

## 間伐遅れの針葉樹人工林からの汚濁負荷流出の経年変化

武田育郎\*

### Changes in annual pollutant load runoff from coniferous plantations with delayed thinning

Ikuo Takeda\*

**Abstract** Weekly water quality measurements and 15 intensive surveys during rainy days were conducted for 8 years in two coniferous forest watersheds (a watershed with delayed thinning and a reference). There is a tendency that the pollutant load runoffs from the watershed with delayed thinning were higher than those of the reference. In addition, thinning practice leaving abandoned lumber increased the base flow rate due to the absence of evapotranspiration by trees, and consequently the base flow load increased. These results suggest that the effect of delayed thinning in coniferous plantations is important for river water quality and eutrophication of lakes. This is because delayed thinning leads to a closed canopy that prevents sunlight from reaching the forest floor and undergrowth disappears, and the nutrient-rich soil surface would be subject to erosion.

**Keywords** coniferous plantation, delayed thinning, pollutant load runoff, water quality

#### はじめに

島根県東部を流れる一級河川の斐伊川では、人口の減少などで人為的な活動が少なくなっているにもかかわらず、明確な水質改善が見られていないが(武田 2023)、この理由の一つとして、針葉樹人工林の間伐遅れ現象が考えられている。間伐遅れである山林の内部は、林冠が閉鎖して日光が十分に入らないため昼間でも薄暗くなり、そのため、林内の下層植生が貧弱となって、栄養分の豊富な表土が流亡しやすくなることが懸念される。また、間伐遅れによる下層植生の貧弱化は、森林生態系の生物の多様性を損ない、森林が本来有している水質浄化機能を阻害しているのではないかと考えられる。

このような観点から、間伐遅れのため下層植生が貧弱になった流域と、対照流域として間伐遅れに到っていない流域を試験流域に設定して水質水文調査を実施し、既報(武田 2002a; 武田 2002b; 武田 2002c)では1998年

12月～2001年3月の期間における測定結果を報告した。その後、2004年には間伐遅れの流域において予期しない間伐(いわゆる「切り捨て間伐」)が行われたが、本論文では年次変動も考慮して1999年1月から当地での測定を終了した2006年12月までの結果より、この期間の汚濁負荷流出の経年変化を取りまとめた。

#### 研究方法

##### 1. 水質水文調査

本研究では、島根県東部のM山の中腹に位置する近接した2つの山林流域を試験流域に定めた(図1)。すなわち、「間伐遅れ」のため林内が昼間でも暗く、下層植生が貧弱なスギ人工林が主体の流域(第1流域)と、対照流域として「間伐遅れ」には到っておらず、下層植生が旺盛なヒノキ人工林が主体の流域(第2流域)を試験流域に設定した。流域面積は、第1流域は0.34ha、第2流域は1.26haであり、この2つの流域は南北に約800m離れていた。流域の平均勾配は、第1流域で0.438、第2流域で0.486であった。また、第1流域の植生は、71%がスギ人工林

であり、29%がヒノキ人工林であった。一方、第2流域では、流域内の60%がヒノキ人工林、13%がスギ人工林であった。その他、広葉樹天然林が22%を、アカマツ林が5%を占めていた。それぞれの人工林の1998年時点における林齢は、地権者からの聞き取りによると、第1流域のスギとヒノキが約20年、第2流域のスギが約50年、ヒノキが約10年であった。なお、第1流域の「間伐遅れ」は、島根県の林分密度管理図における位置づけからも明らかであった(武田ら 2009)。

流量については、両地点とも流域の最下流端に量水堰(三角堰)を設置し、越流水深を10分間隔でロガーに記録し、これを流量に計算した。また、降水量については、堰付近に設置した0.5mm転倒マス型自記雨量計を用いて測定した。

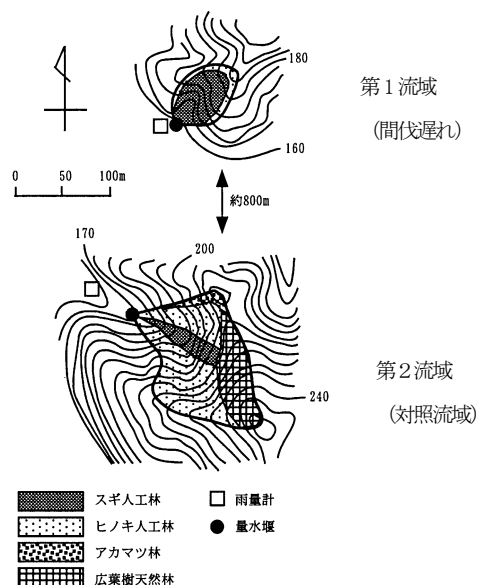


図1 試験流域

水質分析用のサンプルは、図1の量水堰において週1回の頻度での採水(定期調査)と、降雨時における自動採水器を用いた1時間~数時間間隔の採水(降雨時調査)を行った。採水した水の水質分析は、JIS法(並木編 1999)に準拠して行った。

## 2. 年間負荷量の推定方法

流域から流出する年間の汚濁負荷量については、流量によって大きく変化する水質のすべてを化学分析することは現実的ではないことから、両対数グラフを用いたいくつかの推定方法が提案されている(武田 2010)。このうち、最も一般的な「L-Q法」には、負荷量と流量の間のヒステリシスが表せない等の問題点があるとされているが、本研究では表1に示すように15回の降雨時調査を行ったので、流量の直接流出成分と基底流出成分に対応する、直接負荷量と基底負荷量を別々に計算する方法を用いた。すなわち、出水ごとの累加直接負荷量と累加直接流量を用いた「分離型 $\Sigma L$ - $\Sigma Q$ 法」を採用した。ここで流量の成分分離については、出水前の流量を用いた水平分離とし、15回の降雨イベントについて、基底流出成分を除いた累加直接負荷量 $\Sigma L$ と累加直接流量 $\Sigma Q$ を求め、両者の回帰式( $\Sigma L$ - $\Sigma Q$ 式)を用いて年間の全ての出水に対する直接負荷量を計算した。一方、基底負荷量については、週1回の定期調査で測定した水質のうち、降雨の影響のないものは測定間隔の前後の1/2の期間の水質を代表していると仮定し、対応する基底流量を用いて計算した。

表1 降雨時調査における降雨イベントの諸元

イベント No.	測定期間	総降雨量 (mm)		最大降雨強度 (mm/h)	
		第1流域	第2流域	第1流域	第2流域
1	1999/5/24-5/25	53.5	57.0	9.0	9.0
2	1999/5/26-5/27	30.0	31.0	6.5	6.5
3	1999/6/16-6/17	76.5	82.0	11.5	13.0
4	1999/7/2-7/4	74.5	73.0	19.5	18.5
5	1999/10/31-11/2	41.0	41.5	9.0	7.5
6	2000/7/24-7/25	55.5	51.5	22.5	16.5
7	2000/10/23-10/24	7.0	6.5	2.0	2.5
8	2000/11/20-11/21	15.5	21.0	3.0	4.0
9	2002/3/26-3/27	59.5	58.0	7.5	7.5
10	2002/9/16-9/18	40.5	49.5	9.0	12.0
11	2002/11/17-11/18	7.0	7.0	3.0	3.5
12	2003/2/22-2/23	31.5	30.5	4.0	4.0
13	2003/5/7-5/8	35.0	38.0	6.5	8.5
14	2003/10/28-29	7.0	6.5	3.0	4.5
15	2004/7/9-7/10	63.0	66.0	16.5	18.5

間伐遅れの針葉樹人工林からの汚濁負荷流出の経年変化

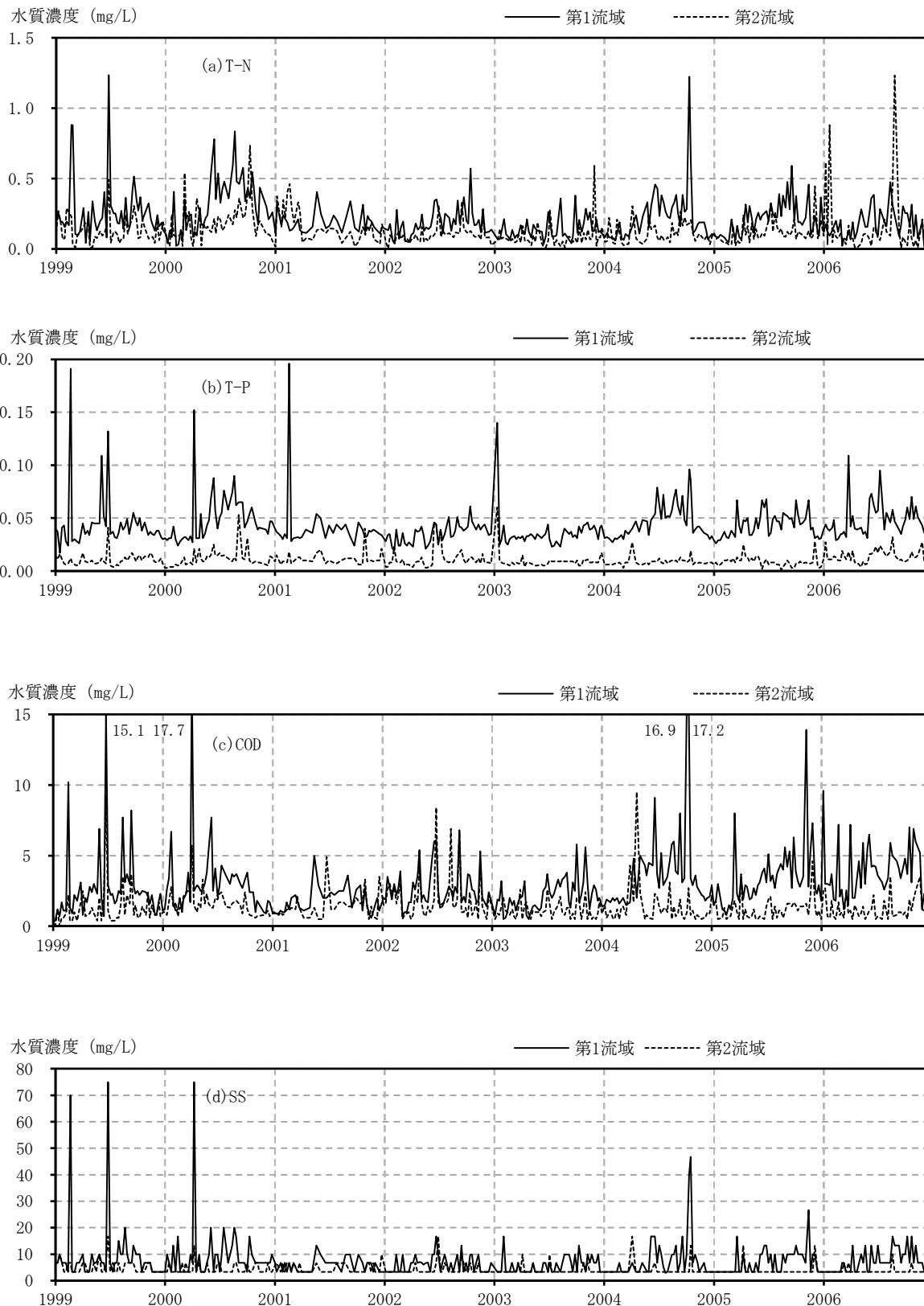


図2 定期調査の結果

## 結果と考察

### 1. 定期調査の結果

図2に、週1回の頻度で測定したT-N（全窒素）、T-P（全リン）、COD（化学的酸素要求量）、SS（懸濁物質）の2流域における水質変動を示した。粒子性成分を含むこれらの水質は、降雨による増水に伴って急激な上昇を示していたが、概して間伐遅れである第1流域の水質の方が第2流域を上回っていた。なかでもT-Pではその傾向が顕著で、第1流域の水質の方が明らかに第2流域を上回っていた。なお、SSについては、採水したサンプルのうち、250mLまたは150mLをろ過した後、通常用いられるmg/Lの水質値を計算したので離散的な時系列となった。また、表2に1999年～2006年のイオン性の水質も含めた平均水質を示した。これを見ると、多くの水質で第1流域の方が第2流域を上回っていたが、NO<sub>3</sub>-N（硝酸態窒素）とPO<sub>4</sub>-P（リン酸態リン）では第2流域の方がわずかに第1流域を上回っていた。

水質項目	第1流域	第2流域
T-N	0.213	0.127
NH <sub>4</sub> -N	0.021	0.009
NO <sub>2</sub> -N	0.004	0.002
NO <sub>3</sub> -N	0.012	0.015
T-P	0.043	0.011
PO <sub>4</sub> -P	0.025	0.027
COD	2.07	0.99
SS	7.3	4.2

### 2. 降雨時調査の結果

表1に示す降雨時調査を行った15の降雨イベントの中から、2003年5月7日～5月8日の水文量と水質の変動を図3と図4に示した。この降雨イベントにおける総降雨量は、第1流域で35.0mm、第2流域で38.0mmとなり、降雨時系列もほぼ同じであった。これに対して流量（mm/h）は、出水前は2流域でほぼ同じであったが、5月8日の午前4時以降における2番目の流量増加時では、第1流域の流量は鋭敏な変化を見せ、第2流域では降雨強度が第1流域よりも大きいにもかかわらず、緩慢な変化となった。

一方水質は、2流域とも同じような変動を示していたが、第1流域の方が第2流域よりも高くなる傾向にあった。なかでもT-Pでは、図2と同様に明らかに第1流域の方が第2流域を上回っていた。このような変動の特徴は、既発表（武田 2002b）の結果とも類似しており、間伐遅れによって下層植生が貧弱になると、降雨に対する流量の変化

が鋭敏になるとともに、水質も高くなる傾向を表しているものと考えられた。

### 3. ΣL-ΣQ式

表1に示す15の降雨イベントについて、累加直接負荷量ΣLと累加直接流量ΣQを計算し、両対数グラフにプロッ

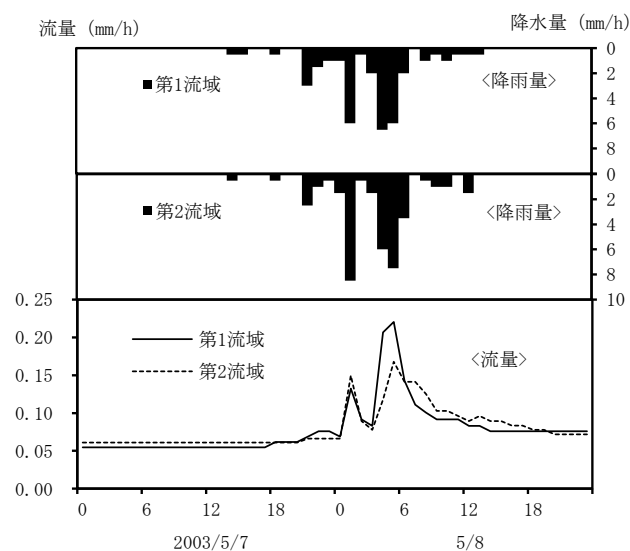


図3 降雨時の水文量の変化

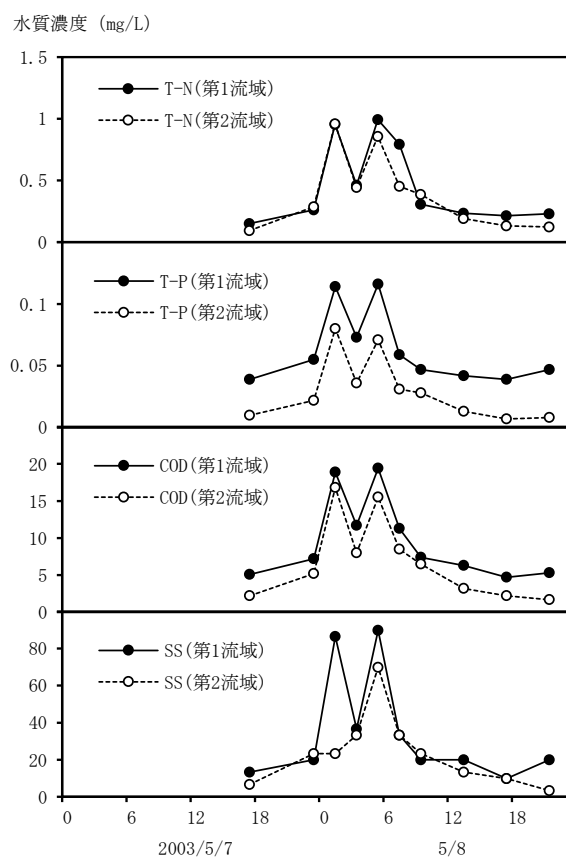


図4 降雨時の水質変化

トして回帰直線 ( $\Sigma L - \Sigma Q$ 式) を求めた (図5)。その結果、T-N, T-P, COD, SSともに統計的に有意な回帰式が得られ、T-P, COD, SSでは第1流域の回帰式が常に第2流域よりも上にあつた。一方、T-Nでは $\Sigma Q$ が0.3mm付近で直線が交わっていたが、それよりも高流量の範囲では第1流域の回帰式が第2流域よりも上にあつた。グラフでの回帰直線の傾きに相当する指数についてみると、COD以外では、第1流域の方が第2流域よりも大きく、間伐遅れの第1流域の方が、流量増加に対する負荷量の増加割合が大きくなった。

#### 4. 年間の水水量の変動

1999年～2006年の年間の降水量 (図6) は、第1流域では1530～2024mm (平均1773mm)、第2流域で1510～2174mm (平均1832mm) であつた。それに対する流量 (図7) は、

直接流量では第2流域の方が第1流域よりも多くなる年もあつたが逆の大小関係となる年もあつた。一方、基底流量では、2003年までは2流域でほぼ同レベルで推移していたものの、2004年以降は第1流域の流量が増加し、第2流域との差も拡大していた

#### 5. 年間負荷量の推定

このようにして求めた $\Sigma L - \Sigma Q$ 式と水水量から、年間の負荷量を推定した (図8, 図9)。上述のように直接流量では第2流域の方が第1流域よりも多くなる年もあつたものの、直接負荷量は、常に第1流域の方が第2流域を上回っており (図8)、これは図5に示す回帰直線の上下関係を反映しているものと考えられた。一方、基底負荷量 (図9) も同様に第1流域の方が第2流域を上回っていたが、第1流

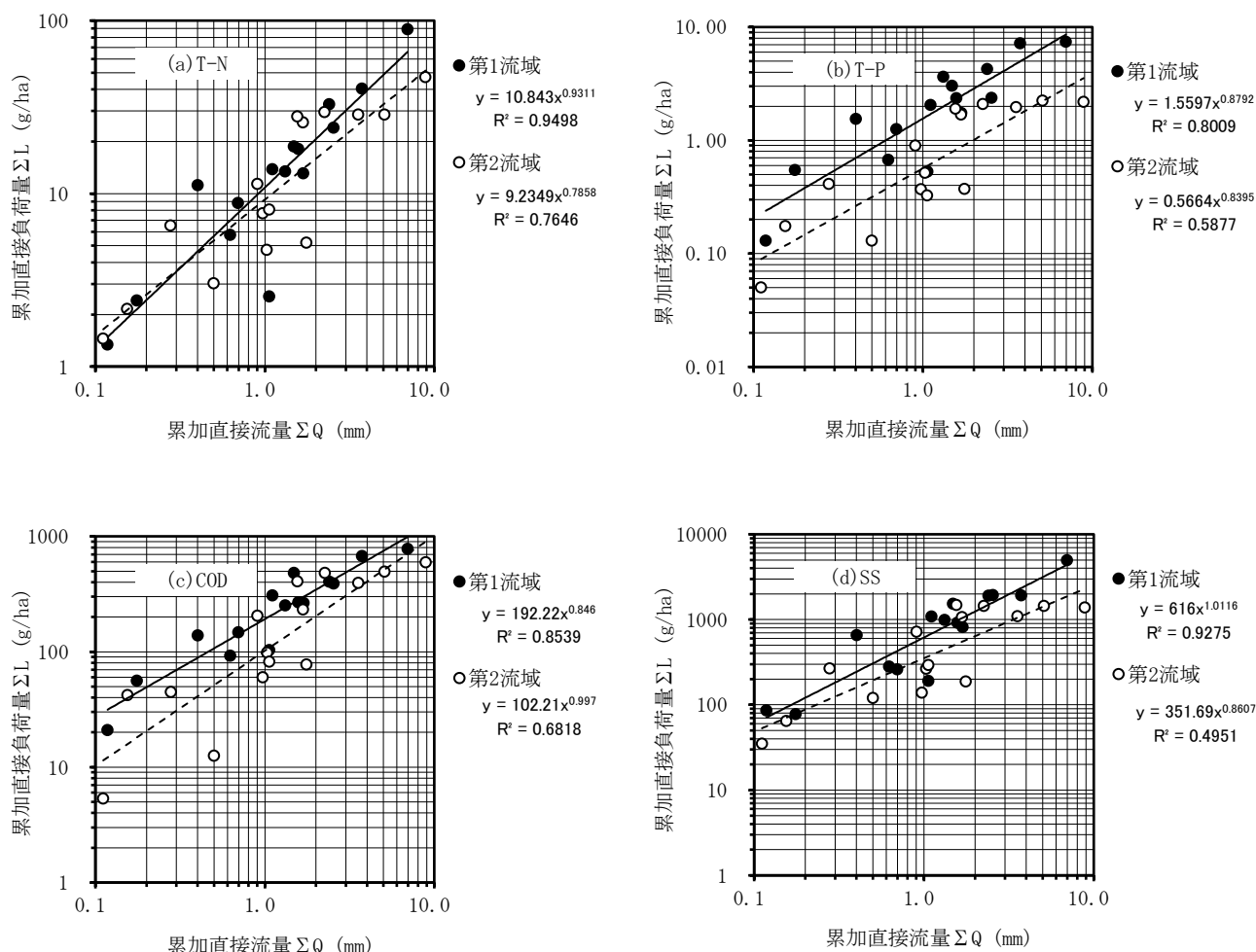


図5 累加直接負荷量 $\Sigma L$ と累加直接流量 $\Sigma Q$ の関係

間伐遅れの針葉樹人工林からの汚濁負荷流出の経年変化

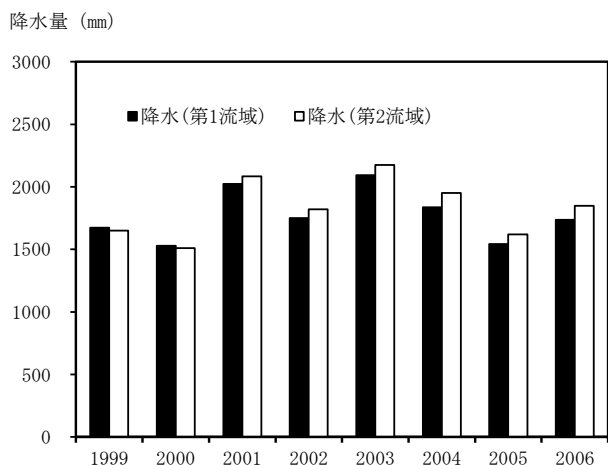


図6 年降水量の変動

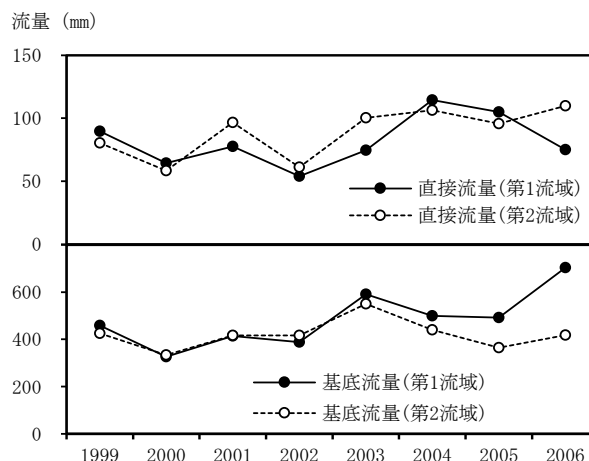


図7 年流量の変動

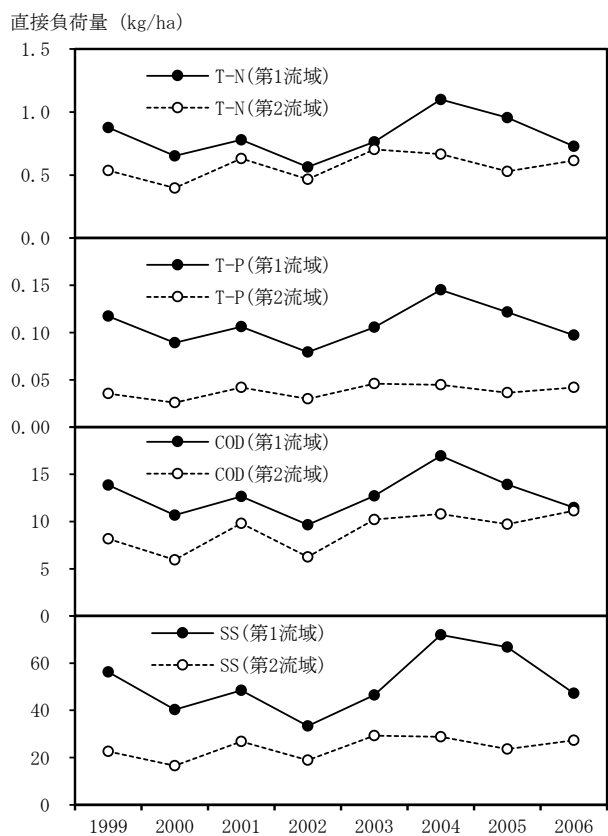


図8 年間の直接負荷量の変動

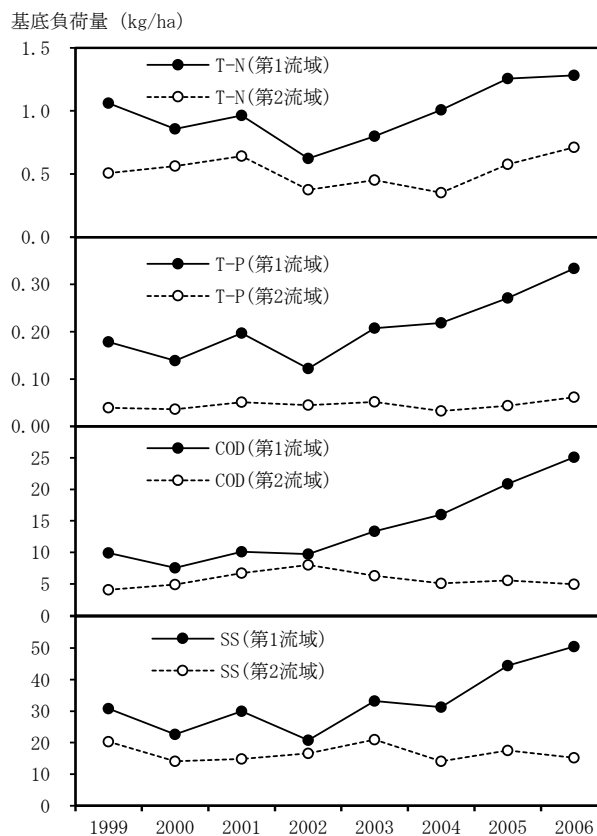


図9 年間の基底負荷量の変動

域では2004年以降は一様に増加する傾向にあり、第2流域との差も拡大していた。

このように2004年以降、第1流域の基底流量と基底負荷量が増加していた理由として、この年の4月に第1流域で行われた間伐（いわゆる「切り捨て間伐」）の影響が考えられた。既報（武田ら 2009）にて示したように、2004年4月以前の降雨時以外の流量は、2つの流域ではほぼ同レベルで推移していたものの、間伐後では第1流域の流量の方が常に第2流域を上回っていた。このことは、それまでは樹木からの蒸発散によって失われていた水が基底流量として流出するようになったためと考えられ、タンクモデルによる日流量の解析（戸田ら 2009）においても同様の結果を得た。図2では2004年以降で第1流域の水質に濃度低下がみられるわけではなかったため、こうした基底負荷量の増加には間伐後の基底流量の増加が寄与していると考えられた。

これらの結果より、原単位を考える上での基礎となる年間負荷量の平均値を計算すると表3のようになった。どの水質項目も間伐遅れの第1流域の方が第2流域を上回っており、このことは、間伐遅れ現象が汚濁負荷流出の増加に寄与していると考えられた。しかしながら、2つの流域では流域面積、植生、傾斜などが同一ではないという難点が残った。また、概して河川流域における水収支を完全に把握することは不可能であるが、本研究においても量水堰の下を流れる地下水や基岩（花崗岩）の亀裂から流れ出る水の存在も考えられた（武田ら 2009）。

水質項目	第1流域	第2流域
T-N	1.784	1.090
T-P	0.316	0.083
COD	26.80	14.70
SS	84.2	40.9

## おわりに

本研究では、2つの針葉樹人工林において8年間の週1回の水質測定（定期調査）と15回の降雨時調査を行い、年間の負荷量を直接流出成分と基底流出成分に分けて求めた。その結果、針葉樹人工林の間伐遅れ現象は、林内の下層植生の貧弱化と表土の露出により、汚濁物質の流出増加に寄与していると考えられた。しかしながら、2つの流域で流域面積や植生が同じでなく、また、地下水流動などの水収支の把握が必ずしも十分でないとする難点も

残った。概して面源から流出する汚濁負荷量は、予測困難な気象現象や観測者が制御できない流域条件（流域面積、地質、植生、傾斜など）の影響を受けるので、得られた結果が着目する要因（本研究の場合は間伐遅れの有無）によるものであるかの十分な因果関係の解明には至らない場合が多いといえる。これらのことから、概してこうした測定結果の公表が十分でないところがあるが、今後はさらなる知見の集積が必要である。

## 謝 辞

本研究の一部（2001年3月まで）は、環境庁水質保全局水質管理課（当時）と島根県環境生活部環境政策課の委託を受けた。水質分析には生物資源科学部農業水利学研究室の卒業論文専攻生、修士論文専攻生の協力を得た。記して深甚なる謝意を表します。

## 引用文献

- 並木博編（1999）詳解 工場排水試験方法 改訂3版, 507pp. 日本規格協会, 東京.
- 武田育郎（2002a）針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響（I）, 水利科学 **265** : 1-22.
- 武田育郎（2002b）針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響（II）, 水利科学 **266** : 47-71.
- 武田育郎（2002c）針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響（III）, 水利科学 **267** : 63-84.
- 武田育郎・福島 晟・宗村広昭（2009）間伐遅れの針葉樹人工林における水文流出の特徴とその長期変動, 農業農村工学会論文集, **263** : 41-48.
- 武田育郎（2010）よくわかる水環境と水質, 244pp. オーム社, 東京.
- 武田育郎（2023）人口減少が特徴的な流域における河川水質の30年間の変遷, 環境技術, **52** : 41-49.
- 戸田政仁・武田育郎・宗村広昭・井手淳一郎（2009）間伐遅れの針葉樹人工林における水文特性とタンクモデル定数との関係, 応用水文, **21** : 1-9.

## 日本語抄録

針葉樹人工林の2つの流域（間伐遅れの流域と対照流域）で、週1回の水質測定と降雨時の集中的な測定を8年間行った。その結果、間伐遅れの流域からの汚濁物質負荷流出量は対照流域よりも高くなる傾向にあった。また、切り捨て間伐が行われた流域では、樹木による蒸発散がないため基底流量が増加し、その結果、基底負荷が増加していた。