

落葉広葉樹林の伐採に伴う年間流出量の増加

誌名	水利科学
ISSN	00394858
巻/号	333
掲載ページ	p. 114-126
発行年月	2013年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



落葉広葉樹林の伐採に伴う年間流出量の増加 ——常緑針葉樹林との比較——

小 松 光

目 次

- I. はじめに
- II. 試験地
- III. 方法
 - 1. 年間流出量データの数値化
 - 2. 伐採による年間流出量増加の算出
 - 3. 常緑針葉樹林との比較
- IV. 結果・考察
 - 1. 年間流出量データの数値化
 - 2. 伐採による年間流出量増加の算出
 - 3. 常緑針葉樹林との比較

I. はじめに

森林流域における植生変化は、流域からの流出量を変化させ、人間にとって利用可能な水資源量を変化させることがある (Fahey and Jackson, 1997; Vertessy *et al.*, 2001)。したがって、植生変化による流出量の変化を理解・予測する理論を築くことは、森林水文学における基本的な課題の一つである。

これまでの森林水文学の通説によれば、「落葉広葉樹林は常緑針葉樹林よりも年間蒸発散量が小さいため、落葉広葉樹林を伐採した場合の年間流出量の増加は、常緑針葉樹林の場合よりも小さい」という (小松ら, 2005; 小松, 2010)。このことは、「落葉広葉樹林から常緑針葉樹林 (／常緑針葉樹林から落

(京都大学白眉センター・京都大学大学院農学研究科特定准教授)

葉広葉樹林)への転換が、年間流出量を減少(／増加)させる」, ということの意味する。日本においては、この通説をもとに、戦後行われた落葉広葉樹林から常緑針葉樹林(スギ林やヒノキ林など)への転換が、水資源を減少させるものとして批判され、また、常緑針葉樹林から落葉広葉樹林への再転換が推奨されてきた(塚本, 1998; 蔵治, 2003)。

「落葉広葉樹林は常緑針葉樹林よりも年間蒸発散量が小さい」、あるいは、「落葉広葉樹林を伐採した場合の年間流出量の増加は、常緑針葉樹林の場合よりも小さい」という通説は、海外の研究結果(Swank and Douglass, 1974; Bosch and Hewlett, 1982)に基づくものである。Swank and Douglass (1974)は、米国アパラチア山脈の流域において、落葉広葉樹林の伐採とその後に植栽された常緑針葉樹林の成長に伴う年間流出量の変化を観測した。年間流出量は、落葉広葉樹林の伐採によっていったん増加したが、常緑針葉樹林の成長に伴い減少し、最終的には落葉広葉樹林の時期よりも小さくなった。このことは、常緑針葉樹林による年間蒸発散量が、落葉広葉樹林よりも大きかったことを意味している。Bosch and Hewlett (1982)は、森林伐採に伴う年間流出量の増加を計測した事例を収集したものである。彼らは、得られた多数のデータについて、森林伐採面積(流域面積で規格化されている)と年間流出量の増加の間に正の相関が認められたことを報告している。Bosch and Hewlett (1982)はさらに、この相関関係を落葉広葉樹林と常緑針葉樹林に分けて解析し、森林伐採面積と年間流出量の関係に対する回帰直線の傾きが、常緑針葉樹林において落葉広葉樹林よりも若干大きいことを報告した。Bosch and Hewlett (1982)は、その論文において、この回帰直線の傾きの違いをあまり重要視していないが、塚本(1992, 1998)や服部ら(2001)は、この回帰直線の傾きの違いを、常緑針葉樹林の蒸発散が落葉広葉樹林よりも大きいことの証左として扱っている。

近年、「落葉広葉樹林は常緑針葉樹林よりも年間蒸発散量が小さい」、あるいは、「落葉広葉樹林を伐採した場合の年間流出量の増加は、常緑針葉樹林の場合よりも小さい」という通説を再考する論文(Komatsu *et al.*, 2011)が発表されている。Komatsu *et al.* (2011)は、落葉広葉樹林と常緑針葉樹林を比較するにあたって、降水の季節性を考慮することを提案している。Swank and Douglass (1974)は、落葉広葉樹林と常緑針葉樹林の年間蒸発散量の違いが、主に冬季の遮断蒸発量の違いによるものと考えている。たしかに、落葉広葉樹

林は冬季に落葉しているがゆえに、冬季の遮断蒸発量が極めて小さい。一方で、常緑針葉樹林は冬季も着葉しているため、遮断蒸発量が小さくないと思われる。しかし、もし冬季に降水量自体が小さいのであれば、常緑針葉樹林においても、冬季の遮断蒸発の絶対量は小さく、冬季の遮断蒸発量が年間蒸発散量に占める割合が極めて小さい、ということも考えられる。そうであるならば、通説は次のように改訂されるべきである (Komatsu *et al.*, 2011)。冬季降水量が大きい場所では、落葉広葉樹林の年間蒸発散量は常緑針葉樹林よりも小さい。冬季降水量が小さい場所では、落葉広葉樹林と常緑広葉樹林の年間蒸発散量の違いは顕著ではない。

この新たに提案された仮説を、計測データによって検証する試みは開始されており、今のところ仮説に整合的な結果が得られている。Komatsu *et al.* (2011) は、日本において得られる森林伐採に伴う年間流出量の増加のデータについて、落葉広葉樹林と常緑針葉樹林の比較を行った。落葉広葉樹林におけるデータとしては、冬季に降水量の多い釜淵試験地 (山形県) のものと、冬季に降水量の少ない常陸太田試験地 (茨城県) のものの2つがある。常緑針葉樹林については、8流域から9のデータが得られており、常緑針葉樹林伐採に伴う年間流出量の増加は、年間降水量と相関を持つことが確認されている。釜淵試験地において計測された年間流出量の増加は、年間降水量が同程度の他試験地における常緑針葉樹林伐採の場合より小さかった。一方、常陸太田試験地において計測された年間流出量の増加は、年間降水量が同程度の他試験地における常緑針葉樹林伐採の場合と同程度であった。これらの結果は、新たに提案された仮説に整合するものである。

しかしながら、Komatsu *et al.* (2011) が仮説検証に用いた落葉広葉樹林のデータはわずか2つであり、より多くのデータによる検証が不可欠である。とくに重要なのは、釜淵試験地、常陸太田試験地と異なる冬季降水量の試験地におけるデータによる検証である。なぜなら、新たに提案された仮説は、冬季降水量の多寡によって、落葉広葉樹林と常緑針葉樹林の関係性が変化する、と主張するものだからである。

筆者は文献調査によって、落葉広葉樹林の伐採前後を通じて流出量を計測した事例 (浜端, 2005) を発見した。この事例は滋賀県の朽木試験地におけるものであり、朽木試験地では冬季降水量が釜淵試験地ほどは多くなく、常陸太田試験地より多い。そこで、本研究では、浜端 (2005) に示されているデータを

もとに、落葉広葉樹林伐採に伴う年間流出量増加を対照流域法によって算出し、得られた値を常緑針葉樹林のものと比較することで、朽木試験地のデータと、新たに提案された仮説との整合性を検討する。

II. 試験地

朽木試験地は、滋賀県北西部の朽木村麻生（現在は、高島市朽木麻生）に位置している（浜端，2005）。朽木村麻生の緯度，経度は，Google Map (<https://maps.google.co.jp/>) によると北緯35.4度，東経135.9度である。

朽木村麻生の隣接2流域において，流出量の計測が1992年から1999年まで行われた。両流域の面積は1.9haと1.1haである。浜端（2005）に示されている地形図によると，標高は両流域ともに210mから310m程度である。

両流域の植生は，流出量計測が開始された1992年，ともにコナラ・クリの優先する落葉広葉樹林であった。1996年に一方の流域（処理流域，面積1.9haの方）において皆伐が行われ，スギが植栽された。もう一方の流域（対照流域，面積1.1haの方）は，流出量計測が終了した1999年まで，植生に対して人為的な処理は行われなかった。なお，1996年の伐採前の時点において，処理流域，対照流域の地上部現存量は，それぞれ88.5t ha⁻¹，98.5t ha⁻¹であった。

当試験地の年間降水量は，1995年から1999年の5年間の平均で2,477mmであった（IV. 1. 参照）。降水量の季節性について，浜端（2005）に記述はな

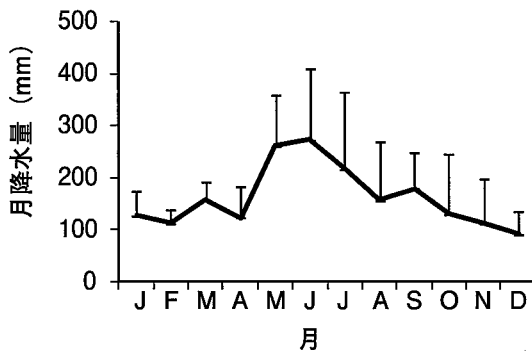


図1 南小松において計測された降水量の季節変化。データは1995年から1999年の平均値であり，バーは標準偏差である

い。ただし、当試験地の近くには、気象庁の観測地点、南小松（北緯35.2度，東経136.0度，標高80m）が存在する（<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>）。月降水量は、夏季に大きく冬季に小さいという点で太平洋側の気候の特徴を持つものの、冬季においても月降水量は100mm程度あることから、日本海側の気候の影響も受けているものと思われる（図1）。このような降水の季節性は、釜淵試験地と常陸太田試験地の中間的なものと考えることができる。釜淵試験地では、そもそも月降水量が夏季に大きく冬季に小さいという季節性を示さない（Komatsu *et al.* (2008) の図4a）。冬季においても夏季と同程度の降水量があり、その値は200mm前後である。常陸太田試験地については、Murakami *et al.* (2000) などの既存文献を見る限り、月降水量データが示されていないが、近隣の気象庁の観測地点（常陸大宮）のデータに基づくと、月降水量は、夏季に大きく冬季に小さいという点で太平洋側の気候の特徴を持ち、冬季の月降水量は50mm以下である。

朽木試験地の年間平均気温については、浜端（2005）に記述がない。南小松においては気温が計測されており、当試験地での計測期間（1992年から1999年）の年間平均気温は14.4℃である。当試験地と南小松の標高差を考慮し、気温逓減率を $0.006^{\circ}\text{C m}^{-1}$ と仮定すると、当試験地の流域最上部と最下部における年間平均気温はそれぞれ13.0℃と13.6℃となる。

Ⅲ. 方法

本研究の解析は3つの段階からなる。それぞれ、1. 年間流出量データの数値化，2. 伐採による年間流出量増加の算出，3. 常緑針葉樹林との比較，である。

1. 年間流出量データの数値化

伐採による年間流出量増加の算出には、処理流域と対照流域における年間流出量データ（それぞれ、 Q_t 、 Q_c とする）が必要である。浜端（2005）には、これらのデータが図中（浜端（2005）の図5）に棒グラフで示されているのみであり、数値として与えられているわけではない。そこで、筆者は、この図をスキャナで取り込みデジタル画像とし、画像上の棒グラフをData Picker（Blue Moon Factory, <http://hp.vector.co.jp/authors/VA019223/index.htm>）により

数値化した。なお、浜端（2005）の図5には、年間降水量 P のデータも示されているので、それについても Q_i 、 Q_c と同様の方法で数値化した。

2. 伐採による年間流出量増加の算出

Q_i 、 Q_c のデータに対して、対照流域法の基本的な解析法（真板ら，2005；Komatsu *et al.*, 2008）を適用し、伐採による Q_i の変化（ ΔQ_i ）を次の手順で計算した。まず、処理前のデータを用いて、 Q_i と Q_c の関係式を作成する。関係式は、

$$Q_i = a Q_c + b \quad (1)$$

で表現した。ここで、 a と b は経験定数である。この式に、処理後の Q_c を入力することで、伐採がなされなかった場合に想定される Q_i の値が得られる。実際に計測された Q_i と、伐採がなされなかった場合に想定される Q_i の差をとることにより、 ΔQ_i が算出される。

なお、朽木試験地では、浜端（2005）を含め、これまでいくつかの先行研究（草加・浜端，1996；金子・浜端，2002）があるが、そのいずれにおいても ΔQ_i が計算されていない。これは、先行研究の重点が、物質循環に置かれていたためであると思われる。

3. 常緑針葉樹林との比較

常緑針葉樹林における ΔQ_i は、Komatsu *et al.*（2011）にまとめられているものを用いた。Komatsu *et al.*（2011）は、日本のさまざまな流域において ΔQ_i を算出している。常緑針葉樹林の伐採については9事例が得られている。9事例のうち、対照流域法によるものは3事例、単独流域法によるものが6事例である。なお、この中には、常緑針葉樹林の成立による事例も含まれている。常緑針葉樹林の成立による事例は、既存研究（Sahin and Hall, 1996; Stednick, 1996）にならい、森林成立による年間流出量の減少が、皆伐による年間流出量の増加と同じであると仮定することにより、解析に加えられている。

解析では、まず、前段落で説明した9事例のデータを P と ΔQ_i のグラフに落とし、常緑針葉樹林における P と ΔQ_i の正の相関を確かめる。そののち、同グラフに朽木試験地の ΔQ_i を落とすことで、朽木試験地の ΔQ_i を常緑針葉樹林のものと比較する。なお、 ΔQ_i は伐採後の各年について算出されるが、ここでの解析では、先行研究（Adams and Fowler, 2006; Komatsu *et al.*, 2011）になら

い、伐採後数年間の ΔQ_t の最大値を用いることにする。

IV. 結果・考察

1. 年間流出量データの数値化

浜端 (2005) の図5から、 P 、 Q_t 、 Q_c は表1のように数値化された。表1をもとに、 P 、 Q_t 、 Q_c の時系列を示したのが、図2である。 Q_t と Q_c は、互いにそ

表1 計測期間 (1992年から1999年) における年間降水量 (P)、処理流域の年間流出量 (Q_t)、対照流域の年間流出量 (Q_c)

西暦 (年)	P (mm)	Q_t (mm)	Q_c (mm)
1992		1084	1606
1993		1297	2013
1994		871	1239
1995	2303	1181	1819
1996	1955	929	1316
1997	2477	1413	1645
1998	2574	1316	1723
1999	2381	1297	1645

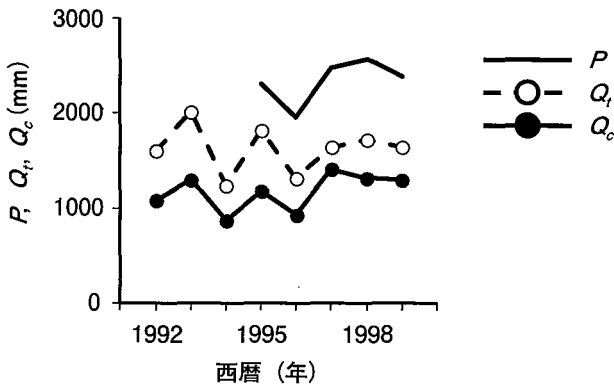


図2 計測期間 (1992年から1999年まで) の年間降水量 (P)、処理流域の年間流出量 (Q_t)、対照流域の年間流出量 (Q_c)

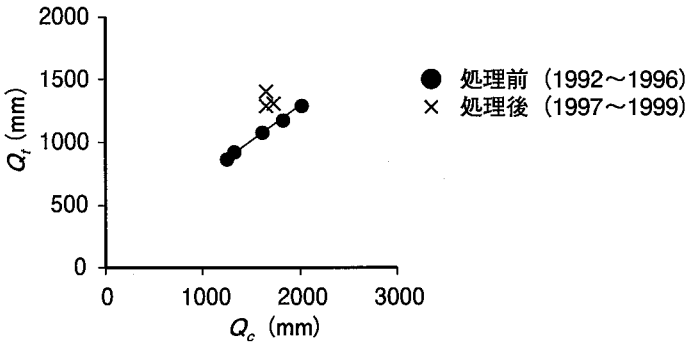


図3 対照流域の年間流出量 (Q_c) と処理流域の年間流出量 (Q_t) の関係。実線は処理前のデータに対する回帰直線

の年々変動が対応している。 P については、1995年以降のデータがあるが、 Q_t と Q_c の年々変動は、年間降水量の年々変動とも対応している。

P から年間流出量を差し引いた年間損失量は、 P のデータが得られる1995年から1999年の平均で、処理流域において708mm、対照流域において1,111mmであった。近畿・北陸地方の年間平衡蒸発量は800mmから900mm程度であり (Komatsu *et al.*, 2010)、対照流域における損失量はこの値を大きく超える。このことは、対照流域において、計測用の堰を通らない流出成分が小さくない可能性を示唆するが、本研究に算出される ΔQ_t に大きな誤差が存在することを意味するわけではない。以下に述べるように、 Q_t と Q_c の間に十分強い相関が認められるからである。

2. 伐採による年間流出量増加の算出

図3は、処理前後それぞれにおける Q_c と Q_t の関係を示している。処理前において、 Q_c と Q_t の間には、有意な正の相関が認められた ($R=0.999$, $p < 0.001$, ピアソンの相関係数の検定)。処理前のデータに対して式(1)を適用し、 a と b を最小二乗法によって決定すると、その値は $a=0.535$, $b=217$ (mm)となった。 R^2 は0.998であった。なお、図3において、式(1)より処理後のデータが上に位置していることから、 Q_t が処理によって増加したことが見て取れる。

図4(a)は、計測された Q_t と式(1)より計算された Q_t の時系列を、図4

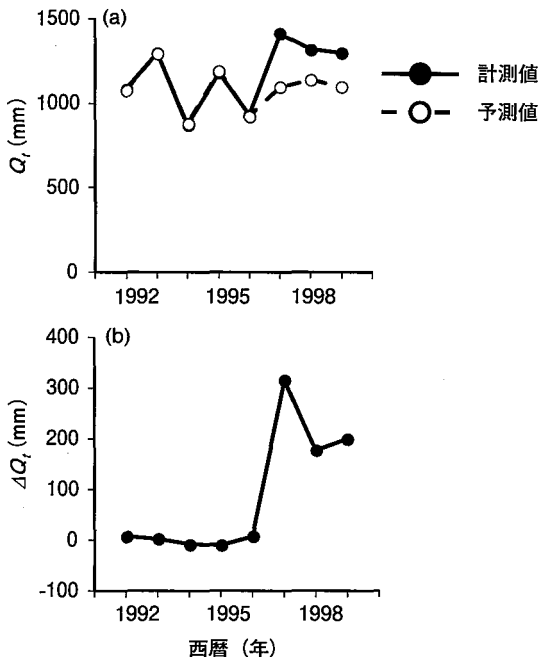


図4 (a) 計測された処理流域の年間流出量 (Q_t) と式 (1) より計算された Q_t , (b) それらの差から計算される, 伐採による年間流出量の増加 (ΔQ_t)

(b) は, それらの差から計算される ΔQ_t の時系列を示している。処理前である 1996 年までは, ΔQ_t がほぼゼロであるのに対し, 処理後である 1997 年以降, ΔQ_t は正になっている。1997 年, 1998 年, 1999 年における ΔQ_t は, それぞれ 316mm, 178mm, 200mm であった。

本研究で算出された ΔQ_t の精度は, 対照流域法による先行研究と同程度, 単独流域法による先行研究より高いものと思われる。対照流域法により得られる ΔQ_t の精度は式 (1) の適合度に依存する。本研究で得られた式 (1) の R^2 は, 対照流域法を用いた他の研究 (真板ら, 2005; Komatsu *et al.*, 2008) と同程度だった。一方, 単独流域法を使った場合, P と年間流出量の関係式を作ることになるが, その場合, R^2 は大きくても 0.95 程度である (Ruprecht and Schofield, 1989; Stoneman, 1993)。

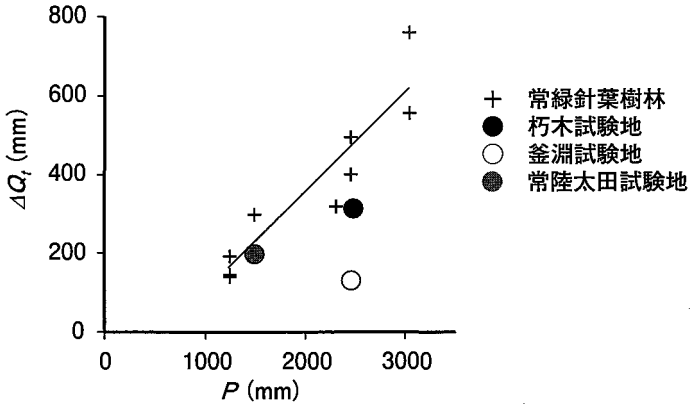


図5 年間降水量 (P) と伐採による年間流出量の増加 (ΔQ_i) の関係。実線は常緑針葉樹林に対する回帰直線。朽木試験地のデータ以外は Komatsu *et al.* (2011) より得た

3. 常緑針葉樹林との比較

図5は、常緑針葉樹林と落葉広葉樹林流域における P と ΔQ_i (の最大値) の関係を示したものである。常緑針葉樹林のデータについて、有意な正の相関が認められた ($R=0.925$, $p < 0.001$, ピアソンの相関係数の検定)。この相関関係を最小二乗法で回帰すると $\Delta Q_i = 0.253P - 151$ となる。ここで、 ΔQ_i と P の単位は mm であり、 R^2 は 0.856 であった。

朽木試験地における ΔQ_i ($=316\text{mm}$) は、常緑針葉樹林に対する回帰直線より下に位置し、その差は 161mm だった。この値は、朽木試験地と同様に落葉広葉樹林の伐採の事例である釜淵試験地の値 (337mm) よりも小さく、常陸太田試験地の値 (25.5mm) よりも大きかった (図5)。朽木試験地の冬季降水量が釜淵試験地より小さく、常陸太田試験地より大きいことを考えると、以上の結果は、新たに提案された仮説に整合的である。

ただし、本研究をもって仮説が十分に検証されたことにはならない。そもそも流域試験において得られる ΔQ_i のデータは、雑多な要因に影響されうるものである。このことは、隣接する流域において同じ処理を行ったとしても、ときに異なった ΔQ_i が得られることがある (Adams and Fowler, 2006) ことから了解される。

したがって、「十分な検証」というのは、次のようなものと筆者は考える。落葉広葉樹林における ΔQ_t データを、さまざまな冬季降水量の流域において得る。データを、冬季降水量が異なるグループごとに分けて、 P と ΔQ_t のグラフ(図5)にプロットする。冬季降水量が小さいグループは、常緑針葉樹林に対する回帰直線に沿ってプロットされ、冬季降水量の大きいグループは、常緑針葉樹林に対する回帰直線より下にプロットされる。常緑針葉樹林の回帰直線と落葉広葉樹林の回帰直線の間に、冬季降水量が小さい場合には有意差が認められず、冬季降水量が大きい場合のみ有意差が認められる。このような結果が得られたとき、仮説は「十分な検証」を受けたことになる。以上の解析のためには、おそらく落葉広葉樹林における ΔQ_t データが20事例ほど必要なのではないかと思われる。

上に説明した「十分な検証」に照らして考えるならば、本研究は、 ΔQ_t データを1事例加えたにすぎず、仮説検証の歩みをわずかに一歩進めただけである。したがって、本論の重要性は、仮説検証の段階を進めたところにあるというよりは、今後も引き続き必要とされる仮説検証に対して、その規範的方法を提示したところにあるものと考ええる。

加えて、本論のもう一つの重要性は、浜端(2005)のデータを利用可能な形に加工したところにもある。皆伐前後において流出量を計測した事例は、日本国内において少なくないが、そのうち落葉広葉樹林を対象としたものは、浜端(2005)のデータを含めて3事例しかない。さらに言えば、浜端(2005)の場合は対照流域がとられているが、そのような事例は数例にとどまる(真板ら, 2005; Komatsu *et al.*, 2008)。その他の多くの事例は、対照流域がとられていないため、精度の相対的に低い単独流域法を適用せざるを得ない(Komatsu *et al.*, 2011)。このことを考えるならば、既存研究(真板ら, 2005; 真板・鈴木, 2007; Komatsu *et al.*, 2007, 2011)でほとんど引用されておらず、十分に認知されていなかった浜端(2005)のデータを、他の研究に利用可能な形に加工したことも、森林水文学に対する本論の貢献である。

謝辞

本研究を行うにあたって、科学研究費補助金 No. 20780119, JST 戦略的創造研究推進事業「荒廃人工林の管理による流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」より援助をいただきました。ここに記して感謝いたします。

す。

引用文献

- Adams, K.N., Fowler, A.M. (2006) Improving empirical relationships for predicting the effect of vegetation change on annual water yield. *J. Hydrol.* 321: 90-115.
- Bosch, J.M., 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.
- Fahey, B., Jackson, R. (1997) Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agric. For. Meteorol.* 84: 69-82.
- 浜端悦治 (2005) 森林伐採と溪流水—朽木における森林伐採実験から—。 *琵琶研所報*22: 31-39.
- 服部重昭・志水俊夫・荒木誠・小杉賢一朗・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 (Ⅱ) — 湯水地域上流森林整備指針策定調査報告書—。 *水利科学*260: 48-74.
- 金子有子・浜端悦治 (2002) 環境負荷の軽減を図るための森林管理方法の検討。 *琵琶研所報*21: 43-45.
- 小松光 (2010) 森林と水資源。 *水利科学*314: 1-29.
- 小松光・澤野真治・久米朋宣・橋本昌司 (2005) 森林の特性と蒸発散量の関係。 *日林誌* 87: 170-185.
- Komatsu, H., Tanaka, N., Kume, T. (2007) Do coniferous forests evaporate more water than broad-leaved forest in Japan? *J. Hydrol.* 336: 361-375.
- Komatsu, H., Kume, T., Otsuki, K. (2008) The effect of converting a native broad-leaved forest to a coniferous plantation forest on annual water yield: a paired-catchment study in northern Japan. *Forest Ecol. Manage.* 255: 880-886.
- Komatsu H, Kume T, Otsuki K. (2010) A simple model to estimate monthly forest evapotranspiration in Japan from monthly temperature. *Hydrol. Process.* 24: 1896-1911.
- Komatsu H, Kume T, Otsuki K. (2011) Increasing annual runoff—broadleaf or coniferous forests? *Hydrol. Process.* 25: 302-318.
- 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。 76pp, 日本治山治水協会, 東京.
- 草加伸吾・浜端悦治 (1996) 朽木実験小流域における皆伐の初期影響—土壌に関する解析データ—. *琵琶研所報*16: 19-27.
- 真板英一・鈴木雅一 (2007) 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.

- 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.
- Murakami, S., Tsuboyama, Y., Shimizu, T., Fujieda, M., Noguchi, S. (2000) Variation of evapotranspiration with stand age and climate in a small Japanese forested catchment. J. Hydrol. 227: 114-127.
- Ruprecht, J. K., Schofield, N. J. (1989) Analysis of streamflow generation following deforestation in southwest Western Australia. J. Hydrol. 105: 1-17.
- Sahin, V., Hall, M. J. (1996) The effects of afforestation and deforestation on water yields. J. Hydrol. 178: 293-309.
- Stednick, J. D., 1996. Monitoring the effects of timberharvest on annual water yield. J. Hydrol. 176: 79-95.
- Stoneman, G. L. (1993) Hydrological response to thinning a small jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest catchment. J. Hydrol. 150: 393-407.
- Swank, W. T., Douglass, J. E. (1974) Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. Science 185: 857-859.
- 塚本良則 (1992) 森林水文学. 319pp, 文永堂出版, 東京.
- 塚本良則 (1998) 森林・水・土の保全. 138pp, 朝倉書店, 東京.
- Vertessy, R. A., Watson, F. G. R., O'Sullivan, S. K. (2001) Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. Forest Ecol. Manage. 143: 13-26.

(原稿受付2013年5月24日, 原稿受理2013年6月13日)