

水環境における汚濁機構の究明と保全施策効果に関する研究

(1) 水環境における面源負荷の発現機構とその対策についての研究 (その1)

ーヒノキ人工林からの降雨時栄養塩流出特性ー

研究期間 (平成 12 年度～14 年度)

永淵 修*, 井手淳一郎**, 大槻恭一**

要 旨

水域における環境基準達成の状況を見ると、湖沼の達成率が極端に悪い。また、河川についても AA 類型の達成がなされていない河川が存在する。これらの流域の汚染源は面源であり、今後これら水域の環境基準達成を図るには面源対策が急務である。ここでは、農地、林地における汚濁負荷発生、流出機構解明を行うとともに、負荷量の予測を行い、汚濁削減のための手法の確立を試みた。さらに、水田からの農薬流出モデルを構築し、力丸ダム湖流域で行った水田農薬流出量調査結果を用いて検証を行った。その結果、水田農薬の環境中への流出は畦畔流出と水管理の不備が大きいことが明らかになった。一方、森林からの栄養塩の流出についてはヒノキ人工林の小流域で詳細な水文、水質調査を行い、ヒノキ人工林からの窒素、リンの流出原単位を示すことができた。

[キーワード : 林地, 溪流, 栄養塩, 農地, 農薬, 流出モデル, 定量評価]

1. はじめに

森林は我が国の国土面積の 2/3 を占め、近年、その公益的機能 (洪水緩和、水質浄化など) が注目されている。この公益的機能は、十分な森林管理のもとで発揮されると考えられる。しかし、近年、林業不振等により、間伐などの森林管理は滞り、森林面積の 44% を占める人工林の多くは、林冠が鬱閉し、下層植生が貧弱になる傾向がある。

下層植生の貧弱な森林では表土が露出し、降雨時、表土の流亡が発生しやすい。この傾向はヒノキ人工林で顕著であると言われている (湯川ら, 1995)。これは、ヒノキの葉は分解が早く、しかも葉の形状が小鱗片状であるためリターの流亡量が多く、降雨時、表層土壌を雨滴衝撃から保護するリター層の発達が貧弱なためである。表層土壌には窒素、リンなどの栄養塩が高濃度で存在するため、降雨時における表土流亡に伴い、これらの栄養塩も流失すると考えられる。したがって、下層植生の貧弱なヒノキ人工林は、森林のもつ、いわゆる公益的機能が十分に発揮されず、汚濁物質、すなわち栄養塩の発生源 (ソース) となることが予測される。しかし、既往研究における栄養塩収支の評価では、

森林は栄養塩の吸収源 (シンク) として評価されてきた。これは栄養塩支出の評価法に問題があり、正しく評価されていない可能性がある。

そこで本研究では、下層植生の貧弱なヒノキ人工林において、水質・水文観測を行い、窒素 (T-N)、リン (T-P) の支出の評価法について検討した。

2. 研究方法

対象試験地である御手洗水流域は福岡市の東方約 15km に位置する流域面積 9.5ha の山地小流域であり、流域内の大部分はヒノキ人工林で覆われている。流域末端には量水堰が設置されており、水位については 10 分間隔で測定し、水質については週一回の定期採水を行った。また、降雨時には別途に集中的な連続調査を行った。流域尾根部の林外 2 地点には気象測器が設置されており、気象観測および降雨の水質観測を行った。なお、本研究は、2001 年 8 月 1 日～2002 年 11 月 28 日の観測データに基づいている。

原単位収支の評価については、降雨を収入、溪流からの流出を支出とした。収入については、降雨量重み付け平均濃度に降雨量を乗じて算出した。支出につい

* 福岡県保健環境研究所 (〒818-0135 福岡県太宰府市大字向佐野 39)

** 九州大学大学院農学部 (〒811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町大字津波黒 394)

では、流出負荷量の代表的な評価手法である区間代表法と L-Q 法の 2 通りの方法(武田, 2001)で算出した。区間代表法は既往研究で広く用いられてきたが、降雨時の水質変動が全く考慮されない方法である。一方、L-Q 法は、(1) 水質の季節性が考慮されない、(2) 増水時と減水時に生じる負荷量のヒステリシスが考慮されないなどの短所が報告されているものの(武田, 2001)、降雨時の水質変動を考慮することができる方法である。

3. 結果及び考察

全窒素 (T-N)、全リン (T-P) の原単位収支を表 1 に示す。T-N、T-P のいずれについても、区間代表法による支出は収入を下回り、本試験地は栄養塩のシンクとして評価された。逆に L-Q 法による支出は収入を上回り、本試験地は栄養塩のソースとして評価された。評価手法によって栄養塩収支の評価が異なったが、区間代表法による支出は、多量の栄養塩の流出が観測される降雨時の負荷量が考慮されないため、実際の支出を過小評価していると考えられる。したがって、区間代表法による支出は栄養塩収支の評価には不適切である。L-Q 法による支出を適切とするなら、本試験地は栄養塩のソースとして評価されるが、L-Q 法には研究方法で記したような短所が報告されていることから検討の余地がある。

L-Q 法による支出の妥当性を検討するため、数回の降雨時における連続した (15 分～1 時間間隔) 実測流出負荷量(実測値)と L-Q 式による推定流出負荷量(推定値)を比較した。その結果、高濃度の懸濁態栄養塩 (PTN, PTP) の流出があったピーク流量時に、推定値が実測値を過小評価していたことが示された。この傾向は組成の多くを懸濁態成分が占める T-P で顕著であり、オーダーの異なる過小評価を呈した。以上より、L-Q 法による支出は実際の支出を過小評価していると考えられた。

本研究の結果から、T-N および T-P の支出の評価法に区間代表法を使うと栄養塩収支の評価を見誤る可能性があることが示された。また、区間代表法を用いた既往研究における栄養塩支出は再検討の余地があることが示唆された。一方、支出の評価に L-Q 法を使うと、流出負荷量原単位としては過小評価するが、本

試験地は栄養塩のソースとして評価された。したがって、下層植生の貧弱なヒノキ人工林は栄養塩のソースとなる可能性がある。

表 1 御手洗水流域における原単位 [kg/yr/ha]

	T-N	T-P
① 降雨による収入	8.60	0.116
② 区間代表法による支出	8.35	0.072
③ L-Q法による支出	16.3	0.189
②/①	0.97	0.61
③/①	1.90	1.62
③/②	1.96	2.64

(週一回の定期採水によるデータを基に作成)

4. まとめ

L-Q 式による負荷量の算定は、流量規模の小さい場合 (<17L/sec) は実測負荷量とうまく適合する傾向にあった。しかし、流量規模の大きな降雨時流出における負荷量、特にその最大ピークは正確には算定できなかった。この原因として、週一回のサンプリングを基に導いた L-Q 式ではデータが低流量時に偏り、その結果、懸濁成分を多く含む項目ほど過小評価する傾向がある。これを防ぐためには高頻度調査が必要であるが、降雨時の高頻度調査は、予測しがたい気象条件により限界があるため、高頻度調査と並行して懸濁態成分を考慮したモデルを構築する必要がある。このモデルの構築は今後の課題であるが、森林域からの正確な栄養塩 (T-N、T-P、TOC) 流出負荷量原単位を示すには降雨時の懸濁態栄養塩の動態を正確に算定することが必要である。

5. 行政的意義、貢献

環境基準見直し作業等の負荷量調査に有益な情報を与える。

引用文献

- 湯川典子, 恩田裕一 (1995) ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (I) 散水型浸透計による野外実験. 日林誌 77: 224-231.
- 武田育郎(2001) 水と水質環境の基礎知識. 198pp, オーム社, 東京.

(1) 水環境における面源負荷の発現機構とその対策についての研究(その2) ー林地からのBOD, COD, 全窒素及び全リンの流出負荷ー

研究期間(平成12年度～14年度)

永淵義孝*, 松尾 宏*, 佐々木重行**

要旨

福岡県添田町の県営林内から流出する渓流水の水質及びその流出負荷について1999年から2001年の3年間にわたり検討した。調査流域としたW-1, W-4及びE-4におけるBODの平均濃度は、河川の環境基準AA類型(1 mg/L)をいずれも下回っていた。3流域の渓流水ともBODとCODの間には相関はなかった。調査結果から算出した3流域におけるBODの年間平均流出負荷量は、4.6 - 6.5 kg/ha・年であり、CODは16.9 - 28.5 kg/ha・年であった。一方、T-Nは2.9 - 8.9 kg/ha・年であり、T-Pは0.20 - 0.62 kg/ha・年であった。これらの数値は、降下物から供給される負荷量と比較して、ほぼ同程度かそれより低いと推定された。

〔キーワード: 流出負荷, 有機物, 栄養塩類, 林地, 福岡県〕

1 はじめに

福岡県では平成8年度から北九州市内河川をはじめとして、県内河川を対象に環境基準の類型指定の見直しを計画的に順次実施しており、平成10年度には豊前海流入河川のうち、荏田町、行橋市、築城町、勝山町、犀川町、豊津町、赤村及び添田町に係る流域について見直し作業を行った。

豊前海流入河川の北部地域における見直し過程のなかで、汚濁排出源については面源の寄与する割合が高く、そのほとんどが森林に由来することが明らかとなった。森林による負荷量原単位が負荷量計算に及ぼす影響は大きく、森林に由来する原単位の確定はダム湖や河川水質の将来予測を行う上で重要である。

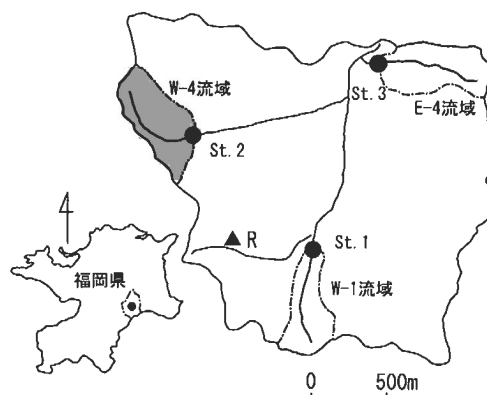
このような観点から、当県における森林からの負荷量原単位等を明らかにすることが急務となっている。

そこで、ここでは森林から流出する渓流水について降水時を除く流況が安定したときに水質調査を行い、森林地帯での渓流水質の実態と負荷量を明らかにした。

2 方法

2・1 調査流域とその概要

福岡県添田町の県営林内にあるW-1, W-4及びE-4を調査流域とした(図1)。その概要を表1に示す。調査流域は、スギとヒノキを主体とした人工林からな



●: 渓流水採取地点, ▲: 降水採取地点

図1 調査地域と試料採取地点

表1 調査流域の概要

流域名	流域面積 (ha)	複層林面積 (ha)	採水点標高 (m)	材積量 (m ³ /ha)	
				1996年	2001年
W-1	15.3	7.2	420	165	208
W-4	23.3	11.9	460	252	269
E-4	21.8	0	380	213	265

り、W-1では、複層林(下木の林齢は15年、上木は45 - 60年程度)が流域面積のほぼ半分である7.2

*福岡県保健環境研究所 (〒818-0135 福岡県太宰府市大字向佐野39)

**福岡県森林林業技術センター (〒839-0827 福岡県久留米市山本町豊田1438-2)

ha を、また、W-4では複層林（下木の林齢は 15 年、上木は 35 - 45 年程）が流域面積の半分である 11.9 ha を占めている。一方、E-4は、W-1及び W-4とは異なり、単層林（林齢は 20 - 30 年）である。また、調査流域の地質は、すべて結晶片岩である¹⁾。

2・2 調査期間

1999 年 1 月 - 2001 年 12 月

2・3 採水方法

渓流水の採取は、図 1 に示す各流域の流末にある量水ダム（水位計が設置されている）の St. 1 - St. 3 で原則として毎月の月末に実施した。

降水については、図 1 に示す R において、30 cm ロートを用いて 20 L のポリタンクに貯留した。

2・4 調査項目及び測定方法

調査項目及び測定方法を表 2 に示す。なお、 PO_4^{3-} -P、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 及び Mg^{2+} の測定にあたっては、試水を 0.45 μm のメンブランフィルターでろ過した。

2・5 流量及び流出負荷量等の算定方法

流量については自記水位計の水位から計算により求めた。また、BOD、COD、T-N 及び T-P の流出負荷量は次の方法により算出した。まず、採水日の濃度（C mg/L）と日流量（Q m^3/day ）とから日負荷量を計算し L - Q 回帰式を求めた。この L - Q 式に日流量を代入して月毎の負荷量を算出し、月毎の値を合計して年間の総流出負荷量とした。年間の総流出負荷量を流域面積で除して年間 ha あたりの数値を算出した。

降水の汚濁負荷量は降水量に濃度を乗じて求めた。なお、この調査では、乾性降水物と降水時の湿性降水物の総量（Bulk）を測定したことになるので、以下、降水の汚濁負荷量を降水物負荷量とする。

材積量の増加分は、表 1 に示す 2001 年から 1996 年の数値を差し引いて求めた。

3 結果及び考察

3・1 渓流水の水質

表2 調査項目及び測定方法

項目	方法
pH	ガラス電極法 ²⁾
電気伝導率(EC)	電気伝導率計 ²⁾
浮遊物質(SS)	ガラス繊維ろ紙法 ²⁾
生物化学的酸素消費量(BOD)	隔膜電極法 ²⁾
化学的酸素消費量(COD)	100℃における過マンガン酸カリウム消費量 ²⁾
全窒素(T-N)	アルカリ性過硫酸カリウム分解-紫外線吸収法 ²⁾
全リン(T-P)	過硫酸カリウム分解-モリブデン青吸収法 ³⁾
リン酸性リン(PO_4^{3-} -P)	モリブデン青吸収法 ³⁾
塩素イオン(Cl^-)	イオンクロマトグラフ法 ²⁾
硝酸イオン(NO_3^-)	イオンクロマトグラフ法 ²⁾
硫酸イオン(SO_4^{2-})	イオンクロマトグラフ法 ²⁾
ナトリウムイオン(Na^+)	イオンクロマトグラフ法 ²⁾
カリウムイオン(K^+)	イオンクロマトグラフ法 ²⁾
カルシウムイオン(Ca^{2+})	イオンクロマトグラフ法
マグネシウムイオン(Mg^{2+})	イオンクロマトグラフ法

W-1、W-4 及び E-4 において調査した水質項目の平均値及び標準偏差を表 3 に示す。

3・1・1 pH、EC、SS 及び無機イオン類

pH 及び EC については、3 流域間で著しい差はみられなかった。SS については、W-4 が幾分高い値を示しており、流域間で幾分違いがみられた。無機イオン類では、W-4 及び E-4 の NO_3^- 濃度が W-1 と比較するとそれぞれ 3 倍 から約 4 倍 ほど高かった。一方、 Ca^{2+} では流域間で違いがみられたが、 Mg^{2+} についてはほぼ同じ値を示した。

3・1・2 BOD 及び COD

1) BOD 及び COD 濃度

各流域での BOD の平均濃度は 0.4 - 0.5 mg/L であり、河川の環境基準 AA 類型（1 mg/L）をいずれも下回っていた。一方、各流域の COD の平均濃度は、それぞれ 1.1、1.8 及び 1.6 mg/L であり、流域間では W-4 がいくらか高い値を示した。

2) BOD と COD との関係

福岡県森林林業技術センターには、W-1、W-4 及び E-4 の渓流水に係る COD のデータが蓄積されている。各流域において BOD と COD とに相関があれば COD からそれぞれの流域での過去における BOD の推定が可能である。このため、BOD と COD との関係につい

表3 各水質項目の平均値及び標準偏差

流域名		pH	EC	SS	BOD	COD	T-N	T-P	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
W-1	平均値	7.4	8.0	1.4	0.4	1.1	0.19	0.014	3.4	0.6	4.3	4.4	0.6	8.0	1.3
	標準偏差	0.2	0.8	1.0	0.2	0.5	0.08	0.011	0.6	0.1	0.5	0.8	0.7	1.5	0.2
W-4	平均値	7.4	6.5	4.4	0.4	1.8	0.49	0.039	3.2	1.8	4.3	5.0	0.6	3.6	1.3
	標準偏差	0.1	0.4	6.4	0.2	1.0	0.14	0.013	0.3	0.5	0.6	0.7	0.1	0.7	0.2
E-4	平均値	7.4	7.9	2.5	0.5	1.6	0.58	0.025	4.1	2.2	5.8	6.2	0.6	5.4	1.2
	標準偏差	0.1	0.5	2.3	0.3	0.7	0.14	0.011	0.3	0.5	0.5	0.9	0.1	0.9	0.2

注) pHおよびEC以外の単位:mg/L, ECの単位:mS/m, pH, EC, SS, T-N, T-P及び無機イオン類:n=33, BOD及びCOD:n=31

て検討した。W-1, W-4 及び E-4での両者の相関係数はそれぞれ 0.037, 0.300 及び 0.148であり, 3流域ともに相関はみられなかった。

3・1・3 窒素及びリン

1) 窒素

W-1, W-4及び E-4の平均窒素濃度は, それぞれ 0.19, 0.49 及び 0.58 mg/L であり, 流域間で大きな違いがみられた。流域間での窒素濃度の違いを明らかにするため, 林相の形態が同様の W-1及び W-4について以下のことを検討した。表1から材積量の増加分を求めたところ, W-1は 43 m³/ha, W-4は 17 m³/ha であり, W-1の材積量の増加は W-4に比べて大きかった。生長の旺盛な林分では植物に吸収・蓄積される窒素量が多いと言われている⁴⁾。また, 広瀬ら⁵⁾は, 流出する渓流水の NO₃-N 濃度は, 同じ地質であれば老齢林より若齢林で低い傾向がみられると報告している。これらのことから, W-1で渓流水の窒素濃度が低いのは, 樹木の生長に伴う窒素吸収の影響が大きいのではないかと推察される。

2) リン

3 流域におけるリンの平均濃度は, それぞれ 0.014, 0.039 及び 0.025 mg/L であり, 窒素と同様に流域間でその濃度に違いがみられた。この原因については, 今回の調査では明らかにできなかった。

3・2 降水量及び流出量

各流域における 1999 年 - 2001 年の降水量, 流出量及び流出率を表 4 に示す。各流域の 1999 年及び 2001 年の降水量は, ほぼ同程度であったが, 2000 年は両年に比較して少なかった。一方, W-1及び E-4の流出率は 55.5 - 66.8 %であったが, W-4では 32.7 - 80.8 %であり, 大きく変動した。W-4で大きく変動した要因については今回の調査では明らかにできなかった。

表4 降水量, 流出量及び流出率

流域名	年	降水量 (mm)	流出量 (mm)	流出率 (%)
W-1	1999	2609	1625	62.3
	2000	2016	1119	55.5
	2001	2644	1766	66.8
W-4	1999	2618	2115	80.8
	2000	1957	640	32.7
	2001	2534	1273	50.2
E-4	1999	2600	-	-
	2000	1846	1069	57.9
	2001	2587	1649	63.7

3・3 負荷量

3・3・1 降下物負荷量

3 年間の降下物負荷量の平均値及び標準偏差を求め表 5 に示す。COD は 28.8±2.4 kg/ha・年, T-N は 13.4±2.9 kg/ha・年, T-P は 0.5±0.1 kg/ha・年であった。

表5 降下物負荷量の平均値及び標準偏差

調査地点	COD	T-N	T-P
R	28.8±2.4	13.4±2.9	0.5±0.1

単位: kg/ha・年

3・3・2 渓流水の流出負荷量

2・5 項に示す方法により, 各流域における日流量 (Q) と各水質項目の負荷量 (L) との関係を示す回帰式 ($L = a \cdot Q^b$) を求めた。その結果を表 6 に示す。

表6 各水質項目回帰式の定数と相関係数

流域名	$L = a \cdot Q^b$		
	a	b	r
W-1	BOD(n=28)	0.520	0.958
	COD(n=29)	0.484	1.117
	T-N(n=31)	0.149	1.037
	T-P(n=31)	0.005	1.143
W-4	BOD(n=28)	0.336	1.002
	COD(n=29)	0.476	1.197
	T-N(n=31)	0.313	1.067
	T-P(n=31)	0.059	0.924
E-4	BOD(n=25)	0.131	1.175
	COD(n=27)	0.951	1.071
	T-N(n=29)	0.294	1.110
	T-P(n=29)	0.0007	1.548

注) L:kg/日, Q:m³/日, n:データ数, r:相関係数

さらに, これらの回帰式に日流量を代入して各流域での BOD, COD, T-N 及び T-P について年間の ha あたりの流出負荷量を調査年毎に算出した。その結果を表 7 に示す。W-1, W-4及び E-4における BOD の年間平均流出負荷量は, 4.6 - 6.5 kg/ha・年であり, また, COD の年間平均流出負荷量は, 16.9 - 28.5 kg/ha・年であった。一方, T-N の年間平均流出負荷量は, 2.9 - 8.9 kg/ha・年であり, また, T-P の年間平均流出負荷量は, 0.20 - 0.62 kg/ha・年であった。年別及び流域別の年間の流出負荷量に変動がみられるが, この変動については, 前者 (年別) が流出率の高低, 後者 (流域別) では流域間での水質濃度の相違がその要因と推察される。

今回の調査で得られた BOD, COD, T-N 及び T-P

の年間の平均流出負荷量は、降下物から供給される負荷量（表5）と比較して、ほぼ同程度かそれより低いと推定された。

4 まとめ

- 1) 各流域の BOD の平均濃度は、0.4 - 0.5 mg/L であり、河川的环境基準 AA 類型（1 mg/L）をいずれも下回っていた。
- 2) 3 流域の渓流水とも BOD と COD との間に相関はなかった。
- 3) W-1で渓流水の窒素濃度が低いのは、樹木の生長に伴う窒素吸収の影響が大きいのではないかと推察された。
- 4) BOD の年間平均流出負荷量は、4.6 - 6.5 kg/ha・年であり、COD の年間平均流出負荷量は、16.9 - 28.5kg/ha・年であった。
- 5) T-N の年間平均流出負荷量は、2.9 - 8.9 kg/ha・年であり、T-P の年間平均流出負荷量は、0.20 - 0.62 kg/ha・年であった。
- 6) BOD, COD, T-N 及び T-P の年間平均流出負荷量は、降下物から供給される負荷量と比較して、ほぼ同程度かそれより低いと推定された。

5 行政的意義、貢献

福岡県における環境基準類型指定見直し作業等に係

る負荷量調査に有益な情報を与える。

文 献

- 1) 佐々木重行ほか：降水と渓流水の成分に関する研究，第38号，福岡県林業試験場（1991）。
- 2) 日本規格協会：JIS K 0102工場排水試験方法，東京（1993）。
- 3) 日本気象協会：海洋観測指針（1978）。
- 4) 加藤正樹ほか：森林と渓流水質-その形成メカニズムと実態-，林業科学技術振興所（1999）。
- 5) 広瀬 顕ほか：森林流出水についての広域的考察（I），京大演報60，162-173（1988）。

表7 BOD, COD, T-N 及び T-P の流出負荷量 (kg/ha・年)

	BOD			COD			T-N			T-P		
	W-1	W-4	E-4	W-1	W-4	E-4	W-1	W-4	E-4	W-1	W-4	E-4
1999年	6.2	7.2	-	19.0	48.4	-	3.2	11.1	-	0.29	0.69	-
2000年	4.4	2.2	4.7	11.8	10.7	16.0	2.1	3.1	6.7	0.16	0.68	0.37
2001年	6.8	4.3	8.2	20.0	26.3	25.9	3.4	6.4	11.0	0.15	0.43	0.87
平均値	5.8	4.6	6.5	16.9	28.5	20.9	2.9	6.9	8.9	0.20	0.60	0.62