

# 森林の緑のダム機能（水源涵養機能）と その強化に向けて



(社) 日本治山治水協会

(社)日本治山治水協会平成14年度公益事業  
(平成14年度「緑と水の森林基金」助成事業)

——— 表紙写真 ———

対照流域法による試験流域の処理の様子。東京大学大学院農学生命科学研究科附属千葉演習林に1991年に設置された袋山沢試験流域で、森林理水及砂防工学研究室を中心とする研究グループが、スギ・ヒノキ林の皆伐と植林が水流出量等に及ぼす影響を総合的に評価しようとしている。

上：2000年4月（伐採1年後），シカの食害によって植物の回復がみられない。

下：2001年8月（伐採2年4ヵ月後，植林4ヵ月後），シカ柵の設置と植林を行い，緑が回復しつつある。筆者撮影。

# 森林の緑のダム機能(水源涵養機能)と その強化に向けて

蔵 治 光一郎



## まえがき

本書は、森のいわゆる「緑のダム」機能について解説したものである。「森は緑のダム」という言葉は、これまで何気なく使われてきたが、2000年に民主党の諮問委員会が「緑のダム構想」を答申、2001年に長野県の知事が「脱ダム宣言」を発表し、コンクリートのダムを作るかわりに、河川改修等に加えて森林の整備をしようと宣言して以来、にわかに政治的、社会的に脚光を浴びるようになってきた。

コンクリートのダムと森林とは、まさに対極的な存在である。地球上に森林が成立したのは、4億年も前のことであるのに対し、コンクリートのダムの歴史は100年余りに過ぎない。森林は、環境条件さえ適すれば、人間の存在に関係なく自然に形成されるが、コンクリートのダムは人間が意識的に作らなければ、存在し得ない。森林は、一度破壊されるとその再生には最低でも50年、場合によっては300年以上の年月を要するが、コンクリートのダムはそれに比べてはるかに短い年数で完成する。森林は、壊すのは簡単だが、つくるのには手間と時間がかかる。コンクリートのダムは、作るのは簡単だが、壊すのは容易でなく、完全に元に戻すことは不可能である。コンクリートのダムは、一度できてしまえば簡単に操作できるが、森林を簡単に操作することはできない。コンクリートのダムを作る際には集中的な投資を必要とするが、森林をつくっていくには、単年度の予算は少なくとも、それを継続的、長期的に投資していく必要がある。コンクリートのダムを作るには短期的かつ大量の労働力が必要だが、森林には長期的、継続的な労働力を必要とする。森林には水関係の機能以外にも無数の公益的、多面的機能がそなわっているが、コンクリートのダムはせいぜい4、5種類の機能を備えるのがやっとなのである。

このように、さまざまな意味で対極的な存在である森林とコンクリートのダムを、たとえば緑のダム機能（水源涵養機能）という単一の切り口で比較すること自体、無理があり、場合によっては無駄なことではないかとも思われる。しかし世界的には、森と水との関係は80年以上前から現実の政治的、社会的問題となっていたという事実や、日本でも昭和初期に岡山県で、ため池の水不足と上流の森林の関係について国と県の技術者間で11年間に及ぶ論争が繰り広げられたという事実は、あまり知られていない。世界には日本よりもはるかに深刻な水不足に直面している都市や地域が多くある。そのような場所では、水源林をどのように管理すれば、水資源確保と森林保全を両立できるのかという問題は、日本とは比べものにならないくらい深刻であるため、森林の機能に対して情緒を排した科学的な解明が進められ、蓄積された科学的知見を踏まえた政治的、社会的判断がなされてきた。そのために、森林と水との関係を科学的に解明することを目的とした国立の研究所を新たに設立した国もあるほどである。そ

れに対して日本では、「森は緑のダム」という言葉は科学的な裏付けなしに、情緒的、観念的に用いられてきており、その真偽、是非を巡る論争も、感情論に終始する傾向がある。森林を扱う学問で、実証的な結果を出そうとすれば極めて長い時間がかかるため、研究者は社会の急激な変化にすぐには対応できない。さらに悪いことに、世界でこれまで何が調べられ、どのような科学的知見が得られているのか、日本ではほとんど紹介されていない。

本書は、森林の緑のダム機能について、これまで世界や日本でどのような研究がなされ、どのような結果が得られているのかを整理し、紹介することによって、多くの人に森と水の関係に関する科学的理解を深めてもらい、それをもとに森と水との関係、緑のダムとコンクリートのダムについて冷静に、科学的に考えてもらいたいという目的のもとに、書かれたものである。本書に示される情報が、水源地域の森と水を巡る様々な活動のベースラインデータとなって、水源地域の森づくりに少しでも貢献することを願っている。

世界的にみれば、20世紀は森林減少の世紀であったと総括できる。しかし森林減少のスピードは鈍ってきており、今後、世界の森林面積は増加傾向に転じる可能性もある。多くの先進国が、森林面積を増加させる政策を打ち出している。その動機の一つとして、地球温暖化防止条約に規定された、二酸化炭素の排出枠取引やクリーン開発メカニズムがある。国際政治の場では、二酸化炭素を吸収し地球温暖化を遅らせる機能が、森林に現在もっとも期待されている機能である。すでに森林大国であり、森林面積を増加させる余地の少ない日本は、発展途上国での植林・森林保全活動をいっそう強化することによって、森林面積を増やし、排出枠を獲得しようとする可能性がある。海外から大量の木材、食料を輸入している日本は、自国の森とダムの問題のみならず、世界の国々の森林と水資源を巡る問題にも、無関心でいてはいけなければならないはずである。森と水との関係を巡る議論は、国内問題のみならず国際的に重要な問題であることも、本書によって多くの人に認識していただければ幸いである。

なお、森林には緑のダム機能以外にもたくさんの機能が備わっており、ある地域の森林の取り扱いを緑のダム機能に重点を置いて決められるような場合は限られている。本書のすべての議論は、そのことを前提としたうえで、あえて緑のダム機能だけを取り出して展開したものであることをはじめにお断りしたい。

平成15年3月

蔵 治 光一郎

# 目 次

## 第1章 緑のダム機能について科学的に考えよう

## 第2章 流域試験と水循環プロセス研究

### 2.1 流域試験

### 2.2 水循環プロセス研究

## 第3章 世界の流域試験とその結果

### 3.1 アメリカ

### 3.2 イギリス

### 3.3 オーストラリア

### 3.4 ニュージーランド

### 3.5 南アフリカ

### 3.6 インド

### 3.7 台湾

### 3.8 マレーシア

## 第4章 日本の流域試験とその結果

## 第5章 流域試験のまとめ

## 第6章 おわりに

—緑のダム機能強化に向けて、いま何が必要とされているか—





## 第 1 章

# 緑のダム機能について科学的に考えよう

緑のダム機能と聞いて人は何を思い浮かべるだろうか。森林に覆われた水源地域が、大雨のときに水を蓄えて洪水を防ぎ、雨が降らないときには蓄えた水をゆっくりと流してゆき、水不足、渇水するときにも豊富な水資源を我々にもたらしてくれる仕組み、いかえれば洪水を緩和し、渇水を緩和する機能を思い浮かべるだろう。森はスポンジのように水を吸い、蓄えるという表現もよく使われる。もし、森が本当にこのような機能を備えていたら、これほど人間にとって都合のよいことはない。コンクリートのダムなど本当に不要かもしれない。

しかし、現実はそれほど甘くない。森がこのような人間に都合の良い機能だけを備えていると思いきむのは、残念ながら幻想でしかないということは、すでに科学的に明らかになっている。それでも森林が人間に都合の良いような機能だけを備えているはずだと思いきむのは、非科学的な態度だと言わざるを得ない。

科学的には、森林に降った雨が川に流れ出てくるまでは、非常に複雑な経路をたどるが、その過程はおおまかに2つの現象がコントロールしていると考えられる。一つは水が水蒸気となって大気へ発散する**蒸発現象**、いま一つは水が土にしみこんでから川に流れ出るまでに数時間から場合によっては数千年もの時間がかかること、すなわち、流れの**遅延現象**である。

蒸発してしまった水は川に流れ出てこない（地球全体では水蒸気はいずれ雨となって戻ってくるが、日本の場合、雨や雪をもたらす水蒸気のほとんどは海に由来するので、陸地からの蒸発量は無視できる）ので、蒸発現象は川の水の絶対量に影響する。つまり、仮に蒸発量が多くなると、川の水の絶対量はその分、減ることになる。それに対して遅延現象は、絶対量は変わらないものの、流れに要する時間が遅れることにより、時々刻々の水量が変化する。例えば、大雨のときに遅延現象が発揮された場合は、発揮されない場合に比べて、水量の最大値は小さくなり、そのかわりに水量が減り始めたころの水量が増加すると考えられる。これを水量の**平準化機能**と呼ぶ。蒸発現象と平準化機能は、決して独立して機能しているわけではなく、密接に関連している。多量の水を蒸発させるためには、平準化機能を発揮して、流れを遅らせ、蒸発可能な水を土の中にとどめておくことが必要となるからである。森が緑のダムとしてどの程度の機能をもっているのかは、蒸発現象と平準化機能の両者を総合して判断されるべきことである。

この本で解説したい点は、現在、ほとんどが森林に覆われている日本の山を今後ど

のように取扱っていけば、緑のダム機能を強化する効果が得られるのか、という点である。日本は、その気候条件から、もともと国土のほとんどが森林に覆われている国であり、山を森林以外の状態に保つにはむしろ手間がかかるような国である、ということ的前提として話を進める。

100年前の日本の山は今よりも荒れていたことは確かであり、はげ山も広く存在した。立派な森林に覆われている今の日本の山は、間違いなく戦後の絶え間ない植林努力によって築き上げられたものであり、もしそれをせずにいたら、ニュージーランドのような、山頂まで森林を失った山々が日本の景色となっていた可能性もある。しかしはげ山は、当時の人間が必要に迫られて森林を過剰に利用したために形成されたものであり、現在人間が森林を再びはげ山にすることは考えられない以上、はげ山と森林を比べることにより緑のダム機能を評価することは、将来を考える場合には現実的でないと考えられる。また同様に、森林との比較対象としてアスファルトや芝生地などを想定することも現実的でないと考える。森林を除去して地面をアスファルトで覆うことは、都市近郊の住宅地にのみ見られる状況であり、芝生地はゴルフ場などに存在するが、多大なコストをかけてやっと維持しているものだからである。また最近では、針葉樹林と広葉樹林を比較してどちらがすぐれているかという議論が目につくが、すでに成林している針葉樹林を成林した広葉樹林に転換しようとしたら、とんでもない手間とコストと時間がかかることを見落としているのであれば、やはり現実的でない議論と言わざるを得ない。

本書で論じたいことは、緑のダムを巡る、より現実的な問題である。すなわち、日本の森林の約4割はすでにスギ・ヒノキを中心とする人工林であり、それらを急激に変化させることはできないという事実を踏まえれば、森林を切った直後や、切った後に植えた樹木が成長していく過程、あるいは何も植えずに放置し、植生が自然に回復、変化してゆく過程において、蒸発現象や平準化機能にどのような変化が生じていくのかを論じることが現実的に重要であると考えられるので、この点に焦点を絞って記述したい。もちろん、これから木を植える場合は、樹種として針葉樹か広葉樹か、あるいは常緑樹か落葉樹かという点は十分考慮する必要がある。

詳しくは第3、4章で明らかにされるが、結論を先にいうと、蒸発現象については森林を切ることが緑のダム機能にプラスの効果、森林が成長することがマイナスの効果を及ぼす。世界で森林が存在する地域を示した地図は、世界の降水量の多い地域とほぼ一致している。この事実は、森林という生物群集が他の背の低い植物に比べて水を大量に消費することを特徴とする生物であり、そもそも水が豊富にあるところにしか、存在しえないということを意味している。森林を切るということは、水が豊富な場所で水の消費者を取り除くことを意味するので、水の絶対量確保にとってはプラスの効果であり、森林の成長は、次第に水を活発に消費するようになるので、マイナス

の効果ということになる。

平準化機能については、まず、それが主に地表面に近い浅いところで起きているのか、それとも樹木の根の届かない地下深いところで起きているのかを知る必要がある。これはおおむね、流域の地質によって決まることがわかっている。ほとんどの水が地下深くへしみ込んでしまうような流域（例えば古生代、中生代に形成された古い地質の流域）では、平準化機能は樹木の根の影響が及ばないところで発揮されているので、森林を切ったり植えたりしても、大きなプラスあるいは大きなマイナスにはならない可能性が高い。

洪水の緩和（例えば、洪水ピーク時の水流出量の減少）という点からは、水がたくさん蒸発し、流れ出る水の絶対量が少なくなれば、洪水時の莫大な水の絶対量も減ることになるため、森林の活発な蒸発現象が緑のダム機能にプラスに作用する。平準化機能が地表面近くの浅いところで起きているような地質条件の場所で、森林の存在により平準化機能が発揮されれば、そのぶん洪水緩和の機能がさらに強化されることになる。しかし蒸発現象、平準化機能の両者を合算した効果にも、量的には限界があると考えられるので、大規模な洪水の場合は、その価値が相対的に小さくなってしまう可能性も否定できない。

渇水の緩和を問題にする場合には、さらにいろいろなことを考えなければならない。まず平準化機能が、渇水時まで持続するかどうか、という問題がある。水を流す時間をどれくらい遅らせているか、もしそれがせいぜい1、2週間だとすると、渇水時にまで緑のダム機能にプラスの効果とを及ぼすことは期待できない。数ヶ月間に及ぶような長期間の平準化機能を発揮する山はあるが、その場合の機能は地表面近くよりもむしろ、樹木の根の届かない地下の岩盤中などの深いところで発揮されていると考えるのが自然である。蒸発現象の観点からは、活発な蒸発に伴う水の絶対量の減少が、緑のダム機能にマイナスに作用するので、渇水時の水量にプラスの作用をもたらすには、平準化機能が渇水時にまで持続した上で、さらにそれが蒸発現象のマイナス作用を補って余りある効果を発揮していなければならない。

ここまで述べてきたことをおおまかに整理すると表1.1のようになる。

表1.1 若い森林の成長や成熟した森林の伐採が緑のダム機能に及ぼす影響

	若い森林の成長	成熟した森林の伐採
水の絶対量確保	×	○
洪水の緩和	○○または○ー	×○または×ー
渇水の緩和	×○または×ー	○○または○ー

○：プラスに働く      ×：マイナスに働く

ー：プラスでもマイナスでもない（平準化機能が樹木の根の届かないところで発揮される場合。あるいは、平準化機能が発揮される時間が渇水発生までの時間より短い場合）

このように、緑のダム機能を科学的に議論する基本的な枠組みはすでにほぼ出来上がっており、強化が期待される機能それぞれについて、森の取り扱い方によって期待に応えられる場合とそうでない場合、どちらともいえない場合に分類できることがわかる。にもかかわらず「学説が定まっていない」と（国土交通省のホームページで）いわれてしまう理由は、（研究者の側にこのような成果を発表、宣伝する努力が足りないことももちろんあるが）現象の強い地域性と気候の年々変動、長い時間スケールの3点にあると筆者は考えている。地質、地形、気候、この3条件だけをとっていても日本は非常に多様であり、一つとして同じ条件を備えている流域はない。ある場所で起こっている現象をつぶさに測定し、結論を出しても、隣の流域は違うかもしれない。また、気象の年々変動も大きく、ある10年間のデータと次の10年間のデータでは、雨の降り方が違ったために違う結論が出てしまったということがおきる。さらに問題は、森林という成長に何十年、何百年もかかる生物の集合体が相手だということである。森林の除去による影響を調べることは比較的短時間で可能だが、森林の成長による影響を調べるには途方もない時間がかかる。森林は陸上で最も複雑な生態系であり、模型などを用いて実験室内で現象を完全に短時間で再現するというようなことは不可能である。

このような事情のため、せっかちな現代社会の要請に対して、研究のペースは必然的に遅れがちとなり、学説が定まっていないといわれる状況を招いてしまっている。しかし研究がまったく進んでいないのかということではなく、100年前から世界中で多くの努力が払われてきている。次章では、このような研究が具体的にどのような方法で進められてきたのかについて、要点を説明する。

## 第 2 章

### 流域試験と水循環プロセス研究

森林の緑のダム機能を検証しようとするとき、大別して2つの方法がある。一つは**流域試験**、いま一つは**水循環プロセス研究**である。

前者は、流域を単位として、降水量と水流出量を精密に測定し、森林除去、森林造成、間伐、樹種転換などの操作をくわえて、水流出量にどのような影響が検出されるかを調べるものである。後者は、森林で起こる水循環のプロセス、すなわち降水が樹冠を通過して林内に到達し、地面にしみこんで地下を流れ、川に流れ出てくるまでの過程をひとつひとつ丹念に検証し、森林が果たしている複雑な機能を個別に理解し、それらを総合化することにより、森林の機能を評価しようというものである。ここでいう森林とは、地上部だけでなく根などの地下部や、森林により形成される落葉層や土壌なども含む。

森と水との関係は100年以上前からヨーロッパで科学的に研究されはじめ、ほぼ時を同じくして日本でも明治30年代から研究されはじめている。当初は前者の方法が主流であったが、ケーススタディの積み重ねから得られる一般性の高い結論はほぼ出尽くしたとの認識が1965年ごろに高まり、プロセス研究が重視されるようになって、現在に至っている。実際の研究フィールドでは両研究がセットで行なわれている場合も多い。最近では、対象とする現象が複雑で強い地域性をもつために、プロセス研究の積み重ねから一般性の高い法則を導いたり、汎用性の高い水循環モデルを数学的、物理学的に構築したりすることも容易ではないということも認識されてきており、新たな研究の方法論を創造していく段階を迎えている。

#### 2.1 流域試験とその成果

流域試験は、森林の機能を実証的に検証する方法である。最も簡単な流域試験は、1流域を対象として、森林を除去したり植林したりして、水流出量の変化、洪水の変化、渇水の変化を観測することで、森林の機能を読み取ろうとする。これを**単独流域法**という。この方法だと、気象条件、特に雨の降り方が毎年違うため、森林を改変して何らかの変化が検出されたとしても、雨の降り方の違いによる影響などを厳密に取り除くことはできない。そこで考え出されたのが、地形、地質がほぼ同じである隣り合った2流域を実験対象とし、一方の流域にはいっさい手を加えずに、もう一方の流域の森林を除去したり植林したりすることによって、森林の機能を調べるという方法

である。この方法は、手を加えない流域（対照流域、コントロール流域などという）との比較により、雨の降り方の違いなどに影響されずに森林の機能だけを抽出できる精密な方法であり、**対照流域法**と呼ばれる（図2.1.1）。対照流域法は、森林が水流出量に及ぼす影響や、洪水の緩和、渇水の緩和といった機能を実証的に評価できるため、これまで世界中で多数行われてきた。

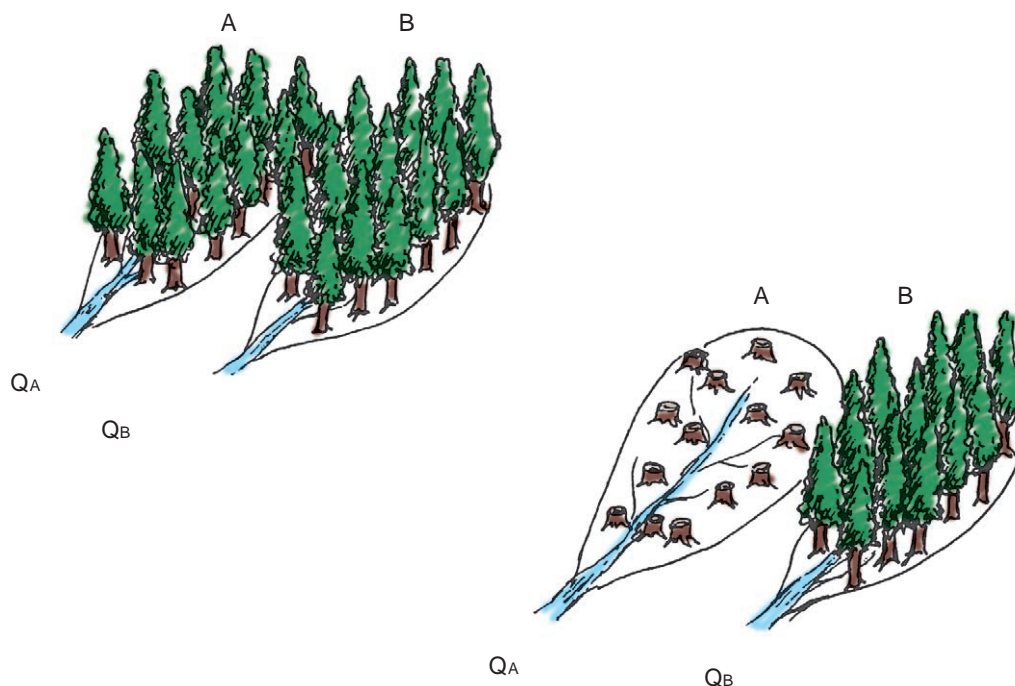


図2.1.1 対照流域法の概念（太田，1996）。Aは森林を除去したり植林したりする流域（処理流域という）。Bは手を加えない流域（対照流域，またはコントロール流域という）。 $Q_A$ 、 $Q_B$ はそれぞれの流域からの水流出量。処理をする前に数年間観測を行ってA、B両流域の特性を把握した後、伐採などの処理を行い、さらに数年間ないし数十年間観測を継続して、処理の影響だけを抽出する。

### <水流出量への影響評価>

対照流域法が最も盛んに行われていた1960年代、世界の39地点で行われた森林が年間の水流出量に及ぼす短期的な影響をヒバートが1967年にとりまとめている。そこでは、以下の3つの結論が示されている。

- ①森林被覆率の減少は水流出量の増加をもたらす。
- ②まばらにしか植生のない流域への森林の造成は、水流出量の減少をもたらす。
- ③これらの処理による変化の絶対量は地点間でばらつきが大きく、予測不可能である。

ボッシュとヒューレットは、その後の研究例を加え、94地点で行われた対照流域法

の短期的結果を整理することによって、③について、相変わらずばらつきは大きいものの、森林除去初年度の増加量は、除去面積率10%につき、単位流域面積あたりに換算して、常緑針葉樹林40mm、落葉広葉樹林25mm、灌木や草地で10mm程度であることを示した。

その後、ホーンベックらは、これまでのレビューが短期的な結果のみに焦点を当てていたことを踏まえ、アメリカの11流域における20年以上の長期的変化を整理した。森林を除去した後、除草剤や伐採などによって森林の再生を人為的に抑えた場合は、水流出量の増加が10年以上継続する一方で、森林の再生を人為的に抑えずに自然再生に任せた場合は、水流出量の増加は3-10年くらいで消滅することを示した。また、水流出量の増加は水量の絶対量が少ない場合に顕著で、洪水時の水流出量にはあまり影響していないことがわかった。季節的には、水流出量の増加は樹木の成長期（春～夏）にかけて大きかったことを見出している。

一方、単独流域法、対照流域法などすべての流域試験の結果を整理することにより、森林や草地に覆われた流域の水流出量を帰納的に求める試みがされてきた。ジャンらは、世界中の250以上の長期流域水収支観測結果をとりまとめ、森林と草地に覆われた流域からの水流出量は、おおむね降水量と“森林と草地の面積比”で決まることを示し（図2.1.2）、100%森林の流域と100%草地の流域では、水流出量の差は降水量が大きいほど大きくなることを示している（図2.1.3～2.1.6）。

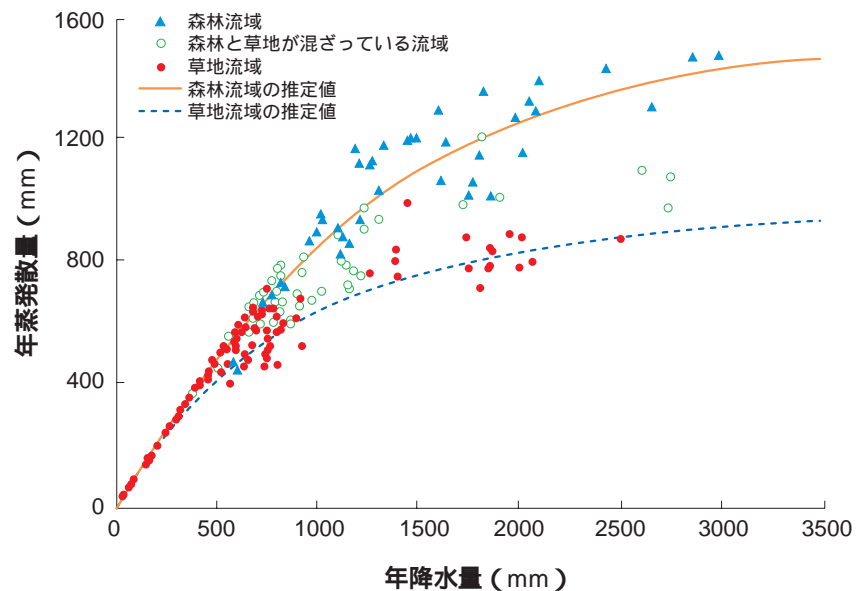


図2.1.2 世界中の多数の流域で観測された年降水量と年蒸発散量（＝年降水量－年水流出量）の関係（Zhang, 2001）。▲は100%森林，●は100%草地，○は森林と草地が混ざっている流域。実線，点線はそれぞれ草地100%，森林100%の場合にジャンが帰納的に導いた推定式による計算結果。

以上のように、多数の流域試験から帰納的に得られた結果は、対照流域法を用いて得られた結果を矛盾なく説明できるものであり、これらの結論に大きな間違いはないことが確認されている。

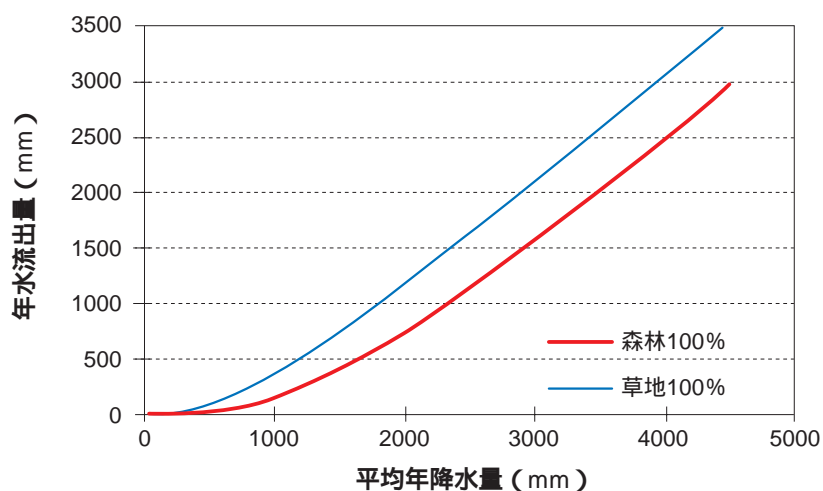


図2.1.3 世界中の多数の観測結果から導かれた、森林と草地の流域からの水流出量と降水量の関係。草地からの水流出量は森林より多くなる。Zhang ら (2001) の式に基づき著者作成。

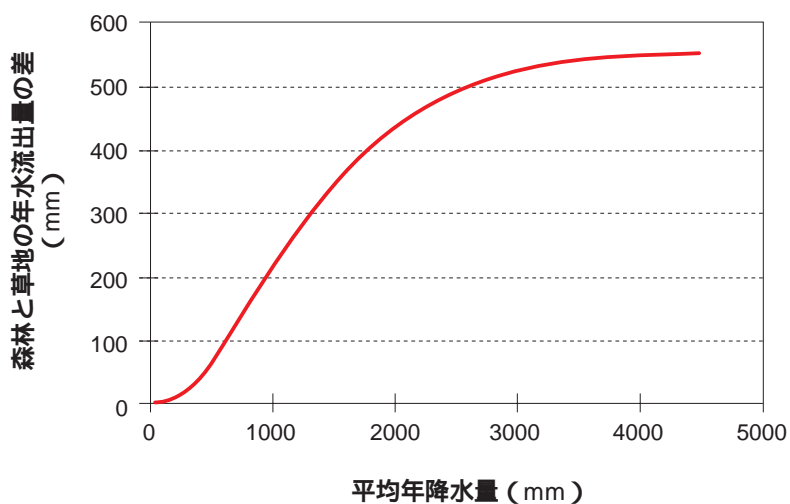


図2.1.4 世界中の多数の観測結果から導かれた、森林と草地の流域からの水流出量の差と降水量の関係。草地・森林間の水流出量の差は、降水量が大きいほど大きい。Zhang ら (2001) の式に基づき著者作成。



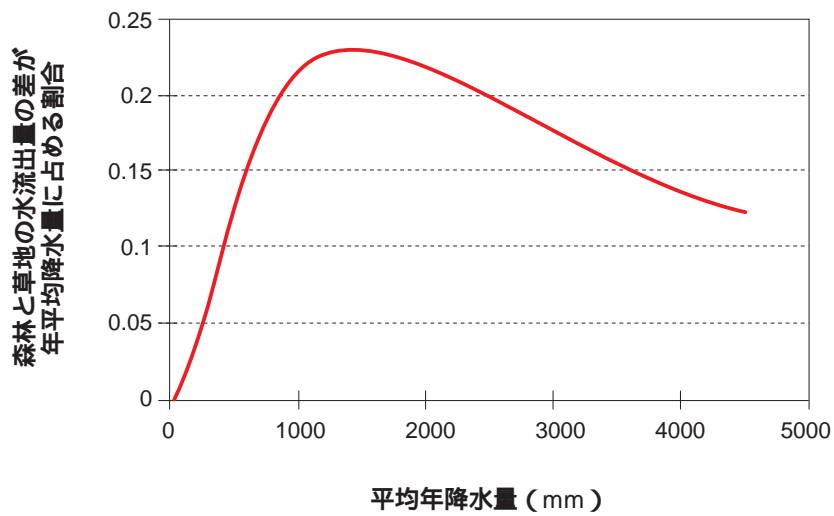


図2.1.5 世界中の多数の観測結果から導かれた，森林と草地の流域からの水流出量の差が降水量に占める割合と降水量の関係．年降水量1450mm付近で極大となり，草地を森林に変えることで，降水量の23%相当の水が失われる．Zhang ら（2001）の式に基づき著者作成．

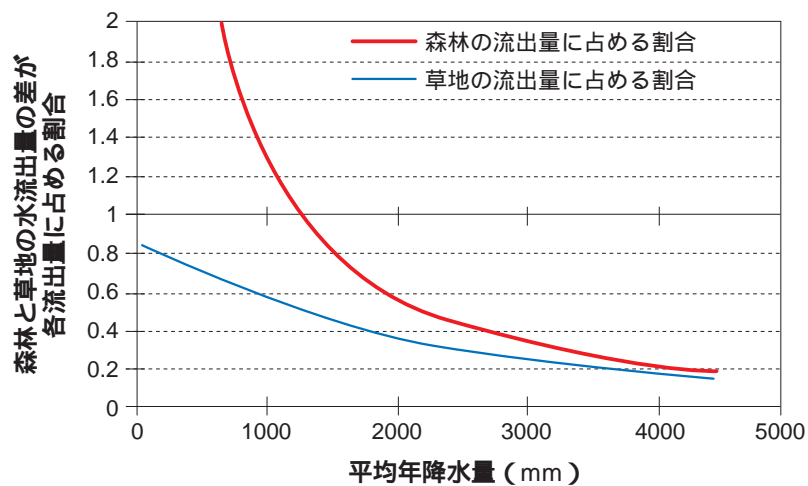


図2.1.6 世界中の多数の観測結果から導かれた，森林と草地の流域からの水流出量の差が流出量（森林，草地）に占める割合と降水量の関係．年降水量が1310mmより少ない地域では，割合が1を超えており，草地と森林の水流出量の差は，森林からの水流出量よりも多いことがわかる．このことは図2.1.3からも読み取れる．Zhang ら（2001）の式に基づき著者作成．

### <洪水や渇水への影響評価>

流域試験により、洪水や渇水に及ぼす影響を評価しようとする場合、2通りのアプローチがある。

一つは、水流出量を、大雨に伴って短時間ではあるが大量に出てくる水量と、雨が降らない期間に少量ながら安定的に流れてくる水量の2つに分離し、それぞれ評価する方法である。本書では前者を**直接流出量**、後者を**基底流出量**と称する。両者の分離方法についてはさまざまな方法が提案されているが、専門的になるので詳細は省略する。また、雨季乾季の明瞭な場所では、水流出量を雨季の水流出量と乾季の水流出量に分離することで、直接流出量、基底流出量の分離による方法とほぼ同様の解析を簡単に行うことができる。

今一つは、洪水を評価する指標として、洪水の**ピーク流出量**、ピークに達するまでに要する時間（**到達時間**）、洪水に伴う水流出が終了したと思われる時間までの水流出量（**洪水時流出量**）などを用いる方法である。渇水の場合は、水流出量の最小値や、連続7日間流出量最小値、連続10日間流出量最小値などが用いられる。また、後述する流況曲線における時間割合90%、95%の流出量なども使われる。本書ではこれらを**渇水時流出量**と総称する。

### <流況曲線>

**流況曲線**とは、年間の水流出量の連続観測データを用いて、横軸に「ある流出量を超える水流出量が観測される時間の割合」、縦軸に水流出量（対数軸にすることが多い）をとったグラフであり、必ず右下がりの曲線となる。横軸がゼロに近いところは大雨や融雪にともなう大量の水流出量に対応し、横軸が100%に近いところでは、雨が降らず水流出量が少ない期間の水流出量を表している。例えば、横軸が95%のときの水流出量は、「水流出量がそれ以下になる時間は全体の5%しかないような（小さい）水流出量」を意味しているので、渇水の評価する指標として使えることになる。

（以下、本書では流況曲線において横軸が90%や95%になるような渇水時を総称して、渇水という。）対照流域法の場合は、処理前と処理後で、流況曲線を直接比較することも行われる。

なお、日本では1年間の毎日の水流出量を大きい順に並べ替えて作成した曲線を伝統的に流況曲線と称している。上記の流況曲線の定義と日本の伝統的流況曲線の定義は一見、異なるが、どちらの定義を用いても得られる曲線は同じである。日本では、洪水や渇水の評価する場合、豊水、平水、低水、渇水流量という言葉それぞれ1年の日水流出量のうち95、185、275、355番目に大きい水流出量と定義しているが、これらを上記の定義にあてはめると、それぞれ横軸が26%、51%、75%、97%のときの水流出量に対応している。

### <ダブルマス曲線>

**ダブルマス曲線**とは、縦軸、横軸ともに積算量（マス）をとって描いたグラフのことである。対照流域法では、縦軸に伐採等の処理を加えた流域の水流出量、横軸に無処理のコントロール流域の水流出量をとってダブルマス曲線を描くと、処理前はほぼ1：1の直線に乗って増加していくが、処理を加えるとそこで曲線に変化が生じる。処理の影響を図上で示しやすいので、よく用いられている。

## 2.2 水循環プロセス研究とその成果

水循環プロセス研究とその成果については、すでに塚本編（1992）、服部ら（2001）に整理されているので、ここではプロセスを蒸発現象、遅延現象に分け、第3章を理解するために必要となる2、3の事柄を簡単に述べるにとどめる。

### <蒸発現象のプロセス>

森林における蒸発現象は、メカニズムの違いから、樹冠遮断蒸発、蒸散、林床面蒸発の3つのプロセスに区分される。**樹冠遮断蒸発**とは、降雨の雨滴や降雪が樹冠に付着し、そのまま蒸発してしまう現象であり、水分子は地表面に到達しないで水蒸気となって大気へ戻る。**蒸散**は、いったん地表面に到達し、地中に浸透した水が、植物体の根から吸い上げられ、幹を通過して葉に到達し、そこで水蒸気となって蒸発する現象であり、植物の光合成と密接に関連している。林床面蒸発は、いったん地表面に到達した水が、植物体内を経由せずに蒸発する現象である。林冠が閉鎖している森林では、林床面蒸発量は樹冠遮断蒸発量や蒸散量に比べて十分小さいと考えられており、蒸発現象は主に樹冠遮断蒸発と蒸散の2つのプロセスについて研究されてきている。

#### ・ペンマン・モンティス式、ブディコ式

1948年にハワード・ペンマンがペンマン式を考案したのは、戦場においてタンクや重機の動作と土壌水分状態との関係を知るために、気候条件に依存した地表面からの物理学的蒸発量推定法について研究するよう軍隊から要請があったからだという。ペンマンの成功は、蒸発面におけるエネルギー、運動量、熱の交換を制御する3つの方程式を解き、地表面温度の項を消去したことに求められる。後にジョン・モンティスは、ペンマンの方程式を基礎として、空気力学抵抗と気孔抵抗という2つの項を結合させることにより、水の制限のあるなし、植物のあるなしに関わらず蒸発散量を推定する枠組みを示した。

一方、ロシアの水文学者エム・ブディコは、森林からの蒸発散量を降水量と純放射量の比（放射乾燥度）を指標として図示し、世界の気候区分や水流出量をオーバーレ

イして示した。これらの式は、森林からの蒸発散量は降水量（蒸発可能な水量）と純放射量（蒸発に使うことのできるエネルギー）のどちらも超えることはない、という前提に立っている。

#### ・カルダーの「蒸発散の制限要因」

1960年代にペンマンやモンティスが導いた式、あるいはブディコが示した図は、よくできていたがゆえに、その後の蒸発散研究に与えた影響は大きかった。しかしその後、これらの式では説明できないような現象が次々と報告されるようになっていった。

イギリス水文学研究所（当時）のイアン・カルダーは、イギリスのプリンリモン試験流域で中性子土壤水分計、ガンマ線減衰法、巨大ビニールシート林内雨量計などの最新技術を駆使して、精密なプロセス研究を行い、樹冠遮断蒸発量が非常に大きく、濡れている樹冠からの蒸発量が純放射量を上回っていることを示した。驚くべきことに、この森林では年間の総蒸発散量も、年間の総純放射量を上回っていた。このことは、太陽から供給される正味のエネルギーを上回るエネルギーが、水を蒸発させるために使われているということであり、エネルギー収支が成り立つとすれば、その不足分はどこか別のところから供給されていることを意味する。同じころ塚本良則は、東京農工大の屋外試験施設でスギを地面近くで伐採し上から吊り下げ、降雨中の重量変化を測定することによって、降雨中の蒸発量は純放射量より大きく、降雨強度に比例して大きくなることを見出した。これらは従来のペンマン・モンティス式では説明できない現象であった。

1980年代後半より、超音波風速温度計などの乱流を直接測定できる機器が実用化され、無降雨時間中の蒸発散現象について理解が進んだ。しかしこれらの乱流測定機器を降雨中の蒸発観測に用いるためには今だ困難が多く、降雨中の蒸発観測とメカニズムの理解、モデル化は、重要な研究課題となっている。

その後、カルダーは、研究対象を熱帯林に広げるとともに、樹冠遮断現象には雨滴の直径分布が重要な役割を果たしていると考え、直径分布を自動記録できるディストロメータを開発し、スリランカで観測を行った。そして世界中のプロセス研究の結果に基づき、森林や草地からの蒸発散量の主要な制御・制限要因は6つあり、そのうちいずれが効くのかを、4つの気候区分（湿潤温帯、乾燥温帯、湿潤熱帯、乾燥熱帯）の草地、森林それぞれについて表2.1のように示した。

表2.1 蒸発散量の主たる制限要因

	森林	草地
乾燥温帯	植物生理 土壌水分	土壌水分 放射
湿潤温帯	移流	放射 植物生理
乾燥熱帯	土壌水分 樹木サイズ	土壌水分
湿潤熱帯	雨滴直径 放射	放射

### <遅延現象（平準化機能）のプロセス>

#### ・浸透能と土壌クラスト

**浸透能**とは、水が地表面に到達したとき、どれくらいの水量が土の中に浸透できるかを表す指標であり、単位時間、単位面積当りの水の量（例えばリットル/m<sup>2</sup>/秒）で表される。これは雨の強さの単位（例えばmm/時）に換算可能であるため、両者を直接比較することにより、降ってきた雨のうちどれくらいが浸透するかを知ることができる。

最も浸透能の低い地表面はアスファルトなどの舗装面で、浸透能はほとんどゼロである。最近では都市でも雨水を浸透させることが治水上有効な対策となっており、いわゆる透水性舗装も普及してきている。逆に最も浸透能の高い地表面は森林土壌であり、雨水をほとんどすべて浸透することができる。しかし森林内でも人や動物が踏み固めた道や林道の上では、浸透能が低くなっており、大雨時にはそのような所が水みちとなって水が集中的に流れる。森林伐採や収穫などに伴い、重機が通過して土を圧密した場所なども、浸透能が低くなっている。また、森林内の地表面は通常落ち葉などに保護されているが、森林伐採などで土の表面が露出すると、雨滴が直接土の表面に当たって粒子を細かく砕き、表面を目詰まりさせてしまう。このような目詰まりによって浸透能が低下した土壌層を**土壌クラスト**と呼んでいる。森林でなくとも、地表面が草に覆われていれば、土壌クラスト生成による浸透能の低下は起こりにくい。放牧地などでは蹄による締め固めにより浸透能が低下することが知られている。

森林内で、浸透能の低い場所がどこに、どのように、どれくらい分布しているかといったことは、平準化機能の評価において重要な情報である。浸透能を1点で測定する技術は確立されているが、広い範囲で測定を行い、空間分布を把握することは容易でない。

### ・ダルシー式、透水係数と巨大孔隙、土中パイプ

雨水は、いったん土に浸透した後、物理学の法則に従って位置エネルギーの高いところから低いところに流れる。土中を水が流れる場合のエネルギーとは、位置エネルギーと土の粒子が水分子を引き留めているエネルギー（吸引圧）との合計になる。土中を水が流れる速度は、エネルギー勾配に比例することを表現した式を**ダルシー式**と呼び、比例係数は**透水係数**と呼ばれる。ダルシー式は飽和状態（土中の間隙がすべて水で満たされた状態）だけでなく、不飽和状態（土中の間隙に水と空気の両方が混じって存在している状態）にも拡張されて用いられる。この場合の透水係数を**不飽和透水係数**といい、その値は土中の間隙に水が満たされている割合によって変化し、水が少なくなるほど透水性が悪くなる。土壌、地質、植生条件と、飽和透水係数、不飽和透水係数との関係を調べることにより、森林の取り扱いが土中の水の流れに及ぼす影響を知ることが可能となる。

森林の土壌には不均一性が強く、とくに**巨大孔隙**とそれが連続してできた**土中パイプ**が森林斜面の流れに大きく影響を及ぼすことがわかっている。土中パイプは、土が不飽和状態であるときは流れにはほとんど寄与しないが、ひとたび飽和状態になるとその透水性はパイプのない部分に比べて一桁ないし二桁大きく、排水システムとして効率よく機能する。

### ・ライパリアン・ゾーンとハイポレイック・ゾーン

河畔域、水辺域は、独特の植生が成立していることから、古くから生態学者の注目を集めていた。水の流れから考えても、河畔域は土中の水分が飽和し、洪水時に速やかな流出成分を生み出す場所として、また活発な土砂生産が行われる場として注目されるようになった。このような多面的機能をもつ河畔域を**ライパリアン・ゾーン**といい、森林伐採の影響を緩衝するために切らないで残しておくことを伐採ルールとして定めている国が多くなっている。一方で、樹木の水消費にライパリアン・ゾーンの樹木が寄与する割合は大きいと考えられるので、アメリカではライパリアン・ゾーンの樹木だけを伐採して影響を調べる流域試験なども行われている。

また近年では、河川水の水質を問題にすると、ライパリアン・ゾーンにおいて土中水が湿潤環境に置かれることによる水質変化や、河川水との混ざり合いによる水質変化の重要性が認識されるようになった。このように水文水質学的に重要な河畔域や河床材料内部のことを、**ハイポレイック・ゾーン**と呼んでいる。

## 第 3 章

# 世界の流域試験とその結果

本章では、世界中でこれまで行われてきた対照流域法を中心とした流域試験の結果や、得られた科学的事実を現実の森林管理に生かしている例を国別に解説する。なお、本章で紹介する試験流域と第4章で述べる日本の流域試験を合わせてリストしたものが表3.1である。

### 3.1 アメリカ

アメリカの森林面積は、20世紀には長い間微減傾向にあったが、1987-92年の平均では増加に転じており、増加量は約50万ヘクタール/年となっている。

アメリカにおける対照流域法の歴史は、1909年にコロラド州ワゴンホイールギャップ試験流域が世界最初の対照流域法試験流域として設定され、森林の収穫が年流出量に及ぼす影響調査が開始された時点までさかのぼる。その後、試験流域の数は増えつづけ、1950年代半ばにはその数は約150に達したといわれている。これらの試験研究の結果から、森林を伐採すると流出量が増えること、植林をすると樹木の成長とともに流出量が減ることなどが見出されていた。

1960年代後半になると、森と水を巡る研究者の関心は、それまでの流域試験から、森林内水移動のメカニズム、水質形成のメカニズムを詳細に理解し、それをもとに森林状態と水循環、水質の関係、森林の役割を論じることに移っていった。それまで対照流域法により、森林が長い時間をかけて成長していく過程が流出量に及ぼす影響を調べていたいくつかの試験流域は、長期性を維持しつつ、メカニズム研究、水質研究、さらには生態系研究を取り込む形で発展し、1980年にスタートした長期生態系研究（LTER：Long Term Ecological Research）サイトとして位置付けられた。これにより、試験流域は長期生態系研究のサイトとして機能し、水収支、物質収支というベースラインデータを各方面の研究者に提供するという役割を果たしていくことになる。

1996年に発表された、アメリカ国内の対照流域法による森林伐採影響評価の結果をとりまとめた論文には、33地点の95試験流域が記載されている。これらの流域の流域面積は1-700ha、平均年降水量は450-2,730mmの範囲にある。得られた結果は、アパラチア、東海岸、ロッキー、太平洋側、平地の5つのカテゴリーに区分して解析されている。ここでは、流域の植生除去の影響を調べる場合、大きい流域では実際の植生除去率は20%以下の場合が多いにもかかわらず、研究はほとんど除去面積率20%以

表3.1 第3章, 第4章に掲載した試験流域一覧

所在地	設立年	緯度	経度	標高	水系	管轄機関	年降水量
<b>アメリカ</b>							
ユウイータ	1933	35° 03'N	83° 25'W	680-1400	テネシー川	農務省森林局	1700-2500
ハツパードブルック	1955	46° 56'N	71° 45'W	490-740	メリマック川	農務省森林局	1300±190
コーンクリーク	1982	41° 13'N	106° 47'W	2682-3322	ブラット川, ミズーリ川	農務省森林局	
<b>イギリス</b>							
プリンリモン	1970	52° 28'N	03° 42'W	320-740	セバン川	水文学研究所	
<b>オーストラリア</b>							
マロンダ	1968			100-1300	ヤラ川	流域水文共同研究センター	1100-2800
カルア	1975			450-940	テレゲリー川	州森林局研究開発部	1450-1750
タンタワングロ	1989	36° 41'S	149° 29'E	800-950		州森林局研究開発部	1100
<b>ニューゼーランド</b>							
グレンドフ	1979	45° 50'S	169° 44'E	460-670	ワイボリ	ランドケアリースーチ	1350
モウテレ	1959	41° 21'S	173° 03'E	60-140	ワイメア	ランドケアリースーチ	
ビッグブッシュ	1978	41° 36'S	172° 44'E	490-620	モトウエカ川	ランドケアリースーチ	1530
マイマイ	1974	42° 05'S	171° 48'E	285-340	マウエライテイ川	ランドケアリースーチ	2450
<b>南アメリカ</b>							
ジョンカーズホーク	1935	33° 59'S	18° 57'E	850-1500		ジョンカーズホーク森林研究ステーション	1300-1800
ウエストリア	1974	23° 04'S	30° 04'E	1050-1430	オリファンツ川	森林局	1700
<b>インド</b>							
グレンモルガン	1964	11° 28'N	76° 37'E	2200	ピカラ川	水土保全中央研究訓練所	1380
<b>台湾</b>							
蓮華池	1967	23° 56'N	120° 54'E	670-890	濁水溪・水里溪	国立森林研究所	2180
<b>マレーシア</b>							
スンガイ・テカム	1973	3° 54-55'N	102° 31-33'E	68-72	パハン川	多機関共同研究	1878
バレンブン	1979	2° 46'N	102° 06'E	170-302	ムア川・ケリンチ川	国立森林研究所	2126
メンドロン	1984	5° 0'N	115° 30'E	650-750	マリガン川	サバ森林工業(株)	3341
<b>日本</b>							
釜淵	1939	38° 56'N	140° 16'E	162-252	最上川・鮭川	(独)森林総合研究所	2424
袋山沢	1991	35° 12'N	140° 06'E	128-230	小櫃川	東京大学森林理水及砂防工学研究室	2043
白坂, 東山	1928	35° 12-15'N	137° 06-10'E	294-629	矢田川	東京大学愛知演習林	1632
江田島	1980	34° 15-17'N	132° 27-29'E	19-376	大須川溪流・長谷川一ツ小島	広島県	1400
真筑波	1969			142-620	利根川・桜川	(独)土木研究所	1422
五條吉野	1978	34° 22'N	135° 51'E	180-300	紀ノ川・吉野川	京都大学農学部	1045-1826



上の流域で行われているという問題点が指摘されている。実際の森林伐採による植生除去面積率は、流域面積が大きくなるほど小さくなると考えられるため、植生を除去した小流域とそのまま放置した小流域の集合体であり、全体として植生除去率が20%以下の大流域において、その影響は小流域の変化による影響を足し算したものになるのかどうか、という点が重要となってくる。

近年、都市の水源林に対する社会的関心が高まったこともあって、研究者、行政が再び流域試験の重要性を認識するようになり、森林の管理方法の比較や、従来の流域より大きいサイズの流域での対照流域法が行われるようになってきた。ここでは、森林と水の関係研究の歴史に欠かせない2試験流域と、比較的大きい流域と対象とした例、計3試験流域について紹介する。

### ①コウィータ試験流域

1933年にアメリカ農務省（USDA）森林局が東南部ノースカロライナ州のアパラチア山脈南部に設定したコウィータ試験流域は、多数の試験流域から構成され、流域の森林の全部または一部を収穫し、他の植生に転換したときに、流出量にどのような影響が及ぶかを研究するサイトとして設けられた。総面積は2,185ヘクタール、標高は675–1,592mであり、56の雨量計、面積3–760ヘクタールの16の試験流域が設けられた。16流域のうち8流域には何らかの処理が加えられ、8流域は対照流域と位置付けられた。現在のコウィータ試験流域の研究目的は、①水、土壌、森林資源は、管理運営、自然の攪乱、大気環境にどのように応答しているのかを測定し、説明し、予測すること、②これら流域資源に対するインパクトを軽減する方法とはどのようなものかを明らかにすること、となっており、その手段として、水文学と生態学に共通した地形単位としての流域スケールでの理論、実験、モデリング、実践を行うこととしている。コウィータ試験流域は LTER サイトの一つとしても位置付けられているほか、他の多数のプロジェクト・サイトとして利用されており、その数は年間30件に及ぶ。平均して、40人の研究者と45人の大学院生が研究を行っている。

コウィータ試験流域で特筆すべき成果はたくさんある。例えばNo.7流域で落葉広葉樹林を1977年に伐採し、その後放置して自然回復に任せた場合の、伐採後20年間の水流出量の変化を調べたところ、伐採後4年間は水流出量の顕著な増加がみられたが、5年後以降は処理前の水準に戻った。15年後以降は処理前に比べて減少する年が多くなってきている（図3.1.1）。特に注目される結果として、No.1とNo.17（写真3.1.1）の流域で、落葉広葉樹林を伐採し、刈払い、その後常緑針葉樹のストロブマツを植林したところ、南向き斜面のNo.1では伐採7年後から、北向き斜面では伐採11年後から水流出量が基準値を下回りはじめ、伐採約25年後に減少量は300mmに達したことが挙げられる。季節別にみると、水流出量の減少は冬の落葉季および成長期（春）初期

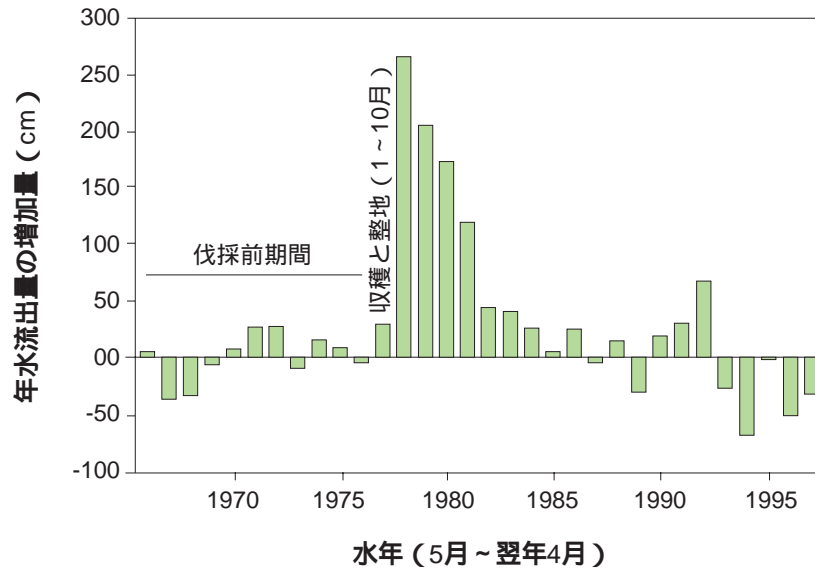


図3.1.1 コウイータ試験流域No.7流域の水流出量の変化（Swankら，2001）。1977年1～10月に伐採，収穫，整地を行ってから20年後までの変化を示す。★は統計的に有意な増加，減少。伐採後4年間は水流出量の顕著な増加がみられたが，5年後以降は処理前の水準に戻った。15年後以降は処理前に比べて減少する年が多くなってきている。



写真3.1.1 コウイータ試験流域No.17（北向き）流域のストロームマツ林。1957年に植林され，現在樹高約30m，本数密度約1,150本／ヘクタールである。2002年10月3日，田中延亮氏撮影。

に大きくなっていた。常緑針葉樹の水消費量は落葉広葉樹に比べて格段に多いということが実証されている（図3.1.2）。この結果はアメリカで最高レベルの科学雑誌の一つであるサイエンス誌に1974年に掲載されている。

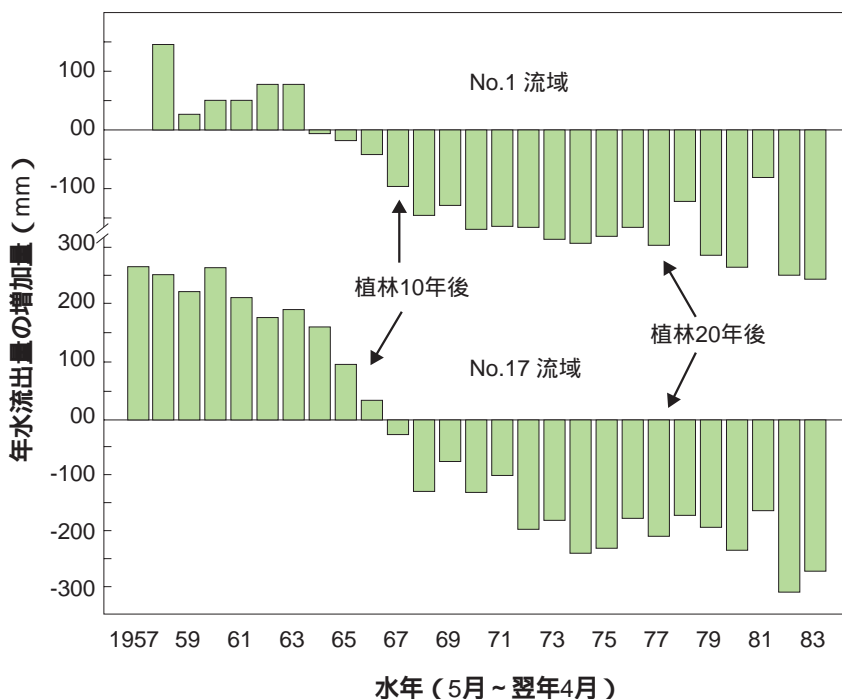


図3.1.2 コウイータ試験流域No.1（南向き），No.17（北向き）流域の水流出量の変化。1957年のストロームマツ植林後27年間の変化を示す。水流出量は大きく減少しており，マツ林が落葉広葉樹林よりも水消費量が多いことを意味している。コウイータ試験流域訪問者への配布資料より作成。

## ②ハッパードブルック試験流域

ハッパードブルック試験流域は、東部ニューイングランド地方のニューハンプシャー州に1955年に設けられた。植生は落葉広葉樹林である。12-42ヘクタールの大きさの6流域で長期観測を開始し、そのうちの3つの流域を1965、70、83年にそれぞれ皆伐、収穫し、その影響を評価している（写真3.1.2）。まず1965年に、No.2流域（22ヘクタール）の樹木を皆伐し、伐採木をすべてその場に積み上げ、3年間除草剤を散布して植物が生育しないようにした。

1970年から1974年にかけては、No.4の流域（36ヘクタール）で列状の収穫が行われた。1回目は25m幅で収穫し、50m幅を残した。2年後には、残した50m幅のうち25m幅を収穫、4年後に残りの25m幅を収穫して完了した。商業価値のある直径10cm以上の幹のみが運び出され、ライパリアン・ゾーンの樹木は緩衝帯として残された。トラクタの搬出路は最終的に流域のわずか2%であった。伐採後の列では天然再生が進

んだ。

1983年には、No.5 流域（22ヘクタール）で皆伐、全幹集材による収穫が行われ、枝葉を含めてすべてを流域の外に運び出した。その結果、幹のみ集材する場合の2倍にあたる、地上全バイオマス量の93%が失われた。また、面積の12%がトラクタの搬出路となった。

重要な成果は、伐採、除草剤散布を行ったNo.2 流域で、除草剤をやめて落葉広葉樹が天然再生し、成長した流域で、伐採13年目から流出量が基準値を下回りはじめたことである（図3.1.3）。16年目には統計的に有意な減少幅となり、減少量は平均で62mm/年となった。これは伐採をしなかった場合の推定流出量が7%減少したことに相当する。

また、列状収穫を行ったNo.4 流域では、除草剤散布流域に比べて流出量の増加幅が最大で114mm/年（3年目）と小さい（除草剤散布流域では初年度347mm/年）。ここでは、伐採8年後（完了してから4年後）から流出量が基準値を下回りはじめ、25年後まで継続している。

皆伐、全幹集材による収穫を行ったNo.5 流域では、初年度のみ統計的に有意な増加があったが（152mm/年）、2年目から増加は有意でない程度の幅となり、7、8年目に有意な増加が観測されたものの、それ以外の年は小幅な増加で推移している。他の2流域で見出された減少は、12年目までには観測されていない。



写真3.1.2 ハッバードブルック試験流域の水流出量測定堰。2001年5月27日，筆者撮影

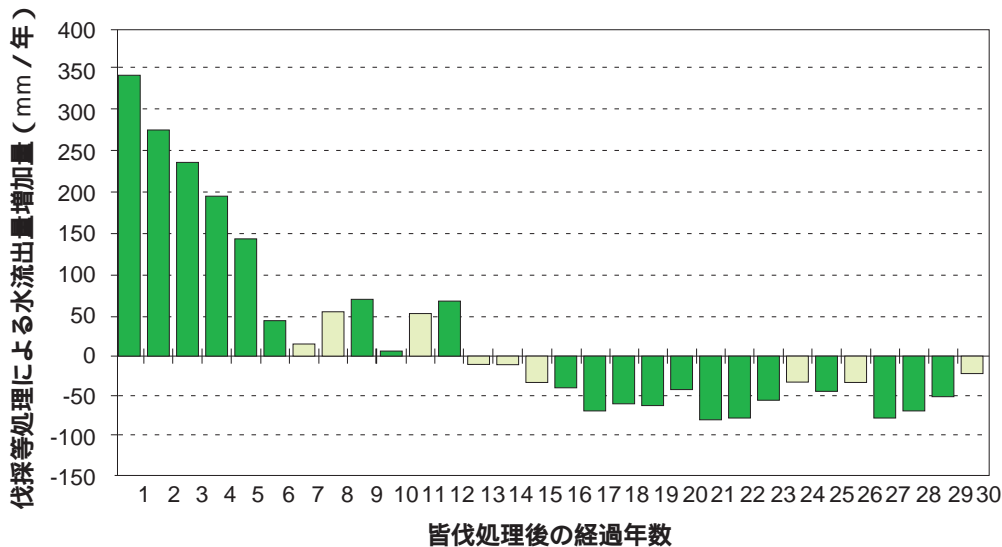


図3.1.3 ハッパードブルック試験流域No.2流域における水流出量増加量の変動。No.2流域は1965年11月に皆伐し、1968年まで除草剤を散布し、植生の進入を抑えた。増加量は予測流出量（対照流域のデータから推定）と実測流出量の差より求めている。緑色棒は統計的に有意な増加ないし減少、黄緑色棒は有意でないもの。Hornbeckら（1997）のデータに基づき著者作成。

### ③コーンクリーク試験流域（大きい流域における森林伐採の影響）

これまでの対照流域試験は、比較的小さいスケールの流域で行われてきた。処理は流域全体が中心であり、その影響は必然的に大きく検出された。しかし、森林の伐採が大きい流域の流出量に及ぼす影響を考える場合、流域全体を皆伐することは考えられず、伐採面積率は20%以下にとどまる。これまでの流域試験では、顕著な影響を検出しようとするためか、伐採面積率が20%以下の場合の影響評価はほとんど行われていない。そこで、大きい流域において、伐採面積率が20%程度にとどまる場合に、小さい流域で得られている結論をそのまま適用してよいのかどうかを検証するために、コーンクリーク試験流域が設けられた。

コーンクリーク試験流域は、ワイオミング州シエラマドレ山脈に位置し、流域面積1,673ヘクタール、標高2,682–3,322mである。隣接する対照流域はアッパーイーストフォーク流域という名称で、面積908ヘクタール、標高はコーンクリークと同じである。1990年から3年間かけて流域の22%が皆伐された。面積1.2–4.0（平均1.6）ヘクタールの小皆伐地が240箇所設けられ、ライパリアン・ゾーン（流れから両側33メートル）は保全された。集材は、伐倒後全幹でトラクタないしゴムタイヤのスキッドを用いてデッキへ運び、そこで丸太に切った。集材路総面積は流域の2%である。

伐採後5年間、4–10月の水流出量に平均76mmの増加が認められた。その増加はほとんど樹木の成長期に集中しており、5月だけで全増加量の半分を占めていた。夏季

の大雨時の洪水流出量を比較した結果、平均年最大流出量は8%増加、平均年最大日流出量は11%の増大が認められた（図3.1.4）。これらは結果は、小さい流域でこれまで得られてきた伐採の影響評価結果をそのまま大きい流域に適用することが可能であることを示していた。

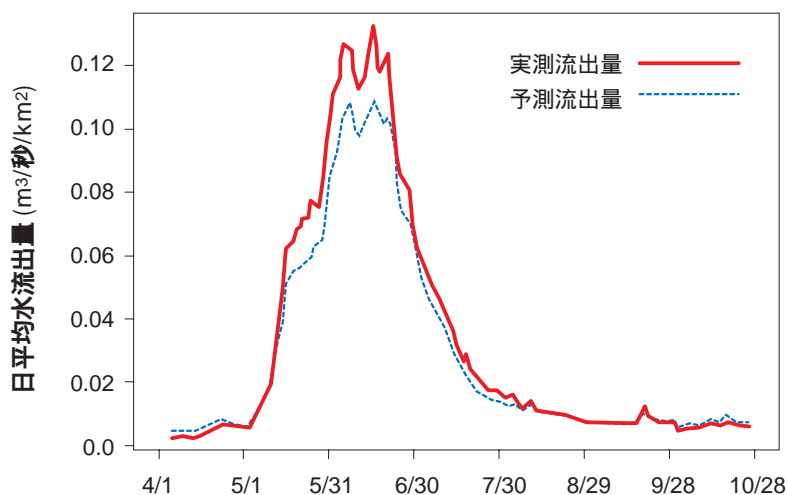


図3.1.4 コーンクリーク試験流域における伐採に伴う水流出量の変化（Troendle ら，2001）。毎日の水流出量について予測値と実測値を比較している。水流出量の増加は5－6月に集中しており、水流出量が多いときに増加量も多い。

## 3.2 イギリス

ローマ人がブリテン島を紀元43年に征服したとき、島の森林面積率は30%であったといわれている。ブリテン島の森林面積率はその後減少を続け、1086年には20%、1920年には5%以下まで減少した。イギリス政府は、木材資源確保のために森林協議会を1919年に設立し、植林を進め、その結果森林面積は増加に転じた。現在の森林面積は約280万 ha、国土の12%である。このことは、20世紀の100年間に100万ヘクタールの森林が新たに造成されたことを意味する。新しい森林は、主に流域最上流の高標高地域に造成され、主な樹種は北米原産の常緑針葉樹であるシトカスプルスであった。

1956年にフランク・ローは、観測事実に基づいて、流域全体のシトカスプルスの造林により、河川水量は42%も減少し、その経済的損失は森林からの収入を上回るといふ報告を行った。これを契機の一つとして1968年、ワリングフォードに水文研究ユニットが設立され、1970年にプリンリモン試験流域（写真3.2.1）が中部ウェールズに設けられた。水文研究ユニットは後に自然環境研究協議会と統合され、国立水文学研究所となる。プリンリモンにおける研究は1980年まで継続され、ローの学説が裏付

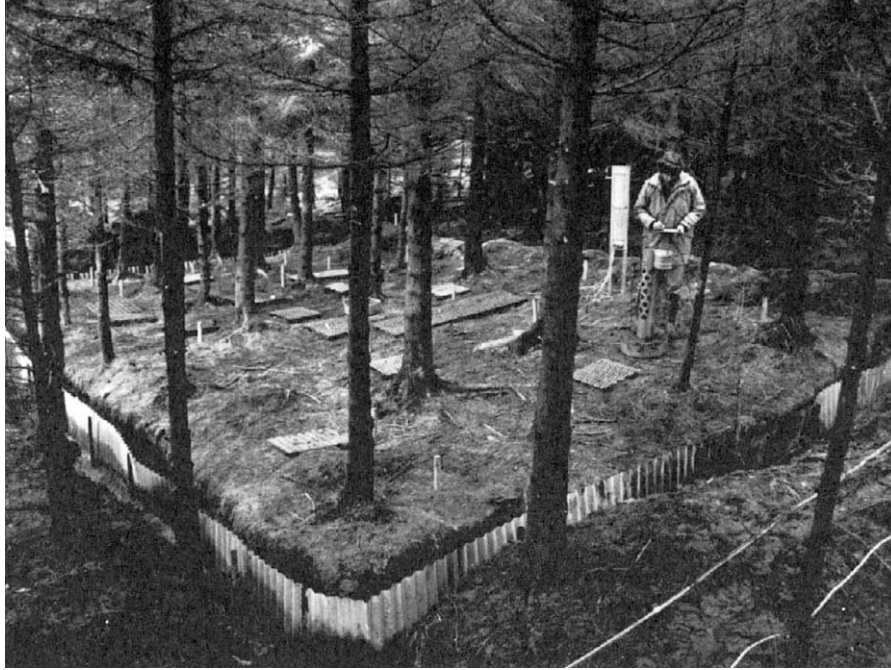


写真3.2.1 プリンリモン試験流域における水循環プロセス研究サイト (Calder, 1999)

けられ、そのメカニズムも明らかになっていった。1970年代から80年代前半にかけては、他にも多くの調査や研究が行われ、林業が河川の水量のみならず、水質に大きな影響を与え、結果として水量が減少したり、サケ・マスの数が激減したりしていることが認識され、森林協議会やシトカスプルスを見る世間の目は非常に厳しくなるに至った。

これを受けて、森林協議会は1988年に「森と水のガイドライン」を定めた(写真3.2.2)。このガイドラインは森林所有者、管理者に対して、森林が淡水生態系にどのような影響を与えているかを解説し、水の環境を守り、強化するために、どのような点に配慮して林業を行えばよいのかということを具体的に示したものである。ガイドラインは公有林、民有林に平等に適用され、その達成度は予算配分の際の基準となる。多分野の研究者、技術者、行政官から構成される委員会によって、定期的に改訂が行われており、まもなく第4版が刊行される予定である。

イギリスは、日本やニュージーランドとは異なり、急勾配の山地が少なく、雨量は少なく、降水強度が弱く、降水時間は長い傾向にある。このような条件下では、降水量に占める蒸発散量の割合や、森林からの蒸発散量に占める樹冠遮断量の割合は、日本に比べて非常に大きくなり、森林と草地の蒸発散量や流出量の差が大きくなる条件下にある。また、流出量がもともと少ないため、森林の影響による流出量の変化を、パーセントで評価すると、数字が非常に大きいものになる傾向がある。これらのことに留意しつつ、ガイドライン中の記述について以下に説明する。

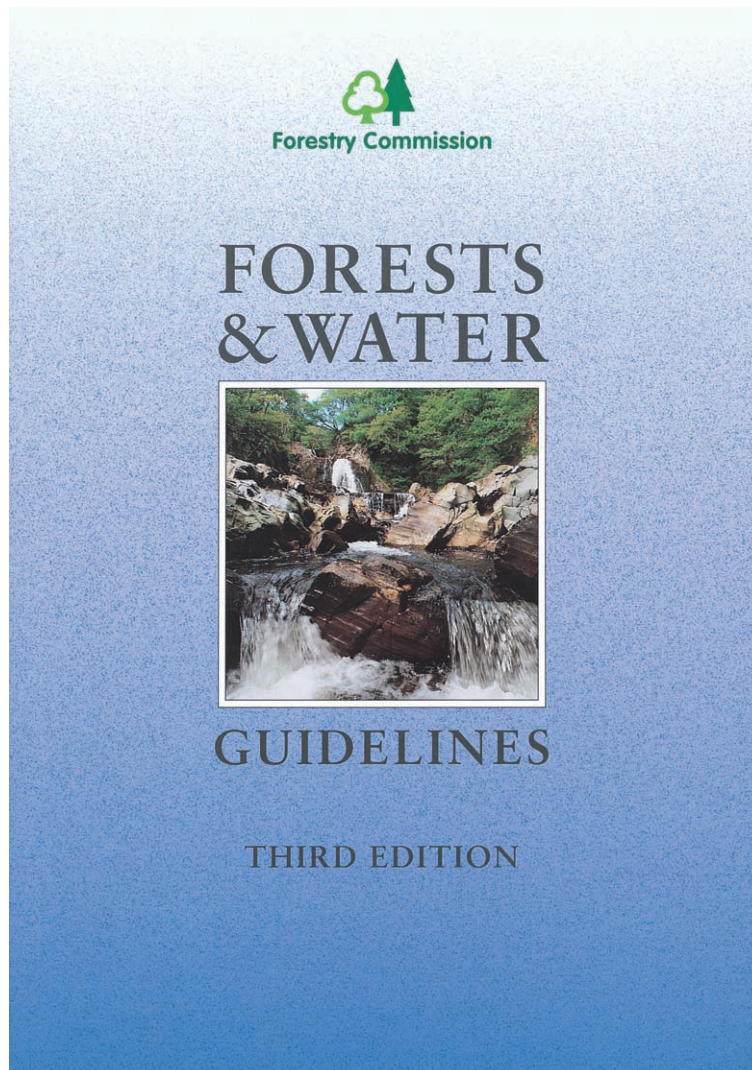


写真3.2.2 森林協議会発行「森と水ガイドライン」表紙.

### <年間の水量>

上流域（高標高域）では、（成熟した）常緑針葉樹林の面積率が10%増加するごとに、水流出量は1.5–2.0%減少する。このことは、森林を皆伐すると水流出量が20–25%増加することを意味する。これは森林が草地に対して樹冠遮断蒸発量が多いためである。下流域（低標高域）では、上流域に比べて雨が少なく、樹冠遮断蒸発量の影響は少ないが、樹木は深い根をもち、草地に比べて蒸散量が多くなる。低標高域では、水流出量はもともと少ないので、森林が存在することによって水流出量は70%またはそれ以上減少する。

落葉広葉樹林の場合は、常緑針葉樹ほど樹冠遮断量は多くなく、草地とそれほど変わらないという研究もある。しかし降水量の少ない地域では、森林は深い根の影響で草地よりも水を消費する。また湿潤な土地を好むポプラやヤナギなどは、蒸散量が非常に大きく、結果として水流出量を50%またはそれ以上減少させる。



### <洪水への影響>

常緑針葉樹林の林業が洪水流出量に与える影響については、森林の取り扱いによって多様である。植林の際、土地を耕したり排水工事を行ったりすると、ピーク流出量は15-20%増大し、ピーク到達時間は3分の1になるが、20年後にはピーク流出量増加率は5%にとどまる。植林や森林の成長そのものが洪水に及ぼす影響は一般的に小さく、皆伐の影響を検出することは難しい。例外として低地の場合は森林にピーク流出量を減少させる効果がある。これは蒸散により乾燥した土壌が、より多くの雨水を保留するからである。

落葉広葉樹林が洪水に与える影響はまだよくわかっていない。不適切な農作業で劣化した土壌においては、森林は降水の浸透能を改善する可能性がある。洪水の氾濫原に存在する森林は洪水の軽減にさまざまな効果があることが知られている。

### <渇水への影響>

研究によれば、上流域（高標高域）の常緑針葉樹林が、河川の夏の基底流出量に及ぼす影響は限定的である。植林前に整地のため耕したり排水工事を行ったりすると基底流出量は増加し、この効果は木が成長、収穫されるまで持続する。最上流の小流域では、基底流出量は収穫直後に増加し、樹木の成長に伴って徐々に減少するが、より大きな流域では、このような影響はほとんどみられない。

下流域（低標高域）の場合はこれとは異なり、常緑針葉樹林を造成すると夏季の基底流出量は減少する。これは全流出量に占める基底流出量の割合が大きいためと考えられる。落葉広葉樹林が基底流出量に及ぼす影響はそれほど大きいものではない。

### <ガイドライン>

常緑針葉樹林が水流出量を減少させることは、下流の水の需要に対して供給に余裕がない場合、問題となる。近年の発電、河川流出量維持、河川生態系、内水漁業、フィッシングなどによる水需要の増大により、このようなケースが増加している。特に水が大量に使われ、渇水時の水不足問題があるところでは重要である。

すでに存在する森林の影響を軽減するために、常緑針葉樹林をさまざまな林齢の混ざった森林、種数の多い森林、多様な構造とオープンスペースをもつ森林へ誘導するための努力が払われてきた。若い森林、伐採跡地、落葉広葉樹林からの流出量は、草地からの流出量と同レベルか、場合によってはより多くなることが研究によって示されてきた。より多様な森林、さまざまな林齢の森林は、流出量のみならず水質、森林火災などにとっても望ましい森林の姿である。

新しく常緑針葉樹林を植林することは、下流の水の需要にとってそれが問題とならないかどうか、早期のアセスメントが必要である。そのための予測モデルはすでにあ

るが、精度の向上が課題である。また、温暖化が蒸発散量にどのように影響するかを予測する必要性が増している。

落葉広葉樹林が流出量減少をもたらすことはほとんどなく、場合によっては増加をもたらす。ただしポプラやヤナギなどの湿地を好む大量水消費樹種の大規模造林の際には、注意深く場所を選定する必要がある。

### 3.3 オーストラリア

オーストラリア大陸は、乾燥した大陸のように思われがちであるが、海岸沿いにわずかながら湿潤気候帯が分布し、主要な都市はすべてそこに位置している。南回帰線より北には熱帯雨林気候、サバナ気候が分布し、夏（北半球の冬）に雨季となる。クイーンズランド州北部のケアンズ、タウンズヴィル付近では、ハリケーンの影響もあって降水量は多いところで7,000mmを超え、熱帯雨林、マングローブ林が成立している。南回帰線より南の東海岸では、温暖湿潤気候となり、降水は年間を通じて降るが、年降水量は多くなく、植生はユーカリ属を主体とする常緑林となっており、水資源をめぐる状況は厳しい。そのため森林と水の関係には多大な関心が払われ、多くの研究が行われてきた。

#### ①マロンダ試験流域（ユーカリ超高齢林の再生に伴う水流出量の増加）

セイタカユーカリ (*Eucalyptus regnans*) はオーストラリア西部、南部およびタスマニア島の比較的湿潤な地域に自生しており、アメリカのセンペルセコイアと並んで、世界で最も樹高が高くなる木（90m以上）として知られている。ヴィクトリア州州都メルボルンの水需要の80%は、セイタカユーカリの森林に覆われた流域からの水資源でまかなわれており、この森林をどのように管理するかを巡って、1960年代から盛んに研究が行われてきた。特に、メルボルンの北東80kmに位置するマロンダ貯水池の集水域であるマロンダ流域（標高100–1,300m、年降水量1,100–2,800mm）内に設けられた18の試験流域では、200年生のセイタカユーカリ林、およびそれが1939年の山火事で焼失した後に自然再生した森林の両方を対象とし、1970–80年代にさまざまな森林の処理が行われ、対照流域法を用いた定量的評価がされている。

これらの研究で得られた特筆すべき成果は、約200年生のセイタカユーカリ超高齢林が1939年の山火事で焼失し、同じ樹種が天然再生した流域（グレイスバーン流域、2,500ha、流域の88%がセイタカユーカリ）で、水流出量が増加することなくはじめから減少したことである（図3.3.1）。これまで世界中で行われてきた、伐採や焼失により森林が失われたことの影響を調べた実験では、初年度の水流出量は例外なく増加していたが、オーストラリアのセイタカユーカリ材流域の事例は、例外が存在するこ

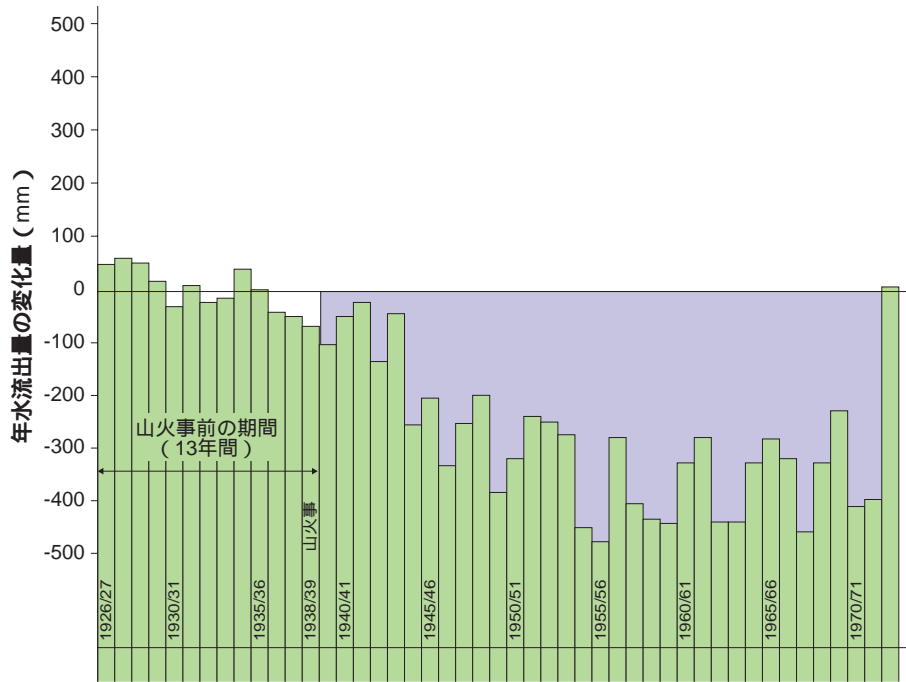


図3.3.1 マロンダ試験流域内グレイスバーン流域における水流出量の変化 (Langford, 1976). 1939年に大規模な山火事によってセイタカユーカリ林が焼失した. その後の森林の自然再生にともない, 水流出量は初年度から30年以上連続して減少している.

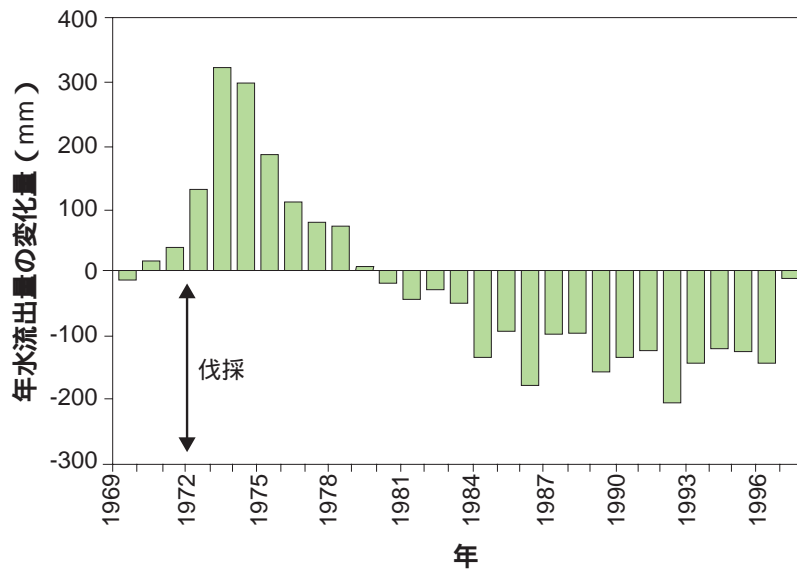


図3.3.2 マロンダ試験流域内ピカニー流域における水流出量の変化 (Vertessy ら, 2001). 1972年に流域の78%が皆伐され, 森林が自然再生する過程での変化. 伐採後8年目から水流出量は減少に転じている.

とを示したという点で注目される。

なお、その後長い間、このケースは特殊な例外とみなされてきたが、近年の論文では、初年度は水流出量が増加しても数年後には減少に転じる事例が近隣の多くの試験流域で見出されてきており、決して特殊な例外ではないという見方がされている（図3.3.2）。その原因は、超高齢林は立木密度が低く、蒸散は少なく、一方で若齢林は活発に水を消費するため、結果として若齢林からの水流出量が少なくなるものとされている。マロンダ試験流域の多数の研究結果を統合することにより、森林の水消費量と林齢（若齢から超高齢まで）の関係を表す曲線が作成された（図3.3.3）。それによれば、水消費量は林齢が約25年のときに最大となり、その後林齢増加に伴いゆるやかに減少する。逆に水流出量は、林齢25年に最小となり、その後林齢増加とともにゆるやかに増加することがわかる。

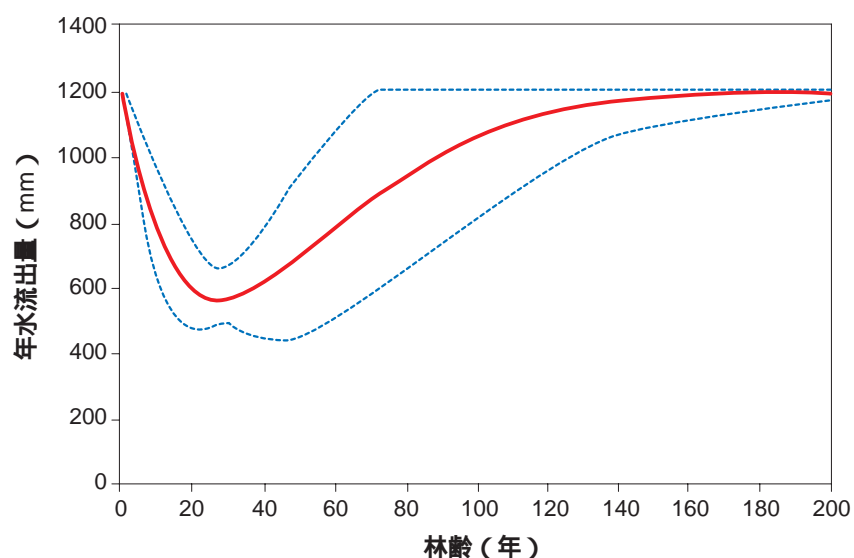


図3.3.3 マロンダ試験流域の観測結果を総合して得られた、林齢増加に伴う水流出量の変化（Vertessy ら，2001）。点線は95%信頼区間を表す。森林の水流出量は林齢が約25年のときに最小となり、その後林齢増加に伴いゆるやかに増加している。この曲線は提案者の名前をとってクチェラ曲線と呼ばれている。

## ②カルア試験流域、タタワンガロ試験流域（ユーカリ林の間伐に伴う水流出量の減少・増加）

ニューサウスウェールズ州州都シドニーの近郊は、メルボルン周辺とは異なり、より乾燥した土地に適するユーカリ属数種の混交林となっている。このタイプの森林に処理を加えたときの影響が調べられている。

カルア試験流域はシドニーの北約200kmに位置し、標高は450–940m、年降水量は1,450–1,750mmであり、夏の2–3月が比較的多雨、冬の8–9月が比較的少雨であ

る。森林の主要な構成樹種は、ユーカリ属の3種 (*E. saligna*、*E. laevopinea*、*E. andrewsii*) であり、平均樹高40m、胸高直径93cmに達する。面積13–97ヘクタールの8つの試験流域が設定され、そのうち6つの流域の森林を1983年に伐採、2つの流域を対照流域として残している。6つの流域では、伐採後の処理の影響を見るため、2流域は火入れをしないで天然再生、2流域は火入れして天然再生、2流域はトラクタによる皆伐と植林、という3種類の処理を行った。ライパリアン・ゾーンは伐採せずに残し、また勾配のきついところなどは伐採していないため、伐採面積率は各流域で25–79%と幅がある。

伐採前7年間、伐採後16年間の水文データを解析した結果、伐採面積率が小さい1流域を除いた5流域では、すべて、伐採0–2年後の水流出量は増加、3–12年後は伐採前の状態にもどり、13年以降、水流出量が減少した(図3.3.4)。水流出量を直接流出量と基底流出量に分離して評価した結果、伐採前の全流出量に占める基底流出量の割合は、標高の高い3流域で55%、低い2流域で29%と違いがあったが、伐採0–2年後の水流出量増加は、標高の高い3流域では主に基底流出量の増加により、標高の低い2流域では主に直接流出量の増加によりもたらされていた。それに対して、伐採13年後以降の水流出量減少は、5流域すべてで、主に基底流出量の減少によって生じていた。

この結果は、急速に成長してきた若い樹木が、蒸散により根から水を吸い上げ、土壌水分量が減少し、基底流出量を減少させたことを意味するものである。

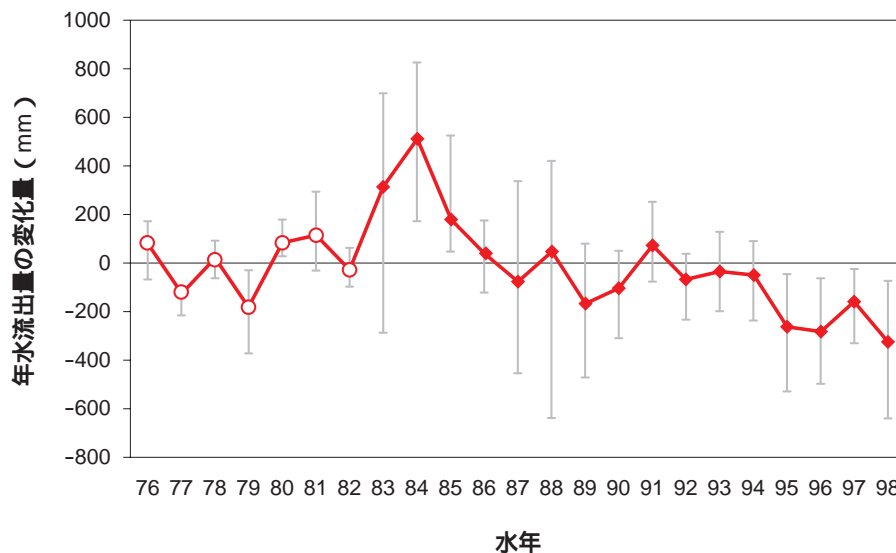


図3.3.4 カルア試験流域内6つの伐採流域における水流出量の変化(Cornishら, 2001)。伐採面積率がそれぞれ違うため、伐採面積当たりに換算して集計した。○が伐採前、◆が伐採後の値、上下線は6流域の値の分布範囲を示している。水流出量の増大は伐採後3年間のみ観測され、4年後以降は処理前の状態に戻っている。処理後13年以降はすべての流域で減少傾向になった。

タンタワンガロ試験流域は首都キャンベラの南約100kmに位置し、標高は800–950 m、年降水量は平均1,100mmである。ユーカリ属の3種 (*E. fastigata*, *E. obliqua*, *E. cypellocarpa*) が高木層の90%を占める。3つの試験流域があり、面積はそれぞれ22、68、86ヘクタールである。このうち一番小さい流域を伐採せずに残し、他の2流域を1989年に伐採した。伐採は、68ヘクタールの流域がパッチ状伐採、86ヘクタールの流域が択伐である。ライパリアン・ゾーン（溪流の両側20m）は伐採せずに残している。伐採1–4年後は、いずれの流域の水流出量も増加したが、その後、68ヘクタールの流域では水流出量が顕著に減少し、特に基底流出量が減少した。86ヘクタールの流域では、水流出量は伐採前の状態に戻ったが、基底流出量はやはり減少していた（図3.3.5）。両者の違いは、伐採方法の違いのためではなく、天然再生した森林の密度や成長速度に違いがあり、密度が高く成長が早い流域で水流出量が減少するタイミングが早かったためと解釈されている。

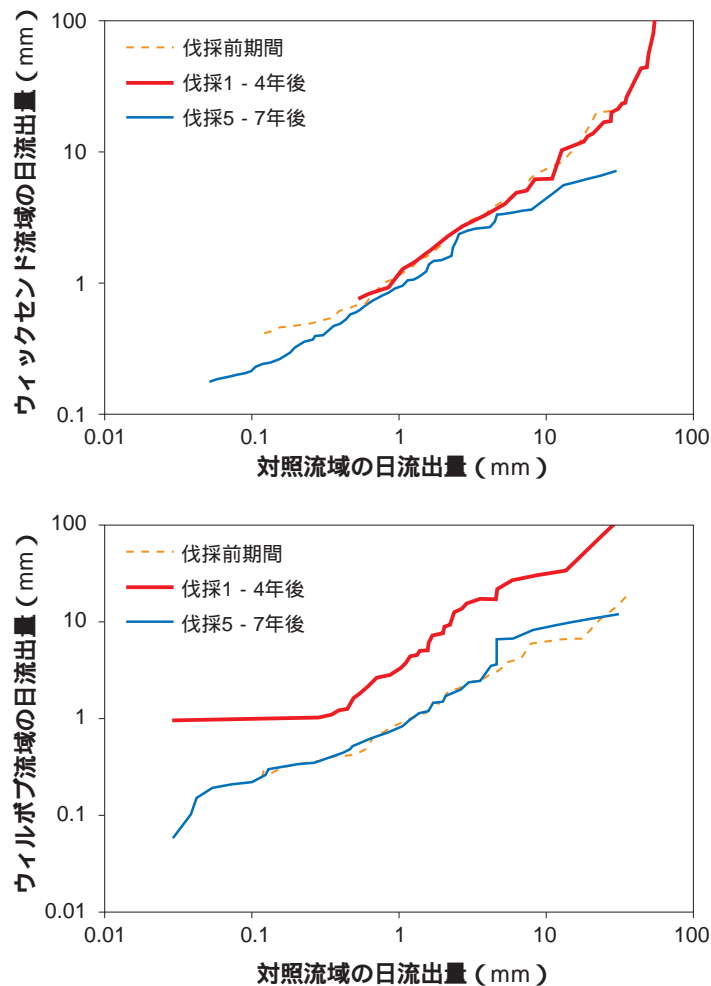


図3.3.5 タンタワンガロ試験流域における伐採前後の対照流域と処理流域の水流出量の比較（Lane ら，2001）。横軸は対照流域，縦軸は上がウィックセンド，下がウィルボブ流域。点線が伐採前，太線が伐採直後から4～5年間，細線が伐採4～5年後から伐採7年後まで。

### 3.4 ニュージーランド

ニュージーランドは、ほぼ全域が温暖湿潤な海洋性気候の火山島であり、モンスーンの影響下でないことを除いて、日本とよく似ている環境下にある。このような気候は日本同様、森林の生育に適しており、1,000年前の森林面積は国土の74%、2,000万ヘクタールに及んでいたという。しかし19世紀前半にヨーロッパ人が移住しはじめたころには、すでに先住民民族によって森林面積は1,130万ヘクタールに減少していた。その後、移住者によって森林は牧草地に転換され、1950年代には570万ヘクタールまで減少した。

1960年代に入り、社会経済情勢の変化が起きた。羊毛や食肉の価格が下落し、農業への補助金がカットされた。日本などが木材を輸入するようになり、牧草地に森林を造成した方が儲かるようになった。かくしてニュージーランドにおける人工林の面積は増加に転じた。すでに130万ヘクタールの人工林が造成され、毎年5万ヘクタールの割合で増えている（写真3.4.1）。農地を森林に転換したとき、そこから流れ出る川の水量や水質にどのような影響があるのかを調べるため、たくさんの試験流域が設定された。ここではこの中から4つの試験流域を取り上げ、どのような実験条件のもとでどのような結果が出たのかを検証していく。

ニュージーランドにおける森林と渇水に関する研究では、渇水の指標として、毎年の連続7日間平均流出量の最小値を用いることが多い。以下では連続7日間平均流出量の最小値を「渇水時流出量」と表記する。



写真3.4.1 ニュージーランド南島北部モトゥエカ川上流域におけるラジャータマツの大規模造林地。谷底に木が残っている部分はライパリアン・ゾーンを伐採せずに保全している部分。2000年11月25日、筆者撮影。

### ①グレンドフ試験流域（天然草地の森林への転換）

グレンドフ試験流域は、天然の草地をマツの森林に転換したことによる影響を調べるために、南島ダニーデンの西約70km、ワイポリ流域上流に設定された。標高は460–670m、平均年降水量は1,350mmで、夏に少雨の傾向がある。218ヘクタールのGH1流域が対照流域として、草地のまま放置され、310ヘクタールのGH2流域の67%に、ラジアータマツが1982年に植林された。植栽密度は1250本／ヘクタールで、1989年に間伐を行って270本／ヘクタールとしている。1991年には林冠が閉鎖した。

#### <水流出量への影響>

植林した1982年から6年後の1988年までは、水流出量に顕著な変化はみられなかったが、7年後の1989年になって、GH2の水流出量はGH1に比べて130mmも減少した。これは水流出量の29%に相当する。その後も減少は続き、減少量は12年後の1994年に273mmとなった（図3.4.1）。

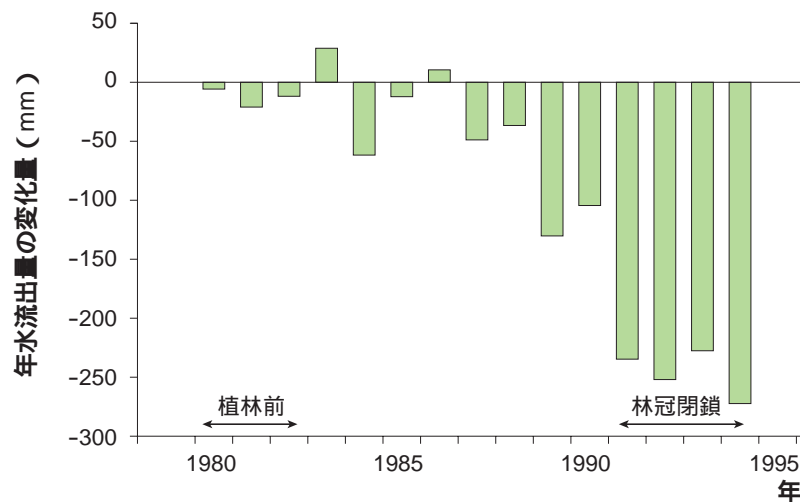


図3.4.1 グレンドフ試験流域における天然草地（GH1）と植林（GH2）流域の水流出量比較（Faheyら，1997）。1991年に林冠が閉鎖し、それに伴い森林流域の流出量が急激に減少している。

#### <洪水への影響>

植林前の1980–82年と植林後、間伐後で地表面が林冠で覆われた1994–96年で、洪水をピーク流出量の大きさに分けて4つのカテゴリーに分けて比較した。その結果、4つのカテゴリーすべてにおいて、植林前では両流域に有意な差がなかった平均ピーク流出量が、GH2の成林後には平均ピーク流出量に有意な差が現れた（図3.4.2）。4つのカテゴリーすべてにおいて、森林が成立した流域のピーク流出量は草地よりも明瞭に



小さくなり、減少率は64–74%の範囲であった。このような有意な差は、洪水発生回数、洪水時流出量でも同様に認められた（図3.4.3、減少率45–65%）。1994–96年に発生した洪水のうち、草地のままのGH1でピーク流出量が最大（17.8リットル／秒／ヘクタール）となった洪水の発生確率を調べたところ、約3年に1回発生する洪水であったが、同じ時に、森林に覆われたGH2のピーク流出量は、わずか5.3リットル／秒／ヘクタールであり、発生確率は1年に1回であった。同様に、1994–96年に発生した洪水のうち、草地のままのGH1で洪水時流出量が最大（42.9mm）となった

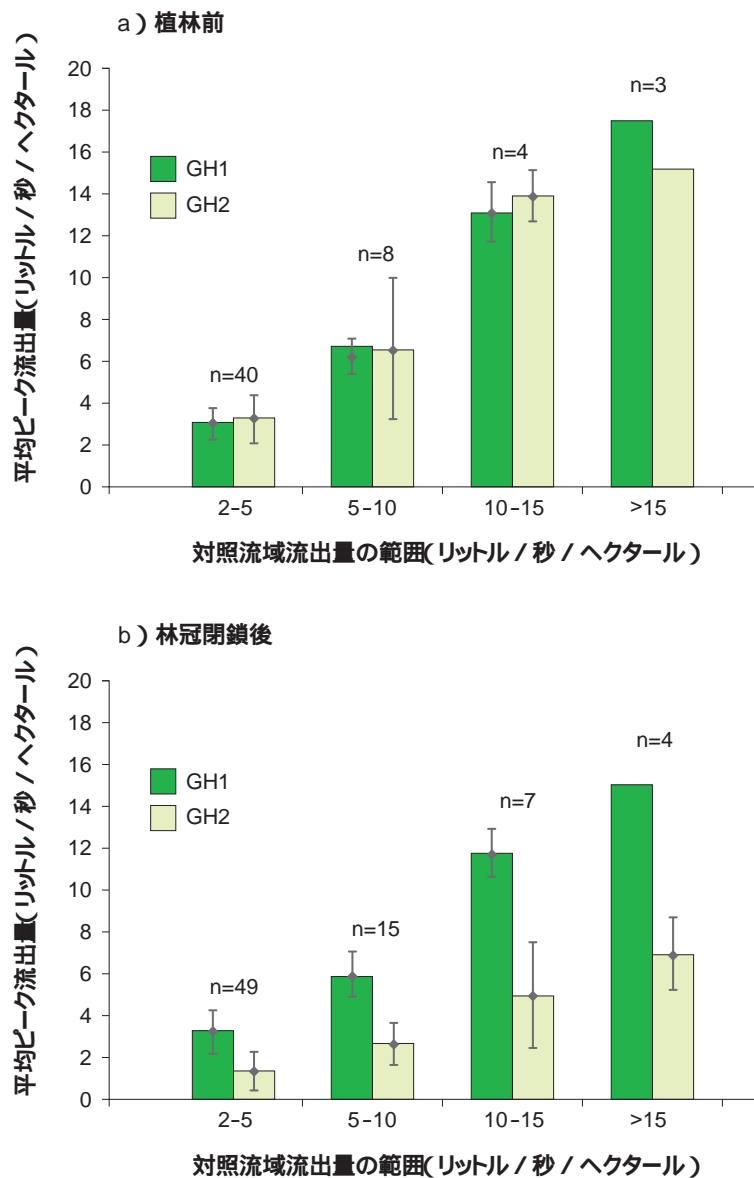


図3.4.2 グレンドフ試験流域における天然草地（GH1）と植林（GH2）流域の平均ピーク流出量の比較（Fahey ら，1997）。上図が植林前，下図が林冠閉鎖後。コントロール流域（GH1）のピーク流出量の大きさで4つに区分している。縦線は標準偏差。

洪水の発生確率を調べたところ、約2.6年に1回発生する洪水であったが、同じ時に、森林に覆われた GH2 の洪水時流出量は21.0mmであり、発生確率は1年に1回であった。流域が森林に覆われることによって、同じ大雨が降った場合に発生した洪水の発生確率が、3分の1になった、言い換えれば、森林は洪水の発生確率を3分の1にする効果を発揮した、といえる。ただし、3年に1回の洪水が1年に1回の規模に軽減されたからといって、30年に1回の洪水が10年に1回の洪水に軽減されるとは限らない。

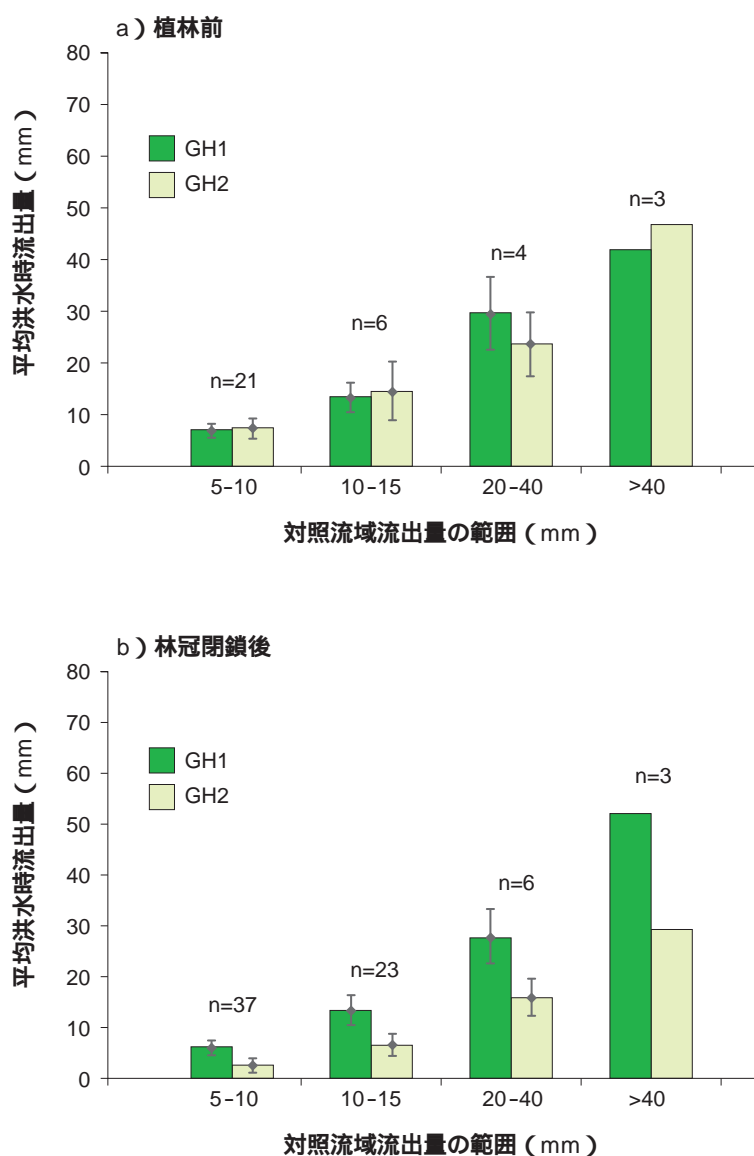


図3.4.3 グレンドフ試験流域における天然草地（GH1）と植林（GH2）流域の平均洪水時流出量の比較（Fahey ら，1997）。上図が植林前，下図が林冠閉鎖後。コントロール流域（GH1）の洪水時流出量の大きさで4つに区分している。縦線は標準偏差。

### ＜渇水への影響＞

渇水時流出量を、植林していない流域と植林した流域で比較した。植林5年後の1987年以降、植林した流域の渇水時流出量が顕著に減少していることが見て取れる(図3.4.4)。統計解析の結果、植林された流域で1年に1度の確率で発生する渇水と同等の渇水は、植林されなかった流域では4年に1度の発生確率であった。すなわち、植林した樹木が成木することによって、渇水の発生確率が高まったといえる。1989年に行われた間伐の影響は、このデータからは特定できない。

流況曲線を用いた解析も行われており、発生確率98%の最小流出量は植林されなかった流域、植林された流域の植林前(1980-82)ではそれぞれ0.10、0.09リットル/秒/ヘクタールであったのが、植林12-14年後(1992-94)には0.07リットル/秒/ヘクタールに減少した。

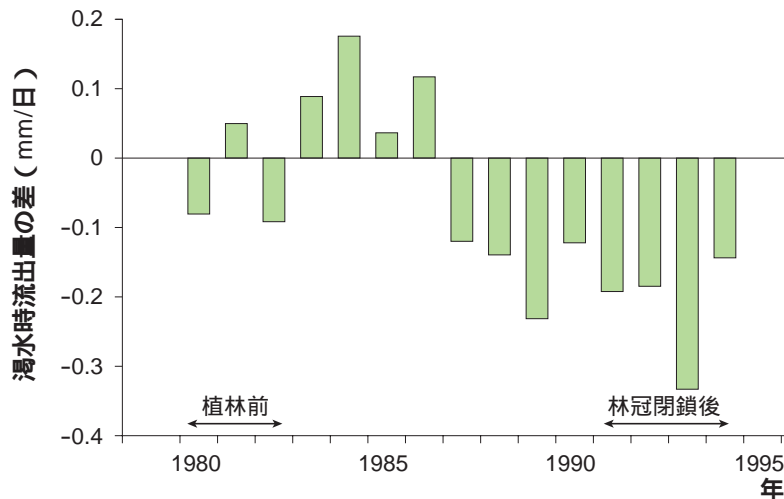


図3.4.4 グレンドフ試験流域における天然草地(GH1)と植林(GH2)流域の平均渇水時流出量の比較(Faheyら, 1997)。1987年以降、森林流域では草地流域よりも渇水時流出量が0.1~0.3mm/日少ない傾向が続いている。

### ②モウテレ試験流域(牧草地を森林に転換)

モウテレ試験流域は、南島北部ネルソンの南西20kmに位置するニュージーランドで最も古い試験流域の1つである。試験流域は6つあり、大きさは2.71~7.65ヘクタールの範囲である。土地被覆は最初、すべて牧草地であったが、6つのうち3つの流域にはラジャータマツを1,500本/ヘクタールの密度で植林し、2回の間伐により300本/ヘクタールに密度を調整し、1991年に収穫している。

### <洪水への影響>

植林後の1964-1993年で発生した洪水について、ピーク流出量の発生確率が2年に1回から50年に1回まで、5つのカテゴリーにおいて、植林した3流域と牧草地のままの3流域を比較評価した結果（図3.4.5）、すべてのカテゴリーで、同じ発生確率の洪水ピーク流出量は、牧草地の流域が森林流域の約2倍になっていることがわかった。この期間内で最も大きい洪水は1980年6月に起きているが、降水量119mm、牧草地の流出量101mmに対して森林流域の流出量はわずか25.5mmであった。全流域の流出の様子（6時間）を図3.4.6に示す。牧草地3流域の流出量は、グラフに示した期間中常に森林3流域を上回っており、特にピーク時に著しい差がある。森林3流域の平均ピーク流出量は、牧草地3流域平均の32%、約3分の1であった。この差は、降水の樹冠遮断量の違いと、降水前の土壤水分状態の違いによってもたらされていると考えられており、1980年6月洪水では、森林流域での樹冠遮断量が24.5mm、牧草地ではほぼゼロ、降水前の土壤に貯留可能な水分量の差は31.5mmと、それぞれ見積もられている。

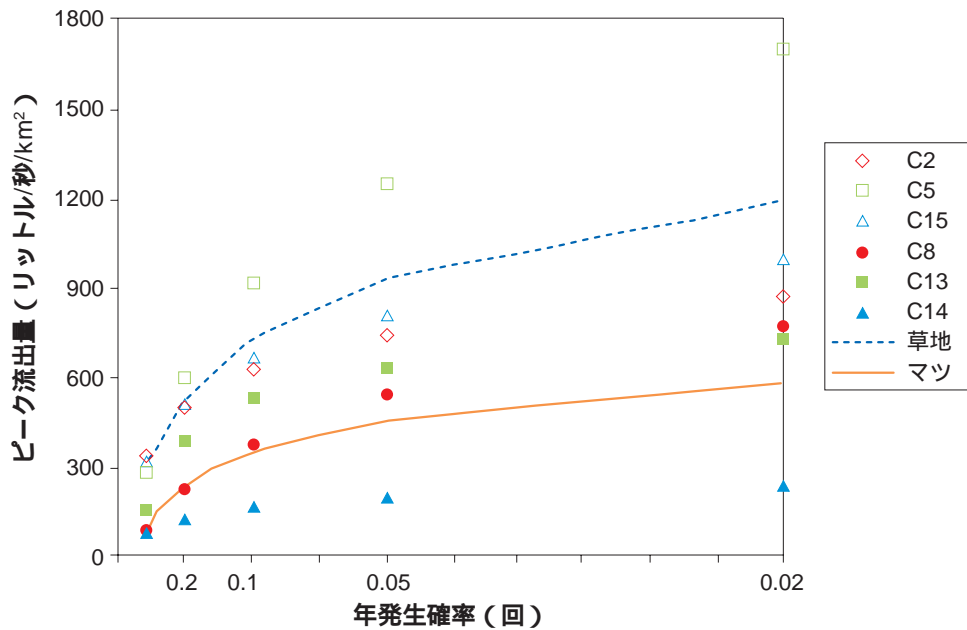


図3.4.5 モウテレ試験流域における発生確率別のピーク流出量 (Rowe ら, 1997). 草地の3流域は白抜き, マツ林の3流域は黒で示す. ピーク流出量はつねに草地流域で大きく, 発生確率が大きい(2年に1回)ときは5倍の, 小さい(50年に1回)ときでも2倍の差がある.

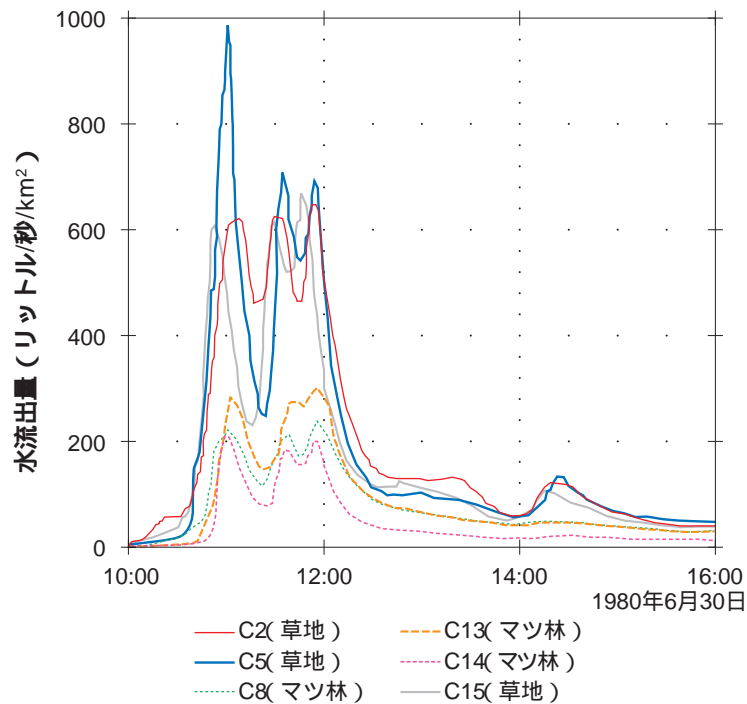


図3.4.6 モウテレ試験流域における1980年6月30日の洪水時水流出量比較 (Rowe ら, 1997)。横軸は時間 (左から右まで6時間), 縦軸が水流出量。草地の3流域はマツ林の3流域に比べてピーク流出量は2~5倍に達しており, 洪水流出量も明らかに多い。

### < 渇水への影響 >

ラジアータマツ植林後、樹冠が閉鎖した後の期間 (1978-85) で、流況曲線を用いて対照流域と伐採流域を比較した結果を図3.4.7に示す。この流域では流出量がゼロになる期間が長いが、植林流域と対照流域では平均年ゼロ流出量日数がそれぞれ157日、64日となった。

### ③ビッグブッシュ試験流域、マイマイ試験流域 (天然林の伐採)

ビッグブッシュ試験流域は、南島北部ネルソンの南西に位置し、DC1 から DC4 までの4つの流域からなる。大きさは4.8-20.2ヘクタールの範囲であり、植生は天然常緑樹林である。年平均気温は10.5℃、年降水量は1,307mmであり、年間を通じて均等に降る。最も小さいDC2はコントロール流域として収穫をせず、DC1及びDC4流域については、1980年にそれぞれ流域面積の87%および94%の森林が収穫され、翌1981年にラジアータマツが植林された。1986年と87年の間に本数密度を1,250本/ヘクタールから600本/ヘクタールにする間伐が行われ、1990年には林冠が閉鎖した。

マイマイ試験流域は、南島西海岸リーフトン近郊にあり、2-9ヘクタールの7つ

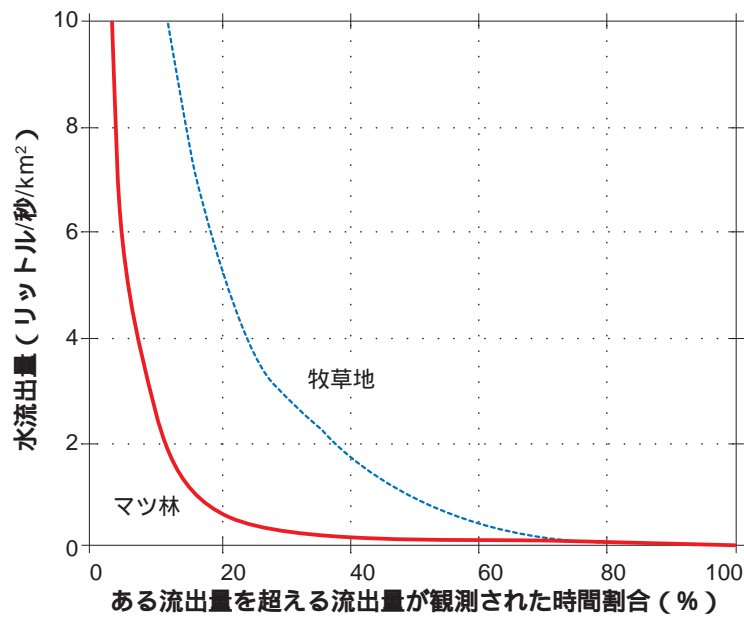


図3.4.7 モウテレ試験流域における流況曲線の比較 (Rowe ら, 1997). 実線が成熟したマツ林, 点線が草地.

の流域からなる。平均年降水量は2,450mmと多い。1979年に天然林を収穫して植林をする際、地ごしらえの方法の違い（火入れをするか、しないか）や、ライパリアン・ゾーンに緩衝帯を設けるか設けないかの違いが、流出量や水質に及ぼす影響を明らかにしようとした試験地である。

#### <水流出量への影響>

ビッグブッシュでは、収穫、植林後、DC1、DC4ともに年流出量はDC2に比べて増加し、増加量はそれぞれ312mm、344mmであった（図3.4.8）。これは両流域の水流出量のそれぞれ61%、68%にあたる。収穫、植林から5年後には、増加量がいったん減少しているが、間伐1年後に再び多くなった。この増加は1年間だけで、その後また減少し、収穫前の状態に戻っている。この一連の変化は、DC1とDC4で見事に同期している。

マイマイでは、初年度の増加量は200–650mmの幅に入っていた。

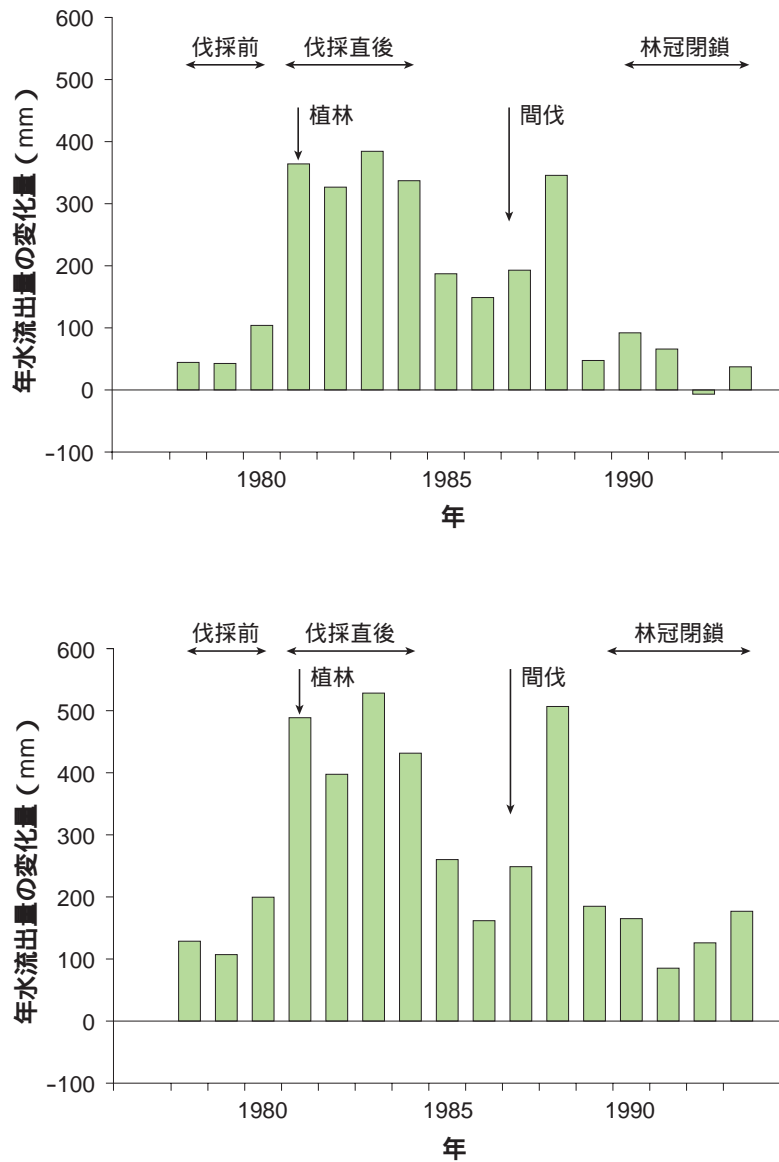


図3.4.8 ビッグブッシュ試験流域におけるコントロール（DC2）と伐採（DC1 = 上図，DC4 = 下図）流域の水流出量比較（Fahey ら，1997）。DC1 と DC4 は伐採の方法が異なる。いずれの流域も，伐採，植林直後に水流出量が約300mm増加するが，4年後から増加量が徐々に減少していくことがわかる。その後，間伐によって増加量は再び増加し，間伐直後は300mmに達するが，翌年に増加量は著しく減少し，伐採前の水準にほぼ戻っている。

### <洪水への影響>

ビッグブッシュでは、収穫前の1978-1980年の期間において、3流域のピーク流出量に有意な差はなかったが、収穫後の1981-1986年の期間では、DC1及びDC4のピーク流出量は、コントロール流域のDC2と比べて有意に高くなった（図3.4.9）。

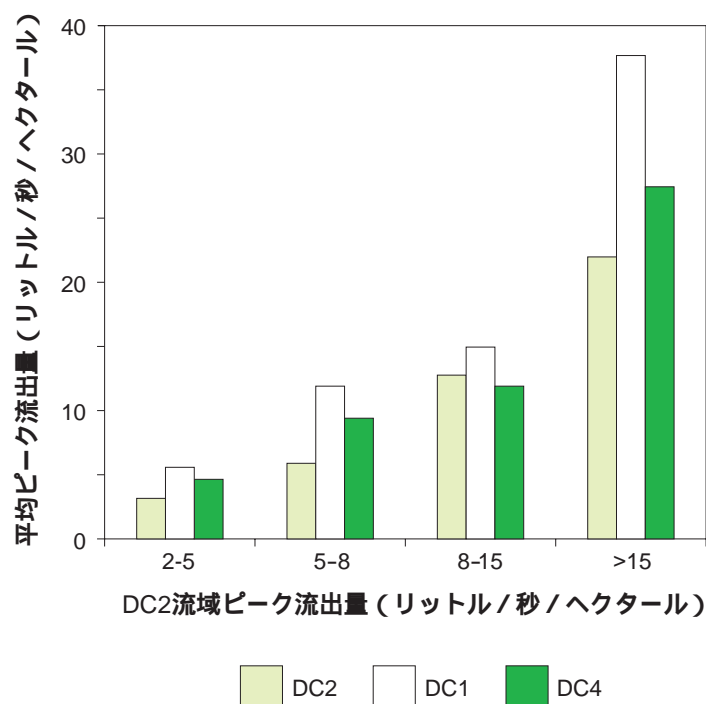


図3.4.9 ビッグブッシュ試験流域におけるコントロール流域 (DC2) と伐採流域 (DC1, DC4) の平均ピーク流出量の比較 (Rowe ら, 1997). コントロール流域 (DC2) のピーク流出量の大きさを4つに区分している.

例えば収穫後に観測された洪水のピーク流出量は、DC1 で38リットル/秒/ヘクタール、DC2 では24リットル/秒/ヘクタールであったが、前者は25年に1回の、後者は19年に1回の頻度で起きる洪水であった。すなわち、森林を収穫したことによって、同じ雨によってもたらされる洪水の起こる頻度が、19年に1回から25年に1回に減少したことになる。

マイマイ試験流域では、皆伐、火入れ直後の1980年に M7、M8 流域で観測されたピーク流出量は、コントロール流域 (M6) と比べて有意に大きくなり、増加率は2-5、5-10、10以上 (リットル/秒/ヘクタール) の範囲で、それぞれ60%、45%、30%であった (図3.4.10)。一方、夏の洪水時に皆伐流域 (M5、M13) のピーク流出量が顕著に増加する一方、冬ではさほど差が生じなかった。夏には樹木の活発な蒸散によってコントロール流域の土壌水分減少量が皆伐流域に比べて大きい、蒸散があまり活発でなくなる冬には、その差は小さくなることから、この研究結果から示唆されている。



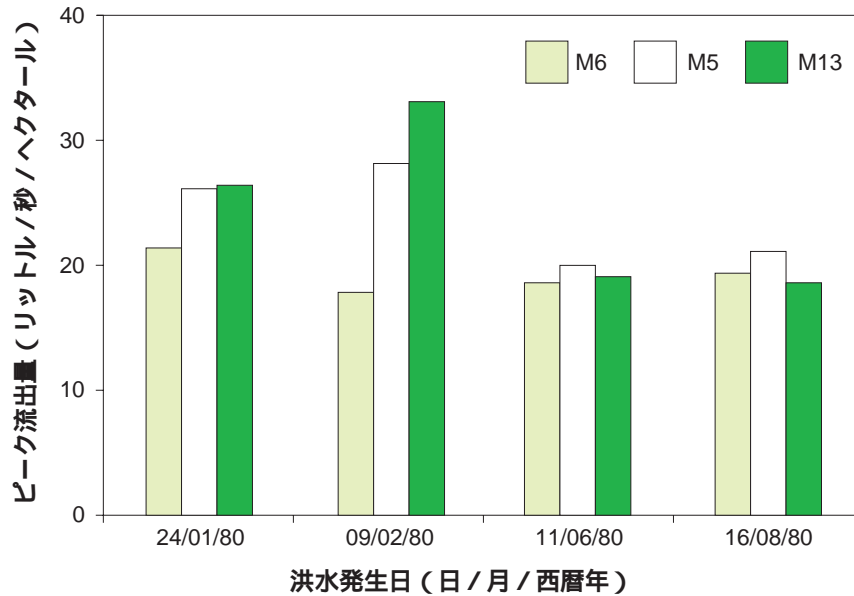


図3.4.10 マイマイ試験流域におけるコントロール（M6）流域と伐採（M5, M13）流域のピーク流出量の比較（Rowe ら, 1997）。左2つが夏, 右2つが冬. 夏の流出ピークは伐採流域で顕著に大きくなっているが, 冬では差がない. これは夏に伐採流域で土壌水分状態がコントロール流域に比べて湿潤であることを意味する。

### < 渇水への影響 >

ビッグブッシュ試験流域で、渇水時流出量の最小値を、対照流域である DC2 と、伐採・植林流域である DC1 および DC4 流域との差を図3.4.11に示した。DC2 は流出量がゼロになることがあり、その期間は対象から除いている。DC2 の渇水時流出量最小値は、おおむね0.02–0.04mm/日の範囲にある。1980年の伐採後、伐採・植林流域の渇水時流出量最小値は DC2 に比べて明らかに増加していることがわかる。増加量は伐採4年後に最大となり、その後減少に転じ、伐採から約10年後、1989年～90年にかけて元の水準に戻っていることがわかる。

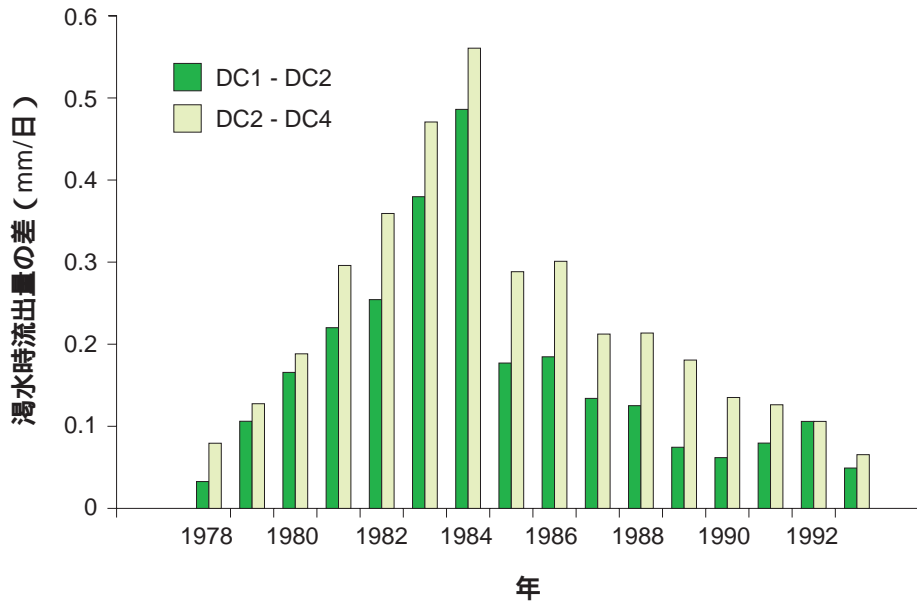


図3.4.11 ビッグブッシュ試験流域におけるコントロール（DC2）と伐採（DC1，DC4）流域の平均渇水時流出量の比較（Faheyら，1997）．伐採流域では森林流域よりも渇水時流出量が多く，その差は年々拡大して1984年には0.5mm／日になった．その後，水流出量の差の減少に伴い渇水時流出量の増加分も減少している．間伐の影響は現れていない．

### 3.5 南アフリカ

意外かもしれないが、世界で最も森林と水の関係を科学的に正確に認識し、それを政策に反映させ、実行に移しているのは、南アフリカだといわれている。水を管理する役所と森林を管理する役所が合わさって一つの局（水森林局）を形成しているのは、世界でも南アフリカだけであろう。この国全体の平均年降水量はわずか440mmであり、川を流れる水はそのうちの10%に満たない。1920年代にはすでに、川の水が少ないのは、当時盛んに植林されていたマツやユーカリが水を消費しているためではないかという疑いがもたれていた。1935年には、植林が気候、水保全および土砂侵食に及ぼす影響を研究することを目的としたジョンカーズホーク森林研究ステーションが設立され、スイスのエメンタール試験流域やアメリカのワゴンホイールギャップ試験流域にならい、8流域からなるジョンカーズホーク試験流域が設置され、1940年から61年にかけて次々と植林が行われた。ジョンカーズホーク森林研究ステーションに所属していたボッシュがアメリカのヒューレットと共著で1982年に発表した有名なレビュー論文には、南アフリカの10流域が掲載されており、これはアメリカに次いで多い（ちなみに3番目に多いのは日本の5流域＝上川、釜淵、宝川、竜の口山南谷、北谷）。ここでは植林の影響とその後の間伐の影響を調べた2つの試験流域の例を示す。

### ① ジョンカーズホーク試験流域（冬雨地帯にマツの植林）

ジョンカーズホーク試験流域は、西ケープ郡ステレンボッシュの東10kmに位置する。典型的な地中海性気候で、冬である4-10月に80%の雨が降る。面積27-246ヘクタールの8流域が設定されている。これらの流域はもともと低木に覆われていたが、まず1940年にボスボウクルーフ流域（200ヘクタール）において、流域の57%にラジアータマツの植林が行われた。その結果、流出水量は減少し、最大減少量は23年後の325mmであった。ビエシエヴレイ流域（27ヘクタール）では、流域の98%にラジアータマツの植林が1948年に行われた。9年目に本数密度46%の間伐、16、23年目に34%の間伐、28年目に22%の間伐を行った。これらの間伐が年流出量および乾季（夏）の流出量に及ぼした影響が調べられている。その結果は以下のものであり、解釈の難しい結果となっている（図3.5.1）。年々の降水量の変動に大きく影響されている可能性が指摘されている。

2回目間伐：年流出量＝増加、乾季の流出量＝減少、雨季の流出量＝増加

3回目間伐：年流出量＝増加、乾季、雨季の流出量＝ともに増加

4回目間伐：年流出量＝減少、乾季、雨季の流出量＝ともに減少

その後、ビエシエヴレイ流域のマツ林は1986年に皆伐されたが、その結果についてはまだレポートされていない。

### ② ウェストファリア試験流域（夏雨地帯にユーカリの植林）

ウェストファリア試験流域は北部郡ツァネーンのすぐ北に位置し、平均年降水量は1,600mm、夏雨の亜熱帯気候下であり、84%の雨が10-3月に降る。もともとの植生は常緑高木林と落葉林との遷移帯である。39.6ヘクタールのD流域は、1981年にライパリアン・ゾーンの樹木、続く82年に全体の樹木の皆伐を行い、ブルドーザで小さな木まで除去した。続く83年にはユーカリ属（*E. grandis*）の木を植林し、3年後に本数密度46%、5年後に34%、8年後に50%の間伐を行った。面積32.4ヘクタールのB流域をコントロールとして残した。この間の流出量の変化をダブルマスカーブで見ると、伐採直後にわずかな流出量の増加があったが、すぐに減少に転じ、3回の間伐にもほとんど影響されず減少状態が続いていることがわかる（図3.5.2）。乾季の水流出量（基底流出量）だけをみても同様な傾向であり、ユーカリ属の水消費量が非常に大きいことを示している。

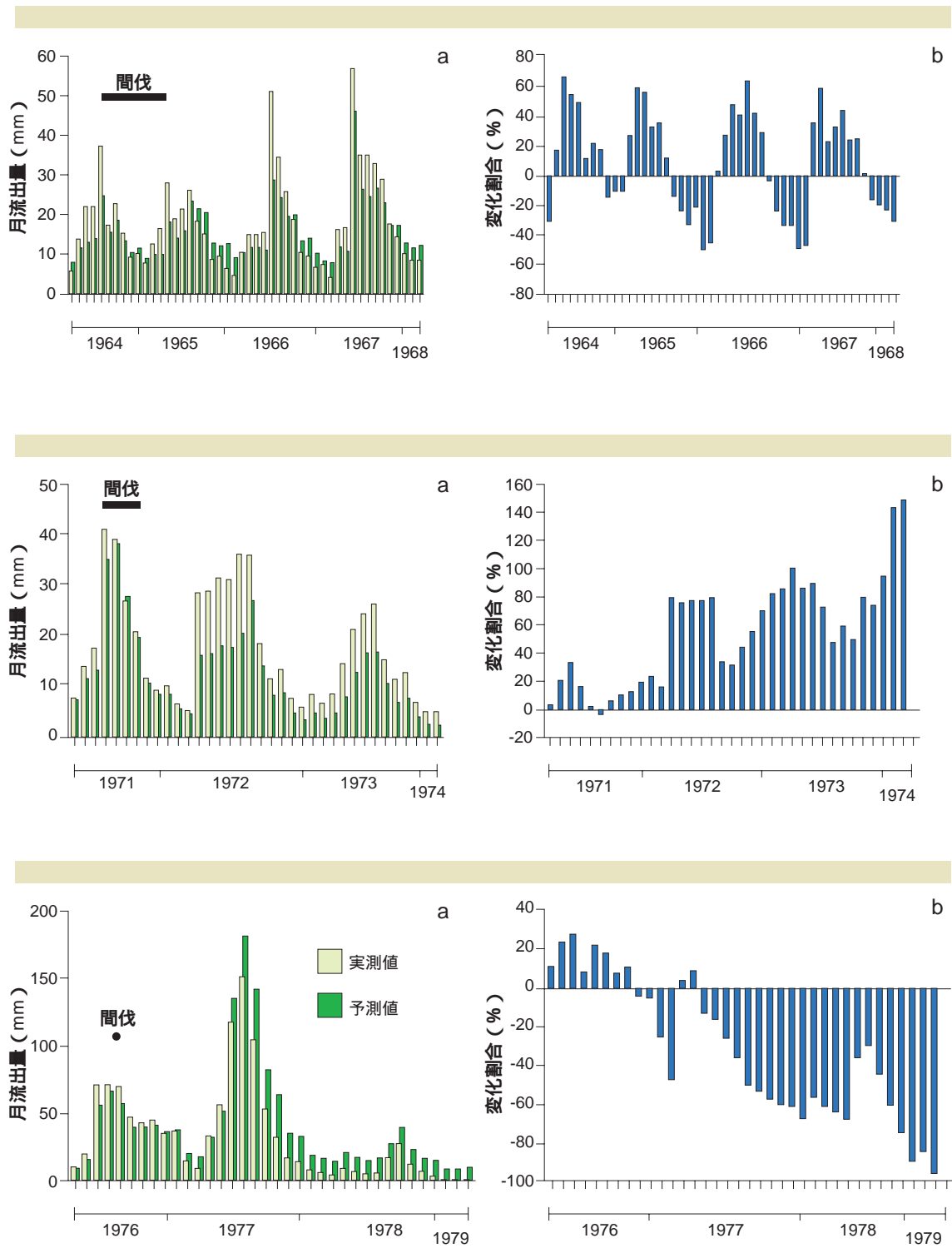


図3.5.1 ジョンカーズホーク試験流域内ピエシエグレイ流域における間伐に伴う月流出量の変化 (Lesch ら, 1997). 左から順に I, 2 回目間伐 (1964-65年), II, 3 回目間伐 (1971-72年), III, 4 回目間伐 (1976-77年), 左図 (a) は白棒が実測流出量, 緑棒が対照流域のデータに基づく予測流出量, 右図 (b) は実測値と予測値の差が予測値に占める割合を示す.

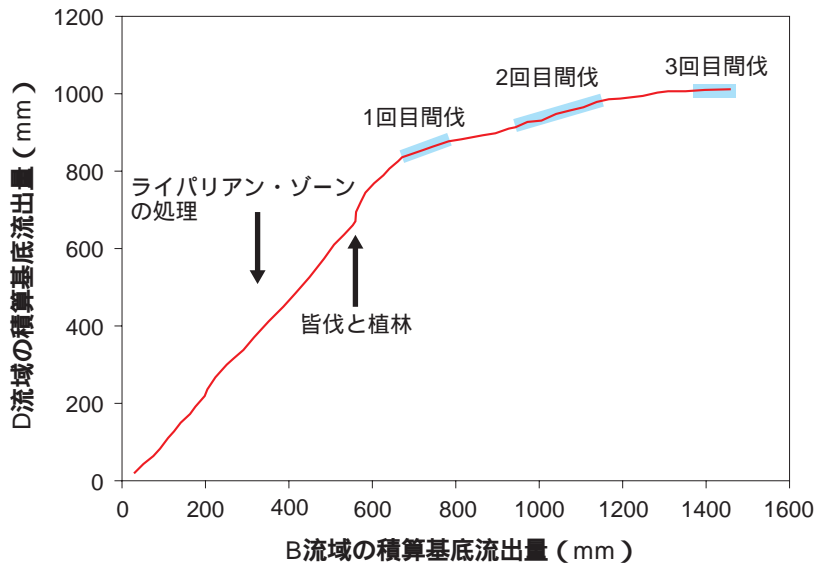
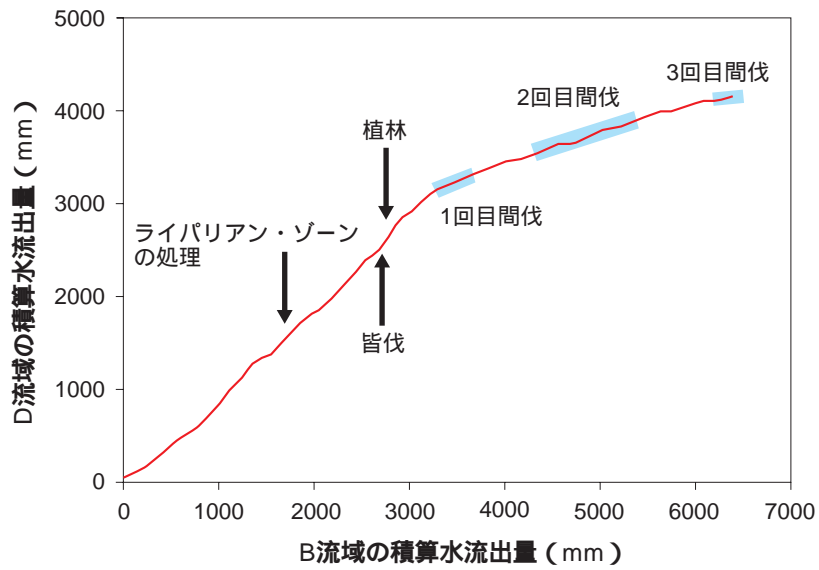


図3.5.2 ウェストファリア試験流域におけるダブルマスカーブ (Leschら, 1997). 上図は水流出量, 下図は基底流出量のみについて描いたもの. 横軸はコントロール流域 (B), 縦軸は処理流域 (D). 処理として伐採と植林, 3回の間伐が行われている.

## 3.6 インド

インドは、熱帯モンスーンないし亜熱帯気候下にあり、蒸発散量は多く、顕著な乾季があり、降水は短い雨季に集中して降る。食料生産のかなりの部分を灌漑農業に依存しているインドでは、特に乾季の水資源の確保は深刻な問題である。一方、インドにもオーストラリア同様、ユーカリの人工林が広い面積に分布し、ユーカリ林の水消費と水資源の問題は古くから人々の関心を集めていた。

### グレンモルガン試験流域（草地にユーカ리를植林し、10年で皆伐、萌芽再生）

グレンモルガン試験流域は、インド南東部タミルナドゥ州ニルギリ郡に位置する。標高は2,200m、平均年降水量は1,379mmで、降水の大部分は雨季の4-10月に降る。1968年に32haの2試験流域が設定された。植生はもともと天然の草地であったが、1971年に片方の流域（流域B）にユーカリ属のブルーガム（*E. globulus*）の植林を行った。植林面積は流域の59%である。残りの41%およびもう片方の流域（流域A）は草地のまま放置された。それから10年後の1981年にB流域のユーカリの萌芽再生（皆伐後、切り株から自然に芽が出て樹木が再生する方式）が行われた。植林前4年間、植林後10年間、1回目皆伐後10年間、計24年間の観測が続けられた。

### <水流出量への影響>

植林後、水流出量の顕著な減少が4年後から観測された（図3.6.1）。ユーカリの樹高や胸高直径の成長量は、植林4-7年後がピークであり、その後、成長量は少なくなっていくが、水流出量の減少幅は植林8年後以降も変化がなかった。皆伐後は、萌芽再生した翌年から水流出量の減少が観測された。水流出量の減少は、樹高や幹断面積密度でなく、木の本数密度によって決まっていると結論付けられている。

### <洪水への影響>

洪水への影響は、発生回数、ピーク流出量について調べられている。A流域で0.47リットル/秒/ヘクタール以上のピーク流出量を観測したイベントを洪水と定義し、流出量のレンジ別に発生回数を比較した結果、植林後のB流域では小さい洪水の数がA流域より多く、逆に大きい洪水の数がA流域より少なくなった（図3.6.2）。平均ピーク流出量は、植林前はA流域がB流域の1.3倍であったのが、植林後は0.54倍、皆伐後は0.52倍と顕著に減少した。植林、萌芽再生が出水規模を抑える効果があったことを明瞭に示している。

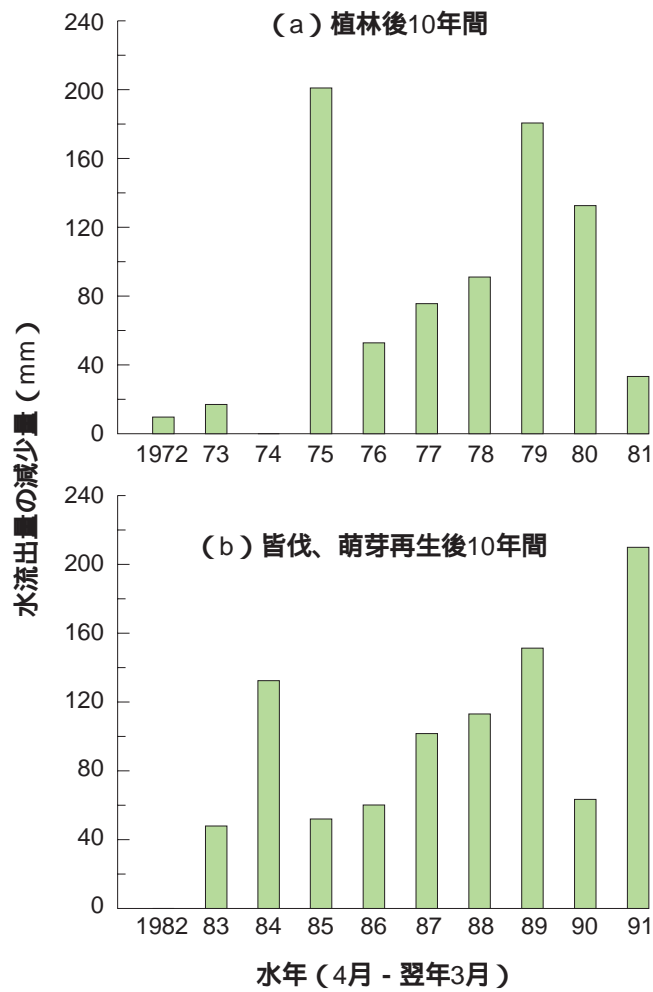


図3.6.1 グレンモルガン試験流域における処理流域の植林，その後の皆伐と萌芽再生に伴う水流出量の減少量（Sharda ら，1998）．上図は植林木の成長に伴う変化，下図は萌芽再生に伴う変化．草地である対照流域と比べて，森林を造成した流域の水流出量は減少している．

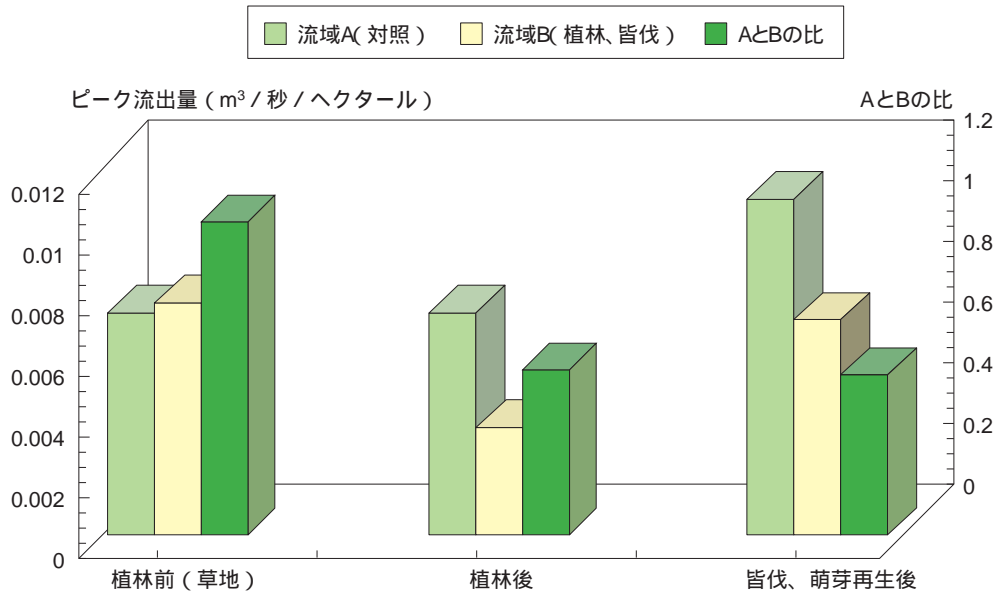


図3.6.2 グレンモルガン試験流域における植林前，植林後，その後の皆伐と萌芽再生に伴うピーク流出量の変化（Sikka ら，2003）．対照流域（A），処理流域（B）のピーク流出量および両者の比を示す．森林造成後，ピーク流出量はほぼ半減している．

### < 渇水への影響 >

連続10日間平均日流出量を用いて流況曲線を描き、植林前4年間、植林後10年間、皆伐後10年間をそれぞれ平均して比較した結果を図3.6.3に示す。植林前はA、B両流域の曲線の差はわずかであるが、植林後、皆伐後ともにB流域の渇水時流出量がA流域より小さくなっている。発生確率が下から5%の渇水時流出量を比較すると、植林前はほぼ同じであったのが、植林後はB流域が0.107mm/日、A流域が0.215mm/日で、植林流域が1/2となっており、皆伐後はB流域が0.033mm/日、A流域が0.125mm/日で、皆伐流域が約1/4となっている。流出量が最も少ないのは乾季の終わりである3月であるため、3月のA流域とB流域の平均流出量比を調べると、植林前で100:88であるが、植林後、皆伐後はそれぞれ100:50、100:46となっている。熱帯モンスーン気候下の地域において、乾季の終わりの時期は、水資源を巡る需要と供給のバランスがもっとも逼迫するときであって、この時期の水流出量の減少は大きな問題となる可能性がある。



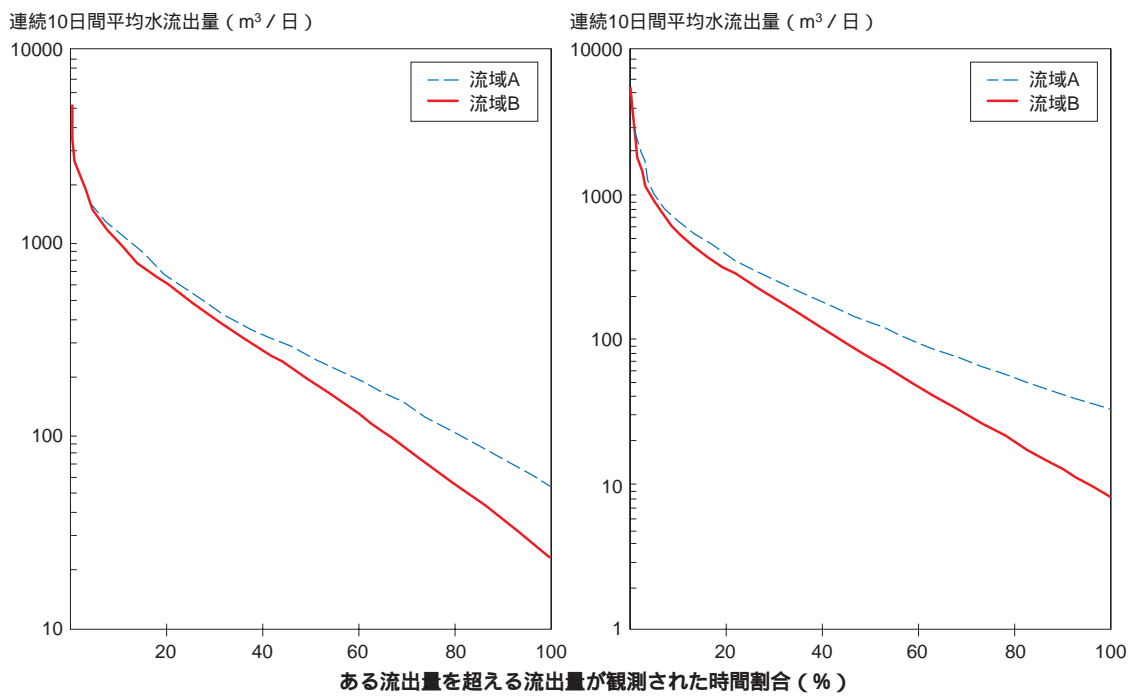
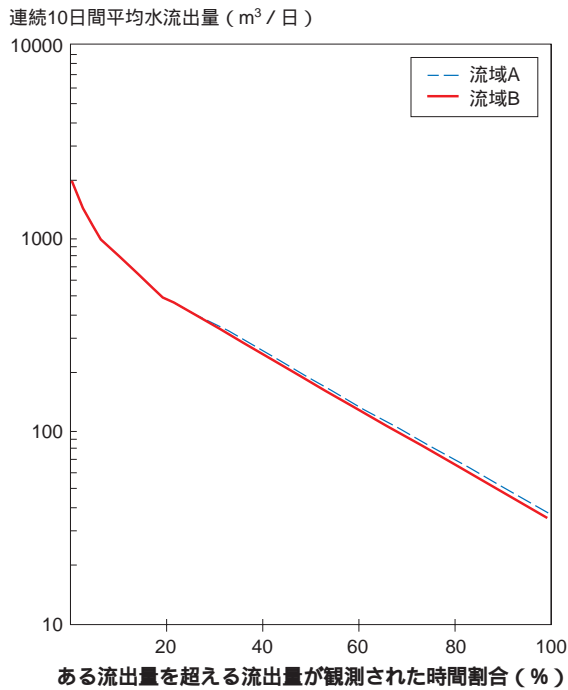


図3.6.3 グレンモルガン試験流域における処理前、植林後、その後の皆伐と萌芽再生に伴う流況曲線の変化 (Sikka ら, 2003). 破線が対照流域 (A), 実線が処理流域 (B). 森林造成後、渇水時流出量は減少しており、萌芽再生後にその差が広がっている (縦軸の目盛間隔が違うことに注意).

### 3.7 台湾

台湾は亜熱帯気候に属し、冬でも暖かいことを除いて、日本と似た条件下にある。国土の74%が森林に覆われた急峻かつ脆弱な山地で、過密な人口はわずかな沖積平野に集中し、地震や台風に頻繁に襲われ、そのたびに崩壊や土石流が発生し、深刻な自然災害をもたらす。大雨の規模は世界記録レベルであり、例えば1996年8月1日には台風による大雨で、阿里山では連続24時間降水量1,749mmを記録している（世界記録は1,870mm）。1999年9月21日の大地震は2,400人以上の死者を出したが、同時に2,365箇所崩壊、土石流、地すべりが起きている。そのような事情もあって、台湾では森林と水の関係は活発に研究されている。たくさんの試験流域があり、国立森林研究所や大学により管理、運営されている。ここで紹介する蓮華池（1966年開設）の他、扇平（高雄県、1967年開設、標高937–1,137m、年降水量3,459mm、5流域21.4–91.6ヘクタール）、畢祿（ピールー、1969年開設、標高2,530–2,622m、年降水量2,394mm、2流域144–238ヘクタール）、石門（シーメン、1976年開設、標高1,184–1,266m、年降水量2,143mm、2流域65.5–69.9ヘクタール）などがあるが、実際に流域の処理が行われたのは蓮華池だけなのである。

台湾は、アジア地域で最も早くアメリカ式の LTER を取り入れた国として知られており、1992年に国家科学会議が中心になって台湾生態系研究ネットワーク（TERN）が設立された。以降現在に至るまで、アジア地域のアメリカ式 LTER は台湾のリーダーシップによって推進されている。2001年現在、台湾には5地点の TERN サイトがあり、うち2サイトで流域試験が行われている。1つは福山（フーシャン、宜蘭県、1993年開設、平均標高850m、年降水量3,315mm、2流域57、97ヘクタール）、もう1つは關刀溪（グァンダウシー、南投県、1995年開設、1流域47ヘクタール）であり、国立森林研究所、国立東華大学、国立台湾大学、国立中興大学などの研究者が中心となって、学際的な共同研究を推進している。

#### 蓮華池（リェンホアチー）試験流域

蓮華池試験流域は台湾中部、日月潭（リーユエ湖）の北西5kmに位置しており、植生は常緑広葉樹林、平均年降水量は2,100mmである。80%の雨は5–9月の間に降る。5つの試験流域があるが、そのうちLHC–4流域（5.86ヘクタール、標高728–797m）を1978–79年に皆伐した。再生木を刈り払い、1980年に中国ファーを植林した。隣接するLHC–5（8.61ヘクタール、標高735–788m）およびLHC–3（3.40ヘクタール、標高666–781m）が対照流域である。

#### <水流出量への影響>

伐採後の流出量は増加し、増加量は雨季（5－9月）の初年度、2年度にそれぞれ402mm、184mm、乾季（10－4月）の初年度、2年度にそれぞれ46mm、20mmとなっている。

#### <洪水、渇水への影響>

LHC-5との比較では、伐採流域のピーク流出量の中央値は48%増加した。また、LHC-3との比較では、ピークの到達時間は23%短くなり、ピーク流出量は24%増加、基底流出量も7%増加した。

現在も観測は続けられているようであるが、森林が成長した後の水流出量の変化については報告されていない。

### 3.8 マレーシア

マレーシアは熱帯雨林気候に属し、気温は年中高温で、降水は1年を通じて降り、目立った乾季が存在しない。マレーシアではイギリスの植民地になって以降、熱帯雨林が切り開かれ、ゴムやアブラヤシ農園への転換が盛んに行われた。対照流域法による森林伐採の影響評価は1970年代から行われはじめ、現在は熱帯雨林地域で最も盛んに流域試験を行っている国といえる。

マレーシアは国土が西マレーシアと東マレーシアに分かれており、前者はマレー半島、後者はボルネオ島北部に位置する。ここでは、西マレーシアの2試験流域と、東マレーシアの1流域を紹介する。

#### ①スンガイ・テカム試験流域（天然林の農地転換）

1973年に、森林からココアやオイルパーム農園への転換が、環境に及ぼす影響を総合的に評価することを目的とした、“スンガイ・テカム試験流域プロジェクト”が立案、実行された。実行メンバーは、灌漑排水局、農業局、環境局、連邦土地開発公団、森林局、森林研究所、マラヤ大学、マレーシア農科大学の8機関にまたがる、省庁横断的・学際的な集団であった。

試験流域はパハン州ジェラントウットのトゥンラザク農業研究センターの中であり、植生は択伐された低地フタバガキ林である。3つの流域（A、B、C）からなり、流域面積は37.7、96.9、56.3ヘクタールである。A流域はB流域に含まれており、A流域に含まれないB流域の部分をサブB流域（59.2ヘクタール）と称する。平均年降水



写真3.8.1 スンガイ・テカム試験流域の処理流域における伐採、火入れ直後の様子（DID, 1989）。

量は1,916mmである。サブB流域では1980年に皆伐、火入れを行い、81年に整地、カバー樹木の植栽、82年にオイルパームの植栽を行った（写真3.8.1）。A流域では1982年に皆伐、火入れを行い、83年に整地、カバー樹木の植栽、カカオの植栽を行った。カバー樹木とは、カカオなどの生育を良くするために、日射を防ぎ、窒素を固定する役割を担うマメ科の樹木である。C流域は伐採せずに放置された。

### ＜水流出量への影響＞

A、Bいずれの流域でも、伐採後の水流出量は顕著に増加した（図3.8.1）。A流域

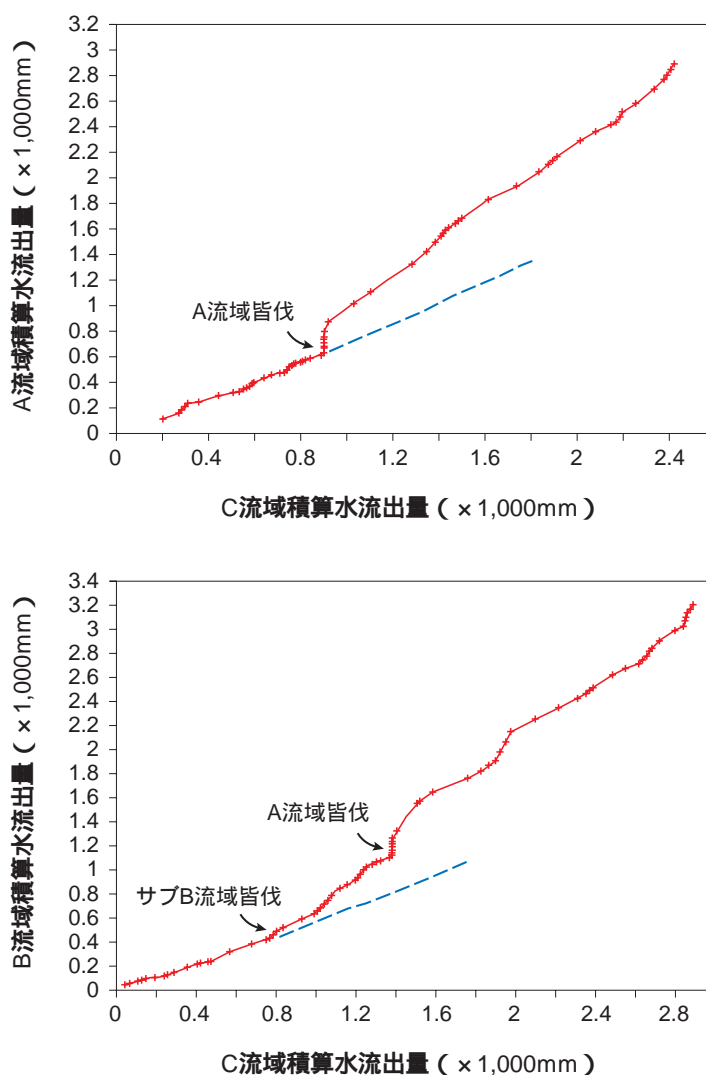


図3.8.1 スンガイ・テカム試験流域ダブルマスカーブ (Abdul Rahim, 1988)。上図はA流域，下図はB流域について描いたもの。横軸はコントロール流域 (C)。B流域はA流域を含んでおり，A流域の処理とサブB流域の処理に時間差があるため，B流域のダブルマスカーブ上では変曲点が2回，現れている。

では初年度から順に、110、706、353、263mmの増加、B流域では順に145、155、137、822、793、476mmとなっている。B流域で、4年度から増加量が急に大きくなっているのは、サブB流域の皆伐から3年後にA流域（B流域に含まれている）を皆伐したためである。年間822mmという増加量は、これまで世界中で観測された増加量のうち最大となっており、湿潤熱帯における森林の蒸発散量が大きいことを示している。

#### ＜洪水への影響＞

洪水流出量が全流出量に占める割合は、B流域伐採後3年間の平均で19%から37%に増加したが、A流域では26%から21%に減少した。ピーク流出量についてはB流域で38%増加した。

これらの研究成果は最終報告書の形でまとめられている。

当時、このプロジェクトに森林研究所から参加した若手研究者は、その後現在に至るまで、半島マレーシア森林水文研究のリーダーとして活躍している。

#### ②バレンブン試験流域（天然林の択伐）

バレンブン試験流域は、ネグリスンビラン州にあり、択伐が流出水量と水の濁り具合に及ぼす影響を検証することを目的として1979年に観測が始められた。試験流域はコントロール、C1、C2の3つの流域からなり、流域面積はそれぞれ4.6、13.3、30.8ヘクタールである。標高は170–300m、平均年雨量は1,900mmである。コントロール流域は伐採せずに残し、C1流域は商業的択伐（蓄積の40%を収穫、林道・搬出路密度140m/ヘクタール）、C2流域では制御された択伐（蓄積の30%を収穫、ライパリアン・ゾーンは伐採せずに残し、林道・搬出路密度100m/ヘクタール）を行った。

#### ＜水流出量への影響＞

択伐後、水流出量は増加し、初年度以降毎年の増加量はC1で165、142、175、188、161、168、113mm、C2で87、70、106、102、53mmである（図3.8.2）。C2は択伐面積が小さく、ライパリアン・ゾーンを残した分、増加量がC1に比べて抑えられており、その傾向は5年間継続していることがわかる。択伐跡地は放置され、パイオニア樹種を中心とした森林が自然回復してきているが、C1では少なくとも7年後まで流出量の増加が継続した。直接流出量は有意に増加したが、ピーク流出量には有意な増加は認められなかった。

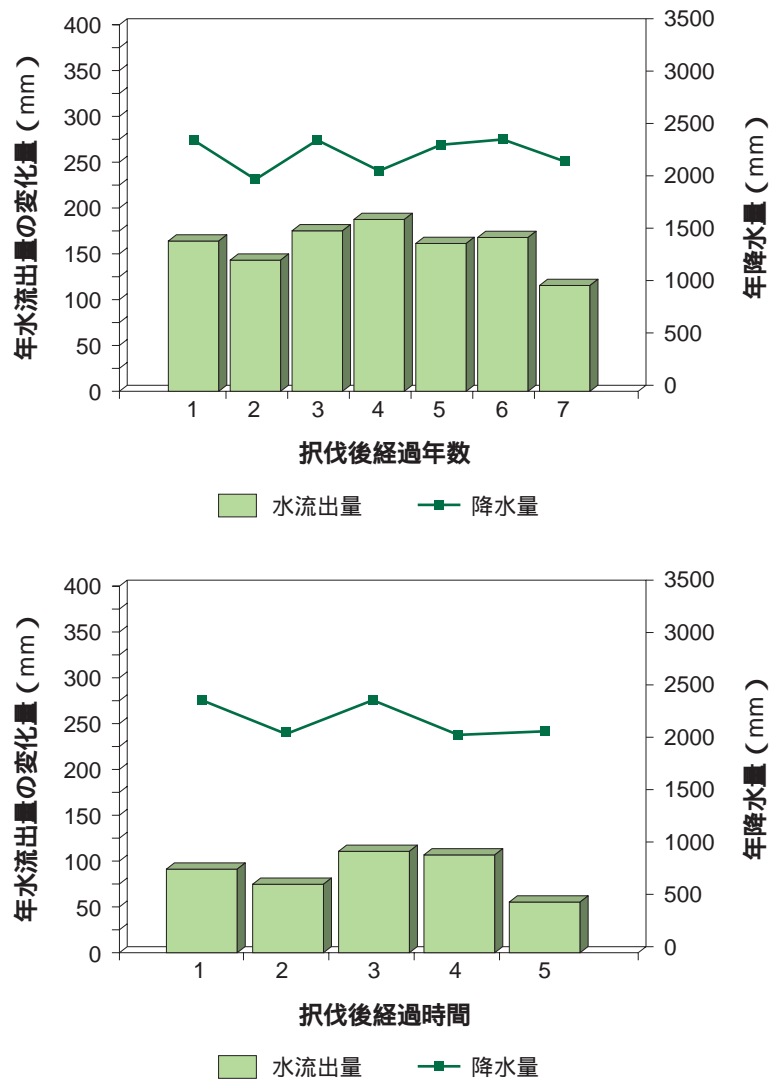


図3.8.2 バレンブン試験流域における熱帯雨林の択伐に伴う水流出量の増加量の変化 (Abdul Rahim ら, 1994). 上図がNo. 1流域, 下図がNo. 3流域. 棒グラフは水流出量増加量 (左軸), 折れ線グラフは降水量 (右軸).

### ③メンドロン試験流域 (天然林の皆伐と早生樹種の植林)

メンドロン試験流域は、ボルネオ島サバ州コタキナバルから海岸沿いに西南方向に下り、シピタンからサラワク州との州境に沿って内陸に入ったところに位置する。ここにはサバ・フォレスト・インダストリーズ (SFI) という民間企業が広大なコンセッション (伐採権) を保有し、マレーシア唯一のパルプ、製紙一貫生産工場を稼働させている。SFI は伐採跡地へのアカシアマンギウムやユーカリ属の植林を行っている。林業に伴う土壌の劣化や水文、水質への影響評価にも精力的に取り組んでおり、スウェーデン政府の援助を受けて研究プロジェクトを実施している。メンドロン試験流域は、スウェーデン農科大学の専門家の指導により建設され、同大学の大学院生が

SFI のスタッフと協力しつつ研究が進められてきた。

メンドロン試験流域は W1 - W6 の 6 つの小流域からなるが、隣接する W1 と W2 は一括して測定されているため、実質 5 流域である。流域の森林は、有用樹種のみが抜切りされた 2 次林であった。1988 年に、5 流域のうち 3 流域の森林が、違った方法で皆伐され、アカシアマンギウムが植林された。W5 流域は重機なしで伐倒し、トラクタで集材した後に焼入れして植林した（この方法が通常の方法）。W1 + 2 流域は、重機を入れずに皆伐を行い、何も収穫せずにすべてを焼き払ってから植林した。W4 流域は、もっとも注意深い方法で、重機を入れずに伐倒、集材し、焼入れせずに植林ベルトのみを刈払って植林した。

### <水流出量への影響>

水流出量は、W5 では初年度 460mm、2 年度 262mm、3 年度 468mm の増加、W1 + 2 で初年度 397mm、2 年度 522mm、3 年 89mm 増加した。この 2 流域ではそれぞれ 3 年間平均 396、336mm 増加したことになる。それに対して、注意深い処理をした W4 流域では、初年度 197mm、2 年度 170mm、3 年度 80mm、3 年間平均 149mm の増加にとどまった（図 3.8.3）。初年度、W4 流域が他の 2 流域より小さいのは、焼入れをしなかったために残存する樹木の水消費の影響と考えられる。2 年度は、増加量は W1 + 2 > W5 > W4 の順であるが、これは植林されたアカシアマンギウムのバイオマスが少ない順序

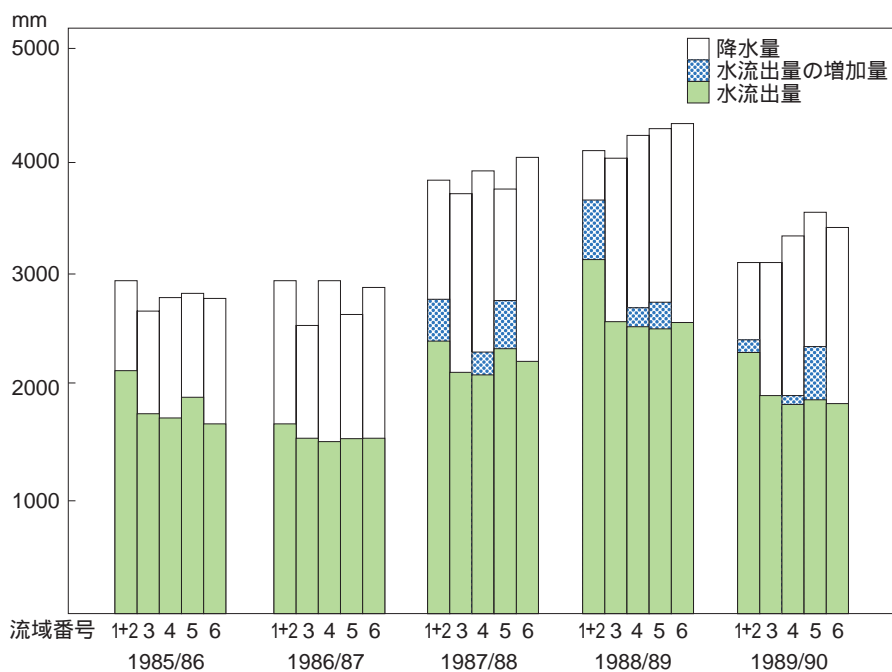


図3.8.3 メンドロン試験流域における伐採に伴う水流出量の増加の様子 (Malmer, 1992)。処理前 2 年間と処理後 3 年間のデータを示す。棒全体が降水量，緑棒が水流出量を表す。W1 + 2, W4, W5 が処理流域であり，青点棒は推定水流出量増加分を示す。



と一致している。W1 + 2 では W5 に比べて植林木の成長が悪かったことが、この差を生んでいると推測される。3年度は W5 > W1 + 2 > W4 の順である。W1 + 2 と W4 の増加量は2年度を下回っており、樹木の成長のためといえるが、W5 の大きい増加量を説明することは難しい。W5 のみ、トラクタ走行路において土壌が圧密されているので、そこに水みちが形成され、早い流出成分が卓越するようになった可能性がある。

#### ＜洪水、濁水への影響＞

伐採、整地、植林の影響解析は、基底流出成分と直接流出成分、洪水ピーク流出量についても行われている。基底流出は、W1 + 2 では有意に増加したが、W4 では有意でなかった。W5 では初年度、2年度には有意に増加したが、3年度は逆に有意に減少している。洪水流出、ピーク流出に関しては、ともに W1 + 2 のみが有意な増加を示し、他の2流域には有意な差はなく、この2流域では森林の皆伐が直接流出量やピーク流出量を増加させたという証拠は認められなかった。

## 第 4 章

### 日本の流域試験とその結果

日本における森林面積の推移については、本シリーズ第1巻の太田（2001）、第2巻の鈴木（2002）に詳述されている。日本の森林面積率はおおむね65～67%で、100年前と現在で差がないが、それは森林が変化しなかったのではなく、かつてはげ山や荒れ地、かや場だった場所が森林になった一方で、都市や農地の開発により森林が失われ、その差し引きがほぼつりあったことによる。

日本最初の試験流域は、東京大林区署（現在の関東森林管理局東京分局）によって、1906年に太田（茨城）、笠間（茨城）、足尾（栃木）の3ヶ所に設置されている。これは、世界最初の試験流域であるスイスのエメンタール試験流域、世界最初の対照流域法試験流域であるアメリカのワゴンホイールギャップ試験流域（1909年）と並んで、当時、世界最先端の試験流域であった。その後、太田試験地では1915年に皆伐、植林が行われ、その影響を評価する研究に発展している。一方、国立大学最初の試験流域は東京帝国大学農学部附属千葉県下清澄演習林（現在の東京大学千葉演習林）に1914年に設けられた足谷（あしやつ）試験流域であることが蔵治ら（2001）によって明らかにされた。ここでは、特に最新の研究成果が発表されている試験流域を中心に6試験流域を選び、最新の結果について紹介する。

#### ①釜淵試験流域（積雪地域における針広混交林の皆伐と植林）

独立行政法人森林総合研究所は、1937年に開始された第2期森林治水事業において設定された森林治水試験地において、日本各地に対照流域法による試験流域を設けて観測を開始した。そのうち上川（北海道）、釜淵（東北）、宝川（関東）、竜の口山（瀬戸内）の4試験流域では、1944～57年にかけて当初の計画通り皆伐などの処理が実行され、その影響が調べられた。これらの結果は国際的に発表され、第2章で紹介したボッシュとヒューレットのレビューに掲載されている。ここではそれらのうち唯一、2001年までの60年間のデータが整理され、結果が示されている釜淵試験流域の結果を紹介する。

釜淵試験流域は山形県最上郡真室川町に位置し、標高は160～250m、平均年降水量は2,456mmであり、そのうち約40%は雪によってもたらされる。1～3号沢の3流域からなり、面積はそれぞれ3.1、2.5、1.5ヘクタールである。観測開始（1937年）当初は、1号沢、2号沢は23～30年生のヒノキ、スギを主とした人工林にブナ、ミズナラ等の落葉広葉樹天然性木を混交する複層林であった。1号沢は対照流域であり、人

手を加えずに放置され、落葉広葉樹主体の混交林にゆるやかに変遷した。2号沢は1947-48年に皆伐された後、毎年の火入れなどによって植生の生育を防いだ後、1960年になだれ防止階段工を施してからスギを植林した。3号沢はもともと広葉樹林だったが、1964年にライパリアン・ゾーン（流域面積の半分に相当する）を皆伐、1970年に残りの部分を皆伐してスギを植林した。2001年現在、2号沢、3号沢スギの林齢はそれぞれ40年、30年である。植栽後の間伐等は行っておらず、自然放置されている。

### ＜水流出量への影響＞

年流出量は、伐採直後に増加し、植林後も増加傾向が続くが、2号沢は植林24年後にマイナスに、3号沢では11年後にマイナスに転じた（図4.1）。これはアメリカの流域で得られた結果と同様であり、植林された木の水消費量が、伐採前のそれを上回るようになったためと考えられる。

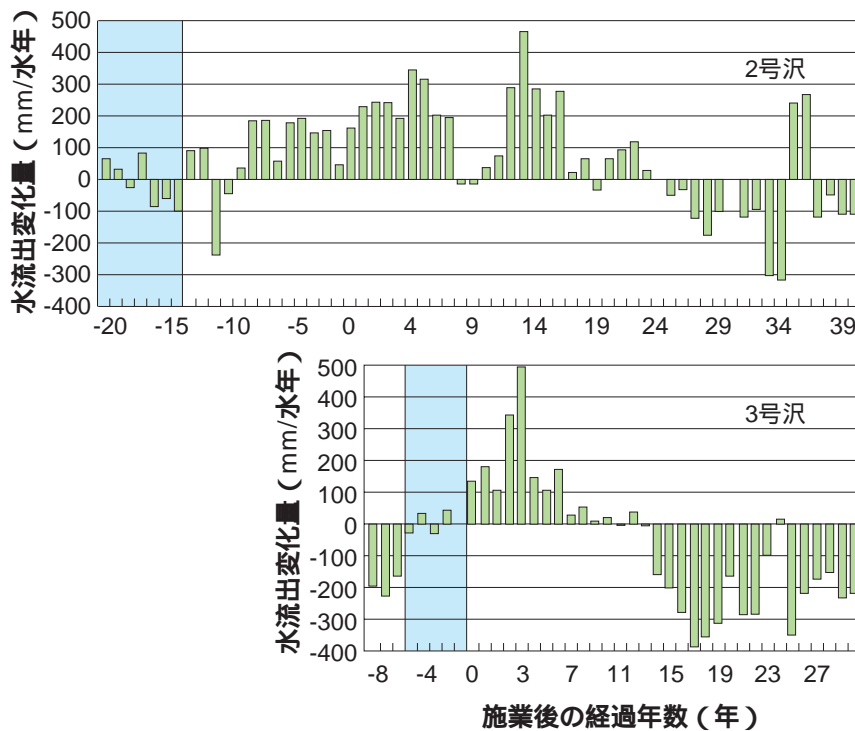


図4.1 釜淵試験流域における水流出量増加量の長期変動（細田ら，2002）。横軸は、最後の施業実施年を0とした年数を示し、その後一切の処理はしていない。水色の部分は水流出量の予測をするための回帰式を求めた期間を示す。

### ②袋山沢試験流域（壮齢林の皆伐と植林）

東京大学大学院農学生命科学研究科森林理水及砂防工学研究室は、スギ・ヒノキ壮齢林の伐採が水流出量のみならず炭素収支、窒素収支、ミネラル収支などに及ぼす影

響を総合的に研究することを目的として、東京大学千葉演習林に袋山沢試験流域を1991年に設定した。年降水量は2,043mm、年間を通じて月100mm以上の雨が降る多雨地域で、標高は150–220m、植生は1930年に植林されたスギ・ヒノキ林であり、立木密度は約1,000本／ヘクタールである。A、Bの2流域からなり、面積はそれぞれ0.8、1.0ヘクタールである。1992年に観測を開始し、1999年にB流域を皆伐、2000年にスギ、ヒノキを植林して現在に至っている。この試験地におけるスギ、ヒノキの成長は非常によく、伐採された立木の蓄積は553m<sup>3</sup>／ヘクタールであり、これまでに日本で行われた対照流域法による森林伐採実験の中で最大である。

### ＜水流出量への影響＞

結果は未だ原著論文としては刊行されていないが、伐採1–3年度の水収支解析からは、約300mmの流出量の増加、土壌水分量の増加が認められた（図4.2）。流出量の増加は洪水時、渇水時の両方に共通して認められたが、流出量の差が夏季よりもむしろ冬季に大きくなっていることが見出されている。

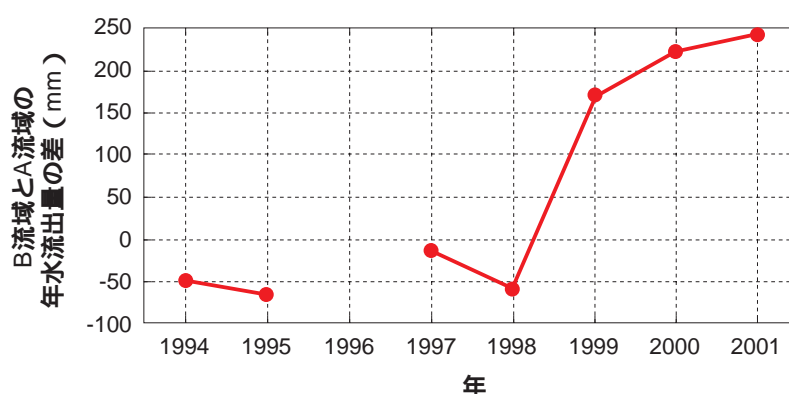


図4.2 袋山沢試験流域における伐採流域（B）と対照流域（A）の水流出量の差（東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ，2002）。1999年2–4月に伐採が実行され、その前後における流出量差の変化について示す。流出量の増加は約300mm／年である。1996年は大雨による水位計の損傷のため欠測。

### ③白坂、東山試験流域（はげ山から針広混交林への回復）

東京大学愛知演習林は、大学演習林に設けられた試験流域の中で最も長い継続観測を行っている演習林である。試験流域は白坂、東山、穴の宮の3試験流域であり、面積はそれぞれ88.5、106.5、13.9ヘクタールである。白坂流域内には2つの隣接小流域（北谷1.19、南谷1.42ヘクタール）、さらにそれぞれの小流域内に極小流域（北谷0.44、南谷0.48ヘクタール）がある。これらの流域の森林は陶器を焼くための薪として明治期に過剰に伐採され、ほとんどはげ山と化していたが、明治末期から荒廃地回

復砂防造林が行われ、徐々に森林が回復し現在に至っている。伐採処理は行われていないので、森林の成長に伴う変化を単独流域法により検出することが目的となっている。ここでは森林の成長が渇水時流出量に及ぼす影響に関する最新研究成果に絞って紹介する。

### ＜渇水への影響＞

白坂流域、東山流域の渇水時流出量を、夏と冬にわけて抽出し、71年間の変化を調べた。渇水時流出量として夏、冬別々に求められた日水流出量の最小値を用いた。その結果、1930年代の最小流出量は夏、冬ともに0.7~0.8mm/日程度であったのが、その後夏は増加、冬は減少し、1980年代には夏は約1.0mm/日、冬は約0.5mm/日になっていた（図4.3）。この変化は森林の変化ではなく、降水量の年々変化で説明されるような変化であることがわかった。森林の増加に伴う水流出量の減少や平準化機能の変化は、夏、冬の両方に影響するはずであり、どちらかに正、どちらかに負の影響を及ぼすことは考えにくいからである。この60年間の降水量（年降水量ではなく、夏、冬

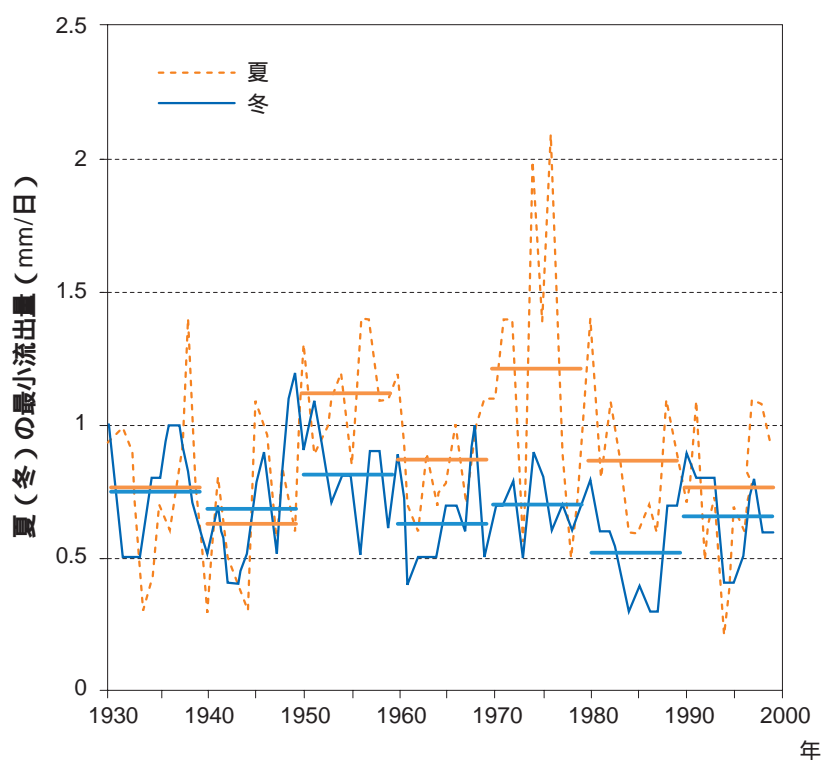


図4.3 白坂流域（東大愛知演習林）における夏と冬の最小流出量の71年間変動（折れ線）。10年ごとに平均をとった結果を横線で示す。1980年代は冬の降水量が少なかったため、冬の最小流出量10年平均が他の年代に比べて小さい。10年ごとの平均を比較するという方法では、森林の成長による変化を調べることは難しい。蔵治・芝野（2002）を改変。

それぞれ別々に求められた、渇水時流出量と最もよく対応し、渇水の指標となる降水量)の変動は、渇水時流出量の変化と見事に対応していた。

国土交通省河川局のホームページ（オピニオン「緑のダム」が整備されればダムは不要か）は、「森林の増加は樹木からの蒸発散量を増加させ、むしろ、渇水時には河川への流出量を減少させることが観測されている」事例として、愛知演習林のデータに基づき、1930年代の平均渇水流出量と1980年代のそれを比較して、1980年代の方が少なかったことを図とともに示している。しかし1990年代にも森林は増加し続けているにも関わらず、冬の渇水時流出量は1980年代と比べて増加に転じている。この変化は、森林の増加によって渇水時流出量が減少しているという国土交通省の解釈では、説明できない。1930年代に比べて、1980年代の渇水時流出量が少ないという結果は、1980年代に冬の降水量が顕著に減少したために、冬の渇水時流出量が減少したことに起因するものであり、森林の増加によって減少したとはいえない。1990年代に入って冬の小雨傾向は解消しており、冬の渇水時流出量はそれに対応して増加している。

森林流域からの渇水時流出量の年々変動は、降水量、それも年降水量でなく渇水発生前数ヶ月間の年々変動によって決まっており、年々の降水量の違いを無視して60年間のデータから森林成長前と成長後、それぞれ10年間の平均値を取り出して比較し、

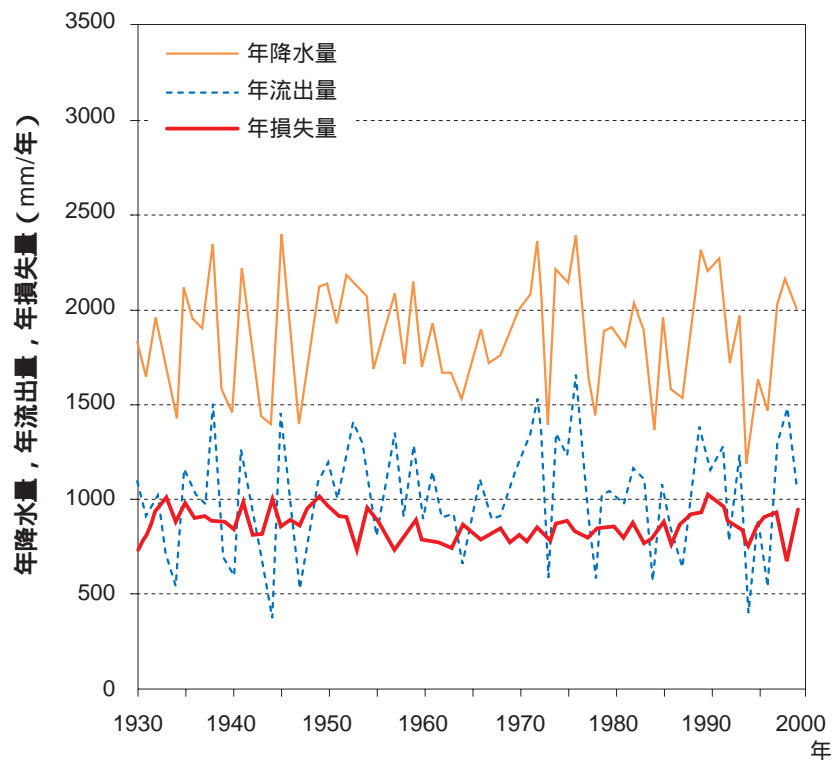


図4.4 白坂試験流域（東京大学愛知演習林）における降水量，水流出量，水損失量（＝降水量－水流出量）の71年間変動．顕著な増加や減少傾向はみられない．公開データに基づき著者作成．

森林の成長が渇水時流出量に及ぼす影響を論じることはできない。愛知演習林においては、水収支から計算された年蒸発散量にも、顕著な増加あるいは減少の傾向は検出されていない（図4.4）。森林の成長の影響は、それがプラスの方向であろうとマイナスの方向であろうと、それほど大きいものではなかったことを、愛知演習林の72年間の観測結果は示している。これは、愛知演習林の森林がはげ山同然の状態から徐々に回復してきているため、72年間を経た今でも、依然として土壌が貧弱であり、森林地上部も水流出量や蒸発散量に影響を及ぼすほどには巨大化していないということの意味している可能性もあり、更なる検討が必要である。

#### ④山火事跡地における針広混交林の回復（江田島試験流域）

1978年6月、山火事によって広島県江田島町（約30km<sup>2</sup>）のうち10km<sup>2</sup>の森林が焼失した。山火事跡地において、森林の喪失からその回復過程を通じて、森林の河川流出量に与える影響を長期にわたって継続的に調査し、森林のもつ緑のダム機能、土砂流出防止機能を解明することを目的として、山火事を免れた流域（A流域、10.7ヘクタール）と2つの山火事跡流域（B流域、21.5ヘクタール、C流域、18.9ヘクタール）において降水量と流出量の観測施設が広島県によって設けられた。観測は1980年に開始され、現在も続けられている。1981－2000年の平均年降水量は1,495mmであり、典型的な瀬戸内気候である。流域の地質は風化花崗岩であり、表層土壌層は薄い。植生は、A流域は一貫して樹齢50年以上のアカマツ－落葉広葉樹の混交林、B、C流域は山火事直後、リター層もすべて焼失した状態であったが、その後航空機種子散布（1978－80年）、山腹緑化工（1978－88年）が行われた結果、2000年現在A流域とほとんど変わらない森林が形成されている。

山火事後に観測を始めたため、厳密な対照流域法にはならないが、20年間のデータからは、観測を担当している九州大学を中心とした研究グループによって以下のような知見が得られている。

#### <水流出量への影響>

山火事3－12年後のB、C流域の水流出量は、A流域の水流出量よりも明らかに多かったが、山火事13－22年後には、3流域の水流出量はほぼ同じレベルになった（図4.5）。山火事16年後（1994年）は異常乾燥年（年降水量796mm）であったが、この年のみ例外的にB、C流域の水流出量がA流域を下回った。

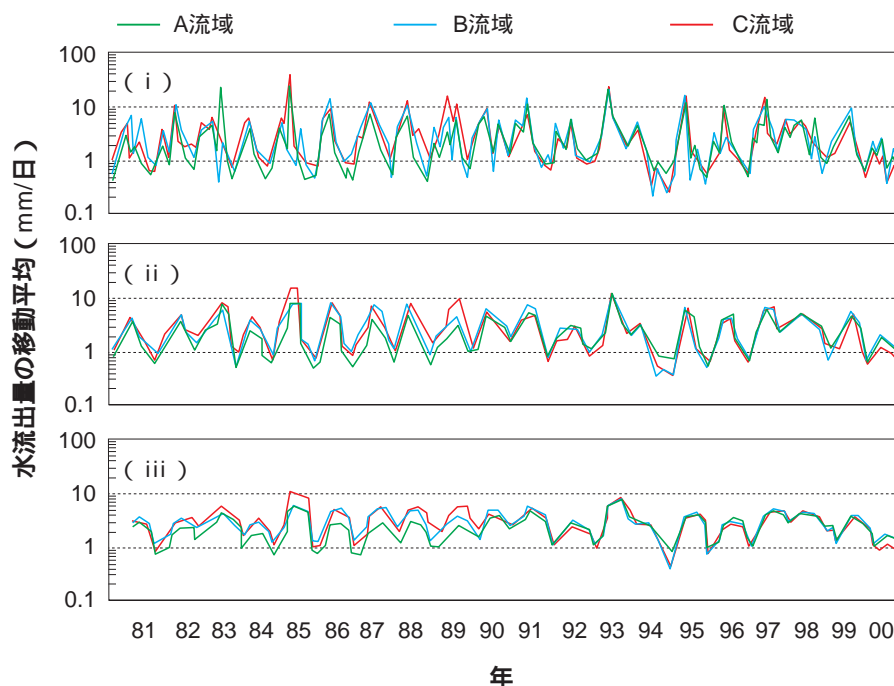


図4.5 江田島試験流域における山火事焼失後自然再生流域と対照流域の水流出量の差 (Ogawa ら, 2002)。上から順に, 30日, 100日, 200日間移動平均。緑線が対照流域 (A), 青線と赤線がそれぞれ山火事焼失後自然再生流域 (B, C)。

### < 渇水への影響 >

山火事 3 - 12年後と 13 - 22年後について、日流出量が 1.0mm/日 を下回る期間の水流出量を A 流域と B 流域で比較したところ、両流域の差は減少していた。すなわち B 流域における植生回復の過程で、水流出量の少ない期間の水流出量が減少した。これは植生の回復が渇水にマイナスの影響を及ぼしたことを意味している。

### ⑤ スギ、ヒノキ林の成長 (裏筑波試験流域)

独立行政法人土木研究所は、裏筑波流出試験地 (312ヘクタール) を設定し、1969 年以来降水量、流出量観測を継続している。この流域では、1966年から69年にかけて大規模な伐採とスギの造林が行われた。その後伐採はいっさい行われておらず、2001 年現在の平均林齢は約 42 年となっている。航空写真の解析によれば、1974年には流域の森林被覆率は壮齢林 39%、若齢林 36%、裸地 24%であったが、1998年には 97%、0%、3%となっている。この森林の成長が流出量に及ぼした影響が解析された。

### < 水流出量、洪水、渇水への影響 >

その結果、唯一統計的に有意なトレンドが見られたのは年損失量の増加傾向であり、その増加率は 13.5mm/年 であった。森林の成長に伴って年損失量が増加した可能性が



ある。しかし、同じ期間の年降水量は統計的に有意ではないものの、増加率12.9mm/年の増加傾向にあり、損失量の増加は森林変化よりもむしろ降水量の増加によって起きている可能性も否定できない。なお、洪水流出量、濁水流出量など他のすべての流出特性値には、有意な増加傾向や減少傾向は認められなかった。

#### ⑥農地の造成（奈良県五條吉野地区）

農地開発事業によって森林が農地に変えられ、地形、流路密度に大幅な改変が行われた流域で、事業が水流出に及ぼす影響を知ることが目的として、奈良県五條吉野地区に対照流域法による試験流域が設けられた。A、B 2流域からなり、A流域が農地造成流域、B流域が対照流域である。面積はA、B流域それぞれ12.1、12.8ヘクタール、造成前の森林面積率はそれぞれ87%、90%である。造成後、A流域森林面積率は22%に減少し、総流路長は約3.3倍、半浸透域および非浸透域の面積が流域全体の22%に達した。

造成前の比較観測は5ヶ月間行われ、流出の様子は両流域間で差はないと結論付けられている。以下はすべて造成後のA、B両流域の直接比較によるものである。

#### <水流出量への影響>

造成後12年間のA流域からの水流出量は、B流域に比べて87-384（平均219）mm多かった（図4.6）。この期間の平均年降水量は1,414mmであり、その15.5%に相当する。A流域の流出量は造成しなかった場合に比べて平均33%減少したことになる。

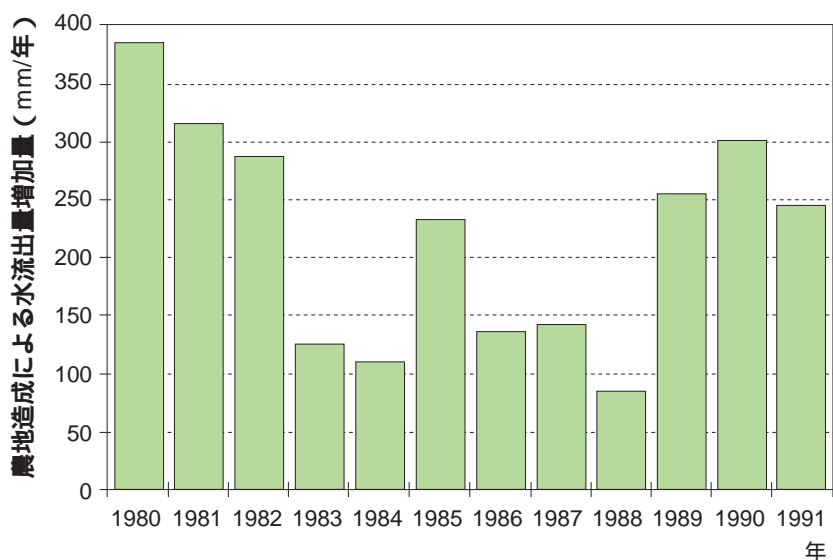


図4.6 五條吉野流域における農地造成（1980年）後の流域と隣接森林流域との水流出量の差。造成前の流出量にはほとんど差がなかったため、予測値を用いずに直接比較している。瀧本ら（1994）のデータに基づき著者作成。

### ＜洪水への影響＞

ピーク流出量は造成後のA流域はB流域の2－12倍に達した。洪水時の直接流出量は1.5－7倍の増加が認められ、洪水到達時間は短縮された（図4.7）。農地の造成が洪水にマイナスの影響を及ぼしたことを意味している。

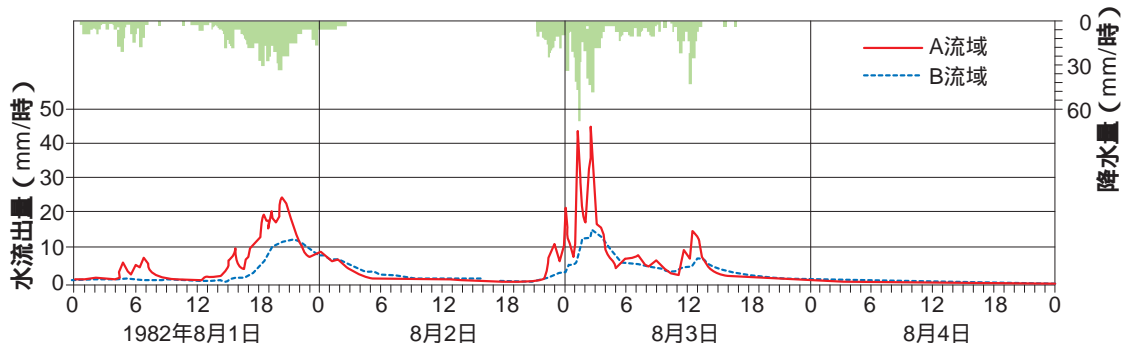


図4.7 五條吉野試験流域における農地造成後における1982年8月1－4日の水流出量変動（小林ら，1984）。点線が対照（森林）流域，実線が農地造成流域。

### ＜渇水への影響＞

A、B流域の流況曲線を比較した結果、造成せずに森林が残っているB流域は、造成後のA流域に比べて渇水流出量が小さくなっていた。これは農地の造成が渇水にプラスの影響を及ぼしたことを意味している。この研究結果を報告した論文には「山林は渇水緩和に役立つか」という題名がつけられており、森林が渇水にマイナスの影響を及ぼしていることが強調されている。

## 第 5 章

### 流域試験のまとめ

これまで、日本や世界の多くの地域で、森林が水の流出に及ぼす影響を検証するための流域試験が行われてきた。その結果、森林および草地に覆われた流域からの年流出量は、おおまかには年降水量と森林面積率から推定できるようになっている。

第3章、第4章で紹介してきた試験流域で得られた結果は以下のようにまとめられる（表5.1）。

#### <水流出量への影響>

森林を伐採（皆伐、択伐、間伐）すると、初年度の水流出量は原則として増加する。例外として雲霧林、超高齢林では、伐採によって水流出量が減少することがある。水流出量の増加がいつまで持続するかは、伐採跡地をどのように取り扱うかによって変わり、植林する、しないにかかわらず、跡地に水を消費するタイプの樹木が成長してゆけば、水流出量の増加量はおおむね10年未満で消滅する。したがって、水資源の確保という観点から望ましい森林とは、以下のような森林である。

- ①植えてから0－10年後までの幼齢林
- ②間伐してから0－3年後までの森林
- ③超高齢林
- ④雲霧林（標高が高いところの森林）

樹種からいうと、望ましくない樹種は、常緑針葉樹、ユーカリ（に象徴される、常緑で成長の早い広葉樹）であり、望ましい樹種は落葉広葉樹ということになる。カラマツに代表される落葉針葉樹や成長の遅い広葉樹、常緑広葉樹については、情報が少ないため、現段階で簡単には判定できない。

#### <洪水への影響>

森林を伐採することにより、大雨時のピーク流出量、直接流出量はおおむね増加するが、有意な増加が検出されない場合もある。伐採後の森林の成長にともなって洪水の発生確率が顕著に減少する場合もあるが、大きい出水の時には森林成長にともなう機能強化の影響が小さい出水の時に比べて相対的に小さくなる傾向にある。めったに発生しない大出水を観測でとらえることは容易でなく、長期継続観測が必要となる。

表5.1 第3章 第4章に掲載した試験流域における緑のダム機能評価のまとめ

	処理タイプ	水流出量への影響			洪水への影響			渇水への影響		
		ピーク	洪水時流出	直接流出	基底流出	渇水時流出	評価指標			
<b>アメリカ</b>										
コウイータ	B, D	×								
ハッパードブルック	B, C	×								
コンククリーク	B	×	○	○						
<b>イギリス</b>										
(ガイドライン)		×	△, ○(低地)					△, ×(下流)		
<b>オーストラリア</b>										
マロンダ	B(山火事焼失), C	○(超高齢林)		○						
カルア	B, C, D	×						×		
タンタワングロ	B, C	×						×		
<b>ニューージーランド</b>										
グレンドフ	A	×	○	○				×	98%流出量	
モウテレ	A		○	○				×	ゼロ流出量日数	
ビッグブッシュ	B, D	×	○	○				×	連続7日間最小流出量	
マイマイ	B, D	×	○	○						
<b>南アフリカ</b>										
ジョンカーズホーク	A, B(間伐)	×								
ウエストフアリア	B, D	×						×		
<b>インド</b>										
グレンモルガン	A, D, B, D(萌芽再生)	×	○	○				×	連続10日間流出量	
<b>台湾</b>										
蓮華池	B, D	×	○	○						
<b>マレーシア</b>										
スンガイ・テカム	B, E	×	○	○						
バレンプン	B(択伐), C	×								
メンドロン	B, D	×	○, △	○, △				×	△	
<b>日本</b>										
釜淵	B, D	×								
袋山沢	B, D	×						×		
白坂, 東山	C(はげ山)	△							△	夏冬別最小日流出量
江田島	C(山火事跡)	×							×	日流出量1mm以下の流出量
裏筑波	D	△		△					△	355日(97%)流出量
五條吉野	B, E	×	○	○					×	355日(97%)流出量

処理タイプ：A 草地に植林、B 森林を伐採、C 森林の自然成長、D 植林木の成長、E 農地造成  
 森林伐採前後ないし森林成長前後の比較で、森林の存在、成長が：○ プラスの影響、× マイナスの影響、△ どちらともいえない

### < 渇水への影響 >

森林を伐採することにより、渇水時の流出量は、変わらない場合と、増加する場合がある。本書で取り上げた事例には、流出量が減少した事例は一つもなかった。増加の度合いはかなり大きいものもあればわずかな差にとどまるものまで様々であり、定量的評価は難しい。めったに発生しない大渇水を観測でとらえることは容易でなく、長期継続観測が必要となる。

### < 日本の流域試験の特徴 >

全体的に、日本の結果は、他の国と比べて大きな違いはみられない。白坂試験流域と裏筑波試験流域では、森林の成長が水流出量へ及ぼす明瞭な影響が検出されていない。この2流域はともに風化花崗岩であり、深層に浸透する水の割合が大きく、水流出量が森林の成長にさほど影響を受けない特殊なケースである可能性がある。両流域とも対照流域法ではないため、厳密には現在の森林を除去する試験を行わないと正確なところはわからない。

本書の整理した範囲では、洪水への影響を調べた流域が少なかったが、これは最近の報告が少ないというだけで、古くからたくさんの報告がされてきた。最近の報告が少ないのは、洪水の解析には分単位の細かいデータが必要で、数十年に及ぶ長期の資料を一括して同じ方法で処理する作業が大変であるためと思われる。近年、渇水の影響を調べた研究がむしろ多くなっているのは、渇水は日水流出量データだけを用いても解析可能であり、長期のデータさえあれば、洪水に比べて扱いやすいためではないかと推察される。森林の緑のダム機能が洪水の防止にどの程度期待できるかという疑問に答えるために、今すでにある試験流域のデータの解析と解釈を進める余地がある。

渇水への影響は、水流出量にマイナスの影響が出ている場合にマイナスの影響、どちらともいえない場合にどちらともいえない、という結果となっている。第1章の表1.1では可能性として挙げてあった渇水へのプラスの影響が、実際に検出された研究例は一つもなかった。これは海外の結果とも共通している。

繰り返しになるが、日本が特別に海外と違うという結果は認められず、海外で得られた数々の知見が、定性的なレベルではそのまま日本でもあてはまる可能性が示唆された。

## 第 6 章

### おわりに

#### 一緑のダム機能強化に向けて、いま何が必要とされているかー

国土交通省河川局のホームページで述べられているように、コンクリートのダムや河川改修は、当然のことながら、現在の森林の機能を前提として計画されている。それならば、森林の機能がより強化されれば、計画を見直す必要がでてくるかもしれない。緑のダム機能強化のために、今後森林をどのように取り扱っていけばよいのか、筆者の考えを最後に述べたい。

日本の森林の約40%は、針葉樹の人工林である。人工林は、速く成長し、かつ経済的に収入が見込める単一の樹種で構成されていることが多い。そのような樹種は、おおむね天然の森林よりも水を多量に消費する傾向にあり、スギやヒノキはその代表的樹種であると考えられる。しかし林業が活発に行われている場合、山地における若い森林の面積割合や、間伐された面積の割合が確保されていることによって、人工林の水消費が抑えられている。

林業が活発に行われていない森林は、若い森林や間伐されて間もない森林の面積割合が非常に少なく、場合によってはゼロである。このような森林は、水消費が抑制されないため、林業が活発に行われている森林に比べて、水消費量が大きい森林となってしまうことは疑いない。現在日本における林業、特に民有林を巡る社会経済的状況は厳しく、手入れされずに過密状態で成長し続ける人工林の面積が増大している。このことは森林の緑のダム機能にとってマイナスに作用している（機能を弱めている）可能性が高い。このような森林では、林業を活発に行い、つねに若い森林や間伐されたばかりの森林が一定の面積を占めているような森林にしていくことが、森林の緑のダム機能をより強化していくために効果的である。

森林、特に針葉樹人工林の緑のダム機能強化策として、複層林の造成が奨励されることがある。しかし緑のダム機能は林班、小班といった小さいスケールで強化される必要は必ずしもなく、広い流域（例えば最上流に位置するコンクリートダムの上流域：1,000－10,000ヘクタール）全体として強化されればよい機能のはずである。広い面積に複層林を造成することによって、流域森林の緑のダム機能は強化されるだろうが、それは、単層林ではあるが若齢から超高齢まで多様な林齢の森林、間伐されたばかりの森林などを広い流域内にモザイク状に配置する方法によっても実現できるか

もしれない。そう考えると、たいへんな手間がかかり、経済的にも無駄の多い複層林造成よりも、単層林のモザイク状配置を推進することが、森林の緑のダム機能強化という観点からは、より賢明なやり方であるように思われる。手間や予算をかけて小さい面積の森林に凝った取り扱いを施す手間と予算を、より広い面積に人手を加えることに費やす方が、より効果的ではないかと考える。

針葉樹林を広葉樹林に転換すればいいという論理が語られることがあるが、一言に広葉樹林といっても、常緑広葉樹林と落葉広葉樹林は区別して考えなければならない。日本では、昔は雑木林、里山といわれる落葉広葉樹林が、平地やいわゆる中間山地域に多く存在した。また奥山にも、伐採－萌芽再生－伐採というサイクルを10－15年で繰り返す薪炭林が広く存在した。これは人間が落ち葉かきや薪炭材の採取、炭焼きなどによって森林に手を加えた結果、形成されたものである。燃料革命、過疎化によって誰も森に入らなくなってから40－50年が経過し、かつて落葉広葉樹林だった森では、常緑広葉樹が優勢になりつつある。いったん常緑広葉樹が成長すると、林内は暗くなり、落葉広葉樹が種を落としても発芽、成長ができなくなるためである。これは、緑のダム機能の強化にとってマイナスの方向の変化といえる。冬に晴天が続く関東地方などでは、冬でも葉をつけている常緑広葉樹林が、落葉広葉樹林よりも水を消費していることは疑いない。かつて落葉樹林であり、現在、常緑樹林となりつつある場所を、できるだけ落葉樹林にもどしてあげることが、緑のダム機能の強化にとって効果的であるが、その実現には人が再び森に入り、手を加えていくしか、方法はない。広葉樹林でも、人手が入らないことが緑のダム機能強化にとってマイナスに働くということに関しては、スギ・ヒノキ林と同じであり、針葉樹林を広葉樹林に変えて、あとは放っておけばよい、というような単純な問題ではないことをよく理解する必要がある。

森林の緑のダム機能を強化する策は、森林面積をこれ以上増やすのではなく、今すでにある、手入れが行き届かなくなった人工林や、落葉樹林から常緑樹林に変わりつつある広葉樹林の、できるだけ広い範囲に人手を加えていくということである。最大の問題は、予算や補助金を出しても、なお林業が経済的に成り立たないような社会情勢の下で、いったい誰が実際に山に入って森に手を加えるのか、という問題である。山に入って森に手を加えるためには、技術、技能が必要であるが、そのような技術、技能はこのままではいずれ減びてしまうことが危惧される。省庁間や政党間で非科学的な争いを続けることは、何ら建設的な結果を生み出さない。国と地方の複数省庁、複数部局にまたがる行政と、都市と農山村の人々が、互いに手を携えて、この問題に取り組むことが必要とされている。

近年、これまで単発的に行われてきた流域の上下流交流が、上下流域の行政、団体、

住民、NPO など多様な主体が連携して行う「流域連携」に発展しつつある活動事例が増えつつある。このような活動の中で、水源地域の森林に人手を加えることの重要性について下流住民に関心を高めてもらうような方策を、今以上に推進することが望まれる。このような活動はこれまでどちらかというと行政主導で進められてきたが、これを住民主体の持続的活動まで高めていくために不可欠な人材の育成や、民間との連携などが、今後ますます必要になると考える。このような取り組みはすでに始まっており、成功事例、失敗事例から多くのことを学ぶことができるに違いない。研究者も、基礎研究をいっそう充実させると同時に、細分化された既存の学問体系の枠を超えて、多分野研究者の有機的結合を図ることにより、問題解決に貢献していく必要があると考える。



## ■謝 辞■

本書をまとめる機会を与えてくださり、かつ有益なコメントを賜った東京大学大学院農学生命科学研究科太田猛彦教授、鈴木雅一教授に感謝致します。写真をはじめ、有益な情報をご提供頂いた同研究科田中延亮助手、国立東華大学夏禹九教授、ランドケアリサーチ（ニュージーランド）Lindsey Rowe 博士、国立森林研究所（マレーシア）Abdul Rahim Nik 博士、ニューカッスル大学（イギリス）Ian Calder 教授に感謝致します。私に日本の森林について多くのことを教えていただいた同研究科附属演習林の教官、技術官、院生、学生の皆様と、熱帯林について多くのことを教えていただいたマレーシア国サバ州森林局、サラワク熱帯林冠研究グループの皆様、タイ王立森林局、カセサート大学林学部の皆様に心から謝意を表します。

## ■引用・参考文献■

### <全般>

- 中野秀章（1976）森林水文学，水文学講座13，共立出版，228p.
- 塚本良則編（1992）森林水文学，現代の林学6，文永堂出版，319p.
- 太田猛彦（1996）森林と水循環，森林科学18：26-31.
- 太田猛彦（2001）森林と環境－森林の公益的機能とは何か－，森林の公益的機能解説シリーズ1，（社）日本治山治水協会，84pp.
- 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（Ⅰ）（Ⅱ）－渇水地域上流森林整備指針策定調査報告－，水利科学260：1-40，261：48-74.
- 鈴木雅一（2002）航空写真で見る日本の森林の変遷，森林の公益的機能解説シリーズ2，（社）日本治山治水協会，84pp.
- 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.
- Calder, I.R. (1999) *The blue revolution: land use and integrated water resources management*, Earthscan Publ. Ltd, London, 192pp.
- Bruijnzeel, L.A. (1990) Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review, UNESCO IHP, 224pp.
- Zhang, L, Dawes, W.R. and Walker, G.R. (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Wat. Res. Res.* 37 : 701-708.

### <アメリカ>

- G.E. ライケンズ，F.H. ボーマン，及川武久監訳，伊藤昭彦訳（1997）森林生態系の生物地球科学（原著第2版），シュプリンガー・フェアラーク東京，176pp.
- Hornbeck, J.W, Martin, C.W. and Eagar, C. (1997) Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Can. J. For. Res.* 27 : 2043-2052.
- Swank, W.T, Vose, J.M. and Elliott, K.J. (2001) Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *For. Ecol. Manag.* 143 : 163-178.

Troendle, C.A, Wilcox, M.S, Bevenger, G.B. and Porth, L.S. (2001) The coon Creek Water Yield Augmentation Project: implementation of timber harvesting technology to increase streamflow, For. Ecol. Manag. 143 : 179-187.

#### <イギリス>

Forestry Commission (2000) Forests & Water Guidelines, Third Edition. Forestry Commission, 36pp.

MaKay, H. and Nisbet, T. (2002) Overcoming concerns about the effect of forest management on water resources in Britain. Proc. Intl. Expert Meeting on Forests and Water, Nov. 2002, Shiga, Japan, 210-213.

#### <オーストラリア>

Langford, K.J. (1976) Change in yield of water following a bushfire in a forest of *Eucalyptus regnans*, J. Hydrol. 29 : 87-114.

Vertessy, R.A, Watson, F.G.R. and O'Sullivan, S.K. (2001) Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. For. Ecol. Manag. 143 : 13-26.

Cornish, P.M. and Vertessy, R.A. (2001) Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. J. Hydrol. 242 : 43-63.

Lane, P.N.J. and Mackay, S.M. (2001) Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. For. Ecol. Manag. 143 : 131-142.

#### <ニュージーランド>

Rowe, L, Fahey, B, Jackson, R and Dancan, M. (1997) Effects of land use on floods and low flows, In Mosley, M.P. and Pearson, C.P.(eds.) : Floods and Droughts: the New Zealand Experience, New Zealand Hydrological Society, 89-102.

Fahey, B. and Jackson, R. (1997) Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. Agric. For. Meteorol. 84 : 69-82.

#### <南アフリカ>

Lesch, W. and Scott, D.F. (1997) The response in water yield to the thinning of *Pinus radiata*, *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis* plantations, For. Ecol. Manag. 99 : 295-307.

#### <インド>

Sharda, V.N, Samraj, P, Samra, J.S. and Lakshmanan, V. (1998) Hydrological behaviour of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri Sub-watersheds, J. Hydrol. 211 : 50-60.

Sikka, A.K, samra, J.S, Sharda, V.N, Samraj, P. and Lakshmanan, V. (2003) Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. J. Hydrol. 270 : 12-26.

#### <台湾>

Hsia, Y.J. and Koh, C.C. (1983) Water yield resulting from clearcutting a small hardwood forested watershed in Central Taiwan. IAHS Publ. 140 : 215-220.

Cheng, J.D, Lin, L.L. and Lu, H.S. (2002) Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. For. Ecol. Manag. 165 : 11-28.

#### <マレーシア>

Abdul Rahim N. (1988) Water yield changes after forest conversion to agricultural landuse in Peninsular Malaysia. J. Trop. For. Sci. 1 : 67-84.

Drainage and Irrigation Department (DID) (1989) Sungai Tekam Experimental Basin Final Report July 1977 to June 1986, Water Resources Publication 20 : 93pp.

Malmer, A. (1992) Water yield changes after clear-felling tropical rainforest and establishment of forest plantation in Sabah, Malaysia. J.Hydrol. 134 : 77-94.

Abdul Rahim N. and Zulkifli Y. (1994) Hydrological response to selective logging in Peninsular Malaysia and its implications on watershed management. In Ohta, T. *et al.* (eds.) : Proc. Inter. Symp. For. Hydrol. Tokyo, Japan, 263-274.

<日本>

小林慎太郎・田中丸治哉, 丸山利輔 (1984) 造成農地の流域および洪水流出特性—農地造成に伴う流出特性の変化 (I), 農土論集113 : 1-7.

福嶋義宏 (1992) 試験流域による森林水文研究の経緯, 水文・水資源学会誌 5 : 34-38.

瀧本裕士, 田中 正, 堀野治彦, 渡辺紹裕, 丸山利輔 (1994) 山林は渇水緩和に役立つか—奈良県五條吉野地区を事例として—, 農土論集170 : 75-81.

蔵治光一郎, 芝野博文 (2001) 大学演習林試験流域における水文観測, シリーズ「水文・水資源観測最前線」, 水文・水資源学会誌14 : 489-498.

細田育広, 村上 亘 (2002) 釜淵森林理水試験地60年間の水流出年々変動, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 241-246.

東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ (2002) 東京大学千葉演習林袋山沢における総合対照流域法調査に関する報告書, 260pp.

蔵治光一郎, 芝野博文 (2002) 森林の成長が渇水時流出量に及ぼす影響—東京大学愛知演習林森林試験流域の例—, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 615-620.

芳賀弘和・大槻恭一・小川 滋 (2002) 広島県江田島流域での山火事後約20年間に於ける基底流出の変化, 水文・水資源学会誌15 : 584-593.

深見和彦, 手計太一, 廣瀬葉子, 松浦 直, 吉谷純一 (2002) 渡良瀬川上流域および裏筑波流出試験地における流出の長期的変化と森林変化との関係に関する一考察, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 597-602.

Ogawa, S, Otsuki, K. and Haga, H. (2002) Forest Hydrology in Japan and Proposal of Long-Term Forest Hydrological Research Network, Proc. Intl. Expert Meeting on Forests and Water, Nov. 2002, Shiga, Japan, 73-86.

## プロフィール

---

**氏名**：蔵治 光一郎（くらじ こういちろう）  
**生年**：昭和40（1965）年 東京都渋谷区生まれ  
**専門分野**：森林水文学、熱帯の森林科学、発展途上地域の総合流域管理  
**著者略歴**：1989年 東京大学農学部林学科 卒業  
1991年 東京大学大学院農学系研究科修士課程 修了  
マレーシア国サバ州森林研究所水文学研究室に青年海外協力隊員として派遣  
1996年 東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程 修了  
博士（農学）  
東京大学農学部附属演習林千葉演習林 助手  
1998年 東京工業大学大学院総合理工学研究科 講師  
2001年 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林 講師  
**著書**：「酸性雨研究と環境試料分析－環境試料の採取・前処理・分析の実際」（愛智出版、共著、2000）  
「Hydrogen and Oxygen Isotopes in Hydrology  
－ The Textbook for the Eleventh IHP Training Course in 2001－」  
（HyARC / UNESCO、共著、2002）

---

---

## 森林の緑のダム機能(水源涵養機能)とその強化に向けて

---

平成15年3月 印刷・発行

著者 蔵治 光一郎  
発行 (社)日本治山治水協会  
〒100-0014  
東京都千代田区永田町2-4-3  
Tel 03-3581-2288  
Fax 03-3581-1410  
印刷 新和印刷株式会社