600 mg L⁻¹ (31) よりも1オーダー大きい値であった (Table 4)。伐採や林道の開設など強度のかく乱を伴う場合、10³オーダー以上のSS濃度が観測されるが、通常の森林の溪流では10³オーダーのSSが観

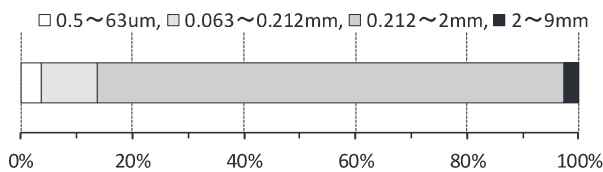


Fig. 9 The particle size distribution of SS obtained at a.m. 4:00 on 19 July, 2011 during “extremely storm event (event ⑥)”.

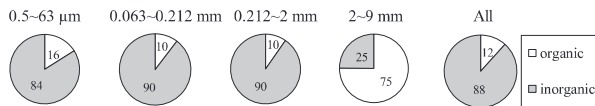


Fig. 10 The ignition loss of SS obtained during “extremely storm event (event ⑥)”. Two numbers within each circle represent organic and inorganic matter contents.

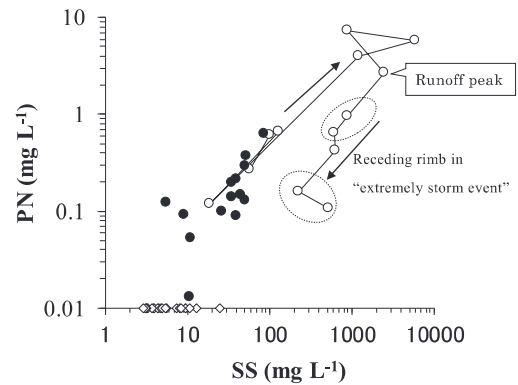


Fig. 11 The relationship between SS concentration and PN concentration.

Twenty open diamond shapes on the horizontal axis represent invisible datasets in Fig. 11 because of PN concentration < 0.01 mg L⁻¹. Thirteen open circles represent datasets obtained during “extremely storm event (event ⑥)”. Open circles surrounded by dotted line represent datasets obtained during the receding limb.

Table 4 Maximum of SS and TN concentrations during storm event and extreme storm event.

	Location	Total rainfall mm	Maximum rainfall intensity mm h ⁻¹	Maximum SS concentration mg L ⁻¹	Maximum TN concentration mg L ⁻¹
This study	Kochi	741.5	45.5	5982	7.39
This study	Kochi	210.5	18.5	85	0.91
This study	Kochi	142.0	19.0	53	0.89
This study	Kochi	133.0	11.5	51	0.90
Hotta <i>et al.</i> (2007) ²⁸⁾	Chiba	410.8	62.2	814	—
Hotta <i>et al.</i> (2007) ²⁸⁾	Chiba	158.6	64.2	320 ³⁾	—
Hotta <i>et al.</i> (2007) ²⁸⁾	Chiba	227.1	30.9	120 ³⁾	—
Zhang <i>et al.</i> (2007) ¹¹⁾	Mie	209	34	650 ³⁾	2.18
Zhang <i>et al.</i> (2007) ¹¹⁾	Mie	182	14 (30) ¹⁾	240 ³⁾	1.82
Zhang <i>et al.</i> (2007) ¹¹⁾	Mie	156	25	200 ³⁾	1.4 ³⁾
Ide <i>et al.</i> (2009) ³¹⁾	Fukuoka	190	74 ²⁾	600 ³⁾	—

¹⁾ Intensity at that the maximum of TN concentration was observed, the number with parenthesis represents maximum intensity during rainfall event

²⁾ Intensity converted from rainfall intensity per 10 minutes

³⁾ The approximately value visually judged from figures

測されることはほぼない³²⁾。“極端出水”では、未攪乱の森林の渓流水であっても 10^3 mg L^{-1} オーダーの SS 濃度が観測されることがわかった。

三重県のヒノキ人工林流域で台風に伴う出水時の TN 濃度の最大値は約 2.2 mg L^{-1} , 約 1.8 mg L^{-1} , 約 1.4 mg L^{-1} であった (Table 4)。“大出水”における渓流水の TN 濃度は先行研究¹¹⁾と比べてやや低かった。これは、本研究のほうが最大の SS 濃度が小さいことから、懸濁物質の流出が少ないことが影響した可能性がある。懸濁物質が少なかったのは、当該降雨イベントの総降水量や最大降雨強度が小さい傾向であったこと、先行研究¹¹⁾の試験地の林相はヒノキ人工林であり、本研究より侵食が多かった可能性が考えられる。“極端出水”の TN 濃度は流量ピーク付近で最大となることは先行研究¹¹⁾と同じだが、降雨規模を反映して最大の TN 濃度は、先行研究¹¹⁾よりも高い濃度を示した。先行研究¹¹⁾の総降水量 209 mm の降雨イベントの際、別の流域で最大の TN 濃度 5.64 mg L^{-1} を観測していることを考えれば、本研究で観測された TN 濃度 (7.39 mg L^{-1}) は大きな数値であるが、現実的にあり得る値である。降雨規模が大きくなっても、TN 濃度は DN 濃度のように低下することなく流量ピーク付近で最大になる。これは水深が増えれば、掃流力が増し、溪床や溪流近傍に存在していた、より大きな土粒子も移動し始めるためである。

“出水”における DN 濃度は流量が増えると上昇し、流量が減ると DN 濃度も低下した。“極端出水”と“大出水”のイベント⑤においては、降雨イベント初期は“出水”における DN 濃度変動と同様の変動を示したが、流量増加過程の途上で、DN 濃度は低下し始め、DN 濃度が降雨前より低い状態が一定期間継続するといった変動を示した。こうした変動は、流域面積 73 ha の大きな流域の末端で観測された結果であるため、一部の小流域や湧出点で起きた事象ではなく、流域内の小流域間のばらつきが平均化された、本流域内での標準的な濃度変動を示していると考えられる。森林流域において大きな出水時の渓流水の DN 濃度の変動に関して直接検討した報告は見当たらない。そのため、渓流水の DN の主成分と考えられるのは NO_3^- ^{11,13)} であることから、 NO_3^- 濃度に関する先行研究と比較を試みる。 NO_3^- 濃度が大きな出水時においてピーク流量より早い段階で顕著に低下することが、高知県の総降水量 247 mm 及び 289 mm¹⁰⁾ の、三重県の総降水量 182 mm¹¹⁾ の降雨イベントで観察されている。DN 濃度の顕著な低下は、“大出水”から“極端出水”において普遍的に起こる現象と考えられる。また、TN と異なり、流量が増え続けると、DN 濃度は増加から減少に転じる。このことから、流域内の存在量に上限をもつ成分と考えられる。

4.2 “極端出水”の SS, TN, DN 流出負荷量の比較

本流域の“極端出水”の SS, TN, DN の流出負荷量はそれぞれ $3108 \text{ kg ha}^{-1} \text{ event}^{-1}$, $5.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ event}^{-1}$, $0.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ event}^{-1}$ であった。国内の 23 森林流域で総降水量 44~398 mm の 72 出水を基に整理された 1 出水あたりの流出負荷量 (平均値)¹⁶⁾ は、SS, TN, DN の順に、70694, 456, $323 \text{ kg ha}^{-1} \text{ event}^{-1}$ であった。一方、我が国の森林に関する SS, TN, DN の原単位のレビューでは、133, 4.9, $5.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と報告されている¹⁵⁾。先行研究¹⁶⁾との比

較では、“極端出水”の SS, TN, DN のいずれも圧倒的に小さい。先行研究¹⁶⁾は著しく大きなデータが含まれる結果、偏りが生じている可能性があるため、後者の先行研究¹⁵⁾と比較する。その結果、“極端出水”では 1 回の出水で、我が国の通常の森林 1 年分に匹敵する TN が流出したことがわかった。この理由として、“極端出水”では最大流量は降雨前流量の 105 倍、最大の TN 濃度は降雨前 TN 濃度の 57 倍と、“大出水” (最大流量は 5~23 倍、最大の TN 濃度は 3~5 倍) と比べて著しく増加するためである。

TN 累加比負荷量に占める DN 累加比負荷量の割合は、“出水”で 97~99%，“大出水”でも 77~97% と、出水時に流出する窒素の形態は溶存態が大半を占めた (Fig. 12)。しかし、“極端出水”の場合では TN 累加比負荷量に占める DN 累加比負荷量の割合は 5% と極めて低くなり、流出した窒素は懸濁態が圧倒的になる。この理由は、“極端出水”時の窒素流出に関して、前節で述べたように溶存態と懸濁態で流量増加に対する応答特性が異なるためである。懸濁態の割合が高まる傾向自体は既往の結果¹¹⁾からも窺うことができるが、本報では“極端出水”の窒素流出に関して懸濁態が圧倒的になることを明確に示した。

本研究の 2011 年、2012 年の年間の SS, TN 流出負荷量 (Table 3) は、Table 5 に示す先行研究^{13, 15, 28, 31, 33)} より多いが、年間の DN 流出負荷量はほぼ同じで大きな違いは認められなかった。年間の SS 流出負荷量に関して、先行研究^{13, 31, 33)} より多く、国内の 9 森林流域の SS 流出負荷量 (最大値は $632 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ¹⁵⁾) よりもかなり多かった。国内外の 25 森林流域の年間の SS 流出負荷量³¹⁾ と比べても、それらのすべてより多かった。年間の TN 流出負荷量に関しても、先行研究^{13, 33)} より多く、国内の 17 流域の流出負荷量平均値 ($4.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 最大値 $20.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ¹⁵⁾) よりも多かった。SS や TN は流量が増えれば、流出負荷量も増える傾向がみられている (Fig. 8)。先行研究^{13, 15, 28, 31, 33)} より本研究で SS や TN が多かったのは、多雨地で観測したこと (地域差の影響) に加え、降水量の多い年であったこと (調査した年の影響) が要因である。さらに、先行研究^{13, 31, 33)} より傾斜が急である (流域の地形の影響) ことも流出負荷量を増加させる方向に作用した可能性がある。また、年間の TN 流出

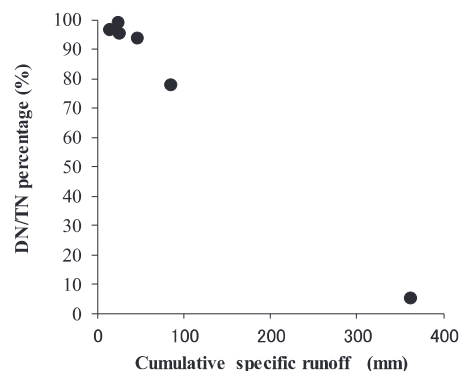


Fig. 12 The relationship between the cumulative specific runoff and the percentage of dissolved nitrogen (DN) to total nitrogen (TN).

Table 5 Comparison of annual loads of SS, TN and DN.

	Location	Year	Annual rainfall mm	Watershed area km ²	SS kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	TN kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	DN kg ha ⁻¹ yr ⁻¹
This study ¹	Kochi	2011	3991	0.73	5607	13.7	4.2
This study ¹	Kochi	2012	4134	0.73	7097	16.2	6.0
黒田ら (1991) ³³⁾	Ibaraki	1985	1742	2.95	295	6.8	3.7 ²
國松・須戸 (1997) ¹³⁾	Shiga	1989	1709	不明	64	1.4	0.6 ²
Hotta <i>et al.</i> (2007) ²⁸⁾	Chiba	1996~1998	1740~2510 ³	0.008	71~126 ³	—	—
Hotta <i>et al.</i> (2007) ²⁸⁾	Chiba	1996~1998	1740~2510 ³	0.011	118~229 ³	—	—
Ide <i>et al.</i> (2009) ³¹⁾	Fukuoka	2002~2006	1920 ⁴	0.095	723 ⁴	—	—
古米 (2012) ¹⁵⁾	Domestic mean	—	—	—	133 ⁵	4.9 ⁶	5.2 ⁷
駒井 (2004) ³⁴⁾	Hyogo	2003	2539	0.375	—	24.9	—
駒井 (2004) ³⁴⁾	Hyogo	2004	2336	0.375	—	33.2	—

¹ Results estimated by Method A. ² NO₃⁻-N. ³ The approximately value visually judged from figures.

⁴ Averaged value in 2002 to 2006 (n=5).

⁵ Averaged value (n=9). ⁶ Averaged value (n=17). ⁷ Averaged value (n=10)

負荷量が 10~30 kg ha⁻¹ yr⁻¹ で、本研究より大きな事例^{34, 35)}がある。これは大気からの過剰な窒素流入により、窒素飽和状態にある森林流域である。窒素飽和にある森林流域の年間の TN 流出負荷量が平均値 (4.9 kg ha⁻¹ yr⁻¹) より多いことは本流域と同じであるが、TN の大部分は溶存態の硝酸態窒素である^{34, 35)}。これに対し、多雨で TN が多い本流域では TN の 2/3 から 3/4 程度 (Table 3 より 2011 年 69 (73) %, 2012 年 63 (73) %, 括弧内の数値は Method B に基づく算定) が懸濁態での流出となっており、特徴が全く異なる。年間の DN 流出負荷量は先行研究^{13, 15)} とほぼ同じであった。本流域のような年降水量が 3000 mm を超える地域の年間の DN 流出負荷量が国内の平均的な雨量 (1700 mm)³⁶⁾ に近い地域の年間 DN 流出負荷量と変わらないことから、流出負荷量からみても DN は雨量、流量の増加に応じて増え続けるものではなく、流域からの DN 流出は有限であることが示唆される。

4.3 “極端出水”の SS, TN, DN 流出の再現性・広域普遍性

想定を超えるような大雨が発生すれば、斜面崩壊などが発生し、多量の土砂流出の起源となり、長期に影響が残ったりする場合がある。例えば、三重県を流れる宮川で台風通過後、濁水が長期に発生したことが報告されている³⁰⁾。これは局所的に発生した崩壊の影響と考えられている。画像 (Google Earth, 撮影日 2012/4/1, 参照日 2016/10/1) で確認した範囲では、今回の“極端出水”では斜面崩壊の形跡は観察されなかった。海外では台風通過後の数年間、NO₃⁻ 濃度の上昇といった現象が報告されている³⁷⁾。しかし、本流域の“極端出水”後の SS, TN, DN 濃度が“極端出水”以前より高い状態が続くといったことは認められなかった。2011 年 7 月 19 日の日降水量 (543.5 mm) は、「船戸」観測所の第 2 位の記録だが、記録的な日降水量は 2005 年 (595 mm), 2003 年 (455 mm), 2007 年 (438 mm), 2004 年 (426 mm) にも観察されている¹⁷⁾。つまり、観測前の 10 年間 (2001~2010 年) に何度も極めて大きな降雨に見舞われていたことが分かる。このことから、河道内に不安定土砂が多量に溜まっていたとは考えにくい。以上より、今回の“極端出水”での SS, TN, DN 流出量は斜面崩壊、あるいは河道に溜まった多量の不安定土砂などの特定の起源に基づい

たものではなく、溪床の堆積物、溪流近傍の土壌、小さな溪岸崩壊土砂等の一般的に想定される起源に基づくと考えられる。このことは、同じような規模の降雨が数年内に再び起きた場合、同規模の SS, TN, DN 流出が再び起こる可能性を示している。

前節において“極端出水”の窒素流出は懸濁態が圧倒的になることを示したが、国内の他の森林流域で“極端出水”が発生した場合、同様のことが起きる可能性について検討する。SS, TN の流出は流量に応じて増えることは、その性質から各地で不変の事象と考えられるので、DN が低下することに着目する。渓流水中の DN の主要な形態である NO₃⁻ 濃度^{11, 13)} について、大きな出水時に顕著に低下することは国内でも認められる場合^{10, 11)} とそうでない場合^{7, 8)} がある。同じような変動が認められたのは高知県梶原町¹⁰⁾、三重県大紀町¹¹⁾ での観測で、これらは同じ地質 (秩父帯あるいは四万十帯の堆積岩) であること、年降水量が多いこと等、立地条件が類似している。そのため、同じ様な水質形成のメカニズムが成立していると考えられる。一方、認められていない事例は関東地方の観測^{7, 8)} であった。これらの試験地は、降雨 (大雨の発生頻度が高くない) や地質 (土層が厚く、洪水流出が緩和される) など立地条件が本研究と異なり、DN 濃度が低下を始める閾値に達するような大きな出水が起こりにくいためと推定している。ただし、滋賀県の森林流域で総降水量 151 mm の出水の際、複数箇所観察していた渓流水、湧水の 1 つで、NO₃⁻ 濃度が低下したことが報告されている³⁸⁾。こうした事例もあることを考慮すると、DN の存在量は有限であり、非常に大きな規模の降雨が発生した場合に TN 流出は懸濁態が主になることは全国各地の森林で認められる可能性が示唆される。

4.4 “極端出水”の懸濁物質の性状

“極端出水”時の SS の粒径組成は、0.212~2 mm 画分、いわゆる粗砂が圧倒的に多かった。これは水位が増え、掃流力が大きいためと考えられる。2~9 mm 画分の占める割合は 3% と低く、かつ有機成分の含有率は 75% と高かった。2 mm 以上の粒子が移動可能となるような掃流には達していないため、比重の軽い有機物のみが捕捉されたと考えられる。SS 全体の有機成分の含有率は 12% であった。出水時には SS に占める有機成分の含有率が

低下することが報告されており、北海道南部の森林で20～30%²⁶⁾、北海道中部の森林で42%（流量が多い時の収束値）³⁹⁾であった。流域面積や降雨条件、対象とするSSの粒径範囲などが異なるので、厳密な議論は難しいが、本研究の“極端出水”のほうが出水の規模としては大きいと考えられ、SSの有機成分の含有率は出水規模の影響を受けている可能性が考えられる。

これまでSS濃度とPN濃度との関係は高い相関が認められていた¹¹⁾。しかし、Fig. 11に示した通り、“極端出水”においてはこれまで考えられていたほど、PN濃度とSS濃度との相関は高くない可能性が示唆された。これは“極端出水”では、同じSS濃度に対して流量の増加過程でPN濃度は高く、流量の逓減過程で低い（Fig. 11）兆候がみられたことに起因している。このような兆候を示した理由は現状では不明である。しかし、“極端出水”のかなり水位がある状態でのSSの性状が関与している可能性がある。この段階で加わるSSは主に単粒状の粗大な粒子で、無機成分が主体である。つまり、PNをあまり保持していないため、SS濃度とPN濃度の関係をそれまでと異なるものにした可能性が考えられる。実際に、“極端出水”において最大のSS濃度を示した試料では、粗砂（0.212～2 mm）が8割（Fig. 9）を占め、そのうちの9割は無機成分（Fig. 10）であった。また、流域から流出すると考えられる森林土壌の窒素含有量を粒径別に比較した場合、粒径が大きくなると窒素の含有量が少なくなることが報告されている⁴⁰⁾。現状では“極端出水”のSSに関する情報が少ないため、今後それらを蓄積していくことが必要である。

懸濁態の栄養塩流出が極端に多くなり、かつ気温、水温の上昇の影響も加われば、堆積域の河川やダム湖で変質し、水質を富栄養化する可能性も考えられる⁴⁾。リンについて、懸濁態成分が河川や湖沼の生態系にどのような影響を与えるかについて不明な点が多いことが既に指摘されている⁴¹⁾。石狩川の大出水の水質調査では、難分解性有機物の割合が増えたことが報告されている⁴²⁾。こうしたことから、流出する栄養塩の構成物と性質についても詳しく把握する必要があるかもしれない。また、河川に細粒土砂が流入すると水生生物の生息場構造は大きく改変され、生物相は甚大な影響をこうむると指摘されている⁴³⁾。栄養塩類が海域に大量に流出する場合、海域の環境の悪化に対する留意が必要である³⁰⁾。加えて、国内の気候変動の影響程度は地域で異なる。どの地域でどの程度の変化が予想されるか、地域や気候変動の変動度合も考慮する必要がある。今後、極端な出水における栄養塩流出の定量定性的な将来予測の精緻化、懸濁態の形で存在している栄養塩類の変質や利用のされ方について明らかにすることが必要であると思われる。

5. まとめ

高知県南西部の森林流域を対象に、非常に大きな規模の出水時の渓流水のSS、TN、DNの動態について明らかにした。結果を以下にまとめる。

- ① “極端出水”では、1回の出水で通常の森林1年分にほぼ相当するTNが流出したことがわかった。
- ② “極端出水”の窒素流出は懸濁態の流出が圧倒的になることを明確に示した。

- ③ “極端出水”におけるPN濃度とSS濃度との相関が高くない可能性が示唆された。

以上、極端に大きな出水が発生した場合の森林からのSS、TN、DNの流出負荷量とその性質に関する調査事例を提示することができた。極端に大きな降雨イベントが発生すれば、栄養塩の流出量の増加のみならず質も変化すると予想された。これらのことから、栄養塩のうち懸濁態についても動態や性質を明らかにすることが必要と考えられる。

謝辞

本研究の遂行全般に関して、(元)高知大学農学部大年邦雄教授、(元)四電技術コンサルタント(株)中山健二氏、四電技術コンサルタント(株)小松和博氏には多大なご協力をいただいた。大年邦雄先生は2014年1月にご逝去された。ここにご冥福をお祈りいたします。査読者の方々には有意義なご指摘を頂き、本稿を飛躍的に改良することができた。高知県土木事務所の方々には流量観測に関する手続きでお世話になった。以上の方々に深く感謝の意を表します。本研究は、科学研究費補助金22580169「豪雨・台風に伴う森林域の栄養塩動態に関する実証的研究」によって実施した。

(原稿受付 2018年11月14日)

(原稿受理 2019年5月28日)

引用文献

- 1) 気象庁, 2018. 地球温暖化情報ポータルサイト. URL. http://www.jma.go.jp/cpdinfo/index_temp.html (2018年9月時点).
- 2) 気象庁, 2019. 災害をもたらした気象事例(平成元年～本年). URL. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html (2019年3月時点).
- 3) 尾崎剛篤, 小野美由紀, 福島武彦, 原沢英夫, 1999. 気象変動の河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究. 土木学会論文集 629 (VII-12), 97-109.
- 4) 風間聡, 沖大幹, 2006. 温暖化による水資源への影響. 地球環境 11(1), 59-65.
- 5) Park, J., Duan, L., Kim, B., Mitchell, M.J., Shibata, H., 2010. Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia. *Environment International* 36, 212-225.
- 6) 海老瀬潜一, 川村裕紀, 2017. 淀川本川のスーパー出水を含めた出水時水質と負荷量の年間総負荷量への影響評価. 水環境学会誌 40(2), 39-49.
- 7) Muraoka, K., Hirata, K., 1988. Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin. *Journal of Hydrology* 102, 235-253.
- 8) 大類清和, 生原喜久雄, 相場芳憲, 1992. 降雨イベントでの渓流水の溶存物質の流出特性と流出成分の分離. 日本林学会誌 74 (3), 203-212.
- 9) 海老瀬潜一, 永淵修, 2002. 屋久島溪流河川水質の流出特性と酸性雨影響. 陸水学雑誌 63(1), 1-10.
- 10) 篠宮佳樹, 山田毅, 稲垣善之, 鳥居厚志, 2006. 四万十川源流部の森林における降雨時の硝酸態窒素流出特性. 水環境学会誌 29(11), 723-729.
- 11) Zhang, Z., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Fukuyama, T., Kosugi, K., Sidle, R., Matsushige, K., 2007. Nutrient runoff from forested watersheds in central Japan during typhoon storms: implications for understanding runoff mechanisms during storm events. *Hydrological Processes* 21, 1167-1178.
- 12) Tsai, C.-J., Lin, T.-C., Hwang, J.-L., Lin, N.-H., Wang, C.-P., Hamburg, S., 2009. Typhoon impacts on stream water chemistry in a plantation and an adjacent natural forest in

- central Taiwan. *Journal of Hydrology* 378, 290-298.
- 13) 國松孝男, 須戸幹, 1997. 林地からの汚濁負荷とその評価. *水環境学会誌* 20(12), 810-815.
- 14) 林誠二, 2010. 森林による水環境への栄養源の供給とその影響. *水環境学会誌* 33(A) (10), 324-327.
- 15) 古米弘明, 2012. 非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究. 平成23年度環境省環境研究総合推進費成果報告書 (RFb-11T1). 社団法人日本水環境学会, 東京.
- 16) Zhang, Z., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Kosugi, K., Hiramatsu, S., Kitahara, H., Kuraji, K., Terajima, T., Matsushige, K., Tao, F., 2008. Characterization of diffuse pollutions from forested watersheds in Japan during storm events - Its association with rainfall and watershed features. *Science of the Total Environment* 390, 215-226.
- 17) 気象庁, 2019. 過去の気象データ検索. URL: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2019年2月時点).
- 18) 浅野友子, 2014. 日本の山地流域の降雨流出データ-収集データの概要と観測の課題-. *水文・水資源学会誌* 27(1), 19-28.
- 19) Hewlett, J.D., Hibbert, A.R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology*, Oxford, Pergamon, UK, pp. 275-290.
- 20) Chiwa, M., Ide, J., Maruno, R., Higashi, N., Otsuki, K., 2010. Effects of storm flow samplings on the evaluation of inorganic nitrogen and sulfate budgets in a small forested watershed. *Hydrological Processes* 24, 631-640.
- 21) 勝山正則, 大手信人, 小杉賢一朗, 2004. 風化花崗岩山地源流域の渓流水 NO₃⁻濃度形成に対する水文過程のコントロール. *日本林学会誌* 86(1), 27-36.
- 22) Yusop, Z., Douglas, I., Nik, A.R., 2006. Export of dissolved and undissolved nutrients from forested catchments in Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management* 224, 26-44.
- 23) 佐野貴洋, 遠藤祐子, 林文音, 芳賀弘和, 2014. 中国山地中部の源流域河川における融雪期の栄養塩濃度の特徴-1年間を通じた週に1度の採水に基づく無雪期と融雪期の比較-. *水環境学会誌* 37(4), 119-128.
- 24) 服部重昭, 志水俊夫, 荒木誠, 小杉賢一朗, 竹内郁雄, 2001. 森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方(Ⅰ)-渇水地域上流森林整備指針策定調査報告-. *水利科学* 45(3), 1-40.
- 25) 近藤純正, 中園信, 渡辺力, 桑形恒, 1992. 日本の水文気象(3)-森林における蒸発散量-. *水文・水資源学会誌* 5(4), 8-18.
- 26) 柳井清治, 寺沢和彦, 1995. 北海道南部沿岸山地流域における森林が河川および海域に及ぼす影響(Ⅰ)山地流域から津軽海峡に流出する浮遊土砂と有機物. *日本林学会誌* 77(5), 408-415.
- 27) 篠宮佳樹, 2017. 台風に伴う増水時の渓流水を通じた放射性セシウムの流出. *水利科学* 61(1), 19-31.
- 28) Hotta, N., Kayama, T., Suzuki, M., 2007. Analysis of suspended sediment yields after low impact forest harvesting. *Hydrological Processes* 21, 3565-3575.
- 29) 篠宮佳樹, 小林政広, 坪山良夫, 澤野真治, 2018. 作業道作設を伴った流域面積の17%で実施された列状間伐中の懸濁物質の流出. *水文・水資源学会誌* 31(4), 178-187.
- 30) 岩崎誠二, 加藤進, 2006. 宮川における台風21号(平成16年)による長期間の濁流水の継続に関する調査. *水環境学会誌* 29(11), 749-754.
- 31) Ide, J., Kume, T., Wakiyama, Y., Higashi, N., Chiwa, M., Otsuki, K., 2009. Estimation of annual suspended sediment yield from a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantation considering antecedent rainfalls. *Forest Ecology and Management* 257, 1955-1965.
- 32) 佐藤弘和, 2005. 浮遊土砂の流出機構と微細土成分比率の解析に基づく流域評価方法の構築. *北海道林業試験場研究報告* 42, 1-50.
- 33) 黒田久雄, 田淵俊雄, 菊池英樹, 鈴木正道, 1991. 森林小集水域における流出水の濃度と流出負荷. *農業土木学会論文集* 154, 25-35.
- 34) 駒井幸雄, 2004. 山林集水域における窒素汚染原因の解明と流域水質へのインパクトに関する研究報告書. 平成16年度河川整備基金助成事業成果報告書. 兵庫県立健康環境科学研究所センター, 神戸. URL: <http://public-report.kasen.or.jp/16-1-①-19.pdf> (2018年8月時点).
- 35) 小林政広, 伊藤優子, 篠宮佳樹, 稲垣善之, 坪山良夫, 玉井幸治, 清水貴範, 澤野真治, 橋本徹, 森下智陽, 吉永秀一郎, 稲垣昌宏, 壁谷直記, 2012. 森林が使いきれなくなった窒素. *森林総合研究所平成24年度研究成果選集*, 36-37.
- 36) 新井正, 2007. 風土としての日本の水-自然地理の視点から-. *地学雑誌* 116, 7-22.
- 37) Schaefer, D.A., William, H., McDowell, W.H., Scatena, F.N., Asbury, C.E., 2000. Effects of hurricane disturbance on stream water concentrations and fluxes in eight tropical forest watersheds of the Luquillo Experimental Forest Puerto Rico. *Journal of Tropical Ecology* 16(2), 189-207.
- 38) 尾坂兼一, 乙守利樹, 草加伸吾, 駒井幸雄, 浜端悦治, 肥田嘉文, 永淵修, 國松孝男, 2010. 森林小流域で測定した比流出量の収斂性の検証. *水環境学会誌* 33(10), 167-174.
- 39) 佐藤弘和, 寺澤和彦, 2004. 択伐施業後における渓流水に含まれる微細土濃度の変化. *日本林学会誌* 86(4), 349-357.
- 40) 増田貴則, 中田貴大, 細井由彦, 2008. 貯水ダムに流入する粒径別窒素・リン負荷量の推定に関する研究. *水工学論文集* 52, 1243-1248.
- 41) 井上隆信, 2003. 非特定汚染源の原単位の現状と課題. *水環境学会誌* 26(3), 131-134.
- 42) 橋治国, 1993. 洪水時における水質と水質成分の流出特性-石狩川1975年8月洪水について-. *水文・水資源学会誌* 6(3), 254-267.
- 43) 加賀谷隆, 2010. 森林と河川生物の関わり:とくに細粒土砂流入の影響の観点から. *水環境学会誌* 33(A) (10), 328-332.

[論文要旨]

高知県西部の森林流域において、2011年7月18~19日における総降水量742mmの“極端出水”のSS、TN、DNの流出負荷量について、総降水量100~300mmの“大出水”、総降水量100mm未満の“出水”と比較しながら調査した。試験流域(砂岩, 73ha, シイ・カシ林)で、自動採水器を用いて2010~2012年にかけて6回(総降水量44~742mm)の出水時調査(採水は2時間間隔)と月1回頻度の定期採水を行った。“極端出水”のDNの累加比負荷量(1出水の単位面積あたりの流出負荷量)は“大出水”のそれとほぼ同じであった。“極端出水”のTNの累加比負荷量は国内のTNの年間負荷量の平均値に匹敵した。累加比負荷量に関してDNのTNに占める割合は“出水”の97~99%、“大出水”の77~97%に対して“極端出水”は5%と、“極端出水”時の窒素流出は懸濁態が圧倒的になることを明確に示した。

キーワード：森林；大規模出水；渓流水；全窒素；溶存態窒素

