千葉袋山沢流域における伐採による月流出量変化

真板英一^{*1}・鈴木雅一¹

真板英一・鈴木雅一：千葉袋山沢流域における伐採による月流出量変化 日林誌 89:278~287, 2007 東京大学千葉演習林袋山沢流域（北緯 35°12′, 東経 140°06′）において対照流域法による森林皆伐実験が行われた。A 流域（0.802 ha）を基準流域, B 流域（1.087 ha）を処理流域とした。地質は新第三紀層に属し, 年平均降水量は 2,170 mm, 年平均気温は 14.2℃である。伐採前の植生は両流域ともに約 70 年生のスギ・ヒノキ人工林で, B 流域は 1999 年春に伐採され, 2000 年にスギ・ヒノキが植栽された。伐採後 3 年間の B 流域の月流出量は増加した。月流出増加量は 3.6~54.7 mm, 平均 26.1 mm であった。月流出増加量は月降水量と強い正の相関があった。また月流出増加量と月降水量の関係には季節変動があり, 冬の方が夏よりも相対的に月流出増加量が大きかった。月流出増加量の降水量依存性は樹冠遮断蒸発に, 季節依存性は蒸散・地表面蒸発に由来すると考えられた。伐採による蒸発散各成分の変化量を推定すると, 蒸散・地表面蒸発合計の変化量よりも樹冠遮断蒸発の変化量の方が大きかった。そのため蒸発散全体の変化の季節変動はほとんど樹冠遮断蒸発の変化の季節変動によって規定されていることがわかった。

キーワード: 季節変動, 蒸発散, 森林伐採, 対照流域法, 流出変化

Maita, E. and Suzuki, M.: **Change in the Monthly Water Yield after Clear-cutting in Fukuroyamasawa, Chiba.** J. Jpn. For. Soc. 89: 278~287, 2007 A paired watershed experiment was conducted in the Fukuroyamasawa Experimental Watershed (35°12′ N, 140°06′ E) in University Forest in Chiba, The University of Tokyo. The watershed is located in a Tertiary formation area and is covered by a mixed plantation of Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*). The annual precipitation and annual mean temperature are 2,170 mm and 14.2°C, respectively. Watershed-A (WS-A, 0.802 ha) was the control watershed and Watershed-B (WS-B, 1.087 ha) was the treatment watershed. WS-B was clear-cut in the spring of 1999 and the same species were planted in 2000. The monthly water yield in WS-B increased in the 3 years after cutting; the increase ranged from 3.6 to 54.7 mm/month, and averaged 26.1 mm/month. There was a positive correlation between the increase in the monthly water yield and the monthly precipitation. There was a seasonal variation in the relationship between the increase in the monthly water yield and the monthly precipitation; the increase in the monthly water yield was relatively greater in winter than in summer. The positive correlation between the increase in monthly water yield and monthly precipitation appeared to result from canopy interception; the remaining seasonal variation was caused by transpiration and soil surface evaporation. The change in evapotranspiration after cutting was estimated; the change in canopy interception was greater than the change in transpiration and soil surface evaporation. Therefore, the seasonal variation in the change in evapotranspiration after cutting depends primarily on the seasonal variation in the canopy interception.

Key words: change in water yield, evapotranspiration, forest cutting, paired watershed method, seasonal variation

I. はじめに

わが国において, 水源地帯の多くは山地森林流域である。森林流域からの流出量は, 気候・地質地形・植生状態などの要因に影響を受けると考えられる。このうち植生状態は変化のスピードが他の要因に比べて速く, また人為的な改変を受けやすい。そのため, 植生状態と流出量との関係は古くから議論の対象になってきた(遠藤, 2004)。近年では, 大規模な開発や人工林の荒廃などの植生変化が河川水量に悪影響を与えるのではないかと懸念が広がっている。自治体の中には水源税等を新規に制定し, 税金を投じての森林保全を始めるところも出てきた。研究者の間でも水源林における施業・管理の方法論について議論が起こっている(塚本・太田, 1984; 服部ら, 2001; 蔵治, 2003)。「水

源林としてあるべき状態」を議論するためには, 森林が流出量に与える影響が精確に解明される必要がある。

森林植生が山地流域からの流出に与える影響を実証的に解明することを目的として, 試験流域における伐採試験が世界各地で行われている。対照流域法に限っても 160 例以上の試験例がある (Brown *et al.*, 2005)。これらの試験結果から, 年流出量については, 1) 森林の伐採によって年流出量は増加する。また増加量は伐採面積にほぼ比例する。2) 伐採による流出増加量と平均年降水量には正の相関がみられる。3) 伐採による流量増加は植生消失による蒸発散の減少として説明できる。ということなどが明らかとなった (Hibbert, 1967; Bosch and Hewlett, 1982; Brown *et al.*, 2005)。

一方, 1 年よりも短い時間単位, すなわち季節流出量や

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: maita@fr.a.u-tokyo.ac.jp

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻 (113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1)

Department of Forest Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan.

(2006 年 7 月 19 日受付; 2007 年 5 月 7 日受理)

月流出量の変化についても解析が行われている。その結果、季節流出量や月流出量は伐採によって、一部の例外を除いて大抵増加することが明らかとなった。しかし、その増加量（もしくは増加率）は必ずしも年間一様ではなく、一年のうちでも特定の季節において大きな増加が現れるという現象がみられること、また加えて、そのような季節的な偏りのパターンは個々の流域ごとに異なっていることが報告されている（中野，1971；Brown *et al.*, 2005）。この原因として、降水量の季節分布や積雪の有無の影響（中野，1971；鈴木，1985；Brown *et al.*, 2005）や、蒸散の季節性（植生の生長期・休眠期）の影響（阿部・谷，1985）が指摘されているものの、未だはっきりとしたことは解明されていない。

伐採による流出量増加の季節性は蒸発散の季節性に原因があると考えられる。蒸発散はおもに三つの成分（樹冠遮断蒸発・蒸散・地表面蒸発）によって構成されるが、各成分の季節変動は同じではないし、伐採による変化も異なる。したがって、伐採による流出量増加の季節性のメカニズムを明らかにするには、蒸発散各成分の変化を定量的に評価することが必要である。しかし、対照流域法が実施された流域で蒸発散の各成分が個別に把握された事例は少なく、伐採試験の解析において多くの場合、蒸発散は一体のものと扱われている。そのため、伐採による蒸発散量の減少について、蒸散・樹冠遮断・地表面蒸発の各成分ごとの変化を定量的に明らかにした研究はきわめて少ないのが現状である（塚本編，1992）。

そこで本研究は、1999年に森林伐採試験が実施された東京大学千葉演習林袋山沢試験地を対象に伐採による月流出量の変化を解析し、流出量変化の季節変動を明らかにするとともに、水収支的方法によって蒸発散各成分の変化の定量化を試みた。

II. 流域概要

1. 試験流域

試験流域は、東京大学農学部附属千葉演習林内の袋山沢試験流域である。房総半島南部の清澄山系の一角をなす東向きの山地斜面で、北緯 35°12'08"，東経 140°06'23"に位置している。地質は新第三紀三浦層群豊岡層清澄砂岩層で、基岩は砂岩泥岩互層である。

流域は東西に細長い二つの流域が南北に隣接する形状になっており、北側を A 流域 (0.802 ha)，南側を B 流域 (1.087 ha) と称している（図-1）。A 流域は森林植生を保持する対照流域，B 流域は皆伐処理を施す処理流域と設定した。流域の諸元については真板ら (2005) を参照されたい。

なお流域内に林道や作業道などは敷設されていない。急峻な観測斜面には金属製のはしごを設置して観測者による人為的な攪乱・踏み固めの防止に努めている。

2. 植生状態と伐採経過

伐採以前の植生は A, B 両流域とも同じで、樹冠がほぼ閉鎖したスギ・ヒノキ人工林である。伐採時においては

図-1. 袋山沢試験地流域地形図
Topographical map of the watersheds.

約 70 年生の壮齢林で、樹高はおよそ 20～25 m であった。下層木は少なく、アオキ (*Aucuba japonica*)，ユズリハ (*Daphniphyllum macropodum*) などが若干みられる程度である。

1999 年春に B 流域の上層木・下層木すべてが皆伐された。施業方法については、植生除去の影響のみを検討するために、地表面の攪乱が最小限にとどまるよう架線集材によって搬出を行った。伐採に際して刈り払われた枝葉は、流域内に放置された。2000 年 1 月、鹿による食害を防ぐために試験地の外周をシカ柵で囲った（蒲谷ら，2001）。2000 年 3 月には伐採跡地にスギ・ヒノキの苗木が植栽された（植栽密度約 3,000 本/ha）。2001 年以降、植栽樹の保育のため下草刈りが定期的に行われている。

III. 方 法

1. 観測方法

流量は、A, B 流域の末端地点と、欠測時のバックアップを目的として A, B 両流域を包含する地点に量水堰を設けて観測している。量水堰は、いずれも基岩にコンクリートを岩着させている。ノッチの形状は、90°三角ノッチである。堰水位は、フロート式自記水位計（池田計器製）を用いてチャート紙上に記録している。その水位記録をデジタイザを用いて読み取り、堰水位と越流量の実測値から得られた水位流量換算式によって実流量に変換することで流出量を得ている。流域が設定されたのは 1991 年で、1993 年途中から信頼できる流出量データが得られるようになった。

降水量は、当流域から東へ約 200 m 離れた位置にある新田観測点の露場で観測された。測器は口径 20 cm，一転倒 0.5 mm の転倒マス式雨量計（大田計器製），および口径 21 cm の貯留式雨量計（自作）を併用している。転倒マス式雨量計は自記観測で、貯留式雨量計は週 1 回の定期観測時に貯留量をメスシリンダーを用いて計測している。年降水量は、1993～2002 年の平均で 2,170.1 mm/year である。また同地点における年平均気温は 14.2℃，純放射量は平均で約 2,500 MJ/m²/year となっている（1998～2000 年）。

2. 解析期間

データが得られた 1993～2002 年のうち、欠測がある

1993, 1996 年は解析に使用しなかった。伐採が 1999 年の途中で行われたことを考慮し, 1994, 1995, 1997, 1998 年を伐採前期間, 2000~2002 年を伐採後期間と定めた。

3. 解析方法

月流出量の解析には単回帰分析を用いた。処理流域である B 流域の月流出量 Q_B を対照流域である A 流域の月流出量 Q_A に対して直線回帰させると次式ようになる。

$$Q_B = a Q_A + b \quad (1)$$

伐採によって月流出量が有意に変化したかどうかの検討は次のように行った (Harr *et al.*, 1982)。まず伐採前期間のデータに対して (1) 式を求める。次に, この回帰の結果を用いて予測値の 95% 信頼区間を計算する。この信頼区間は, もし伐採が行われなかったならばデータの 95% はこの区間内に含まれるであろうと期待される区間である。最後に伐採後期間のデータが予測値の信頼区間に含まれるか否かを調べる。もし伐採後期間のデータが信頼区間外であるなら, 伐採による月流出量の変化は 5% 水準で有意な変化であるといえる。

一方, 伐採による月流出量の変化量 ΔQ は, 伐採しなかったとしたら得られたであろう月流出量の推定値 $\hat{Q}_B$ と, 伐採後期間に実際に観測された月流出量 Q_B との差として求められる。 $\hat{Q}_B$ は, 伐採前期間における回帰直線 (1) 式に伐採後期間の A 流域月流出量 Q_A を代入することで推定できる。すなわち ΔQ は次式のように求められる。

$$\Delta Q = Q_B - \hat{Q}_B \quad (2)$$

$$= Q_B - a Q_A - b \quad (3)$$

なお $\hat{Q}_B$ の信頼区間をもとに ΔQ の 95% 信頼区間を併せて算出した。

既往の研究において, 伐採による流出量変化は降水量に影響される, と指摘されていることから, 本研究では ΔQ と月降水量 P との関係について解析を行った。

ところで, 既往の研究において, 流量が比較的小さいときには伐採による流量増加が認められるが, 大きな流出の場合には伐採前後で流量の変化がみられない, という指摘がある (白井・星川, 1960; 阿部・谷, 1985; Thomas and Megahan, 1998; Robinson *et al.*, 2003; Cosandey *et al.*, 2005 など)。本流域においても同様の現象がみられた (詳細は後述する)。そこで, 流量変化が認められない大規模流出時のデータを除外し, 残りのデータで伐採による月流出増加量 ΔQ^* を (ΔQ と同様の方法で) 算出した。 ΔQ^* についても月降水量 P との関係について解析を行った。

IV. 結 果

1. 基準流域の月水収支の特性

伐採の影響を解析する前に, まずは袋山沢試験地の一般的な月流出特性を示しておく必要があるだろう。そこで観測期間において常に森林状態が保たれた A 流域について, 1994~2002 年 (1996 年を除く) の 8 年分の月データを示

図-2. A 流域における平均月水収支 [mm/month]
Mean monthly water budget in WS-A.

図-3. A 流域における月降水量と月流出量の関係
Relationship between monthly precipitation and monthly water yield in WS-A.

すことにする。

1) 季節分布

1月から12月までの各月について8年間の平均水収支を求めると図-2が得られる。なお図-2において損失量とは, 降水量から流出量を引いた残余である。

まず, 降水量の季節分布についてみると, 3~10月の間に降水量の多い月 (約 200 mm/month もしくはそれ以上) が集まっていることがわかる。すなわち, 袋山沢試験地は夏雨型の流域であるといえる。ただし盛夏期の8月は降水量が約 100 mm/month と少なく, 冬期 (11~2月) と同程度である。

続いて流出量・損失量の季節分布についてみると, ともに降水量の季節分布によく似ており, 春から秋に多く, 冬に少ない傾向があることがわかる。流出量・損失量と降水量との相関係数はそれぞれ 0.94, 0.94 であり, いずれも強い正の相関があった。

流出量と損失量を比較すると, 平均値ではほぼ1年を通じて損失量の方が大きい。ただし各月で流出量と損失量の差を検定すると (Mann-Whitney の U 検定, 5% 水準), 8~2月 は損失量の方が有意に大きいが, 3~7月 は流出量と損失量に有意な差は認められず, 季節によって異なる結果となった。

2) 月降水量と月流出量の関係

月降水量と月流出量の散布図を図-3に示す。月降水量が100 mm以上の範囲では月流出量は月降水量に対して右上がりに増加するが、それ以下の範囲では月流出量は少ない。特に月降水量50 mm以下の範囲では月流出量はほぼゼロである。一般に山地森林流域では基底流出の影響で降水の少ない月でもある程度の流出が発生するが、本流域は基底流出が少ない(真板ら, 2005)ため、寡雨月には流出がほぼゼロになると考えられる。

本流域の流出特性については第V章でさらに議論を行う。

2. 伐採による流出量の変化

1) 月流出量の変化

初めに、A, B両流域の月流出量 Q_A , Q_B の対比図を図-4に示す。まず伐採前期間の点の分布に注目すると、原点から右上に向かって直線状に付置しており、両流域の月流出量が(1)式のような直線関係にあることがわかる。ただし図-4を詳細に調べると、原点付近とそれ以外の区間では直線の傾きが異なっている。 $Q_A=20$ mm/month 付近を境に傾きが変化することから、 $Q_A=20$ mm/month の前後で区間を区切り、それぞれに対して(1)式の回帰直線を求めると、

$$Q_A < 20 \quad Q_B = 1.2963 Q_A + 0.41 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.95) \quad (4)$$

$$Q_A \geq 20 \quad Q_B = 0.8343 Q_A + 8.52 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.99) \quad (5)$$

が得られた。サンプルサイズはそれぞれ19, 29である。

次に、伐採による流出量の変化を調べる。図-4において、伐採前後で点の分布を比較すると、伐採前期間に比べて伐採後期間の点は全体的に上側に位置している。さらに、(4)式、(5)式から求められた予測値の95%信頼区間と、伐採後期間の点の分布を比べると、伐採後期間の点はすべて95%信頼区間の上側に外れていることがわかった。すなわ

図-4. A, B両流域の月流出量の関係
Relationship between monthly water yields in WS-A and WS-B.

ち、袋山沢B流域では、伐採後期間のすべての月で、月流出量が伐採によって有意に増加した。

2) 月流出増加量 ΔQ の解析

伐採による月流出量の増加量 ΔQ は(3)式のように求められる。図-4に即していえば、伐採後期間の点と、伐採前期間の回帰直線との差が ΔQ である。

ただしその前に、気象条件を考慮して集計期間の調整を行った。調整したのは2001年1月と2002年9~10月である。

本流域は積雪が少ない流域であるが、2001年1月27日には珍しくまとまった降雪があり積雪が発生した。この影響を除くため同月28~31日のデータは集計から除外することとした。

また2002年9~10月には、9月30日から10月1日にかけて、ちょうど月境界をまたいで総雨量100 mm以上の降雨イベントが発生した。このような大きな降雨イベントの最中に水収支期間を区切るのは不適切であると判断したので、この降雨イベントによる直接流出が終了したと思われる10月3日を区切りとすることとした。すなわち、2002年9月は9月1日から10月3日まで、2002年10月は10月4日から10月31日までを集計期間と定めた。

なおこの調整はともに伐採後期間のものであるため、伐採前期間の回帰直線(4)式および(5)式に影響はない。

以上の調整を加えたのち、 ΔQ の算出を行った。伐採前期間の回帰直線(4)式および(5)式は $Q_A=17.57$ で交点をもつため、 $Q_A < 17.57$ である月は(4)式を、 $Q_A \geq 17.57$ である月は(5)式を $\hat{Q}_B$ の推定に用いた。

算出された ΔQ を表-1に掲げた。 ΔQ の最大値は2001年10月の51.9 mm, 最小値は2000年2月の3.6 mmで、月によって値に大きなばらつきがあった。なお平均値と標準偏差は 25.2 ± 12.8 mmであった。

ΔQ の年合計値の平均は302.1 mmであった。この値は年流出量の解析から算出された年流出増加量の値295.9 mm/y(真板ら, 2005)とほぼ等しい値である。

次に、 ΔQ と月降水量の関係について調べた。両者の散布図を図-5に示す。図-5において、 ΔQ は月降水量に対し

表-1. 伐採による月流出増加量 ΔQ [mm/month]
Increase in monthly water yield after cutting ΔQ .

	2000	2001	2002	Mean
Jan	22.4 (13.0 ~ 31.9)	37.1 (28.0 ~ 46.3)	30.8 (21.7 ~ 39.9)	30.1
Feb	3.6 (0.2 ~ 4.0)	18.5 (9.1 ~ 28.0)	11.3 (1.8 ~ 20.7)	11.1
Mar	31.6 (22.4 ~ 40.7)	29.4 (20.2 ~ 38.7)	27.2 (17.9 ~ 36.4)	29.4
Apr	35.2 (26.0 ~ 44.5)	10.4 (6.8 ~ 14.0)	14.7 (11.4 ~ 18.0)	20.1
May	26.2 (16.9 ~ 35.4)	27.6 (18.3 ~ 36.8)	21.0 (11.5 ~ 30.4)	24.9
Jun	43.2 (33.8 ~ 52.5)	20.4 (11.2 ~ 29.6)	36.3 (27.1 ~ 45.5)	33.3
Jul	11.6 (1.7 ~ 21.5)	4.7 (1.4 ~ 6.7)	17.1 (7.9 ~ 26.3)	11.1
Aug	4.2 (0.8 ~ 6.5)	20.8 (11.5 ~ 30.0)	21.0 (11.8 ~ 30.1)	15.3
Sep	41.0 (31.8 ~ 50.1)	38.9 (29.6 ~ 48.2)	41.5 (31.5 ~ 51.5)	40.5
Oct	30.9 (21.7 ~ 40.2)	51.9 (41.5 ~ 62.4)	32.0 (22.7 ~ 41.3)	38.3
Nov	20.1 (10.7 ~ 29.5)	40.0 (30.9 ~ 49.2)	11.7 (8.3 ~ 15.0)	23.9
Dec	6.7 (3.3 ~ 8.0)	19.3 (15.7 ~ 23.0)	46.0 (36.7 ~ 55.3)	24.0
Total	276.7	319.0	310.6	302.1

括弧内の範囲は95%信頼区間。

The 95% confidence intervals are shown in parentheses.

図-5. 伐採による月流出増加量 ΔQ と月降水量の関係
Relationship between increase in monthly water yield after cutting ΔQ and monthly precipitation.

て直線的関係にあることがわかる。両者の相関係数は 0.78、決定係数は 0.61 であった。

続いて、 ΔQ と月降水量の関係の季節変動について調べた。図-2 に示した水収支の季節分布を考慮し、3~6 月、7 月、8 月、9~10 月、11~2 月の 5 グループに分けて図-5 を描き直すと図-6 のようになる。図-6 から、季節によって ΔQ と月降水量の関係が異なることがわかる。すなわち、どのグループも月降水量が大きいほど ΔQ が大きくなる傾向があるが、同じ降水量に対する ΔQ の大きさは 11~2 月のグループが最も大きく、以下 3~6 月および 9~10 月、8 月、7 月の順に大きい傾向がみられる。季節進行の観点からいうと、11~2 月から 7 月にかけては降水量当たりの ΔQ は季節の進行とともに小さくなっていき、7 月から 11~2 月にかけては逆に大きくなっていくという周期変動がみられる。

なお図中の直線は、上側の実線が 11~2 月のグループ、下側の点線が 7 月に対する回帰直線で、それぞれ

$$11\sim 2 \text{ 月}) \Delta Q = 0.1516 P + 4.20 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.79) \quad (6)$$

$$7 \text{ 月}) \Delta Q = 0.0319 P + 5.12 \quad (p = 0.40; R^2 = 0.65) \quad (7)$$

である。

3) 月流出増加量 ΔQ^* の解析

次に、流出規模を考慮した月流出増加量 ΔQ^* の算出を行う。 ΔQ^* は、伐採の影響が現れない一定規模以上の流出 ($q_A \geq 10 \text{ mm/h}$) が起こった時間帯を除いて算出したものである。以下に詳細を記す。

まず、大きな流出が短期的な現象であることを考慮し、1 時間単位の流出量データを解析した。

A, B 両流域の時間流出量を散布図上にプロットし、伐採前後で点の分布を比較したところ、A 流域の時間流出量 q_A が約 10 mm/h より小さい区間では伐採によって B 流域の流出量が増加した傾向が認められたが、それ以上の区間では伐採前後で点の分布に違いが認められなかった。そこ

図-6. 月降水量と月流出増加量 ΔQ の関係の季節変動
Seasonal variation of relationship between increase in monthly water yield after cutting ΔQ and monthly precipitation.

(6)式は 11~2 月のデータに対する回帰直線、(7)式は 7 月のデータに対する回帰直線。

Equation (6) is a regression line for Nov.~Feb., Eq. (7) is a regression line for Jul.

で、両流域の時間流出量データを、 $q_A < 10 \text{ mm/h}$ である時間帯と $q_A \geq 10 \text{ mm/h}$ である時間帯の 2 グループに分離した（これ以降、 $q_A \geq 10 \text{ mm/h}$ を記録した時間帯を大規模流出と呼ぶ）。大規模流出の発生時間数は、伐採前期間で計 17 時間、伐採後期間で計 25 時間あった。さらに 2 グループそれぞれについて、時間流出量を月ごとに集計して合計値を求めた。

結果を図-7 に示す。図中の直線および曲線は伐採前期間の点に対する回帰直線および 95% 予測区間である。大規模流出以外を集計した図-7(a) では、図-4 と同様に、 $Q_A = 20 \text{ mm/month}$ で区間を分けて回帰直線を求めた。それぞれ、

$$Q_A < 20 \quad Q_B = 1.2963 Q_A + 0.41 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.95) \quad (8)$$

$$Q_A \geq 20 \quad Q_B = 0.8643 Q_A + 6.61 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.99) \quad (9)$$

が得られた。サンプルサイズはそれぞれ 19, 29 である。(8)式は (4)式と同じであるが、これは $Q_A < 20 \text{ mm/month}$ の月には大規模流出が発生しなかったことによる。一方、大規模流出を集計した図-7(b) について、伐採前期間の回帰直線を求めると

$$Q_B = 0.7967 Q_A - 2.16 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.98) \quad (10)$$

が得られた。

さて図-7 の (a) と (b) を比較すると、伐採に対する流出量変化の反応が異なることがわかる。まず大規模流出以外を集計した (a) 図をみると、伐採後期間の点はすべて 95% 予測区間の上側に外れており、伐採によって B 流域の流出量が有意に増加したことが示されている。一方、大規模流出を集計した (b) 図では、伐採後期間の点は伐

(a) $q_A < 10 \text{ mm/h}$ (b) $q_A \geq 10 \text{ mm/h}$

図-7. 流出規模で区分したA, B両流域の月流出量の関係

Relationship between monthly water yields in WS-A and WS-B divided by flow size.

(a) A流域の時間流出量が10mm未満の時間帯のみ集計。(b) A流域の時間流出量が10mm以上の時間帯のみ集計。(a)では伐採の影響がみられるが、(b)ではみられない。

(a) Data when hourly discharge in WS-A is less than 10 mm. (b) Data when hourly discharge in WS-A is greater than or equal 10 mm. The influence of cutting is positive in figure (a), while not in figure (b).

採前期間の回帰直線とほぼ重なっており、またすべての点が95%予測区間の内側に位置していることから、伐採による流出量の増加は認められない。

そこで、伐採による流量増加が認められる大規模流出以外のデータのみを用いて、月流出増加量 ΔQ^* を算出した。すなわち、図-7(a)において、伐採後期間の点と伐採前期間の回帰直線の差を ΔQ^* とした。回帰直線 (8) 式と (9) 式は $Q_A = 14.35$ で交点をもつため、 $Q_A < 14.35$ の月は (8) 式を、 $Q_A \geq 14.35$ の月は (9) 式を $\hat{Q}_B$ の推定に用いた。

算出された ΔQ^* を表-2 に示した。 ΔQ^* の最大値は2001年10月の54.7 mm、最小値は2000年2月の3.6 mm/month、平均値と標準偏差は $26.1 \pm 12.7 \text{ mm}$ であった。また ΔQ^* の年合計値は平均で313.3 mm/year となった。

ΔQ と ΔQ^* を比較すると、 $\Delta Q > \Delta Q^*$ である月よりも $\Delta Q < \Delta Q^*$ である月の方が多く、特に2000年3月および2000年7月では ΔQ に対して ΔQ^* の方が大きく上回っている。そのため平均値や年合計値では ΔQ^* の方が値が大

図-8. 伐採による月流出増加量 ΔQ^* と月降水量の関係

Relationship between increase in monthly water yield after cutting ΔQ^* and monthly precipitation.

図-9. 月降水量と月流出増加量 ΔQ^* の関係の季節変動

Seasonal variation of relationship between increase in monthly water yield after cutting ΔQ^* and monthly precipitation.

(11) 式は11～2月のデータに対する回帰直線、(12) 式は7～8月のデータに対する回帰直線。

Equation (11) is a regression line for Nov~Feb, Eq. (12) is a regression line for Jul~Aug.

きくなっている。

ΔQ^* と月降水量との関係を図-8 に示した。 ΔQ^* と月降水量の相関係数は0.82であった。

続いて、 ΔQ^* と月降水量の関係の季節変動を調べた。図-6においては7月と8月を別のグループとして扱ったが、図-8では7, 8月がほぼ1本の直線上にあるので一つのグループとして扱うこととした。他の月は図-6と同じとした。結果を図-9に示す。

図-9において、 ΔQ^* と月降水量の関係は全体的に図-6における ΔQ と月降水量の関係と似ている。すなわち、どのグループも月降水量が大きいほど ΔQ^* も大きいという

傾向があるが、同じ降水量に対する ΔQ^* の大きさは 11~2 月のグループが最も大きく、以下 3~6 月および 9~10 月、7~8 月の順に大きい傾向が見られる。季節進行の観点からいうと、11~2 月から 7~8 月にかけては降水量当たりの ΔQ^* は季節の進行とともに小さくなっていき、7~8 月から 11~2 月にかけては逆に大きくなっていくという周期変動がみられる。

なお図-9 に示した直線は、上側の実線が 11~2 月のグループ、下側の点線が 7~8 月のグループに対する回帰直線で、それぞれ

$$11\sim 2 \text{ 月}) \Delta Q^* = 0.1503 P + 4.97 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.79) \quad (11)$$

$$7\sim 8 \text{ 月}) \Delta Q^* = 0.07548 P + 2.29 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.97) \quad (12)$$

である。

V. 考 察

1. 袋山沢流域の流出特性と水収支

流域の水収支を論じる場合、考慮すべき点として、深部浸透や漏水などによって量水堰に捕捉されずに流域外に流出する水分と、降水が溪流に流出するまで流域内部に一時的に滞留する流域貯留水分がある。

一点目について、袋山沢試験地の量水堰はコンクリートを基岩に岩着させているため、堰の漏水はないと考えられるが、深部浸透については、年水収支の解析から 400 mm/year かそれ以上の規模で発生していると考えられる(真板ら, 2005)。深部浸透量は直接測定することが難しいため、伐採の前後で深部浸透量が変化したかどうかは現状では不明である。そこで本論文では、深部浸透量は伐採前後で変化しなかったものと仮定して解析を進めることとした。

次に二点目であるが、数カ月もしくはそれ以下の短い期間で水収支を論じる場合、流域貯留量の変動が無視できないと考えられるため、短期水収支法(高瀬・丸山, 1978; 鈴木, 1985)を用いて流域貯留量が等しいと見なせる水収支期間を探索したり、あるいは流出モデルを用いて流域貯留量自体を推定したりするのが通常である。しかしながら、もし流域貯留量変動が十分に小さいことが明白であるなら、短期水収支法のように特定の 2 時点を探索する必要はなく、機械的に(たとえば暦月で)水収支期間を定めてよいことになる。

ここで、袋山沢試験地の流域貯留量について検討しよう。図-3 に A 流域における月降水量と月流出量の関係を示したが、図-3 の特徴は、降水量の少ない月の点がほぼ横軸に重なることである。このことは、換言すれば、降水量が少ないときに流域貯留水分が遅れて流出する、いわゆる基底流出が、袋山沢試験地ではきわめて少ないということを意味している。ただし B 流域の基底流出は A 流域に比べてやや多く、また伐採によって増加した(真板ら, 2005)ことから、詳しく検討する必要がある。

一般に以下の水収支式が成立する。

$$P = Q + E + D + \Delta S \quad (13)$$

ただし P : 降水量, Q : 流出量, E : 蒸発散量, D : 深部浸透量, ΔS : 流域貯留量変動量。ここで、もし伐採しなかった場合に成立していたであろう水収支式(添字 f)と、伐採したことにより現に成立した水収支式(添字 c)を考えることができる。

$$P = Q_f + E_f + D_f + \Delta S_f \quad (14)$$

$$P = Q_c + E_c + D_c + \Delta S_c \quad (15)$$

P は伐採の有無によらず共通であること、また仮定により $D_f = D_c$ であることを考慮して(15)式から(14)式を引くと、

$$\Delta Q + \Delta E + \Delta(\Delta S) = 0 \quad (16)$$

ただし $\Delta Q = Q_c - Q_f$, $\Delta E = E_c - E_f$, $\Delta(\Delta S) = \Delta S_c - \Delta S_f$ 。 $\Delta(\Delta S)$ は「流域貯留量変動の伐採による変化」を意味しており、もし $\Delta(\Delta S)$ が小さいものであるならば(16)式より $\Delta E \approx -\Delta Q$ となり、伐採による蒸発散量の変化を論ずることが可能となる。

いま、基底流量の目安として低水流量を用いると、B 流域の伐採前の低水流量は平均で 0.10 mm/day、伐採後の平均は 0.32 mm/day である。30 日間まったく通減せずにこの流量が流出し続けたとすると総流出量はそれぞれ 3.0, 9.6 mm/month となる。両者の差は 6.6 mm/month であるが、実際には流量の通減があるから、伐採による B 流域の基底流出量の変化はおそらく月に数ミリ程度であろうと考えられる。

月に数ミリという値を $\Delta(\Delta S)$ の概算値とみなして ΔQ や ΔQ^* と比較すると、 ΔQ の平均は 25.2 mm/month, ΔQ^* の平均は 26.1 mm/month であるから、 ΔQ あるいは ΔQ^* に対する $\Delta(\Delta S)$ の影響は小さいであろうと考えられる。

したがって本研究においては、伐採による月流出量の増加は月蒸発散量の減少によってほぼ説明できると仮定して議論を進めることとする。

2. ΔQ^* の算出法

第 IV 章では月流出増加量の推計値として ΔQ と ΔQ^* を算出した。両者の違いは大規模流出時のデータを含めるか除外するかにある。

大きな流出が発生したときに伐採の影響が認められなくなる現象はいくつかの試験例で報告されている。この原因について、たとえば去川試験地の伐採試験を解析した竹下(1990)は、十分な降水量があると土壌水分状態等の要因に差がなくなり、流域の流出特性が直接反映されるためであるとしている。

袋山沢流域でも同様のことが考えられる。すなわち、大降雨によってある限度以上に水分が流域に供給された場合、樹冠遮断蒸発率は低くなり、また土壌は十分に湿潤化して、対照流域・処理流域の水分条件は植生の有無に関係なくほぼ等しいものになり、流出量は伐採前と同じ流出特性に従うものと考えられる。

さて、 ΔQ と ΔQ^* を比べると、全体的に ΔQ^* の方が大きく算出されたが、その原因は A, B 両流域の流出特性の違いにある。本試験地はもともと、高水時には A 流域の方が、低水時には B 流域の方が流量が多いという特性があった(真板ら, 2005)。図-7 において、大規模流出時((10)式)とそれ以外のとき((9)式)の回帰直線の違いは、そのような流出特性を反映していると考えられる。すなわち、(9)式に比べて大規模流出時の(10)式の方が、同量の Q_A に対する Q_B の値が小さい。このため、大規模流出時を含めて算出した ΔQ の値の方が大規模流出時を除外した ΔQ^* よりも小さくなったのである。

ただ、第 IV 章における解析結果をみると、 ΔQ と ΔQ^* のどちらを用いても得られる結果にはあまり違いがない。少なくとも本論文において、 ΔQ と ΔQ^* の違いは本質的な問題ではないと思われる。そこで、本試験地の流出特性を考慮すると、 ΔQ よりも ΔQ^* の方が伐採による流出増加量の推定値としてより実態を表現している数値であると考えられることから、以降の議論では ΔQ^* を考察の対象にしたい。

3. 蒸発散に対する伐採の影響の評価

月流出量の増加が月蒸発散量の減少と読み代えられることから、図-9 に示した流出増加量の季節変動を蒸発散の観点から説明することを試みる。

森林流域において、蒸発散は樹冠遮断蒸発、蒸散、地表面(林床面)蒸発の3成分から構成される。これらの成分は、降水量依存性、季節変動、伐採に対する反応、の各点でそれぞれ異なる性質がある。

まず樹冠遮断蒸発は、蒸発量が降水量にほぼ比例することが経験的に知られている(塚本編, 1992)。またスギ・ヒノキのような常緑林の場合、葉量の季節変動が比較的小さく、したがって樹体表面の付着水分量もあまり季節変動しないものと考えられる。樹体表面からの蒸発強度は熱エネルギーが多く供給される夏季に大きくなるとも考えられるが、実際に遮断量を観測すると季節変動は必ずしも明瞭ではなく(鈴木, 1983)、年間一定の蒸発強度を与えている研究例も多い(たとえば鈴木ら, 1979; 服部・近嵐, 1988)。また伐採によって樹冠遮断蒸発は減少する(服部・近嵐, 1988; 村上, 2003)。

次に蒸散は、夏に大きく冬に小さいという季節変動を示す(鈴木, 1983)。また蒸散は土壤水分不足によって抑制される可能性があるが、日本の森林においては土壤水分不足によって蒸散抑制が起こることはあまりなく(近藤ら, 1994)、その意味で蒸散の降水量依存性は小さい。また伐採によって蒸散量は減少する(村上, 2003)。

最後に地表面蒸発であるが、森林植生が存在する場合、林床面から蒸発は土壤水分よりも放射エネルギーが律速となる(服部, 1983)ため降水量依存性は小さいと考えられる。裸地の場合、土壤の保水容量を越える降雨は蒸発に寄与しないので袋山沢のような湿潤条件では裸地面蒸発の降水量依存性はやはり小さい(近藤, 1994)。季節変動は林床面・

裸地面ともに夏に大きく冬に小さい傾向を示すが、林床面蒸発は地中貯熱の影響で位相がやや遅れ、10月に最大、3月に最小となる(服部, 1983; 近藤・大岡, 1994)。また伐採によって蒸発面への純放射量が増えるため地表面蒸発が増加すると考えられる(塚本編, 1992)。

これらの性質を考慮して図-9を検討しよう。まずはじめに冬の場合について考える。蒸散および地表面蒸発は冬季にはそもそも小さいから、この2成分については植生であろうとなかろうとあまり差はない。したがって、冬季における伐採による流出増加(蒸発散減少)は樹冠遮断蒸発の減少が主因であると考えられる。

袋山沢試験地においては伐採前の植生の樹冠遮断蒸発率を実測されており、降水量に対して約17%であると報告されている(田中ら, 2005)。一方、(11)式において、11~2月の流出増加量は降水量に対して約15%の傾きである。両者の値が近いことは、冬季の流出増加が樹冠遮断蒸発の減少を主因とするという説を補強する。

次に夏の場合について考えよう。夏季は蒸散および地表面蒸発が大きくなるため、伐採による流出増加(蒸発散減少)の原因として3成分すべてを考慮しなければならない。しかしここで、樹冠遮断蒸発率が季節的にほとんど変化しないとすると、樹冠遮断蒸発の減少を原因とする分については冬季の結果を援用すればよい。すなわち、伐採による流出増加量(蒸発散減少量)における夏季と冬季の差は、蒸散および地表面蒸発の変化によるものである。

さて図-9から、夏季と冬季を比較すると、11~2月に比べて7~8月の流出増加量(蒸発散減少量)が小さいことがわかる。つまり、蒸散・地表面蒸発は伐採によって、樹冠遮断蒸発の減少を打ち消す方向、すなわち増加方向に変化したのである。ここで、蒸散は伐採によって減少し、地表面蒸発は増加することに注意すれば、蒸散の減少量よりも地表面蒸発の増加量の方が大きかったことにより、蒸散・地表面蒸発は全体として伐採により増加方向に変化したと理解できる。

4. 蒸発散変化の季節変動

以上の考察から明らかなように、図-9にみられる月流出増加量(月蒸発散減少量)の季節変動は、蒸散・地表面蒸発の変化量の季節変動に他ならない。そこで次に、蒸散・地表面蒸発の月変化量の平均値を推定してみたい。

伐採による月蒸発散の変化量 ΔE は、樹冠遮断蒸発の変化量 ΔI 、蒸散の変化量 ΔT 、地表面蒸発の変化量 ΔG の総計と等しい。すなわち、

$$\Delta E = \Delta I + \Delta T + \Delta G \quad (17)$$

このうち ΔE は、月流出増加量を月蒸発散減少量として扱えることから、月流出増加量 ΔQ^* の平均値(表-2)を符号反転すれば得られる。また ΔI は、田中ら(2005)の結果から、伐採後期間の平均月降水量の17%を与えた。 ΔT と ΔG は本論文の枠内では分離することができないので、その合計量 $\Delta T + \Delta G$ として扱うと、(17)式の残余と

表-2. 伐採による月流出増加量 ΔQ^* [mm/month]
Increase in monthly water yield after cutting ΔQ^* .

	2000	2001	2002	Mean
Jan	23.8 (15.8~31.9)	35.7 (28.0~43.4)	33.8 (26.1~41.6)	31.1
Feb	3.6 (0.2~4.0)	19.8 (11.8~27.8)	12.4 (4.5~20.4)	11.9
Mar	39.6 (31.8~47.4)	29.8 (22.0~37.6)	27.5 (19.7~35.3)	32.3
Apr	35.4 (27.7~43.2)	10.9 (2.8~18.9)	14.7 (11.4~18.0)	20.3
May	26.4 (18.6~34.2)	27.9 (20.1~35.7)	22.1 (14.1~30.0)	25.5
Jun	40.0 (31.9~48.1)	20.2 (12.5~28.0)	35.3 (27.5~43.1)	31.8
Jul	26.7 (19.0~34.4)	4.7 (1.4~6.7)	19.2 (11.4~26.9)	16.9
Aug	4.2 (0.8~6.5)	20.9 (13.1~28.7)	21.1 (13.4~28.8)	15.4
Sep	40.7 (33.0~48.5)	39.0 (31.3~46.8)	40.3 (31.9~48.7)	40.0
Oct	31.4 (23.6~39.2)	54.7 (46.5~62.8)	32.5 (24.7~40.4)	39.5
Nov	21.2 (13.3~29.2)	39.0 (31.3~46.7)	11.7 (8.3~15.0)	24.0
Dec	6.7 (3.3~8.0)	20.4 (12.3~28.4)	46.7 (38.8~54.6)	24.6
Total	299.7	323.0	317.3	313.3

括弧内の範囲は95%信頼区間。

The 95% confidence intervals are shown in parentheses.

して算出できる。

このようにして算出した結果を図-10に示す。図-10において $\Delta T + \Delta G$ は、夏に大きく冬に小さいサインカーブ形の季節分布をしており、6~9月は特に値が大きいことがわかる。

図-10から各変化量の年積算値を求めると、 ΔE は -313.4 mm/year, ΔI は -383.7 mm/year, $\Delta T + \Delta G$ は 70.3 mm/year となる。 ΔI と $\Delta T + \Delta G$ の絶対値を比べると ΔI の方がはるかに大きい。伐採前の植生が壮齢針葉樹であったことを考えると T は I と同程度減少したと思われるが、 G の増加が大きかったため $\Delta T + \Delta G$ は比較的小さな値になったものと思われる。そのため、結果として見掛け上 ΔI が ΔE を規定している形になっている。

5. 流域間の相違の原因

図-10において、伐採による蒸発散減少量（すなわち流出増加量）は、樹冠遮断量の変化量 ΔI と、蒸散および地表面蒸発の変化量 $\Delta T + \Delta G$ の合成として説明できた。このことから、伐採による流出増加の季節性が流域間で異なるという現象には、 ΔI の季節分布の違いと $\Delta T + \Delta G$ の季節変動の違いの二つの要因が関与していると考えられる。

まず ΔI の季節分布であるが、樹冠遮断量は降水量にはほぼ比例するため、降水量の季節分布の違いが原因となって ΔI の季節分布の違いが生ずると考えられる。

一方 $\Delta T + \Delta G$ の季節変動については、 ΔT および ΔG の個々の量もさることながら、 ΔT と ΔG は伐採による変化の方向が逆であるので、両者の量的関係がより重要であると考えられる。袋山沢試験地のように $|\Delta T| < |\Delta G|$ となる流域では、流出増加量は夏季の方が相対的に少なくなるが、逆に $|\Delta T| > |\Delta G|$ となる流域では、夏季の方が流出増加量は相対的に大きくなる。すなわち、 $|\Delta T|$ と $|\Delta G|$ の大小関係によって流出増加の季節変動が正反対になる。

ΔG は斜面方位などの流域特性によって流域ごとに大きく異なると考えられる。たとえば塚本・城戸（1985）は伐採による年流出増加量を斜面方位ごとに整理した結果、北向き流域の方が南向き流域よりも増加量が大きいことを示

図-10. 伐採による蒸発散各項の月変化量

Monthly change in evapotranspiration after cutting.

ΔE , 蒸発散全体の変化量; ΔI , 樹冠遮断蒸発の変化量; $\Delta T + \Delta G$, 蒸散と地表面蒸発の変化量の合計値。算出方法はそれぞれ、 $\Delta E = -\Delta Q^*$, $\Delta I = 0.17 P$, $\Delta T + \Delta G = \Delta E - \Delta I$ ただし ΔQ^* , 流出量の変化量; P , 降水量。

ΔE , Change in total evapotranspiration; ΔI , Change in canopy interception; $\Delta T + \Delta G$, Sum of the change in transpiration and soil surface evaporation. The following equations are used for the calculation, respectively, $\Delta E = -\Delta Q^*$, $\Delta I = 0.17 P$, $\Delta T + \Delta G = \Delta E - \Delta I$, where ΔQ^* , Change in water yield; P , Precipitation.

し、服部（1992）はこの現象を斜面方位による地表面蒸発量の差異として解釈している。同様のことは月流出増加量についても起こり得ると考えられ、伐採による流出増加の季節変動が流域ごとに異なる原因の一つとして ΔG の差異があるものと思われる。

ただ、袋山沢試験地での結果では、 ΔG は ΔT とほとんど相殺されてしまい、伐採による流出増加の季節変動に対する決定力はあまりない。他の流域でも同様であるとする、 ΔG の流域間の差異が伐採による流出増加の季節変動の差異に対してどの程度の影響をもつのかは不明である。ただ少なくとも本研究の結果は、湿潤な閉鎖針葉樹林を皆伐した場合、伐採後の地表面蒸発量は伐採前の蒸散量に見合うくらい大きいことを示しており、伐採による流出量変化の議論において地表面蒸発量の変化を無視できないことを示唆している。

わが国では森林は樹冠が閉鎖している場合が多いが、植生の立木密度や LAI が小さい北方林では地表面蒸発が蒸発散の中で大きな比重を占めていることが報告されている (Baldocchi *et al.*, 2000)。 ΔT や ΔG の値は植生条件や間伐率などによって当然異なると考えられるから、本研究の結果が他流域でも妥当するものであるかどうかは現時点では不明である。今後の研究で明らかにされることを期待したい。

VI. ま と め

東京大学千葉演習林袋山沢試験地で行われた森林伐採試験を対象に、伐採による月流出量の変化を解析した結果、以下のことが明らかとなった。

1) 伐採によって月流出量は増加した。増加はすべての

月で5%水準で有意であった。月流出増加量は月ごとにばらつきが大きく、値の範囲は3.6~54.7 mm/monthで、平均で26.1 mm/monthであった。

2) 月流出増加量は月降水量と強い正の相関があった(相関係数0.82)。また月流出増加量と月降水量の関係には季節変動がみられた。同量の月降水量に対する月流出増加量は夏季(7, 8月)が最小で、冬季(11~2月)が最大であった。

3) 月流出増加量には降水量依存性と季節依存性がみられたが、降水量依存性は樹冠遮断蒸発の降水量依存性由来し、季節依存性は蒸散・地表面蒸発の季節依存性由来すると考えられた。また同量の降水に対する月流出増加量が夏よりも冬の方が大きいことは、蒸散量の減少量よりも地表面蒸発の増加量の方が大きいことが原因であると考えられた。

4) 伐採による蒸発散の月変化量(ΔE)を、樹冠遮断蒸発の月変化量(ΔI)と、蒸散・地表面蒸発の月変化量($\Delta T + \Delta G$)に分離することができた。その結果、 ΔI は $\Delta T + \Delta G$ に比べてはるかに大きく、 ΔE の季節性は見掛け上ほとんど ΔI の季節性によって規定されることがわかった。

本研究は東京大学千葉演習林との共同研究として進められたものである。観測施設の建設や伐採施業を始め長期にわたる千葉演習林の協力に感謝し、歴代の千葉演習林長・職員・技官の方々に篤く御礼を申し上げる。また袋山沢試験地の立ち上げに尽力された太田猛彦先生(現東京農業大学)、継続的な流量観測と資料の蓄積を精力的に行った白木克繁氏(現東京農工大学)、蔵治光一郎氏(現東京大学愛知演習林)ほか、研究室関係者の方々の多大な努力に対して謝意を表す。

なお本研究の一部は、第117回日本森林学会大会で既に発表したものである。

引用文献

- 阿部敏夫・谷 誠(1985) 松くい虫による松枯れが流出に及ぼす影響. 日林誌 67: 261-270.
- Baldocchi, D., Kelliher, F.M., Black, T.A., and Jarvis, P. (2000) Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. *Global Change Biol.* 6: 69-83.
- 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. *J. Hydrol.* 55: 3-23.
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., and Vertessy, R.A. (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. Hydrol.* 310: 28-61.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., and Richard, D. (2005) The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *J. Hydrol.* 301: 235-249.
- 遠藤泰造(2004) 森林の水源涵養機能に関する論争史 (I). 水利科学 268: 54-88.
- Harr, R.D., Levno, A., and Mersereau, R. (1982) Streamflow changes

- after logging 130-year-old douglas fir in two small watersheds. *Water Resour. Res.* 18: 637-644.
- 服部重昭(1983) ヒノキ林における地面蒸発量の季節変化. 日林誌 65: 9-16.
- 服部重昭(1992) 林況と蒸発散量の関係. (森林水文学. 塚本良則編, 文永堂出版, 東京). 96-102.
- 服部重昭・近嵐弘栄(1988) ヒノキ林における間伐が樹幹遮断に及ぼす影響. 日林誌 70: 529-533.
- 服部重昭・志水俊夫・荒木 誠・小杉賢一郎・竹内郁雄(2001) 森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方 (I). 水利科学 45 (3): 1-40.
- Hibbert, A.R. (1967) Forest treatment effects on water yield. In *International Symposium on Forest Hydrology*. Soppe, W.E. and Lull, H.W. (eds.), Pergamon Press, Oxford, 527-543.
- 蒲谷 肇・佐々木潔州・軽込 勉・山本博一・佐倉詔夫(2001) 70年生スギ・ヒノキ人工林の皆伐に伴う植生の変化とシカ防護柵設置の効果. 日林関東支論 53: 236-237.
- 近藤純正(1994) 裸地面蒸発量の土壌種類と年降水量への依存性. 天気 41: 525-535.
- 近藤純正・大岡浩明(1994) 裸地面蒸発の季節変化の観測. 農業気象 50: 101-107.
- 近藤純正・中島健雄・渡辺 力(1994) 森林流域貯留水量の蒸発散抑制の考察. 水水 7: 402-410.
- 蔵治光一郎(2003) 森林の緑のダム機能(水源涵養機能)とその強化に向けて. 76 pp, 日本治山治水協会, 東京.
- 真板英一・鈴木雅一・太田猛彦(2005) 新第三紀層流域における70年生スギ・ヒノキ林伐採による年流出量の変化. 日林誌 87: 124-132.
- 村上茂樹(2003) 森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係—水源林管理への応用に向けて—. 水利科学 46(6): 1-28.
- 中野秀章(1971) 森林伐採および伐跡地の植被変化が流出に及ぼす影響. 林試研報 240: 1-251.
- Robinson, M., Cognard-Plancq, A.-L., Cosandey, C., David, J., Durand, P., Führer, H.-W., Hall, R., Hendriques, M.O., Marc, V., McCarthy, R., McDonnell, M., Martin, C., Nisbet, T., O'Dea, P., Rodgers, M., and Zollner, A. (2003) Studies of the impact of forest on peak flows and baseflows: a European perspective. *For. Ecol. Manage.* 186: 85-97.
- 白井純郎・星川吉之助(1960) 竜の口山水源涵養試験第5回報告 主として最大流量の林相別比較について. 林試研報 124: 105-156.
- 鈴木雅一(1983) 降雨-流出過程における森林の影響. ハイドロロジー 13: 1-10.
- 鈴木雅一(1985) 短期水収支法による森林流域からの蒸発散量推定. 日林誌 67: 115-125.
- 鈴木雅一・加藤博之・谷 誠・福嶋義宏(1979) 桐生試験地における樹冠通過雨量・樹幹流量・遮断量の研究 (II) 遮断量の解析. 日林誌 61: 391-398.
- 高瀬恵次・丸山利輔(1978) 水収支法による季別流域蒸発散量の推定. 農土論集 76: 1-6.
- 竹下 幸(1990) 流域の全面積および一部を皆伐した後の増水流量の変化について. 日林論 101: 601-602.
- 田中延亮・蔵治光一郎・白木克繁・鈴木祐紀・鈴木雅一・太田猛彦・鈴木 誠(2005) 袋山沢試験流域のスギ・ヒノキ壮齡林における樹冠通過雨量, 樹幹流量, 樹冠遮断量. 東大演報: 113: 197-240.
- Thomas, R.B. and Megahan, W.F. (1998) Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion. *Water Resour. Res.* 34: 3393-3403.
- 塚本良則編(1992) 森林水文学. 319 pp, 文永堂出版, 東京.
- 塚本良則・城戸 毅(1985) 森林伐採による年流出量の増加について. 水利科学 161: 26-38.
- 塚本良則・太田猛彦(1984) 水管理のための森林施業序論. 水利科学 158: 28-61.