

公益信託エスぺック地球環境研究・技術基金
平成 20 年度 助成金研究報告書

水系の水質形成過程における森林の水質浄化機能の検討

島根大学大学院 生物資源科学研究科

井手 淳一郎

1. 緒言

近年の下水道普及率の向上や工場、事業場等の汚水処理の工夫にも関わらず、公共用水域の水質は顕著な改善が見られていない。この原因として、わが国の国土面積の2/3を占める森林からの窒素、リン、有機物等の汚濁物質の流出が注目されている。近年、少子高齢化や地域の過疎化に伴い、管理の行き届かなくなった森林（非管理林）や農地が増加傾向にある。このような土地利用の粗放化が上流域からの汚濁物質を増加させ、下流域の水環境を悪化させている要因と考えられている（武田, 2002a, b, c）。しかし、このことを明示する科学的なデータはほとんどないのが現状である。

森林は、流域の土地利用の大部分を占めることがわが国では一般的であるため、農地と並び汚濁物質の主要な供給源（面源）と考えられている。しかし、これまでの汚濁物質に関する研究は流域末端の河口部において汚濁物質の流出量（汚濁負荷量）を評価する、いわゆる出口調査が主体であったため、様々な土地利用形態を含んだ流域全体において、森林に端を発した汚濁物質がその流域の河川や下流域の水環境にどのような影響を及ぼしているのかについては不明である。このことは、水域の水環境保全を推進するための、流域内の森林の整備にどの程度コストをかけるべきかの判断を難しくしている要因の一つである。

本研究では、水系の水質形成という観点から、流域における森林の土地利用がその流域の河川や水系の水質に及ぼす影響を、農地との対比によって明らかにすることを目的とする。このため、島根県の斐伊川水系において、森林および農地の流域内における面積割合と河川水質の関係について調べた。また、水系において支流河川の流入する前後における本流河川の水質変化を調べた。

表1 各サブ流域における
土地利用の面積割合[%]

2. 方法

採水地点	農地	宅地	森林	その他
A	8.8	0.8	84.9	5.5
B	10.0	0.6	81.2	8.1
C	10.4	0.9	80.4	8.2
D	5.2	0.4	92.2	2.2
E	8.7	0.8	83.5	7.0
F	7.9	1.2	85.8	5.0
G	8.5	1.0	84.0	6.4
H	16.1	2.7	67.6	13.7
I	10.0	1.4	80.8	7.8

2.1. 調査地概要

研究対象の水系である斐伊川水系は宍道湖・中海に流入する最大の河川であり、その年間の平均流量は、宍道湖の貯水量の約3.5倍、中海の貯水量の約2.5倍に相当する。したがって、斐伊川からの汚濁物質は、これら二つの汽水湖の水質に大きく影響している。一方、宍道湖はアオコの発生する富栄養湖で

あり、中海でも赤潮の発生が見られ、双方とも窒素、リン、有機物の濃度が環境基準を上回っている。斐伊川の流域面積は911.4km²であり、土地利用形態は森林が約80%、農地が約10%、宅地が1.4%を占める（表1）。島根県は高齢化率が全国で最も高く、また、人口も減少傾向にあるため、林業従事者は減少の一途をたどっている（島根県, 2008）。したが

って、斐伊川流域における森林，とくにスギ，ヒノキなどの針葉樹人工林のほとんどが十分には管理されていない。

2.2. 調査方法

斐伊川流域の9つの水質観測地点(図1: A～I地点)において，水質分析用の河川水の採水を行った。これらの9つの観測地点は入れ子状になった流域(サブ流域)の末端に位置し，各地点の水質はサブ流域の土地利用を反映していると考えられる。観測地点Iでは，河川水の採水に加え，流量観測を行った。降雨データは出雲，大東，掛谷，横田で観測されている気象庁のデータを利用した。これらの水質・水文観測に加え，支流河川からの汚濁物質が水系の本流河川の水質に与える影響を調べるため，B地点の流入前後の斐伊川(B_{in}，B_{out}地点)において，水質分析用の河川水の採水と河川流量の計測を行なった(写真1)。

水質分析項目は全窒素(TN)，全リン(TP)，溶存有機炭素(DOC)，硝酸態窒素(NO₃⁻-N)である。TNについては，水酸化ナトリウム-ペルオキシ二硫酸カリウムで分解後，紫外線吸光光度法(K 0102 45.2)を，

T-Pについてはペルオキシ二硫酸カリウムで分解後，モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光光度法(K 0102 46.3.1)を用いた。DOCは試料水を濾過後，非分散型赤外分光計(TOC-V, CSN, 島津製作所)によって測定した。NO₃⁻-Nの測定についてはイオンクロマトグラフを用いた。なお，TN，TP，NO₃⁻-Nについては1992年より継続したデータが集積されている。

2.3. 解析方法

河川水質と森林または農地の土地利用との関係を調べるため，9つの観測地点における河川水質とそれぞれのサブ流域における森林または農地との面積割合との間の関係を表式によって表した：

$$C = a + bA \quad (1)$$

ここで，C：各観測日における河川水の汚濁物質(TN，TP，DOCまたはNO₃⁻-N)の濃度[mg l⁻¹]，A：各サブ流域における森林または農地の面積割合[%]，a，b：最小自乗法によって決定される定数。

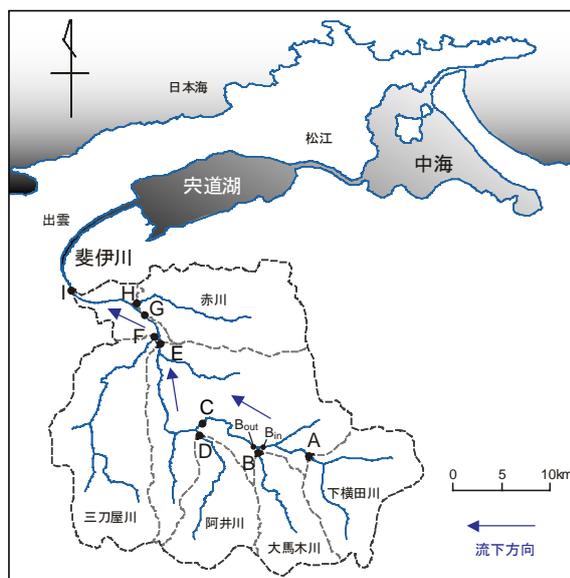
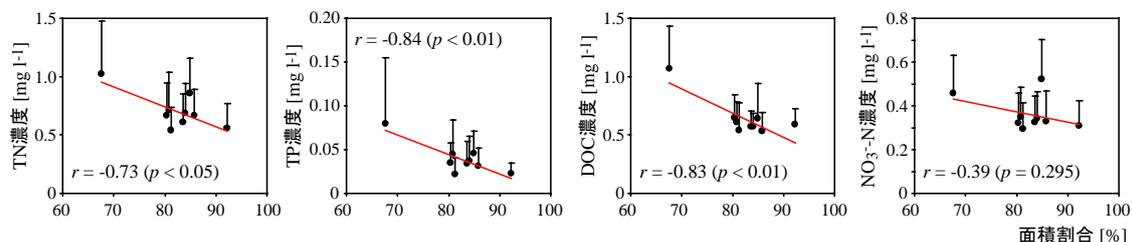


図1 斐伊川流域における水質観測地点



写真1 河川流量の計測の様子

(a) 森林



(b) 農地

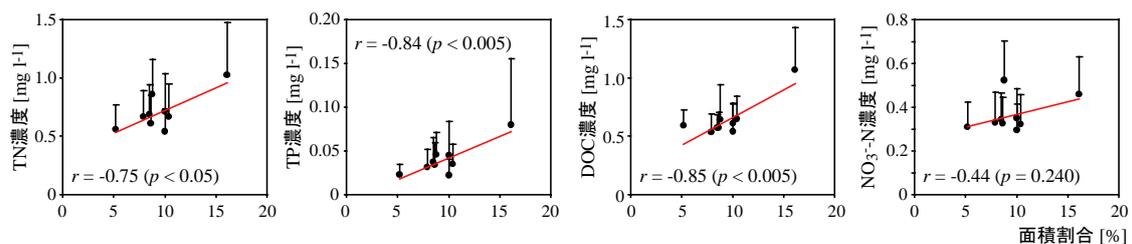


図2 観測期間におけるサブ流域河川のTN, TP, DOC, NO₃⁻-N濃度の平均値と (a) 森林または (b) 農地の面積割合との関係。エラーバーは標準偏差を示す。

B地点の流入前後における斐伊川の水質の変化が、B地点の河川からの汚濁物質によって説明されるか否かを検証するため、B地点の河川流入後の斐伊川(B_{out}地点)の汚濁物質濃度を次式によって算出し、実測の汚濁物質濃度と比較した：

$$C_{cal} = \frac{C_{in}Q_{in} + C_B Q_B}{Q_{in} + Q_B} \quad (2)$$

ここで、 C_{cal} ：B_{out}地点における河川水の汚濁物質の推定濃度[mg l⁻¹]、 C_{in} ：B_{in}地点における汚濁物質の濃度[mg l⁻¹]、 C_B ：B地点における汚濁物質の濃度[mg l⁻¹]、 Q_{in} ：B_{in}地点における河川流量[l s⁻¹]、 Q_B ：B地点における河川流量[l s⁻¹]。なお、 C_{cal} と実測の汚濁物質濃度(C_{ob} [mg l⁻¹])との誤差(Er [%])は次式によって評価された：

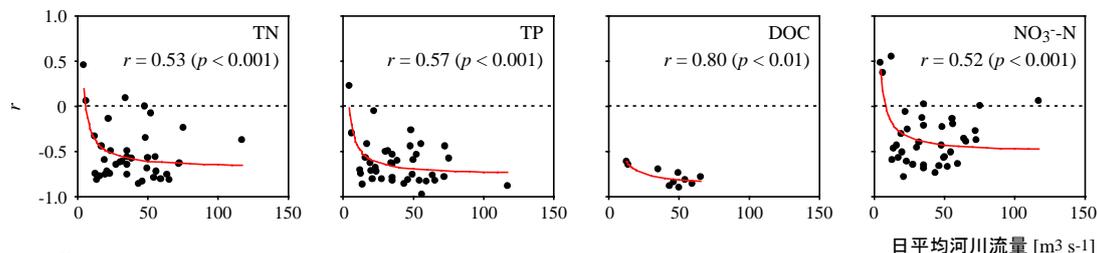
$$Er = \frac{1}{n} \sum \frac{|C_{cal} - C_{ob}|}{C_{ob}} \cdot 100 \quad (3)$$

3. 結果と考察

3.1. 河川水質と土地利用との関係

1992年から2009年までに得られている、9つの観測地点における河川水の汚濁物質(TN, TP, DOC, NO₃⁻-N)濃度のデータ(DOC濃度のデータは2008年から2009年までのもの)を用いて、土地利用と河川水質の関係について解析を行った。その結果、観測期間における河川水のTN,TPおよびDOC濃度の平均値と各サブ流域内に占める森林または農地の面積割合との間には有意な相関関係があった(図2)。森林の面積割合が大きいほど河川水の汚

(a) 森林



(b) 農地

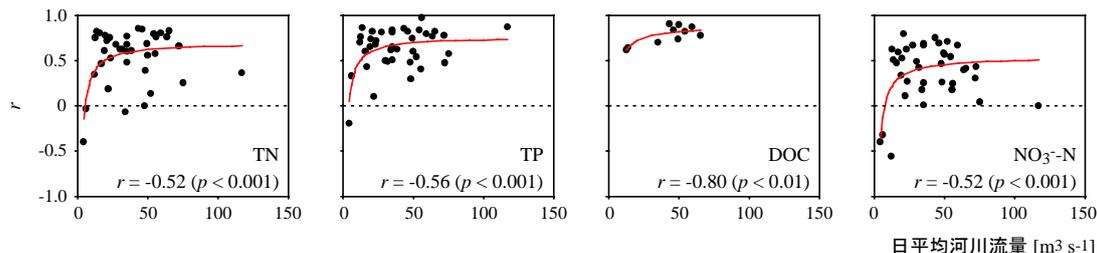
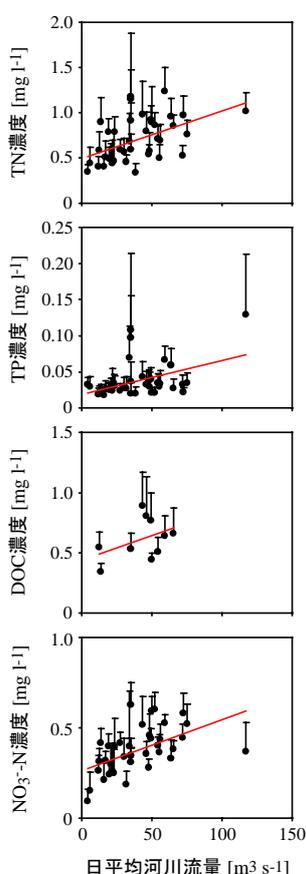


図 3 斐伊川 (I 地点) の河川流量と (a) サブ流域における森林面積割合と河川水の TN, TP, DOC, NO₃⁻-N 濃度との相関係数 (r), または (b) サブ流域における森林面積割合と河川水の TN, TP, DOC, NO₃⁻-N 濃度との相関係数 (r) との関係. 実線は回帰式を示す.



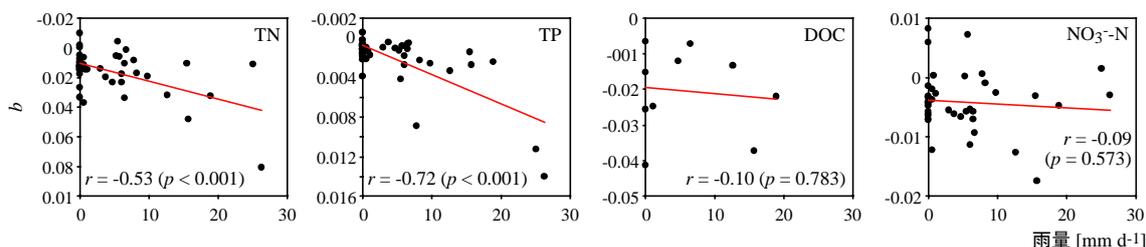
濁物質濃度は低くなる傾向にあった。一方、農地の面積割合が大きいほど河川水の汚濁物質濃度は高くなる傾向にあった。

各観測時における河川水の汚濁物質濃度と土地利用面積割合との相関係数 (r) を算出し、斐伊川 (I 地点) の日平均河川流量との関係を調べた。その結果、河川流量が多いほど、サブ流域における森林の面積割合と汚濁物質濃度との r は負に大きくなった (図 3 (a))。一方、農地の面積割合と汚濁物質濃度との r は、河川流量が多いほど正に大きくなった (図 3 (b))。これらの結果は、降雨が多くなって河川流量が増すと、河川水質はより明確に流域の土地利用を反映することを示していた。斐伊川流域では、河川流量が増加するほど、河川水の TN, TP, DOC, NO₃⁻-N のいずれの濃度も上昇傾向を示す (図 4)。しかしながら、森林の面積割合と河川水の汚濁物質濃度との r は河川流量の増加と共に負に大きくなっていったことから、流域内における森林の存在は出水時における河川水の汚濁物質濃度の上昇を抑える方向に作用すると考えられた。

各観測時における河川水の汚濁物質濃度と各サブ流域における森林または農地の面積割合との関係式 ((1)式) の傾き (b) を

図 4 各観測日における 9 地点の河川水の TN, TP, DOC, NO₃⁻-N 濃度の平均値と斐伊川 (I 地点) の河川流量と関係. 実線は回帰式を示す.

(a) 森林



(b) 農地

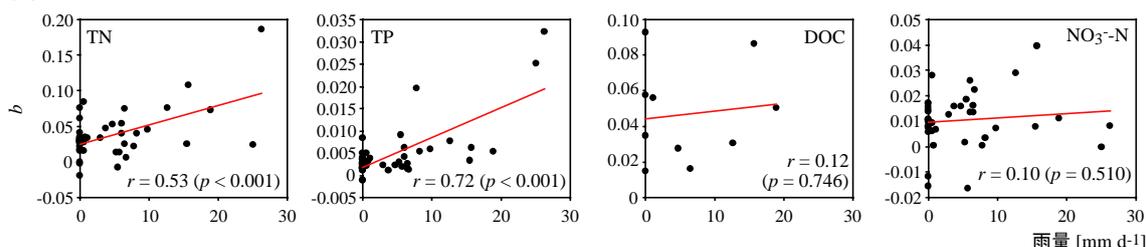


図 5 日降雨量と (a) サブ流域における森林面積割合と河川水の TN, TP, DOC, NO₃⁻-N 濃度との回帰式の傾き (1)式における回帰係数: b), または (b) サブ流域における森林面積割合と河川水の TN, TP, DOC, NO₃⁻-N 濃度との回帰式の傾き (b) との関係。実線は回帰式を示す。

算出し、降雨または河川流量との関係について調べた。その結果、森林、農地ともに、懸濁態を含む水質項目である TN と TP についての b と降雨との間に有意な相関関係が認められた (図 5)。一方、溶存態である DOC, NO₃⁻-N では、 b と降雨との間に有意な相関関係は認められなかった。これは、雨滴による土壌浸食が懸濁態の窒素とリンの発生に深くかかわっていることを示唆する。森林では、降雨が増加すると TN と TP における b は小さくなる傾向にあった (図 5 (a))。一方、農地では、降雨が増加するほど TN, TP における b は大きくなる傾向にあった (図 5 (b))。農地では植生による土壌表面の被覆が小さいので、出水時、雨滴衝撃によって土壌浸食が起こりやすいと考えられる (Peterjohn and Correll, 1984)。したがって、本研究の結果は、農地では出水時に懸濁態の窒素、リンが発生し、河川水の TN, TP 濃度の上昇に寄与していることを示唆する。その一方で、本研究の結果は、森林では植生によって土壌表面が被覆されているので、雨滴衝撃による懸濁態の窒素、リンの発生が農地に比べて抑制されることを示唆する。Ide et al. (2007) は管理の十分に行き届いていないヒノキ人工林では、下層植生が貧弱で土壌表層が露出しているため、出水時に表面侵食が起こりやすく、土砂とともに多量の栄養塩が流出することを示した。また、そのような森林では十分に管理された森林 (管理林) に比べ、年間の浮遊土砂量も多くなることが報告されている (Ide et al., 2009)。したがって、出水時において森林が河川の汚濁物質濃度の上昇を抑制する効果は森林の管理状態に左右されると予想される。本研究の結果は森林の管理状態を考慮していないため、今後、管理林と非管理林において本研究と同様の調査を行い、森林の管理状態の違いが河川水質に及ぼす影響について検討していく必要があるだろう。

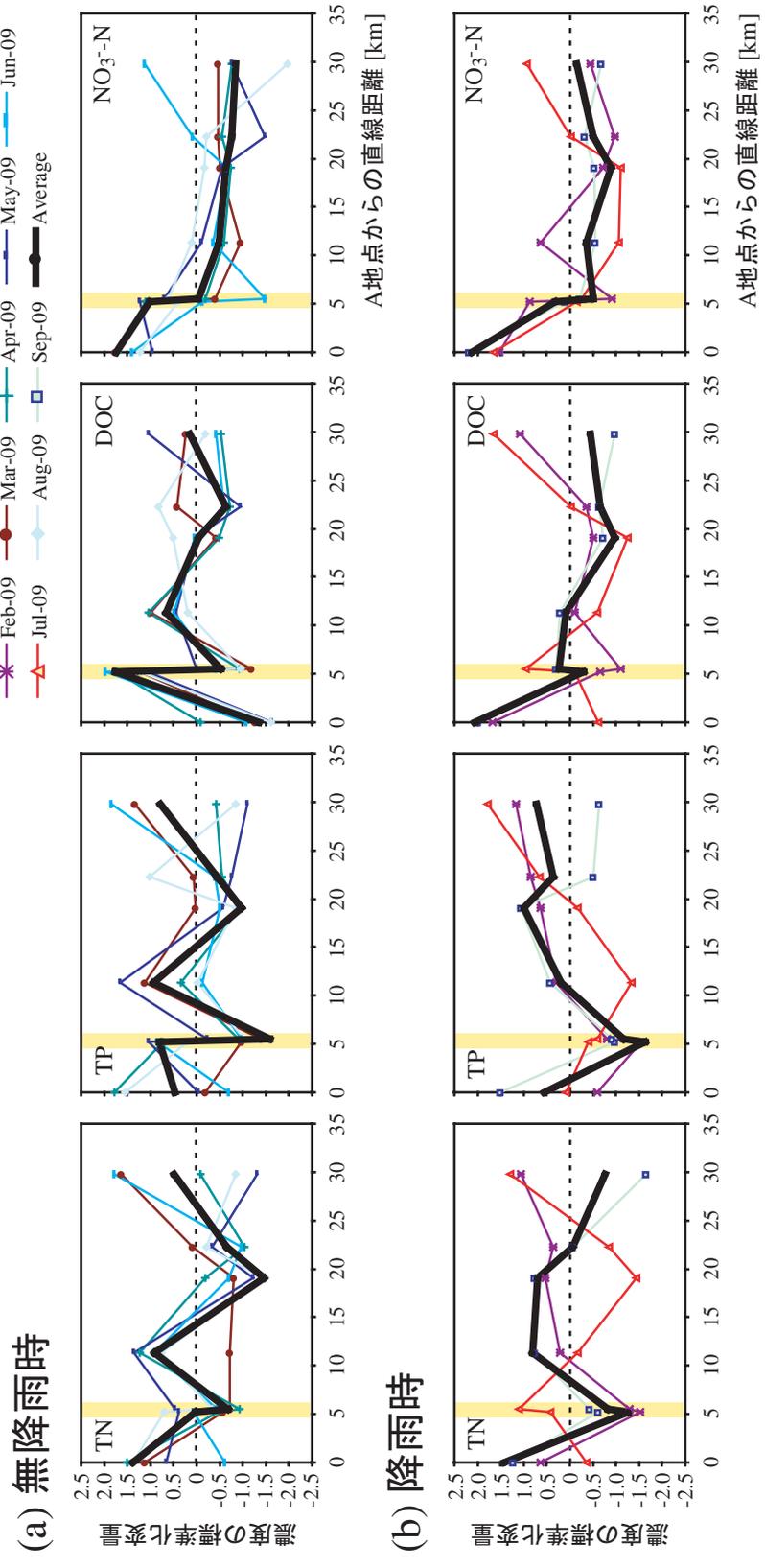


図6 (a) 無降雨時と (b) 降雨時における本流河川（斐伊川）の流下に伴う河川水中TN, TP, DOC, NO_3^- -N濃度の変動。
 縦軸は観測日ごとに正規化した濃度を示す。黒色の太線は平均的な濃度変動を示す。黄色の区間は B_{in} - B_{out} 地点間を示す。

3.2. 流下過程における斐伊川の水質変動

2009年における斐伊川のA, B_{in}, B_{out}, C, E, G, I地点(図1)における汚濁物質濃度のデータを用いて、河川の流下に伴う汚濁物質濃度の変動を調べた。その結果、斐伊川の汚濁物質濃度は項目ごとに、また、観測日ごとに様々に変化していた(図6)。汚濁物質濃度の平均的な相対変化を項目ごとにみると、無降雨時にNO₃⁻-N濃度が減少傾向にある以外は、流下に伴って汚濁物質濃度は上昇したり、減少したりして、一定の傾向を示さなかった。一方、観測地点間によっては、無降雨時と降雨時で上昇傾向と減少傾向が逆転する現象がみられた。これらの結果は河道内における汚濁物質の脱吸着反応や懸濁物質の沈降・掃流過程などの物理化学的過程と微生物による脱窒や河床付着生物膜による栄養塩の吸収などの生物学的過程に起因すると考えられる(Hauer and Lamberti, 2007; Tanio et al., 2008)。また、支流河川の流入が本流河川である斐伊川の汚濁物質濃度に強く影響することで、河川の流下に伴う汚濁物質濃度の変動の、無降雨時と降雨時における違いを引き起こしたと考えられる。

B地点流入前後のB_{in}地点とB_{out}地点における汚濁物質濃度の変化に着目すると、TN, TP, DOCにおいて、無降雨時と降雨時で減少傾向と上昇傾向が逆転していた(図6)。また、NO₃⁻-Nにおいては、降雨時のB_{in}地点とB_{out}地点における減少の程度が無降雨時にくらべ小さかった。B地点のサブ流域では、人口密度と宅地面積が他のサブ流域に比べて小さいため、河川への人為汚染の影響が少なく、平水時は河川水質が清澄で汚濁物質濃度が低い。このことは、無降雨時においてTN, TP, DOC, NO₃⁻-Nのいずれの濃度もB_{in}地点からB_{out}地点にかけて減少傾向にあったことを説明すると考えられる。一方で、B地点のサブ流域は他のサブ流域に比べ農地の面積割合が高い。したがって、降雨時に河川流量が増加するとB地点の河川の汚濁物質濃度が高くなり、B_{in}地点からB_{out}地点にかけての汚濁物質濃度はB地点の河川の流入によって上昇傾向に転じると考えられる。(2)式によって推定されたB_{out}地点の汚濁物質濃度と実測の汚濁物質濃度との誤差が小さかったこと(表2)から、B_{in}地点からB_{out}地点にかけての汚濁物質濃度の変化はB地点の河川の流入によって説明可能である。以上の結果から、出水時においては、支流河川の流域における面源(農地または森林)の面積割合が下流の本流河川の水質形成に大きく影響することが示唆された。

表2 (2)式によって推定されたB_{out}地点のTN, TP, DOC, NO₃⁻-N濃度の誤差[%]

	TN	TP	DOC	NO ₃ ⁻ -N
Er*	7.3	10.7	7.7	7.1

* (3)式による相対誤差

4. 結論

本研究では、森林や農地の土地利用が流域の河川水質や水系の水質にどのように影響するかを検討した。その結果、出水時では、河川流量が大きくなるほど、河川水質に森林や農地の土地利用がより強く反映されることが示された。また、流域における森林の存在は、河川水の汚濁物質濃度の上昇を抑制する方向に作用することが示唆された。森林は植生の被覆によって雨滴衝撃から土壌浸食を防ぎ、懸濁態の窒素やリンの発生を抑制することで、

河川水の TN,TP 濃度の上昇を抑制すると考えられた。

斐伊川において流下に伴う汚濁物質濃度の変化を調べた結果、支流河川の土地利用は下流の本流河川の汚濁物質濃度に影響することが明らかとなった。支流の流域において農地の面積割合が大きい場合は、出水時、支流河川の汚濁物質濃度が上昇し、本流河川の流下に伴う汚濁物質濃度の変動が支流河川の流入によって上昇傾向に転じることが示された。

本研究の結果は、様々な土地利用形態を含んだ流域において森林が、農地と比較した場合、出水時に河川水質が汚濁するのを緩和していることを示唆する。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、「公益信託エスプレック地球環境研究・技術基金」は資金面で大きな助力となりました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- Hauer FR, Lamberti GA (2007) *Methods in Stream Ecology*. Academic Press, 896pp.
- Ide J, Nagafuchi O, Chiwa M, Kume A, Otsuki K, Ogawa S (2007) Effects of discharge level on the load of dissolved and particulate components of stream nitrogen and phosphorus from a small afforested watershed of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *Journal of Forest Research* 12:45-56.
- 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.
- Peterjohn WT, Correll DL (1984) Nutrient Dynamics in an Agricultural Watershed: Observations on the Role of A Riparian Forest Nutrient Dynamics in an Agricultural Watershed: Observations on the Role of A Riparian Forest Nutrient Dynamics in an Agricultural Watershed: Observations on the Role of A Riparian Forest. *Ecology* 65:1466-1475.
- 島根県 (2008) 社会経済情勢の変化と今後の課題. <http://www.pref.shimane.lg.jp/chiikiseisaku/tokuteichiiki/postkaso.html>.
- Tanio Y, Ohte N, Fujimoto M, Sheibley R (2008) Nitrate and phosphate uptake in a temperate forest stream in central Japan In: *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Water Management: Proceedings of the International Conference on Hydrological Changes and Management from Headwaters to the Ocean*. Taylor & Francis Group, London, UK, pp 83-89.
- 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.