

論文 (Original article)

作業道作設を伴う間伐実施中の渓流水の懸濁物質濃度の定期調査

篠宮 佳樹^{1)*}、小林 政広²⁾、伊藤 優子²⁾、大貫 靖浩³⁾、坪山 良夫⁴⁾、澤野 真治⁵⁾

要旨

2012 年と 2013 年に作業道作設を伴う列状間伐 (伐採率は本数で 35%) が実施された茨城県内のスギ人工林・落葉広葉樹林からなる森林流域で、渓流を定時に採水して、間伐前と間伐中の、出水時を除く懸濁物質 (SS) 濃度を調べた。この間伐では作業道が全ての支流 (通常は水流が無い) に沿って建設された。2012 年の間伐では、間伐実施中の定時調査において SS 濃度が間伐前と比較して著しく増加することはなかった。しかし、2013 年の間伐では、間伐実施中およびその直後において定時調査時の SS 濃度が間伐前に比べて有意に高くなった。さらに、高濃度の SS (175.4 mg L^{-1}) が降雨終了から 11 時間以上経過後に採水した渓流水で観測された。この要因として、降雨後の湧出水が作業道の路面を侵食した可能性や、作業道の開設や集材作業などの林業機械による攪乱の可能性が考えられた。以上より、間伐実施中は出水時以外でも渓流水の SS 濃度が間伐前より著しく上昇する場合があることがわかった。

キーワード：渓流水、列状間伐、懸濁物質、作業道、定期調査

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。渓流水に含まれる懸濁物質 (Suspended Solid, 以降 SS と表記) は河川の濁りの原因とされ、しばしば問題となる。SS の著しい増加は魚類や藻類などの水生生物の生育環境を悪化させると考えられている (佐藤 2006, 加賀谷 2010)。

森林施業に伴う SS の流出に関して、全面皆伐では SS 濃度や SS 流出量が数倍から十倍程度増加、部分皆伐では 1.4 倍、2 倍程度の増加と報告されている (佐藤 2006)。また、Bathurst and Iroum (2014) のレビューでは、世界の温帯域の森林伐採で SS 流出が 0.2 ~ 150 倍増加することが示され、森林伐採が SS 流出に及ぼす影響は非常に大きな変動があるとまとめられている。国内でも集材路 (文献中の表記をそのまま使用、本研究の作業道と同義と考えている) 開設を伴う択伐 (佐藤・寺澤 2004) や間伐 (Nam et al. 2016, 篠宮ら 2018) により SS 濃度が上昇したり、SS 流出量が増加したりしたことが報告された。また、架線集材を利用して皆伐 (Hotta et al. 2007) や間伐 (白木ら 2020) を実施した場合には SS 流出増加や濁水の発生が見られず、SS 流出が抑制されたとの報告もある。

一般に流量が多くなると SS 濃度も高くなるので、森林施業と SS や濁水の流出に関する研究のほとんどが出水時を取り扱ったものが通常である (佐藤・寺澤 2004, Hotta

et al. 2007, 阿部ら 2014, Nam et al. 2016, 篠宮ら 2018)。しかし、出水時以外の渓流水においても作業道の開設中に濁水は発生することが報告されている (杉山ら 2009)。従って、間伐などの森林施業が SS 流出に及ぼす影響を厳密に解明するには施業実施中の SS 流出の実態についても把握する必要がある。ただし、作業現場に立ち入るのは危険を伴うとともに、伐採現場では伐採木によって設置した観測機器が破壊されるリスクもあり、観測の蓄積は進んでいない。

このような中、林野庁 (2010) は林業の生産性の向上とコスト縮減を図る間伐方法として、植栽列や斜面方向等に沿って直線的に伐採するスギ林を対象に列状間伐を導入した。筆者らが観測を行っていた茨城県のスギ人工林流域においても 2012 年から 2013 年にかけて、列状間伐が行われることになった。森林施業と多面的機能の両立を図ることが求められる状況において、森林施業が SS の流出に及ぼす影響を明らかにすることは重要であることから、列状間伐前後の渓流水における SS 濃度変動を調査した。その 2012 年までの結果 (篠宮ら 2018)、2013 年間伐後 (2013 年 10 月以降) の出水時の結果 (Shinomiya et al. 2020) は既に報告されている。本論文では、2013 年の間伐実施期間中の出水時以外の SS 濃度に注目して、間伐施業が SS 流出に及ぼす影響を検討する。

原稿受付：令和 3 年 4 月 20 日 原稿受理：令和 4 年 2 月 3 日

1) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

2) 森林総合研究所 立地環境研究領域

3) 森林総合研究所 東北支所

4) 森林総合研究所 理事

5) 森林総合研究所 北海道支所

* 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

2. 研究方法

2.1 試験流域の概要

試験流域 (N36°31.1', E140°18.7'; 面積 59.9 ha) は茨城県内の国有林に位置し、小林ら (2018) の試験流域と同一である (Fig. 1)。アメダス観測点「常陸大宮」(試験流域より北へ約 10 km) の平年値 (1981 ~ 2010 年) は年降水量 1,344 mm、年平均気温 12.7 °C である (気象庁 2019)。気象観測値は気象庁ウェブサイトより引用した、1981 ~ 2010 年の平年値 ($n=30$) である。流域の地質は中生層の頁岩・チャート等でその上部を火山灰が覆い、土壌は褐色森林土である (大貫ら 2014)。流域の標高は概ね 130 ~ 300 m、斜面の平均傾斜は 16.5°、起伏比は 0.11 であった。植生は主として約 50 年生のスギ (*Cryptomeria japonica*) 人工林で、斜面上部はコナラ (*Quercus serrates*) にアカマツ (*Pinus densiflora*) などが混じる落葉広葉樹林である。ス

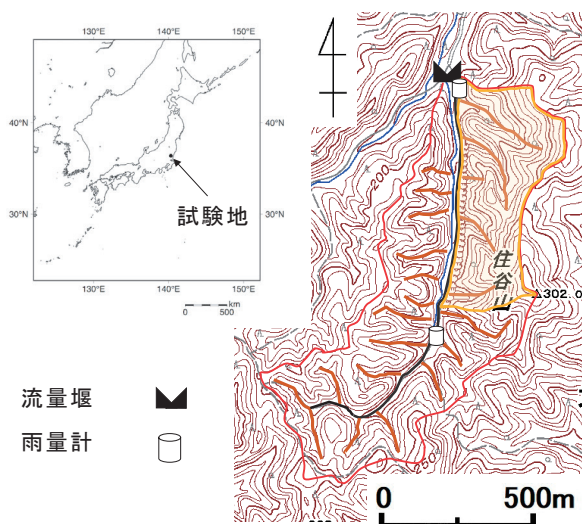


Fig.1. 試験地の位置図

Location of the experimental site

黒の実線、茶色の実線、赤の実線は、それぞれ間伐前に存在していた林道、新設された作業道、流域境界を表す。黄色の実線で囲まれた部分は、2012 年に間伐が行われた場所を示す。流域のそれ以外の範囲で 2013 年に間伐が実行された。斜面上部は落葉樹林であるため、2012 年、2013 年とも間伐は実施されていない。地理院タイルを基に作成された。

The black, brown, and red solid lines represent the forest road that existed before thinning, newly constructed spur roads, and the watershed boundary, respectively. The area surrounded by yellow solid lines shows where thinning was conducted out in 2012. In other area of the watershed, thinning was done in 2013. The thinning was not done in the higher part of slope of the watershed in both 2012 and 2013 thinning because vegetation was deciduous broad-leaved forest. Figure 1 was produced using information from the Geospatial Information Authority of Japan (<http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>).

ギ林内の下層植生はヒサカキ (*Eurya japonica*)、アオキ (*Aucuba japonica*) などが繁茂し、スギの落葉落枝等が林床を覆っていた (Fig. 1)。

2.2 間伐の概要

間伐前の試験流域は常時水流のある主谷沿いに林道 (未舗装で恒常的に使用可) が約 1.5 km 敷設されていた。間伐は 2 年にわたって実施され、まず 2012 年 8 月下旬から 11 月中旬にかけて流域の北東部分 (流域面積の 17%) を対象に列状間伐が行われた (篠宮ら 2018)。翌年の 6 月下旬から 8 月中旬にかけて、未着手であった部分 (流域面積の概ね 3 割) について実施し、全流域の間伐を終了した。なお、試験流域の斜面上部は落葉広葉樹林であり、スギは斜面中部や下部に植栽されているため、実際に間伐されたのは試験流域の概ね半分であった。間伐を実施するにあたり、全ての支谷沿いに総延長で約 4,900 m の作業道 (未舗装で一時的利用を前提とする、幅員 3 m) が作設された。作業道作設により路網密度は間伐前の約 25 m ha⁻¹ から間伐後の約 108 m ha⁻¹ に増加した。作業道は全て行き止まり式で、そのうちの一部では盛土部の法肩には切り株が埋め込まれていた (田邊・大内 2008)。作業道が作設された支谷に恒常的な水流は認められなかった (Photo 1)。列状間伐は本数で 35 % の間伐率で計画され、実際には幅約 6 m を残した後、幅約 3 m を伐採 (2 伐 5 残) するように実施された。間伐により立木密度は約 1,400 本 ha⁻¹ から約 950 本 ha⁻¹ に減少した。伐採木はグラップルによる掴みどり、またはウインチによる曳き出し後、林内作業車 (クローラ型) にて搬出された。主谷沿いの林道の幅員が広い場所に土場が 2 ~ 3 箇所設けられた。当該施業で発生した枝条は施業中、谷筋に一時的に置かれ



Photo 1. 谷筋 (恒常的な水流がない溪流) に沿って開設された作業道

The spur road constructed along a tributary (an ephemeral stream)

撮影日時: 2012 年 12 月 17 日、撮影者: 篠宮佳樹

Taken by Yoshiki Shinomiya on December 17, 2012.

(Photo 2)、施業終了時に作業道路面に高さ 1 m 程度まで積みあげられた (Photo 3)。なお、2013 年 6 月 18 日には既に間伐施業が始まっていたことを確認している。また、間伐終了直後に常時水流のある主谷と複数の作業道を踏査した限りでは、溪岸の崩壊、作業道法面の崩壊などの



Photo 2. 間伐実施中に谷筋に集められていた枝条
The branches deposited in a tributary during thinning
 撮影日時：2013 年 7 月 16 日、撮影者：伊藤優子
 Taken by Yuko Itoh on July 16, 2013.



Photo 3. 2013 年間伐の最終段階で作業道に積み上げられた枝条
The branches piled up on the surface of spur road at the final stage of thinning in 2013
 撮影日時：2013 年 8 月 13 日、撮影者：小林政広
 Taken by Masahiro Kobayashi on August 13, 2013.

特定の流出源はみられなかった。また、林内で表層土壌が攪乱されたとみられる場所は特に認められなかったことから、林業機械は作業道上のみを移動していたと推察された。2013 年間伐の際、常時水流のある主谷を作業道が横断する箇所が存在が確認されたことから、林業機械が溪流の河床を攪乱した可能性があるとして推察された。

2.3 流量、雨量の測定

流量は、流域の最下端部の 120°V ノッチ式量水堰において自記水位計 (光進電気工業製 STS DL/N70 型) を用いて 10 分間隔で水位を計測し、水位-流量曲線により算定した。堰付近と流域中央の開けた地点で転倒桁式自記雨量計を設置し、林外雨量を測定した。

2.4 採水方法及び分析方法

渓流水の採取は、Table 1 に示すように、2012 年間伐前 (2010 年 6 月 1 日～2012 年 8 月 31 日)、2012 年間伐中 (2012 年 9 月 1 日～11 月 21 日)、2012 年間伐後 (2012 年 11 月 22 日～2013 年 6 月 20 日)、2013 年間伐中 (2013 年 6 月 21 日～8 月 13 日)、2013 年間伐後 1 期 (2013 年 8 月 14 日～10 月 8 日)、2013 年間伐後 2 期 (2013 年 10 月 9 日～2014 年 12 月 31 日) に量水堰のやや上流の流水部で行った。2012 年間伐前は、原則として 2 週間に 1 回の頻度でポリエチレンボトルを用いて人力で概ね 12～15 時の間に採水した。2012 年間伐中では、自動採水器 (SIGMA 製 900 または ISCO 製 model6712) を用いて毎日 1 回、原則として 16 時に採水した (但し、採水期間 82 日のうち 25 日間は欠測) (篠宮ら 2018)。2012 年間伐後は毎月 1 回 (人力で概ね 12～15 時) の頻度で採水した。2013 年間伐中および 2013 年間伐後 1 期は、自動採水器 (ISCO 製 model6712) により毎日 1 回 15 時 (7 月 17 日以降は 17 時) に採水した。採水時刻を 15 時あるいは 17 時としたのは、間伐作業が行われている時間帯における SS 流出の状況を把握するためである。なお、2013 年間伐中に 1 回欠測した (7 月 27 日)。2012 年間伐中、2013 年間伐中、2013 年間伐後 1 期において自動採水器の採水は常に同じ位置で行った。2013 年間伐後 2 期は、2 週間に 1 回 (人力で概ね 13～15 時) の頻度で採水した。SS 濃度は、孔径 2 mm の篩を通過させた渓流水 (0.8～1.1 L) を孔径 0.5 μm のガラス繊維フィルター (桐山製作所製 SS-47) を用いて吸引ろ過し、ガラス繊維フィルターを 105 °C の定温で 2

Table 1. 調査期間と採取方法の概要

Summaries of survey periods and sampling methods

	期間名称	開 始	終 了	採取頻度	採取方法
①	2012 年間伐前	2010/06/01	～ 2010/08/31	2 週間に 1 回	人力
②	2012 年間伐中	2012/09/01	～ 2012/11/21	毎日 1 回	自動採水器
③	2012 年間伐後	2012/11/22	～ 2013/06/20	1 カ月に 1 回	人力
④-1	2013 年間伐中 (前半)	2013/06/21	～ 2013/07/21	毎日 1 回	自動採水器
④-2	2013 年間伐中 (後半)	2013/07/22	～ 2013/08/13	毎日 1 回	自動採水器
⑤-1	2013 年間伐後 1 期	2013/08/14	～ 2013/10/08	毎日 1 回	自動採水器
⑤-2	2013 年間伐後 2 期	2013/10/09	～ 2014/12/31	2 週間に 1 回	人力

時間乾燥し、放冷後、ガラス繊維フィルターの乾重量を差し引いて SS の乾重量を求め、供試水量で除して算定した。

2.5 2012 年間伐前に定期的に採水された SS 濃度の概要

2012 年間伐前 (2010 年 6 月～2012 年 8 月) に定期的に採水された渓流水の SS 濃度は $0.0 \sim 3.1 \text{ mg L}^{-1}$ 、平均 1.3 mg L^{-1} ($n=40$) であった (篠宮ら 2018)。北海道、福島県、千葉県、高知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 $1.5 \sim 5.6 \text{ mg L}^{-1}$ (柳井・寺澤 1995)、 2.1 mg L^{-1} (篠宮 2017)、 1.5 mg L^{-1} (Hotta et al. 2007)、 1.9 mg L^{-1} (篠宮・横山 2019) であった。流域面積や林相は様々であるが、先行研究とほぼ同じであったことから、本流域は SS 濃度に関しては特異な点はみられない一般的な森林流域であるといえる。

2.6 2012 年間伐中における定時調査の SS 濃度の概要

2012 年間伐中の SS 濃度は、降雨中に採水された 2012 年 9 月 23 日の SS 濃度が 6.7 mg L^{-1} であったことを除くと、 $0.2 \sim 4.4 \text{ mg L}^{-1}$ ($n=57$) であった (Fig. 2)。2012 年 9 月 23 日の SS 濃度を除けば、2012 年間伐中の SS 濃度は平均 2.1 mg L^{-1} 、無降雨日 (日雨量 0.0 mm d^{-1}) に限ると平均 1.9 mg L^{-1} と、2012 年間伐前の SS 濃度と比較して著しい増加はなかった (篠宮ら 2018)。

3. 結果

3.1 調査期間中の気象、水文

2010 年、2011 年、2012 年、2013 年の年間の雨量、流量を Table 2 に示す。2012 年、2013 年は 2010 年、2011 年に比べて雨量および流量が概ね $100 \sim 200 \text{ mm}$ 少なかった。2013 年間伐中は、6 月 26 日、6 月 21 日、8 月 1 日に

それぞれ日雨量 34.2 mm d^{-1} 、 34.5 mm d^{-1} 、 31.8 mm d^{-1} の降雨があったものの、日雨量 50 mm d^{-1} を越える大きな降雨はなかった。2013 年間伐後 1 期 (2013 年 8 月 14 日～10 月 8 日) には台風 18 号に伴う日雨量 89.4 mm d^{-1} (最大時間雨量 36.1 mm h^{-1}) の降雨があった。

3.2 2013 年間伐中における SS 濃度

2012 年間伐後 (2012 年 11 月 22 日～2013 年 6 月 20 日) の SS 濃度は $0.2 \sim 3.8 \text{ mg L}^{-1}$ ($n=6$) で、2012 年間伐前の SS 濃度 ($0.0 \sim 3.1 \text{ mg L}^{-1}$) と同程度であった。

2013 年間伐中の SS 濃度は最小 0.4 mg L^{-1} から最大 175.4 mg L^{-1} まで変化した (Fig. 3)。 50 mg L^{-1} 以上の SS 濃度が観察されたのは、6 月 27 日を除くと 7 月 24 日、7 月 29 日、8 月 7 日であり、それぞれの日雨量は 25.9 mm d^{-1} 、 10.2 mm d^{-1} 、 11.9 mm d^{-1} で、それぞれの SS 濃度は 143.4 mg L^{-1} 、 65.8 mg L^{-1} 、 81.7 mg L^{-1} であった。採水初日 (6 月 21 日) の SS 濃度は 32.4 mg L^{-1} で、当日の雨量は 34.2 mm d^{-1} 、採水は降雨が終了した 2 時間後であった。6 月 27 日は日雨量が 1.1 mm d^{-1} と少なかったにもかかわらず、最大の SS 濃度 175.4 mg L^{-1} が観察された。無降雨日の渓流水に関しては、2013 年間伐中の SS 濃度は $0.4 \sim 14.8 \text{ mg L}^{-1}$ (平均 5.6 mg L^{-1} 、 $n=24$) であった。この SS 濃度は

Table 2. 調査流域の 2010～2013 年の年雨量と年流量
Annual rainfall and runoff between 2010 and 2013 at the experimental watershed

年	年雨量 mm	年流量 mm
2010	1703	850
2011*	1679	705
2012	1476	624
2013	1524	631

*9 月 21～26 日は欠測

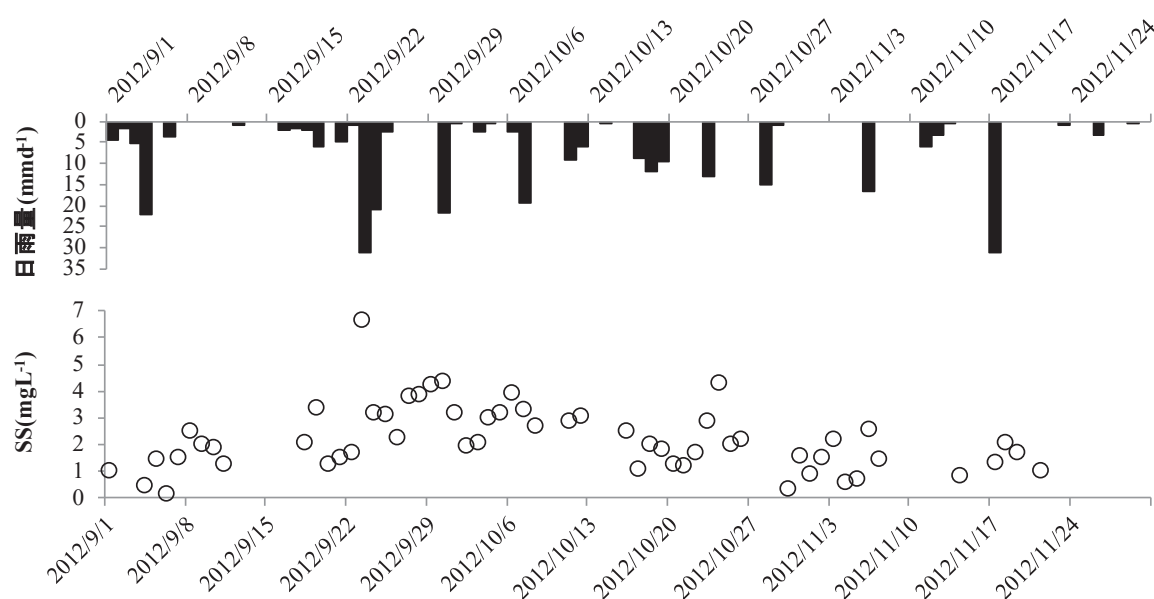


Fig. 2. 2012 年間伐中の日雨量と SS 濃度
Daily rainfall and SS concentration during thinning in 2012

2012 年間伐前 (2010 年 6 月 1 日～2012 年 8 月 31 日) のそれより有意に大きかった ($p<0.001$ 、Scheffe 法; 2012 年間伐前 (2010 年 6 月 1 日～2012 年 8 月 31 日)、2013 年間伐中 (2013 年 6 月 21 日～8 月 13 日)、2013 年間伐後 1 期 (2013 年 8 月 14 日～10 月 8 日) の 3 者の比較で有意水準を一定に保つため多重比較を行った)。Fig. 3 を見る限り、2013 年間伐中は 2013 年 7 月 23 日以降、SS 濃度が $10 \sim 20 \text{ mg L}^{-1}$ と、やや高い傾向が継続した。6 月 21 日から 7 月 22 日までの無降雨日の SS 濃度 ($n=17$) は平均 4.0 mg L^{-1} であるのに対し、7 月 23 日以降の無降雨日の SS 濃度 ($n=7$) は平均 9.5 mg L^{-1} であった。2013 年間伐中

の前半 (2013 年 6 月 21 日～7 月 22 日) に比べて 2013 年間伐中の後半 (2013 年 7 月 23 日～8 月 13 日) のほうが、SS 濃度がやや高かった。以上より、2013 年の間伐では日雨量約 1 mm の日に高濃度の SS が観測されるとともに、無降雨時の渓流水の SS 濃度に関して間伐前に比べて間伐実施中に高まる傾向が認められた。

3.3 2013 年間伐後の SS 濃度

2013 年間伐後 1 期 (2013 年 8 月 14 日～10 月 8 日) の SS 濃度は $5.8 \sim 125.7 \text{ mg L}^{-1}$ の範囲で変化した (Fig. 4)。このうち無降雨日の SS 濃度は $6.0 \sim 33.8 \text{ mg L}^{-1}$ 、平均

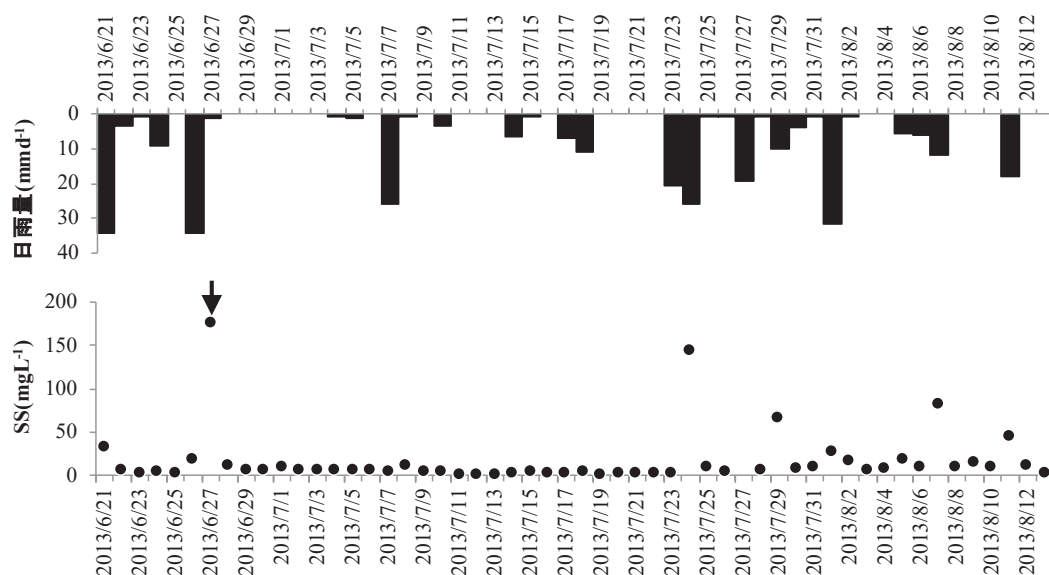


Fig. 3. 2013 年間伐中の日雨量、SS 濃度

Daily rainfall and SS concentration during thinning in 2013

矢印は考察で検討したデータを示す。

The arrow indicates the data considered in the “Discussion”.

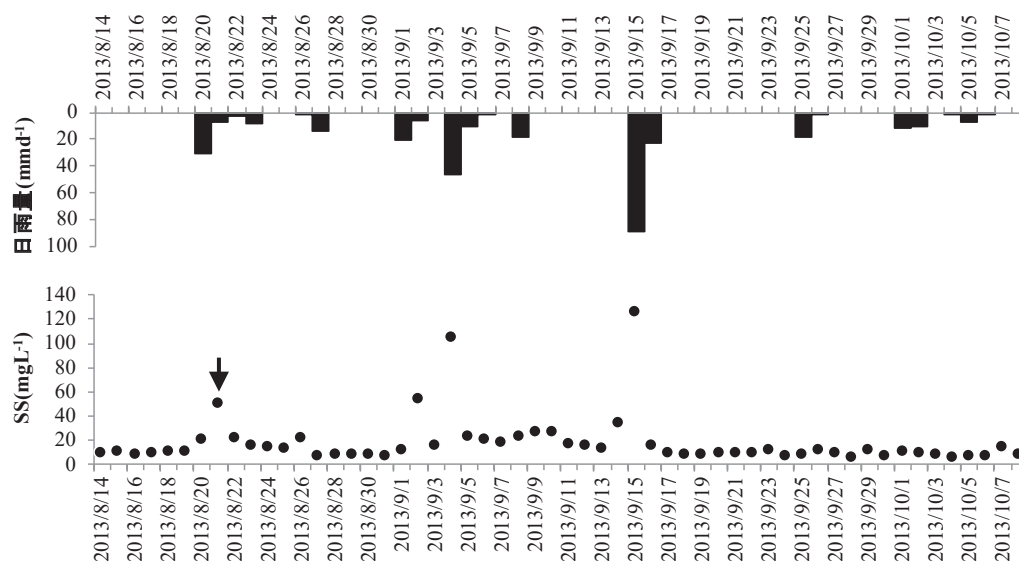


Fig. 4. 2013 年間伐終了後における日雨量、SS 濃度

Daily rainfall and SS concentration after thinning in 2013

矢印は考察で検討したデータを示す。

The arrow indicates the data considered in the “Discussion”.

値は 11.8 mg L^{-1} ($n=35$) であった。無降雨日の SS 濃度は 2012 年間伐前 (2010 年 6 月～2012 年 8 月) に比べて間伐後 1 期 (2013 年 8 月 14 日～10 月 8 日) のほうが有意に高かった ($p<0.001$, Scheffe 法)。7 月 23 日～10 月 8 日 (2013 年間伐中の後半～2013 年間伐後 1 期) の SS 濃度はやや高い傾向で推移していた。最大の SS 濃度 125.7 mg L^{-1} は 9 月 15 日 (日雨量 89.4 mm d^{-1}) に観察された。この降雨は台風 18 号によるもので、採水は降雨終了 5 時間後であった。9 月 4 日にも 103.8 mg L^{-1} の高い SS 濃度が観察された (日雨量 46.9 mm d^{-1})。そのほか、8 月 21 日 (日雨量 7.5 mm d^{-1}) に 50.4 mg L^{-1} の、9 月 2 日 (日雨量 6.5 mm d^{-1}) に 53.8 mg L^{-1} の SS 濃度が観察された。

2013 年間伐後 2 期 (2013 年 10 月 22 日～2014 年 12 月 31 日) の降雨中の採水 (日雨量 41.5 mm d^{-1})、大雨 (採水当日の日雨量 69.0 mm d^{-1} 、降雨イベントの総雨量 139.0 mm) 終了 7 時間後の採水を除くと、SS 濃度は $0.6 \sim 5.1 \text{ mg L}^{-1}$ (平均 2.3 mg L^{-1} , $n=30$) であり、2012 年間伐前 (2010 年 6 月～2012 年 8 月) に比べて明瞭に高い値を示すことはなかった。

3.4 2013 年間伐における流量と SS 濃度との関係

2013 年間伐における間伐前と間伐中の流量と SS 濃度との関係を Fig. 5 に示す。間伐前のデータは、2012 年間伐前の 2010 年 6 月から 2012 年 8 月にかけて月 2 回頻度で 40 回採取した渓流水と出水時 (総雨量 $15 \sim 130 \text{ mm}$ 、

最大時間雨量 $3 \sim 39 \text{ mm h}^{-1}$) に採取した溪流の SS 濃度である (篠宮ら 2018)。間伐中の SS 濃度は、間伐前と比較して、明らかに高い SS 濃度 (50 mg L^{-1} 以上のデータとした。これは間伐前の低流量時 2010 年 12 月 22 日 0:50 に観察された SS 濃度が 46.0 mg L^{-1} であったことを参考にした。Fig. 5, Fig. 6 にデータあり) が 4 回観察された。これらは、6 月 27 日の 175.4 mg L^{-1} を除き、降雨中に採水されたか、ないしは降雨終了 2 時間後に採取されたデータである。流量 0.1 mm h^{-1} 以下、SS 濃度 5 mg L^{-1} 以下の範囲に、無降雨日に採取された 11 データが分布するが、そのうちの 10 データは 2013 年間伐中の前半 (6 月 21 日～7 月 22 日) であった。流量と SS 濃度との関係からも 2013 年間伐中の前半より後半で SS 濃度が高い傾向が観察された。

2013 年間伐における間伐前と間伐後の流量と SS 濃度との関係を Fig. 6 に示す。間伐前に比べて明らかに高い SS 濃度 (50 mg L^{-1} 以上のデータ) は間伐後に 3 回観察された。これらのうち、8 月 21 日 (50.4 mg L^{-1}) は降雨終了 11 時間後に採水され、9 月 2 日および 9 月 4 日は降雨中に採水されたデータである。なお、期間中に最も雨量が多かった 9 月 15 日のデータは、間伐前のデータの分布範囲の内側にあった。この期間において 5 mg L^{-1} 以下の SS 濃度は観察されなかった。ただし、これらは間伐前と比較して著しく高いものではなかった。

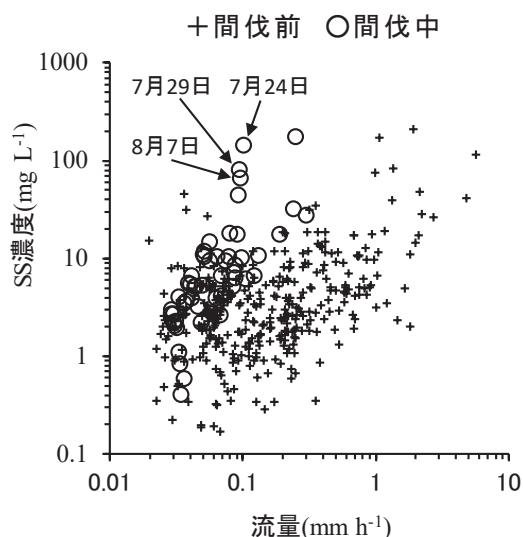


Fig. 5. 2013 年間伐における間伐前と間伐中の流量と SS 濃度との関係

The relationships between the runoff and the SS concentration before and during thinning

間伐前の流量と SS 濃度との関係は正の相関あり ($r=0.48$, $p < 0.001$)。間伐中も同様 ($r=0.74$, $p < 0.001$)。There is a positive correlation between the runoff and the SS concentration before thinning. Their relationship during thinning is the same.

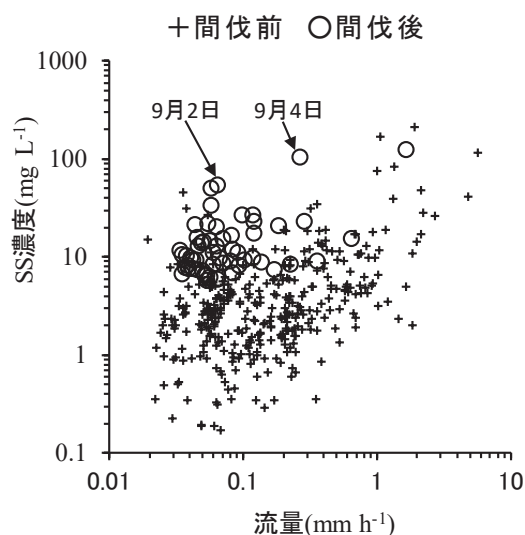


Fig. 6. 2013 年間伐における間伐前と間伐後の流量と SS 濃度との関係

The relationship between the runoff and the SS concentration before and after thinning

間伐後の流量と SS 濃度との関係は正の相関あり ($r=0.46$, $p < 0.001$)。There is a positive correlation between the runoff and the SS concentration after thinning.

4. 考察

2013 年間伐中の 7 月 24 日、7 月 29 日、8 月 7 日、および 2013 年間伐後 1 期の 9 月 2 日、9 月 4 日に 50 mg L^{-1} 以上の SS 濃度が観察されているが、いずれも降雨中に採水された。Fig. 5 および Fig. 6 の流量と SS 濃度との関係より、これらのデータは間伐前の分布範囲より明らかに SS 濃度が大きかった。このことは、2012 年間伐 (篠宮ら 2018) と同様に、2013 年間伐でも出水時の SS 濃度が間伐前より上昇していたことを示す。

2013 年間伐中の後半から 2013 年間伐後 1 期 (2013 年 7 月 23 日～10 月 8 日) にかけて無降雨時の SS 濃度がやや高い傾向もみられた (Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6)。この理由については以下の可能性が考えられる。間伐実施中に谷筋に放置されていた枝条が 2013 年間伐の最終段階では作業道路面上に積み上げられていたことが観察されたことから、その作業の際、溪流を攪乱した可能性が考えられる。また、常時水流のある主谷の溪流を横断する箇所は 8 箇所程度存在したと考えられ、林業機械が直接渡河することによって、あるいは構造物の設置・撤去、原状に戻す作業によって溪流を攪乱した可能性がある。この他、運材の車両が主谷沿いの林道を走行したり、積み込み作業を行った際に濁水を発生した可能性や間伐終了後の期間、比較的大きな降雨が続けて発生したことにより、SS 流出が促進された可能性なども考えられる。以上のことから、やや高い SS 濃度が継続した理由について特定できなかったものの、2013 年間伐中の後半から 2013 年間伐後 1 期の溪流水において、作業道の作設や集材作業の影響とみられる、やや高い SS 濃度が観察されたと考えている。

2013 年間伐中の 6 月 27 日に採水した溪流水の SS 濃度は 175.4 mg L^{-1} であった。このときは前日に 34.5 mm d^{-1} の降雨があり、当日も午前 3 時までに 1.1 mm d^{-1} の降雨があったが、採水した 15 時までの 12 時間は無降雨であった。2013 年間伐後 1 期の 8 月 21 日 (前日雨量 30.7 mm d^{-1} 、当日雨量 7.5 mm d^{-1}) に、降雨終了から 11 時間後に SS 濃度 50.4 mg L^{-1} が観察された。本流域の間伐前の 19 出水 (21 出水のうち 2 つは降雨終了から概ね 10 時間後の実測データがなかった) に関して降雨終了から概ね 10 時間後 (5～11 時間後) に実測された SS 濃度は $0.5 \sim 10.9 \text{ mg L}^{-1}$ 、平均 3.1 mg L^{-1} であった。従って、6 月 27 日および 8 月 21 日に観察された SS 濃度はかなり高い値であった。Zhang et al. (2007) は出水時の流量逓減過程において SS が TN (全窒素) や NO_3^- (硝酸イオン) に比べて濃度が急激に低下することを報告している。流量逓減過程における SS 濃度の急激な低下は、福島県、高知県の森林流域でも観察されている (Shinomiya et al. 2014, 篠宮・横山 2019)。前者では、総雨量 168 mm の降雨イベントの際、降雨終了 1.5 時間後で SS 濃度は 5.0 mg L^{-1} まで、後者の総雨量 44 mm 、 78 mm 、 133 mm 、 142 mm 、 211 mm の降雨イベントでは、降雨終了から 10 時間以内に SS 濃度は

5.5 mg L^{-1} 以下まで低下している。したがって、降雨終了から 11 時間以上経過した 6 月 27 日および 8 月 21 日の高濃度の SS は降雨による直接の影響によるものではないと考えられる。

降雨終了から 11 時間以上経過した段階で高い SS 濃度が観測された理由を検討する。施業終了後ではあるが、いくつかの作業道や溪流を踏査した際、溪岸の崩壊箇所などは見当たらなかった。伐採跡地には枝条が多数散乱し、著しい攪乱の跡や地表が露出した場所は観察されなかった。スギ人工林の伐採跡地での調査では土壌物理性の悪化は認められなかった (篠宮ら 2012) ことから、伐採作業における地表の攪乱は少ないと推定される。これらのことから、伐採跡地が SS 流出の主たる起源ではないと考えられる。また夏季で局地的な降雨が発生した可能性が考えられるが、6 月 27 日、8 月 21 日の両日とも、採水時刻付近の 2 台の雨量計に転倒記録はなく、流量も増加することなく単純に低減していたことから、局地的な降雨の影響ではないと考えられる。高い SS 濃度が観察された 6 月 27 日、8 月 21 日はともに前日に 30 mm d^{-1} 以上の降雨があった点が共通していた。このことから、降雨終了後でまだ地下水位が高く、作業道に湧出水が流入し、作業道表面を侵食し、溪流水の SS 濃度を上昇させた可能性がある (野口ら 2014)。なお、作業道は谷筋に沿って作設されたために、そこで発生した SS は濁水ろ過機能 (Okura et al. 1997, 大野・落合 2010) をもつ林地を通過することなく溪流に流れ込み、それによって降雨終了から 11 時間以上経過後に高い SS 濃度が観測されたと考えている。従って、6 月 27 日の高濃度の SS は、篠宮ら (2018) に記したように、作業道が開設され、新たな裸地が形成され、そこから SS が供給されたために発生したと考えられる。この他、流域内で林業機械が作業道作設など作業を行っていた可能性もある。8 月 21 日については、2013 年間伐の最終段階で作業道の切土面から作業道の幅員の半分程度の範囲まで枝条が積み上げられたことが観察されたが、作業道路面の約半分は間伐終了後も裸地として残っており、そこが SS の生産に寄与した可能性がある。

なお、2012 年間伐では 2012 年間伐前と比較して、定時採水の SS 濃度の上昇は認められなかったが、2013 年間伐では、SS 濃度の上昇が認められた。これは 2013 年間伐では間伐対象面積が 2012 年間伐に比べて約 2 倍広いこと、常時水流のある主谷を渡河する作業が加わっていることが影響した可能性がある。

以上のことから、本流域で実行された作業道作設を伴う列状間伐実施中や間伐終了後の出水時以外の溪流水に、作業道の作設や集材作業の影響とみられる、SS 濃度の上昇が認められた。

5. まとめ

茨城県のスギ人工林流域で、作業道作設を伴う列状間伐を実施している最中の溪流水を通じた SS 流出について

実態を報告した。その結果、間伐中および間伐後に、出水時以外の渓流水の SS 濃度が上昇する場合があることがわかった。特に、降雨終了から十分に時間が経過しても高濃度の SS が発生する場合があることが確認された。

本報では、SS の流出源や流出メカニズムを明らかにすることができなかった他、SS 濃度が時間単位で変化することを踏まえ、間伐実施中の SS 流出負荷量を検討することができなかった。今後、森林施業実施中の SS 流出源や SS の流出メカニズムを明らかにするとともに SS 流出量を精度高く算出するためには、森林施業に合わせて、多地点高頻度で SS 濃度を観測することや、林業機械の作業内容や活動状況も併せて SS 濃度変動を明らかにすることが必要であると考えられる。こうした調査や研究が蓄積されれば、森林施業を実施している流域からの濁水の流出実態や影響要因が特定され、下流への濁水影響を予測する技術の開発につながると考えられる。

謝 辞

本研究では、茨城森林管理署管内北山国有林を試験地として借用させていただいた。査読者の方には本稿の改良のために多くのご助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

引用文献

- 阿部 俊夫・佐々木 尚三・相澤 州平・橋本 徹・山野井 克己 (2014) 作業道を通じた間伐林分から渓流への浮流土砂流入—生田原国有林の事例—。北方森林研究, 62, 91–94.
- Bathurst, J. C. and Iroume, A. (2014) Quantitative generalizations for catchment sediment yield following forest logging. *Water Resour. Res.*, 50, 8383–8402. doi:10.1002/2014WR015711.
- Hotta, N., Kayama, T., Suzuki, M. (2007) Analysis of suspended sediment yields after low impact forest harvesting. *Hydrol. Proc.*, 21, 3565–3575. DOI: 10.1002/hyp.6583.
- 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, 33A(10), 328–332.
- 気象庁 (2019) “過去の気象データ検索”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照 2019-03-25).
- 小林 政広・吉永 秀一郎・伊藤 優子・篠宮 佳樹・相澤 州平・岡本 透・釣田 竜也 (2018) 桂不動谷津流域における 2001～2014 年の降水と渓流水の水質。森林総合研究所研究報告, Vol.17 No.4 (No.448), 333–373.
- Nam, S., Hiraoka, M., Gomi, T., Dung X. B., Onda, Y. and Kato, H. (2016) Suspended-sediment responses after strip thinning in headwater catchments. *Landscape Ecol. Eng.*, 12, 197–208. doi.org/10.1007/s11355-015-0284-0.
- 野口 正二・金子 智紀・北田 正憲・鈴木 秀典 (2014) 開設された作業道における表面流の発生—現地踏査と植生調査の解析—。日林誌, 96, 342–347. DOI: 10.4005/jjfs.96.342.
- Okura, Y., Kitahara, H. and Sammori, T. (1997) Forest soil and litter as filtering media for suspended sediment. *J. For. Res.*, 2, 9–14. doi.org/10.1007/BF02348256.
- 大野 泰宏・落合 博貴 (2010) 森林のバイオマッともつ濁水ろ過機能の定量的評価に向けた予備的実験。日林誌, 92, 171–175. DOI: 10.4005/jjfs.92.171.
- 大貫 靖浩・吉永 秀一郎・釣田 竜也・荒木 誠・伊藤 江利子・志知 幸治・松浦 陽次郎・小野 賢二・岡本 透 (2014) 桂試験地における土層厚の分布と土壌物理特性。森林総合研究所研究報告, Vol.13 No.2 (No.431), 43–59.
- 林野庁 (2010) “第 1 部 第 1 章 第 2 節 林業の生産性向上の取組 (2) 間伐”, 平成 21 年度版林業白書, http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/21hakusyo_h/all/h06.html. (参照 2017-08-15).
- 佐藤 弘和 (2006) 浮遊土砂の流出抑制に配慮した森林管理方法。日林誌, 88, 50–59. DOI: 10.4005/jjfs.88.50.
- 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。日林誌, 86, 349–357. DOI: 10.11519/jjfs1953.86.4_349.
- 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.
- 篠宮 佳樹・稲垣 善之・野口 麻穂子・奥田 史郎・宮本 和樹・伊藤 武治 (2012) 強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性。森総研研報, 424, 175–180.
- 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.
- Shinomiya, Y., Kobayashi, M., Tsurita, T., Tsuboyama, Y., Sawano, S., Itoh, Y., Ohnuki, Y., and Shichi, K. (2020) Discharge of suspended solids and radiocesium into stream water in a forested watershed before and after line thinning with spur road construction. *J. Environ. Radioact.*, 225, 106418.
- Shinomiya, Y., Tamai, K., Kobayashi, M., Ohnuki, Y., Shimizu, T., Iida, S., Nobuhiro, T., Sawano, S., Tsuboyama, Y. and Hiruta, T. (2014) Radioactive cesium discharge in stream water from a small watershed in forested headwaters during a typhoon flood event. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60, 765–771. DOI: 10.1080/00380768.2014.949852.
- 篠宮 佳樹・横山 雄一 (2019) 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。水環境学会誌, 42(5), 219–229.

- 白木 克繁・金澤 悠花・工藤 司・片岡 宏介・ウジムセ・内山 佳美 (2020) 簡易架線集材による森林整備が流出浮遊土砂量と流域流出量に与える影響. 水文・水資源学会誌 33(2), 47–55.
- 杉山 正典・古川邦明・横井秀一・臼田寿生・松本 武 (2009) 山地小流域における作業路開設時の濁水発生について. 中部森林研究, 57, 169–172.
- 田邊 由喜男・大内 正伸 (2008) 山を育てる道づくり. 農山村文化協会, 157pp.
- 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. 日林誌, 77 (5), 408–415.
- Zhang, Z., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Fukuyama, T., Kosugi, K., Sidle, R. C. and Matsushige, K. (2007) Nutrient runoff from forested watersheds in central Japan during typhoon storms: implications for understanding runoff mechanisms during storm events. Hydrol. Proc., 21, 1167–1178.

Regular survey of suspended solid concentrations in streamwater during line thinning with construction of spur road

Yoshiki SHINOMIYA^{1)*}, Masahiro KOBAYASHI²⁾, Yuko ITOH²⁾, Yasuhiro OHNUKI³⁾,
Yoshio TSUBOYAMA⁴⁾ and Shinji SAWANO⁵⁾

Abstract

We investigated suspended solid (SS) concentrations, except flooding, before and during line thinning in a Japanese cedar and broad-leaved forested watershed in Ibaraki Prefecture, Japan. Line thinning was conducted at a thinning rate of 35% during 2012 and 2013. Spur roads were constructed along all tributaries (ephemeral streams). The SS concentrations in the regular survey during the thinning conducted in 2012 did not increase significantly compared to the values before conducting thinning. Whereas, SS concentrations were significantly higher during and after the thinning that was conducted in 2013 than the values before conducting thinning. Furthermore, even though 11 hours had passed since the end of the rainfall, high SS concentration (175.4 mg L^{-1}) was observed. This reason may be that the spring water after rainfall eroded the surface of the spur roads and the disturbance by forestry machinery for spur roads construction or timber collection. Therefore, it was concluded that the SS concentrations in streamwater except flooding during thinning might be higher than the values before thinning.

Key words : streamwater, line thinning, suspended solid, spur roads, regular survey

Received 20 April 2021, Accepted 3 February 2022

1) Center for Forest Restoration and Radioecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Forest Soils, FFPRI

3) Tohoku Research center, FFPRI

4) Vice President, FFPRI

5) Hokkaido Research center, FFPRI

* Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, 305-8687, Japan