

## 第4章 流況曲線の変化

前章では、森林の伐採が年流出量に与える影響について解析した。その結果、袋山沢 B 流域では、伐採によって年流出量が約 300 mm/year 増加したことが明らかとなった訳だが、しかし一方で新たな疑問も発生する。すなわち、年流出量の増加は、ハイドログラフのどの部分の増加が原因なのであろうか、という問いである。

この設問に対しては、ハイドログラフの分割の仕方の違いに応じて、ふたつの観点から答えることができるであろう。ひとつ目は、ハイドログラフを高低で分割し、高水流出と低水流出の増加の仕方を解析する方法であり、ふたつ目は、ハイドログラフを季節で分割し、季節ごとの増加の仕方を解析する方法である。

本章では前者の観点から解析を行なう。

まず第1節では、本章で解明されるべき課題、および解析方法について述べる。第2節では伐採前後における平均的な流出量変化について解析を行なう。第3節では流出量の年々のばらつきが伐採前後でどう変化したのかを解析する。第4節では他流域の事例と比較しながら結果を考察する。

### 4.1 目的と方法

治山治水および水資源の観点からすれば、河川流出の理想は、降雨時には洪水が起こらず、無降雨時には必要とされる分だけの流量が常に河川に流れている状態である。河川流出をそのような理想状態に近付けるためには、高水時の過剰流量を減らし、その分を渇水時に持ち越して流量をなるべく一定に近付けることが必要となる（中野ら, 1963）。

さて以前より、森林流域には流出調整作用がある、と言われている。いわゆる水源涵養機能である。すなわち、森林は洪水流出を減らして災害を抑制する一方、高い保水力によって水分を長期間保持して渇水時の流出量を増加させる、というものである。前者の作用は洪水緩和機能と呼ばれ、後者は渇水緩和機能と呼ばれる。

近年になって、自然環境に対する問題意識が昂揚し、「緑のダム」に代表されるような、森林流域が持つとされる流出調整作用に対する社会的な期待が高まっている。そのような期待を受ける形で、森林の水源涵養機能を維持し向上させるためにはどのような施策が効果的であるのか、森林水文学者によって議論されている（たとえば塚本・太田, 1984; 服部ら, 2001a, 2001b）。

以上のような背景から、本章では、袋山沢 B 流域において、森林皆伐によって水源涵養機能がどのように変化したのかを検討する。検討すべき項目は主に2点である。ひとつは渇水時流出量の変化である。第2章でも述べた通り、袋山沢流域は基底流出量が非常に少ない流域である。このような流域において伐採によって渇水時流出量がどのように変化したのか（すなわち渇水緩和機能がどう変わったのか）を明らかにするのが本章の目的のひとつである。もうひとつの検討項目は流出の年間一様性の変化である。森林流域に期待される流出平準化作用が伐採によってどのように変化したのかを明らかにする。

解析は流況曲線を用いて行なった。ここで、流況曲線とは、各水年の日流出量を大きいものから

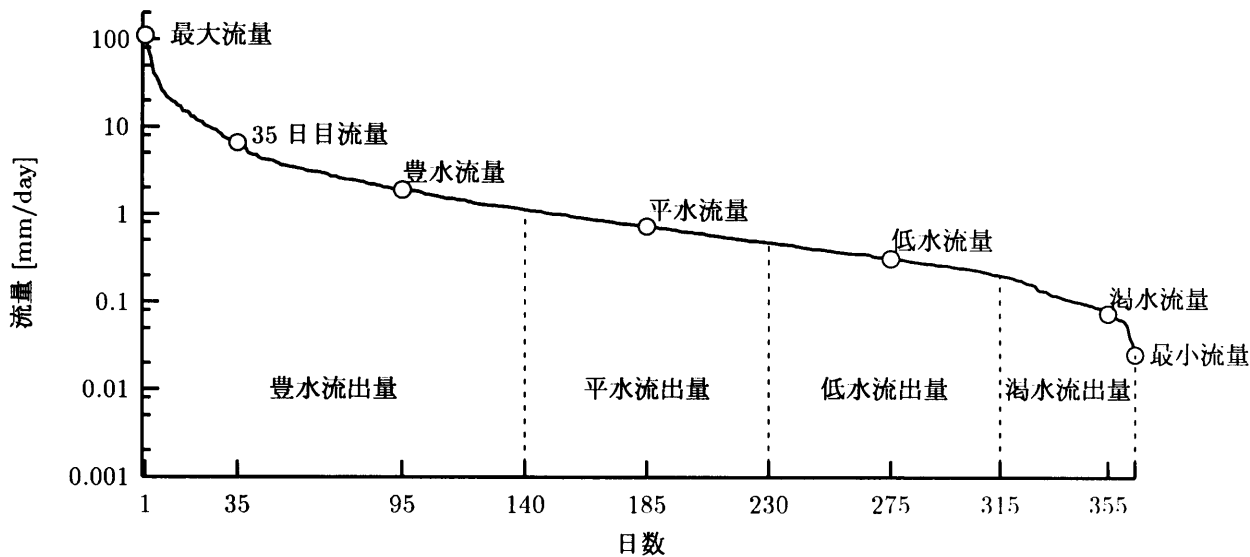


図 4.1: 流況曲線概念図

降順に並べ変えて作成した曲線である。ハイドログラフは降雨に対応して曲線に凹凸が生ずるが、流況曲線はなだらかな右下がりの曲線を描くのが特徴である。図-4.1 に流況曲線の一例を示しておく。本章の解析に流況曲線を用いる理由は、森林の流量調節作用である洪水緩和機能と渇水緩和機能の両機能に対して、流況曲線は高水側の変化と低水側の変化を統一的に解析することができる方法だからである（玉井ら, 2004）。

流況曲線は、通常、一水年の日流出量を並べ変えて作成されるが、本章では伐採前の4水年および伐採後3水年の流況曲線を平均化した「平均流況曲線」も解析の対象とした。ここで平均流況曲線とは、各水年における流況曲線のN日目流量の算術平均を平均流況曲線のN日目流量とする操作によって平均化された流況曲線である。計算は1日目から365日目までに行ない、閏年の366日目流量は使用しなかった。A,B両流域について伐採前・伐採後期間それぞれで平均化操作を行なうことで、計4本の平均流況曲線が得られることになる。平均流況曲線を解析することによって、伐採前後の流出量変化の平均値を議論することが可能となる。平均流況曲線に対して、一水年ごとの流況曲線を「単年流況曲線」と呼ぶことにする。

流況曲線を数値化して論じるために流況流量（流況指標）がよく用いられる。一般には、流況曲線上の95日目の流量を「豊水流量」、185日目を「平水流量」、275日目を「低水流量」、355日目を「渇水流量」と定義し、各流量を流況曲線の代表値として扱う。本章においても、各流況曲線の代表値として流況流量を用いる。ただし、曲線形をより詳細に見るために、通常の豊水・平水・低水・渇水流量に加えて、最大（1日目）・35日目（35日目）・最小（365もしくは366日目）流量を定義し、計7流量とする。

流況曲線は日流量で構成される表現形式であるから、単位はmm/dayである。従って、流況曲線の変化を年流出量（mm/year）の変化へと接続するためには、流況曲線をmm/dayからmm/yearへと積分する必要がある。そこで本章では、中野ら（1963）によって提案された流況流出量を導入することとした。流況流出量とは、流況流量（流況指標）に準拠して定義された、流況曲線の積分値である。豊水と平水、平水と低水、低水と渇水流量との中間点で流況曲線を分割し、1～140（閏年は1～141）日目流量の積分値を「豊水流出量」、以下同様に141～230（142～231）日目を

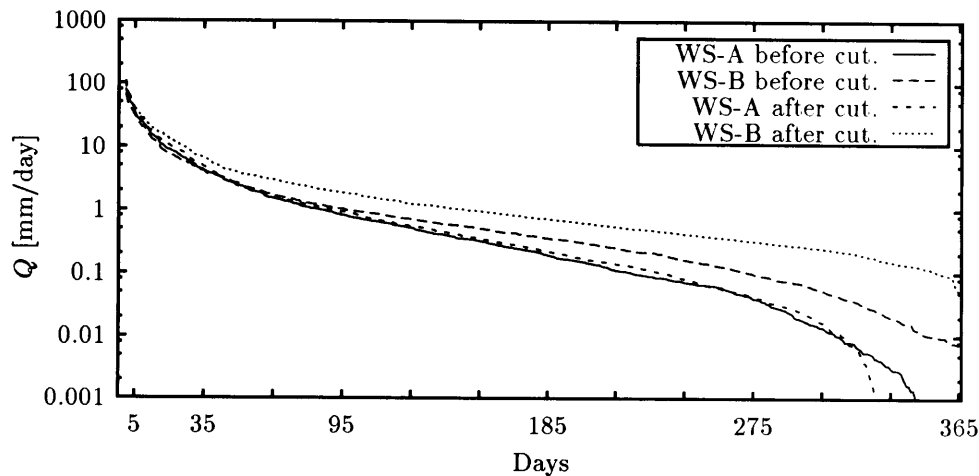


図 4.2: 伐採による平均流況曲線の変化

「平水流出量」、231～315（232～316）日目を「低水流出量」、316～365（317～366）日目を「渇水流出量」と定義する。また各流出量が水年流出量に占める割合を各流出率と定義する。この積分によって、高水／低水を統一的に論ずることができるという流況曲線の特徴を保存したまま、水年流出量と同じ次元で量的な解析が可能となる。

低水時流出量の変化は low-flow days によって検討した。Low-flow days とは一水年のうち日流出量が一定量を下回る日数のことを言い（Harr *et al*, 1982）、渇水時の流出特性の指標として用いられている。本論文では、渇水時に発生する流出停止現象が伐採によってどう変化したのかを検討するため閾値を 0 mm/day とし、加えて 0.1 mm/day も閾値として検討した。

## 4.2 平均流況曲線とその変化

初めに、平均流況曲線の方から解析する。前述の方法で算出した平均流況曲線を図-4.2 に示した。まずは図-4.2 から概観を読み取っておこう。

図-4.2 には流域別・期間別に計 4 本の曲線が描かれているが、対照流域である A 流域の流況曲線は伐採前後で曲線がほぼ重なっているのに対して、処理流域である B 流域のものは伐採前期間の曲線に比べて伐採後期間のものは上方に移動しており、伐採によって流量が増加したことがわかる。図-4.2 は縦軸が対数表示になっているために、低水側（図の右側）での変化が強調されている。流況曲線が高水／低水の全体としてどう変化したかはこの図からは読み取ることができない。

以下、流況曲線、およびそれを数値化した流況流量の解析を通じて伐採による変化の全体を明らかにして行く。

### 4.2.1 流況曲線・流況流量の解析

#### 4.2.1.1 伐採前の 2 流域の違い

まず初めに、袋山沢 A,B 流域の流出特性の差について解析する。すなわち、森林状態において袋山沢 A,B 流域の平均流況曲線にどのような違いがあったのかを解析する。

## 4.2. 平均流況曲線とその変化

表 4.1: 伐採前後の平均流況指標 [mm/day]

Average indice of the discharge duration curves before and after clear-cutting

流域 WS	期間 Period	最大 Max.	35 日目 35th day	豊水 Plentiful	平水 Ordinary	低水 Low	渇水 Scanty	最小 Minimam
WS-A	伐採前 Before cutting	<b>81.70</b>	<b>4.12</b>	0.82	0.19	0.040	0	0
WS-B	伐採前 Before cutting	67.30	4.04	<b>1.03</b>	<b>0.36</b>	<b>0.099</b>	<b>0.0099</b>	<b>0.0074</b>

A,B 流域のうち値が大きい方を太字で示した。

The bold letter represents the larger side between Watershed-A and B.

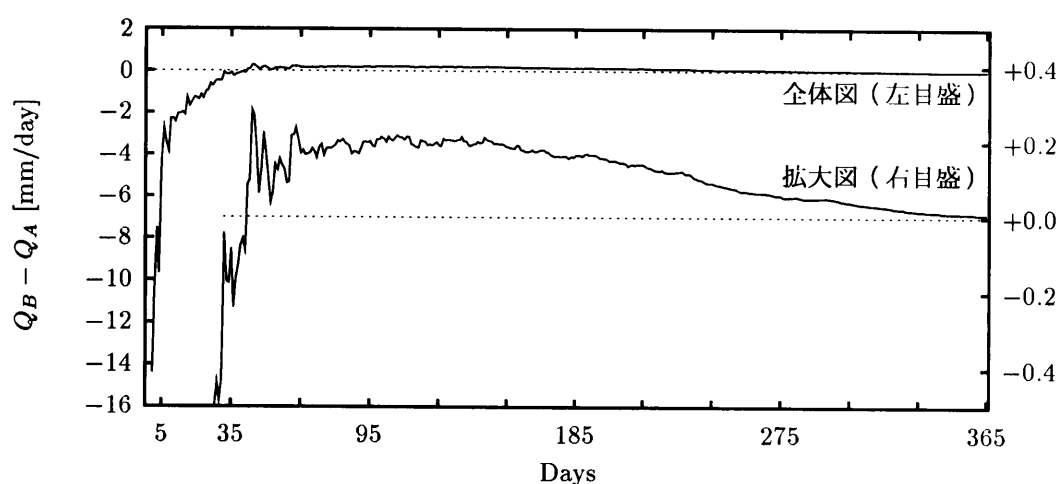


図 4.3: 伐採前の 2 流域の差

A,B 各流域の伐採前期間の平均流況曲線について、各流況流量を表-4.1 にまとめた。なお 2 流域のうち値が大きい方を太字で強調してある。

さて表-4.1 から A,B 両流域の流量を比較すると、高水側と低水側で傾向が異なることがわかる。すなわち、高水側では A 流域の方が流量が大きく、逆に低水側では B 流域の方が流量が大きい。A,B 両流域の流量の大小が逆転する境界について詳しく調べたところ、流況曲線上の日数としては 41 日目と 42 日目の間に、流量としては約 3.2 mm/day を境として逆転が起こっていた。つまり、袋山沢試験地の 2 流域は、一年の大半（日数にして 320 日ほど）は A 流域に比べて B 流域の流量が多いが、3.2 mm/day 以上の出水時には逆に A 流域の方が流量が多くなる、という流出特性があるのである。

A,B 両流域の流量差について更に詳しく見るために、B 流域の流況曲線から A 流域の流況曲線を引いたグラフを図-4.3 に示した。2 本の曲線のうち、上側に覆い被さっているものはグラフ全体を表示したもので、左側の目盛が対応する。下側のもう一方の曲線は縦軸 0 付近を拡大したもので、右側の目盛が対応する。縦軸正值側は B 流域の方が流量が大きく、負値側は A 流域の方が大きいことを表している。

さて図-4.3 を見ると、A,B 両流域の流量差の絶対値が最も大きくなるのは 1 日目流量で、流量

差は  $-14.4 \text{ mm/day}$  であった。1 日目以降、日数が下るにつれて両流域の流量差の絶対値は急激に小さくなって行き、6 日目には差が  $-3 \text{ mm/day}$  程度になる。6 日目以降は日数の経過とともに比例的に差が縮まって行き、先述の通り 41 日目と 42 日目の間で両流域の大小は逆転する。42 日目以降は逆に正值側に差が微増して行き、110 日目付近でピーク（約  $0.2 \text{ mm/day}$ ）を迎える。110 日目以降はまた再び両流域の差が縮まって行き、最終的には 365 日目において流量差  $0.0074 \text{ mm/day}$  に到る。

ここで、A 流域の方が流量が大きい 1～41 日目の区間と、B 流域の方が大きい 42～365 日目の区間のそれぞれで、両流域の流量差の積算値（すなわち図-4.3 における積分値）を求めてみると、前者の区間では  $-88.5 \text{ mm}$ 、後者の区間では  $39.4 \text{ mm}$  と算出された。両積算値を合計すると  $-49.1 \text{ mm}$  となる。この数値は、前章において A, B 両流域の水収支を比較した際に明らかになった、A 流域の方が約  $50 \text{ mm/year}$  年流出量が多いという事実に対応するものである。

#### 4.2.1.2 基準流域における伐採前後の変化

次に、基準流域である A 流域について、伐採前後での平均流況曲線の変化について調べる。A 流域は基準流域として植生が保存された流域であるから、仮に気象条件などの外部要因が伐採前後で同じであったならば平均流況曲線に変化はなかったはずである。逆に言うと、もし気象条件などが伐採前後で異なっていたならば、A 流域の平均流況曲線は伐採前後で変化したはずである。本小節では、B 流域における変化を解析するに先立ち、A 流域における変化を解析しておく。

さて、A 流域の平均流況曲線について、伐採後期間の曲線から伐採前期間の曲線を引くと、図-4.4 が得られる。図-4.4 には 2 本の曲線が描かれているが、下側のものはグラフ全体を表示したもので、左側の目盛が対応している。一方、上側のものは縦軸 0 付近を拡大したもので、右側の目盛が対応している。縦軸正值側は伐採後期間の方が流量が大きいことを意味し、負値側は逆に伐採後期間の方が流量が小さいことを意味する。

図-4.4 から、グラフの全体的傾向をみると、曲線は大部分の区間で縦軸正值側に偏っていることがわかる。曲線が正值側である日数を集計すると 291 日、逆に負値側である日数は 60 日、残り 14 日は両期間ともに流量が 0 であった。

両期間の差が最大となったのは 1 日目で、値は  $29.26 \text{ mm/day}$  であった。1 日目以降、ばらつきがあるものの、日数が下るにつれて差が小さくなっていき、0 に漸近していく傾向が認められる。差が負値になる区間は、40～60 日目付近、240 日目付近、320～335 日目付近の 3 箇所に出現しているが、この出現パターンに有意性は認めがたく、偶然のバラツキであるように思われる。

以上のことから、A 流域の平均流況曲線は、全体的傾向としては伐採前期間よりも伐採後期間の方が流量が大きく、両期間の流量差は流況曲線上の日数に（すなわち流量の大小に）対応していた、と言える。

続いて、流量の大小と両期間の流量差の大小を比較するために、両期間の流量差を伐採前期間の流量で除して変化率を算出すると、図-4.5 が得られる。図-4.5 をみると、若干の例外を除けば、A 流域における両期間の流量の変化率はおおよそ  $0.1 \sim 0.2$  の範囲に収まっていることがわかる。図の右側、310 日目以降では変化率が負値側に大きくずれ込んで  $-1$  にまで下がっているが、これは伐採後期間の流量が 0 となったためである。グラフを全体的にみれば、伐採後期間の流量はほぼ一定の比率で増加していると言っていいだろう。

以上の結果を流況流量として数値化したものを表-4.2 に示しておく。

伐採前期間に比べて伐採後期間の流出量が多いということは、既に前章の水収支の解析でも述べた通りである。その原因は入力となる降水量に両期間で差があるためであると考えられる（図-3.1

#### 4.2. 平均流況曲線とその変化

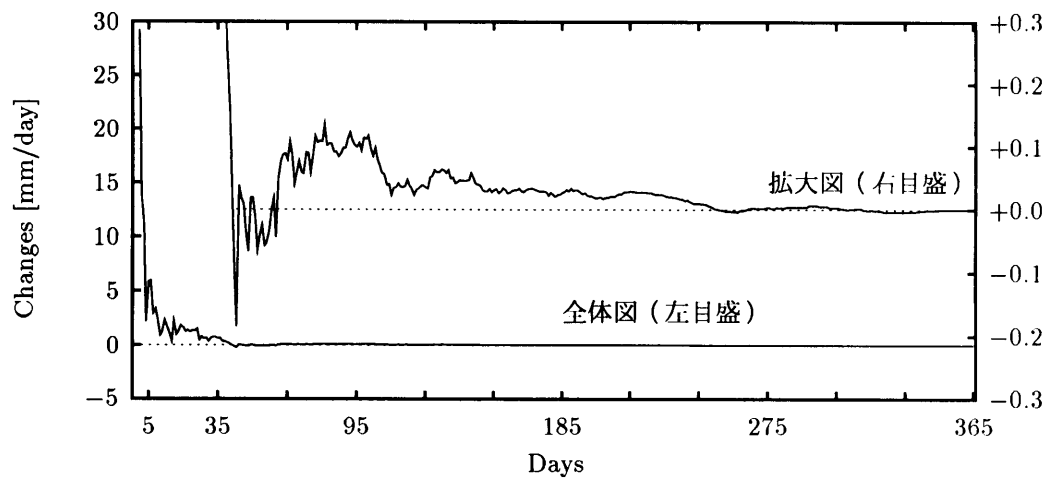


図 4.4: A 流域の伐採前後の差

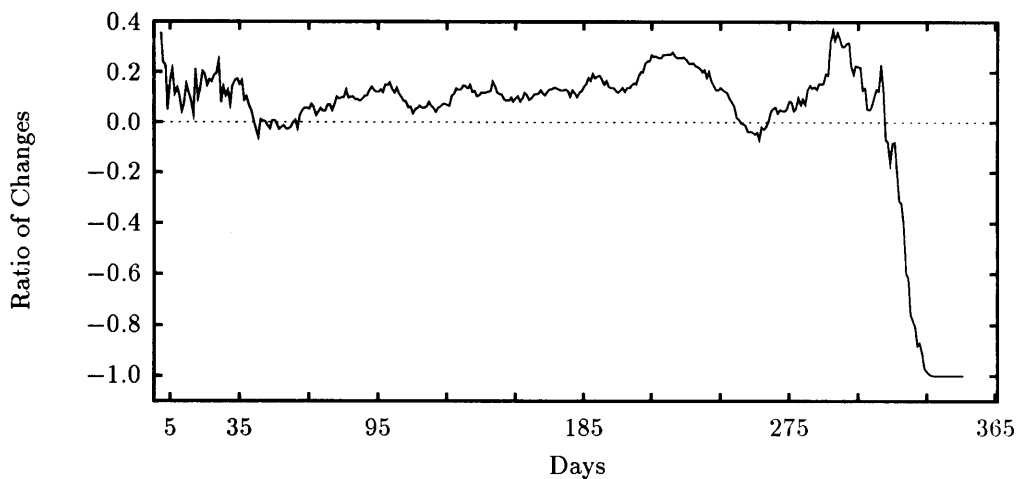


図 4.5: A 流域の伐採前後の差の比率

表 4.2: A 流域における伐採前後の平均流況指標 [mm/day]

Average indice of the discharge duration curves before and after clear-cutting

期間 Period	最大 Max.	35 日目 35th day	豊水 Plentiful	平水 Ordinary	低水 Low	渇水 Scanty	最小 Min.	
伐採前 Before cutting	81.70	4.12	0.82	0.19	0.040	0	0	I
伐採後 After cutting	110.96	4.76	0.92	0.22	0.044	0	0	II
変化量 Changes	29.26	0.63	0.10	0.03	0.004	0	0	II - I
変化率 Ratio of changes	0.36	0.15	0.12	0.14	0.1	-	-	(II - I) / I

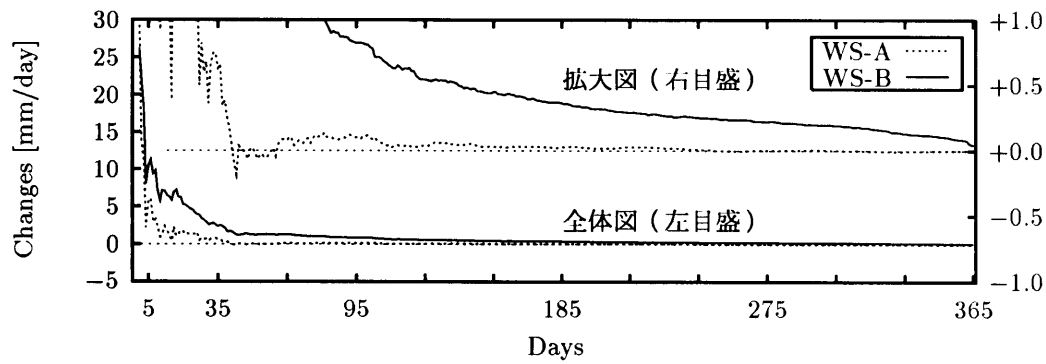


図 4.6: 伐採による各流域の変化

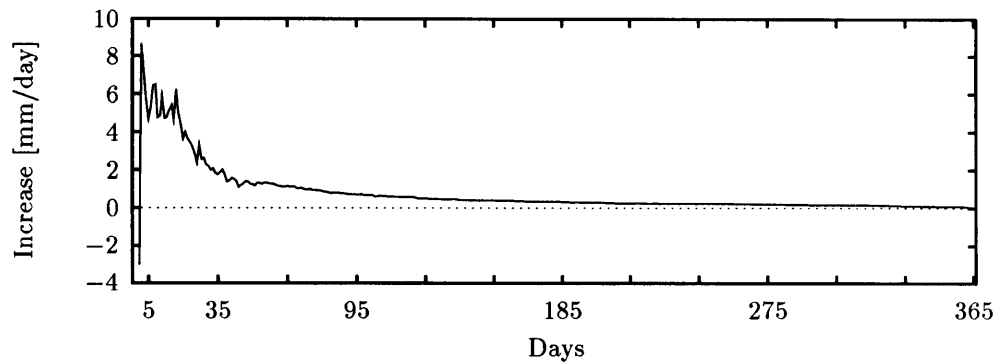


図 4.7: 伐採による増加量

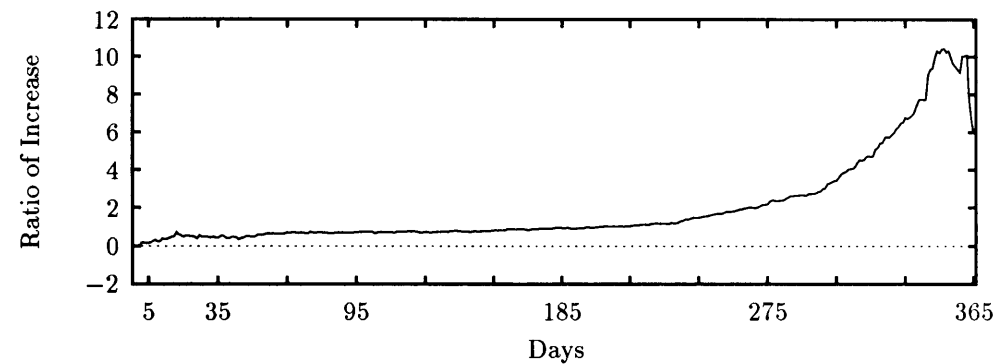


図 4.8: 伐採による増加率

参照)。図-4.5 から、両期間の降水量の差は流況曲線をほぼ均等に変化させたことがわかる。

#### 4.2.1.3 伐採による変化

ではいよいよ、袋山沢 B 流域における、伐採による平均流況曲線の変化について解析する。

まず初めに、伐採後期間の平均流況曲線から伐採前期間のそれを引いて得られる「変化量」を図-4.6 に示す。縦軸正值側は伐採後期間の方が流量が多いことを表し、負値側は逆である。図中には比較のために、先述の図-4.4 において示した A 流域の変化量も書き入れておいた。図中、計 4 本ある曲線のうち、下側の 2 本はグラフ全体を表示しており、左側の目盛が対応する。上側の 2 本は

表 4.3: 伐採前後の平均流況指標 [mm/day]

Average indice of the discharge duration curves before and after clear-cutting

流域 WS	期間 Period	最大 Max.	35 日目 35th day	豊水 Plentiful	平水 Ordinary	低水 Low	渇水 Scanty	最小 Min.	
WS-A	伐採前	81.70	4.12	0.82	0.19	0.040	0	0	I
	伐採後	110.96	4.76	0.92	0.22	0.044	0	0	II
	変化量	29.26	0.63	0.10	0.03	0.004	0	0	II - I
	変化率	0.36	0.15	0.12	0.14	0.1	-	-	(II - I)/I
WS-B	伐採前	67.30	4.04	1.03	0.36	0.099	0.0099	0.0074	III
	伐採後	93.54	6.43	1.85	0.72	0.32	0.11	0.052	IV
	変化量	26.23	2.39	0.82	0.36	0.22	0.098	0.044	IV - III
	変化率	0.39	0.59	0.80	1.03	2.23	9.92	5.97	(IV - III)/III
増加量		-3.03	1.76	0.72	0.33	0.22	0.098	0.044	IV-III-II+I
増加率		-0.045	0.44	0.70	0.92	2.22	9.90	5.95	(IV-III-II+I)/III

縦軸 0 付近を拡大して表示したもので、右側の目盛が対応する。

さて図-4.6 をみると、袋山沢 B 流域の変化量は曲線全体で、すなわち 1 日目から 365 日目までのすべてにおいてプラスの値を取っていることがわかる。すなわち、袋山沢 B 流域の平均流況曲線を伐採前後で比べると、すべての日数において例外なく伐採後期間の方が流量が多い。また、A 流域の変化量との比較では、1 日目のみは A 流域の変化量の方が多いが、2 日目から 365 日目まではすべて B 流域の変化量の方が多い。A 流域は基準流域として植生が保持された流域であるから、A 流域よりも B 流域の方が流量が多いということは、伐採の影響によって流量が増加したことを意味している。

そこで、B 流域の変化量から A 流域の変化量を引いて、伐採による増加量を算出すると、図-4.7 が得られる。縦軸正值側は伐採によって流量が増加したことを意味し、負値側は逆に減少したことを意味する。さて図-4.7 から、伐採による増加量と流況曲線上の日数との対応関係を見ると、日数が小さいほど増加量が大きく、日数が大きいほど増加量が小さいという関係があることがわかる。流況曲線は日数が小さいほど流量が大きいことを考慮すると、増加量は流量の大小に連動していることになる。

続いて、増加量を B 流域の伐採前期間の流量で除して増加率を算出すると図-4.8 のようになる。図-4.8 によると、流況曲線の増加率は、日数が小さいほど値が小さく、日数が大きいほど値が大きい。曲線の形状は不均一で、220 日目までは日数に対して曲線の傾きはゆるやかであるが、それ以降は傾きが急になっていき、あたかも山の稜線のような曲線を描いている。350 日目付近でピークを迎え、それ以降ではやや値が小さくなる。極大となる 350 日目付近では増加率は 10 を越える。すなわち伐採によって 350 日目付近の日流量は 11 倍以上になったのである。

図-4.7 と図-4.8 を見比べると、曲線の形状が互いに左右反転したような恰好になっていることがわかる。このことから、伐採による流出の変化は、流量でみると高水側の増加が大きい、比率でみると低水側の増加が大きい、と言える。

以上の解析を流況流量として数値化したものを表-4.3 に示しておく。

さてここまでは、グラフの横軸として流況曲線上の日数を採用してきた。本章は流況曲線の解析であるからこの表示法はさしあたり適切であると思われる。しかしここまでの解析によって、伐採



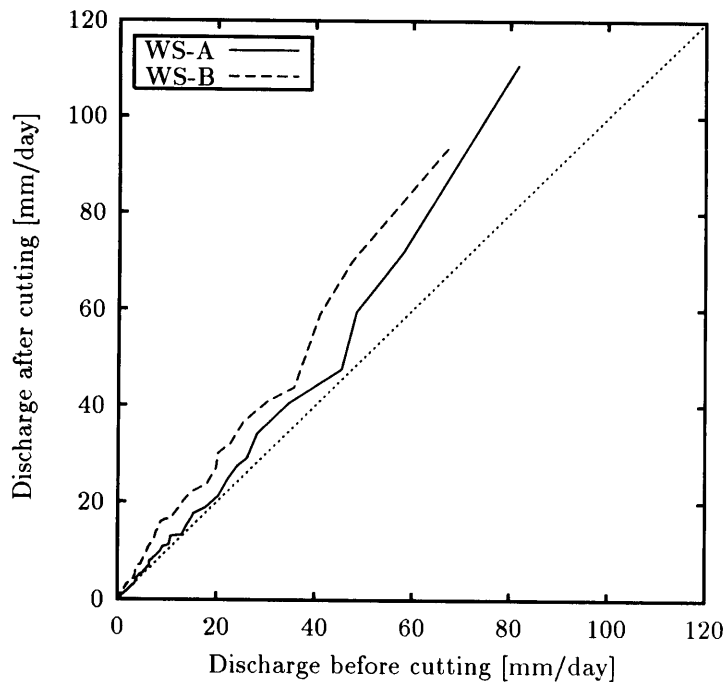


図 4.9: 伐採前後期間の平均流況曲線

による流況曲線の変化は日数の小さい側と大きい側とで異なる傾向を見せること、すなわち高水側と低水側とで異なることが明らかとなった。そこでここでは、流況曲線の変化を、日数に対してではなく流量に対してプロットしたグラフをもとに解析し、流況曲線の変化が流量とどのような関係にあるのかを明らかにしたい。

まず、図-4.9 に、A,B 各流域の平均流況曲線に対して、同じ日数の流量を伐採前後で対比したグラフを示す。図中点線で 1:1 ラインを表示してあるが、もし伐採前後で流況曲線に変化がなかったらグラフは 1:1 ラインに乗るはずである。現実にはグラフは 1:1 ラインの上側に位置しており、伐採後期間の方が流量が多かったことを示している。基準流域である A 流域において伐採後期間の方が流量が大きかったのは、先にも述べた通り伐採後期間の降水量が大きかったせいである。それに対して、皆伐施業が行なわれた B 流域のグラフは A 流域の曲線よりもさらに上側に位置しており、伐採によって流量が増加したことが示されている。

A,B 各流域の変化量、つまり図-4.9 において各曲線と 1:1 ラインの差を取ると図-4.10 が得られる。なお図-4.10 は図-4.6 の横軸を伐採前期間の流量で表示したのと同じであり、曲線自体は両図とも同一である。さて図-4.10 を見ると、伐採前後期間の変化量が流量と連動している様子がさらに明白に見て取れよう。A,B 両流域ともに、流量が大きくなるにつれて変化量も大きくなる傾向を見せている。

続いて、伐採による増加量を流量に対して表示したものが図-4.11 である。基準となる A 流域の流量が伐採前後で異なることを考慮して、横軸には A 流域流量の伐採前後の平均値を使用した。なお図-4.11 の横軸を流況曲線上の日数に直すと図-4.7 が得られる。

さて図-4.11 によれば、伐採による増加量は、流量の規模によって、傾向を異にする 3 つの区間に区分できそうである。まず流量が 10 mm/day 以下の区間においては、伐採による増加量は流量に対してほぼ比例していることがわかる。図-4.11 の原点付近を拡大したグラフを図-4.13 に示し

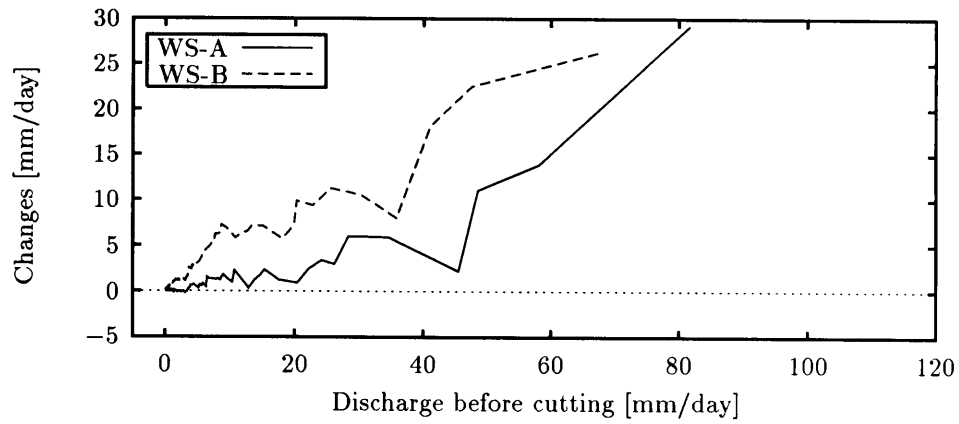


図 4.10: A,B 各流域の伐採前後の変化量

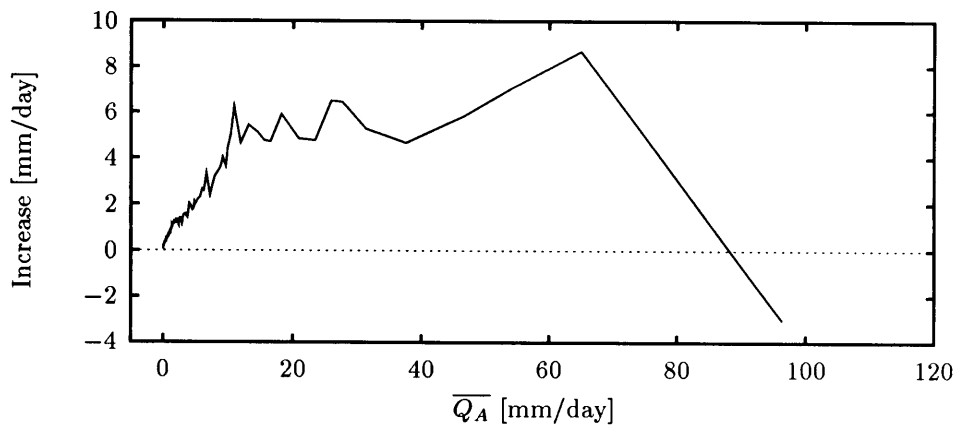


図 4.11: 伐採による増加量

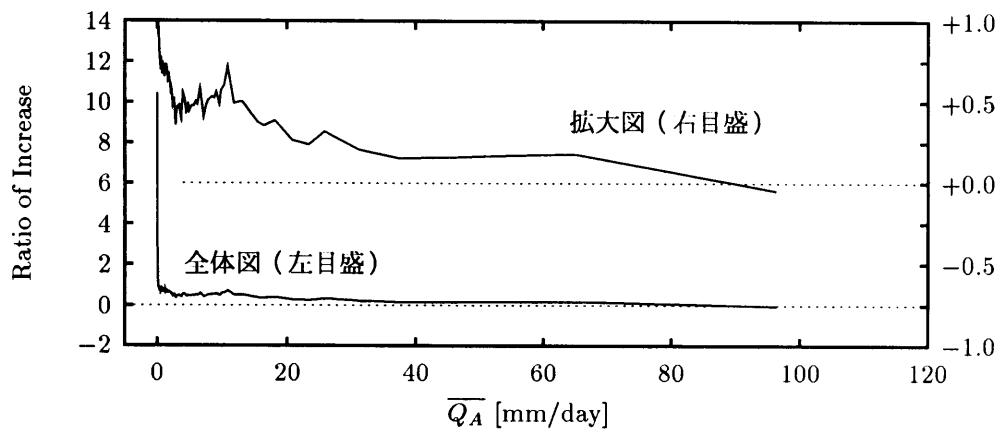


図 4.12: 伐採による増加率

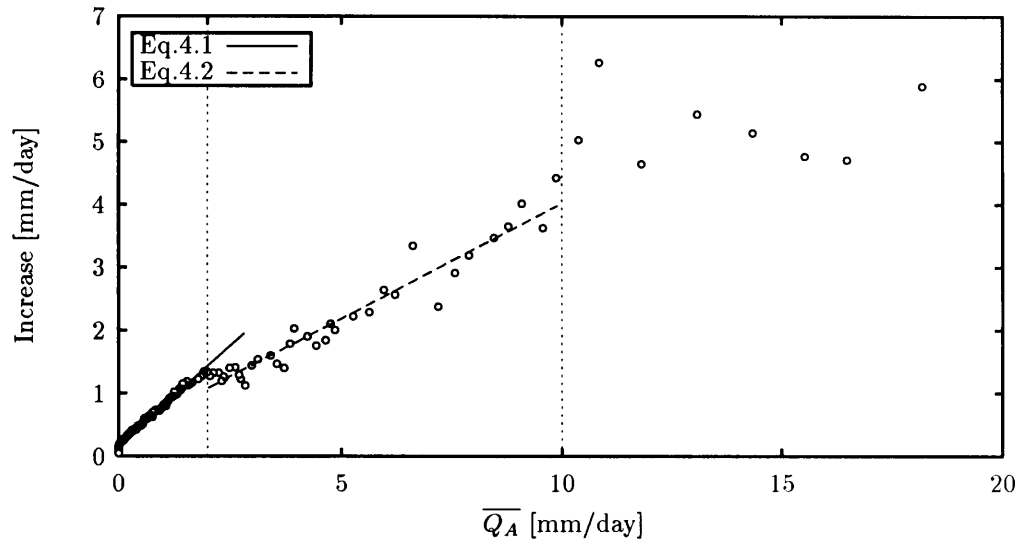


図 4.13: 伐採による増加量（拡大図）

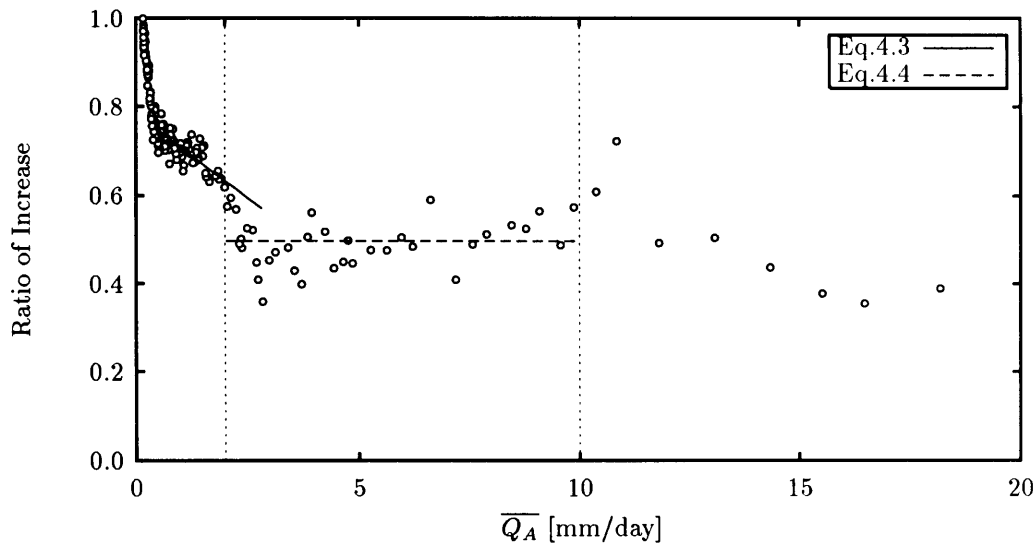


図 4.14: 伐採による増加率（拡大図）

た。流量が 10 mm/day 以下の区間を詳しくみると、2 mm/day の付近でグラフの傾向が変化していることがわかる。さらに、流量 2 mm/day 以下の区間と、2 mm/day 以上 10 mm/day 以下の区間でグラフはそれぞれ直線状である。そこで近似式として、A 流域流量の伐採前後の平均値  $\overline{Q_A}$  mm/day に対する増加量  $\Delta Q_B$  mm/day の回帰直線を求めると、

$$\overline{Q_A} \leq 2) \quad \Delta Q_B = 0.6283\overline{Q_A} + 0.18 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.9863) \quad (4.1)$$

$$2 < \overline{Q_A} \leq 10) \quad \Delta Q_B = 0.3686\overline{Q_A} + 0.34 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.9426) \quad (4.2)$$

が得られた。(4.1) 式および (4.2) 式は図-4.13 に示してあるが、(4.1) 式はもとのプロットと回帰直線が重なって見にくいので、流量 3 mm/day の区間まで延長して描いてある。

(4.1) 式および (4.2) 式はともに決定係数が高く、また図-4.13 においても当てはまりが良好である。したがって両式ともに近似式として妥当であると思われる。

流量 10 mm/day 以下の区間では増加量と流量との間に直線的関係が見出されたのに対して、10 mm/day 以上 50 mm/day 以下の区間では増加量は流量との連動性がなく、ほぼ一定の範囲の値を取っている。その区間における増加量値の範囲は約 4.5 ～ 6.5 mm、平均値は 5.35 mm であった。

流量 50 mm/day 以上の区間では、流量が大きくなるのに対して増加量は逆に減少する傾向を示した。流量が最大となるグラフ最右端では増加量は負値を取り、すなわち伐採によって流量が減少した。ただし、この区間はデータ数が少なく、この傾向が有意なものであるとは言えない。

続いて、伐採による流量の増加率と流量との関係を図-4.12 に示した。なお図-4.12 の曲線は図-4.8 と同一であり、図-4.12 の横軸を流況曲線上の日数に直すと図-4.8 が得られる。図-4.12 には曲線が 2 本描かれているが、下側のものはグラフ全体を表示しており、左側の目盛が対応する。上側の曲線は縦軸 0 付近を拡大したもので、右側の目盛が対応する。

さて図-4.12 を見ると、横軸 0 付近とそれ以外の区間とで値の絶対値が大きくことなることが見て取れる。横軸 0 付近では増加率は最大で 10 以上となるが、それ以外の区間では増加率は 1 以下である。グラフの全体的傾向としては、増加率は流量が大きくなるに従って値が小さくなっていく傾向が見られた。しかし詳細に見ると、増加量と同様に、流量 2 および 10 mm/day 付近でグラフの傾向が変化しているように見える。

そこで図-4.14 に、図-4.12 の原点付近を拡大したものを示した。図-4.12 から、各区間における増加率の傾向を見てみる。まず流量 2 mm/day 以下の区間では、流量 0 mm/day 付近において増加率は流量の増大とともに急激に減少するが、増加率 0.8 を下回ると傾きは緩やかになり、増加率はゆっくりと減少していく。流量 0.35 mm/day 以上 2 mm/day 以下の区間で増加率  $R$  と A 流域流量の伐採前後の平均値  $\overline{Q_A}$  との間で回帰直線を求めると、

$$0.35 \leq \overline{Q_A} \leq 2) \quad R = -0.07529\overline{Q_A} + 0.78 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.6596) \quad (4.3)$$

が得られる。グラフのばらつきが大きいために決定係数はやや低い、回帰の有意性（すなわち傾きの有意性）は 1% 水準を超えているため、この区間において流量の増大とともに増加率は減少していくと断じてよいと思われる。

流量 2 mm/day 以上 10 mm/day 以下の区間では、流量と増加率との間に連動は見出せず、増加率は約 0.5 を中心に 0.4 ～ 0.6 程度の値を取る。この区間で増加率の平均を取ると 0.497 が得られた。

$$2 < \overline{Q_A} \leq 10) \quad R = 0.497 \quad (4.4)$$

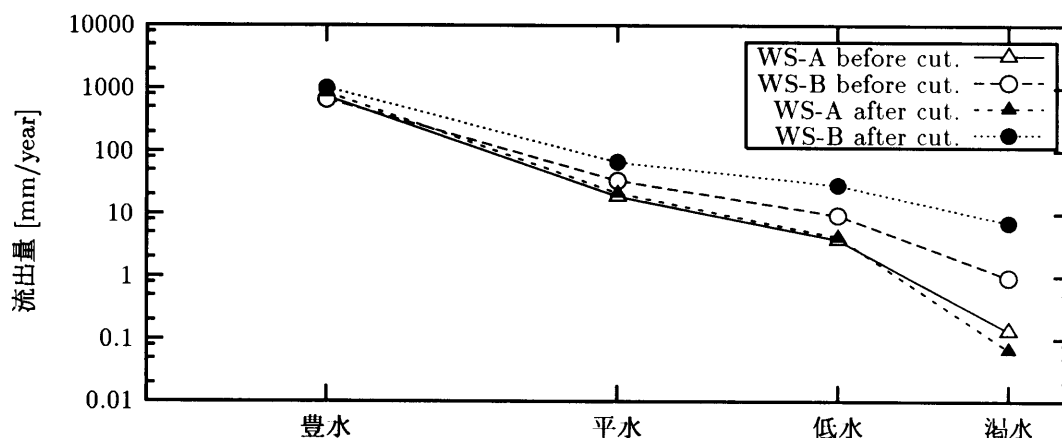


図 4.15: 平均流況曲線の流況流出量

流量が 10 mm/day 以上になると増加率は再び流量の増大とともに減少しはじめ、ゆっくりとその値を低下させて行く。

図-4.14 には (4.3) 式および (4.4) 式から求められた線を書き入れておいた。

#### 4.2.2 流況流出量

この小節では平均流況曲線の流況流出量を解析する。

まず初めに流況流出量のグラフを図-4.15 に示す。図-4.15 において、横軸の各目盛は各区間の中間点に位置するように調整してある。すなわち、豊水流出量（1～140 日目流量の計）は横軸 70.5 の位置に、平水流出量（141～230 日目流量の計）は 185.5 に、低水流出量（231～315 日目流量の計）は 273 に、渇水流出量（316～365 日目流量の計）は 340.5 にそれぞれプロットされている。

図-4.15 の全体的な形状は図-4.2 に酷似しているが、このことは流況流出量が流況曲線の区間積分であることを考えれば当然のことと言える。以下の解析は前小節で行なった流況曲線・流況流量の解析と重複する部分も多いが、重複する部分については軽く触れるにとどめ、本小節では水年流出量 (mm/year) への接続を中心的課題として解析を進めることにする。

##### 4.2.2.1 伐採前の 2 流域の違い

まずは、袋山沢 A,B 流域の流出特性の差異について調べておく。すなわち、森林状態において両流域の平均流況流出量にどのような違いがあったのかを解析する。

A,B 各流域における、伐採前期間の平均流況流出量を表-4.4 にまとめた。なお 2 流域のうち値が大きい方を太字で強調してある。

まず総流出量を比較してみると、A 流域の方が B 流域よりも約 50 mm/year 多い。このことは水収支の項 (§3.1.2) でも述べた通りである。

次に各流出量を見ると、豊水流出量は A 流域の方が大きく、平水・低水・渇水流出量は B 流域の方が大きい。このことは流況曲線の項 (§4.2.1.1) で解析した両流域の大小関係と対応する。すなわち A,B 両流域の流量は、高水側では A 流域の方が流量が大きく、低水側では逆に B 流域の方が

#### 4.2. 平均流況曲線とその変化

表 4.4: 平均豊水・平水・低水・渇水各流出量 [mm/year]  
Average plentiful, ordinary, low and scanty discharge

流域 Watershed	期間 Period	豊水 (%) Plentiful(%)	平水 (%) Ordinary(%)	低水 (%) Low(%)	渇水 (%) Scenty(%)	計 Total
A	伐採前期間 Before cutting	735.62(97.01)	18.73(2.47)	3.81(0.50)	0.14(0.02)	758.29
B	伐採前期間 Before cutting	665.47(93.83)	33.38(4.71)	9.40(1.33)	0.96(0.14)	709.21

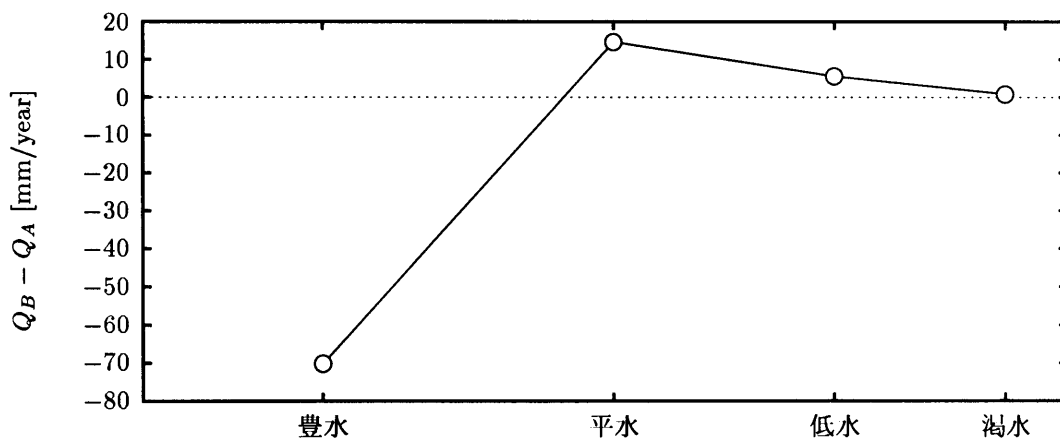


図 4.16: 伐採前期間の A,B 流域の差

大きかった。両流域の大小関係が逆転するのは流況曲線上で 41,42 日目であったが、この日付を流況流出量の定義と照らし合わせると、豊水流出量 (1~140 日目) の区間に含まれる。つまり豊水流出量は、A 流域の方が流量が大きい区間 (1~41 日目) と B 流域の方が大きい区間 (42~140 日目) とで構成されており、両区間を合成すると前者の方が優勢であるため、結果として A 流域の方が大きい、と理解できる。

一方、平水・低水・渇水各流出量において B 流域の方が大きいのは、それぞれ流況曲線上で B 流域の方が流量が大きくなる区間の積分値だからである。

表-4.4 をもとに、B 流域流出量から A 流域流出量を引いて両流域の流出量の差を取ると図-4.16 が得られる。縦軸正値は B 流域の方が流出量大きいことを意味しており、負値は逆に A 流域の方が大きいことを意味する。

図-4.16 における曲線の形状は図-4.3 と類似しているが、図-4.16 は実質的には図-4.3 の区間積分であるので似ているのは当然である。さて各流出量の点の分布を見てみると、平水・低水・渇水各流出量は平水から渇水にかけて次第に 0 に漸近していくという規則的な配列であるのに対して、豊水流出量の点は他の 3 点とは傾向を異にしていることがわかる。

次に、各流出量が総流出量に占める割合、すなわち各流出率について見てみる。A,B 両流域の流出率を比べてみると、豊水流出率は A 流域の方が大きく、平水・低水・渇水各流出率は B 流域の

表 4.5: A 流域の平均豊水・平水・低水・渇水各流出量 [mm/year]  
Average plentiful, ordinary, low and scanty discharge in WS-A

期間 Period	豊水 (%) Plentiful(%)	平水 (%) Ordinary(%)	低水 (%) Low(%)	渇水 (%) Scanty(%)	計 Total	
伐採前期間 Before cutting	735.62(97.01)	18.73(2.47)	3.81(0.50)	0.14(0.02)	758.29	I
伐採後期間 After cutting	849.60(97.07)	21.35(2.44)	4.23(0.48)	0.07(0.01)	875.25	II
変化量 Changes	113.98(97.45)	2.62(2.24)	0.42(0.36)	-0.07(-0.06)	116.96	II - I
変化率 Ratio of changes	0.15	0.14	0.11	-0.50	0.15	(II - I) / I

方が大きくなっている。この大小関係は各流出量のものと一致している。

#### 4.2.2.2 伐採前後の差（A 流域）

続いて A 流域における伐採前・伐採後期間の各流出量の差を調べる。

表-4.5 に、伐採前後期間における各流出量と各流出率、および両期間の変化量と変化率を一覧にして示した。

まず総流出量の変化を見ると、伐採前期間に比べて伐採後期間の方が 116.96 mm/year、比率にして 15% 多いことがわかる。両期間における総流出量の違いは、両期間の年降水量に違いがある (§3.1.3) が原因であると思われる。

次に各流出量の変化であるが、豊水・平水・低水各流出量は、総流出量と同様に、伐採後期間の方が大きかった。しかし渇水流出量は逆に伐採後期間の方が小さかった。各流出量の変化率を見ると、豊水・平水・低水各流出量は総流出量の変化率とほぼ等しい値であったが、渇水流出量の変化率は他の流出量に比べて値がかなり小さかった。

各流出量の変化率を図-4.18 に図示した。図中には参考のために総流出量の変化率も併記しておいた。図-4.18 の全体的な形状は図-4.5 に似ているが、このことは、図-4.18 が図-4.5 の区間平均であるということを考えれば当然のことと言える。さて図-4.18 を見ると、豊水流出量の変化率は総流出量の変化率と等しいが、平水から渇水へと低水側に行くにつれて各流出量の変化率は総流出量の変化率から乖離して行くことがわかる。ただし平水・低水流出量の乖離はわずかなものであり、豊水から低水流出量にかけては伐採前後の変化率はほぼ均等であったと言っても良いだろう。これに対して渇水流出量の変化率は、他の流出量とは逆に伐採後期間の方が流出量が少なかった。これは伐採後期間の方が日流量が 0 になる日数が多かったことの影響であろう。年流出量に対する渇水流出量の寄与は小さいために、年流出量が増加しても渇水流出量が減少するということは起こり得ることである。

最後に、各流出率の変化を見てみよう。表-4.5 からわかる通り、各流出率は伐採前後でほとんど変化していない。最大の変化は豊水流出率に出現したが、その変化量はたかだか 0.06%（97.01% から 97.07% に変化）であった。このことから、A 流域においては、高水流出／低水流出のバランス、すなわち流出の年間一様性が伐採前後で変化しなかった、と言えるだろう。

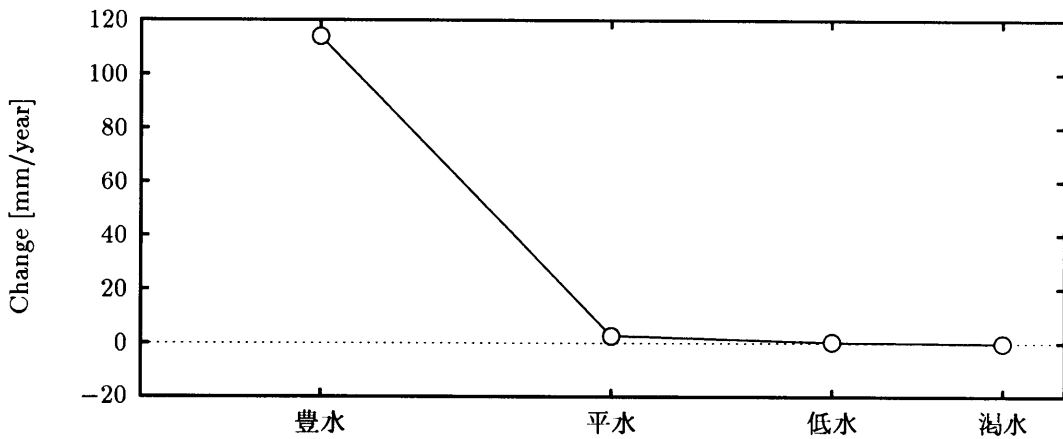


図 4.17: A 流域の伐採前後の差

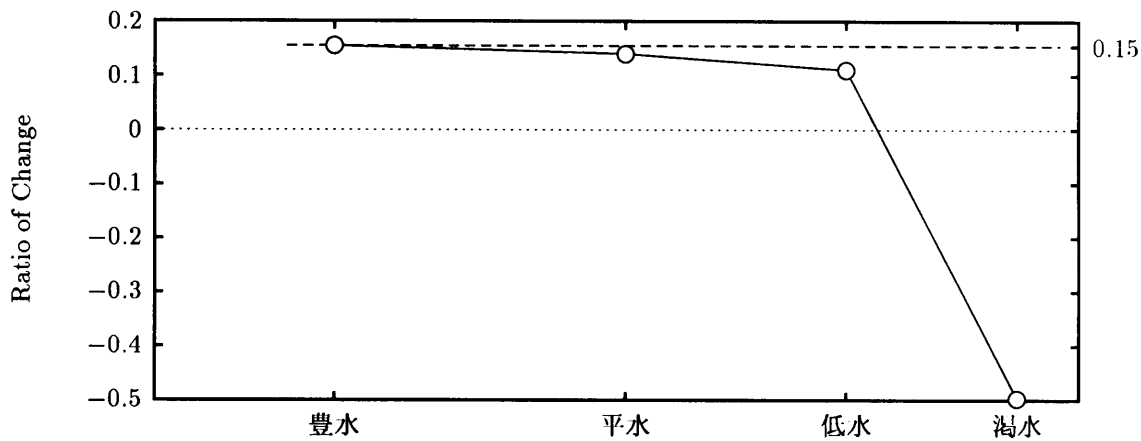


図 4.18: A 流域の伐採前後の差の比率

#### 4.2.2.3 伐採による変化

ではいよいよ、袋山沢 B 流域において、伐採によって平均流況流出量はどう変化したかを見てみよう。

表-4.6 は平均流況流出量の変化についての計算結果を一覧にしたものである。以下、この表を逐次図化して伐採の影響を解析していく。

まず初めに各流出量の変化量を図-4.19 に示す。変化量とは、伐採後期間の流出量から伐採前期間の流出量を引いたもので、図-4.19 の縦軸正值側は伐採後期間の方が流出量が大きかったことを意味し、逆に負値側は伐採前期間の方が流出量が大きかったことを意味する。図-4.19 の曲線の形状は図-4.6 に似ているが、これは図-4.19 が図-4.6 の区間積分であるためである。

さて図-4.19 を見ると、B 流域の変化量は各流出量ともにプラスの値を取っており、伐採後期間の方が流出量が大きかったことを示している。また A 流域の変化量と比較すると、各流出量ともに A 流域の変化量よりも B 流域の変化量の方が大きいことがわかる。A 流域は基準流域として植生が保持された流域であるから、A 流域よりも変化量が多いということは、伐採によって B 流域の流出量が増加したことを意味している。



## 4.2. 平均流況曲線とその変化

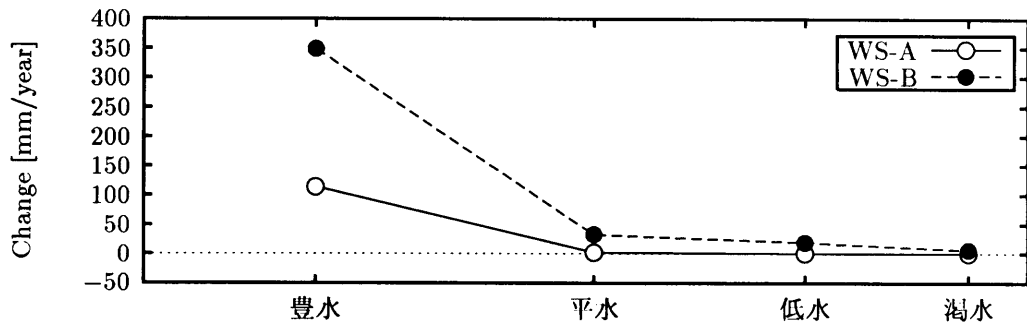


図 4.19: 伐採前後における平均流況流出量の変化

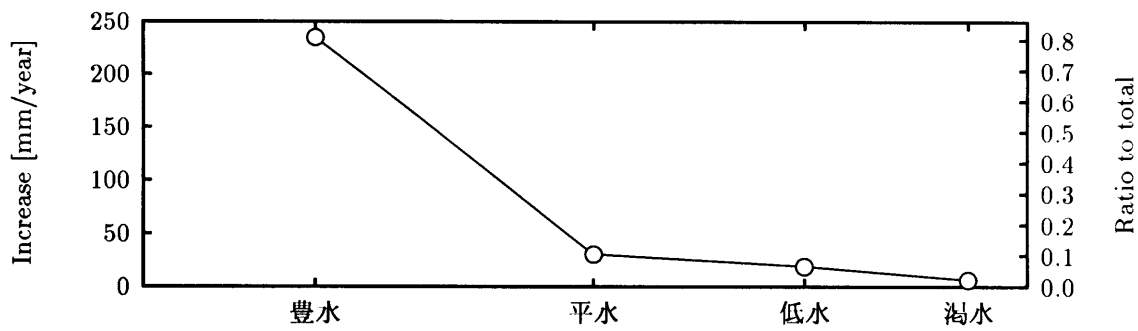


図 4.20: 伐採による平均流況流出量の増加量

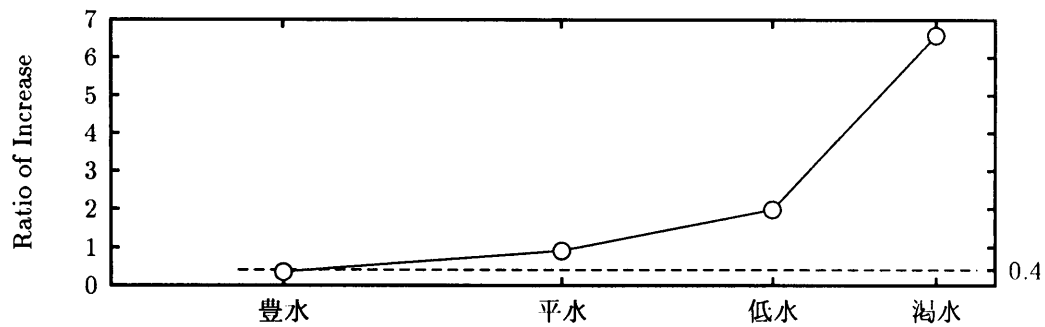


図 4.21: 伐採による平均流況流出量の増加率

## 4.2. 平均流況曲線とその変化

表 4.6: 平均豊水・平水・低水・渇水各流出量 [mm/year]  
Average plentiful, ordinary, low and scanty discharge

流域 WS	期間 Period	豊水 (%) Plentiful(%)	平水 (%) Ordinary(%)	低水 (%) Low(%)	渇水 (%) Scanty(%)	計 Total	
WS-A	伐採前期間 Before cutting	735.62(97.01)	18.73(2.47)	3.81(0.50)	0.14(0.02)	758.29	I
	伐採後期間 After cutting	849.60(97.07)	21.35(2.44)	4.23(0.48)	0.07(0.01)	875.25	II
	変化量 Changes	113.98(97.45)	2.62(2.24)	0.42(0.36)	-0.07(-0.06)	116.96	II - I
	変化率 Ratio of changes	0.15	0.14	0.11	-0.50	0.15	(II - I) / I
WS-B	伐採前期間 Before cutting	665.47(93.83)	33.38(4.71)	9.40(1.33)	0.96(0.14)	709.21	III
	伐採後期間 After cutting	1014.52(90.86)	66.30(5.94)	28.53(2.56)	7.23(0.65)	1116.58	IV
	変化量 Changes	349.05(85.68)	32.92(8.08)	19.13(4.70)	6.27(1.54)	407.37	IV - III
	変化率 Ratio of changes	0.52	0.99	2.04	6.53	0.57	(IV - III) / III
増加量 Increases		235.06(80.94)	30.30(10.43)	18.71(6.44)	6.33(2.18)	290.41	IV - III - II + I
増加率 Ratio of increases		0.35	0.91	1.99	6.59	0.41	(IV - III - II + I) / III

そこで、B 流域の変化量から A 流域の変化量を引いて、伐採による各流出量の増加量を算出すると、図-4.20 が得られる。図-4.20 の曲線の形状は図-4.7 に似ているが、これは図-4.20 が図-4.7 の区間積分であることを考えれば当然である。また図-4.20 の右端には、総増加量に対する各増加量の割合を目盛してある。

さて、まず表-4.6 より、総流出量は伐採によって 290.41 mm/year 増加したと求められた。この数値は前章での解析の結果求められた増加量 295.8 mm/year とは計算方法が異なるために正確には一致していないが、両者の差は 2% 程度であり、特に問題視することもなかろう。

総流出量の増加に対応して、各流出量も伐採によって増加した。図-4.20 を見ると、伐採による流出量の増加量は豊水流出量が最も大きい。豊水流出量は、総増加量 290.41 mm/year に対して 235.06 mm/year 増加しており、割合で言うと 80.94 % であった。総流出量の増加に最も寄与しているのは豊水流出量の増加であると言える。豊水流出量に続いて、平水・低水・渇水の順に増加量が多い。また同時にこの順で総増加量に対する寄与も大きかった。

続いて、各流出量の増加量を B 流域の伐採前期間の流出量で除して算出した増加率を図示すると図-4.21 のようになる。また参考のために総流出量の増加率 (0.41) を併記しておいた。図-4.21 の曲線の形状は図-4.8 に類似しているが、このことは、図-4.8 が点平均、図-4.21 が区間平均という違いがあるものの、両者がともに伐採による流量の増加率を表示したものであることから当然のことと言える。

さて図-4.21 より、伐採による各流出量の増加率は、豊水流出量が最も小さく、以下平水・低水・渇水の順に小さかった。すなわち、高水側よりも低水側の方が増加率が大きい傾向があった。増加率が最も小さかった豊水流出量は、総流出量の増加率よりも値が低かった。一方平水・低水・渇水

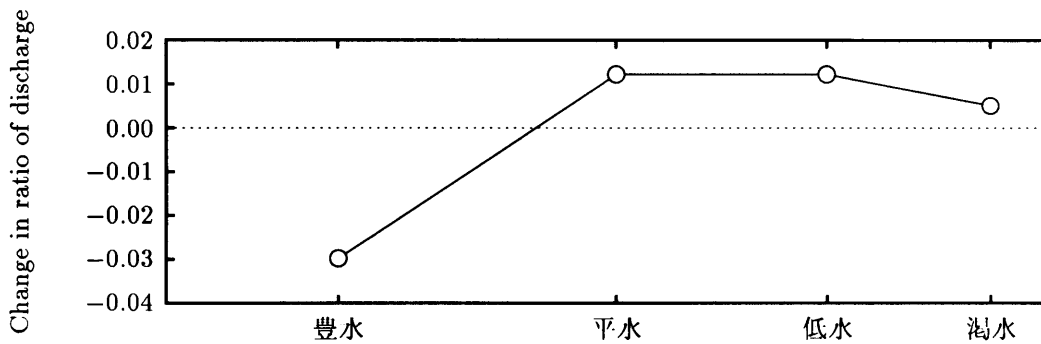


図 4.22: B 流域の各流出率の変化量

流出量の増加率は総流出量の増加率よりも大きかった。

最後に、各流出率の変化について見てみよう。A 流域の各流出率は伐採前後で変化が見られなかったことは既に述べた。一方、B 流域は、表-4.6 によると、豊水流出率は伐採後期間の方が値が小さかったが、平水・低水・渇水流出率は逆に伐採後期間の方が値が大きかった。表-4.6 をもとに、B 流域の各流出率が伐採前後期間で変化した量を図化してみると図-4.22 のようになる。図-4.22 の縦軸は伐採後期間の各流出率から伐採前期間の各流出率をそれぞれ引いたものである。したがって縦軸正値側は伐採によって流出率が大きくなったことを意味し、負値側は逆に伐採によって流出率が小さくなったことを意味している。

さて図-4.22 を見ると、伐採によって豊水流出率は減少し、平水・低水・渇水流出率は増加したことがわかる。ところで、各流出率の合計値は定義上 1 (100%) であるから、各流出率の変化はゼロサムの関係にある。つまり、図-4.22 において、豊水流出率が減少した分だけ平水・低水・渇水各流出率は増加したのである。具体的に数値を述べれば、豊水流出率における約 3% の減少分が、平水流出率約 1.2%、低水流出率約 1.2%、渇水流出率約 0.5% の増加分にそれぞれ分配されたのである。

### 4.3 単年流況曲線とその変化

ここでは単年の流況曲線から、流況曲線の年々変動を対象に解析を行なう。

#### 4.3.1 単年流況流量の解析

観測期間の各年について、A 流域の流況流量を表-4.7 に、B 流域の流況流量を表-4.8 に示した。1996 年は台風による欠測のため、B 流域の 1999 年は水年の途中で伐採のために流況流量を算出できなかった。

まず初めに、A, B 両流域の単年流況曲線の対比図を図-4.23 に示す。図-4.23 は同じ水年の両流域の単年流況曲線について、(A 流域の N 日目流量, B 流域の N 日目流量) という座標を線グラフでつないだものである。図右上側に 1 日目側が、図左下側に 365 日目側がプロットされている。ただし図-4.23 はグラフ中央部分を強調するため、両軸ともに 0.01 ~ 10 の範囲で抜き出している。

さて図-4.23 から、伐採前後での変化を見てみよう。まず曲線の位置を見ると、伐採前期間の曲線に対して伐採後期間の曲線は上側に位置しており、伐採によって B 流域の流量が増加したこと

#### 4.3. 単年流況曲線とその変化

表 4.7: A 流域の流況 [mm/day]

	最大 Maximam	35 日目 35th day	豊水 Plentiful	平水 Ordinary	低水 Low	渇水 Scanty	最小 Minimam
1994	92.72	2.74	0.50	0.16	0.028	0	0
1995	101.25	3.37	0.72	0.086	0	0	0
1996	(欠測日あり)						
1997	59.40	1.89	0.38	0.11	0.027	0	0
1998	73.42	8.49	1.69	0.40	0.11	0	0
1999	125.03	2.49	0.46	0.089	0	0	0
2000	152.96	4.59	0.70	0.18	0.0031	0	0
2001	120.28	5.42	1.18	0.26	0.078	0	0
2002	59.63	4.27	0.88	0.21	0.051	0	0

表 4.8: B 流域の流況 [mm/day]

	最大 Maximam	35 日目 35th day	豊水 Plentiful	平水 Ordinary	低水 Low	渇水 Scanty	最小 Minimam
1994	73.81	2.37	0.69	0.31	0.077	0	0
1995	87.74	3.13	0.90	0.28	0.0030	0	0
1996	(欠測日あり)						
1997	49.92	2.17	0.57	0.23	0.094	0	0
1998	57.74	8.50	1.94	0.60	0.22	0.039	0.030
1999	(伐採年)						
2000	124.11	6.12	1.64	0.76	0.26	0.080	0.027
2001	98.40	7.07	2.17	0.69	0.37	0.070	0.024
2002	58.10	6.12	1.74	0.70	0.34	0.17	0.10

が示されている。次に各期間の曲線のバラツキに注目すると、流量の大きさによって異なる変化が見て取れる。まず  $Q_A > 0.7$  の区間では伐採前後ともに曲線のバラツキは少なく、それぞれ 1 本の曲線に近似できるような形になっている。また、 $Q_A < 0.2$  の区間では両期間ともに曲線群にバラツキがあり、差は見られない。しかし  $0.2 < Q_A < 0.7$  の区間では、伐採前期間の曲線群はバラツキが少ないのに対して、伐採後期間の曲線群はばらついていて、水年ごとに曲線の位置が異なっている。

すなわち、伐採によって、流況曲線の中央付近において流量の年々のバラツキが大きくなったのではないか、と思われるのである。

次に、A,B 両流域の流況流量を各流量ごとに対比した散布図を図-4.24 に示す。ただし渇水流量および最小流量は、A 流域の流量がすべて 0 であり、散布図を描くことに意味が無いので図示しなかった。

さて、まずは各流量の伐採前期間のデータを解析しよう。図-4.24 に示した各図において、伐採前期間の点はいずれも右上がりの直線状に分布していることがわかる。それぞれについて回帰直線を求めると以下の各式が得られる。

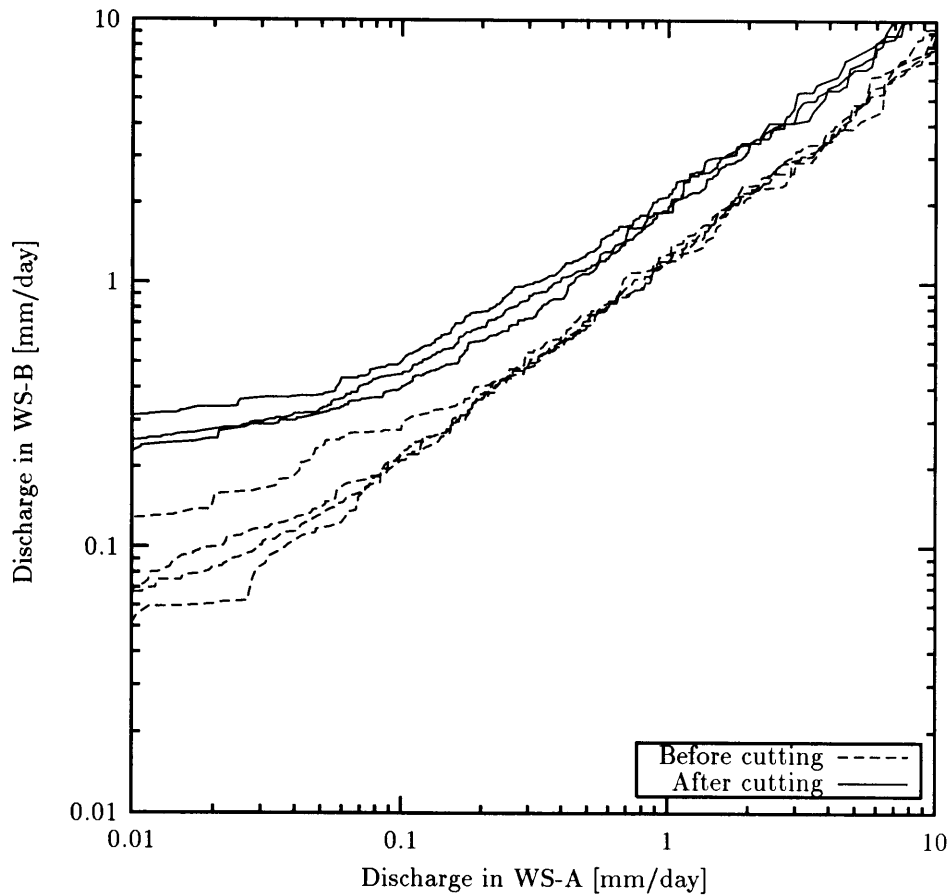


図 4.23: A,B 両流域の単年流況曲線対比図

$$\text{最大)} \quad Q_B = 0.8771Q_A - 4.36 \quad (p = 0.02; R^2 = 0.96) \quad (4.5)$$

$$35 \text{ 日)} \quad Q_B = 1.0042Q_A - 0.10 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.99) \quad (4.6)$$

$$\text{豊水)} \quad Q_B = 1.0499Q_A + 0.16 \quad (p < 0.01; R^2 > 0.99) \quad (4.7)$$

$$\text{平水)} \quad Q_B = 1.1348Q_A + 0.14 \quad (p = 0.02; R^2 = 0.96) \quad (4.8)$$

$$\text{低水)} \quad Q_B = 1.8572Q_A + 0.02 \quad (p = 0.02; R^2 = 0.96) \quad (4.9)$$

回帰の有意性、および決定係数はいずれも高く、点の分布の直線性が高いことがうかがえる。すなわち、伐採前期間においては、各流量ともに、年々変動が A,B 両流域で高度に一致していたと言える。

各図において回帰直線と 1:1 ラインとの位置関係を見ると、(a) 最大流量では回帰直線は 1:1 ラインの下側にあり、(b) 35 日目流量では回帰直線と 1:1 ラインはほぼ一致しており、(c) 豊水・(d) 平水・(e) 低水流量では回帰直線は 1:1 ラインの上側に位置している。各流量の位置関係の違いは A,B 両流域の流出特性の差に原因が求められるだろう。すなわち、高水側では A 流域の方が、低水側では B 流域の方が流量が大きいという流出特性が存在するために、高水側と低水側で回帰直

#### 4.3. 単年流況曲線とその変化

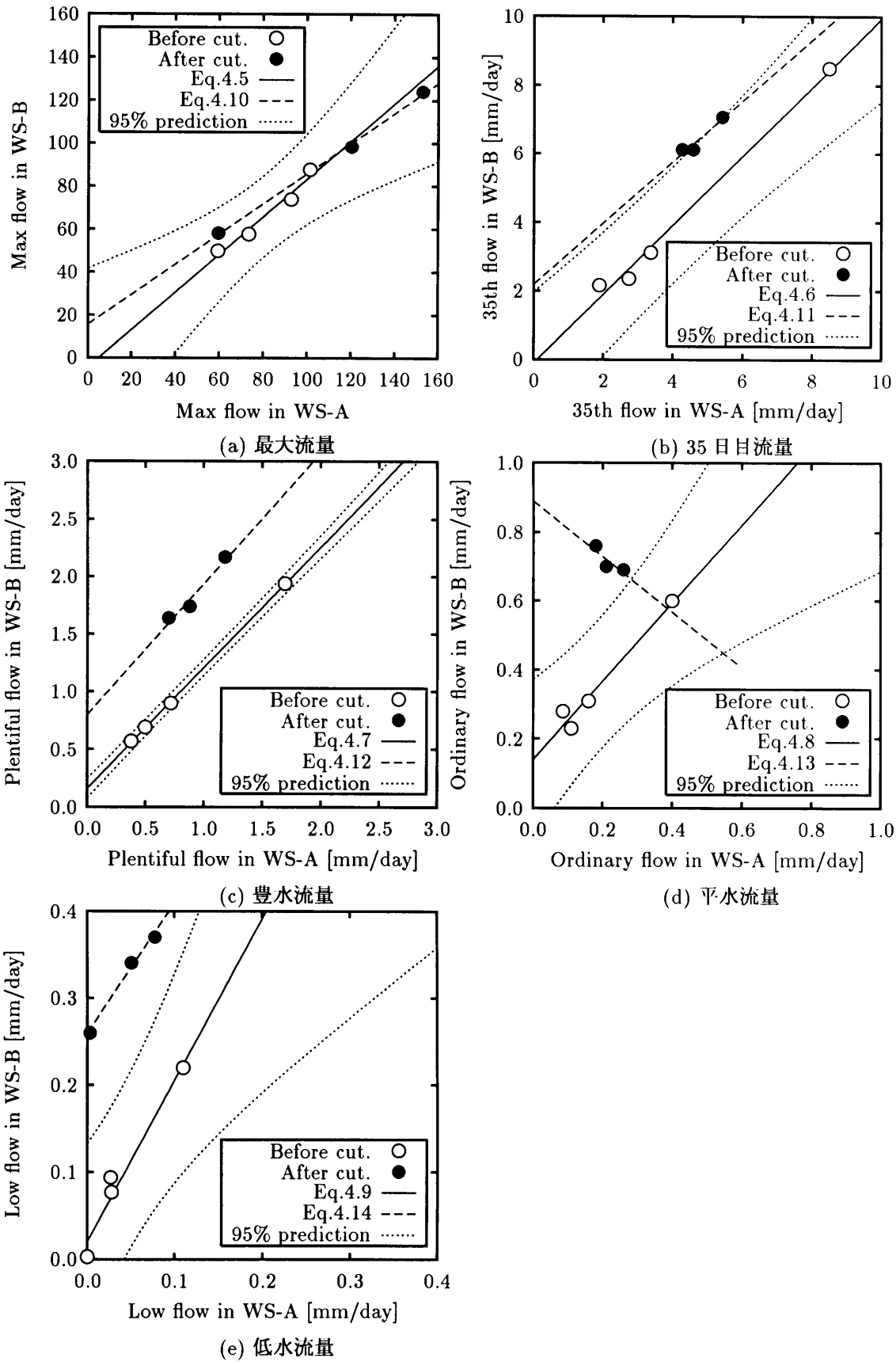


図 4.24: A,B 流域の単年流況流量の対比図

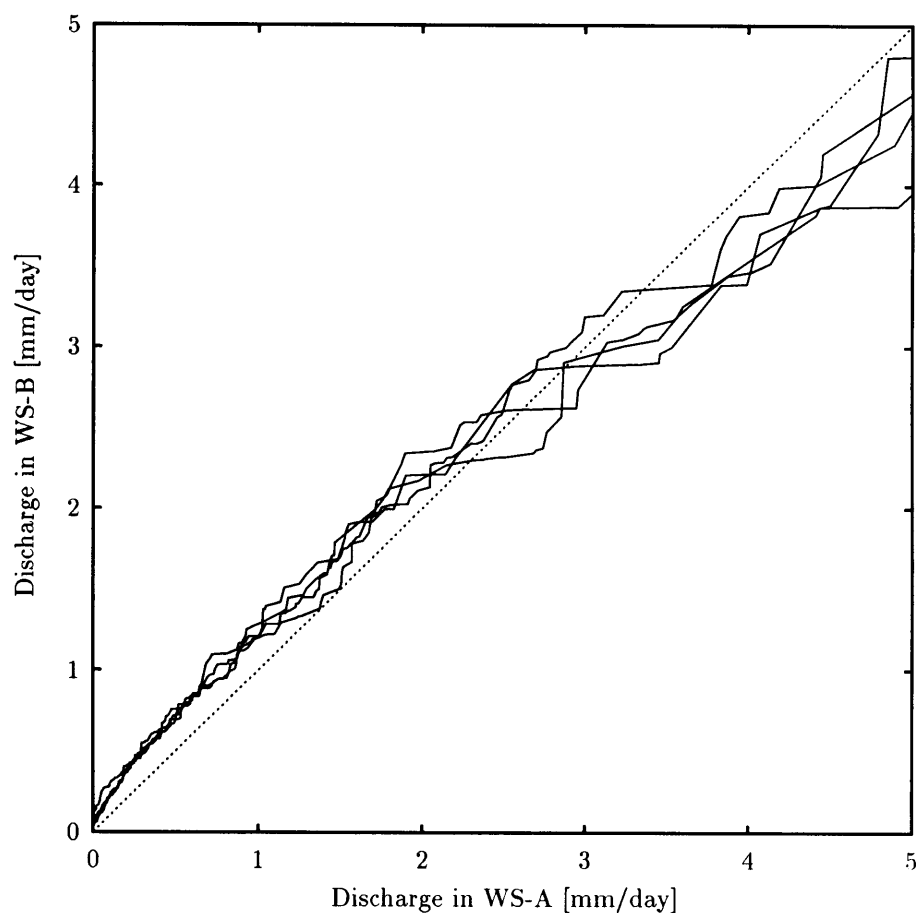


図 4.25: 伐採前期間における A,B 両流域の単年流況曲線対比図

線と 1:1 ラインの位置関係が異なるものと考えられる。

次に回帰係数を見てみよう。(4.5)～(4.9) 式回帰係数を見ると、最大から低水にかけて回帰係数が順々に大きくなっていることがわかる。また最大流量は回帰係数が 1 以下であるが、35 日目～低水流量は 1 以上である。最大～平水流量の回帰係数は互いに比較的近い値を取っているが、低水流量は他流量と比べて比較的離れた値であることも指摘できる。

各流量で回帰係数がこのように異なるのは、A,B 両流域の流況曲線の形状に原因がある。図-4.23 における伐採前期間の曲線群を、両軸を通常軸にして表示すると図-4.25 が得られる。図-4.25 から、曲線群の傾きは高水側から低水側にかけて連続的に急になっていくことがわかる。このような曲線形が原因となって各流量の回帰係数の違いが生じているものと思われる。

では次に、伐採後期間の点の分布について見てみる。

まずは伐採前後で点の分布位置が異なるかどうかを調べる。図-4.24 において点線で示されているのは、伐採前期間の直線回帰から導かれた予測値の 95 % 信頼区間である。換言すれば、仮に伐採が行われなかった場合、新たな観測値の 95 % がこの中に含まれるであろうと期待される区間である。伐採後期間の点と 95 % 信頼区間の位置関係によって、伐採前後で点の分布が有意に異なるかどうか判断できる。

さて (a) 最大流量では、伐採後期間の点は伐採前期間の回帰直線にほとんど重なっており、伐採

による変化が認められなかった。

これに対して (b)35 日目・(c) 豊水・(d) 平水・(e) 低水流量では、伐採後期間の点はいずれも伐採前期間の回帰直線の上側に位置しており、各流量ともに伐採によって流量が増加したことがわかる。また 95 % 信頼区間との位置関係を見ると、(b)35 日目流量では伐採後期間の点は信頼区間の上限ラインに重なるように分布しており、伐採前期間に比べて値が有意に増加したと言える年と言えない年が両方ある。一方 (c) 豊水・(d) 平水・(e) 低水流量では伐採後期間の点はすべて信頼区間の上限ラインから更に上側に位置しており、すべての年で流量が伐採前期間よりも有意に増加したと言える。

次に回帰直線の変化を調べる。図-4.24 からわかる通り、各流量において伐採後期間の点は直線状に分布している。(a) 最大・(b)35 日目・(c) 豊水・(e) 低水流量では点の分布は右上がりであるが、(d) 平水流量だけは他と異なり右下がりになっている。それぞれ回帰直線を求めると以下の各式が得られる。

$$\text{最大)} \quad Q_B = 0.7019Q_A + 15.66 \quad (p = 0.03; R^2 > 0.99) \quad (4.10)$$

$$35 \text{ 日)} \quad Q_B = 0.8899Q_A + 2.20 \quad (p = 0.17; R^2 = 0.93) \quad (4.11)$$

$$\text{豊水)} \quad Q_B = 1.1378Q_A + 0.80 \quad (p = 0.13; R^2 = 0.96) \quad (4.12)$$

$$\text{平水)} \quad Q_B = -0.8061Q_A + 0.89 \quad (p = 0.34; R^2 = 0.74) \quad (4.13)$$

$$\text{低水)} \quad Q_B = 1.4920Q_A + 0.26 \quad (p = 0.06; R^2 = 0.99) \quad (4.14)$$

回帰の結果を見ると、決定係数は高いものの、回帰の有意性は良くないものが多い。サンプル数が 3 水年と少ないことに加え、点の分布にバラツキが少なく 1ヶ所に集中していることが原因であろう。

続いて回帰係数を見てみる。(4.10)～(4.14) 各式において、回帰係数は最大・35 日目・豊水・低水の順に次第に大きくなっている。高水側から低水側にかけて回帰係数が順に大きくなる傾向は伐採前期間と同様である。しかし平水流量はその傾向から外れ、特異な値を示している。他流量では回帰係数の符号がプラスであるのに、平水流量は符号がマイナスである。これは図-4.24 において平水流量だけ点の分布が右下がりになっていることに対応している。

さて、平水流量の回帰係数が他流量に比べて特異な値を取るのは偶然であるのかそうでないのか。その点を確認する為に、流況曲線全体に対して流量の回帰係数を取ることを考える。つまり、豊水やら平水やらの流況曲線上特定の流量ではなく、1 日目から 365 日目までの各流量に対して、それぞれ A 流域と B 流域の回帰直線を求めるのである。

結果を図-4.26 に示す。可読性のため、図-4.26 は縦軸の範囲を -1 ～ 2 に限っている。図右端側では伐採前後両期間ともに回帰係数が 2 以上になる部分があるが、その部分は図中には現れていない。図-4.26 から、まず伐採前期間の曲線を見ると、図左端・1 日目から図右側へ日数が進むにつれて、ゆるやかに回帰係数が増加して行く傾向があることがわかる。図右端側では曲線が消えるが、これは回帰係数が縦軸の範囲を超える区間、および各流域において流量が 0 となり回帰係数が計算できなくなる区間が存在するためである。

伐採前期間のゆるやかな形状に対して、伐採後期間の曲線はおおきく湾曲した形状を示している。図左側、1 日目～120 日目付近では、伐採後期間の曲線は伐採前期間のものと重なっており、両曲線に違いは認められない。しかし 120 日目～280 日目の区間では、伐採後期間の曲線は伐採前期間から大きく離れて下側に位置している。特に 150 日目～230 日目の区間では伐採後期間の回帰係数は負値を示していることが注目される。280 日目以降では伐採後期間の曲線は図から消える



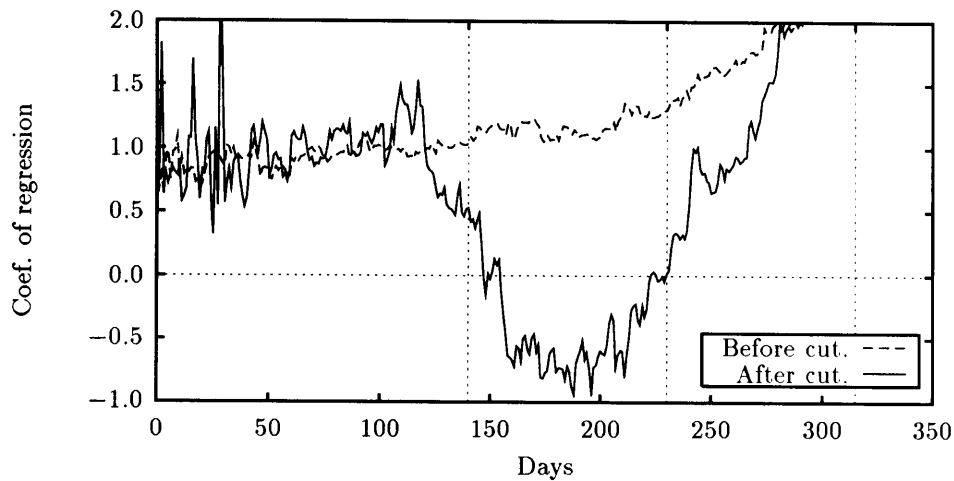


図 4.26: 伐採前後の回帰係数

が、これは伐採前期間と同様、A 流域の流量が 0 となり回帰係数が計算できなくなるためである。

さて図-4.26 から、伐採後期間の回帰係数には、平水流量（185 日目流量）を中心とした 80 日程度の区間において、値がマイナスになるということが明らかとなった。(4.10)～(4.14) 式において平水流量のみ回帰係数がマイナスになることは単なる偶然ではなく、伐採によって発生した有意味の現象であると考えられる。

高水側から低水側にかけての回帰係数の動きを具体的にグラフ化してみよう。図-4.27 に示したのは、35 日目流量から 15 日間隔で、流量とその回帰直線を図化したものである。まず (a) 伐採前期間を見ると、各回帰直線はお互いに重なり合って、全体としてあたかも 1 本の直線のような形状を示している。グラフ全体にわたって回帰直線の傾きにはあまり変化が見られない。一方 (b) 伐採後期間は、図右上・高水側では回帰直線は右上がりとなっているが、日数が下って図中央では逆に右下がりの傾きとなる。その後さらに日数が下ると再び右上がりに戻る、という動きが認められる。

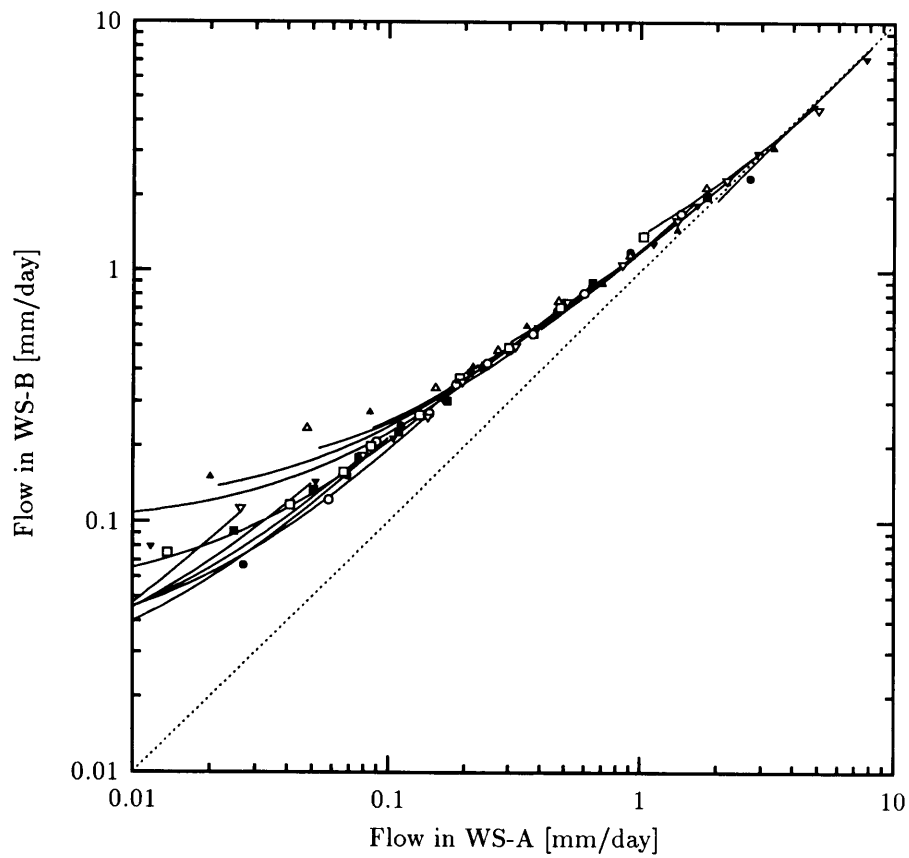
図-4.27(b) において回帰直線が右下がりになっている区間は、図-4.23 において伐採後期間の曲線群にバラツキが認められた区間と重なっていることが指摘できる。B 流域における森林伐採は、流況曲線のこの部分において、他の部分とは異なる変化をもたらしたと言えるだろう。

### 4.3.2 Low-flow Days

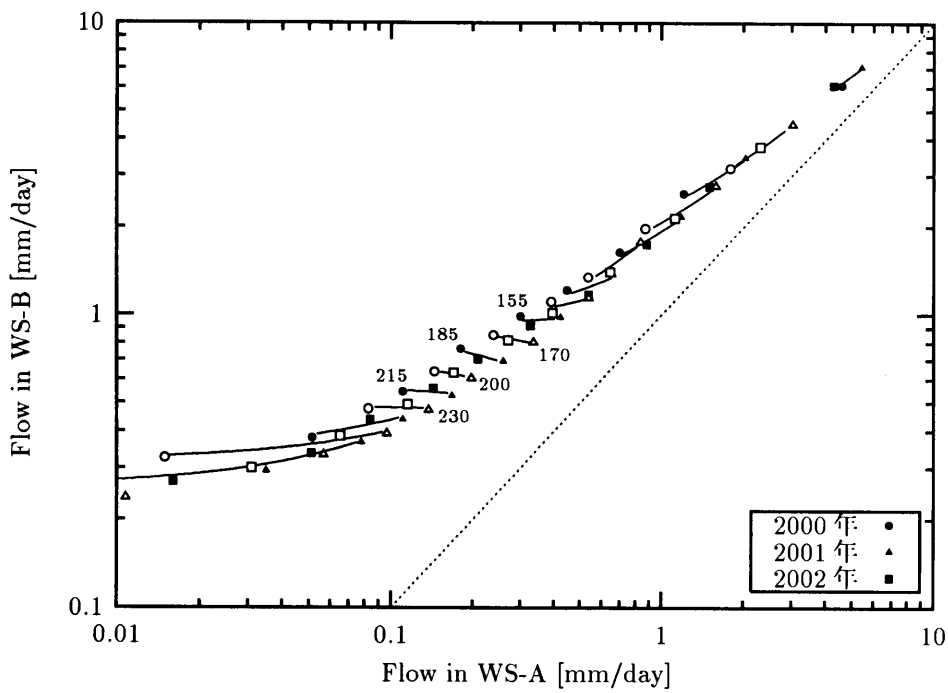
各閾値ごとの low-flow days を表-4.9 にまとめた。1996 年は台風による欠測のため、1999 年の B 流域は水年途中に伐採が行なわれたため、low-flow days の集計は行なわなかった。

表-4.9 には閾値 0.3, 0.5 mm/day の low-flow days も掲げてあるが、予備解析の結果、両閾値は閾値 0.2 mm/day の low-flow days とよく似た振る舞いをする事が明らかとなった。そこで以下の解析では閾値 0.3, 0.5 mm/day を閾値 0.2 mm/day で代表させることとし、0, 0.1, 0.2 mm/day を解析対象とした。

#### 4.3. 単年流況曲線とその変化



(a) 伐採前期間



(b) 伐採後期間

図 4.27: 15 日間隔の回帰直線

#### 4.3. 単年流況曲線とその変化

表 4.9: 袋山沢流域の low-flow days

	A 流域					B 流域				
	0	< 0.1	< 0.2	< 0.3	< 0.5	0	< 0.1	< 0.2	< 0.3	< 0.5
1994	69	142	200	239	270	42	97	133	171	244
1995	132	182	206	231	255	77	132	159	183	228
1996	(欠測日あり)									
1997	53	174	226	254	285	34	93	165	207	255
1998	14	86	136	162	192	0	39	83	116	164
1999	128	187	219	245	275	(伐採年)				
2000	82	114	185	211	250	0	25	69	99	144
2001	38	110	166	188	220	0	18	41	63	145
2002	27	125	177	202	236	0	0	17	76	137

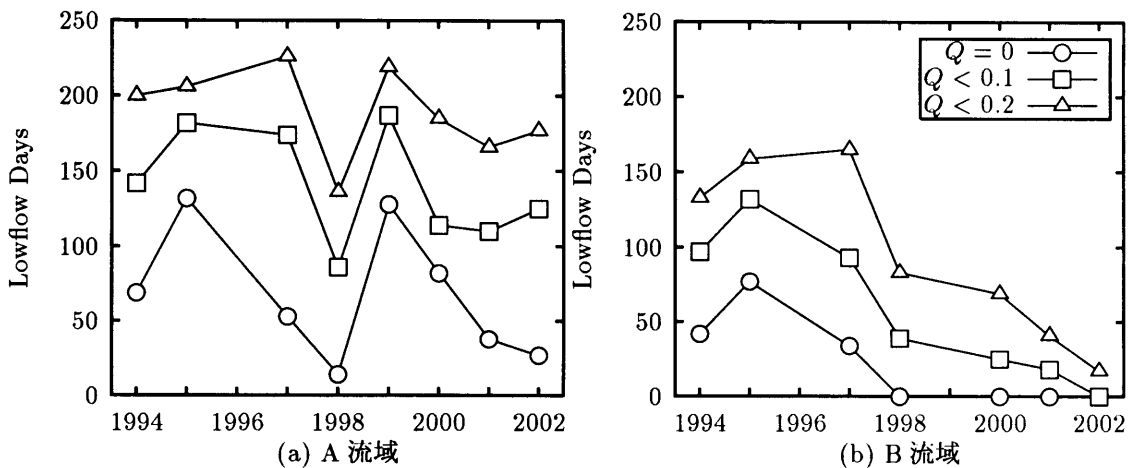


図 4.28: Lowflow days の時系列変化

##### 4.3.2.1 A, B 各流域の年々変動

まず、基準流域である A 流域の年々変動について調べる。図-4.28(a) に、A 流域の low-flow days を各閾値ごとに時系列で図示した。図-4.28(a) を見ると、各閾値の年々変動はおおまかには互いに似ていることがわかる。

A 流域の low-flow days について、各閾値相互の年々変動の相関係数を求めると、表-4.10 が得られる。表-4.10 において、相関係数が 0.8 を超える組合せは太字で強調した。

表 4.10: A 流域における各閾値間の相関係数

	0	< 0.1	< 0.2
0	$x$	0.78	0.69
< 0.1		$x$	<b>0.93</b>
< 0.2			$x$

表 4.11: B 流域における各閾値間の相関係数

伐採前期間				伐採後期間		
	0	< 0.1	< 0.2	0	< 0.1	< 0.2
0	<i>x</i>	<b>0.99</b>	0.79	<i>x</i>	(NA)	(NA)
< 0.1		<i>x</i>	<b>0.87</b>		<i>x</i>	<b>0.96</b>
< 0.2			<i>x</i>			<i>x</i>

さて表-4.10を見ると、閾値 0.1 と 0.2 の組合せで相関係数が 0.93 という高い値を示しているが、閾値 0 と 0.1, 0.2 の組合せではともに 0.8 以下という比較的低い値になっている。このことから、low-flow days の年々変動は、閾値 0.1 と 0.2 はよく似ているが、0 と 0.1 あるいは 0 と 0.2 は比較的似ていないとすることができる。しかし比較的低いとは言ってもすべての組合せでほぼ 0.7 以上の相関係数があることを考えると、各閾値の low-flow days の年々変動はおおまかには互いに似ていると言っていいただろう。

続いて B 流域の low-flow days について、各閾値ごとに時系列で表示したものを図-4.28(b) に示す。A 流域同様、B 流域においても各閾値の low-flow days の年々変動は互いに似ていることが図-4.28(b) からわかる。

伐採前後で期間を分けて、各閾値相互の相関係数を求めると表-4.11 が得られる。表中 "(NA)" と表記されている部分は、閾値 0 mm/day の low-flow days がすべての年で 0 日であったために相関係数が計算できなかったことを意味している。また相関係数が 0.8 以上の組合せは太字で強調した。

さて表-4.11 において、まず伐採前期間を見ると、すべての組合せで相関係数は約 0.8 以上の値を示しており、各閾値における low-flow days の年々変動は互いに類似的事であることが示されている。特に閾値 0 と 0.1 の組合せでは相関係数は 0.99 と非常に高い値となっている。A 流域において相関係数が最大となったのは閾値 0.1 と 0.2 の組合せであったが、伐採前期間の B 流域においては閾値 0 と 0.1 の組合せであった。

一方伐採後期間を見ると、閾値 0 を含む組合せは相関係数が計算できなかったため、閾値 0.1 と 0.2 の組合せしか相関係数が得られなかった。さてその相関係数であるが、0.96 と非常に高い値が得られた。各閾値における low-flow days の年々変動の類似性は、伐採が行なわれた後でも維持されたことが示されている。

#### 4.3.2.2 対照流域法による解析

A, B 両流域の low-flow days を対比したグラフを図-4.29 に示す。

図-4.29 から、まず伐採前期間のプロットを見ると、点はすべて 1:1 ラインの下側に位置していることがわかる。すなわち、A, B 両流域の low-flow days を比較すると、B 流域の日は A 流域よりも少ない。このことは A, B 両流域の流出特性の差によるものと思われる。先述の通り、低水側では B 流域の方が流量が大きいため、ある流量を下回る日数は B 流域の方が少なくなるのである。A, B 流域の日数の差、すなわち各点と 1:1 ラインとの差を見ると、原点付近では差が小さく、原点から離れるにつれて次第に差が大きくなるが、横軸 150 付近以降は差が一定となる傾向が見られる。横軸 150 以上の区間では、両流域の日数の差は約 60 日である。

さて伐採前期間の点の分布形を見ると、A, B 両流域の low-flow days は直線的関係にあることが

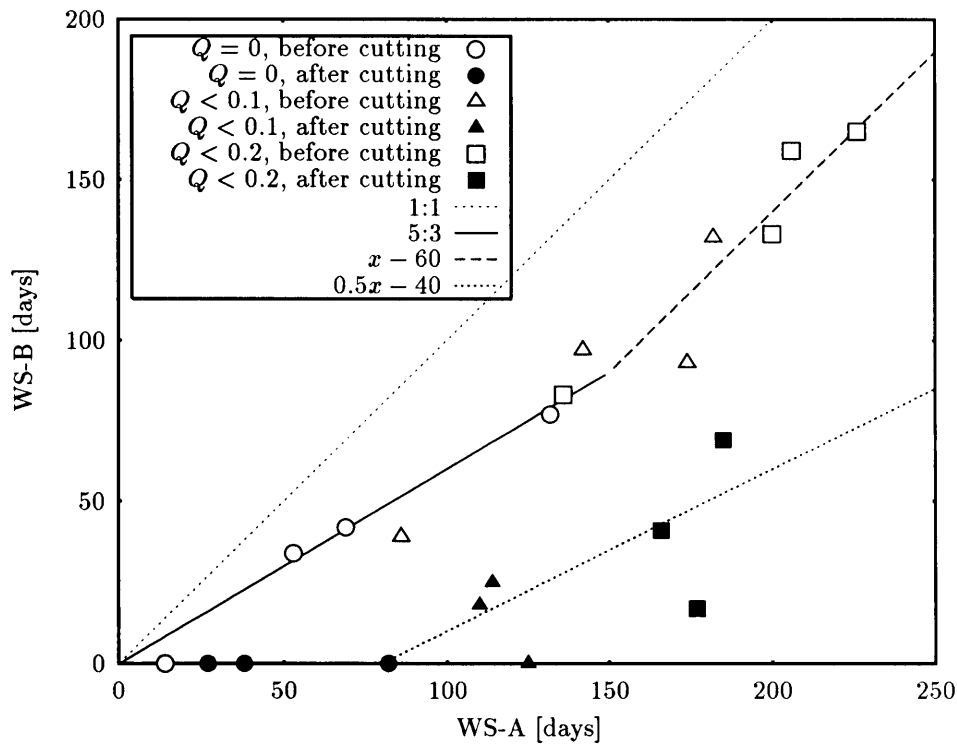


図 4.29: A,B 両流域における low-flow days の対比図

わかる。直線の傾きは横軸 150 付近で変化するように見えるため、図-4.29 では 2 本の直線で近似線を表現した。横軸 150 以下の区間では、B 流域の low-flow days は A 流域のそれに対してほぼ比例している。図-4.29 に引いた直線は  $y = 0.6x$ 、すなわち A 対 B が 5:3 となる直線である。該当区間にある各点がこの近似線付近に集中していることが図から読み取れるであろう。一方横軸 150 以上の区間では、点の分布の傾きは急になる傾向を見せている。図-4.29 に引いた直線は  $y = x - 60$ 、すなわち傾き 1 の直線である。図-4.29 から、この直線が該当区間の点の分布をよく近似していることがわかる。

これに対して伐採後期間の点の分布は、伐採前期間の点よりも下側に分布している。すなわち、伐採によって B 流域の low-flow days が減少したことが示されている。伐採によって低水側の流量が増加したために、一定流量を下回る日数が減少したのである。

伐採後期間の点の位置を詳しく見ると、閾値 0 の点は横軸上に完全に乗っていることがわかる。これは伐採後期間の B 流域において、流出が停止した日が一日もなかったことを意味している。伐採前期間では閾値 0 の low-flow days すなわち流量が停止する日数は両流域間で比例関係が見られたが、伐採後期間には、A 流域の流出停止日数にかかわらず、B 流域の流出が停止しなくなったのである。

閾値 0.1, 0.2 の点は、全体的に見れば右上がりの分布形を示しているが、分布の直線性は低い。図-4.29 には  $y = 0.5x - 40$  を近似線として引いてあるが、見ての通り、点の分布は近似線に対してバラツキが大きい。伐採前期間は全体的にも各閾値ごとに見ても点の分布に直線性が認められた。しかし伐採後期間は、全体的には右上がりの傾向があるように見えるが、各閾値ごとに見ると点の分布に右上がりの直線性が認められない。すなわち伐採によって A,B 両流域間の low-flow days は

表 4.12: 豊水・平水・低水・渇水各流出量

年	A 流域				B 流域			
	豊水	平水	低水	渇水	豊水	平水	低水	渇水
1994	683.24	14.81	2.98	0.00	616.24	28.41	7.57	0.01
1995	781.86	10.01	0.00	0.00	696.87	25.84	1.86	0.00
1996	(欠測日あり)							
1997	491.38	10.69	2.50	0.00	451.30	21.61	8.38	0.30
1998	985.98	39.41	9.75	0.54	897.48	57.65	19.78	3.54
1999	796.12	8.56	0.01	0.00	(伐採年)			
2000	748.88	17.85	1.50	0.00	899.51	67.79	24.00	5.01
2001	930.38	25.42	6.54	0.10	1103.49	65.06	31.22	6.36
2002	869.93	20.48	4.57	0.10	1041.67	65.43	30.04	10.18

年ごとのバラツキが大きくなり、相関性が弱くなった、と言える。相関が弱まった原因は A,B 両流域の土壌水分条件の差が年によって大きくバラツクようになったためであると考えられる。すなわち、伐採前は両流域の植生が同じであったため、降雨が同じであれば土壌水分条件もほぼ等しかったと思われるが、伐採後は植生が異なり、降雨が同じであっても降雨パターンによって土壌水分条件が両流域で大きく異なったりあまり差が生じなかったりする現象が生じたのではないかと推察される。

### 4.3.3 単年流況流出量

A,B 各流域の単年流況流出量を表-4.12 に示す。1996 年は台風による欠測日があるため、1999 年の B 流域は水年途中に伐採が行なわれたため、流況流出量の集計は行なわなかった。

図-4.30 に、A,B 流域の流況流出量を各流出量ごとに対比した散布図を示す。図-4.30 から、まず伐採前期間の点の分布を見ると、いずれも右上がりの直線状に分布していることがわかる。各流出量それぞれについて回帰直線を求めると以下の各式が得られる。

$$\text{豊水)} \quad Q_B = 0.8995Q_A + 3.81 \quad (p < 0.01; R^2 > 0.99) \quad (4.15)$$

$$\text{平水)} \quad Q_B = 1.1680Q_A + 11.50 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.98) \quad (4.16)$$

$$\text{低水)} \quad Q_B = 1.7860Q_A + 2.60 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.99) \quad (4.17)$$

$$\text{渇水)} \quad Q_B = 6.3642Q_A + 0.10 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.99) \quad (4.18)$$

(4.15)～(4.18) 式の各式において、回帰の有意性、および決定係数はいずれも高い値を示している。すなわち、伐採前期間においては各流出量はいずれも年々変動が A,B 両流域で高度に類似的であったと言える。

図-4.30 の各図において、伐採前期間の点の分布と 1:1 ラインの位置関係を見ると、(a) 図・豊水流出量では点の分布は 1:1 ラインの下側に位置しているが、(b) 図・平水、(c) 図・低水、(d) 図・渇水流出量では逆に点の分布は 1:1 ラインの上側に位置している。各流出量の位置関係の違いは、高水側では A 流域の方が流量が大きく、低水側では逆に B 流域の方が大きい、という袋山沢流域の流出特性の影響であろう。

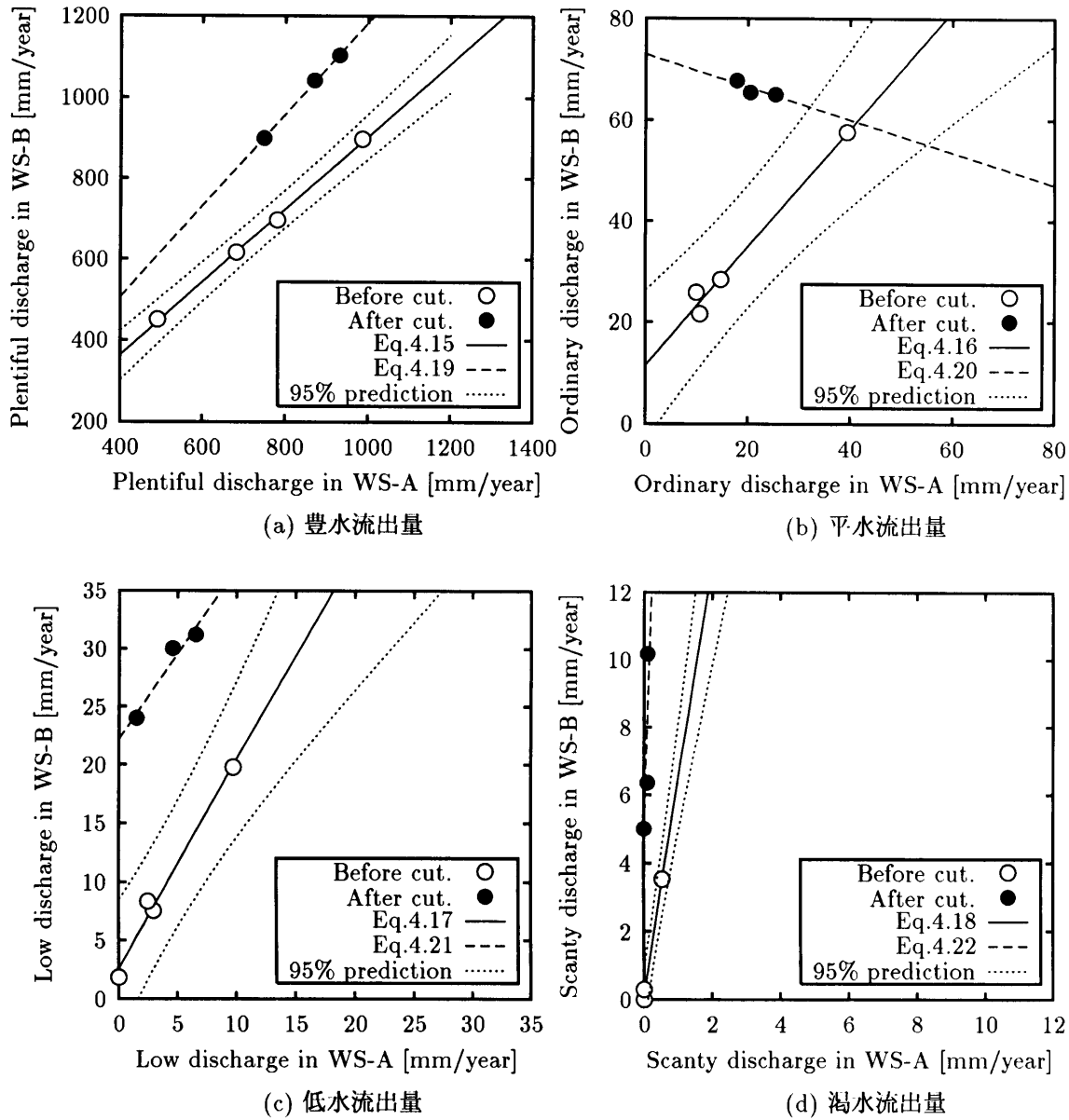


図 4.30: A,B 流域の単年流況流出量対比図

続いて回帰直線の傾きを見てみよう。(4.15)～(4.18)各式の回帰係数は、豊水から渇水にかけて順々に大きくなっていくことがわかる。値の大きさとしては、豊水流出量は回帰係数が1以下であるのに対して、平水～渇水流出量は回帰係数が1以上であることを指摘できる。

さて次に、伐採後期間の点の分布について見る。

まずは伐採前後で点の分布が有意に異なるかどうか調べよう。図-4.30において点線で示されているのは、伐採前期間の回帰直線から得られた予測値の95%信頼区間である。すなわち、仮に伐採が行なわれず植生状態が維持された場合に、新たな観測値が95%の確率でこの領域内に含まれるであろうと期待される区間である。新たな観測値がこの区間の外側に位置すれば、その観測値は5%水準で有意に分布が異なると言える。

さて図-4.30の各図を見ると、各流出量いずれにおいても、伐採後期間の点のすべてが95%信頼区間の上側に外れている。すなわち伐採によって各流出量は5%水準で有意に増加したと言える。

次に回帰直線の変化を見る。図-4.30からわかるように、各流出量において伐採後期間の点は直線状に分布している。しかし、(a)豊水・(c)低水・(d)渇水流出量では点の分布は伐採前期間と同様に右上がりであるのに対して、(b)平水流出量では伐採前期間とは逆に右下がりの分布になっている。それぞれ回帰直線を求めると以下の各式が得られる。

$$\text{豊水)} \quad Q_B = 1.1311Q_A + 53.77 \quad (p = 0.02; R^2 > 0.99) \quad (4.19)$$

$$\text{平水)} \quad Q_B = -0.3238Q_A + 72.98 \quad (p = 0.36; R^2 = 0.71) \quad (4.20)$$

$$\text{低水)} \quad Q_B = 1.4792Q_A + 22.20 \quad (p = 0.16; R^2 = 0.94) \quad (4.21)$$

$$\text{渇水)} \quad Q_B = 32.6000Q_A + 5.01 \quad (p = 0.50; R^2 = 0.49) \quad (4.22)$$

回帰の結果を見ると、(4.19)式・豊水流出量は回帰の有意性、決定係数ともに高い値を示しているが、他の式はさほど高くない値である。この原因として、伐採後期間の点の分布が集中的であることが指摘できるだろう。特に(d)渇水流出量ではA流域の流出量の範囲が0～0.10 mm/yearという狭さであるため、点の分布が垂直的になっており、回帰直線は有効な回帰になっていない。

さて回帰直線の傾きに注目すると、豊水・低水・渇水流出量では回帰直線は正であるが、平水流出量では負値である。また伐採前後で傾きの変化を比較すると、豊水・渇水流出量では伐採後期間の方が傾きが大きい、平水・低水流出量では伐採後期間の方が小さい値となっている。この現象は、図-4.26に示した回帰係数曲線に原因がある。図-4.26には流況流出量の集計区間の区切りを垂直の点線で示しておいた。各区分ごとに回帰係数曲線を吟味すると、豊水流出量の区分(1～140日目)では伐採後期間の曲線の方が伐採前期間よりも上側に位置する傾向が見られる。平水流出量の区分(141～230日目)では、伐採前期間の曲線が縦軸正値側にあるのに対して伐採後期間は負値側に位置している。低水流出量の区分(231～315日目)の区分では、両期間ともに曲線は正値側にあるものの、伐採前期間に比べて伐採後期間の方が位置が下側である。流況流出量は流況曲線の区分積分であるから、(4.19)～(4.22)各式の回帰係数は図-4.26に示した回帰係数曲線の区分平均に近い値となるのは当然である。

さて続いて、各流出量の伐採による増加量の年々変動について解析を行なう。

図-4.30の各図において、伐採後期間の各点と伐採前期間の回帰直線の差を取ると、伐採による流出量の増加量が算出できる。表-4.13に示したのは、A流域の各流出量と伐採前期間の回帰直線から算出した、仮に伐採が行なわれなかった場合にB流域の流出量が取ったであろう「推定値」と、実際に観測された流出量と伐採しなかった場合の推定値との差である「増加量」である。

各増加量の時系列変化を図-4.31に示す。参考のために年流出量の増加量の時系列変化を最上段



#### 4.3. 単年流況曲線とその変化

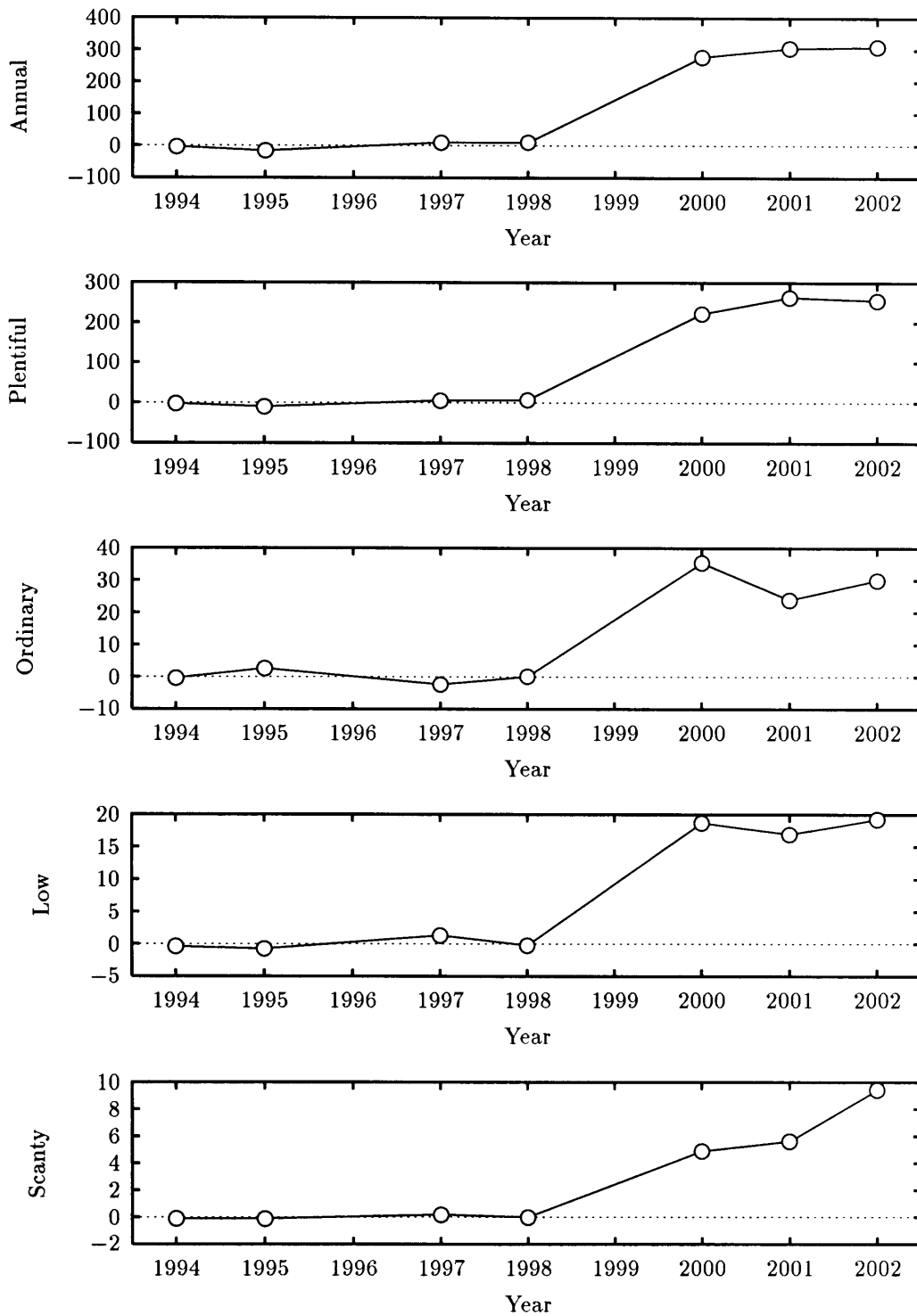


図 4.31: 各流出量の増加量の時系列変化 [mm/year]

表 4.13: 各流出量の伐採後期間の推定値と増加量

年	推定値				増加量			
	豊水	平水	低水	渇水	豊水	平水	低水	渇水
2000	677.43	32.35	5.28	0.10	222.08	35.44	18.72	4.91
2001	840.69	41.19	14.28	0.74	262.80	23.87	16.94	5.62
2002	786.31	35.42	10.76	0.74	255.36	30.01	19.28	9.44

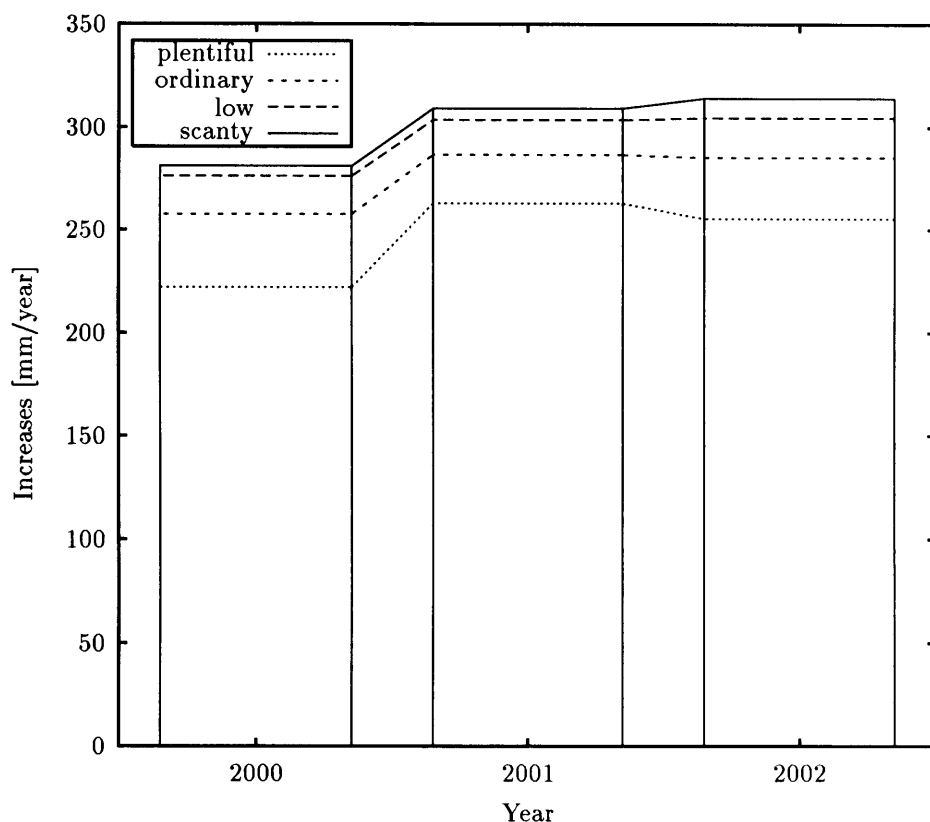


図 4.32: 各増加量の水年ごとの積算

に併記した。なおグラフには伐採前期間のデータもプロットされているが、これは伐採前期間の直線回帰の回帰残差を表示したものである。

さて図-4.31 から、各流出量の増加量の年々変動を見ると、各流出量で変動の様子が異なっていることがわかる。たとえば豊水流出量では増加量の最大値が現れたのは 2001 年であったが、平水・低水流出量では 2000 年が最大であり、また渇水流出量では 2002 年が最大であった。

水年ごとに各増加量を積算すると図-4.32 が得られる。図-4.32 から、水年の総増加量の大半は豊水流出量の増加によって占められていることがわかる。豊水流出量の増加量と水年増加量の変動に高い正の相関が見られたのはこのためである。しかし水年増加量の変動のすべてを豊水流出量増加量の変動で説明できる訳ではない。水年増加量は 2001 年よりも 2002 年の方が量が大きい、豊水流出量増加量は逆に 2002 年の方が小さい。豊水流出量増加量の減少分以上に平水・渇水流出量増加量が増大したために総計としての水年増加量が大きくなったのである。

表 4.14: 豊水・平水・低水・渇水各流出率 [%]

年	A 流域				B 流域			
	豊水	平水	低水	渇水	豊水	平水	低水	渇水
1994	97.46	2.11	0.43	0.00	94.48	4.36	1.16	0.00
1995	98.74	1.26	0.00	0.00	96.18	3.57	0.26	0.00
1996	(欠測日あり)							
1997	97.39	2.12	0.50	0.00	93.71	4.49	1.74	0.06
1998	95.20	3.81	0.94	0.05	91.72	5.89	2.02	0.36
1999	98.93	1.07	0.00	0.00	(伐採年)			
2000	97.48	2.32	0.20	0.00	90.28	6.80	2.41	0.50
2001	96.67	2.64	0.68	0.01	91.49	5.39	2.59	0.53
2002	97.19	2.29	0.51	0.01	90.79	5.70	2.62	0.89

#### 4.3.4 単年流況流出率

ここでは単年の流況流出率について解析を行なう。各流出率の水年ごとのデータを表-4.14 に示した。

A,B 流域の流況流出率を各流出率ごとに対比した散布図を図-4.33 に示す。図-4.33 の各図から、まず伐採前期間の点の分布形を見ると、各流出率はいずれも右上がりの直線状であることがわかる。各流出率それぞれについて回帰直線を求めると以下の各式が得られる。

$$\text{豊水)} \quad Q_B = 1.2335Q_A - 25.87 \quad (p = 0.02; R^2 = 0.96) \quad (4.23)$$

$$\text{平水)} \quad Q_B = 0.9005Q_A + 2.48 \quad (p < 0.01; R^2 > 0.99) \quad (4.24)$$

$$\text{低水)} \quad Q_B = 1.9041Q_A + 0.40 \quad (p = 0.06; R^2 = 0.89) \quad (4.25)$$

$$\text{渇水)} \quad Q_B = 6.8000Q_A + 0.02 \quad (p = 0.01; R^2 = 0.97) \quad (4.26)$$

(4.23)~(4.26) 式の各式を見ると、各流出率はいずれも回帰の有意性、および決定係数が高く、各式の回帰直線の有効性が高いことがわかる。

図-4.33 の各図において、伐採前期間の点の分布と 1:1 ラインの位置関係を見ると、(a) 豊水流出率では各点は 1:1 ラインの下側に位置しているが、(b) 平水・(c) 低水・(d) 渇水流出率では逆に各点は 1:1 ラインの上側に位置している。各流出率の位置関係の差異は、高水側では A 流域の流量が大きく、低水側では B 流域の方が大きい、という袋山沢流域の流出特性の影響である。

次に伐採後期間について見てみる。

まず点の分布が伐採前後でどの方向に変化したのか調べよう。図-4.33 を見ると、(a) 豊水流出率では伐採後期間の点は伐採前期間の回帰直線に比べて下側にあり、伐採によって B 流域の豊水流出率が低下したことがわかる。一方 (b) 平水・(c) 低水・(d) 渇水流出率は伐採後期間の点は伐採前期間の回帰直線の上側に分布しており、伐採によって各流出率が大きくなったことが示されている。

次に伐採による各流出率の増加あるいは減少が有意な変化であるかどうかを調べる。図-4.33 の各図において点線で示されているのは、伐採前期間の回帰直線から得られた予測値の 95%信頼区間である。言い換えると、仮に伐採が行なわれなかった場合に新たな観測値の 95%が含まれることが予測される区間である。つまり新たな観測値がこの区間外に位置するならば、その観測値は

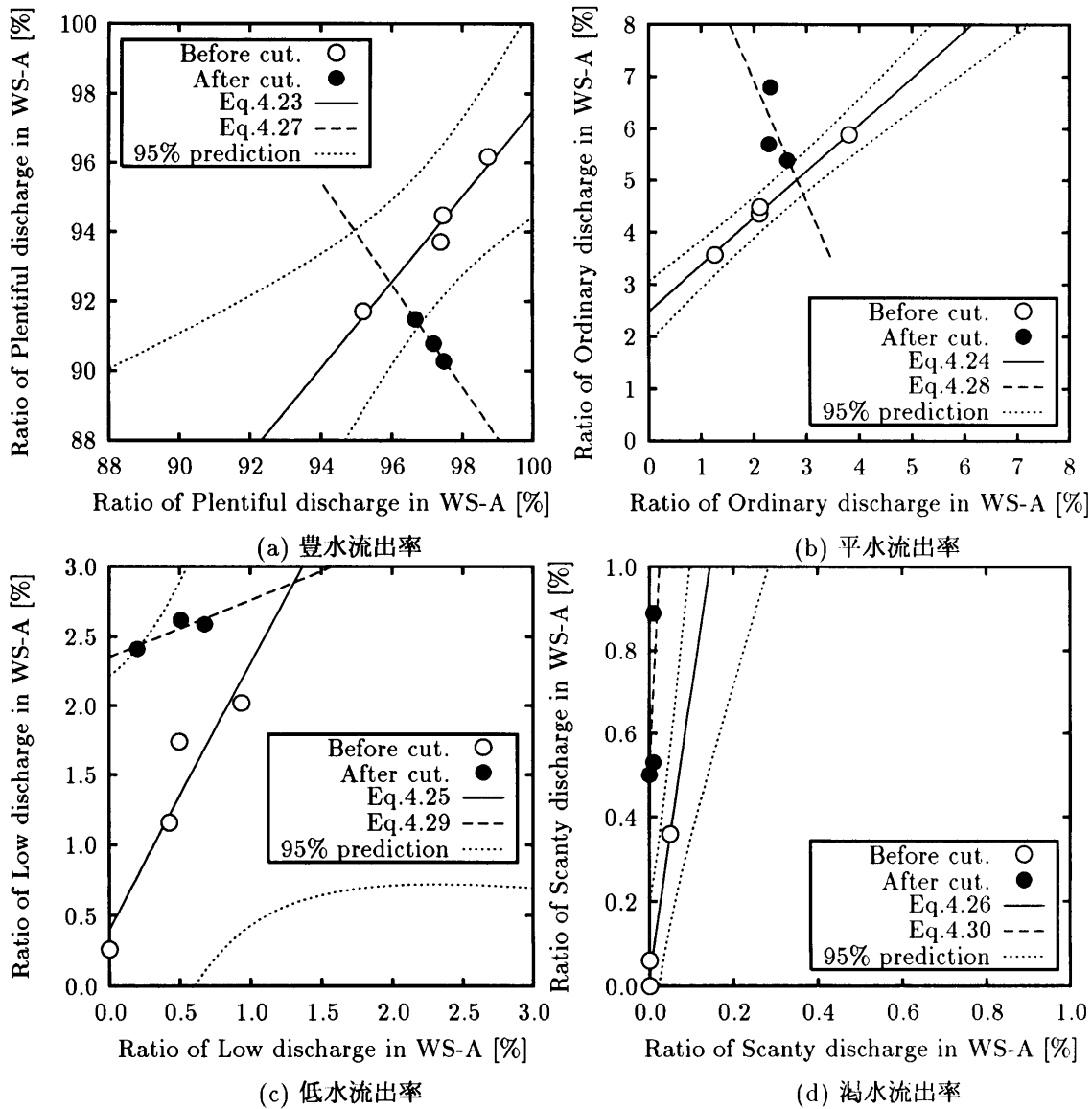


図 4.33: A,B 流域の単年流況流出率対比図

5%水準で有意に分布が異なると言えるのである。

さて図-4.33の各図において伐採後期間の点の分布を見てみよう。まず (a) 豊水流出率では、伐採後期間の3水年のうち1水年は点が95%信頼区間の内側に位置しているが、残り2水年は信頼区間の下側に分布しており、5%水準で変化が有意であった年と有意でなかった年があったが、有意であった年の方が多数であった。(b) 平水流出率では伐採後期間の点はすべて信頼区間の上側に外れており、伐採による変化は5%水準で有意であった。(c) 低水流出率では3水年のうち1水年は信頼区間の上限線上にあるが、残り2水年は信頼区間内に位置しており、伐採による変化は有意なものとは言えなかった。(d) 渇水流出率では伐採後期間の点はすべて信頼区間の上側に外れており、伐採による変化は5%水準で有意であった。

以上をまとめると、豊水・平水・渇水流出率では伐採による変化はほぼ有意であったが、低水流出率では有意ではなかった。低水流出率だけ有意でなかった原因は、低水流出率の回帰直線の当てはまりが悪く、信頼区間の範囲が局限されなかったことに求められるであろう。(4.23)～(4.26)式の各式を比較すると、回帰の有意性では低水流出率のみ  $p$  値が5%に達せず、また決定係数では低水流出率のみ0.9を下回っている。図-4.33の各図を見比べても、信頼区間の面積が(c)図だけ顕著に広いことがわかる。(c)図を見ると、低水流出率において点の分布が伐採前後で異なることは明白であるので、変化に有意性が検出されなかったことを重大に考える必要はないだろう。

次に回帰直線の変化について調べる。図-4.33の各図において、伐採後期間の点に対して回帰直線を求めると以下の各式が得られる。

$$\text{豊水)} \quad Q_B = -1.4764Q_A + 234.23 \quad (p = 0.046; R^2 = 0.99) \quad (4.27)$$

$$\text{平水)} \quad Q_B = -2.3330Q_A + 11.60 \quad (p = 0.58; R^2 = 0.37) \quad (4.28)$$

$$\text{低水)} \quad Q_B = 0.4119Q_A + 2.35 \quad (p = 0.31; R^2 = 0.78) \quad (4.29)$$

$$\text{渇水)} \quad Q_B = 21.0000Q_A + 0.50 \quad (p = 0.62; R^2 = 0.31) \quad (4.30)$$

回帰の結果を見ると、(4.27)式・豊水流出率は回帰の有意性・決定係数ともに高く、回帰が有効であると判断できるが、他の式は回帰の有意性・決定係数ともに低く、有効な回帰は得られなかった。図-4.33を見ると、(b) 平水・(d) 渇水流出率では横軸・A流域流出率を取る値の範囲が狭く、伐採後期間の点の分布がほぼ垂直になってしまっている。(c) 低水流出率では縦軸・B流域流出率がほぼ一定値であるために傾きが0に近く、回帰係数の有意性が低い結果となった。以上のことから、伐採前後で回帰直線を比較することに意味があるのは豊水流出率のみであると言える。

さてその豊水流出率について、伐採前後で回帰直線の変化を見ると、伐採前期間では右上がりであったものが伐採後期間では右下がりになったことがわかる。すなわちB流域の豊水流出率は、伐採によって、A流域の流出率の変動に対してまったく正反対の変動パターンを示すようになったのである。

続いて、各流出率の伐採による変化量の年々変動について解析する。

図-4.33において、伐採後期間の各点と伐採前期間の回帰直線の差を取ると、伐採による流出率の変化量が算出できる。表-4.15に示したのは、A流域の各流出率と伐採前期間の回帰直線から算出した、仮に伐採が行なわれなかった場合にB流域の流出率が取ったであろう「推定値」と、実際に観測された流出率と伐採しなかった場合の推定値との差である「変化量」である。

各変化量の時系列変化を図-4.34に示した。図には伐採前期間の分もプロットされているが、これは伐採前期間の直線回帰の回帰残差を表示したものである。

さて図-4.34から、各流出率の変化量の変動パターンを比較すると、伐採後期間の曲線形の凹凸

#### 4.3. 単年流況曲線とその変化

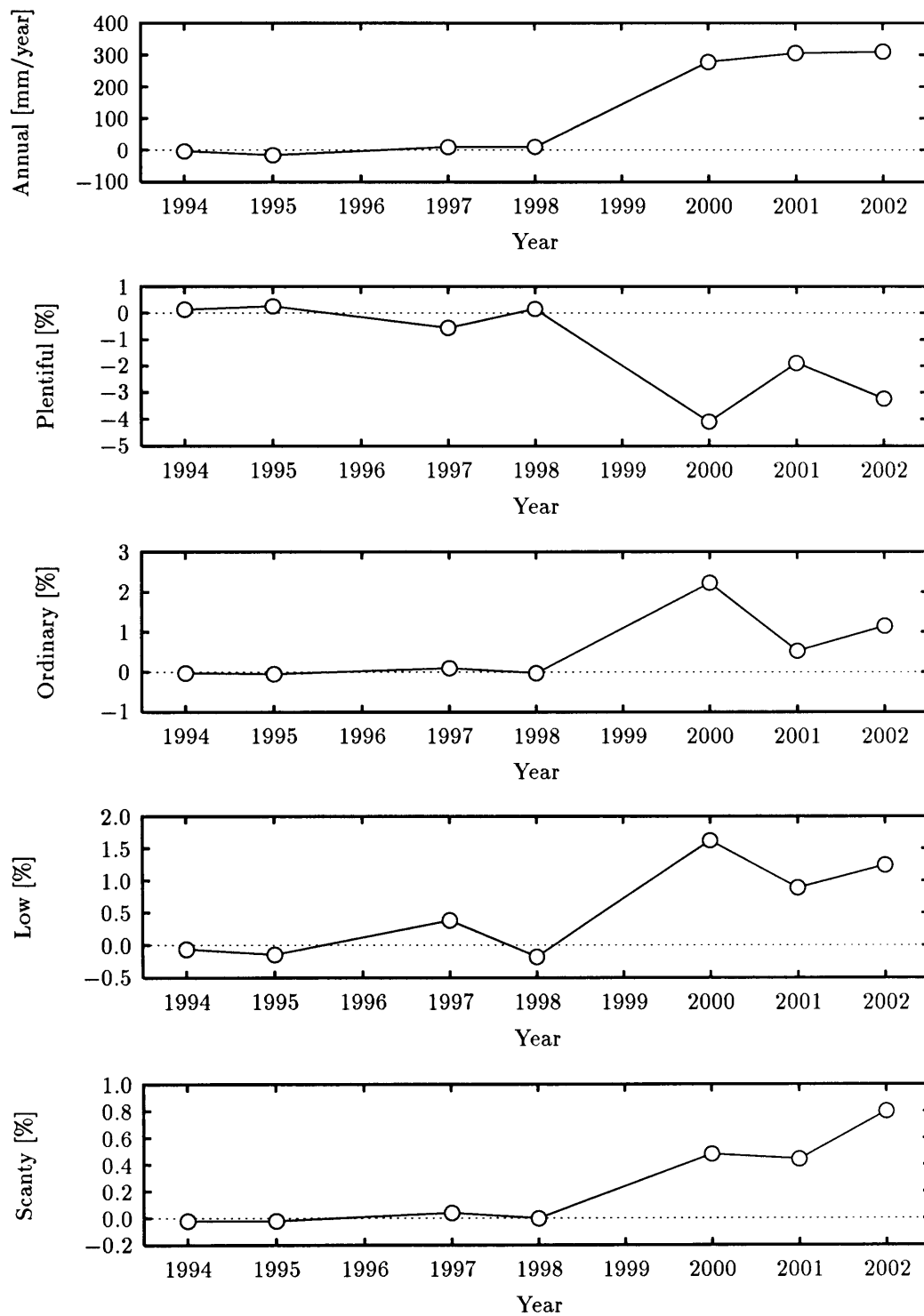


図 4.34: 各流出率の変化量の時系列変化

表 4.15: 各流出率の推定値と変化量 [%]

年	推定値				変化量			
	豊水	平水	低水	渇水	豊水	平水	低水	渇水
2000	94.72	4.52	0.74	0.01	-4.09	2.23	1.62	0.48
2001	93.73	4.59	1.59	0.08	-1.88	0.53	0.89	0.44
2002	94.37	4.25	1.29	0.09	-3.23	1.15	1.24	0.80

が、豊水流出率と平水・低水・渇水流出率で逆になっていることがわかる。すなわち、豊水流出率は上に凸の形状であるが、平水・低水・渇水流出率では逆に下に凸の形状である。しかし、変化量の符号が豊水流出率はマイナス、平水・低水・渇水流出率はプラスであることを考えると、変化量の絶対値の変動パターンは各流出率とも実は同じである。

このことは、流出率の総計が常に 100% であり、各流出率の変化はゼロサムであるという性質が関係している。すなわち、各水年ともに、豊水流出率が減少した分だけ平水・低水・渇水流出率が増加するという構造になっているのである。しかしそれにしても、平水・低水・渇水流出率の年々変動の形状が似ていること、および平水・低水・渇水流出率の増加分を豊水流出率の低下が補っているという点は注目に値しよう。

## 4.4 考察

### 4.4.1 伐採による流況曲線等の変化

森林伐採による流出量の変化を流況曲線を用いて解析した研究としては、まず最初に中野ら (1963) を挙げることができる。中野ら (1963) は国内外 4 試験地 5 流域の事例を解析し、伐採などの林況悪化によって豊水・平水・低水・渇水各流出量はいずれも増加する傾向が認められたと結論している。また増加の主な原因は、豊水流出量については伐木・搬出時に作られた難浸透面での直接流出量の増加に、平水・低水・渇水各流出量については森林植生の減少による蒸発散損失の減少にあると推定している。

本研究で解析対象とした袋山沢流域の伐採事例において、同様の解析を行なったところ、各流況流出量がいずれも増加したことが認められた。すなわち本研究は中野ら (1963) の結論を再確認し補強するものであると言える。

中野ら (1963) の研究は林況の経年変化と流出量の変動の連関を調べることを目的としており、伐採前後の流出量の平均的变化を量的に算出することは行なわれていない。

林況悪化による流出量の増加量・増加率の定量的な評価を行なった研究としては以下のものがある。

谷・阿部 (1987) は、竜の口山南谷において 1980 年前後に起こった松枯れ被害による流出量の変化を、タンクモデルを用いて解析した。その結果、松枯れ前および松枯れ後の日流出量をそれぞれ  $Q_b$ ,  $Q'_b$  とすると、松枯れによる日流出量の変化は

表 4.16: 竜の口山南谷における松枯れ前後の流況流量の変化

	豊水	平水	低水	渇水	
松枯れ前	0.465	0.254	0.178	0.082	I
松枯れ後	0.745	0.422	0.302	0.146	II
増加量	0.280	0.168	0.124	0.064	II - I
増加割合	1.60	1.66	1.70	1.78	II / I

谷・阿部 (1987) をもとに著者作成。

表 4.17: 袋山沢 B 流域における伐採前後の流況流量の変化

	豊水	平水	低水	渇水
増加量	0.72	0.33	0.22	0.098
増加割合	1.70	1.92	3.22	10.90

表-4.3 の一部を編集・修正して再掲。

$$\frac{Q'_b}{Q_b} = 1.532Q_b^{-0.059} \quad (4.31)$$

と導かれた。(4.31) 式より、松枯れによって日流出量が増加すること、流出量が大きくなるほど増加の割合が小さくなることが結論された。(4.31) 式を伐採前の流況流量に当てはめると、各流量における松枯れによる流量増加割合は、渇水流量は 1.78 倍、低水流量で 1.70 倍、平水流量で 1.66 倍、豊水流量で 1.60 倍であった (表-4.16)。

谷・阿部 (1987) の結果を本研究の結果を比較してみよう。表-4.17 に袋山沢 B 流域の結果を、表記を谷・阿部 (1987) に合うように修正して再掲した。表-4.16 および表-4.17 から、まず各流量の増加量を比較すると、各流量とも袋山沢 B 流域の方が増加量が多い。これは袋山沢流域の方が降水量が多いことが原因であろう。一方増加割合を比較すると、各流量ともに袋山沢 B 流域の方が大きい。豊水流量では両流域の値の差はさほど大きくないが、平水・低水・渇水の順に両流域の差は広がって行く傾向が見られる。低水側で両流域の増加割合が大きく異なる原因は、袋山沢流域がその降水量に比して低水時流出量が少ないという流出特性があるためであると思われる。

玉井ら (2004) は、竜の口山南谷の流出量について、北谷を対照流域とした対照流域法の手法を用いて、1959 年の山火事および 1980 前後に発生した松枯れによる森林衰退の影響を解析した。流況曲線上の各 N 日目流量ごとに、森林健全期と森林衰退期それぞれで北谷と南谷の流量の関係を回帰直線として求めた。森林健全期の回帰直線と森林衰退期の実測値との差を求めることで森林衰退による流出量の変化が得られる。図-4.35 に、原論文から流況曲線上の各日数ごとの流出量の平均変化量の図を引用した。

図-4.35 から明らかに、森林衰退によって流況曲線はすべての日数において増加したことがわかる。また増加量は日数が小さいほど大きく、日数が大きくなるに従って増加量は小さくなっていくこともわかる。また原著者らは、流況曲線の変化を増加割合で言うと、1~40 日目では約 1.18 倍、140~320 日目では約 1.54 倍、365 日目では 1.75 倍であり、日数が多いほど増加割合が大きい、と述べている。

さて玉井ら (2004) の結果を本研究の結果と比較してみる。図-4.36 に袋山沢 B 流域における、森林伐採による流況曲線の増加量のグラフを再掲した。図-4.35 および図-4.36 から、両流域における増加量の曲線形はよく似ていることがわかる。すなわち、図左側、日数が小さいほど増加量が大き



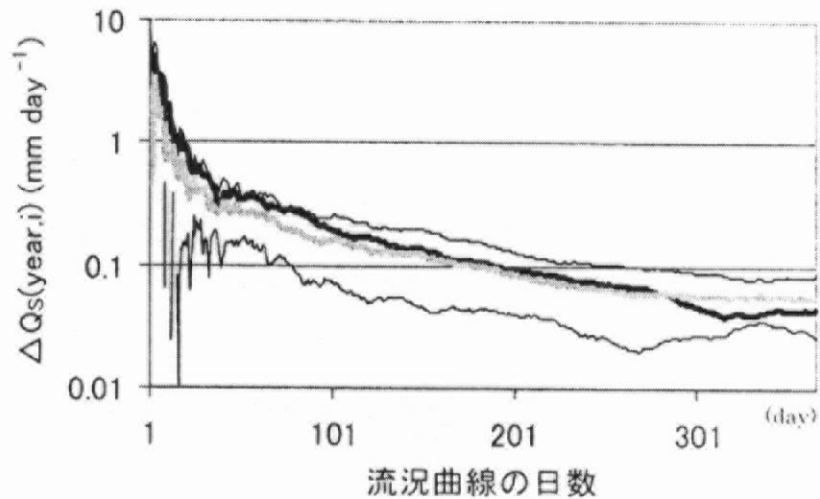


図 4.35: 竜の口山南谷における森林衰退による流況曲線の変化

縦軸は各日数における流出量の平均増加量。濃線は林野火災による増加を、薄線は松枯れによる増加を、細線は両者を併せた 19 年間の標準偏差を表す。玉井ら (2004) から引用。

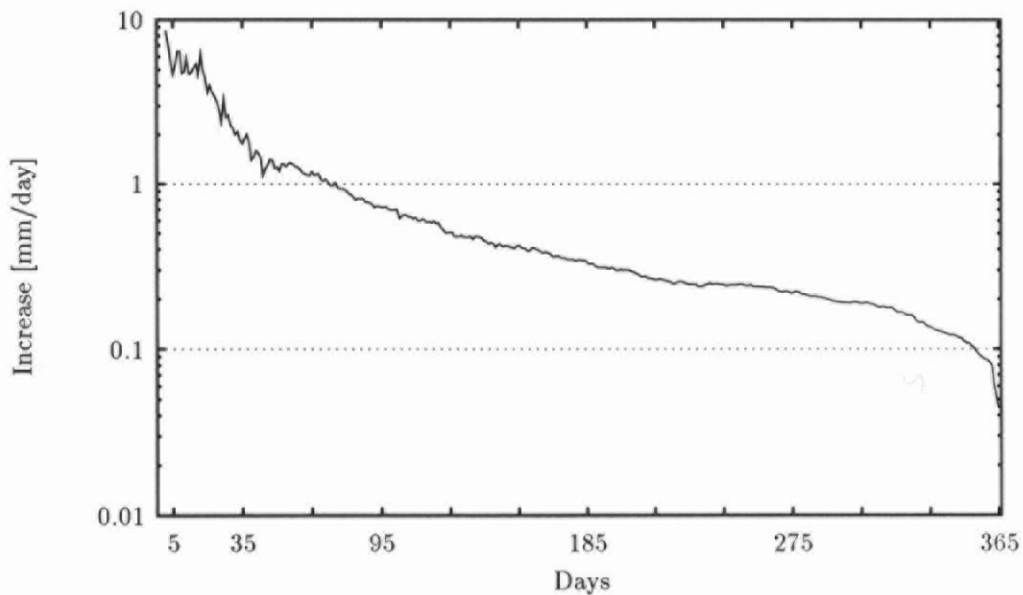


図 4.36: 袋山沢 B 流域における森林伐採による流況曲線の増加量

図-4.7 を、縦軸を対数軸に修正して再掲。

表 4.18: 日流量の増加割合の比較

基準流域流量 [mm/day]	0.5	1	2	3
袋山沢 B 流域	1.74	1.70	1.63	1.50
竜の口山南谷	1.71	1.50	1.25	1.22

く、日数が大きくなるに従って増加量が小さくなっていく傾向が共通している。ただし、曲線の縦軸上の位置は、袋山沢 B 流域の方が高い。すなわち増加量の値は袋山沢 B 流域の方が大きい。袋山沢流域の方が増加量が多い原因は、先述の通り降水量が多いためであろう。

阿部・谷 (1985) は、竜の口山南谷において 1980 年前後に発生した松枯れによる日流出量変化を、北谷を対照流域として解析した。その結果、松枯れによる日流出量の変化は日流出量の大きさによって異なり、北谷の日流出量が 0.5 mm/day 以下の日では 1.71 倍に増加、3 mm/day 以上の日は 1.22 倍に増加した。0.5～3 mm/day の範囲では、日流出量が大きくなるに従って増加割合は小さくなり、北谷流出量が 1 mm/day の時は 1.50 倍、2 mm/day の時は 1.25 倍であった。

阿部・谷 (1985) の結果を本研究の結果と比較してみよう。袋山沢 B 流域における伐採による増加量と流量の大きさの関係は図-4.14 に既出である。ただし図-4.14 では増加量の比率すなわち  $\frac{\text{伐採後期間流量} - \text{伐採前期間流量}}{\text{伐採前期間流量}}$  で表示してあるのに対し、阿部・谷 (1985) では増加割合すなわち  $\frac{\text{松枯れ後流量}}{\text{松枯れがなかった場合の流量}}$  である。従って阿部・谷 (1985) と比較するには図-4.14 の縦軸に 1 を加える必要がある。

その点に注意して比較しよう。基準流域の流量が 0.5, 1, 2, 3 mm/day の時の増加割合を一覧にすると表-4.18 のようになる。表-4.18 からわかる通り、各流量ともに袋山沢 B 流域の方が増加割合が大きい。また両流域の増加割合の差は流量が大きくなるにしたがって徐々に広がっている。両流域の増加割合の差は、降水量の多寡や、地質や流域面積の差によって直接流出率が異なるからではないかと思われる。

本研究では、各年の N 日目流量に対して、基準流域流量と処理流域流量との回帰直線の傾きを求め、伐採前後の変化を解析した (§4.3.1: 図-4.26, 4.27)。

玉井ら (2004) は、これと同様の手法を、竜の口山試験地南谷流域における山火事および松枯れ被害による流量変化に対して適用している。回帰係数の変化を表したグラフを原論文から引用した (図-4.37a)。なお比較のために袋山沢 B 流域の結果 (図-4.26) を再掲した (図-4.37b)。

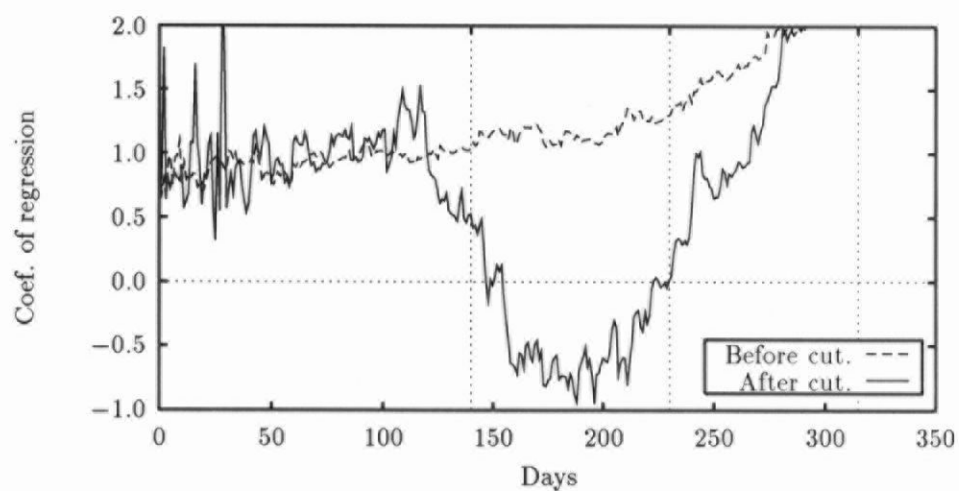
さて図-4.37 から林況と回帰係数の関係を見ると、袋山沢 B 流域と同様、竜の口山南谷においても林況の変化により N 日目流量の回帰係数が変化したことがわかる。変化の具合を両流域で比較すると、両流域で共通の点と異なる点とがある。まず共通する点としては、林況悪化による回帰係数の変化が大きく現れるのはグラフ中央部であり、グラフの両端においてはあまり変化が見られないという点である。ただ細かく言うと、袋山沢 B 流域の場合は 110 日目を境にして変化の大きさが急変するが、竜の口山南谷の場合は緩やかであるところに違いが見られる。一方両流域で異なる点は変化の方向である。竜の口山南谷では林況の悪化により回帰係数が大きくなったが、袋山沢 B 流域では逆に伐採によって回帰係数が小さく (プラスからマイナスに) なった。

ここで両流域で変化の方向が異なる理由について考えてみる。まず、両流域ともに、林況悪化による流量の増加量は流量の大きさに連動するという結果が得られている。袋山沢 B 流域について



(a) 竜の口山南谷 (玉井, 2004 より引用)

薄点は森林健全期、濃点は森林衰退期。



(b) 袋山沢 B 流域 (図-4.26 を再掲)

図 4.37: N 日目流量の回帰係数の変化

は既に解析結果を提示したので省略する。竜の口山南谷については、先に引用した図-4.35 に示されているように、流況曲線上の日数が小さいほど、すなわち流量が大きいほど増加量が多い、という結果である。とすると、各 N 日目流量において、対照流域の流量が大きいほど増加量が多くなるのが整合的であり、従って、林況悪化によって回帰係数が大きくなる方向に変化することが整合的であると言える。すなわち竜の口山南谷の例は蓋然性があるが、袋山沢 B 流域の例はそうではないのである。

袋山沢 B 流域においてこのような結果が出た理由としてはいくつか考えられる。まず伐採後の観測期間が 3 年間と短いことが挙げられる。つまりサンプル数が少ないために偏った結果が出てしまったという可能性である。この可能性はもちろんあり、今後も続けられるであろう観測によって追試・再解析されるべきであると思うが、しかしそれは、110 日目までは伐採前後で変化が認められないのに対して、110 日目以降で急に变化する現象が見られることを説明できない。ある範囲でだけ特定の現象が起こっているならば、それなりの理由があるものと考えるべきであろう。

別の理由としては植生の経年変化も考えられる。袋山沢 B 流域では伐採後に幼樹を植栽したため、植栽木の生長とともに流域の植生条件が若干ながら経年変化した可能性がある。しかし、例えば表-4.7, 4.8 から A, B 両流域の平水流量の経年変化を見ても、伐採後に B 流域の流量にトレンドは認められない。また植生に経年変化があったとしたら、流況曲線全体に影響が出るはずであり、110 日目以降という限られた範囲でだけこの現象が起こる理由が説明できない。

あるいは気象条件の年々変動が原因であるとも考えられる。伐採後に A, B 両流域の流量が異なるのは、その時点での両流域の土壤水分状態が異なるからであるが、土壤水分状態が異なるのは両流域の植生に差があるからである。すなわち、両流域の流量の差は、気温などの、森林植生の蒸発散に影響する気象要因によって変化する。一方で流量自体はその年の降水量の多寡に直接的な影響を受ける。さてそこで、降水量の多寡と気温などによる蒸発散の多寡の組合せて考えてみよう。たとえば、降水量は少ないが森林からの蒸発散が多い場合、A 流域は、入力水分が少ないことに加えて蒸発散損失が多いために、流量が少なくなる。一方で B 流域は、入力水分は少ないが、植生がないことによって損失から免れる水分量が多いために、比較的流量が大きくなるであろう。また逆に、降水量は多いが森林からの蒸発散が少ない場合、A 流域は、入力水分が多くかつ蒸発散損失が少ないために流量が大きくなる。一方 B 流域は、入力水分が多いが、植生がないことによって損失から免れる水分量が少いために、A 流域に比べてさほど大きな流量は得られないことになる。すなわち、前者の条件では A 流域流量が小さい時に B 流域流量が大きくなり、後者の条件では A 流域流量が大きい時に B 流域流量が小さくなるのである。

降水量と森林の蒸発散量の変動を組み合わせるこの説明は、110 日目を境に傾向が変化する現象も説明可能である。すなわち、年間の降水日数が 100 日あまりであることを考えると、森林の蒸散が流出に影響するのは流況曲線上で主に 100 日目以降であると考えたと辻褄が合う。

このように考えた時、袋山沢 B 流域と竜の口山南谷で変化の方向が異なったことは次のように説明できるであろう。まず、袋山沢 B 流域では伐採後の観測期間が 3 年間と短く、各年の降水量と森林の蒸発散量の組合せに偏りが生じたのに対し、竜の口山南谷では森林衰退期として約 20 年間のデータがあり、各年の降水量と蒸発散量の組合せが均等に得られたことが考えられる。また竜の口山試験地は瀬戸内の小雨地帯に存在することから、降水量に対する蒸発散量の比率が相対的に高く、森林衰退による蒸発散の変化の方が降水量の年々変動よりも支配的であるとも考えられる。

#### 4.4.2 低水時流出量の変化

一般に森林伐採によって低水時流出量は増加することが知られている（中野, 1972）。蔵治 (2003) は国内外の小流域試験の結果をレビューし、低水時流出量は伐採などの森林悪化によって増加し、逆に森林回復によって減少する現象が一般的に見られることを示した。

伐採などの林況悪化によって低水時流出量や基底流出量が増加する原因として、森林植生の減少による蒸発散量の減少を挙げる研究者が多い（例えば、竜の口山南谷の事例を解析した谷・阿部, 1985 など）。常陸太田流域の事例を解析した藤枝・野口・小川 (1996) は、蒸発散の中でも特に樹冠遮断量の減少を強調している。

さて本研究では、袋山沢 B 流域の伐採事例を解析し、流況曲線や low-flow days の変化などから、森林伐採によって低水時流出量が増加したことを示した。そこで以下では、袋山沢流域の流出特性を踏まえた上で本実験における低水時流出量増加の原因を推測してみる。

一般に渇水時の流出量は、いわゆる基底流出量によって維持されと考えられる。しかし当流域では、森林状態において、年間を通じて安定的に供給されるような基底流出は存在しないと思われる。当流域が属する第三紀層地質は中・古生層と並んで基底流出量が少ないことが知られているが（虫明ら, 1981; 岸原・石井, 1983）、当流域の場合、地質の流出特性に加え、流域面積が小さいことや、先述のように深部浸透が多いことが原因となって基底流出がさらに減少し、安定供給が不可能になっているのであろう。特に深部浸透の存在は、基岩に浸透した水分が基岩地下水として基底流出の一部を形成することなく流域外に漏洩することを意味する。基岩地下水からの流出は流出成分のうちでもっとも安定的な成分であるが、当流域では流出停止現象がよく発生することから考えると、基岩地下水からの安定的流出は当流域には存在していないと思われる。したがって、当流域の基底流出は、表層土壌層における遅い水移動のみによって形成されているものと思われる。

さて、流況曲線や low-flow days などの変化から、本実験において伐採によって基底流出は増加し、またその供給が安定化したと言える。今述べた通り当流域では基岩地下水からの流出がほとんどないと考えられるため、基底流出によって維持される渇水時流出量が増加し安定化したことは、土壌層中に貯留される水分が無降雨期間中も保持されるようになったことを示している。森林状態において無降雨期間中に土壌層の水分に支配的な影響を与える要素は植生の蒸散作用と考えられることから、本実験における伐採による渇水時流出量の増加は伐採による蒸散量の減少によって起こったものと推察される。

#### 4.4.3 流出の年間一様性の変化

森林流域に期待される流出調整作用には大別して洪水緩和機能と渇水緩和機能がある。森林を伐採するとほとんどの流域で洪水流量は増加し、洪水緩和という面では伐採により負の影響が生ずる。一方渇水流量も伐採によって増加することが多く、渇水緩和という面で伐採は正の影響を及ぼす。このことから、森林施業に際しては洪水緩和機能なるべく保ちつつ渇水緩和機能が高まるように伐採量を調節することが望ましいと言われる（塚本・太田, 1984; 太田, 1991）。

伐採によって渇水流量の増量を図る場合、洪水流量増加のデメリットに比して渇水流量増加のメリットが上回るかどうか判断の基準となるだろう。伐採前後の流出一様性の変化はそのような判断基準のひとつとなり得るものと思われる。

中野 (1971) は、国内外の数流域について豊水・平水・低水・渇水各流出率を解析した。その結果、多くの流域で皆伐あるいはほとんど皆伐に近い伐採によって豊水流出率が減少し低水・渇水各流出率が増加したことを示し、この意味で流出の一様性が向上したと結論した。また志水ら (1994)

は宝川の温暖期（6～10月）の流出を対象に、帯状伐採によって平水・低水・渇水各流出率が増加したと述べている。本実験においては、豊水から渇水の各流出量が増加したが、増加率でみると豊水流出量の増加率よりも渇水流出量の増加率の方が大きく、結果として伐採によって流出一様性が高まったことが示された。またハイドログラフから算出した直接流出率についても、直接流出量・基底流出量はともに伐採によって増加したが、直接流出量の増加に比べて基底流出量の増加が相対的に大きかったために、直接流出率の低下が見られた。

各流出量の増加の原因について、高水流出（豊水流出量）と低水流出（平水・低水・渇水流出量）に分けて考察する。まず高水流出について、中野（1971）は、樹冠層除去による遮断蒸発量の減少、施業中の地表面攪乱による表面流出の発生、蒸散量減少にともなう土壌水分増加による直接流出増加を原因として挙げている。これに対して本実験では架線集材を実施したために地表面攪乱は抑制されたことから、樹冠遮断量の減少および蒸散量減少・土壌湿潤化による直接流出増加が原因となって豊水流出量が増加したと考えられる。一方低水流出について同じく中野は蒸散量の減少の影響であると述べているが、本実験においても同様の影響があると考えられる。

また藤枝・野口・小川（1996）は、年流出量増加が遮断量の減少に起因するとしうえて、流出増加量の直接流出量と基底流出量の配分割合は作業道などの難浸透域の面積割合に依存すると述べている。本実験の結果では作業道などの難浸透域がなくとも伐採によって直接流出率に変化しており、難浸透域の面積割合だけに依存するものではないことを示している。

これらの事例から、地表面攪乱を抑制した森林施業は森林流域に期待される水源涵養機能に正の効果を与えるものであると言えよう。特に当流域のような渇水期に流出が停止するような基底流出が少ない流域においても伐採によって渇水時流量の増加が起こることがわかった。

## 第5章 伐採による流出量変化の季節性の解析

本章では、伐採による流出量の増加が、季節によってどのように異なるのかを解析する。また伐採の影響が季節によって異なる原因についての考察も行なう。

解析の方法としては主に月水収支を用いる。また補助的に短期水収支も用いた。

第1節ではまず袋山沢流域の月水収支の特性について概観を記述する。第2節では月水収支および短期水収支から、伐採後期間における平均的な流量変化について論じる。第3節では単月の月流出量データから単月の流出増加量を算出し、その季節性を明らかにする。第4節では得られた結果に対して考察を加える。

### 5.1 袋山沢流域の月水収支の概観

まず、袋山沢流域における月降水量、月流出量の数表を表-5.1～5.3に掲げた。表-5.2および表-5.3において1996年が空欄となっているのは9月に台風による欠測があるためである。表-5.1および表-5.2には最下段に平均値を併記した。

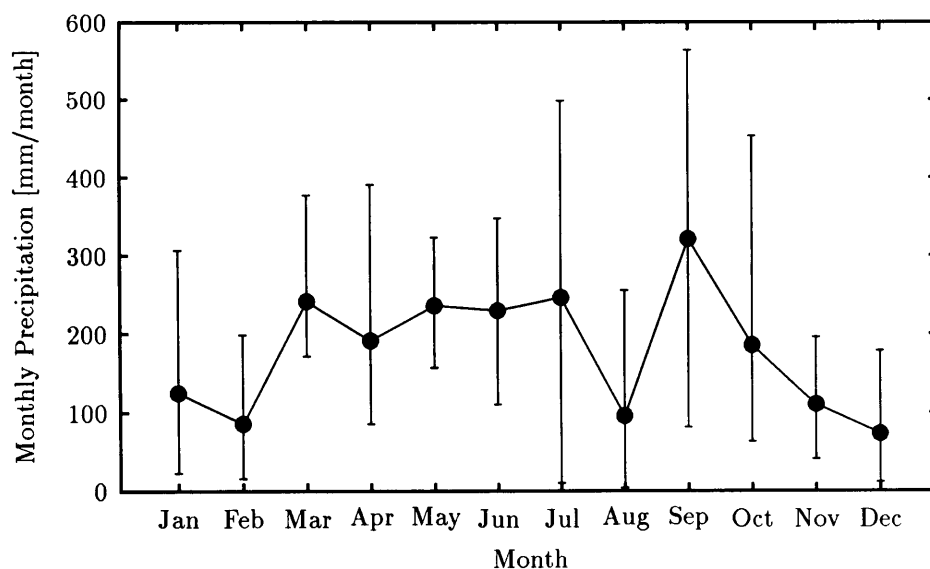


図 5.1: 各月の平均降水量 [mm/month]

## 5.1. 袋山沢流域の月水収支の概観

表 5.1: 月降水量 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1994	54.9	173.9	377.0	179.7	297.6	122.1	64.0	43.2	387.2	123.2	72.0	49.1
1995	43.2	42.2	303.3	207.8	322.8	313.8	149.3	4.2	304.8	182.0	89.7	11.1
1996	63.3	53.3	207.3	102.8	224.1	110.8	498.4	44.8	563.8	134.5	157.8	112.4
1997	79.4	77.3	171.8	161.0	234.5	249.5	243.6	17.8	245.1	63.1	158.4	97.9
1998	207.6	198.8	173.1	288.4	245.7	282.2	390.9	91.2	328.3	182.6	40.9	79.9
1999	23.0	79.1	291.7	390.6	244.9	137.6	304.6	132.1	81.7	147.7	145.9	21.6
2000	129.9	15.6	265.4	198.3	187.6	347.7	304.8	47.6	296.9	205.9	112.7	38.7
2001	306.5	60.0	195.8	110.1	211.5	172.5	10.1	255.5	335.6	453.1	196.5	96.4
2002	216.9	71.9	189.4	85.5	157.2	330.5	252.4	229.1	370.3	234.4	46.6	179.0
平均	125.0	85.8	241.6	191.6	236.2	229.6	246.5	96.2	323.7	191.8	113.4	76.2

表 5.2: A 流域月流出量 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1994	8.2	83.5	247.4	48.8	132.1	29.1	2.6	0.4	117.1	23.9	6.8	1.0
1995	1.7	0.1	92.9	63.5	216.2	168.5	78.0	0.0	112.7	50.9	7.3	0.0
1996	(欠測日あり)											
1997	13.4	11.9	43.3	82.7	88.8	98.2	75.7	4.4	54.4	3.7	17.0	11.1
1998	83.6	84.9	66.3	122.1	97.4	147.7	203.6	8.1	139.9	68.1	2.3	11.7
1999	0.2	5.1	103.4	257.8	140.1	13.8	221.1	19.6	0.5	22.2	20.7	0.4
2000	17.9	0.0	95.3	56.4	55.4	169.5	224.5	1.5	71.1	49.2	26.8	0.7
2001	153.6	22.7	51.7	15.4	52.0	69.7	1.2	59.0	154.6	265.8	100.0	16.7
2002	93.6	24.7	52.4	6.0	27.0	146.2	144.5	79.6	164.9	113.5	2.8	39.9
平均	46.5	29.1	94.1	81.6	101.1	105.3	118.9	21.6	101.9	74.7	23.0	10.2

表 5.3: B 流域月流出量 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1994	12.9	84.3	215.5	49.3	116.2	30.8	3.8	0.3	104.6	25.1	8.4	1.0
1995	2.0	0.1	92.3	63.1	182.5	147.1	75.4	1.5	97.6	51.0	11.8	0.3
1996	(欠測日あり)											
1997	20.3	16.4	42.6	75.0	78.4	86.4	65.9	6.1	49.3	4.0	21.0	16.2
1998	81.6	81.7	65.5	119.6	94.6	141.3	178.3	10.1	121.4	68.0	4.6	11.7
1999	0.5	4.6	111.8	265.6	141.4	43.7	212.8	51.1	8.4	63.8	63.3	10.1
2000	45.9	4.0	119.6	90.8	80.9	193.1	207.4	6.5	108.8	80.5	51.0	8.0
2001	164.6	46.0	81.1	30.8	79.5	87.1	6.7	78.5	176.4	282.2	132.0	41.4
2002	117.4	40.4	79.4	22.9	52.0	166.8	146.2	95.9	176.2	146.7	15.7	87.8



表 5.4: A 流域における月平均水収支 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
降水量	132.7	89.9	245.9	202.7	237.7	244.5	215.0	102.6	293.7	199.0	107.8	71.7
流出量	46.5	29.1	94.1	81.6	101.1	105.3	118.9	21.6	101.9	74.7	23.0	10.2
損失量	86.2	60.7	151.9	121.1	136.6	139.2	96.1	81.0	191.8	124.3	84.9	61.5

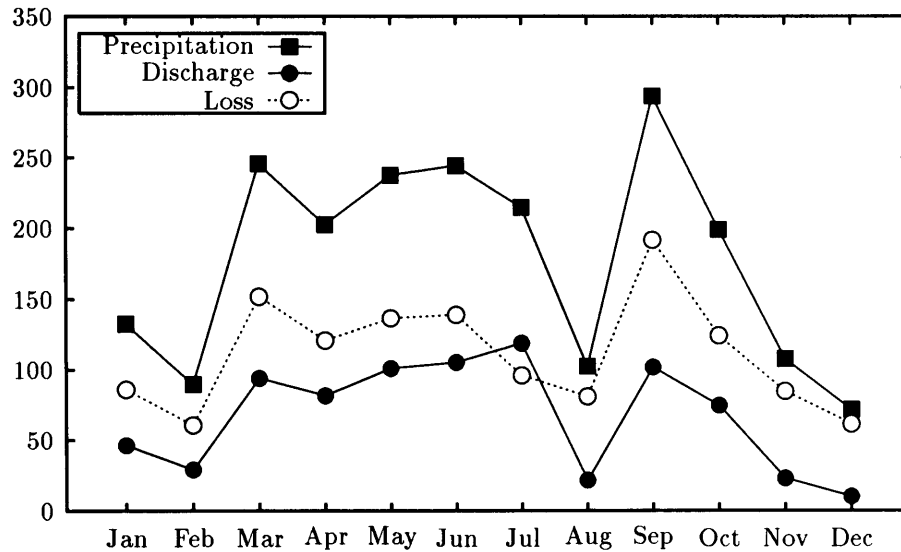


図 5.2: A 流域における平均月水収支 [mm/month]

### 5.1.1 平均月水収支

表-5.1 から、各月の平均降水量を図示したものが図-5.1 である。図-5.1 において縦線で表示されているのは各月の降水量の範囲である。すなわち縦線の最下端が各月の最小降水量、最上端が最大降水量を示している。

さて図-5.1 から、平均月降水量の季節分布を見ると、3～10 月は比較的量が多く、11～2 月は少ない傾向が見られる。ただし 8 月はその前後の月に比べて降水量が少なく、11～2 月と同じくらいの量である。おおまかに言うと、袋山沢流域の月降水量の季節分布は、夏期に多く、冬期に少ないという太平洋岸気候の特徴を持っている。

また各月の最小・最大降水量の較差を見ると、7,9,10 月の縦線の長さが他に比べて比較的長く、較差が大きい。これはこの時期の雨量が台風性の大降雨の有無に左右されるためであると思われる。

次に、基準流域である A 流域における月水収支を見る。表-5.4 に A 流域における各月の平均月水収支表を示す。表-5.4 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。また降水量の平均値は表-5.1 と表-5.4 とで異なるが、これは表-5.4 では流出量の欠測に合わせて 1996 年を除いたことにより、両者の集計期間が異なることが原因である。

表-5.4 をグラフにすると図-5.2 が得られる。図-5.2 を見ると、降水量・流出量・損失量の曲線形は互いによく似ている。すなわち A 流域において、月流出量・月損失量の季節分布は月降水量の

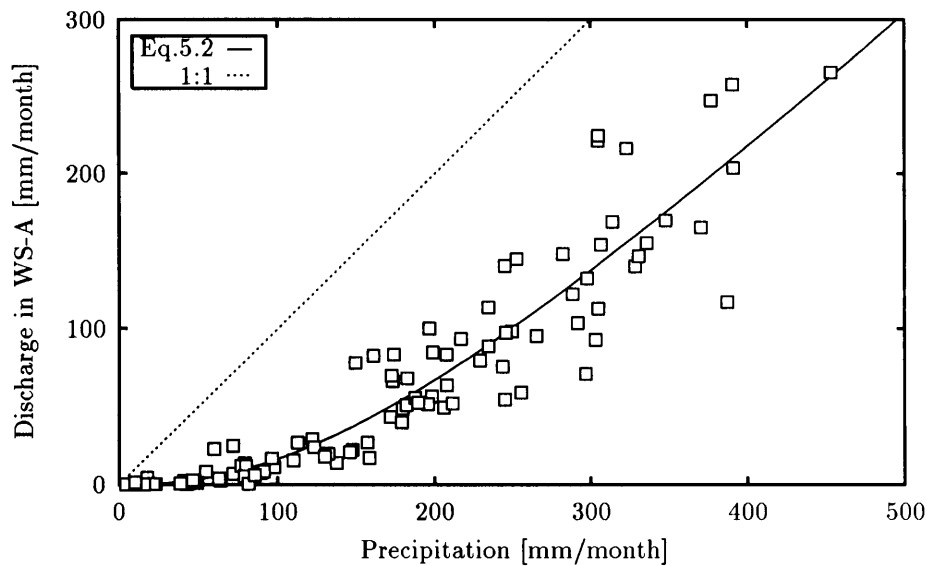


図 5.3: A 流域における月降水量と月流出量の関係

季節分布に良く連動していることがわかる。すなわち、降水量・損失量ともに、夏期に多く、冬期に少ないという季節性が存在する。表-5.4 から、降水量と流出量、降水量と損失量との相関係数を求めるとそれぞれ 0.94, 0.94 であり、ともに強い正の相関が見られる。

流出量と損失量を比較すると、7 月のみ流出量の方が大きくなっているが、大半の月では損失量の方が大きい。損失量の曲線形を詳しく見ると、3 月および 9 月は前後の月よりも大きな値を示している。この現象は、3 月は冬季の、9 月は夏季の土壌乾燥の補填として初期損失が多くなることに原因があると推測される。

### 5.1.2 月降水量と月流出量

図-5.3 に示したのは、A 流域における月降水量と月流出量の散布図である。図-5.3 においてデータは各月ごとに分けて、12 ヶ月すべてプロットした。また図-5.3 には 1:1 ラインを併記した。図中の各点において、横軸との差がその月の流出量を示しており、1:1 ラインとの差が損失量を意味していることになる。さて図-5.3 において点の分布を見ると、分布にバラツキが見られるものの、全体的にはおおそ原点を通る下に凸の曲線状である。曲線の傾きは原点に近いほど緩やかで、原点から離れるほど急になっている。また流出量と損失量との比率で言うと、原点近くでは流出量に比べて損失量が多いのに対して、原点から離れるにつれて流出量の比率が大きくなることもわかる。

ここで、図-5.3 の点の分布に対して近似曲線を求める。曲線形としては、月降水量を  $P$ 、月流出量を  $Q$  として、

$$Q = P \exp\left(-\frac{a}{P-b}\right) + c \quad (5.1)$$

が適切であると思われた。そこで図-5.3 に対して (5.1) 式を当てはめると次式が得られた。

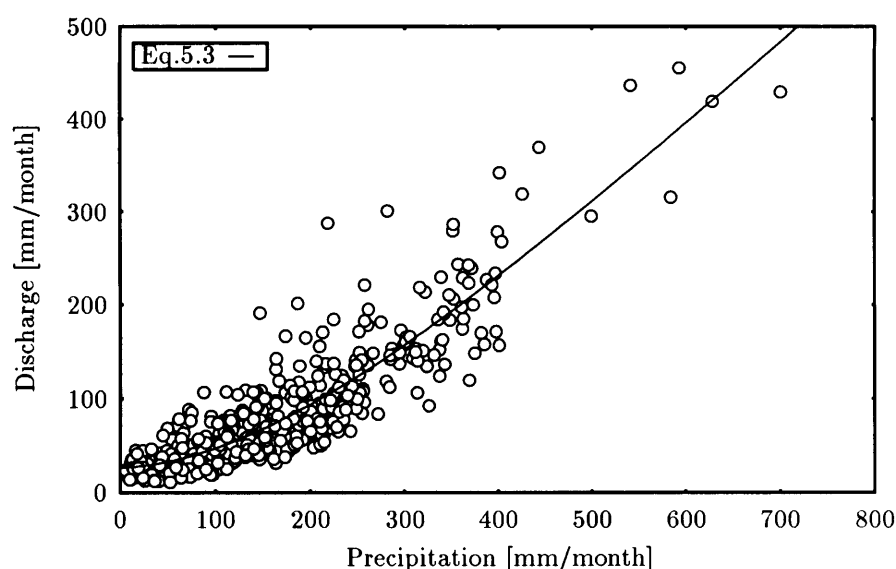


図 5.4: 東京大学愛知演習林白坂流域の月降水量・月流出量

$$Q_A = P \exp\left(-\frac{273.90}{P + 51.15}\right) + 0.08 \quad (5.2)$$

なお図-5.3 に (5.2) 式を併記しておいた。図-5.3 を見ると、点の分布と (5.2) 式の近似曲線はよく対応していると言えるだろう。

さて、(5.2) 式において大きな特徴のひとつは切片項がほぼ 0 だということである。月降水量が 0 の時に月流出量がほぼ 0 であるということは、換言すれば、無降雨期間でも流出が維持されるようないわゆる基底流出が袋山沢流域には存在しないということである。

参考のために、東京大学愛知演習林の白坂流域の月データを示す。図-5.4 に白坂流域における月降水量と月流出量の散布図を示した。用いたデータは 1949～1991 年の 43 年間の月データである。図-5.4 において、点の分布はばらついているものの、全体的には下に凸の曲線形を示していると認められよう。(5.1) 式を当てはめると次式が得られる。

$$Q = P \exp\left(-\frac{350.73}{P + 124.69}\right) + 26.18 \quad (5.3)$$

(5.3) 式において、切片項は 1% 水準で有意であった。白坂流域では、月降水量が 0 であっても月流出量は 0 にならず、26.18 mm/month の流出が発生するのである。日流出量に直すと約 0.9 mm/day である。白坂流域では一年を通じて約 1 mm/day の流量が維持されるということが経験的に知られていることを考えると、(5.3) 式の切片の値は妥当なものと言えるだろう。

さて、基底流量は流域貯留量の多寡に依存すると考えると、基底流出量が少ない袋山沢流域は流域貯留量が小さいものと考えられる。流域貯留量が小さいということは、ある期間における水収支を考えた時に重要な意味を持つ。

一般に、ある期間における流域水収支は次式のように表すことができる。

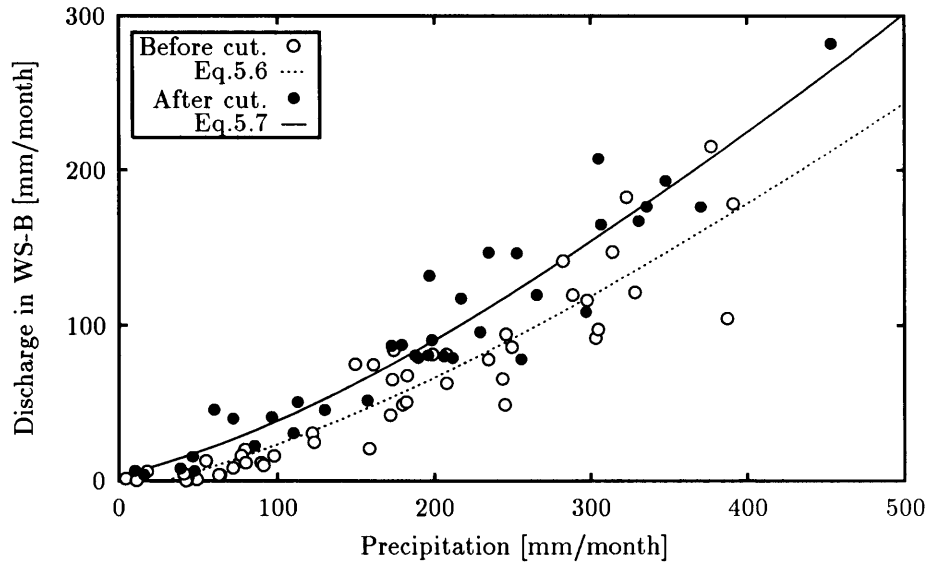


図 5.5: B 流域における月降水量と月流出量の関係

$$P = Q + L + \Delta S \quad (5.4)$$

ただし、 $P$ : 月降水量、 $Q$ : 月流出量、 $L$ : 月損失量、 $\Delta S$ : 流域貯留量の変動。

(5.4) 式において  $\Delta S$  が意味するものは、水収支期間の初端と末端における流域貯留量の差である。ここで流域貯留量が 0 と見做せるほど小さいとするならば、その差分である  $\Delta S$  も 0 とすることができる。その場合 (5.4) 式は、

$$P = Q + L \quad (5.5)$$

と書き換えることができる。すなわち、任意の水収支期間において、降水量と流出量の差分から損失量が高い精度で推定できるということを意味するのである。

蛇足ながら、B 流域の月降水量と月流出量の関係を図-5.5 に示した。伐採前後でそれぞれ (5.1) 式を当てはめると、

$$\text{伐採前)} \quad Q_B = P \exp\left(-\frac{679.05}{P + 489.44}\right) - 7.89 \quad (5.6)$$

$$\text{伐採後)} \quad Q_B = P \exp\left(-\frac{414.30}{P + 302.14}\right) + 3.28 \quad (5.7)$$

が得られる。

表 5.5: 伐採前期間における平均月流出量 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
WS-A	26.7	45.1	112.5	79.3	133.6	110.9	90.0	3.2	106.0	36.7	8.4	6.0	I
WS-B	29.2	45.6	104.0	76.8	117.9	101.4	80.9	4.5	93.2	37.0	11.5	7.3	II
差	2.5	0.5	-8.5	-2.5	-15.7	-9.5	-9.1	1.3	-12.8	0.4	3.1	1.4	II-I

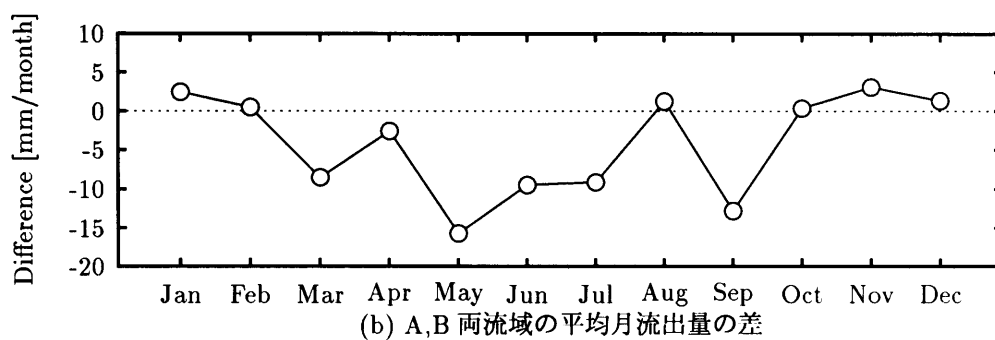
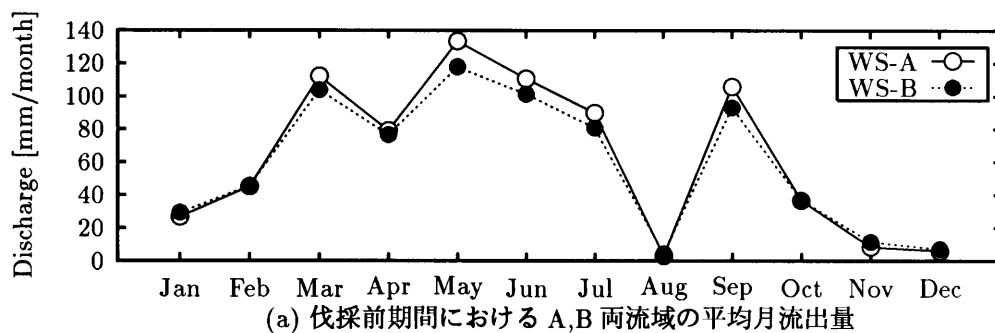


図 5.6: 伐採前期間における A,B 両流域の平均月流出量の差

## 5.2 水収支法による解析

### 5.2.1 平均月流出量の解析

#### 5.2.1.1 森林状態における A,B 流域の差異

ここでは、各月の平均月流出量を伐採前後で比較し、伐採による月流出量の変化を解析する。それに先立ち、まず、A,B 両流域ともに森林状態であった伐採前期間において、両流域の月流出量を比較し、両流域の月流出特性を明らかにする。

まず、伐採前期間における A,B 両流域の平均月流出量、および両流域の差（B 流域流出量から A 流域流出量を引いたもの）を表-5.5 に掲げた。また表-5.5 をグラフにすると図-5.6 が得られる。

まず A,B 両流域の月流出量の季節分布を見てみよう。図-5.6(a) に示されている通り、両流域ともに全体的には、夏期に流出量が多く、冬期に少ない山型の曲線形を示している。ただし 8 月には流出量は少ないが、これも両流域共通である。両流域の曲線はほぼ重なっており、両流域の月流出量はほぼ等しいと言ってよいだろう。

A,B 両流域の平均月流出量の差をグラフにしたものが図-5.6(b) である。図-5.6(b) において、縦

表 5.6: 平均月流出量の伐採前後の変化 [mm/month]

		Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
A	伐採前	26.7	45.1	112.5	79.3	133.6	110.9	90.0	3.2	106.0	36.7	8.4	6.0	I
	伐採後	88.4	15.8	66.5	25.9	44.8	128.5	123.4	46.7	130.2	142.8	43.2	19.1	II
	変化量	61.6	-29.3	-46.0	-53.3	-88.8	17.6	33.4	43.5	24.2	106.2	34.9	13.2	II-I
B	伐採前	29.2	45.6	104.0	76.8	117.9	101.4	80.9	4.5	93.2	37.0	11.5	7.3	III
	伐採後	109.3	30.1	93.4	48.2	70.8	149.0	120.1	60.3	153.8	169.8	66.2	45.7	IV
	変化量	80.1	-15.5	-10.6	-28.6	-47.1	47.6	39.3	55.8	60.6	132.8	54.8	38.4	IV-III
増加量		18.5	13.8	35.4	24.8	41.7	30.0	5.8	12.3	36.4	26.6	19.9	25.3	IV-III-II+

軸正值側は B 流域の方が流出量が大きく、負値側は A 流域の方が大きいことを意味する。さて図-5.6(b)を見ると、A,B 両流域の月流出量の差には季節性が認められる。すなわち、3～9 月の夏期には値がマイナスで、10～2 月の冬期には逆に値がプラスである。ただし 8 月は夏期であるがプラスの値を取っている。図-5.6 の (a) 図と (b) 図を比べると、曲線の凹凸がほぼ線対称になっていることがわかる。すなわち、月流出量が大きい夏期には A 流域の方が流出量が大きく、月流出量が少ない冬期には B 流域の方が流出量が大きい。

このことは、高水側では A 流域の方が流量が大きく、低水側では B 流域の方が流量が大きい、という袋山沢流域の流出特性に一致する。また表-5.5 から両流域の差の総計を求めると -48.9 mm となるが、これは年水収支における両流域の差-49.1 mm/year とほぼ一致するものであった。

### 5.2.1.2 伐採による月流出量の変化

次に、基準流域である A 流域を対照とし、伐採による B 流域の月流出量の変化を解析する。

表-5.6 に、A,B 各流域の伐採前後期間の平均月流出量、伐採後期間の平均月流出量から伐採前期間のそれを引いた「変化量」、および B 流域の変化量から A 流域のそれを引いた「増加量」を一覧にして掲げた。図-5.7 は表-5.6 をグラフにしたものである。なお参考のために月降水量のグラフを図-5.7 の最上段に併記した。

さてまず月降水量について見てみよう。図-5.7(a)によると、伐採前期間の月降水量は、夏期に多く冬期に少ないという季節性が比較的明瞭に現れているが、伐採後期間においてはさほど明瞭には認められない。伐採前期間に比べて伐採後期間の月降水量は、冬期の 11～1 月では多くなり、夏期の 3～5 月では少なくなり、夏期と冬期の較差が小さくなって曲線形が全体的に平坦になった。また 8,10 月の値が伐採後期間の方が大きいことも指摘できるが、この変化は台風による大降雨の有無が原因であると思われる。伐採前後で比較すると、2～5 月および 7 月は伐採後期間の方が降水量が少なく、それ以外の月では伐採後期間の方が降水量が多かった。

A 流域および B 流域の月流出量は図-5.7(b) および (c) に示されている。A,B 両流域ともに、伐採前後期間の月流出量の曲線形はそれぞれ月降水量の曲線形に似ている。伐採前後で比較すると、両流域ともに、2～5 月は伐採後期間の方が流出量が小さく、それ以外の月では伐採後期間の方が流出量が大きい。(a) 図・降水量は 2～5 月に加えて 7 月も伐採後期間の方が小さかったが、これに対して流出量では 7 月は伐採後期間の方が大きかった。

A,B 各流域で伐採前後の差を取ると図-5.7(d) が得られる。図-5.7(d) において、縦軸正值側は伐採後期間の方が流出量が多いことを、負値側は伐採後期間の方が流出量が少ないことを意味する。さて図-5.7(d) から、変化量の符号を見ると、両流域ともに 2～5 月はマイナスで、それ以外の月は

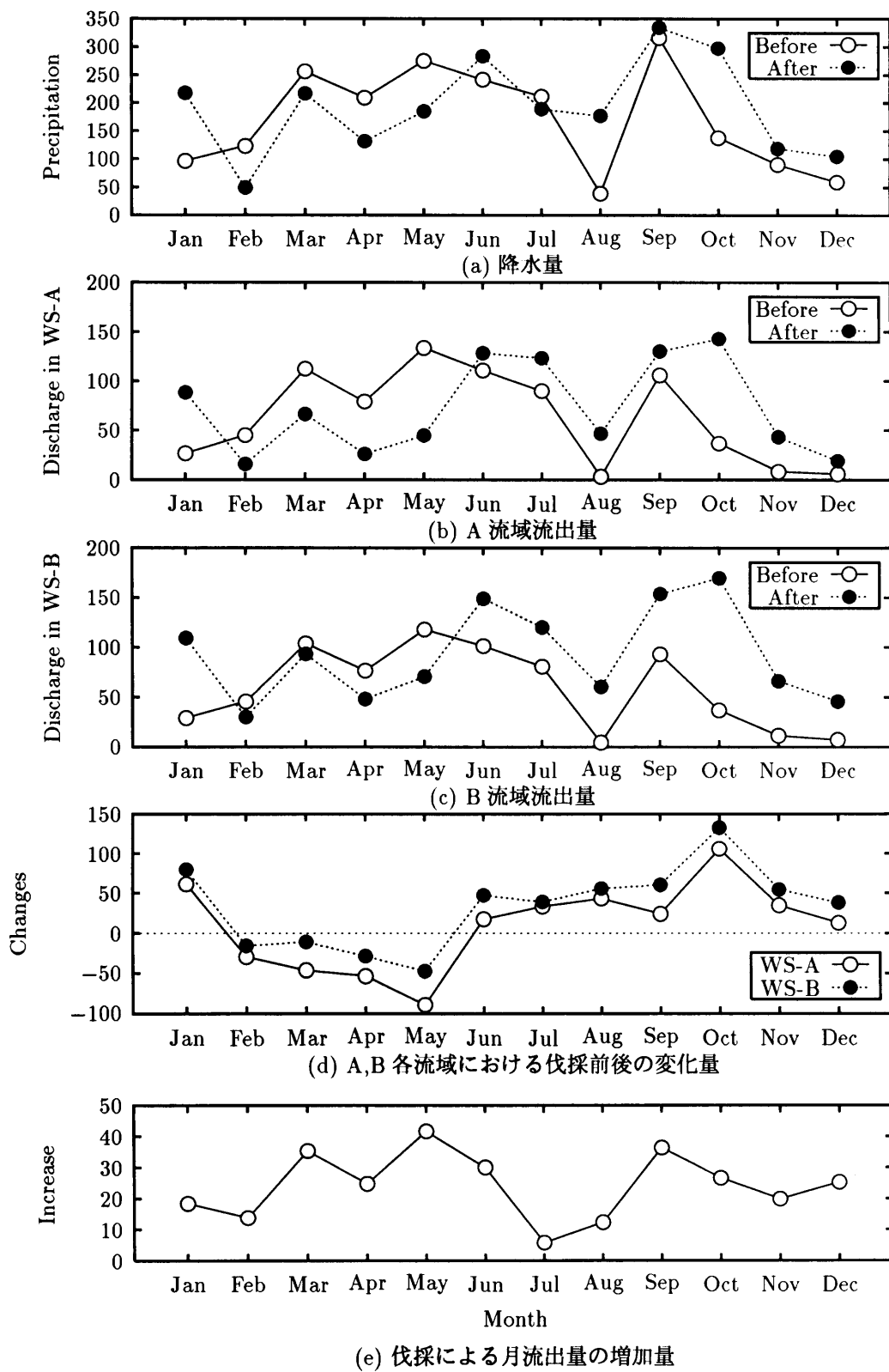


図 5.7: 袋山沢流域における平均月水収支とその変化 [mm/month]

プラスであるが、これは伐採前後の降水量の違いによるものと思われる。A, B 両流域の曲線形を比較すると、2本の曲線の凹凸はほとんど同じ形状であると認められる。曲線の位置を比較すると、A流域の曲線に比べてB流域の曲線の方が上側に位置していることがわかる。すなわち、伐採前期間を基準とした伐採後期間の相対的な流出量は、A流域よりもB流域の方が多かった。

図-5.7(d)における2曲線の差を取ると図-5.7(e)が得られる。図-5.7(e)はB流域の伐採前後の変化量からA流域の変化量を引いたもので、伐採によるB流域の月流出量の増加量を意味している。さて図-5.7(e)を見ると、1月から12月までの全ての月において増加量はプラスの値になっている。すなわち、森林伐採によってB流域の月流出量は増加した。各月の増加量に着目すると、3～6月の春季および9,10月の秋季は比較的增加量が大きく、11～2月の冬季および7,8月の夏季は比較的小さいという傾向がある。増加量が最大となったのは5月で41.7 mm/month、最小となったのは7月で5.8 mm/month、各季で平均を取ると、春季(3～6月)は33.0 mm/month、夏季(7,8月)は9.1 mm/month、秋季(9,10月)は36.5 mm/month、冬季(11～2月)は19.4 mm/monthであった。

## 5.2.2 短期水収支法による解析

### 5.2.2.1 理論と方法

短期水収支法とは、降水量と流出量の差から流域蒸発散量を推定する流域水収支法を、数日という比較的短期間に適用することで、流域蒸発散量の季節変化を求める方法である。

一般に流域水収支は次式のように表すことができる。

$$E = P - Q - \Delta S \quad (5.8)$$

ただし、 $E$ : 流域蒸発散量、 $P$ : 流域降水量、 $Q$ : 流域流出量、 $\Delta S$ : 流域貯留量の変動。

(5.8)式において、流域降水量と流域流出量から流域蒸発散量を推定するためには、貯留量変動 $\Delta S$ の値を見積もる必要がある。短期水収支法では、 $\Delta S$ が0もしくは無視できるくらい小さな値となるように水収支期間を定めることでこの問題を解決する。

いま、流域貯留量 $S(t)$ が、流域からの流出量 $q(t)$ と流出量の時間変化 $dq/dt$ の関数で表されると仮定すると、 $q(t)$ および $dq/dt$ のいずれもが等しい時刻 $t_1, t_2$ において、 $S(t_1)$ と $S(t_2)$ は等しいことになる。このとき、時刻 $t_1$ と $t_2$ との間で水収支を取れば、 $\Delta S$ を0と見做すことができる。

水収支期間の定め方として、高瀬・丸山(1978)は、流出量 $q(t)$ が貯留量 $S(t)$ のみの関数として十分に近似されると考えられる地下水流出段階時の流量 $q_c$ を定め、ハイドログラフの逓減部に $q_c$ が現れる時刻を水収支期間の起点・終点と定める方法を用いた。これに対して鈴木(1985)は、基準流量を一つに限定する必要はないとし、起点・終点の流量の差がある比率以内になるように水収支期間を定める方法を採用した。

本論文においては、解析期間が伐採前期間4水年、伐採後期間3水年といずれも短いため、サンプル数を多く確保できる鈴木(1985)の方法に倣った。ただし、サンプル数の確保や、袋山沢流域の流出特性のために、鈴木(1985)とまったく同じ基準は適用できなかった。

鈴木(1985)の論文から、水収支期間の選定法を詳しく引用しよう。

1. 先行する2日間に降雨がなく、当日も無降雨である日を水収支の起日、終日の候補とする。
2. この候補間で、日流出量の差が日流出量の2%以内である日の組を $t_1, t_2$ とする。



3. この組のうち、期間が8日以内のもの、60日以上のものを除外する。

条件1について、鈴木(1985)は、 $S(t)$ に $dq/dt$ の影響が大きい直接流出やそれに続く早い中間流の段階のものを除くための条件であると記している。そこで本研究では、サンプル数確保のために、先行する2日間に降雨があっても、その量が小さいもの(1,2 mm/day程度以下)であれば、ハイドログラフの逓減曲線に変化が認められない場合に限り起日・終日の候補とした。

条件2について、袋山沢流域では流出の逓減が急であり、また日流量のオーダーが大きく変動するため、日流量の比率を基準にするのは不適當であった。そこで本研究では、起日・終日の日流出量の実量差を基準とし、実量差が0.1 mm以内を選定基準に定めた。

条件3について、サンプル数確保のために、本研究では6~70日とした。

また鈴木(1985)は渇水による蒸発散量低下が見られる期間は集計から除外しているが、本研究は伐採による変化の実量を算出することを目的とするため、渇水時のデータも集計に含めた。袋山沢流域では渇水時に流出が停止するが、流出が停止した期間を含むような水収支期間であっても集計に含めたことを注記しておく。

ここで、特に記しておかなければならないことは、基準流域の水収支期間の定め方についてである。袋山沢流域はA流域を基準流域、B流域を処理流域として伐採実験が行なわれた流域であるが、伐採後は当然として、両流域ともに森林状態であった伐採前においても、A流域とB流域のハイドログラフは異なっている。既に何度か述べた通り、高水側ではA流域の方が流量が大きく、低水側では逆にB流域の方が流量が大きい。短期水収支法では流量が比較的小さい日を水収支期間の起点・終点に定めるため、特に低水側での両流域の流出特性の差は水収支期間の差異を生じさせる原因となる。

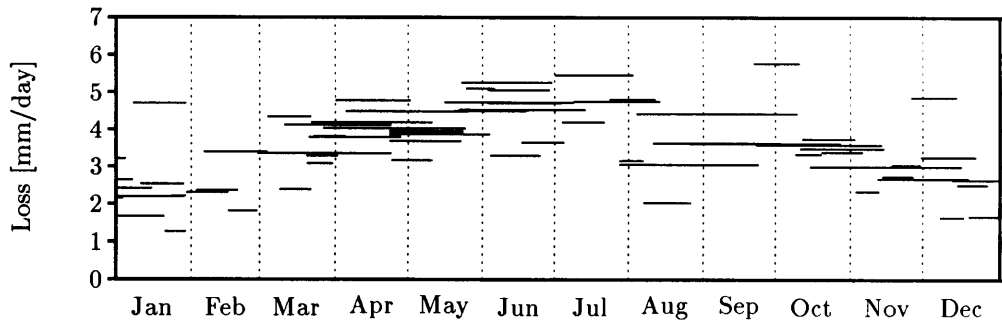
A,B各流域独立に水収支期間を選定して算出された蒸発散量を比較すると、水収支期間にずれがあるために算出値にムラが生じ、結果が安定しない現象が生じた。この現象を回避するために、本研究においては、A流域の水収支期間はB流域のものに合わせた。なおA流域の水収支期間の違いによる結果の相違については次項で詳しく述べる。

さて、B流域の日降水量、日流出量データから上述の条件に当てはまる期間を選定したところ、伐採前期間68例、伐採後期間69例が得られた。年数の短い伐採後期間の方がサンプル数が多いが、これは伐採によってB流域の基底流出が多くなったために上述の条件に当てはまるデータが得られやすくなったためであると思われる。

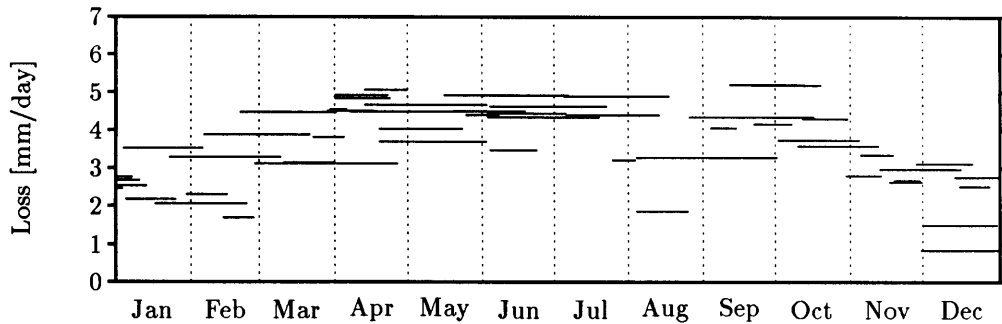
得られた水収支期間の統計値を記しておく。

伐採前期間68例について、各水収支期間の日数の平均値±標準偏差は $28.5 \pm 16.2$ 日、最小値~最大値は7~68日であった。各水収支期間の起点と終点のB流域日流量の差は平均値±標準偏差で $0.0086 \pm 0.010$  mm、最小値~最大値は $0.000059 \sim 0.00433$  mmであった。起点のB流域日流量を終点のB流域日流量で除した値が、 $0.98 \sim 1.02$ に含まれたものは25例(37%)、 $0.95 \sim 1.05$ に含まれたものは52例(76%)あった。5例(7%)は起点・終点ともにB流域日流量は0であった。

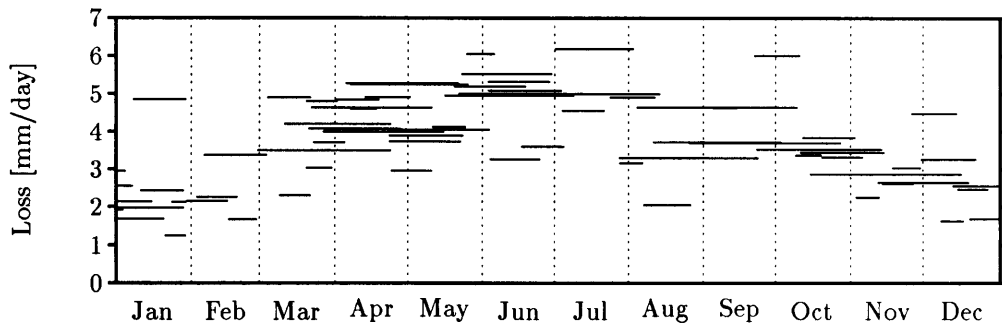
伐採後期間69例について、各水収支期間の日数の平均値±標準偏差は $27.0 \pm 15.2$ 日、最小値~最大値は6~63日であった。各水収支期間の起点と終点のB流域日流量について差を求めると、平均値±標準偏差は $0.015 \pm 0.016$  mm、最小値~最大値は $0.00037 \sim 0.092$  mmであった。起点のB流域日流量を終点のB流域日流量で除した値が、 $0.98 \sim 1.02$ に含まれたものは33例(48%)、 $0.95 \sim 1.05$ に含まれたものは63例(91%)あった。



(a) A 流域伐採前期間



(b) A 流域伐採前期間（独立）



(c) B 流域伐採前期間

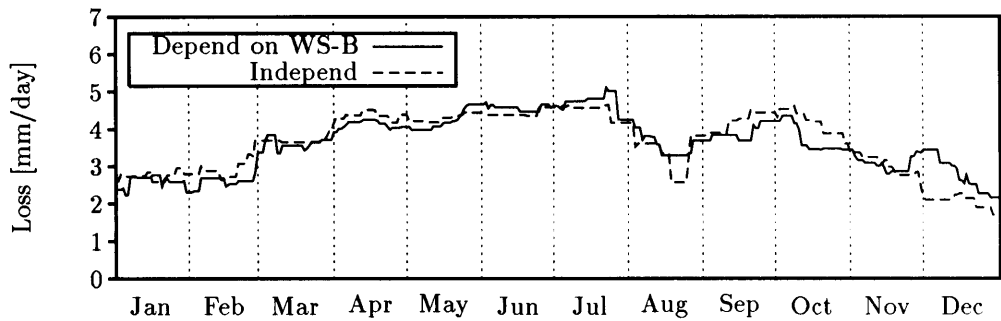
図 5.8: 短期水収支法の適用結果（伐採前期間）

### 5.2.2.2 伐採前期間における A,B 両流域の差異

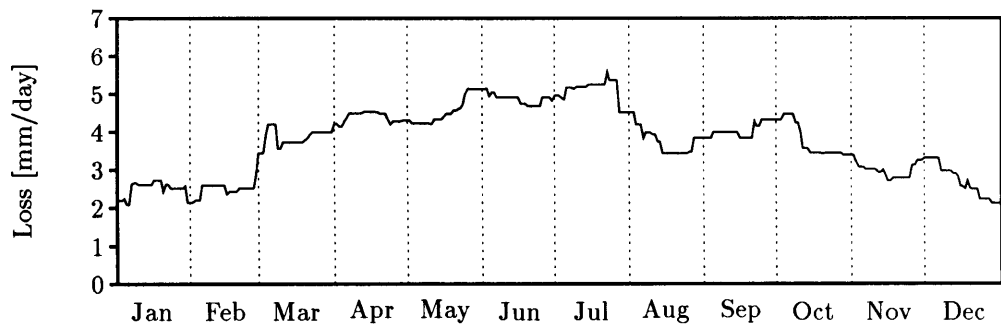
伐採による蒸発散量の変化を論じる前に、A,B 両流域ともに森林状態であった伐採前期間における両流域の蒸発散量の差異を確認しておく必要があるだろう。

まずはじめに、伐採前期間における各流域の短期水収支法の適用結果を図-5.8 に示す。図-5.8 には A 流域の図が 2 枚掲げられているが、このうち (a) 図は水収支期間を B 流域のものに合わせた場合の結果で、(b) 図は A 流域独立で水収支期間を選定した場合の結果である。

さて図-5.8 を見ると、各水収支期間の平均日損失量は、各図ともに、夏期に多く、冬期に少ない山型の分布をしていることがわかる。各水収支期間の平均日損失量の推定値の範囲は、少数の例外を除き、夏期では約 3~6 mm/day、冬期では約 1~3 mm/day であった。



(a) A 流域伐採前期間



(b) B 流域伐採前期間

図 5.9: 短期水収支法による平均日蒸発散量

次に、図-5.8の各図において、一日ごとに、同日に属する推定値を平均すると、図-5.9が得られる。A流域の結果を示した(a)図には、水収支期間をB流域に合わせたものと、A流域独立で選定したものと、2本の曲線を併記した。さて図-5.9の各図において、平均日損失量の曲線はともに山型の曲線形を示している。すなわち、日損失量はA,B両流域ともに、夏期に多く冬期に少なくなるという季節変化が見られた。各図ともに、最小となるのは1,2月で、その値は約2.5 mm/dayである。また最大となるのは7月で、値は約5 mm/dayであった。夏季の中でも8月は7,9月に比べて値が小さくなるが、これは夏季の乾燥による蒸発散減少のためであると思われる。

図-5.9の(a)図に示した2本の曲線を比較すると、水収支期間をB流域のものに合わせた場合とA流域独立で選定した場合とでは、12月前半部に1 mm程度の違いが見られるものの、全体としてはよく似た曲線形であり、ほとんど違いは見られなかった。

しかし、両曲線の違いはB流域との差を求めた時に明瞭に現れた。図-5.10は図-5.9の(b)図から(a)図を引いて得られた、A,B流域の平均日損失量の差である。図-5.10を見ると、A流域の水収支期間をB流域に合わせたかA流域独立で選定したかによって、曲線の特徴が異なることがわかる。B流域に合わせて水収支期間を取った方は曲線がなめらかで、値の変動幅が比較的小さいのに対し、A流域独立で水収支期間を取った方は、曲線がギザギザしており、値の変動幅が大きい。

日損失量はゆるやかに季節変化すると考えられるので、A,B両流域の日損失量の差も同様にゆるやかに季節変化するものと考えられる。しかるに図-5.10に示されたギザギザの曲線はゆるやかな季節変化と言うにはほど遠く、推定値として望ましいものとは思われなかった。短期水収支法は水収支期間の取り方に強く依存する方法であるため、A流域とB流域とで異なる水収支期間を採用

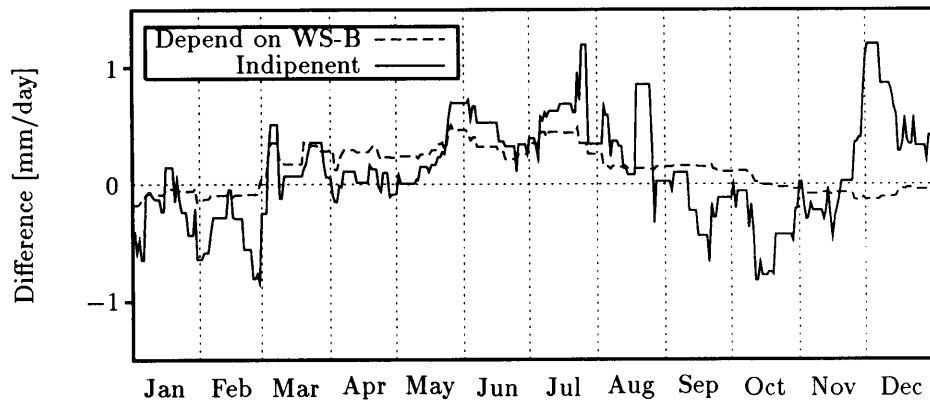


図 5.10: 伐採前期間における A,B 流域の損失量の差

することは基準流域と処理流域を比較するという対照流域法の方法論から避けるべきであると判断された。そこで以下の解析においては A 流域の水収支期間は B 流域に合わせたものを対象とする。

さて図-5.10 から水収支期間を合わせた方の曲線を見ると、3 月から 10 月半ばまでは曲線は正值側にあり、10 月半ばから 2 月までは逆に曲線は負値側にある。図-5.10 において、縦軸正值は B 流域の方が損失量が多いことを、負値側は A 流域の方が損失量が多いことを意味するから、3 月から 10 月半ばの夏期では B 流域の方が損失量が多く、10 月半ばから 2 月の冬期では逆に A 流域の方が損失量が多いという結果となった。両流域の損失量の差は、夏期は  $0.1 \sim 0.4 \text{ mm/day}$ 、冬期は約  $-0.1 \text{ mm/day}$  であった。曲線全体を横軸方向で積分すると  $45.8 \text{ mm/year}$  となるが、この値は年水収支から求めた両流域の損失量の差  $49.1 \text{ mm/year}$  とほぼ等しいものである。

### 5.2.2.3 伐採による損失量の変化

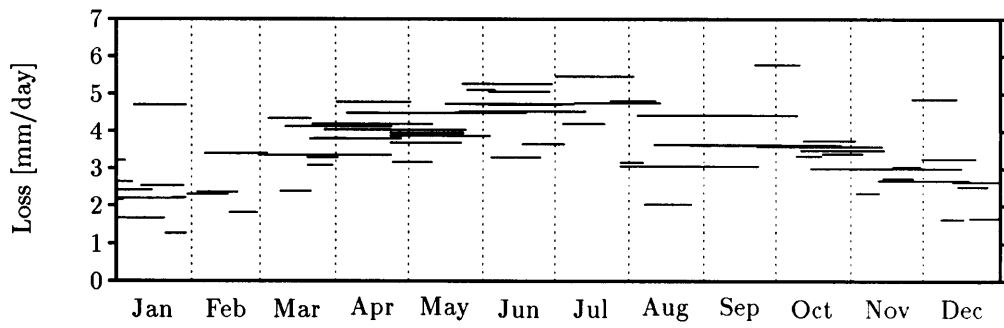
次に、伐採による損失量の変化を対象流域法によって解析する。

まず基準流域である A 流域について、伐採前後での損失量の変化を見てみよう。A 流域は植生が保存された流域であるから、A 流域の伐採前後の差は気象などの外的条件によるものと理解できる。

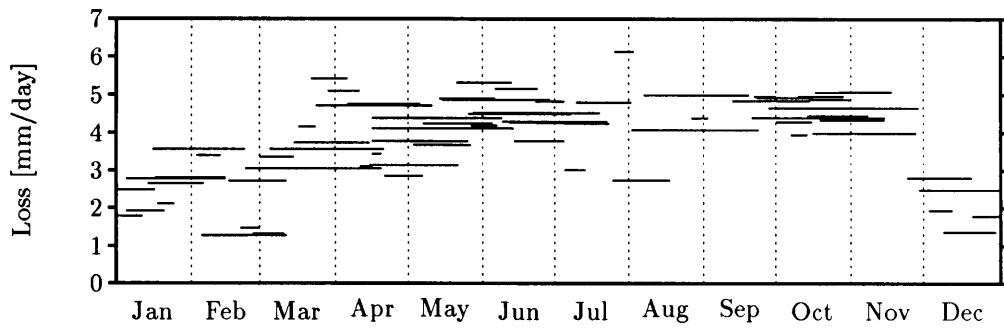
まず伐採前後期間での短期水収支法の適用結果を図-5.11 の (a) 図および (b) 図に示す。なお図-5.11(a) は図-5.8(a) と同一である。図-5.11(a)(b) とともに、夏期に高く冬期に低い山型の分布をしていること、日損失量の値が約  $1 \sim 6 \text{ mm}$  の範囲にあることが共通して観察される。

図-5.11(a)(b) をそれぞれ一日ごとに平均すると図-5.11(c) が得られる。図-5.11(c) から、両曲線はともに約  $2 \sim 5 \text{ mm/day}$  の範囲にあり、損失量自体は伐採前後で変化していないことがわかる。伐採前後で曲線を比較すると、1~7 月は両曲線はほぼ重なっているが、8~11 月では伐採後期間の曲線の方が上側に位置しており、12 月は逆に伐採後期間の曲線が伐採前の曲線の下側に位置している。

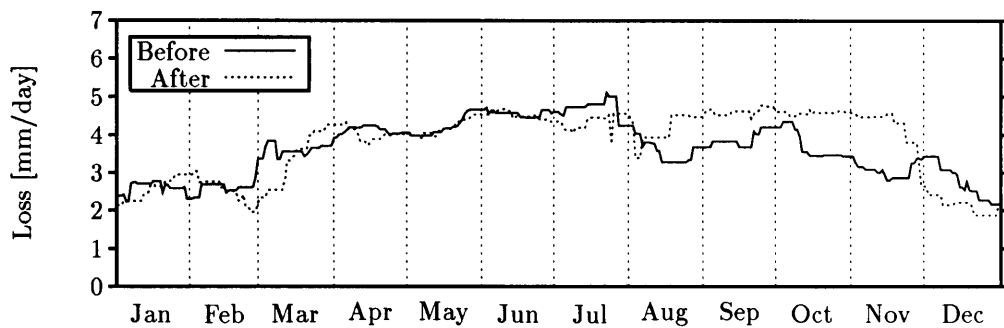
図-5.11(c) において伐採後期間の日損失量から伐採前期間の日損失量を引いて、両期間の日損失量の差を求めると図-5.11(d) が得られる。図-5.11(d) において縦軸正值側は伐採後期間の方が日損失量が多いことを意味し、逆に負値側は伐採後期間の方が少ないことを意味する。さて図-5.11(d)



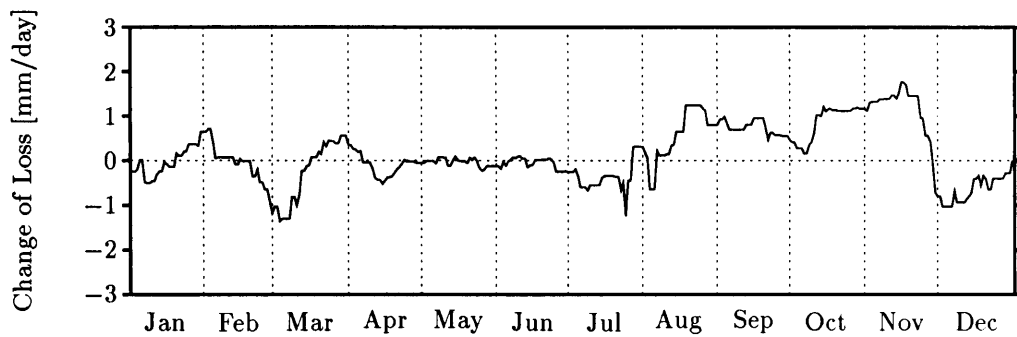
(a) 短期水収支法の適用結果（伐採前期間）



(b) 短期水収支法の適用結果（伐採後期間）



(c) 伐採前後期間それぞれの平均日損失量



(d) 平均日損失量の伐採前後の差

図 5.11: A 流域の損失量

から A 流域における伐採前後の日損失量の変化を見ると、8～11 月は伐採後期間の方が損失量が大きく、3 月上旬および 12 月上旬は逆に伐採後期間の方が小さい。その他の月では伐採前後では変化はない。値の範囲は  $\pm 1.5$  mm/day 程度である。

続いて処理流域である B 流域の伐採前後の日損失量の変化を調べる。

図-5.12(a) および (b) に示したのは B 流域における短期水収支法の適用結果である。ただし (a) 図は図-5.8(c) として既出である。さて図-5.12(a)(b) より、B 流域の日損失量は伐採前後ともに、夏期に多く冬期に少ない山型の季節変化をしていることがわかる。値の範囲は両図ともに約 1～6 mm/day であった。

図-5.12(a)(b) のそれぞれについて、一日ごとに日損失量の平均値を取ると図-5.12(c) が得られる。図-5.12(c) から伐採前後で日損失量の範囲を見ると、伐採前期間では約 1.5～4.5 mm/day であったが、伐採後期間では約 2～5 mm/day で、伐採後期間の方が 0.5 mm/day ほど範囲が増加方向に移動した。伐採前後の曲線を比較すると、3～7 月および 12 月において伐採後期間の方が日損失量が小さかったが、他の月では伐採前後でほとんど変化が見られなかった。

伐採後期間の平均日損失量から伐採前期間の平均日損失量を引いて伐採前後の日損失量の差を求めると、図-5.12(d) が得られる。図-5.12(d) において縦軸正值側は伐採後期間の方が日損失量が多いことを意味し、逆に負値側は伐採後期間の方が少ないことを意味する。さて図-5.12(d) から B 流域における伐採前後の日損失量の変化量を見ると、全体的に負値側に偏っていることがわかる。変化量がプラスの値を取るのはほぼ 8～11 月のみである。値の範囲は約  $-2.5 \sim 0.5$  mm/day であった。

図-5.11(d) に示した A 流域日損失量の伐採前後の変化量、および図-5.12(d) に示した B 流域日損失量の伐採前後の変化量を併記したものが図-5.13(a) である。図-5.13(a) から A, B 両流域の変化量を比較すると、曲線の形状は互いによく似ており、曲線の凹凸がほぼ一致するが、曲線の位置関係では A 流域に比べて B 流域の曲線の方が全体的に下側に位置している。

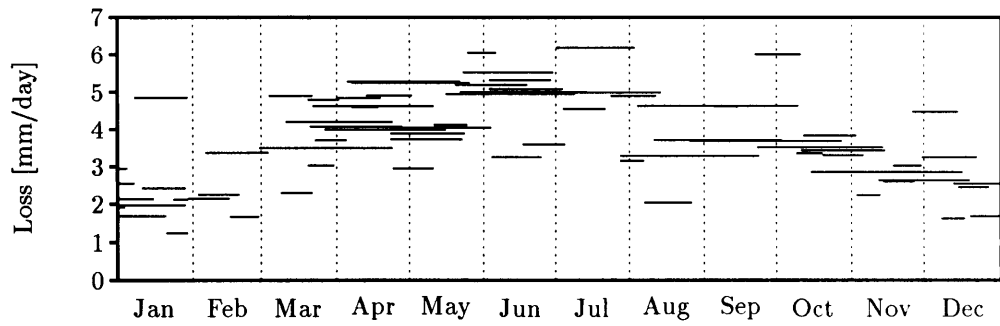
B 流域の変化量から A 流域の変化量を引いて、伐採による B 流域の日損失量の増加量を算出すると、図-5.13(b) が得られる。図-5.13(b) において、縦軸正值側は伐採によって損失量が増加したことを意味し、負値側は逆に減少したことを意味する。さて図-5.13(b) を見ると、増加量の曲線は、7 月の一部を除くほぼすべての月において縦軸負値側に位置している。すなわち、森林の伐採によって日損失量はほぼ年間を通じて減少したことが示された。日損失量の減少量は季節によって異なっている。3～5 月の春季および 10, 11 月の秋季では減少量は比較的大きく、値は約  $-1$  mm/day であった。一方 6～9 月の夏季および 12～2 月の冬季では  $-0.5$  mm/day 程度の値で、春季・秋季の半分程度の減少であった。

### 5.2.3 月水収支と短期水収支の比較

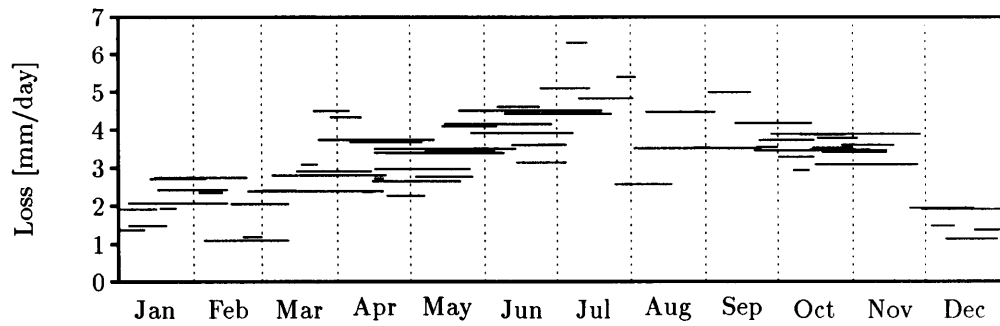
以上、月水収支の解析から伐採によって月流出量が増加したことを、短期水収支の解析から伐採によって日損失量が減少したことが明らかとなった。ここで、月水収支の結果と短期水収支の結果を比較してみよう。

まず、増減の方向についてであるが、水収支式  $P = Q + L$  からわかる通り、流出量と損失量は和一定の関係にあり、一方が増加すれば他方は減少するという関係にある。したがって、流出量は増加し損失量は減少したという本解析結果は整合的である。

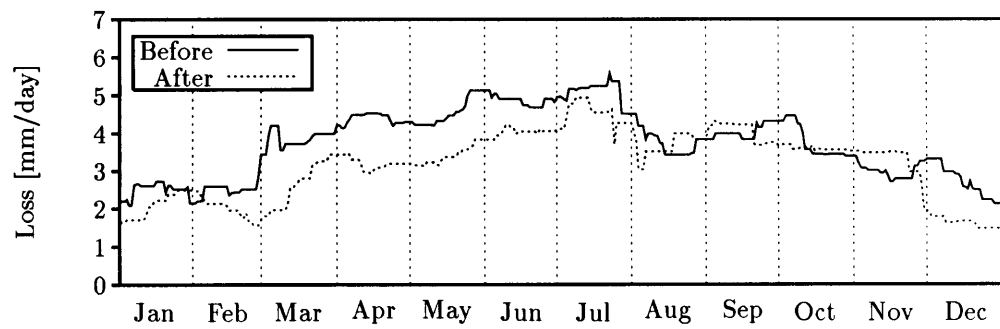
変化の季節性について言うと、流出量の増加が比較的多かったのは 3～6 月および 9, 10 月であったのに対して、損失量の減少が比較的多かったのは 3～5 月および 10, 11 月であった。両者には若干のずれがあるものの、おおまかに見れば春季および秋季に比較的大きな変化が見られたという点



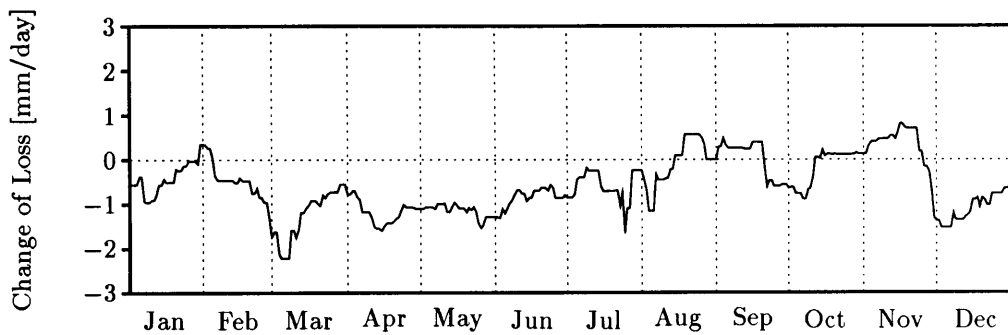
(a) 伐採前期間



(b) 伐採後期間

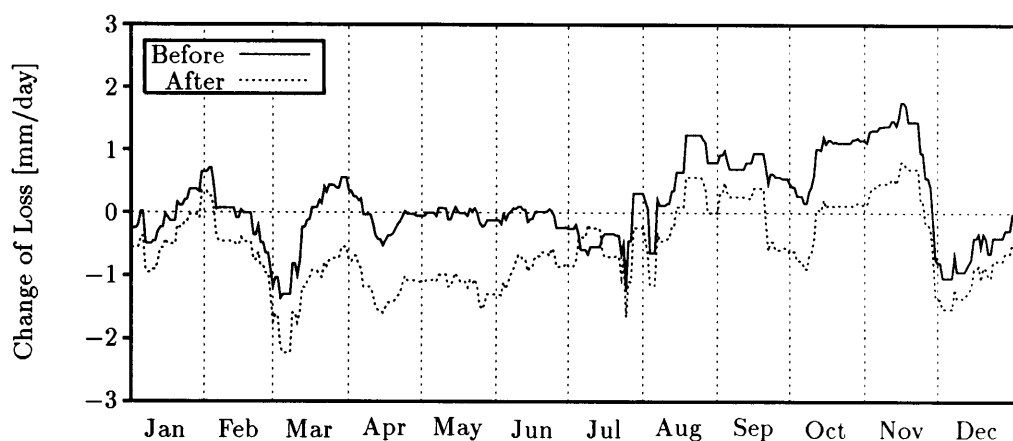


(c) 伐採前後の平均値の比較

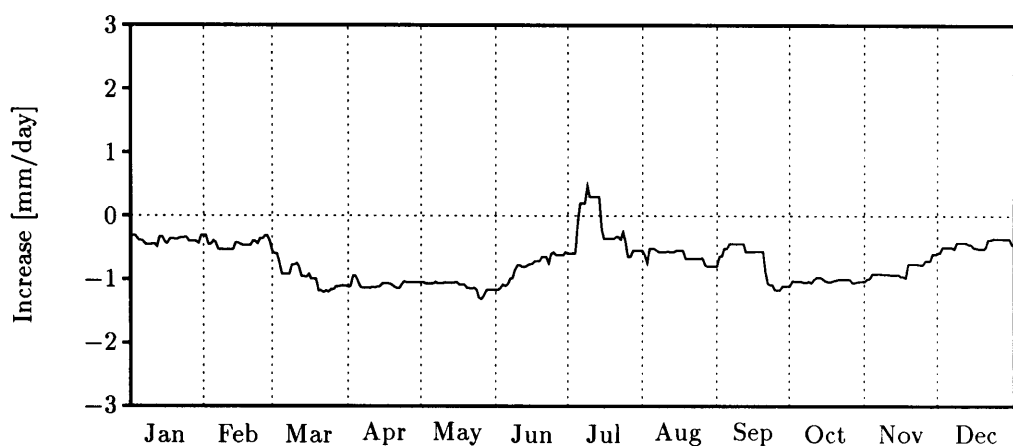


(d) 伐採前後の差

図 5.12: B 流域の損失量の変化



(a) 各流域の伐採前後の変化量



(b) 伐採による変化量

図 5.13: 伐採による損失量の変化

は一致している。流出量の増加量と損失量の減少量を比較すると、まず春季・秋季では流出量の増加は 33.0 もしくは 36.5 mm/month、損失量の減少は約 1 mm/day で、単位を変換すればほぼ一致している。冬季では流出量の増加は 19.4 mm/month、損失量の減少は約 0.5 mm/day で、やはりほぼ一致している。夏季は損失量の値が一定でないので比較しにくい、一部に減少ではなく増加が見られることにより冬季に比べて減少量が少ないという点は流出量の増加量と一致している。

流出量の増加量を示した図-5.7(e) と、損失量の減少量を示した図-5.13(b) を比べると、流出量の増加量はグラフの凹凸が多く、ギザギザした感じになっているのに対し、損失量の減少量のグラフは比較的凹凸が少なくなめらかな曲線である。これは短期水収支法が水収支期間を暦月とは無関係に選定するため、結果として一種の移動平均のような作用が発生するためだと思われる。



## 5.3 対照流域法による解析

### 5.3.1 A,B 両流域の月流出量の関係

はじめに、伐採前後期間における A,B 両流域の月流出量を対比した散布図を図-5.14 に示す。図-5.14(a) はグラフ全体を表示し、図-5.14(b) はグラフの原点付近を拡大して表示した。

さて図-5.14 から、まずは伐採前期間における A,B 両流域の月流出量の関係について見てみよう。図-5.14(a) から伐採前期間の点の分布を全体的に見ると、原点から右上にかけて直線状に付置しており、A 流域と B 流域の月流出量が強い線形の関係にあることが認められる。ただし図-5.14(b) によると、原点近傍とそれ以外の区間では分布の傾向が異なる。すなわち、原点近傍では点の分布は比較的急な傾きの直線状であるのに対して、原点から離れた区間では比較的緩やかな傾きである。図-5.14(b) から、傾きの変曲点は  $Q_A = 20 \text{ mm/hour}$  付近にある。そこで  $Q_A = 20 \text{ mm/hour}$  の前後で区間を区切り、それぞれに対して回帰直線を求めると次の各式が得られた。

$$Q_A < 20) \quad Q_B = 1.2963Q_A + 0.41 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.95) \quad (5.9)$$

$$Q_A \geq 20) \quad Q_B = 0.8343Q_A + 8.52 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.99) \quad (5.10)$$

両式は、回帰の有意性および決定係数ともに高く、回帰が有効であることが示されている。

さて (5.9) 式と (5.10) 式において、回帰直線の傾きを比較すると、原点近傍の (5.9) 式では 1 よりも大きい、一方の (5.10) 式では 1 よりも小さい値であった。このことに関連して、図-5.14 から点の分布位置を見ると、原点近傍では各点は 1:1 ラインの上側に位置する傾向があるが、原点から離れた区間では逆に各点は 1:1 ラインの下側に位置している。これらのことは A,B 両流域の流出特性の差、すなわち、高水側では A 流域流量の方が大きく、低水側では逆に B 流域流量の方が大きいという性質の影響であると推察される。

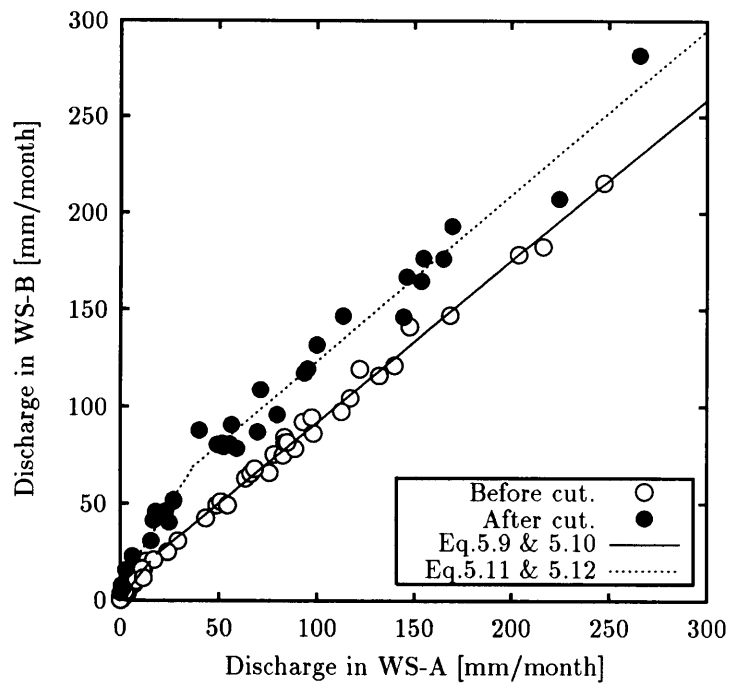
次に、伐採後期間における A,B 両流域の月流出量の関係について見てみよう。まず両期間で点の分布を比較すると、伐採後期間の点の分布域は、伐採前期間の点の分布域に対して上側に位置していることがわかる。すなわち、伐採によって B 流域の月流出量は増加したことが示されている。伐採後期間の点の分布は、伐採前期間と同様に、原点近傍とそれ以外の区間でそれぞれ直線状になっている。ただし、両区間の境目となる位置が伐採前後で異なり、伐採前期間では  $Q_A = 20 \text{ mm/month}$  付近であったのに対し、伐採後期間では  $Q_A = 35 \text{ mm/month}$  付近である。そこで  $Q_A = 35 \text{ mm/month}$  で区間を区切り、それぞれに対して回帰直線を求めると次の各式が得られた。

$$Q_A < 35) \quad Q_B = 1.6661Q_A + 7.62 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.94) \quad (5.11)$$

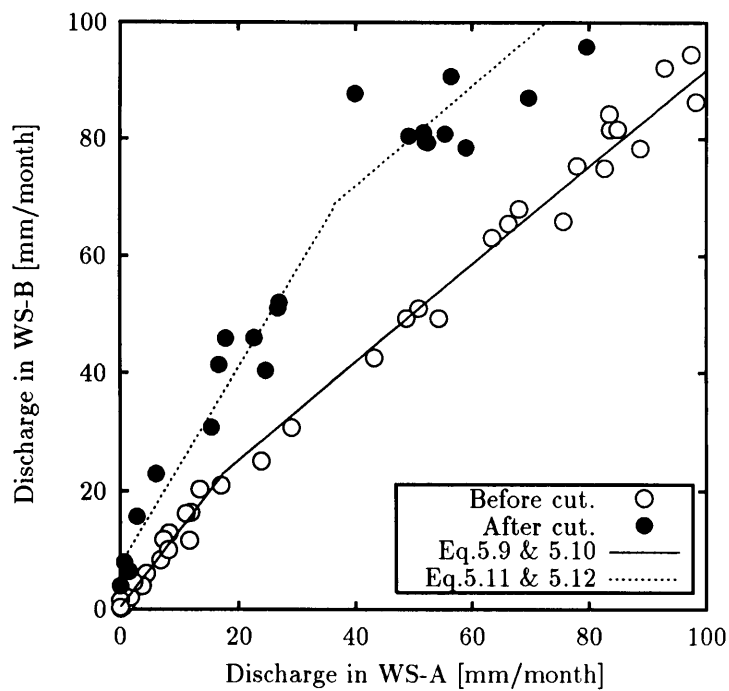
$$Q_A \geq 35) \quad Q_B = 0.8587Q_A + 37.58 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.97) \quad (5.12)$$

両式の傾きは、原点近傍では 1 以上で、原点から離れた区間では 1 以下の値である。この特徴は伐採前期間と共通している。

伐採前後で回帰式を比較すると、(5.9) 式に比して (5.11) 式の方が、また (5.10) 式に比して (5.12) 式の方が、回帰の決定係数が低い。すなわち、原点近傍および原点から離れた区間のいずれにおいても伐採後期間の方が決定係数が低い。このことは図-5.14 から認められる。図-5.14 において伐採前後の点の分布域を比べると、伐採前期間がタイトな直線状であるのに対して、伐採後期間は幅広い帯状の分布域を形成しており、点のバラツキは伐採後期間の方が大きいことがわかる。



(a) 全体図



(b) 原点付近拡大図

図 5.14: A,B 流域の月流出量対比図

### 5.3.2 出水規模と伐採の影響

伐採による月流出量の増加量は、伐採後に実際に観測された月流出量から、仮に伐採しなかったとした場合に得られたであろう月流出量の推定値を引けば算出できる。図-5.14 で言えば、伐採後期間の点と伐採前期間の回帰直線の差を求めればよい。しかし、その方法で算出した増加量を解析したところ、大出水が発生した月は他の月と異なる挙動を示すことがわかった。

そこで、大出水時の流出特性が平常時とどう異なるのか調べることにした。図-5.15 は、A,B 両流域の時間流出量を対比した散布図である。伐採前後で点の分布域が重なっているため、伐採前後の比較にはベジエ曲線による平滑化曲線を用いることとした。ただし、点は両期間ともに原点近傍に集中しており、制御点の分布に疎密があるため、グラフの全体を 1 本のベジエ曲線で平滑化すると疎区間の近似性が良くなかった。そこで両期間ともに密区間と疎区間とで 2 本のベジエ曲線で平滑化してある。伐採前期間は密区間が  $Q_A < 7 \text{ mm/hour}$ 、疎区間が  $Q_A > 5 \text{ mm/hour}$  の範囲で平滑化を行ない、伐採後期間は密区間が  $Q_A < 6.5 \text{ mm/hour}$ 、疎区間が  $Q_A > 4.8 \text{ mm/hour}$  の範囲で平滑化した。

さて図-5.15(c) から、伐採前後期間の平滑化曲線を比較すると、 $Q_A = 10 \text{ mm/hour}$  付近および  $Q_A = 15 \text{ mm/hour}$  付近を境に傾向が異なっている。まず  $Q_A < 10 \text{ mm/hour}$  の区間では、伐採後期間の曲線が伐採前期間よりも上側に位置しており、伐採によって B 流域の時間流出量が増加したことが示されている。それに対し  $Q_A > 10 \text{ mm/hour}$  の区間では、両期間の曲線はほぼ重なり合っており、伐採前後で流出量の変化は見られない。

一方  $Q_A > 15 \text{ mm/hour}$  の区間においては伐採後期間の方が伐採前期間の曲線よりも上側にある。しかし伐採前期間の点の分布を見ると、この区間に含まれる点は 2 点しかなく、またベジエ曲線は必ず端点を通るという性質があるために、伐採前期間の曲線はその 2 点のうち特に右端の 1 点に強く影響されていると思われる。伐採前期間の曲線は  $Q_A = 13 \text{ mm/hour}$  付近で屈曲しているが、 $Q_A < 13 \text{ mm/hour}$  の区間の曲線をそのまま右上に延長すると伐採後期間の曲線とよく重なる。これらのことを考慮すると、伐採前後の両曲線の差が確たるものであると言い難く、伐採前後で流出量の変化はなかったものと見做してよいものと思われた。

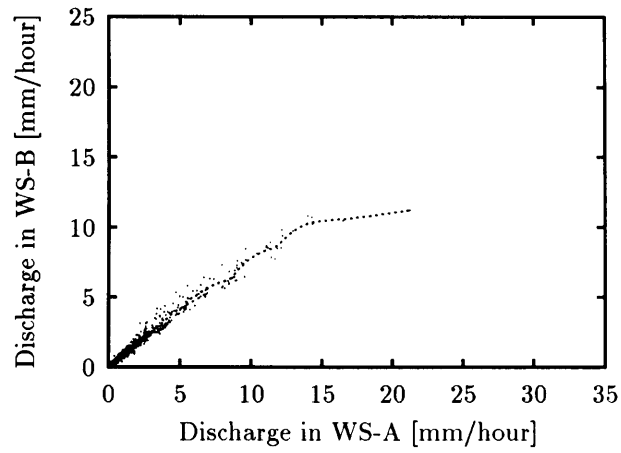
以上により、 $Q_A < 10 \text{ mm/hour}$  の出水規模においては伐採によって B 流域の流出量は増加したが、 $Q_A > 10 \text{ mm/hour}$  の大出水時では伐採前後で流出量に変化は見られず、 $Q_A = 10 \text{ mm/hour}$  を境にして流出特性が異なっていることが明らかとなった。

そこで、各月において、 $Q_A = 10 \text{ mm/hour}$  を区切りとして大出水時とそれ以外の時間で別々に流出量を集計した。表-5.7 に、大出水時の集計値を示した。伐採前期間では 8 ヶ月に大出水が発生し、その時間数は計 17 時間であった。伐採後期間は 10 ヶ月、計 25 時間であった。表-5.7 から各月の大出水流出量を A,B 両流域で比較すると、伐採前後ともにすべての月で A 流域の流出量の方が B 流域よりも大きかった。

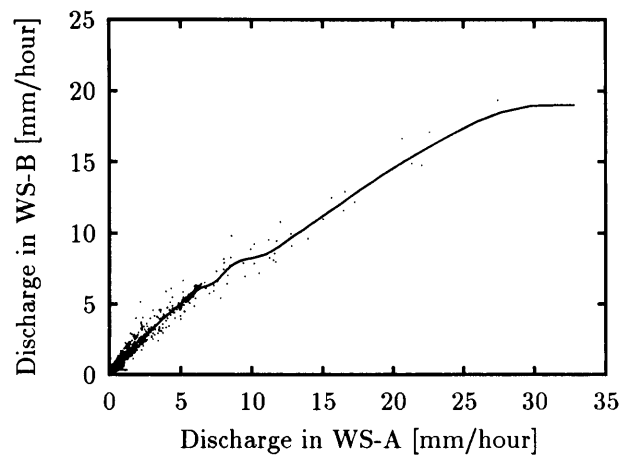
大出水時を除く、 $Q_A < 10 \text{ mm/hour}$  だった時間のみの月流出量については表を掲げないが、表-5.2 および表-5.3 から表-5.7 を引けば同じものが得られるはずである。

図-5.16 に、大出水の出現状況を示した。

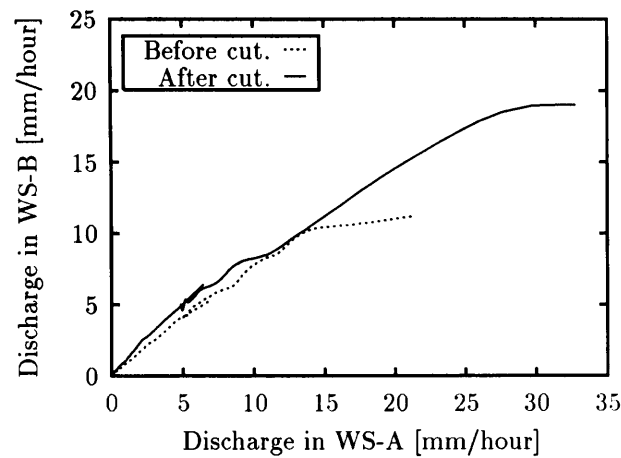
大出水時流量の月集計値、および大出水を除いた月流出量について、A,B 両流域の流出量を対比すると図-5.17 が得られる。図-5.17(a) は  $Q_A < 10 \text{ mm/hour}$  であった時間のみの、すなわち大出水時の流出量を除いた月流出量の散布図であり、図-5.17(b) は大出水時流量の月集計値の散布図である。さて図-5.17 の各図から、伐採前後の点の分布を比較すると、大出水を除いた (a) 図においては伐採前後で点の分布に差が認められるが、大出水を集計した (b) 図においては、伐採前後で点の分布はほとんど同じで変化が見られなかった。



(a) 伐採前期間

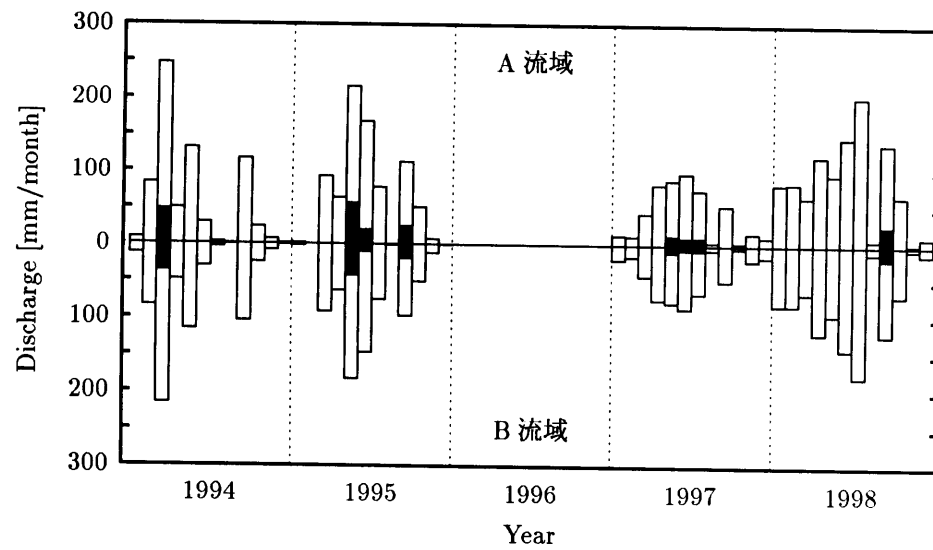


(b) 伐採後期間

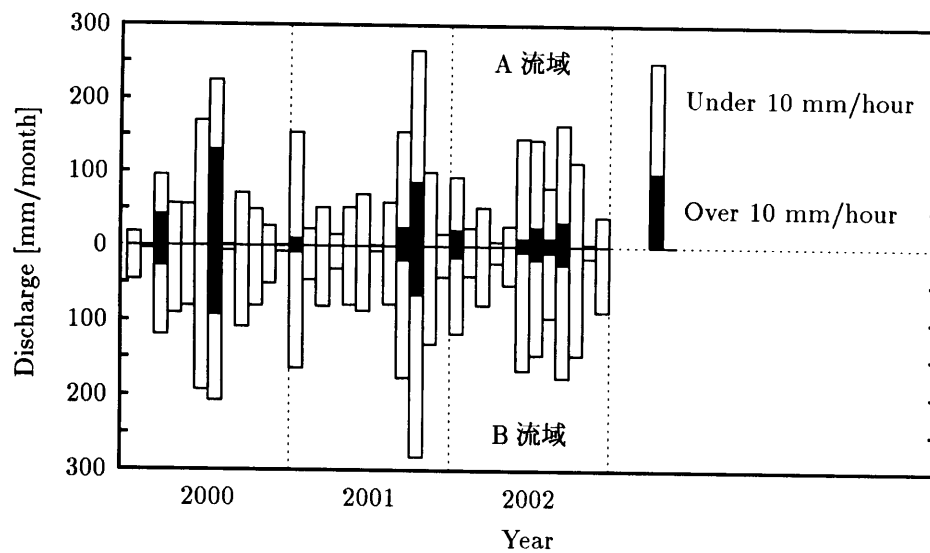


(c) 伐採前後期間のベジエ曲線の比較

図 5.15: A,B 流域の 1 時間流量の対比図



(a) 伐採前期間



(b) 伐採後期間

図 5.16: 大出水の発生状況

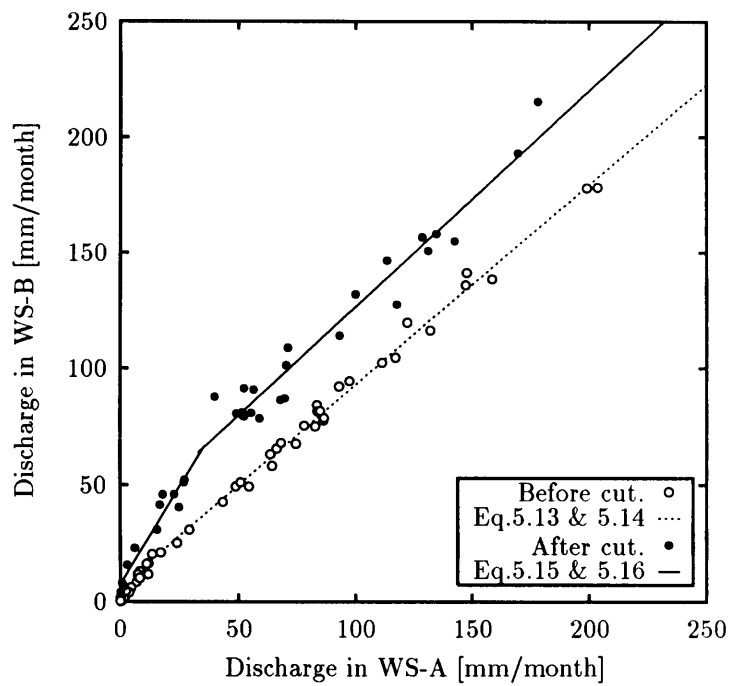
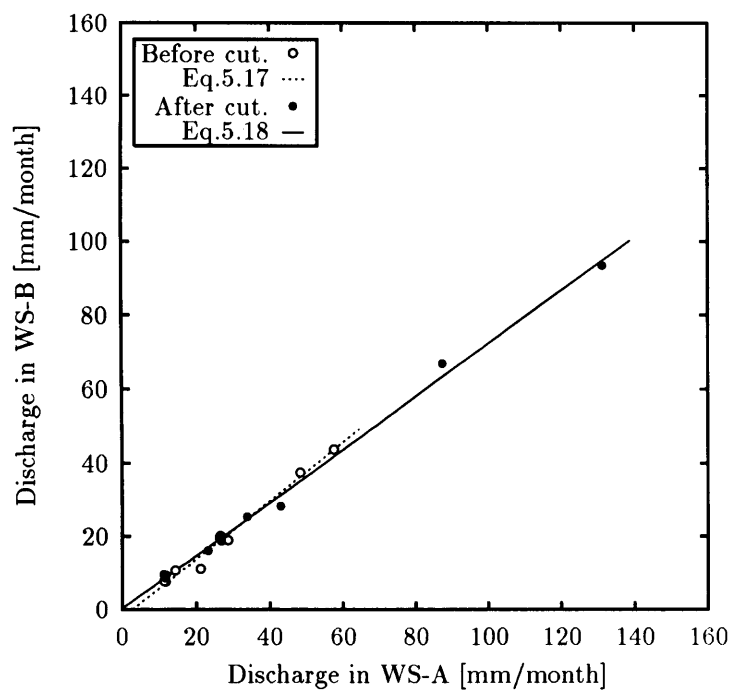
(a)  $Q_A < 10$  mm/hour(b)  $Q_A \geq 10$  mm/hour

図 5.17: 大出水とそれ以外の月流出量

表 5.7: 時間流量が 10 mm 以上となる時間の月別集計値

伐採前期間				伐採後期間			
A 流量	B 流量	出現時間数		A 流量	B 流量	出現時間数	
1994/03	48.4	37.5	4	2000/03	43.0	28.3	2
1995/05	57.7	43.8	5	2000/07	131.3	93.5	7
1995/06	21.2	11.2	1	2001/01	11.2	9.6	1
1995/09	26.5	20.1	2	2001/09	26.1	19.7	2
1997/05	14.3	10.7	1	2001/10	87.6	66.9	5
1997/06	11.7	7.7	1	2002/01	23.2	16.1	2
1997/07	11.4	7.8	1	2002/06	11.6	8.6	1
1998/09	28.6	19.0	2	2002/07	26.8	18.7	2
				2002/08	11.8	9.5	1
				2002/09	33.8	25.4	2

図-5.17 の各図において、A,B 両流域の流出量には直線関係が認められる。それぞれ回帰直線を求めよう。まず図-5.17(a) は、全体として、素の月流出量をプロットした図-5.14(a) に似ている。伐採後期間の点の分布が  $Q_A = 35$  mm/hour 付近で屈曲していることが図-5.17(a) から見て取れよう。伐採前期間については、拡大図は示さないが、 $Q_A = 20$  付近で屈曲が認められた。高水側と低水側で別々の直線で回帰すると、伐採前期間については、

$$Q_A < 20) \quad Q_B = 1.2963Q_A + 0.41 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.95) \quad (5.13)$$

$$Q_A \geq 20) \quad Q_B = 0.8643Q_A + 6.61 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.99) \quad (5.14)$$

伐採後期間については、

$$Q_A < 35) \quad Q_B = 1.6661Q_A + 7.62 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.94) \quad (5.15)$$

$$Q_A \geq 35) \quad Q_B = 0.9350Q_A + 33.05 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.95) \quad (5.16)$$

の各式が得られた。

(5.13)~(5.16) 式を、素の月流出量の回帰直線 (5.9)~(5.12) 式と比較すると、高水側の回帰直線は伐採前後ともに違いが見られるが、低水側の回帰直線は伐採前後とも同じである。これは低水側に位置する月では大出水が発生しなかったことを意味しており、妥当である。

次に図-5.17(b) から、大出水の月流出量について A,B 両流域の関係を見ると、伐採前後ともに直線状に分布していることがわかる。伐採前後でそれぞれ回帰直線を求めると以下の各式が得られた。

$$\text{伐採前)} \quad Q_B = 0.7967Q_A - 2.16 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.98) \quad (5.17)$$

$$\text{伐採後)} \quad Q_B = 0.7197Q_A + 0.38 \quad (p < 0.01, R^2 > 0.99) \quad (5.18)$$

表 5.8: 伐採による月流出量の増加量

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	計
2000	23.8	3.6	39.6	35.4	26.4	40.0	26.7	4.1	40.7	31.4	21.2	6.7	299.6
2001	25.3	19.8	29.8	10.9	27.9	20.2	4.7	20.9	39.0	54.7	39.0	20.4	312.6
2002	33.8	12.4	27.5	14.7	22.1	35.3	19.2	21.1	30.9	42.0	11.7	46.7	317.4
平均	27.6	11.9	32.3	20.3	25.5	31.8	16.9	15.4	36.9	42.7	24.0	24.6	309.9

### 5.3.3 伐採による増加量の算出

以上の解析により、大出水とそれ以外とは伐採に対する反応が異なることが明らかとなった。すなわち、大出水を除いた流出量においては伐採による流出量の増加が認められたのに対して、大出水流出量は伐採による増加は認められなかった。

素の月流出量から推定した増加量に挙動が異なるデータが現れたのは、伐採による反応が異なる2成分が混合していたためである。そこで、伐採による月増加量の推定は、大出水を除いた月流出量によって行なうことにした。具体的に言えば、図-5.17(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月増加量の推定値とする。

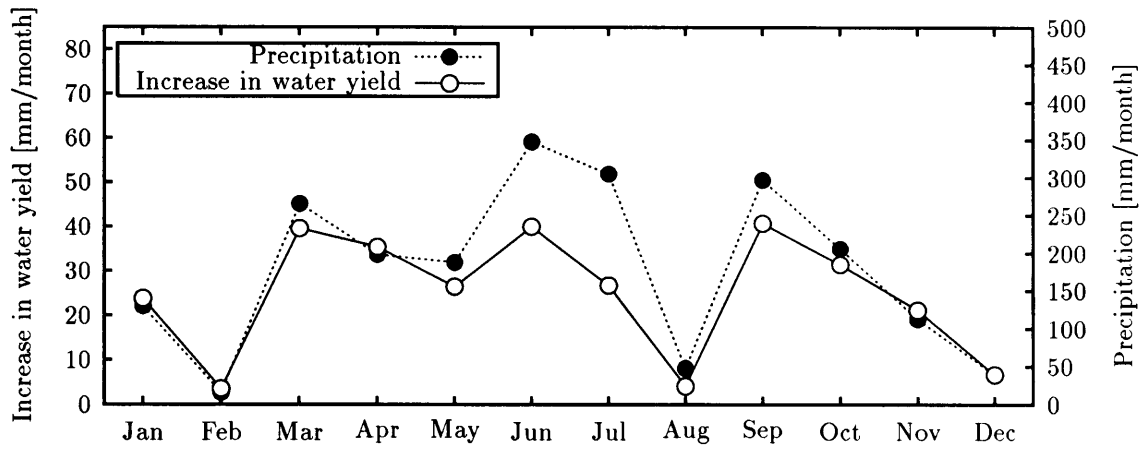
伐採後期間の回帰直線 (5.13), (5.14) 式は  $Q_A = 14.35 \text{ mm/hour}$  で交差することから、 $Q_A < 14.35 \text{ mm/hour}$  の時は (5.13) 式を、 $Q_A \geq 14.35 \text{ mm/hour}$  の時は (5.14) 式を、伐採しなかった場合に得られたであろう流出量の推定式とした。

以上の手順で算出された月増加量の推定値を表-5.8に示した。各月の推定値はすべてプラスの値である。すなわち、すべての月において伐採によって月流出量は増加したことが示された。最小値は2000年8月の4.1 mm/month、最大値は2001年10月の54.7 mm/monthである。表-5.8の右端に各年の合計値を併記したが、月増加量の年合計値は年流出量の解析から算出された年増加量の値よりも多くなった。これは大出水のデータを除いたことが原因であると推察される。

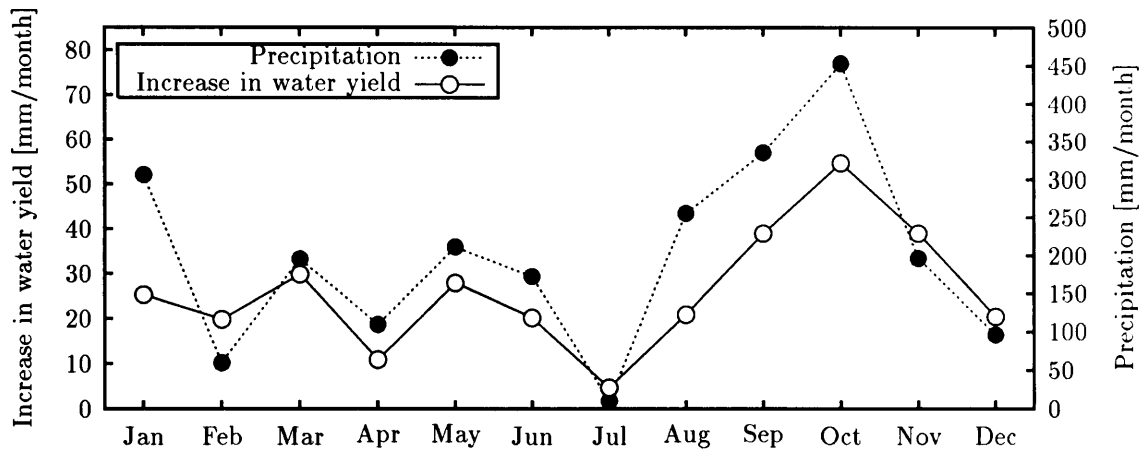
表-5.8の月増加量を時系列で表示すると図-5.18が得られる。図-5.18には参考のために月降水量を併記した。左右の縦軸の目盛は1:0.17の割合にしてあるが、これは袋山沢試験地における遮断蒸発の年平均値が17%程度(田中ら, 2005)であること考慮した。さて図-5.18を見ると、月増加量の時系列的変動は月流出量の変動に似ていることがわかる。図を詳細に見ると、月降水量と月増加量の曲線の連動の様子は一様ではなく、ある季節性が存在することが認められる。すなわち、11~5月では両曲線はほぼ重なっているが、6~10月では月降水量の曲線の方が上側を走っている。なお月降水量と月増加量では縦軸のレンジが異なるので、両曲線が重なっていることは両者が同一の値を持つことを意味しないことに注意されたい。

月降水量と月増加量の散布図を作成すると図-5.19が得られる。図-5.19から、月増加量は月降水量に対して比例的関係にあることがわかる。両者の相関係数は  $r = 0.80$  であり、月降水量と月増加量の間に強い正の相関関係が認められる。ただし月増加量の大小が月降水量のみですべて説明できる訳ではない。月増加量に対する月降水量の説明力(決定係数)は  $r^2 = 0.64$  であり、十分とは言えない。図-5.19における点の分布も、直線状と言うよりは扇状である。

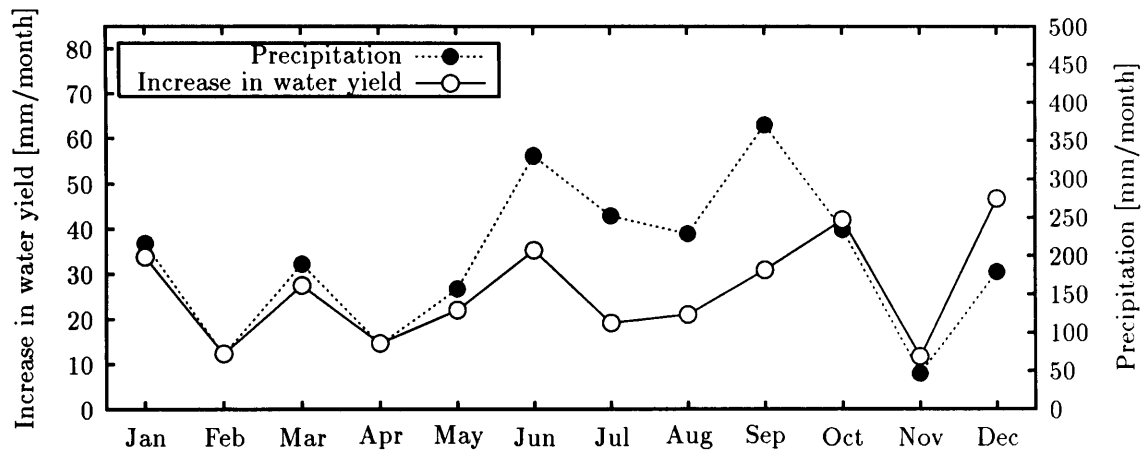




(a) 2000 年



(b) 2001 年



(c) 2002 年

図 5.18: 伐採による月流出量の増加量

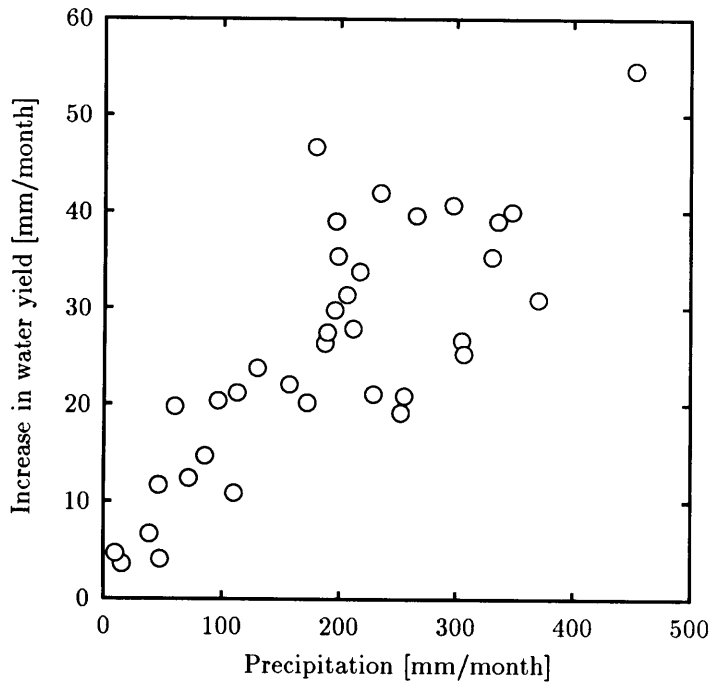


図 5.19: 月降水量と月増加量の関係

#### 5.3.4 伐採による増加量の季節性

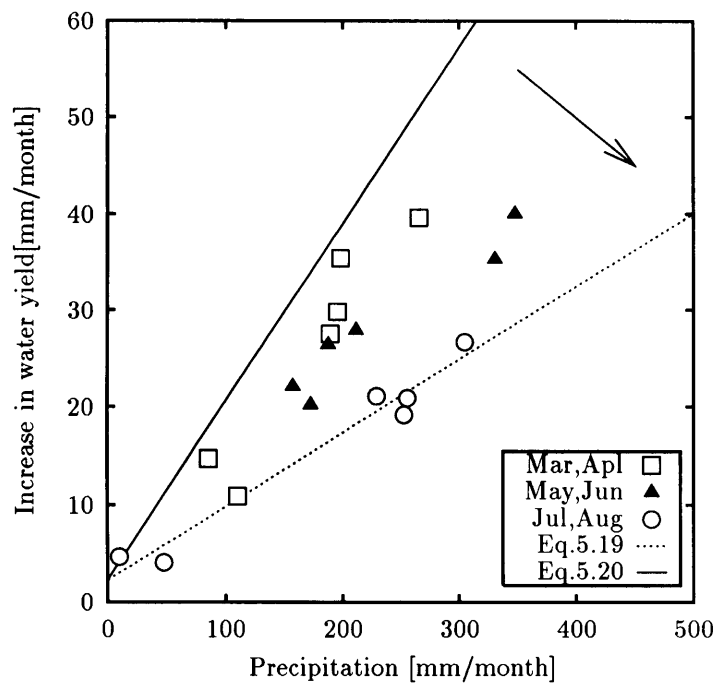
そこで次に、月降水量と月増加量の関係を季節別に分けて解析を行なった。図-5.19において、月ごとに点の分布を調べ、点の分布が同じであると認められる月をグループ化したところ、3,4月、5,6月、7,8月、9月、10月、11~2月の6グループに区分できることがわかった。

図-5.20に、図-5.19をグループ別で点種を変えたものを示す。可読性のために夏期（3~8月）と冬期（9~2月）でグラフを分けた。各図にはそれぞれ2本の直線が引かれているが、このうち上側の直線は11~2月の点（ただし後述の通り外れ値の1点を除いた）から求めた回帰直線であり、下側の直線は7,8月の点から求めた回帰直線である。前者を冬季回帰線、後者を夏季回帰線と呼ぶことにする。

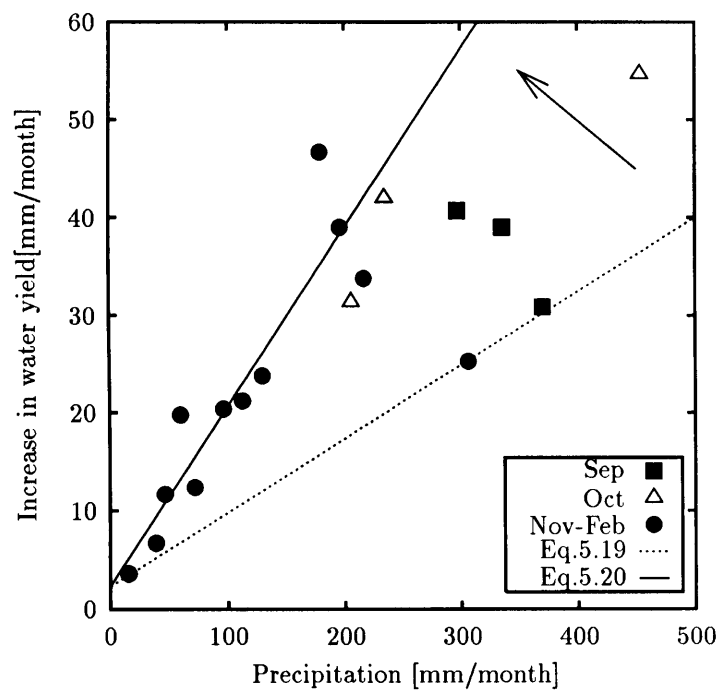
まず、図-5.20(a)から、夏期における月増加量の季節性を調べよう。図-5.20(a)において、夏期の点は全体的に、夏季・冬季両回帰線によって囲まれた扇状の範囲に分布している。グループ別に見ると、3,4月の点は上側の冬季回帰線の付近に位置し、対して5,6月の点は両回帰線の間付近に位置している。7,8月の点は下側の夏季回帰線に分布が重なっているが、これは夏季回帰線が7,8月の点の回帰直線であることの必然である。季節性という観点から見ると、夏期の点の分布位置は、上側の冬季回帰線から下側の夏季回帰線に向けて順々に下がって行く傾向が認められる。すなわち、3~8月の間、月降水量に対する月増加量の値は季節の進行とともに小さくなっていく傾向があった。

また各グループの点の分布は直線的であり、各グループにおいて月降水量と月増加量との間には強い正の相関関係が存在することがわかる。各グループで相関係数を求めると、それぞれ0.95, 0.97, 0.98が得られ、いずれも高い値であった。

7,8月の点から算出した夏季回帰線は、



(a) 夏期 (3~8 月)



(b) 冬期 (9~2 月)

図 5.20: 月降水量と月増加量の関係の季節変化

$$\Delta Q = 0.07548P + 2.29 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.97) \quad (5.19)$$

である。

次に冬期における月増加量について調べる。図-5.20(b)において、冬期の点の全体的分布は、夏期と同様に、夏季・冬季回帰線に囲まれた扇状の範囲に位置している。グループごとに点の分布を比較すると、9月の点は両回帰線の中程から下側の夏季回帰線にかけて分布し、10月の点は両回帰線の中程からやや上側の冬季回帰線寄りに位置している。11～2月の点は1つの例外を除いて冬季回帰線に重なって分布しているが、これは冬季回帰線は11～2月の回帰直線であることによる。季節性という観点からすると、冬期の点の分布位置は、下側の夏季回帰線から上側の冬季回帰線に向けて、季節の進行とともに上がって行く傾向が見られた。すなわち、9～2月の間、月降水量に対する月増加量の値は季節の進行とともに大きくなっていく傾向があった。

また、9月および10月の点は扇の弧側に位置し、11～2月の点は要側に大半の点が集中していることも指摘できる。これは袋山沢流域における降水量の季節分布の偏りのために、冬季の降水量が少ないためである。

点の分布形については、10月および11～2月の点は右上がりの直線状の分布形であるが、9月の点は右下がりである。また9月の3点のうち1点は下側の夏季回帰線の上に重なっている。

さて先述の通り、11～2月の点のうち、1点だけ他の点と傾向の異なる点が存在する。図-5.20(b)において、ほとんどの点は上側の冬季回帰線に重なっているが、残り1点は下側の夏季回帰線上に位置している。この点は後述の理由により外れ値として扱うことが妥当であると判断されたので、冬季回帰線の算出に際しては計算から除外した。外れ値を除いた点から求めた冬季回帰線は、

$$\Delta Q = 0.1833P + 2.34 \quad (p < 0.01; R^2 = 0.85) \quad (5.20)$$

である。

ではその外れ値について詳しく調べよう。ここで調査の対象とするのは、冬季回帰線の算出において除外した点と、9月の3点のうち夏季回帰線に重なっている点である。それぞれ2001年1月、2002年9月のデータである。

まず2001年1月から見ていく。A流域とB流域のハイドログラフはよく似た波形を示すのだが、2001年1月のハイドログラフを調べると、28～29日のあたりに両流域のハイドログラフが大きく異なる期間が存在することがわかった。該当期間のハイドログラフを図-5.21に示す。図-5.21において、1月28日に注目すると、A流域のハイドログラフには午後に降雨に対応して流量のピークが発生しているが、B流域の同時刻のハイドログラフは平坦なままで、流量のピークは認められない。

両者のハイドログラフの違いの原因として観測機器の不調などが考えられたため、バックアップ系の観測データとの照らし合わせを行なった。まずB流域には正規系のフロート式水位計のほか、水圧式水位計 Kadec-mizu が設置されていた。そこでフロート式水位計と水圧式水位計のデータを調べたところ、両者は一致し、どちらのデータにも1月28日に流量のピークは認められなかった。次に、A,B両流域の合流点に設けられているC堰の観測データを調べると、1月28日に、A流域流量に見られたものとよく似た流量ピークの波形が観測されていた。以上の2つのバックアップデータから、1月28日の流量は、B流域ではピークが発生しなかったが、A流域ではピークが発生したと判断するのが妥当である。

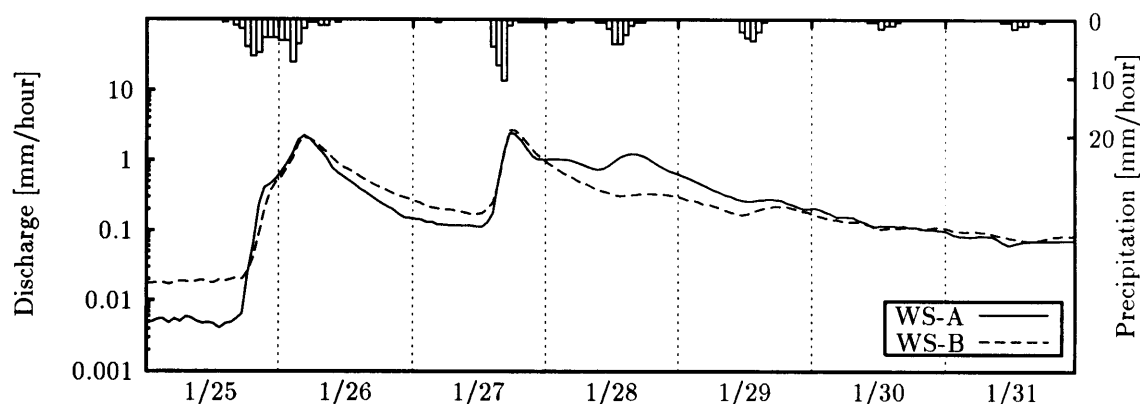


図 5.21: 2001 年 1 月末のハイドログラフ [mm/hour]

A 流域と B 流域の流出量に差が生じた原因としては入力水分量に差があったことが考えられる。図-5.21 において降水量の波形に着目すると、1 月 28 日以降、日中のみ雨量計の反応が見られ、またその量は日を追うごとに低減していく現象が観察される。これは雨量計の受水部に積もった積雪が数日にわたって融けていく過程であると考えられる（新田露場に設置した雨量計は融雪装置を装備していない）。

参考までに、気象庁・勝浦測候所のデータを調べたところ、1 月 27 日夜に降雪があったものの、気温が氷点を越えていたため積雪しなかったようである（気象庁ホームページより）。袋山沢試験地は勝浦測候所に比べて 200m ほど標高が高く、また内陸に位置するため、気温が氷点下になり積雪した可能性は高い。

2001 年 1 月末における A, B 両流域の流出の差は、降雪に対する両流域の特性の差によるものであろう。すなわち、森林植生が保存された A 流域においては、樹木の樹冠が雪を捕捉するために積雪量が多かったが、B 流域は植栽から 1 年も経っておらず、植栽樹の樹高が低いためにさほどの積雪が発生しなかったものと考えられる。

このことを考慮して、2001 年 1 月のデータについては、1 月 28 日以降のデータを集計から除外し、1 月 27 日までの期間で月降水量と月増加量を算出することが妥当であると判断された。

次に、2002 年 9 月のデータを調べる。ハイドログラフを調べたところ、9 月と 10 月の月境界をまたいで比較的大きな降雨イベントが発生していることがわかった。9 月 30 日に 35.5 mm、10 月 1 日に 72.1 mm の降雨があり、2 日間合計で 107.6 mm である。大きな降雨イベントが月境界をまたいだことにより、流域に水分の貯留が生じ、月水収支の収支が合わなくなった可能性が考えられた。

月増加量と月降水量の時系列変動を示した図-5.18 を見ると、月増加量と月流出量の曲線の凹凸はほとんど一致しており、両者の変動は対応が見られるが、2002 年 9～10 月の部分だけは例外的に一致しておらず、月降水量は 9 月に極大であるのに対して月増加量は 10 月に極大である。この極大発生月のずれは、水分の貯留によって月水収支にずれが生じたことを支持している。

そこで、2002 年 9～10 月の月境界を、歴月境界をまたぐ降雨イベントによる直接流出が終了したと見做せる時刻、10 月 3～4 日に定め、9 月 1 日～10 月 3 日を 2002 年 9 月の水収支期間、10 月 4 日～10 月 31 日を 2002 年 10 月の水収支期間として、月降水量と月増加量を再計算した。

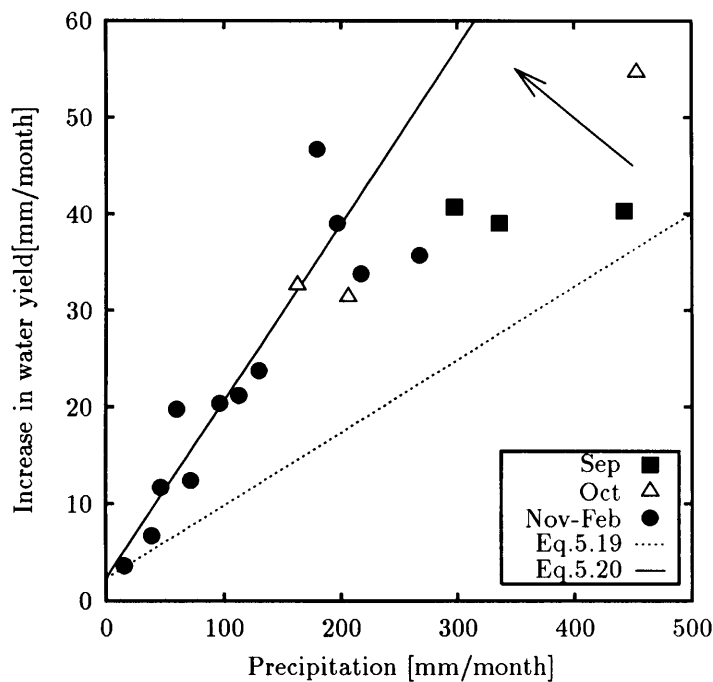


図 5.22: 月降水量と月増加量の関係の季節変化・冬期補正済

表 5.9: 伐採による月流出量の増加量と月降水量（修正後）

(a) 月降水量 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	129.9	15.6	265.4	198.3	187.6	347.7	304.8	47.6	296.9	205.9	112.7	38.7
2001	267.0	60.0	195.8	110.1	211.5	172.5	10.1	255.5	335.6	453.1	196.5	96.4
2002	216.9	71.9	189.4	85.5	157.2	330.5	252.4	229.1	442.4	162.3	46.6	179.0
平均	204.6	49.2	216.9	131.3	185.4	283.6	189.1	177.4	358.3	237.8	118.6	104.7

(b) 月流出量の増加量 [mm/month]

	Jan	Feb	Mar	Apl	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	計
2000	23.8	3.6	39.6	35.4	26.4	40.0	26.7	4.1	40.7	31.4	21.2	6.7	299.6
2001	35.7	19.8	29.8	10.9	27.9	20.2	4.7	20.9	39.0	54.7	39.0	20.4	323.0
2002	33.8	12.4	27.5	14.7	22.1	35.3	19.2	21.1	40.3	32.6	11.7	46.7	317.4
平均	31.1	11.9	32.3	20.3	25.5	31.8	16.9	15.4	40.0	39.6	24.0	24.6	313.3

以上の解析を踏まえ、2001 年 1 月および 2002 年 9, 10 月のデータに補正を反映すると、図-5.22 が得られる。図-5.22 を見ると、季節の進行にともなって点の分布は、冬季・夏季回帰線の間あたりから冬季回帰線に向けて順々に近付いていく傾向がより明瞭に見て取れることがわかる。

なお修正後の月増加量の一覧表を表-5.9 に掲げた。

## 5.4 考察

### 5.4.1 水収支法の結果と対照流域法の結果の比較

以上、水収支法と対照流域法のふたつの方法によって伐採による流出量増加の季節性について解析した訳だが、両方法の解析結果は一見矛盾する結果となった。

§5.2 で述べた通り、水収支法を用いて伐採による流出量増加（あるいは損失量減少）の季節性を解析したところ、春季（3～6月）と秋季（9,10月）に多く、夏季（7,8月）と冬季（11～2月）に少ないという結果が得られた。

一方、対照流域法による解析では、§5.3 に記した通り、伐採による月流出量の増加は、冬季に大きく夏季に少ないという結果が得られた。

両者の食い違いは、降水量の季節性によって説明され得る。すなわち、水収支法の解析では降水量の季節性が考慮されていないのに対し、対照流域法の解析では月流出量の増加量を月降水量の関数として解析したからである。

ここで、ふたつの解析結果を四季ごとに総合すると次のように書くことができる。

**冬** 降水量に対する流出増加量のレートは大きい、降水量が少ないために流出増加量の実量は小さい。

**春秋** 降水量に対する流出増加量のレートは中程度であるが、降水量が多いために流出増加量の実量は比較的大きい。

**夏** 降水量に対する流出増加量のレートは小さく、降水量も少ないために流出増加量の実量も小さい。

降水量の季節性を媒介とすることにより、水収支法と対照流域法のふたつの結果は矛盾無く説明された。

### 5.4.2 考察・月増加量の季節変化の決定要因

§5.4.1 での議論から、伐採による流出量増加の季節性を決定する要因として2つの要因が挙げられた。すなわち、降水量の季節性と、降水量に対する流出増加量のレートの季節性である。このうち、降水量の季節性は、1ha程度の森林を伐採した程度では変化しないと考えてよいので、伐採実験としては外部要因である。したがって、伐採による流出増加量の季節性は、降水量に対する流出増加量のレートの季節性によって決定されている、とすることができる。

そこで以下では、降雨に対する流出増加レートが季節の進行につれて規則的に変化する原因について考察を加える。

まず議論の出発点として、議論の焦点を流出から蒸発散に転換しよう。森林を伐採することによって水収支が変化するのには、主に、森林植生の消失によって蒸発散量が変化し、その結果として流出量が（蒸発散とは逆の方向に）変化するためである。特に本実験の場合、伐採施業による地表面攪乱を抑制したため、植生消失以外の要因による流出量の変化を考慮する必要がなく、流出の変化はすべて蒸発散の変化によって生じたと想定してよい。

これに関しては、流域貯留量が少ないという袋山沢流域の流出特性が有利にはたらく。袋山沢流域では、流域貯留量が少ないために、月水収支において流出量と蒸発散量が良く対応することから、月流出量の増加量を月蒸発散量の減少量として扱うことができるのである。

以上のことから、降雨に対する流出増加レートは、降雨に対する蒸発散減少レートと換言することができる。本項における考察課題も次のように換言できよう。すなわち、降雨に対する蒸発散減少レートが季節の進行につれて規則的に変化する原因は何であろうか、と。

その問いに答えるためには、蒸発散の成分ごとに伐採の影響を検討することが必要であろう。

森林流域からの蒸発散はおおまかに言って、3つの成分に区分できる。すなわち、樹冠遮断蒸発、蒸散、地表面蒸発である。各成分は伐採によってどのような影響を受けることになるのか考えよう。

樹冠遮断蒸発は森林植生の複雑な樹冠構造に遮られて降雨の一部が地表に到達することなく蒸発する成分である。植生を除去すると樹冠はすべて消失するため、森林伐採によって樹冠遮断蒸発は減少する。樹冠遮断蒸発は森林樹冠構造の空気力学的な複雑さが主動因であるため、季節性は比較的小さい。したがって伐採による樹冠遮断蒸発の減少も季節性が小さいものと考えられる。

蒸散は植生の生理的活動によって土壌中の水分が林木の生体内に吸収され、葉の気孔から大気中に水蒸気が放出される成分である。よって当然ながら植生を除去すれば蒸散は減少する。蒸散は植生の生理活動の活発さに依存しているため、植生の生理活動の季節性に連動して季節変化する。したがって伐採による蒸散の減少量も季節性が存在すると思われる。

地表面蒸発は土壌表層の水分が大気へ直接蒸発する成分である。地表面蒸発は地表面へ到達する日射の熱量によって発生する。日射は伐採前は樹冠によって大部分が遮られて地表面に到達しないが、伐採後には樹冠の消失により地表面にほぼすべて到達するようになる。したがって、地表面蒸発は植生の伐採によって増加する。地表面蒸発は日射量に依存するため、日射の季節性に連動して地表面蒸発も季節変化する。伐採による地表面蒸発の増加量も同様に季節変化するものと思われる。

以上のように、蒸発散を構成する3成分のうち、季節変化をするものは蒸散と地表面蒸発である。両者はともに、夏季に大きく冬季に少ないという季節性を持つ。しかし、伐採による変化の方向は逆であり、蒸散は伐採によって減少するのに対して地表面蒸発は伐採によって増加する。したがって、伐採による蒸発散減少の季節変化は、蒸散減少の季節変化の較差と地表面蒸発増加の季節変化の較差の大小によって決定されるのである。仮に蒸散減少の較差の方が大きい場合は、蒸発散全体の減少量は、夏に大きく冬に小さいこととなろう。逆に地表面蒸発の較差の方が大きければ、蒸発散全体の減少量は、夏に小さく冬に大きいこととなろう。

本実験の場合、降雨に対する蒸発散減少レートは、夏に少なく冬に大きいという結果であった。したがって本実験において、蒸散減少量の季節変動較差よりも地表面蒸発増加量の較差の方が大きかったと考えられる。本実験における蒸発散3成分の増減の季節変動を図に表すと、概略として図-5.23のようになるであろう。

### 5.4.3 出水規模と流出増加量

ところで、本研究では伐採による流出増加量を算出するに際して、大出水時には伐採の影響が見られないとして集計から除外したが、他流域においても同様の現象が数例報告されている。

小野・川口(1979)は、釜淵試験地3号沢流域での伐採試験(1961~1969年伐採)のデータを解析した結果、データ不足などの理由により若干の留保をつけながらも、1連続直接流出量180mm以上の大規模な出水時には、直接流出量は森林の有無に無関係になると示唆している。原著者らはこの現象を大規模出水時における森林の洪水抑制機能の限界の問題として他の機会に検討したいと述べている。

白井・星川(1960)は竜の口山試験地北谷・南谷で行なわれた伐採試験について、伐採前後の最大流量の変化を解析した。それによると、植生の伐採によって最大流量は原則的には増加するが、



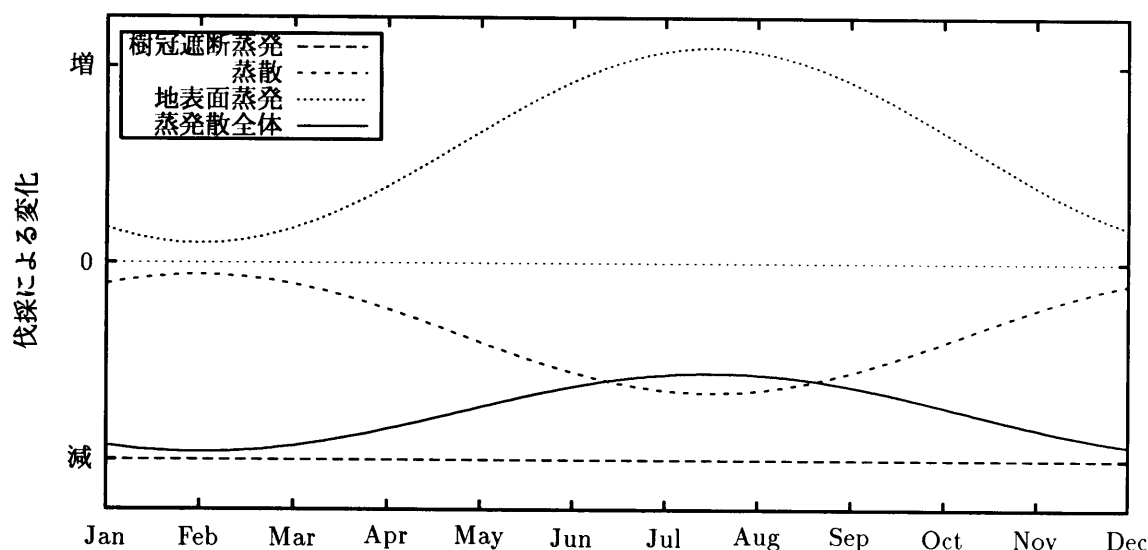


図 5.23: 袋山沢流域における伐採による蒸発散各成分の変化

いちじるしい出水時における植生の差の影響は重視するにあたらないと結論された。

阿部・谷(1985)は竜の口山試験地南谷において1980年前後に発生した松くい虫被害によるピーク流出量(mm/hour)の変化を、北谷流域を対照とした対照流域法により解析している。それによると、松枯れ後には松枯れ前よりもピーク流出量が多い傾向が認められたが、北谷の流出量が4 mm/hourを超えるような範囲では、松枯れによる変化は認めることができない、とのことである。

竹下ら(1987)は去川試験地I号沢での皆伐試験(1965～1966年伐採)についてI号沢とII号沢の年流出率を比較している。その論文の中で原著者らは、皆伐後10年間のほとんどの年で伐採を行なったI号沢の方が年流出率が高かったが、1972年だけは両流域に差が見られなかった現象に対して、原因として1972年は日降雨強度の大きい雨量の回数が多く、年雨量も4000 mmを越していたということを指摘し、年流出率は多雨年には森林の状態よりも森林土壌により強く影響されると考えられると述べている。

竹下ら(1989)は去川試験地I号沢での皆伐試験(1965～1966年伐採)およびII号沢での部分皆伐試験(1982年伐採)について、I号沢とII号沢のピーク流量比を解析した。それによると、I号沢の皆伐およびII号沢の部分皆伐のいずれにおいても、降雨開始から増水の最大水位発生までの積算雨量がある境界値以下のケースでは両流域のピーク流量比に小さな変化が現れたが、積算雨量が境界値以上のケースでは対照期間と比較して変化が見られなかったとしている。

竹下(1990)は去川試験地I号沢での皆伐試験(1965～1966年伐採)およびII号沢での部分皆伐試験(1982年伐採)について、I号沢とII号沢の増水流出率比を解析した。それによると、I号沢の皆伐およびII号沢の部分皆伐のいずれにおいても、増水中の総降雨量がある量以下の場合では伐採による変化が認められるが、総降雨量がある量以上の場合では伐採前後で変化が見られないと述べられている。この原因について原著者らは、十分な降水量があると土壌水分状態等の要因に差異がなくなつて、流域の流出特性が反映されるためであると考察している。

以上引用したように、袋山沢流域以外に、釜淵、竜の口山、去川各試験地においても、大出水時には伐採の影響が見られない現象が観測されている。また海外の事例に関しては、Thomas and

Megahan(1998, 2001)、Robinson *et al.*(2003)、Cosandey *et al.*(2005) において同様の報告がされている。全体として報告数が少なく、この現象が森林伐採における一般的な結果だとは言いえないものの、少なくとも袋山沢流域にのみ見られる特異な現象ではないとは言えるだろう。

さて袋山沢流域においてこのような現象が発生した原因についてであるが、上記引用文献の各著者の推察はそのまま袋山沢流域にも適用できると思われる。

森林の伐採によって流量に変化が生じるのは、森林の有無によって土壌水分に差が生じるためである。すなわち、森林が存在する流域においては、蒸発散が比較的多く、土壌中の水分量は比較的少ない。一方、森林が伐採された流域においては、蒸発散が比較的少なく、土壌中の水分量は比較的多く保たれる。この土壌水分の相対的な差によって、流域からの流量に差が生じると考えられる。逆に言えば、流域の土壌水分に差がなければ、流域からの流量に差は生じないであろう。

森林流域と伐採流域を比較した場合、土壌水分量はほぼ一年を通じて差が生じ、結果として流量もほぼ一年を通じて差が生ずる。しかしながら、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、その直前の土壌水分量の差にかかわらず、すなわち流域の植生状態にかかわらず、土壌は過剰に湿潤となってしまう、流域間の土壌水分の差は消失する。結果として、等しく湿潤化した流域から等しい流量が流出する。おそらくこのようなメカニズムによって、大出水時の流量に伐採の影響が現れない現象は発生するものと推察される。

#### 5.4.4 他流域における伐採の影響の季節性

伐採等による流出量増加の季節性について、袋山沢流域の結果を他流域の事例と比較して検討しよう。まず他流域における先行研究を引用する。

丸山・猪瀬(1952)は釜淵試験地2号沢流域の伐採試験を解析している。基準流域である1号沢と伐採流域である2号沢の月流出量の回帰直線を伐採前(1939～1947水年)と伐採後(1948～1950水年)でそれぞれ求め、両回帰直線の差から伐採による月流出量の増加量を算出した。その結果、冬季(12～5月)では増加が見られないが、夏季(6～11月)では各月とも約20 mm弱の増加が見られたとしている。

白井ら(1954)は竜の口山試験地北谷・南谷流域を対象に、松喰い虫被害による伐採の影響を、伐採前(1937～1943年)、伐採後(1946～1951年)の比較することで解析した。月雨量と月流量の差から月消失量を算出し、流域貯留量の変動を均すために3ヵ月移動平均を施した。伐採前後で平均月消失量を比較したところ、両流域ともに2～9月の期間において顕著に月消失量が減少した。また夏(7,8月)および冬(1,2月)それぞれで月雨量と月流量の回帰直線を導き、さらにそこから月損失量 $l$ を月雨量 $x$ の一次式を導いた。伐採前後で一次式の差を取ることで伐採による月損失量の差 $\Delta l$ が得られる。夏・冬それぞれで $\Delta l$ を求めると、

$$\text{夏)} \quad \Delta l = -0.310x + 24.01 \quad (5.21)$$

$$\text{冬)} \quad \Delta l = -0.605x + 8.93 \quad (5.22)$$

が得られた。なお原文では伐採前から伐採後を引いて差を算出しているが、引用に際しては伐採による変化を算出する目的で伐採後から伐採前を引いて差を算出したことを断っておく。

中野(1971)は国内外の数流域における伐採事例を解析し、伐採による月流出量変化の季節性は流域によって異なり、冬期の増加量の方が大きい「冬増加型」と、夏期の増加量の方が大きい「夏増加型」の両方が存在するとしている。さらに各流域の特徴を比較して3類型に区分している。冬増加型に属する上川流域は、冬期に降水量が多く、夏期の気温が低く、また北西向きである。夏増

加型に属する流域のうち、釜淵2号沢および宝川初沢流域は、冬期に降水量が多いことは冬増加型と共通であるが、夏の気温が比較的高く、土壌深が浅く、南東向きである。夏増加型に属する竜の口山南谷・北谷流域は、夏期に降水量が多い。原著者のこの分類から推察するに、伐採による月流出量変化の季節性は、降水量の季節分布と夏期の蒸発散量によって規定されている、と言えそうである。

中野(1971,1972)は、伐採によって月流出量は一般的に増加するが、盛夏期には伐採によってかえって流出量が減少する例があることを報告している。その原因として原著者は、伐採による増水量の変化が、流域の水分状態によっては減少することに求めている。すなわち、森林植生を伐採すると地表面蒸発が大きくなり、地表浅層土層が乾燥するために降雨時の初期損失量が大きくなる。先行降雨が少なく流域が乾燥している時には、植生が地表を被覆している森林流域の方がかえって土壤水分が多いことがあるということである。

鈴木(1985)は、国内数流域に短期水収支法を適用し、植生変化にともなう蒸発散量変化の季節性を解析している。それによると、流域によって蒸発散量の変化が大きい季節は異なる。竜の口山南谷流域では主に6~9月に変化が生じた。去川試験地では、1号沢は秋~冬に、3号沢では年間を通じて変化が生じた。川向流域では春~秋、特に夏に大きな変化が生じた。原著者は流域ごとに変化の季節性が異なることについて、降水量の季節分布との関連を示唆している。

Brown *et al.*(2005)は世界各地の対照流域法の結果をまとめるに際して、降水量の季節性を考慮して4つのグループに区分している。すなわち、(1) Tropical/summer dominant rainfall, (2) Snow affected catchment, (3) Winter dominant rainfall, (4) Uniform rainfall である。このうち雪の影響のない(1)(3)(4)については降水の多い季節に流出量が大きく変化しており、雪の影響がある(2)については融雪期に大きな変化が見られると原著者らは報告している。

では、袋山沢流域と以上の事例を比較してみよう。

まず、降水量の季節性を基準に流域のグループ化を行なったBrown *et al.*(2005)に従えば、袋山沢試験地は(1) Tropical/summer dominant rainfall に区分される。このグループは伐採によって夏期の流出量が大きく変化するとされているが、この主張は袋山沢試験地の結果と整合的である。しかしBrown *et al.*(2005)は、このようになる原因については詳しく論じていない。

次に、伐採による流出量の増加が夏冬のどちらにより大きく現れるかという点で言うと、袋山沢流域は夏増加型に属する。中野(1971)の分類に従って、夏増加型をさらに2つに区分すると、夏期に降水量が多い竜の口山タイプに近いと思われる。

その竜の口山流域を対象にした白井ら(1954)の解析では、月降水量と伐採による月損失量変化の関係は袋山沢流域の試験とよく似た結果が示されている。すなわち、伐採による月損失量の変化量は月降水量と直線関係で表すことができ、回帰直線を求めると夏に比べて冬の方が回帰直線の傾きが大きい、という共通点が見られた。回帰係数の絶対値は袋山沢流域に比べて竜の口山流域の方が大きい、これは竜の口山流域が小雨地帯に位置し、降雨が損失する比率が大きいためであろう。

結局、伐採による損失量減少・流出量増加の季節性は、降水量の季節分布による遮断蒸発の季節分布と、気温・日射などの季節性による蒸散・地表面蒸発の季節分布の組合せによって決定されていると考えられる。したがって、国内の試験例の中で、流域の気象条件が袋山沢流域と近いと思われる竜の口山流域の結果が袋山沢流域の結果と似たものとなったのだと思われる。

## 第6章 伐採による蒸発散各項の変化

第3章から第5章までにおいて、袋山沢B流域で森林を伐採した結果、流出量が増加した現象について、降水量データと流出量データを用いて解析を行なった。その結果、伐採によって蒸発散量が減少したことが明らかとなったが、蒸発散の各項の内訳の変化は不明のままである。

ところで、袋山沢試験地では、降水量・流出量以外にも観測項目があり、また研究例が存在する。そこで本章では、袋山沢流域において行なわれた他の観測例・研究例を参考にして、伐採によって蒸発散各項の変化を推定してみたい。

### 6.1 年水収支の変化

#### 6.1.1 方法

一般に流域の水収支式は、降水量  $P$ 、流出量  $Q$ 、蒸発散量  $E$ 、深部浸透  $D$ （単位はいずれも  $\text{mm/year}$  とする。水年単位であるため流域貯留量変動は無視できるものとする）とした時、

$$P = Q + E + D \quad (6.1)$$

と表すことができる。さらに蒸発散  $E$  が樹冠遮断  $I$ 、蒸散  $T$ 、地表面蒸発  $G$  の3成分から構成されるとすると、

$$P = Q + I + T + G + D \quad (6.2)$$

と表すことができる。

伐採前後を区別するために、伐採後の記号にはダッシュを付けることにする。すなわち、

$$\text{伐採前)} \quad P = Q + I + T + G + D \quad (6.3)$$

$$\text{伐採後)} \quad P' = Q' + I' + T' + G' + D' \quad (6.4)$$

伐採による各項の変化量をデルタ記号を用いて表現すると、

$$\Delta P = P' - P \quad (6.5)$$

$$\Delta Q = Q' - Q \quad (6.6)$$

$$\Delta I = I' - I \quad (6.7)$$

$$\Delta T = T' - T \quad (6.8)$$

$$\Delta G = G' - G \quad (6.9)$$

$$\Delta D = D' - D \quad (6.10)$$

また各変化量は次式を満たす。

$$\Delta P = \Delta Q + \Delta I + \Delta T + \Delta G + \Delta D \quad (6.11)$$

以上の等式に既知の数値を代入し、未知の変数を推定していくのが本章における基本的な手段である。

なお、推定の精度は 50 mm/year とする。精度は細かいに越したことはないが、ここでは年々変動を均した平均的な変化量を求めるので、あまり細かな値を求めることに意味がないと思われる。

### 6.1.2 伐採前期間における推定値

では初めに、伐採前の B 流域の水収支を推定してみよう。

まず降水量  $P$  であるが、表-3.1 から、袋山沢試験地の平均年降水量は 2143.2 mm/year である。したがって次式が与えられる。

$$P = 2150 \quad (6.12)$$

流出量  $Q$  は、伐採前期間における年降水量と年流出量の回帰直線である (3.6) 式から導くことができる。すなわち、

$$Q_B = 0.6382P - 603.36 \quad 3.6$$

に  $P = 2143.2$  mm/year を代入すると  $Q_B = 768.8$  mm/year が得られる。したがって流出量  $Q$  は以下のように与えられる。

$$Q = 750 \quad (6.13)$$

袋山沢試験地では 1996 年 9 月から 2000 年 11 月まで樹冠遮断蒸発量を連続観測が行なわれていた (田中・蔵治, 2002)。したがって遮断蒸発量  $I$  は実測値を与えることができる。田中ら (2005) によると、袋山沢試験地内のヒノキ林プロットにおける樹冠遮断量は平均して降水量の 17 % 程度である。年降水量 2143.2 mm/year の 17 % は 364.3 mm/year となる。したがって  $I$  は次のように与えられる。

$$I = 350 \quad (6.14)$$

地表面蒸発量は、小型ライシメータを用いて 1998 年 8 月から 2000 年 1 月までの期間に現地観測されていた (田中・蔵治, 2002)。したがって地表面蒸発量  $G$  は実測値を与えることができる。加山 (2000) の論文を要約・整理した田中・蔵治 (2002) は、伐採前の年地表面蒸発量は約 160mm であるとしている。したがって地表面蒸発量  $G$  は次式で与えられる。

$$G = 150 \quad (6.15)$$

深部浸透量は、当然ながら、直接測定することが難しい。ここでは、小田 (2004) による推定値を参考にしたい。小田 (2004) は袋山沢試験地における水質観測データから、塩素イオンの収支に着目し、深部浸透量の推定を行なった。小田 (2004) の方法は次のようなものである。塩素イオンは土壌中で化学反応を起こさないため、流域に入力される量と流域から流出する量が等しくなるはずである。もし、渓流水に含まれる塩素イオンの量が降雨などにより入力される量よりも少ないとしたら、残りの分は深部浸透によって流域外に流亡したものと考えられる。深部浸透水の塩素イオン濃度が渓流水の濃度と等しいと仮定すると、流亡した塩素イオン量から深部浸透量を算定することができる。

このような方法によって、小田 (2004) は、袋山沢 B 流域の伐採前における平均年深部浸透量を 473 mm/year と算定した。ところで、表-3.1 にも示した通り、伐採前期間の平均年降水量は全期間の平均年降水量よりもやや少ない。このことから、小田 (2004) の深部浸透量の推定値もやや少なめに見積もられていることが考えられる。そこでここでは小田 (2004) の推定値を多少水増しして、次式のようにしておく。

$$D = 500 \quad (6.16)$$

以上により、伐採前の水収支式 ((6.3) 式) を構成する項目のうち、蒸散量  $T$  以外の項目が算定された。したがって (6.3) 式に各項目の推定値を代入することにより  $T$  が算定される。

$$2150 = 750 + 350 + T + 150 + 500 \quad (6.17)$$

$$T = 400 \quad (6.18)$$

### 6.1.3 伐採後期間における推定値

次に、水収支各成分の、伐採による変化量、および伐採後の推定値を算定する。

まず降水量  $P'$  であるが、伐採前後で水収支を比較するために、降水量は伐採前後で同じ値を与えることにする。すなわち、

$$P' = 2150 \quad (6.19)$$

$$\Delta P = 0 \quad (6.20)$$

流出量  $Q'$  は、§3.4.2 で解析したように、伐採によって年流出量が約 300 mm/year 増加したことから、

$$\Delta Q = 300 \quad (6.21)$$

$$Q' = 1050 \quad (6.22)$$

と与えられる。

地表面蒸発量  $G'$  について、田中・蔵治 (2002) は、加山 (2000) の結果から伐採後の日平均値を 1.42 mm/day としている。この値を 365 倍して年間値にすると約 520 mm/year である。そこで  $G'$  および  $\Delta G$  を以下のように定める。

$$G' = 500 \quad (6.23)$$

$$\Delta G = 350 \quad (6.24)$$

深部浸透量  $D'$  に関しては実測データと呼べるものがない。そこで本研究では深部浸透量は伐採前後で変化しなかったという仮定を置くことにする。すなわち、

$$\Delta D = 0 \quad (6.25)$$

$$D' = 500 \quad (6.26)$$

以上で与えられた  $\Delta P, \Delta Q, \Delta G, \Delta D$  の値を (6.11) 式に代入すると、

$$0 = 300 + \Delta I + \Delta T + 350 + 0 \quad (6.27)$$

$$\Delta I + \Delta T = -650 \quad (6.28)$$

となる。

最後に  $\Delta I$  と  $\Delta T$  の配分であるが、これを決定するのに §5.4.2 での考察の結果を援用する。すなわち §5.4.2 において、蒸散の減少量よりも地表面蒸発量の増加量の方が多いと考察されたのであった。このことから、

$$|\Delta T| < \Delta G = 350 \quad (6.29)$$

という条件が要請される。一方、 $\Delta I$  については、 $I' \geq 0$  であるから

$$-350 \leq \Delta I \leq 0 \quad (6.30)$$

という条件を満たさねばならない。結局、(6.28)～(6.30) 式から、

$$\Delta I = -350 \quad (6.31)$$

$$\Delta T = -300 \quad (6.32)$$

と配分されるのが妥当であると思われる。 $\Delta I, \Delta T$  から  $I', T'$  を求めると、

$$I' = 0 \quad (6.33)$$

$$T' = 100 \quad (6.34)$$

となる。

以上の各推定値を一覧にまとめたものを表-6.1 として掲げた。また表-6.1 をグラフ化したものを図-6.1 に示す。

表 6.1: 袋山沢 B 流域における伐採前後の水収支各項の変化 [mm/year]

	降水量	流出量	蒸発散			深部浸透
			樹冠遮断	蒸散	地表面蒸発	
伐採前	2150	750	350	400	150	500
伐採後	2150	1050	0	100	500	500
変化量	±0	+300	-350	-300	+350	±0

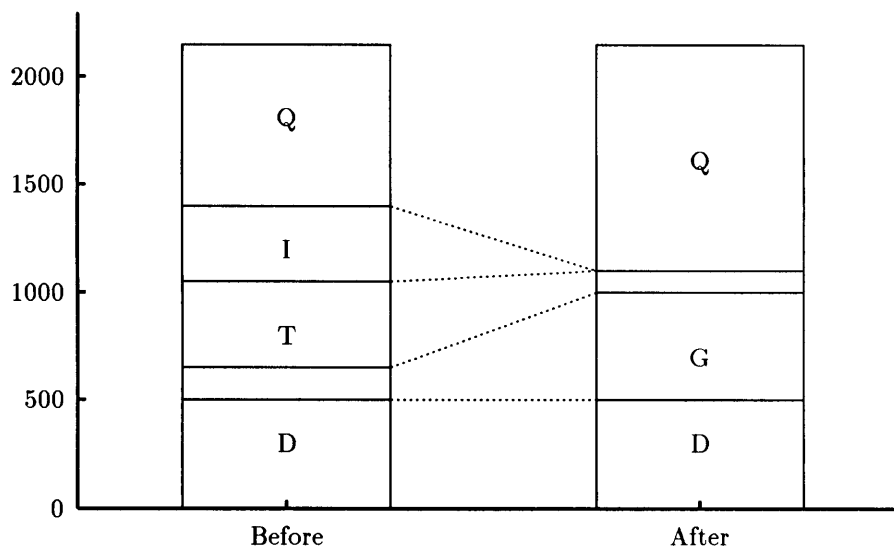


図 6.1: 袋山沢 B 流域における伐採前後の年水収支の変化 [mm/year]

## 6.2 月水収支の変化

### 6.2.1 月蒸発散量の変化

続いて、伐採による蒸発散各項の変化を、月単位で表すことを試みよう。年単位では水収支各項の観測値が存在したが、月単位では、蒸散、地表面蒸発、深部浸透の各項の観測値が得られていないので、月水収支全体の変化を推定することは難しい。そこでここでは、蒸発散各項の変化量のみを焦点をしぼって解析する。

さて、伐採による月蒸発散の変化量  $\Delta E$  は、遮断蒸発の変化量  $\Delta I$ 、蒸散の変化量  $\Delta T$ 、地表面蒸発の変化量  $\Delta G$  の総計と等しい。すなわち、

$$\Delta E = \Delta I + \Delta T + \Delta G \quad (6.35)$$

このうち  $\Delta E$  は §5.3.4 において月流出量の解析から算出されている（表-5.9）。先にも述べたとおり、袋山沢流域では流域に貯留される水分量が少ないために、月流出量の変化は月蒸発散量の変化と見做すことができる。したがって、表-5.9 の平均値がそのまま月蒸発散の変化量になるのである。



遮断蒸発量は、前節までで解析したように、伐採前は月降水量の 17 % 程度であったものが、伐採後にはほぼ 0 と見做せる程度にまで減少したと考えられる。月降水量を  $P$  とすると、遮断蒸発変化量  $\Delta I$  は、

$$\Delta I = -0.17P \quad (6.36)$$

と表すことができる。

月蒸散量は、伐採前にも伐採後にも袋山沢試験地では観測されていない。しかし、袋山沢試験地から 200m ほど離れた地点にある気象露場・新田観測地において、スギの樹液流がヒートパルス法によって観測されている。ヒートパルス速度と樹木個体の蒸散量はほぼ比例関係にあると考えられるから（小南・鈴木, 1988）、ヒートパルス速度の季節変化はそのまま蒸散量の季節変化に相当するとしてよいだろう。

新田試験地におけるスギ樹液流のヒートパルス速度の観測結果は、たとえば康ら (2002) に示されている。それによると、新田試験地の 21 年生スギのヒートパルス速度は、1,2 月頃にほぼ 0 になり、7,8 月頃に最大となるという季節変化をしていることが明らかとなった。ここではその季節変化を三角関数で近似することにする。月数を  $m$  として、

$$f(m) = -\cos\left((m - 1.5)\frac{2\pi}{12}\right) + 1 \quad (6.37)$$

伐採による流域蒸散変化量  $\Delta T$  の季節変化は単木蒸散量の季節変化に比例するものとする。

前節での解析により、伐採による年蒸散量の変化は、年降水量 2150 mm に対して -300 mm と見積もられた。伐採後期間における袋山沢試験地の平均年降水量は 2305.9 mm/year であり、前節で仮定した年降水量よりも多いが、降水量が十分に多い場合蒸散量は一定と見做すことができると考えられるから、降水量の違いは考慮せずともよいと思われる。

以上のことから、 $m$  月における蒸散変化量  $\Delta T(m)$  は

$$\Delta T(m) = \frac{300}{12} f(m) \quad (6.38)$$

$$= -25 \cos\left((m - 1.5)\frac{2\pi}{12}\right) + 25 \quad (6.39)$$

と表すことができる。

地表面蒸発は袋山沢試験地で観測例があるが、季節変化を算出するところまでは行かなかったようである。そこでここでは、地表面蒸発変化量  $\Delta G$  は、(6.35) 式に  $\Delta E, \Delta I, \Delta T$  を代入して残差として算出することにする。

以上の方法にしたがって  $\Delta E, \Delta I, \Delta T, \Delta G$  の季節変化を算出すると、図-6.2 が得られる。

まず図-6.2 から、残差として算出した  $\Delta G$  の季節変化を見ると、2 月を除くすべての月で正値を取っていることがわかる。すなわち伐採によって地表面蒸発がほぼすべての月で増加したことが示されている。その変化量は、2 月が最小で、最大は 7 月に現れている。曲線形はほぼサインカーブで、蒸散変化量  $\Delta T$  の曲線と  $x$  軸を挟んでほぼ線対称である。

それに対して遮断蒸発変化量  $\Delta I$  は、降水量の季節分布に依存して季節変動が見られるけれども、 $\Delta T, \Delta G$  の季節変化に比較して季節変化が小さく、通年で伐採による変化が見られる。また  $\Delta I$  は蒸発散全体の変化量  $\Delta E$  と季節変動がよく似ている。

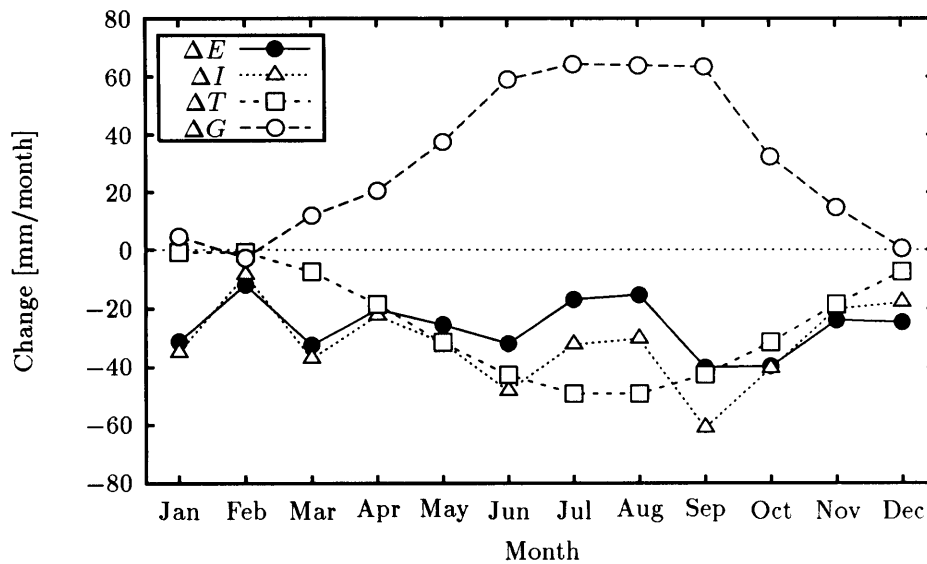


図 6.2: 伐採による蒸発散各項の月変化量

つまり、蒸散変化量  $\Delta T$  と地表面蒸発変化量  $\Delta G$  は、変化の方向が正反対でかつ季節変動が似ているために互いに打ち消し合うことになり、結果として蒸発散全体の変化量  $\Delta E$  は遮断蒸発変化量  $\Delta I$  によって季節変動が大部分決定されている、と推察されるのである。

### 6.2.2 月水収支の変化

続いて、伐採による水収支各項の月別変化を推定することを試みる。実際の観測では伐採前後で降水の量とパターンが異なるために、伐採前後で単純な比較ができない。そこで、伐採前後を比較可能とするために、伐採後期間の月降水量パターンに対する水収支各項の量を推定することとする。

まず流出量であるが、伐採後については実際の観測データをそのまま用いる。伐採前の流出量は、伐採後期間の流出量データから伐採による増加量を引くことで求められる。

樹冠遮断蒸発は、袋山沢試験地における遮断率が約 17% であることから、伐採前は月降水量の 17% を与える。伐採後は樹冠遮断蒸発がないものとする。

蒸散は、前節の式 (6.37) で示したような季節変化をするものと仮定し、年総量が伐採前後でそれぞれ 400, 100 mm/year (表-6.1) となるように定数倍した。

地表面蒸発は、蒸散と同じく前節の式 (6.37) で示したような季節変化をするものと仮定し、年総量が伐採前後でそれぞれ 180, 550 mm/year となるように定数倍した。年総量の値が表-6.1 と異なるのは、前提として与えた伐採後期間の降水量データが、表-6.1 の算出において仮定した 2150 mm/year よりも多いためである。言い換えると、表-6.1 に比べて降水量が多い分を、流出量と地表面蒸発に割り振ったのである。

最後に深部浸透量は、降水量から流出量と蒸発散各項を引いた残余として与えた。

以上の方法によって水収支各項を算出すると、図-6.3 が得られる。図-6.3 において、残余項である深部浸透に注目すると、降水量が多い月に深部浸透も多い傾向が見られる (1,3,9 月)。これは、

## 6.2. 月水収支の変化

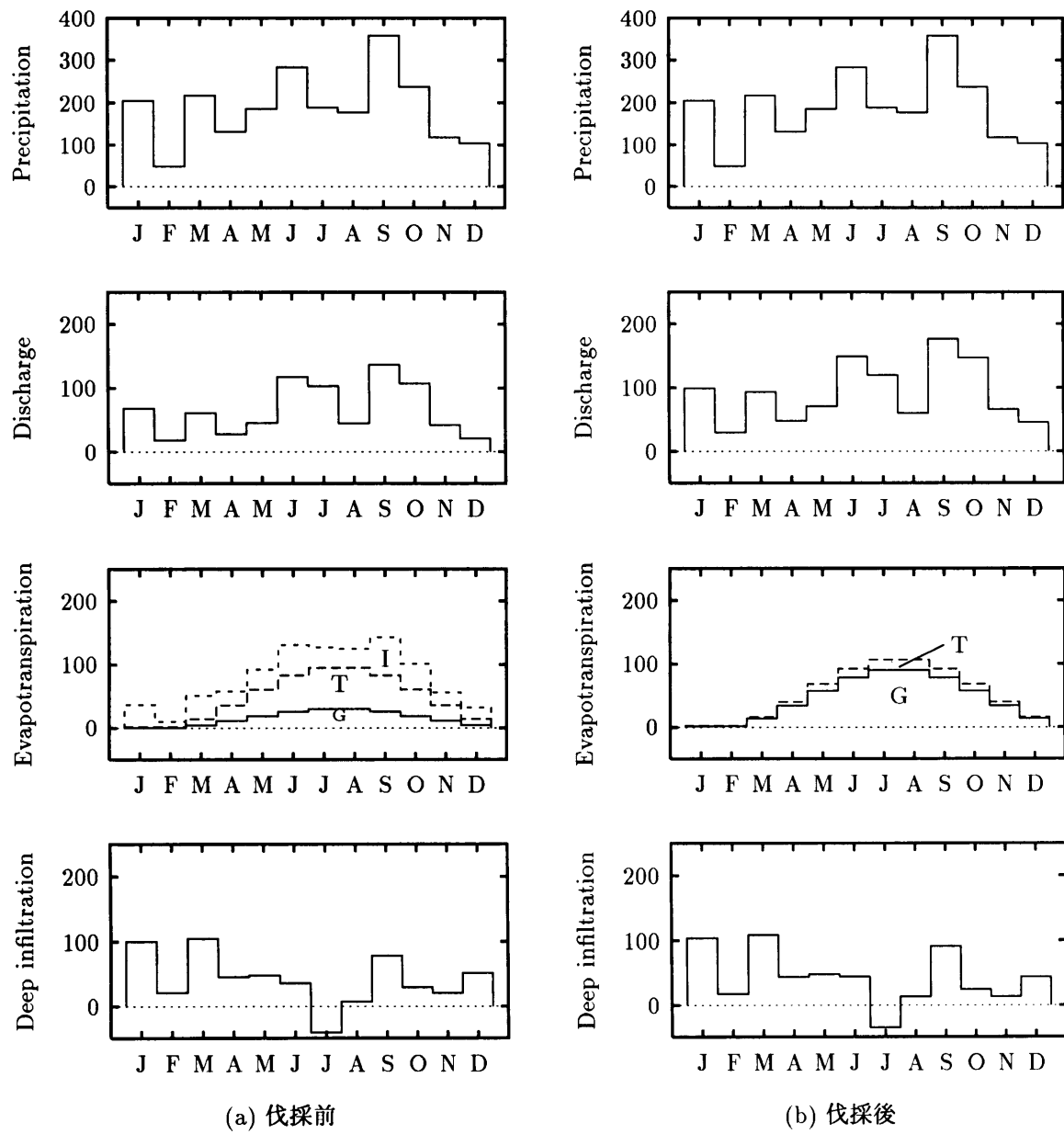


図 6.3: 伐採前後の水収支各項の変化 (推定) [mm/month]

実際に深部浸透現象が降水量に連動して生起している可能性もあるが、それに加えて、蒸散および地表面蒸発を降水量と無関係に算出したことの影響が残余項としての深部浸透量に影響していると思われるであろう。

次に、図-6.3の結果から、伐採前後の月水収支の変化を月別に対比させたものが図-6.4である。各月とも、値の大小はあるが、伐採による蒸散の減少と地表面蒸発の増加がほぼ打ち消し合っており、樹冠遮断蒸発の減少が流出量の増加に寄与していることがわかる。また、冬季においては蒸散と地表面蒸発の合計量は伐採前後でほぼ等しいが、夏季においては伐採前に比べて伐採後の方が多くなり、その分流出量の増加が比較的小さくなっていることもわかる。

### 6.3 蒸発散各項の変化と流出成分の変化

伐採による蒸発散各項の変化量が図-6.2のようであった時、その変化によって流出はどのように変化すると考えられるか考察したい。

遮断蒸発の減少は地表面に到達し土壤に浸透する水分量を増加させることから、流出量の量的な増加に直接寄与するものと考えられる。

一方、蒸散の減少と地表面蒸発の増加は量的には互いに打ち消し合う関係にあり、流出量の量的な変化に対する寄与はさほど大きくはないと思われる。むしろ重要な点は、蒸散と地表面蒸発とで、水分が消失する土壤部位が異なることであろう。すなわち、蒸散においては植生の根圏全体から水分が消失するのに対し、地表面蒸発においては大気と接している土壤表面から主に水分が消失する。この違いにより、土壤表面においては、伐採すると地表面蒸発が増加するために伐採前に比べて乾燥し、逆に土壤深部においては、蒸散が減少するために伐採前よりも湿潤になると考えられる。

伐採による土壤表面の乾燥化については、袋山沢試験地における土壤水分の観測データを整理した新田(2004)によって裏付けられている。

土壤表面の乾燥化は、降雨時の初期損失を増加させ、流出量全体を減少させる効果があるだろう。一方土壤深部の湿潤化は無降雨時の流出量を増加させる効果があると思われる。言うならば、伐採によって蒸散から地表面蒸発へと水分消失経路が変化することにより、流出量全体の量はほとんど変化しないが、直接流出と基底流出との流出成分配分比が変化し、基底流出の比率が大きくなるものと考えられる。

### 6.3. 蒸発散各項の変化と流出成分の変化

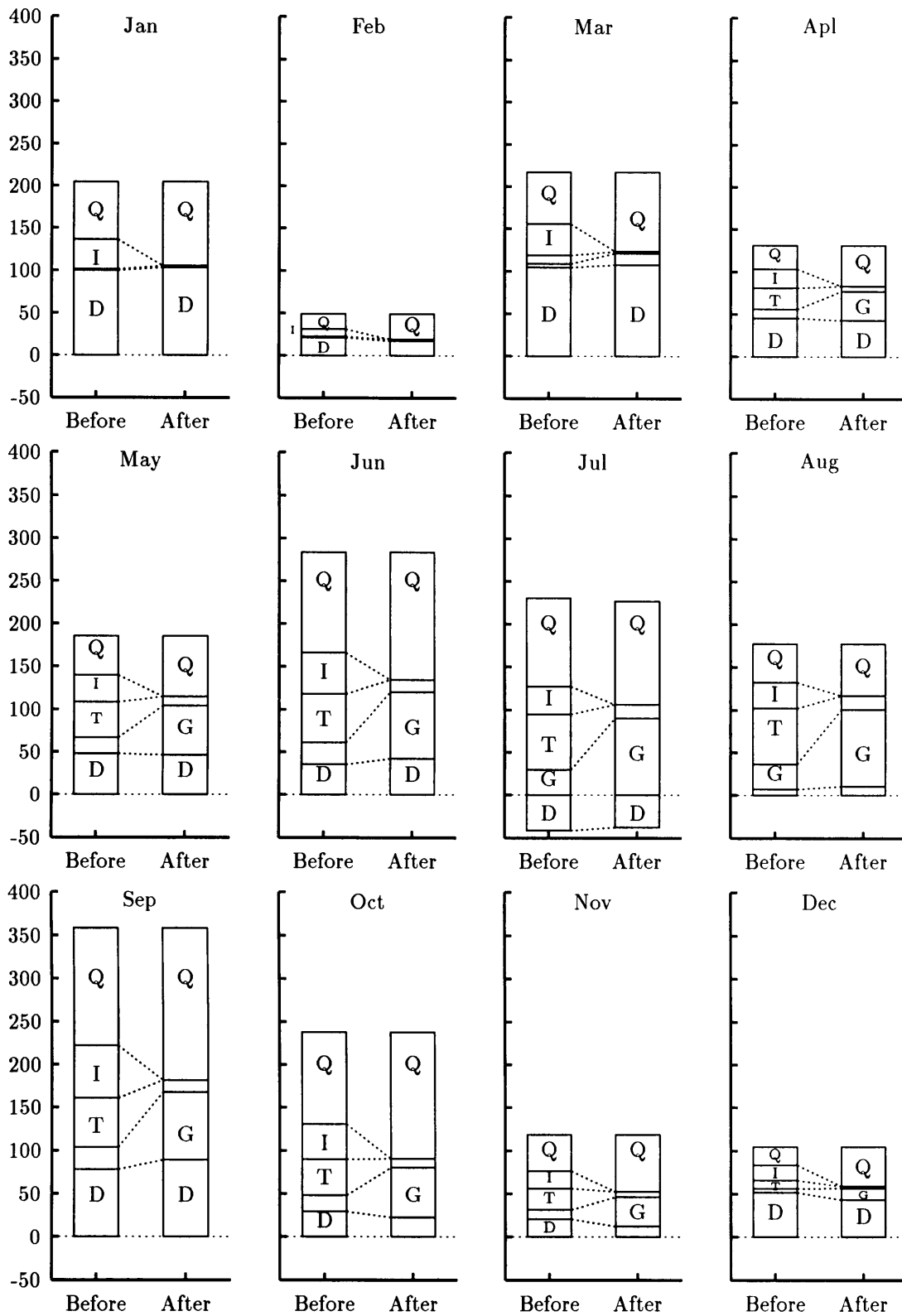


図 6.4: 伐採前後の月水収支の月別変化（推定） [mm/month]

## 第7章 まとめと結論

本論文における解析の結果と考察の結論を以下にまとめる。

### 7.1 袋山沢流域の水文学的特徴について

森林状態において、袋山沢流域には以下のような特徴があった。

1. 平均年降水量は 2150 mm/year 程度で、わが国の平均値（約 1800 mm/year）よりも多い。降水量の季節分布は、夏期に多く冬期に少ないという太平洋岸気候の特徴が見られた。
2. 平均年損失量はわが国の森林小流域の観測事例に比して大きかった（桜島の火山灰流域を除くと国内最大であった）。深部浸透が大きいことが原因であると考えられた。
3. 年流出量  $Q$  mm/year と年降水量  $P$  mm/year の一次式  $Q = aP + b$  における係数  $a$  の値は約 0.6 で、わが国の森林小流域の観測事例の中で最小レベルであった。深部浸透が大きいことが原因であるという仮説を論証することはできなかった。
4. 全流出に占める基底流出の比率が低く、盛夏および冬季に流出が停止する現象がほぼ毎年観測された。原因として、基岩に浸透した水分が深部に流失してしまうため、基岩地下水が形成されないためであると考えられた。
5. A, B 両流域の流出ハイドログラフは総じて良い対応を示すが、高水時には A 流域流量の方が、低水時には B 流域流量の方が大きい傾向があった。

### 7.2 伐採による流出と蒸発散の変化

袋山沢 B 流域において、スギ・ヒノキ人工林を皆伐した結果、流出と蒸発散に次のような変化が見られた。ただし地表面の攪乱が最小限にとどまるような施業方法を採用したため、地表面流の増加は抑制された。

#### 7.2.1 年流出量について

1. 年流出量は平均で約 300 mm/year 増加した。森林の伐採によって一般的に年流出量が増加することは中野 (1971)、Bosch and Hewlett (1982) などによって知られているが、本研究はそれらの結果を補強した。中野 (1971) はわが国においては森林皆伐による増加量は 200～300 mm/year 程度であると推測しているが、袋山沢 B 流域における増加量 300 mm/year は中野 (1971) の推測値のほぼ上限値であった。

## 7.2. 伐採による流出と蒸発散の変化

2. 年流出量  $Q$  mm/year と年降水量  $P$  mm/year の一次式  $Q = aP + b$  における係数  $a$  の値は、伐採によって大きくなった。同様の結果は上川（勝見, 1956）、宝川初沢（水見ら, 1964）、竜の口山（白井ら, 1954）にも示されているが、本研究の結果はそれらを補強するものであった。またわが国における森林小流域の事例を解析した結果、伐採による係数  $a$  の増加は特定の流域に限られたものではなく、一般的に見られる現象であることが示された。
3. 伐採後の各年の年流出増加量  $\Delta Q$  mm/year と各年の年降水量  $P$  mm/year は一次式、 $\Delta Q = aP + b$  で回帰できることがわかった。袋山沢 B 流域の係数  $a$  の値を他流域の針葉樹林伐採事例と比較した結果、各流域の係数  $a$  はほぼ一定値 (0.10~0.15) になり、中野 (1971) の仮説が追試された。
4. わが国の森林小流域における針葉樹林伐採試験等の結果を整理し、平均年降水量  $\bar{P}$  が多い流域ほど伐採による年流出量の平均増加量（あるいは森林回復による年流出量の平均減少量） $\overline{\Delta Q}$  が大きいことを示した。また  $\bar{P}$  と  $\overline{\Delta Q}$  は一次式  $\overline{\Delta Q} = a\bar{P} + b$  で回帰できることを明らかにした。また袋山沢 B 流域の値はその直線上にプロットされることがわかった。年増加量と平均年降水量の間に正の相関関係が見出されることは Bosch and Hewlett (1982) によって指摘されているが、わが国の事例について同様のことを示したのは本研究が初めてである。
5. 2~4 から、 $Q, \Delta Q, \overline{\Delta Q}$  のいずれにも降水量依存性が見られることがわかった。この共通の原因として樹冠遮断蒸発が考えられた。すなわち、伐採による流出増加は蒸発散の減少によって起こるが、蒸発散のうち樹冠遮断蒸発量は降水量に強く依存するため、結果として伐採による流出増加量に降水量依存性が現れるものと推察された。

### 7.2.2 流量の高低と伐採の影響

伐採の影響が高水時と低水時とでどのように異なるのか、主に流況曲線を用いて解析を行なった結果、以下のことが示された。

1. 高水側から低水側にかけて、ほぼすべての範囲で流出量の増加が認められ、中野ら (1963)、谷・阿部 (1987)、玉井ら (2004) と同様の結果が得られた。本研究と同様の手法で竜の口山南谷流域を解析した玉井ら (2004) の結果と比較すると、竜の口山南谷流域に比べて袋山沢 B 流域の方が、流況曲線のすべての範囲で増加量が大きかった。これは袋山沢流域の方が降水量が大きいためであると考えられた。
2. 伐採によって low-flow days が減少した。これは Harr *et al* (1982) の結果と同様であった。伐採前は A, B 両流域の low-flow days には正の相関があったが、伐採後は相関が弱くなった。原因としては、伐採によって A, B 両流域の土壌水分条件の差が年毎の降雨パターンに依存して変動するためであると推察された。
3. 伐採によって低水時流量の増加が認められた。中野 (1971)、蔵治 (2003) は森林流域において一般的に、森林悪化によって低水時流出量は増加し、逆に森林回復によって減少することを示したが、本研究の結果はこれを補強するものである。また、低水時流量の増加によって、袋山沢流域の流出の特徴である、夏季および冬季の流出停止が発生しなくなった。伐採によって低水時流量が増加したのは、植生除去による蒸散の減少が原因であると推察されたが、これは中野 (1971) の仮説を支持するものである。

4. 流出増加量の実量は流量の大小と連動して変化し、高水側の方が増加量が大きかった。この結果は竜の口山南谷流域（谷・阿部, 1987; 玉井ら, 2004）と同様であった。またこのことから高水側の増加が年単位の増加量に対して支配的な要因であることが示されたが、このことは中野ら（1963）を補強するものであった。
5. 流量の増加率は流量の大小と連動して変化し、低水側の方が増加率が大きかった。この結果は竜の口山南谷流域（阿部・谷, 1985; 谷・阿部, 1987; 玉井ら, 2004）の結果と同様であった。
6. 全流出量に占める高水側流出量と低水側流出量の比率を指標に流出の年間一様性を調べたところ、伐採によって一様性が高くなったことがわかった。これは中野（1971）の結果を追試するものであった。

### 7.2.3 伐採の影響の季節性

伐採の影響が季節によってどう異なるのかについて、主に月流出量の解析によって以下のことが示された。

1. 伐採前後で月流出量を比較したところ、伐採による流出量増加は通年で認められた。またその増加量には季節的な変動が見られ、春秋に大きく、夏冬に少ない傾向があった。中野（1971, 1972）は、森林伐採によって月流出量は一般的に増加するが、盛夏期にはかえって流出量が減少する例があることを報告しているが、袋山沢 B 流域では盛夏期にも月流出量の増加が認められた。
2. 短期水収支法を用いて伐採前後で蒸発散量を比較したところ、伐採によってほぼ通年で蒸発散の減少が認められた。またその減少量は、春秋に大きく、夏冬に小さかった。
3. 1, 2 の結果はほぼ正確に対応した。一般に森林流域では流域貯留量の影響で降雨と流出の間に時間遅れがあり、流出量と蒸発散量にずれが生じるが、袋山沢流域は流域貯留量が小さいためにそのずれが無視できるほど小さいと推察された。このことにより、以降の解析において、月流出量の解析から月蒸発散量を議論することが可能であると考えられた。
4. 伐採による月流出増加量は月降水量と正の相関（相関係数 0.80）があった。このことから、降水量依存性の強い樹冠遮断蒸発の減少が流出増加の主要因であると推察された。月流出増加量と月降水量の相関性について竜の口山流域（白井ら, 1954）でも同様のことが報告されているが、白井ら（1954）の方法は月流出量に 3 ヶ月移動平均をかけた上での解析であり、単月増加量を量的に算出して月降水量との相関関係を明瞭に示し得たのは本研究が初めてである。
5. 同量の月降水量に対する月流出増加量の大きさは、季節の進行に伴って、冬が最大で夏が最小になるような年周変化をしていることがわかった。これは、伐採前の蒸散量と伐採後の地表面蒸発量を比較した時に地表面蒸発量の方が多く、両者の差が夏に大きく冬に小さいことが反映していると解釈された。同様の季節性は白井ら（1954）が竜の口山流域について報告しているが、白井ら（1954）の解析は 1, 2 月および 7, 8 月のみの比較であり、季節的な進行については論じていない。それに対して本研究は季節進行を明晰に示すことができた。
6. 4 および 5 から、袋山沢流域で生じた伐採後の月流出増加量が春秋に大きいという季節性について、降水量の季節分布に基づく樹冠遮断蒸発の季節性と、蒸散・地表面蒸発の年周変動



に基づく「同量の降水量に対する流出増加量の大きさ」の季節変動の組合せによって定量的に説明可能であることが明らかとなった。すなわち、

**冬** 降水量に対する流出増加量の割合は大きい、降水量が少ないために流出増加量の実量は小さい。

**春秋** 降水量に対する流出増加量の割合は中程度であるが、降水量が多いために流出増加量の実量は比較的大きい。

**夏** 降水量に対する流出増加量の割合は小さく、降水量も少ないために流出増加量の実量も小さい。

従来から、伐採による流量増加の季節性について、降水量の季節分布と蒸発散の季節性の影響が指摘されてきたが、その2つの要因を組み合わせることで月流出増加量の季節変化を定量的に説明したのは本研究が初めてである。

#### 7.2.4 蒸発散各項の変化の推定

袋山沢試験地における他の観測例（樹冠遮断蒸発など）を総合し、伐採による蒸発散各項（樹冠遮断蒸発、蒸散、地表面蒸発）の変化は推定したところ、次のような結果を得た。

1. 年水収支は表-6.1のように推定された。すなわち伐採によって、樹冠遮断蒸発量は 350 mm/year の減少、蒸散は 300 mm/year の減少、地表面蒸発は 350 mm/year の増加と推定された。森林伐採による蒸発散量の変化について、構成各成分の変化を示し得た研究例は少ない（塚本編, 1992）。本研究の結果は実測データに基づく推定例として貴重な一例を提供するものと思われる。
2. 月蒸発散の伐採による変化量は図-6.2のように推定された。すなわち、月遮断蒸発量は月降水量の 17% の減少、月蒸散量は冬に最小、夏に最大となるサインカーブ形で近似される減少、月地表面蒸発量は冬に最小、夏に最大となるサインカーブ形で近似される増加と推定された。
3. 伐採による樹冠遮断蒸発、蒸散、地表面蒸発の各月変化量のうち、伐採前の蒸散量と伐採後の地表面蒸発量は、季節変化の傾向がほぼ同様でその値も著しい差がないことから、互いにはほぼ変化を打ち消し合い、主に遮断蒸発の減少が伐採による流出量の増加に対して支配的な要因であると考えられた。これは藤枝・野口・小川 (1996) の仮説を支持するものである。
4. 伐採前の蒸散量と伐採後の地表面蒸発量は量的には打ち消し合うが、水分の消失経路が異なるため、高水時流量と低水時流量の比率に変化が生じるものと考えられた。すなわち、植生が消失したとき地表面蒸発の増加によって土壌表面が乾燥するのに対し、土壌深層は蒸散の減少によって湿潤化するため、無降雨期間の流出に配分される水分量が相対的に多くなると推察された。
5. 降水量の季節分布は流域によって違いがあるが、一方で蒸散量と地表面蒸発量は植生や緯度・斜面方位などの流域条件によって異なることから、伐採による蒸散・地表面蒸発の変化の季節性も流域ごとに異なると考えられる。従来の伐採試験研究では流出量変化の季節性が流域によって異なることについて十分な整理がされていなかったが、本研究で得られた、伐採に

## 7.2. 伐採による流出と蒸発散の変化

よる月毎の流出増加量が降水量に依存して変動する遮断蒸発起源の流出量変化と、伐採前の蒸散量と伐採後の地表面蒸発量の差から生ずる流出量変化の和として説明されるという知見を用いることにより流域間の差異をより良く説明できる可能性が示された。

## 謝辞

本論文を執筆することができたのは、多くの方々のおかげである。

まずはじめに砂防研究室教授として袋山沢試験地の設定および運営の任に長く尽力されてきた太田猛彦、鈴木雅一両先生のお名前を挙げなければならない。既に 10 年を超える研究プロジェクトが継続されてきたのはひとえに両先生のリーダーシップに依拠するところが大きい。

また袋山沢試験地の研究プロジェクト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亙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。

継続的な流量観測と資料の蓄積については、研究室の諸先輩方および同輩諸君のたゆまぬ努力のたまものである。特に観測チームにおいて中心的役割を果たした、蔵治光一郎、白木克繁、田中延亮、堀田紀文各氏の存在を忘れることはできない。

研究室の学生仲間たちには研究の相談に乗ってもらったり解析のヒントをもらうなどした。一々名を挙げないが、ここに記して謝意を表する。

## 引用文献

- 愛知演習林 (1981) 愛知演習林量水観測結果報告 (III). 演習林 22: 84-191.
- 愛知演習林 (1999) 愛知演習林量水観測結果報告 (VI). 演習林 38: 127-146.
- 愛知演習林・演習林研究部 (1976) 愛知演習林量水観測結果報告 (I). 演習林 20: 39-64.
- 愛知演習林・演習林研究部 (1977) 愛知演習林量水観測結果報告 (II). 演習林 21: 48-89.
- 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.
- 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., 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.
- エム・イ・ブディコ (1973) 気候と生命 (下). 内島善兵衛・岩切敏訳, 488pp, 東京大学出版, 東京.
- 秩父演習林 (2002) 秩父演習林量水観測結果報告 (1989~2000 年). 演習林 41: 83-121.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. (2005) The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. J. Hydrol. 301: 235-249.
- 遠藤泰造 (2004a) 森林の水源涵養機能に関する論争史 (I). 水利科学 268, 54-88.
- 遠藤泰造 (2004b) 森林の水源涵養機能に関する論争史 (II). 水利科学 269, 78-116.
- 遠藤泰造・勝見精一・舟木敏夫 (1961) 夏期間の流量におよぼす伐採の影響について. 林試北海道支場年報 1960: 181-214.
- 遠藤泰造・勝見精一・鶴田武雄 (1961) 出水およぼす森林の伐採の影響について. 林試北海道支場年報 1960: 150-167.
- 藤枝基久・阿部敏夫 (1982) 竜の口山試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響. 林試研報 317: 113-138.
- 藤枝基久・野口正二・小川真由美 (1996) 森林流域における土地被覆変化が水文環境に与える影響—皆伐・トラクタ集材を例にして—. 日林誌 78(1): 43-49.
- 藤枝基久・野口正二・小川真由美・志水俊夫・坪山良夫・細田育広 (1996) 宝川森林理水試験地水文観測 53 年間の記録. 森林総研研報 370: 77-120.
- 藤枝基久・志水俊夫・金城勝・寺園隆一 (1995) 沖縄本島の水源地帯における水文環境. 日林誌 77(2): 145-152.
- 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.
- 福田晴耕・角 哲也・寺井喜之・池淵周一 (1992) 森林伐採の流況変化に関する事例研究. 第 4 回水資源に関するシンポジウム: 649-654.
- 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(4): 34-38.

- 福嶋義宏・鈴木雅一・谷 誠・加藤博之(1978) 滋賀県東南部の花崗岩山地における3つの小流域水文観測報告. 京都大学農学部演習林報告 50: 115-127.
- 福嶋義宏・鈴木雅一・友村光秀(1981) 梁ヶ谷試験地の水文観測報告. 京都大学農学部演習林報告 53: 131-143.
- 後藤義明(2001) 岡山県竜の口山森林理水試験地における長期試験の成果と展望林業技術 711: 18-23.
- 服部重昭・志水俊夫・荒木 誠・小杉賢一朗・竹内郁雄(2001a) 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.
- 服部重昭・志水俊夫・荒木 誠・小杉賢一朗・竹内郁雄(2001b) 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)－渇水地域上流森林整備指針策定調査報告－. 水利科学 45(4): 48-74.
- 浜端悦治(1999) 森林の回復過程が渓流水に及ぼす影響－森林伐採プロジェクトのまとめに向けて－. 琵琶湖研究所所報 18: 54-59.
- Harr, R.D., Levno, A., and Mersereau, R.(1982) Streamflow Changes After Logging 130-Year-Old Douglas Fir in Two Small Watersheds. Water Resou. Res. 18(3): 637-644.
- Hibbert, A. R.(1967) Forest treatment effects on water yield. In International Symposium on Forest Hydrology. Sopper, W. E. and Lull, H. W. (eds.), 813pp, Pergamon Press, Oxford, 527-543.
- Hornbeck, J.W., Adams, M.B., Corbett, E.S., Lynch, J.A. (1993) Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. J.Hydrol. 150: 323-344.
- 細田育広・大丸裕武・村上亘・北田正憲・齋藤武史(1999) 釜淵森林理水試験地観測報告－1・2号沢試験流域－(1979年1月～1993年12月). 森林総研研報 376: 1-52.
- 細田育広・村上 亘(2002) 釜淵森林利水試験地 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: 241-246.
- 井倉洋二・久保田勝義(1995) 大藪川森林理水試験地の水文特性(I)－水位－流量曲線式の検討と水収支について－. 九大演報 72: 107-116.
- 井上 桂・高田岩次・勝見精一・増田久夫(1956) 上川試験林の伐採による流量変化. 林試北海道支場業務報告 特別報告 7: 121-147.
- 地頭蘭隆・下川悦郎(1990a) 南九州における火山砕屑物に覆われた森林流域の流出特性. 水文・水資源学会誌 3(1): 7-16.
- 地頭蘭隆・下川悦郎(1990b) 高隈演習林内の第2号試験流域における水文観測 1986年～1988年の水文資料解析. 鹿大演報 18: 43-60.
- 地頭蘭隆・下川悦郎(1991) 甲突川水系川田川上流の森林流域における水文観測. 鹿児島大学農学部演習林報告 19: 43-60.
- 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳(1997) 桜島における土石流河川の流出特性. 鹿大演研報 25: 9-20.
- 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳(2000) 屋久島上面川流域の降雨・流出特性. 鹿大演研報 28: 13-25.
- 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.
- 康 怡慧・小松 光・吉藤奈津子・久米朋宣・鈴木雅一(2002) 樹液流データを用いたスギ林蒸散量の日変化・季節変化. 日林講 113: 238.
- 漢那賢作・新垣 隆・金城 勝(2001) 森林流域における水土保全事業が水源かん養機能に与える影響－国頭村辺土名の水文試験結果を例にして－. 沖縄県林業試験場研究報告 44: 1-14.
- 関西支場防災研究室・岡山試験地(1979) 竜の口山森林理水試験地観測報告(1959年1月～1977年12月). 林試研報 308: 133-195.

- 勝見精一 (1956) 上川試験地における伐採後の流出量変化 (第 1 報). 林試北海道支場業務報告 特別報告 5: 139-149.
- 川と水委員会編 (2001) 世界水ビジョン. 138pp, 山海堂, 東京.
- 加山俊也 (2000) 林床面蒸発. 袋山沢プロジェクト中間報告書, 113-118.
- 岸原信義・石井正典 (1983) 日本列島の山地流域からの流出に関する研究 (II) 流況の表示法と地質区分に関する研究. 日林誌 65: 1-8.
- 気象庁 気象観測 (電子閲覧室). <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- 近藤純正・中園 信 (1993) 日本の水文気象 (4): 地域代表風速、熱収支の季節変化、舗装地と芝生地の蒸発散量. 水文・水資源学会誌 6(1): 9-18.
- 小南裕志・鈴木雅一 (1988) ヒノキの樹液流速と給水量の関係, 京大演報 60, 190-197.
- 近藤純正・中園 信・渡辺 力・桑形恒男 (1992) 日本の水文気象 (3) - 森林における蒸発散量 -. 水文・水資源学会誌 5(4): 8-18.
- 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.
- 桑原英夫 (1975) 日本の平均年降水量について. 水利科学 101, 61-78.
- 九州支場防災研究室 (1982) 去川森林理水試験地観測報告 (1967 年 1 月～1976 年 12 月). 林試研報 317: 147-190.
- 丸山岩三・猪瀬寅三 (1952) 釜淵森林理水試験第 1 回報告. 林試研報 53: 1-46.
- 村井 宏 (1980) 水源かん養のためにのぞましい森林とその取扱いについて. 水利科学 131: 84-99.
- 村上茂樹 (2000) 林分構造が流域蒸発散に及ぼす影響の研究. 学位論文.
- 虫明功臣・高橋 裕・安藤義久 (1981) 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果. 土木学会論文報告集 309: 51-62.
- 永見郷康・吉野昭一・阿部敏夫 (1964) 森林伐採にともなう暖候期間の流出量変化 [宝川森林治水試験第 3 回報告]. 林試研報 170: 59-74.
- 中島皇・福島義宏 (1994) 芦生演習林内の高原部における由良川最源流部の 2 流域の流出特性. 京大演報 66: 61-75.
- 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.
- 中野秀章 (1972) 森林と水資源. 水利科学 16(3): 26-58.
- 中野秀章 (1976) 森林水文学. 228pp, 共立出版, 東京.
- 中野秀章 (1985) 森林と水 - 流出の平準化と総量と -. 水利科学 162: 1-34.
- 中野秀章・菊谷昭雄・森沢万佐男 (1963) 林況変化, とくに伐採が溪川流出に及ぼす影響 (I) - 水年・豊水・平水・低水・渇水各流出量への影響 -. 林試研報 156: 1-84.
- 新田秀典 (2004) 森林伐採が斜面表層の土壌水分分布に与える影響. 東京大学 2003 年度卒業論文, 65pp.
- 野口陽一 (1984) 歴史としての森林影響研究 (I) 水利科学 157: 22-39.
- 沼本晋也・鈴木雅一・太田猛彦 (1999) 日本における最近 50 年間の土砂災害被害者数の減少傾向. 砂防学会誌 51(6): 3-12.
- 小田智基 (2004) 森林伐採による水質変化に基づく水収支・物質収支の推定. 東京大学 2003 年度卒業論文, 30pp.
- 小野茂夫・川口利次 (1979) 森林伐採が直接流出量、渇水流出量に及ぼす影響. 林試東北支場年報 20: 104-111.
- 太田猛彦 (1991) 森林の水源涵養機能と森林施業のあり方私論. 水利科学 197: 1-33.

- 太田猛彦・窪田順平(1992) 山体地下水研究へのアプローチ. 第4回水資源に関するシンポジウム: 59-70.
- 太田岳史・平山健一(1991) 岩手火山体南面の4流域における水収支. 岩手大学農学部演習林報告 22: 1-10.
- Reinhart, K.G.(1967) Watershed calibration methods. *In* International Symposium on Forest Hydrology. Sopper, W. E. and Lull, H. W. (eds.), 813pp, Pergamon Press, Oxford, 715-723.
- 林業試験場(1961), 森林理水試験地観測報告(日降水量・日流出量), 林業試験場, 225pp.
- 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., Zollner, A.(2005) Studies of the impact of forest on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management* 186: 85-97.
- 櫻井莊三(1935) 年流出量並びに年流出率と年雨量との関係. 砂防 42: 1-18.
- 清水 晃・清水貴範・宮縁育夫・小川泰浩(2002) 暖温帯地域の針葉樹人工林流域における蒸発散と流出. 第6回水資源に関するシンポジウム論文集: 43-48.
- 志水俊夫・坪山良夫・細田育広(1994) 等高線にそった帯状伐採が渓川流出に及ぼす影響(I) 温暖期の長期流出特性について(英文). 日林誌 76(5): 393-401.
- 森林環境部土木保全科水資源保全研究室・水流出管理研究室(1993) 筑波森林水文試験地観測報告(1978年5月～1987年12月). 森林総研報 364: 125-168.
- 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.
- 白井純郎・近藤松一・大原忠一(1954) 竜ノ口山水源涵養試験第4回報告 伐採による流量変化の総合的考察. 林試研報 68: 95-122.
- 白井純郎・竹下 幸(1968) 去川試験地の流量、消失水量、保留量について(去川森林理水試験地第4回報告). 林試研報 216: 127-168.
- Shiraki, K. and Igarashi, K.(2004) Relationship between Base Flow and Basin Area of Small Mountainous Basins at the Tokyo University Forest in Aichi and in Chiba. *Bull. Tokyo Univ. For.* 111: 49-57.
- 白木克繁・劉 若剛・唐鎌 勇・執印康裕・太田猛彦(1999) 東京大学農学部附属千葉演習林袋山沢水文試験地の水収支解析. 東大演報 102: 71-86.
- 白木克繁・執印康裕・太田猛彦(1998) 袋山沢水文試験地における水収支. 平成6-9年度科学研究費補助金(基盤研究A(2))研究成果報告書 対照流域法による森林-環境系の応答解析(研究代表者: 太田猛彦東大教授), 23-32.
- Stednick, J.D.(1996) Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *J.Hydrol.* 176: 79-95.
- 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(4): 115-125.
- 鈴木雅一・福嶋義宏・窪田順平(1987) 竜王山試験流域の水文観測報告. 京都大学農学部演習林報告 59: 165-175.
- Swank, W.T.(1988) *Forest Hydrology and Ecology at Caweeta*. 469pp, Springer-Verlag, New York.
- 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.
- 武田繁後(1951) 年流出量と主なる降雨の増水量に就て(寶川森林治水試験第2回報告). 林試研報 50: 1-87.
- 武田進平(1950) 御明神演習林に於ける流出量測定結果. 盛岡農林専門学校学術報告 26: 111-119.

## 7.2. 伐採による流出と蒸発散の変化

- 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.
- 竹下 幸・河合英二・水谷完治 (1989) 森林小流域の流出機構 (VI) 皆伐後および部分皆伐後の洪水流量の変化について. 日林論 100: 637-638.
- 竹下 幸・大谷義一・河合英二 (1987) 森林小流域の流出機構 (IV) 皆伐処理と部分伐採処理による流出量の変化. 日林論 98: 577-578.
- 竹下 幸・清水 晃・宮縁育夫 (1996) 去川森林理水試験地観測報告 (1977 年 1 月～1986 年 12 月). 林試研報 370: 31-75.
- 竹下伸一・高瀬恵次 (2003) 蒸発散サブモデルを導入した長期間流出モデルの開発. 水文・水資源学会誌 16(1): 23-32.
- 瀧本裕士・堀野治彦・渡辺紹裕・丸山利輔 (1994) 造成農地と山林の蒸発散特性の比較－短期水収支法による流域蒸発散量の推定－. 水文・水資源学会誌 7(6): 529-535.
- 玉井幸治・後藤義明・深山貴文・小南裕志 (2004) 林野火災とマツ枯れによる森林の衰退が流出量と流況曲線に及ぼす影響－岡山市竜の口山量水試験地の場合－. 日林誌 86(4): 375-379.
- 田中延亮・蔵治光一郎 (2002) 樹冠遮断・リター遮断・林床面蒸発. (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. 東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ, 260pp, 東京). 38-43.
- 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.
- 谷 誠・阿部敏夫 (1985) 竜の口山森林理水試験地における研究の成果と今後の展望. 林試関西支場年報 26: 59-64.
- 谷 誠・阿部敏夫 (1987) 森林変化の流出に及ぼす影響の流出モデルによる評価. 林試研報 342: 41-60.
- Thomas, R.B., Megahan, W.F. (1998) Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion. Water Resources Research 34(12): 3393-3403.
- Thomas, R.B., Megahan, W.F. (2001) Comment on "Peak flow responses to clear cutting and roads in small and large basins, weastern Cascades, Oregon" by J.A.Jones and G.E.Grant, 1996 - reply. Water Resources Research 37(1): 181-183.
- 東大愛知演習林 (1984) 愛知演習林量水観測結果報告 (IV). 演習林 23: 57-88.
- 東北支場山形試験地 (1980) 釜淵森林理水試験地観測報告 1・2 号沢試験流域 (1959 年 1 月～1978 年 12 月). 林試研報 311: 129-188.
- 東京大林区署 (1923) 有林地ト無林地トニ於ケル水源涵養比較試験. 林試研報 23: 63-99.
- 東京大学農学部愛知演習林 (1987) 愛知演習林量水観測結果報告 (V). 演習林 25: 135-151.
- 塚本良則編 (1992) 森林水文学. 319pp, 文永堂出版, 東京.
- 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.
- 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.
- 矢部和弘・中嶋伸行・西尾邦彦 (2002) 短期水収支法による森林地帯の蒸発散量の季節変化. 東京農大農学集報 46(4): 229-234.
- 山口伊佐夫 (1962) 流域内水収支に対する森林の影響 蒸発と蒸散について. 水利科学 27: 29-48.
- 吉野昭一・菊谷昭雄 (1985) 高海拔流域における森林伐採と暖候期間の流出量変化第 1 報宝川試験地の本流流域について (宝川森林治水試験第 4 回報告). 林試研報 331: 127-145.