

原著論文

福岡県における林地からのBOD, COD, 全窒素及び全リンの流出負荷

永淵義孝*, 松尾 宏*, 佐々木重行**

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。調査対象とした 3 流域 (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 と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、荊田町、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。

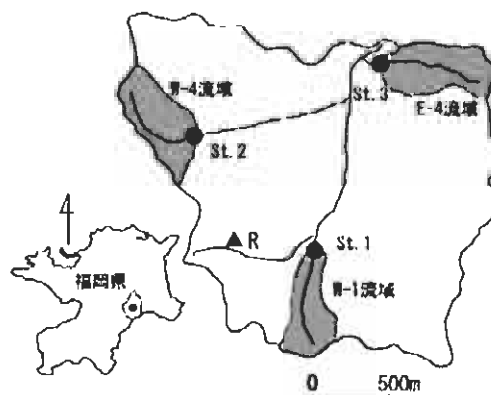
このような観点から、当県における森林からの負荷量原単位等を明らかにすることが急務となっている。

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り、W-1 では、複層林 (下木の林齢は 15 年、上



●: 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

木は45 - 60 年程度) が流域面積のほぼ半分である 7.2 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

* 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)

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、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 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 1 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、乾性降水物と降雨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

W-1、W-4 及び E-4 において調査した水質項目の平

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($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)	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

均及び標準偏差を表 3 に、また、BOD、COD、T-N 及び T-P の 1999 年 1 月から 2001 年 12 月までの推移を図 2 に示す。

3・1・1 pH、EC、SS 及び無機イオン類

3 流域の pH 及び EC については、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る傾向にあった。

無機イオン類では、 NO_3^- 濃度が W-1、W-4 及び E-4 の順で高くなっており、W-4 及び E-4 の濃度は 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+} 及び Mg^{2+} については、前者では、流域間での違いがみられたが、後者はほぼ同じ値を示した。 Ca^{2+} 及び Mg^{2+} は、岩石起源の元素で流出水の濃度は地質の影響が大きいと考えられている⁴⁾。いずれの流域とも地質が結晶片岩であるのに対して流域間で Ca^{2+} に差がみられるのは、何らかの他の要因が作用しているのではないかと推測される。

3・1・2 BOD 及び COD

1) BOD 濃度

各流域における BOD の推移から、調査期間中に E-4 で環境基準の AA 類型（BOD：1 mg/L）を超える

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

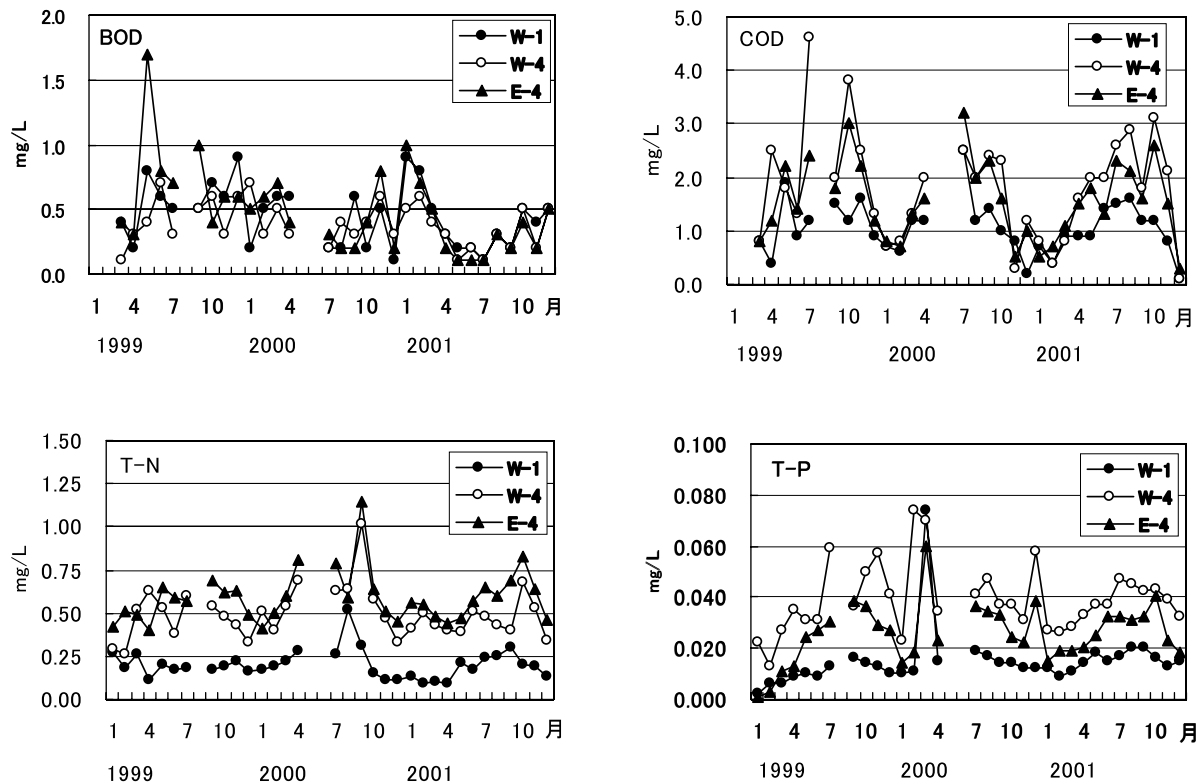


図2 BOD, COD, T-N 及び T-P の推移

濃度 (1.7 mg/L) が 1 回だけ出現した。しかし、BOD の平均濃度は 0.4 - 0.5 mg/L で、河川的环境基準 AA 類型 (1 mg/L) をいずれも下回っており、その水質は非常に良好であった。

2) COD 濃度

W-1, W-4 及び E-4 における COD の推移をみると、各流域とも、夏季に COD 濃度が高くなる傾向がみられた (図2)。また、3 流域の平均 COD 濃度は、それぞれ 1.1, 1.8 及び 1.6 mg/L であり、各流域間では W-4 がいくらか高い値を示した。

3) 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 との関係について検討した。一例として W-1 における両者の関係を図 3 に示す。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。また、図 2 に示す調査流域の BOD と COD との濃度推移パターンをみると明らかに異なっていた。金子⁵⁾は調査した渓流水において BOD と COD とで相関が認められない理

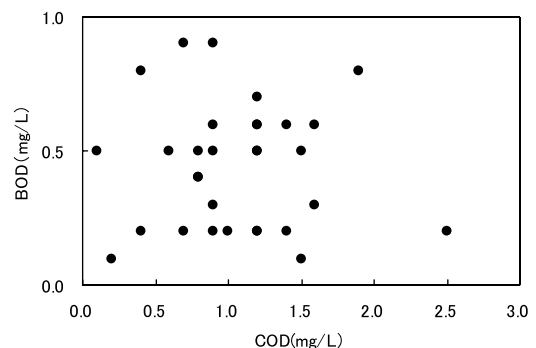


図3 BOD と COD との関係 (W-1)

由として、微生物が利用する有機物と化学的に酸化されやすい有機物とは別物であり、有機物の濃度変動パターンも異なると推定されるとしている。

3・1・3 窒素及びリン

1) 窒素

各流域の T-N 濃度は、いずれも夏季に高く、冬季に低くなる傾向で推移している (図 2)。一方、W-1, W-4 及び E-4 の平均濃度は、それぞれ 0.19, 0.49 及び 0.58 mg/L であった。それぞれの濃度は W-1, W-4 及び E-4 の順で高くなっており、流域間で大きな違いがみられた (表 3)。また、表 3 の NO₃濃度

を硝酸性窒素 (NO₃-N) 濃度に換算すると、W-1 では T-N の約 74 %, W-4 については約 84 %, E-4 では 86 %が NO₃-Nであり、T-N の大部分は NO₃-Nであった。次に、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。すなわち、表 1 の1996 年及び 2001 年の材積量からその増加分を求めたところ、W-1については 43 m³/ha、W-4では 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報告されている⁶⁾。また、広瀬ら⁷⁾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

各流域での T-P 濃度の推移パターンは、2000年の2月 (W-4だけ) 及び3月のデータを除くと全般的に夏季に高くなる傾向がみられる (図 2)。また、3 流域での T-P 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 (表 2)。最低値を示した流域は、窒素と同様に W-1であったが最高値を示した流域は、窒素の場合とは異なり W-4であった。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。

なお、T-P の構成成分をみると、溶存性の PO₄-P は W-1及び W-4では平均 80 %を、また、E-4については平均 70 %を占めていた。

3・2 降水量、流出量及び流出率

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。当該調査地域の平均降水量は、約 2350 mm と報告されている⁸⁾。各流域の 1999 年及び 2001 年の降水量は、前述の平均降水量の 108 - 111 % であり、多雨の傾向にあった。一方、

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

2000 年の降水量は、平均降水量の 79 - 86 % 程度であり、少雨傾向にあった。

W-1 及び W-4 の流出率は55.5 - 66.8 % であったが、W-4では32.7 - 80.8 % にあり、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。

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調査結果から、平均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。一方、他地域で測定された報告例⁹⁾をみると COD : 17.2 - 86.4 kg/ha・年、T-N : 6.3 - 19.3 kg/ha・年、T-P : 0.17 - 2.61 kg/ha・年にあり、報告によっては調査手法等が異なる場合も考えられるので単純には比較できないが、今回の調査で得られた降下物負荷量は、報告例の数値の範囲内であった。

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。その一例を W-1における BOD について図 4 に示す。

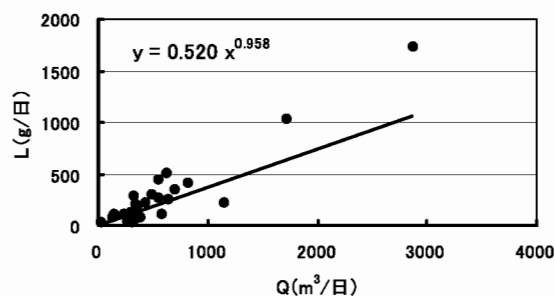


図4 BOD の L - Q 曲線 (W-1)

他の各水質項目についても同様に回帰式の定数と相関係数を求めた。各水質項目回帰式の定数と相関係数をまとめて表 6 に示す。各流域のそれぞれの水質項目における L と Q との間には t 検定の結果から、1 % の危険率で有意に相関のあることが分かった。

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	0.812
	COD(n=29)	0.484	1.117	0.877
	T-N(n=31)	0.149	1.037	0.907
	T-P(n=31)	0.005	1.143	0.915
W-4	BOD(n=28)	0.336	1.002	0.818
	COD(n=29)	0.476	1.197	0.824
	T-N(n=31)	0.313	1.067	0.942
	T-P(n=31)	0.059	0.924	0.882
E-4	BOD(n=25)	0.131	1.175	0.869
	COD(n=27)	0.951	1.071	0.890
	T-N(n=29)	0.294	1.110	0.989
	T-P(n=29)	0.0007	1.548	0.942

注) L:kg/日, Q:m³/日, n:データ数, r:相関係数

次に、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 1999 - 2001 年の調査年毎に算出した。その結果を表 7 に示す。なお、1999 年の E-4 では水位計の故障により日流出量のデータ収集が長期間にわたり不可能となった。このため、E-4 における同年の流出負荷量は算定しなかった。

表 7 から明らかなように、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。

年別あるいは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）が降水の流出率の高低、後者（流域別）では流域間での水質濃度の相違がその一つの要因ではないかと推察される。

COD 等に関わる森林からの流出負荷量については、多くの報告がある。例えば、流域別下水道整備計画調

査指針と解説⁹⁾での数値は COD が 3.9 - 154 kg/ha・年、T-N が 0.3 - 12.5 kg/ha・年、T-P では 0.01 - 1.31 kg/ha・年にある。今回の調査結果（BOD を除く）は、流域別下水道整備計画調査指針に記載された数値の範囲内にあった。

また、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、表 5 に示す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。

以上のように福岡県の森林から流出する BOD, COD, T-N 及び T-P の流出負荷量をある程度明らかにすることができた。しかし、表 7 に示すように得られた流出負荷量の数値は流況の安定したときに調査を行って得られた結果であり、今後、降雨時の調査を含めて基礎的な資料の蓄積が必要であると考えられる。

4 まとめ

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、その結果を解析したところ以下のことが明らかとなった。

- 1) 各流域の平均 BOD 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。
- 2) BOD 及び COD の推移パターンをみると、両者は異なっていると推測され、特に COD は夏季において高くなる傾向にあった。
- 3) 3 流域の渓流水とも BOD と COD との間には相関はなかった。
- 4) T-N の成分としては、NO₃-N が、また、T-P では PO₄-P がそれぞれ 70% 以上を占めることが分かった。
- 5) 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。
- 6) 各流域の 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

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

負荷量は、16.9 - 28.5 kg/ha・年であった。

- 7) 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。
- 8) 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と比較して、ほぼ同程度かそれより低いと推定された。

文 献

- 1) 佐々木重行ほか：降水と溪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) 小林 純：日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究，48，63 - 106（1961）。
- 5) 金子真司：調査地域の溪流水質の解明，湖沼での

有機物の動態解析手法の開発に関する研究，10 - 18，農林水産省農林水産技術会事務局（2000）。

- 6) 加藤正樹ほか：森林と溪流水質-その形成メカニズムと実態-，林業科学技術振興所（1999）。
- 7) 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）。
- 8) 竹下敬司ほか：地形による福岡県周辺の年降水量分布の推定，福岡県林試時報，18，1 - 20（1966）。
- 9) 建設省都市局下水道監修：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，日本下水道協会 p66，p64（1999）。

Runoff Loads of BOD, COD, Nitrogen and Phosphorus from Forest Areas in Fukuoka Prefecture

Yoshitaka NAGAFUCHI *, Hiroshi MATSUO * and Shigeyuki SASAKI **

*Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences **

*and Fukuoka Forest Research and Extension Center ***

*39 Mukaizano, Dazaifu, Fukuoka 818-0135, Japan **

*1438-2 Yamamoto-machi, Kurume, Fukuoka 839-0827, Japan ***

An investigation on water quality of mountain stream was conducted in three small forest watersheds (W-1, W-4 and E-4) located in Fukuoka prefecture during 1999 - 2001. Water quality and runoff loads of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (T-N) and total phosphorus (T-P) were estimated. BOD concentrations of W-1, W-4 and E-4 were below environmental standard value (1 mg/L) of the water body. Among organic pollution indicators, there was no close correlation between BOD and COD. The mean annual runoff loads of BOD, COD, T-N and T-P from three small forest watersheds were estimated to be in the range of 4.6 - 6.5 kg/ha, 16.9 - 28.5 kg/ha, 2.9 - 8.9 kg/ha and 0.20 - 0.62 kg/ha, respectively. It was estimated that runoff loads of COD, T-N and T-P from forest areas were less than or almost comparable to that of COD, T-N and T-P from the deposition.

[Key words : Runoff loads, Organic matter, Nutritious salts, Forest areas, Fukuoka prefecture]