特集：有明海・八代海の再生 Feature: Rehabilitation of the Ariake Sea and the Yatsushiro Sea

総説 REVIEW

森林地からの水・土砂・栄養塩の流出と森林管理

小川 滋*

九州大学大学院農学研究科 〒811-2415 糟屋郡篠栗町津波黒394

Shigeru OGAWA: Runoff of rainwater, sediment, and nutrient from forest areas with reference to forest management. *Ecol. Civil Eng.* 8(1), 51-59, 2005

Faculty of Agriculture, Kyushu University, 394 Tsubakuro, Sasaguri, Fukuoka, 811-2415 Japan

Abstract: The forest watersheds are located in the upper reaches of the basins and water source area draining to the Ariake-Yatsusiro Seas, and the forest area functions as a rainfall catchment area. Rainwater, sediment and nutrient flow out of the forest area into the middle basin and then to the bottom basin. The water source area has a very local characteristic and also the nature of the rainfall-runoff varies over a wide range. Data taken from each source area all the way to the bottom basin are necessary for an evaluation of the influence of the forest area. However, there are few such observational data available, although data of observational values of “the amount per unit area” are necessary for the individual basins. Thus general runoff characteristics from the forest area cannot be explained. In this paper, first, the general water balance in the forest area was discussed, and second, sediment discharge from the forest area was shown to be within the range of normal geological erosion. The runoff of nutrient from the forest area was lower by one-order than nutrient (Total-Nitrogen (T-N) and Total-Phosphorus (T-P)) flowing into the Ariake-Yatsusiro Seas. But, the T-N from the abandoned Hinoki (*Chamaecyparis Obtusa* Endl.) forest was estimated to be the same order of T-N flowing into the Ariake-Yatsusiro Seas. Accurate measurement of the nutrient during rainfall and flooding, from the upper to the down reaches of rivers, are not presently being undertaken. For this reason, an accurate assessment of the runoff of rainwater, sediment and nutrient from the forest area isn't clear. It is noted that the conservation of the soil layer is the most important for forest management.

Key words: Ariake-Yatsusiro Seas, forest watershed, rainwater, sediment, nutrient

はじめに

有明海・八代海に流入する河川流域は、一級河川7流域、2級河川104流域である。本流域において森林域の多くは、水源地域として最上流部に位置し、中流域、下流域の人間活動の自然制約的な要因ともなっているの

で、森林域における水循環についての十分な理解の上で生産、消費、廃棄等の活動を行わねばならない。本流域での森林集水域は、中・下流域へ水・土砂・栄養塩などを排出している。森林集水域は、最上流部にいくに従って、流路は毛細血管のように分岐している。また、これらの毛細流路に対応する小流域の水源域は、きわめて局所的な特性を有しているのが普通であり、降雨一流出の特性の差異が著しい。そのため、流域全体に及ぼす森林集水域

の影響を評価するには、個別の変動幅の大きい小流域の特性が時間、空間的に平均化するスケールでのデータが必要とされる。そのためには、流域規模で、セル（0次谷）からスケールアップする流出データが必要とされるが、現在のところ、このような視点で、流域全体をデータベース化できる観測資料はない。

そこで、森林地からの水・土砂・栄養塩の流出の平均的な実態を把握するために、年単位の資料として考察する。また、森林は、長期的な管理が必要であることから、年単位の変動の解析も必要とされる。

ここでは、日本における森林地の水循環に関する現在の理解について述べ、次に現在利用可能な森林流域の観測資料をもとに、森林地と有明海・八代海との連鎖系を視点において、森林上流域における水・土砂・栄養塩の流出特性を述べる。また、森林流域から中・下流域へ、あるいは有明海・八代海への流出、流入を考える場合の基本的な森林流域の特性を述べる。しかし、森林地における観測データがない場合が多く、森林地からの一般的な流出特性として説明したところも多い。そのため、有明海・八代海流域に特定した目的は十分に達していない点があることをあらかじめお断りしておきたい。

森林地の水循環

森林は、生物の生存にとって非常に良好な環境を形成している。森林生態系として生物界の物質循環がうまく行われているからである。森林は、太陽熱による蒸散によって地圏から大気圏への水循環を行うとともに、有機物の分解物と無機物の混合した森林土壌を形成することによって、物質循環の安定的な状態を形成している。蒸散は、特に熱環境への影響として気象現象、あるいは広域的な気候変化にまで大きく関係する。森林土壌は、雨水が河川へ流出する経路やその水量、水質を決定し、洪水、渇水、水源かん養、水質形成に大きな影響を与えている。そのため、この森林土壌を大きく変化させるような森林の変化は、直接、水循環に影響を与えることになる。

近年では、第2次世界大戦と敗戦後の復興期で、森林資源は略奪され、昭和30年以前では、都市近郊や集落周辺のハゲ山は数多くあり、洪水や土砂災害は頻繁に起こっていた。西日本に多くみられたハゲ山に緑が戻ったのは、化学肥料への転換、石油エネルギーへの転換、外材の輸入、皆伐面積の減少などによる森林資源への圧力が少なくなったこと30~40年あまりと考えてよい（例え

ば、鈴木2002）。

この森林資源代替物への転換による日本山地の森林化によって、表層崩壊や表面浸食は減少し、洪水緩和の機能もよくなってきた。しかし、ここには、自国の森林資源の循環的利用を行えない日本林業の問題と同時に海外の森林資源を利用するという深刻な問題があり、植物資源の輸入は、水の輸入であるといういわゆるバーチャル・ウォーターの問題でもある。森林地は、水源涵養、洪水緩和、水質保全の機能があるといわれるが、この機能の理解は、そう単純ではない。実際の観測データ、解析結果をもとに理解しなければならない。

森林地からの水・土砂流出

森林地からの水流出

森林伐採による年流出量の増加については、森林（広葉樹林）を皆伐し放置した場合、初年度で無処理推定流出量に対して65%の流量増加を、23年後の再度の伐採でも40%の増加を示した（Swank 1987）。また、樹種、及び植生被覆率による年流出量の変化について世界の森林水文試験地の試験結果をもとにまとめた植生の減少と年流出量の増加との関係（Fig. 1）によると、植生の減少は、年流出量の直線的な関係として示されている（Bosch & Hewlett 1982）。また、針葉樹の減少が広葉樹の減少より流出量の増加が大きいことを示している。さらに、Bosch & Hewlett（1982）によると、降水量が増加すれば蒸発散量も増加することも示されており、森林の伐採に伴う流出量の増加は、年降水量の増加とともに増える。

次に、日本国内の森林と流出の関係について、北海道から沖縄までの森林流出試験地（16試験地、流域面積0.4 ha~1,900 ha）の観測結果に基づいて、総括的なまとめが行われている（林野庁2001）。

この調査結果として、Fig. 2に流出率と年降水量の関係を示す。Fig. 2によると、年降水量とともに流出率は増加しており、森林の伐採、山火事などで変化のあった森林地（変化流域）では、降水量と流出率の関係はバラツキが大きい。自然流域（森林そのままの状態）では、降水量の増加とともに流出率が増え、年降水量2500 mm以上では、ほぼ一定となる。また、その流出率の範囲は、年損失量（年消失量）として、500 mm~1000 mmである。温暖湿潤帯である日本では、一般的には、降水量が多ければ、流出量も大きいと考えられる。

また同調査結果によると、流出率と森林蓄積（樹木の材積量）との関係では、森林蓄積の増加とともに流出率

Fig. 1. Relation of annual increase in streamflow and percentage reduction in plant cover (after Bosch and Hewlett, 1982).

は減少することが示されており、森林の蓄積は生長とともに増加するので、生長に伴う蒸散量の増加と考えられる。これらの結果では、スギ人工林では、植栽されて60年程度まで流出率が減少するようである。

次に、有明海・八代海流入流域の森林と水流出については、上流森林小流域の長期にわたる観測資料がないので、上述の国内試験流域の結果をもとに、推定するしかない。年降水量をもとに、蒸発散量、森林蓄積、森林伐採などの関係は、全流域にあてはまると考える。また、北九州の河川の渇水比流量は、概略 $2 \text{ m}^3/\text{秒}/100 \text{ km}^2$ 程度であるが、地質によって、流況が異なり、有明海・八

代海流域において、白川流域など新しい時代の火山岩(第四紀火山岩など)は、浸透性がよく渇水流量が大きいことが示されている(志水 1980)。また、全国の地質別・地方別に流況係数(豊水流量/渇水流量)を比較した岸原ら(1983)によると、九州地方のシラス、火山灰、火山碎屑物、火山岩類、深層風化花崗岩の平均流況係数は1.73~4.84であり、未風化花崗岩、砂岩、泥岩類、変成岩類は、5.84~6.73となっており、火山岩の地質の流況の変動が少ないことが示されている。

森林地からの土砂流出について

森林土壌は、気候条件と密接に関連して生成されており、それとの相互作用で植生も生産活動を行っている。この斜面を覆っている土壌層は、自然状態では長期にわたって平衡を保っていると考えることができる。つまり、Fig. 3 (Dunn & Leopold 1978) に示すように、母岩の風化による土壌物質の供給(入力)と斜面侵食(土砂の移動)、および溶解、リーチングによる土壌物質の除去(出力)とのバランスで土壌層が維持されて平衡状態にあり、さらに、土壌層では、植生による有機物の供給・分解が行われ、養分の循環が行われている。これは、いわば動的平衡ということができる。土壌侵食には、バランスが保たれている循環的土砂移動である地質的侵食(geological normal rate erosion)とそのバランスがこわれ斜面の表面が異常に下降する加速的侵食(accelerated erosion)がある。地質的侵食は、人間の歴史に比較して十分に長い期間バランスがとれる状態の土粒子の移動であり、気

Fig. 2. Relation of annual precipitation and runoff ratio in Japan (After Japan Forestry Agency (2001), translated into English by the author).

Fig. 3. The soil achieves a balance between the input and output in its natural state (After Dunn & Leopold (1978)).

候、地質、地形、植生などの要因によってきまる土壤生成速度と侵食量の平衡が維持されている状態(動的平衡)と理解される。この自然斜面での侵食速度は、気候、地質、植生、地形などの要因によって変わるが、1 mm/年(1000 m/百万年)程度は、人間の歴史期間にたいして大きな影響を与えない量(許容侵食量)と考えられている(Kirkby & Morgan 1980)。

日本の森林地での侵食量について、滋賀県田上山の侵食量の観測結果によると、花崗岩の裸地では、10 mm/年、山腹緑化工施工地で、0.1 mm/年のオーダー(鈴木 1994)と考えられる。また、遠賀川流域森林流域(1,260 ha)でのプロット調査では、 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ mm/年程度が観測されている(林野庁 2002)。

有明海・八代海流入河川流域における土砂流出

国交省九州地方整備局から概略的な資料として提供を受けた有明・八代海に注ぐ河川上流域の砂防ダム 112 基の堆砂量資料をもとに、砂防ダムの堆砂量($\text{m}^3/\text{年}$)を上流森林域からの土砂流出量として推定を試みた。砂防ダム流域は、偏在しており、また、堆砂期間のパラッキや簡易測量など測定精度にも問題があるので、一応の目安として Fig. 4 を示す。流域面積は、 $0.05 \sim 4.5 \text{ km}^2$ の範囲であり、平均年堆砂量 $182.76 \text{ m}^3/\text{年}$ で、流域面積あたり平均堆砂量(比堆砂量)は、 $0.07 \text{ mm}/\text{年}/\text{km}^2$ である。これを森林地の侵食量と考えれば、ほぼ妥当なオーダーの値である。しかし、その算定された年堆砂量の範囲は、

2 mm $\sim$ 0.003 mm/年と 3 オーダー異なる範囲にあり、流域ごとの特性が大きくあらわれている。

さらに、砂防ダムの流域面積よりオーダー的に大きな貯水ダム(流域面積 $50 \sim 300 \text{ km}^2$)の単位面積あたり堆砂量($\text{mm}/\text{年}/\text{km}^2$)についてみると(国土交通省ら 2003)、下笠ダム(0.562)、松原ダム(0.229)、寺内ダム(0.417)、緑川ダム(0.396)である。砂防ダムの堆砂量は、平均的には 1 オーダー低いので、砂防ダムで捕捉できない細砂・浮流砂などの流出、洪水時の溪岸、河岸、裸地面等の土砂露出面からの土砂流出、あるいは、侵食量がオーダー的に異なる流域からの流出が考えられる。これらについて、砂防ダムのデータの精度、水系ごとの調査などが必要である。

しかし、全体的にみれば、長期的には、 $10^{-1} \text{ mm}/\text{年}/\text{km}^2$ の許容的な土砂流出(あるいは侵食量)と考えてもよいであろう。

栄養塩の流出

土壌層での水質形成

森林生態系における流水水質に関する物質循環において、森林地では、枝葉、樹幹などの地上部における降水水質の変化もあるが、最も重要な役割を持っているのが「土壌層」であり、その物理性、化学性、並びに微生物の作用である。土壌層は、水の移動経路を規定して、

Fig. 4. Relation of sediment yield and basin area above Sabo dams.

各種流入物質と接触し、濾過、吸着、交換などに関係すると同時に、落葉落枝などの有機物を分解する微生物や小動物の生活の場となっている。土壌粒子表面では、陽イオンを吸着、交換する働きがあり、降水等からのアンモニア態窒素、リンなどは、土壌に吸着され植物に吸収される。また、吸着されず流亡しやすい硝酸態窒素は還元状態で脱窒作用を受け、気化される。この結果、年単位の長期では、降水（収入）と流出水（支出）における窒素とリンの収支は、流出水が少なく、プラス収支となることが多く、植物等に吸収蓄積されることになる。

たとえば、田渕ら（1998）によると、降水量による窒素は、年間7～13 kg/haにも達するが、森林地での流出窒素は、1～5 kg/haで、約1/3程度に減少する。リンについては、0.1～0.5 kg/haで降水よりやや少ない程度とされている。また、滋賀県の3森林集水域で計測された堤（1987）の調査結果（Table 1）によると、同様の結果を示しており、Ca, Mg, K, Naなども土壌層に吸着されるが、岩石の風化によって、これらの成分は土壌層に加わるため、流出水の方が多くなり、収支（降水による収入－流出水による支出）はマイナスとなる。しかし、水質上問題となる程度の濃度とはならないと考えられている。

また、重金属も土壌層で吸着、集積が行われるが、吸

着能の限界以上は流出するので、水源域としての問題と同時に、森林生態系に重大な支障をきたすことも考慮しておく必要がある。

酸性雨によってpHが低下するが、日本の多くの森林土壌中に含まれる火山灰の非晶質、準晶質の粘土鉱物による酸性物質の緩衝作用、風化鉱物による中和などで、土壌の急速な酸性化が起きず、流出水質の酸性化や植物に有害なAlの溶出も抑えられている（例えば柴田2000）。

このように、森林地からの流出水質は、土壌層の物理化学的特性、生物活動によって形成されている。

森林伐採などで養分物質の循環的利用が中断、破壊されると窒素など循環的利用に用いられていた流出成分濃度は増加する。しかし、これらの水質形成には、地形、地質、土壌構造、降雨量などによる影響が大きく、降水の量と質、水の移動経路、土壌による緩衝能、イオン交換能、地中での飽和・不飽和の水分条件、蒸散による水質の濃縮などによって、水質形成のメカニズムも大きく異なる。また、とくに、短期流出と長期流出では、流出のプロセスの相違によって流出水の水質形成が異なってくる。そのため、森林地における水資源問題では、地域性や流域特性を考えた降水、乾性降水物の量と質、流出水の量と質のモニタリングを継続することが重要である。

Table 1. Nutrient budgets: input from precipitation and output by runoff from forest basin (Unit is kg/ha per year) (after Tsutsumi (1987), translated into English by Ogawa).

	Jakujo, Shiga Pref.			Harigatani, Shiga Pref.			Ryuouzan, Shiga Pref.		
	Input	output	difference	Input	output	difference	Input	output	difference
NH ₄ ⁺ -N	1.63	0.22	1.42	1.95	0.34	1.61	2.87	0.97	1.90
NO ₃ ⁻ -N	2.77	0.80	1.97	2.87	1.08	1.79	5.07	1.78	3.20
Org ⁻ -N	2.52	0.82	1.70	4.27	1.41	2.86	3.97	1.45	2.52
Tot ⁻ -N	6.92	1.83	5.09	9.09	2.66	6.43	11.90	4.20	7.70
P	0.37	0.13	0.23	0.28	0.55	-0.27	0.31	0.23	0.08
K	3.89	4.05	-0.67	5.63	7.24	-1.61	3.09	8.55	-5.46
Ca	3.98	5.55	-1.58	4.57	22.63	-18.07	5.73	145.26	-139.53
Mg	1.41	2.42	-1.01	2.48	15.64	-13.16	3.31	23.24	-19.93
Na	8.06	29.58	-21.52	20.05	48.66	-28.61	9.48	33.57	-24.09
Cl	33.62	28.59	5.03	48.11	64.63	-16.53	45.62	62.46	-16.84

有明海，八代海流入河川からの栄養塩流出

森林試験地流域における水質調査 (Table 1) では、前述の栄養塩 (全窒素，全リンなど) は、収支ではプラス，あるいはプラスマイナス 0 で栄養塩のシンクとされている。しかし，区間代表法 (観測値をある区間の代表値とする方法; I-R 法) など連続した流量データがない推定法では，出水時の栄養塩流出を正確に測定できていないために，過小評価していることがある。そこで，森林地小流域での全窒素 (以下 T-N とする)，全リン (以下 T-P とする) について，L-Q 法 (負荷量と流量との関係式を用いて，流量より負荷量を求める方法) で観測した結果を示す。有明海・八代海の流域には，水質を調査している森林試験地流域がなかったため，試験地流域は，観測資料のある博多湾に注ぐ多々良川上流域と，玄界灘に注ぐ遠賀川上流域である。なお，データは，原単位 (kg/年/ha) を用いている。原単位は，流域間の量的特性比較に有効であり，流域面積を用いて総量など絶対量への変換も容易である。しかし，濃度と流量の観測値が必要であり，一般に，両方が継続的に観測されている場合は少ない。今後は，濃度と流量の同一地点での継続的な観測が必要とされる。また，濃度のみによる生態系への影響などの評価には限界がある。

多々良川上流域では，Table 2 (井手ほか 2003) に示すように，T-N について，流出支出/降雨収入は，L-Q 法で 1.90，区間代表法で，0.97，T-P については，支出/降雨収入は，L-Q 法で 1.62，区間代表法で，0.61 となった。

また，遠賀川上流域でも，平水時では，窒素収支はプ

ラスで，増水時を考慮するとマイナスの場合があることが示されている (林野庁 2002)。さらに，年流出係数の年々の低下に伴い T-N の年収支は，プラス (シンク) 量が増加することが示された。この流出係数の低下は，森林植生の成長に伴う蒸散量の増加による流出量の減少によるもので，T-N 収支のプラスは，成長に伴う窒素吸収の増加と流出量の減少との効果であると考えられた。この効果のうち，窒素濃度の減少より，流出係数の低下が大きいことから，蒸散による流出量減少の効果が大きいと考えられている。

これらの観測結果 (原単位: kg/年/ha) によると，L-Q 法で，T-N は，多々良川上流 (ヒノキ林管理放棄地) で 16.3，T-P は，0.189 (井手ら 2003)，遠賀川上流域 (スギ林) で，T-N は，増水を考慮すると 10 程度である (林野庁 2002)。

また，多々良川上流森林域 (ヒノキ管理放棄地) では，出水時の栄養塩 (T-N，T-P) の流出が平水時より 1 ~ 2

Table 2. The budgets of T-N and T-P flux in Ochozu Experimental Watershed.

	T-N	T-P
① input ^a	8.6	0.116
② output by I-R method ^a	8.35	0.072
③ output by L-Q method ^a	16.3	0.189
②/①	0.97	0.61
③/①	1.9	1.62
③/②	1.96	2.64

^a Unit is kg/ha per year.

Fig. 5. Concept of matter and water cycle in watershed.

オーダー大きい（単位 kg/10 min/ha）ことが示され、これは、懸濁態の栄養塩の流出によるとされている（Ide et al. 2001）。つまり、出水時の栄養塩の流出を正確に評価すると、森林地はシンクではなく、ソースの可能性もある。しかし、前に述べたように、通常は、窒素、リンについては、降雨水より低濃度の水質を供給していると考えられる。

なお、有明海・八代海への総流入負荷量について、戸原（2002）がとりまとめた有明海流入負荷量から流域面積を推定して試算すると、T-Nで約 40 kg/年/ha、T-Pで約 5 kg/年/ha となり、前述の田淵ら（1998）や堤（1987）による T-N と T-P の値と比較すると 1 オーダー高い値である。このオーダーの差、また、遠賀川、多々良川上流森林域からの T-N、T-P との差が、単純に中流域、下流域から加えられた負荷量というわけではないが、森林流域からの流出負荷量と最終的な有明海・八代海への流入量との関係を考える場合の現在利用できる観測資料ということではできよう。

以上述べたように、有明海・八代海流域の森林上流域からの栄養塩の流出観測資料も十分ではなく、さらに中流域、下流域でどのような動態となり、最終的に有明海・

八代海への流入栄養塩となるのかは、現在の観測資料からは不明な部分が多い。

森林管理と流域管理

森林地は、もともと生態学的に安定であり、そのような森林斜面の土壌層の生態学的バランスは、森林地からの水・土砂・栄養塩を安定的に流出させる。その表層土壌層を保全するという意味での森林保全が人間生活の環境にとって重要である。この森林の生態的安定は、多種多様な要素から成り立っており、全体的なバランスから人間と森林の関係を考えていく必要がある。

しかし、最近では、上流森林地域での伐採放置林、管理放棄地が増加している。これらの影響は、水流出の不安定性、土砂流出の増加・栄養塩流出増加をもたらす。これらの影響を上流から沿岸域まで流れに沿って計測し、データベース化し、評価していく必要がある。これについては、観測データは、全体流域で、水量、水質など管理・利用の目的別のデータとして、共通あるいは換算可能な「単位面積・単位時間あたり」の「原単位」での統合管理が必要とされる。さらに、これらのデータは、LTER

Fig. 6. Concept of the Long-Term Forest Hydrological Research Network LTER; Long Term Ecological Research, ILTER; International LTER, EANET; Acid Deposition Monitoring Network in East Asia.

(長期生態研究)のデータベースのネットワークとして公開されることにより、異なる分野の研究者によるデータ利用が容易になり、総合的な研究が推進されるものと考えられる。Fig.5に現在、全国演習林協議会で研究開発されているLTERに関係する長期森林水文研究(LTFHR)の構想を示す。

ここで、自然生態系における物質循環の視点にたつて、社会の持続的発展を考えることにする。適正な個別循環系は、Fig.6に示すように、流域における森林水源域、耕地域、都市域、海洋域等の個別循環系への適正な限度内での物質の入出力のやりとりによって保障される。このためには、土地利用別個別循環系の高度な技術開発と地域に定着した人間生活を根底に持つ循環型思想へのパラダイムシフトがその基礎として必要である。

摘 要

有明海に流入する河川は、一級河川が7流域であり、2級河川が104流域である。これらの流域の森林域は、水源地域として最上流部に位置しており、森林域は、降

雨の集水域として機能して、中流域と下流域への水・土砂・栄養塩などを排出している。そのため、森林域における水循環についての十分な理解の上で、人間は生産と消費と廃棄の活動を行なう必要がある。水源域は、きわめて局所的な特性を有しており、降雨一流出特性の変動が著しい。そのため、流域全体に及ぼす森林集水域の影響を評価するには、各水源流域から下流域までの連続したデータが必要とされる。しかし、このような観測資料は少ない。全流域でのデータとして、共通、あるいは換算可能な「原単位」での観測が必要とされる。これらを踏まえて、森林流域と有明海・八代海との関係について説明した。しかし、森林流域の観測データが少ないため、森林地からの一般的な流出特性について説明している箇所もある。

最初に、森林地の一般的な水循環について述べ、次に、森林流域からの土砂流出は、正常な地質的浸食のオーダーであることを述べた。さらに、森林地からの栄養塩の流出は、有明海に流入する栄養塩(T-N, T-P)より1オーダー低いが、森林管理放棄のヒノキ林地からのT-Nの流出は、同程度のオーダーとなることが推定された。ま

た, 降雨時, あるいは, 洪水時の正確な栄養塩の計測は, 有明海に流入する河川の上下流で行われていないので, まだ, 正確な森林地からの水・土砂・栄養塩の流出・流入が把握できていないことを述べた. 最後に, 森林の管理については, 土壌層の保全が最も大事であることを述べた.

また, 森林流域から沿岸域まで流域生態系水循環システムの概念を示し, 各個別生態系水循環のデータベースについて, 長期生態研究のネットワークとして構築する必要があることを述べた.

引用文献

- Bosch, J. M. and Hewlett, J. D. (1982) A review of catchment, experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *Jour. of Hydrology*, **55**: 3-23
- Dunn, T. and Leopold, L. B. (1978) Water in environmental planning, pp. 509. W. H. Freeman and Company. San Francisco.
- Ide J., Nagafuchi O., Kume A., Otsuki K. & Ogawa S. (2003) Runoff nutrients from an afforested watershed of *chamaecyparis obtusa* during rain events, *Proceedings of the 7th International Specialised IWA Conference*, Dublin, Ireland., **5B**, 30-34.
- 井手淳一郎・東智洋・久米篤・大槻恭一・小川滋・永渕修 (2003) ヒノキ人工林小流域における栄養塩収支について, 2003 年度森林生態圏管理学 (演習林) 研究発表会講演要旨集, 17-18.
- Kirkby M. J. and Morgan R. P. C. (eds.) (1980) *Soil erosion*. John Wiley & Sons, New York.
- 岸原信義・石井正典 (1983) 日本列島の山地流域からの流出に関する研究 (Ⅱ) 流況の表示法と地質区分に関する研究, *日本林学会誌* **65**(1): 1-8.
- 国土交通省, 水資源開発公団 (2003) 九州地方ダム等管理フォローアップ調査年次報告書 (平成 13 年版).
- 林野庁 (2001) 渇水地域上流森林整備指針策定調査平成 12 年度荒廃現況調査報告書.
- 林野庁 (2002) 水土保持機能評価指針策定調査平成 13 年度荒廃現況調査報告書.
- 柴田英昭 (2000) 酸性雨と森林・土壌生態系—プロトン代謝と物質循環への影響, *遺伝* **54**(11): 85-89.
- 鈴木雅一 (2002) 航空写真で見る日本の森林の変貌, 森林の公益的機能新解説シリーズ第 2 巻, (社) 日本治山治水協会.
- 志水俊夫 (1980) 山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係, *林試研報* **310**: 109-128.
- Swank, W. T. (1987) *Forest hydrology and ecology at Coweeta*, pp. 297-380, Springer-Verlag.
- 田淵俊雄・安楽敏・中曾根英男・柚山義人 (1998) 清らかな水のためのサイエンス—水質環境学, 地域環境工学シリーズ 4, 農業土木学会.
- 戸原義男 (2002) 有明海・諫早湾干拓をめぐる最近の話題—水理・水質を中心にして—, 同窓会報 37, 九州大学農学部同窓会.
- 堤利夫 (1987) *森林の物質循環*, 東大出版会, 東京.