

千葉演習林袋山沢試験地における  
森林伐採が流出量に及ぼす影響に  
関する研究

真板英一

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>9</b>
1.1	近年の社会的状況	9
1.2	森林水文学における問題関心	9
1.3	既往の研究成果	10
1.4	本論文の目的	11
1.5	本論文の構成	12
<b>第2章</b>	<b>試験流域について</b>	<b>13</b>
2.1	流域概要	13
2.1.1	試験流域	13
2.1.2	植生状態と伐採経過	15
2.2	観測について	15
2.2.1	観測方法	15
2.2.2	観測成績	17
2.2.3	解析期間	19
2.2.4	ハイドログラフ概観	23
<b>第3章</b>	<b>年流出量とその変化</b>	<b>24</b>
3.1	袋山沢流域の年水収支（観測結果）	24
3.1.1	観測結果の概観	24
3.1.2	A,B 2流域の水収支の比較	25
3.1.3	伐採前後の水収支差	27
3.2	森林状態での年流出量	28
3.2.1	目的と方法	28
3.2.2	袋山沢の結果	29
3.2.3	考察1・袋山沢 A 流域の年損失量	31
3.2.4	考察2・袋山沢 A 流域の年流出量	34
3.2.5	考察3・袋山沢 2 流域の比較	35
3.2.6	袋山沢 A 流域と他流域との比較	37
3.2.7	考察4・袋山沢 A 流域と他流域の比較	42
3.3	伐採による年降水量と年流出量の関係の変化	45
3.3.1	目的と方法	45
3.3.2	袋山沢の結果	46
3.3.3	考察1・袋山沢流域における伐採の影響	48
3.3.4	他流域の結果	49
3.3.5	考察2・伐採による係数 $a$ の変化について	63

3.4	伐採による年流出量の変化（対照流域法）	66
3.4.1	目的と方法	66
3.4.2	袋山沢の結果	68
3.4.3	考察1・袋山沢流域の結果	71
3.4.4	他流域の結果	72
3.4.5	考察2・袋山沢流域と他流域との比較	84
<b>第4章</b>	<b>流況曲線の変化</b>	<b>89</b>
4.1	目的と方法	89
4.2	平均流況曲線とその変化	91
4.2.1	流況曲線・流況流量の解析	91
4.2.2	流況流出量	101
4.3	単年流況曲線とその変化	107
4.3.1	単年流況流量の解析	107
4.3.2	Low-flow Days	113
4.3.3	単年流況流出量	118
4.3.4	単年流況流出率	123
4.4	考察	127
4.4.1	伐採による流況曲線等の変化	127
4.4.2	低水時流出量の変化	133
4.4.3	流出の年間一様性の変化	133
<b>第5章</b>	<b>伐採による流出量変化の季節性の解析</b>	<b>135</b>
5.1	袋山沢流域の月水収支の概観	135
5.1.1	平均月水収支	137
5.1.2	月降水量と月流出量	138
5.2	水収支法による解析	141
5.2.1	平均月流出量の解析	141
5.2.2	短期水収支法による解析	144
5.2.3	月水収支と短期水収支の比較	150
5.3	対照流域法による解析	153
5.3.1	A,B 両流域の月流出量の関係	153
5.3.2	出水規模と伐採の影響	155
5.3.3	伐採による増加量の算出	160
5.3.4	伐採による増加量の季節性	162
5.4	考察	167
5.4.1	水収支法の結果と対照流域法の結果の比較	167
5.4.2	考察・月増加量の季節変化の決定要因	167
5.4.3	出水規模と流出増加量	168
5.4.4	他流域における伐採の影響の季節性	170

<b>第 6 章</b>	<b>伐採による蒸発散各項の変化</b>	<b>172</b>
6.1	年水収支の変化 . . . . .	172
6.1.1	方法 . . . . .	172
6.1.2	伐採前期間における推定値 . . . . .	173
6.1.3	伐採後期間における推定値 . . . . .	174
6.2	月水収支の変化 . . . . .	176
6.2.1	月蒸発散量の変化 . . . . .	176
6.2.2	月水収支の変化 . . . . .	178
6.3	蒸発散各項の変化と流出成分の変化 . . . . .	180
<b>第 7 章</b>	<b>まとめと結論</b>	<b>182</b>
7.1	袋山沢流域の水文学的特徴について . . . . .	182
7.2	伐採による流出と蒸発散の変化 . . . . .	182
7.2.1	年流出量について . . . . .	182
7.2.2	流量の高低と伐採の影響 . . . . .	183
7.2.3	伐採の影響の季節性 . . . . .	184
7.2.4	蒸発散各項の変化の推定 . . . . .	185
<b>謝辞</b>		<b>187</b>
<b>引用文献</b>		<b>188</b>

# 目次

2.1	袋山沢試験地流域地形図	13
2.2	袋山沢試験地の流域ヒソグラフ曲線	14
2.3	流量実測試験の様子(2001年7月11日、筆者撮影)	17
2.4	水位流量換算式の検定結果	18
2.5	袋山沢流域のハイドログラフ [mm/day]	21
3.1	袋山沢流域の年降水量および年流出量	26
3.2	袋山沢流域の年降水量および年損失量	26
3.3	袋山沢 A,B 流域の年流出量差	26
3.4	袋山沢 A 流域の年降水量と年流出量の関係	30
3.5	伐採前期間における袋山沢 A,B 流域の年降水量と年流出量の関係	30
3.6	袋山沢 A 流域の実測値と Oldekop 式による推定値の比較	33
3.7	袋山沢流域の水文学的基盤の地形(白木ら,1999 より)	36
3.8	森林流域の年損失量 [mm/year]	39
3.9	森林流域における平均年降水量と平均年流出量の関係	41
3.10	森林流域における平均年降水量と平均年損失量の関係	41
3.11	グループ別の係数 a の分布	42
3.12	袋山沢流域における伐採前後の流出量	46
3.13	上川北谷流域における伐採と台風被害の影響	50
3.14	上川南谷流域における伐採と台風被害の影響	51
3.15	上川二の沢流域における伐採の影響	53
3.16	釜淵 2 号沢流域における伐採等の影響	55
3.17	宝川流域における伐採の影響	57
3.18	常陸太田流域における伐採の影響	58
3.19	竜の口山北谷流域における伐採と火事の影響	60
3.20	竜の口山南谷流域における伐採と火事の影響	61
3.21	去川 2 号沢流域における伐採の影響	63
3.22	袋山沢 A,B 流域の年流出量の関係	69
3.23	伐採後の年流出量の増加量	70
3.24	年降水量と伐採伐採による年流出増加量	71
3.25	釜淵 2 号沢流域における伐採等の影響	73
3.26	森林期間における 2 流域の流出量	74
3.27	釜淵 2 号沢流域における伐採による年流出量の増加量の経年変化	75
3.28	釜淵 2 号沢流域における伐採による年流出量の増加量と年降水量の関係	77
3.29	竜の口山流域における伐採と火事の影響	78
3.30	竜の口試験地における伐採による年流出量の増加量の経年変化	80

3.31 竜の口山における伐採による年流出量の増加量と年降水量の関係	81
3.32 去川 2 号沢流域における伐採の影響	82
3.33 去川試験地における伐採による年流出量の増加量の経年変化	83
3.34 去川流域における伐採による年流出量の増加量と年降水量の関係	83
3.35 伐採等による年流出量の平均増加量と平均年降水量の関係	85
4.1 流況曲線概念図	90
4.2 伐採による平均流況曲線の変化	91
4.3 伐採前の 2 流域の差	92
4.4 A 流域の伐採前後の差	94
4.5 A 流域の伐採前後の差の比率	94
4.6 伐採による各流域の変化	95
4.7 伐採による増加量	95
4.8 伐採による増加率	95
4.9 伐採前後期間の平均流況曲線	97
4.10 A,B 各流域の伐採前後の変化量	98
4.11 伐採による増加量	98
4.12 伐採による増加率	98
4.13 伐採による増加量 (拡大図)	99
4.14 伐採による増加率 (拡大図)	99
4.15 平均流況曲線の流況流出量	101
4.16 伐採前期間の A,B 流域の差	102
4.17 A 流域の伐採前後の差	104
4.18 A 流域の伐採前後の差の比率	104
4.19 伐採前後における平均流況流出量の変化	105
4.20 伐採による平均流況流出量の増加量	105
4.21 伐採による平均流況流出量の増加率	105
4.22 B 流域の各流出率の変化量	107
4.23 A,B 両流域の単年流況曲線対比図	109
4.24 A,B 流域の単年流況流量の対比図	110
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	111
4.26 伐採前後の回帰係数	113
4.27 15 日間隔の回帰直線	114
4.28 Lowflow days の時系列変化	115
4.29 A,B 両流域における low-flow days の対比図	117
4.30 A,B 流域の単年流況流出量対比図	119
4.31 各流出量の増加量の時系列変化 [mm/year]	121
4.32 各増加量の水年ごとの積算	122
4.33 A,B 流域の単年流況流出率対比図	124
4.34 各流出率の変化量の時系列変化	126
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	129
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	129
4.37 N 日目流量の回帰係数の変化	131

5.1	各月の平均降水量 [mm/month]	135
5.2	A 流域における平均月水収支 [mm/month]	137
5.3	A 流域における月降水量と月流出量の関係	138
5.4	東京大学愛知演習林白坂流域の月降水量・月流出量	139
5.5	B 流域における月降水量と月流出量の関係	140
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	141
5.7	袋山沢流域における平均月水収支とその変化 [mm/month]	143
5.8	短期水収支法の適用結果（伐採前期間）	146
5.9	短期水収支法による平均日蒸発散量	147
5.10	伐採前期間における A,B 流域の損失量の差	148
5.11	A 流域の損失量	149
5.12	B 流域の損失量の変化	151
5.13	伐採による損失量の変化	152
5.14	A,B 流域の月流出量対比図	154
5.15	A,B 流域の 1 時間流量の対比図	156
5.16	大出水の発生状況	157
5.17	大出水とそれ以外の月流出量	158
5.18	伐採による月流出量の増加量	161
5.19	月降水量と月増加量の関係	162
5.20	月降水量と月増加量の関係の季節変化	163
5.21	2001 年 1 月末のハイドログラフ [mm/hour]	165
5.22	月降水量と月増加量の関係の季節変化・冬期補正済	166
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	169
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]	176
6.2	伐採による蒸発散各項の月変化量	178
6.3	伐採前後の水収支各項の変化（推定） [mm/month]	179
6.4	伐採前後の月水収支の月別変化（推定） [mm/month]	181

# 表 目 次

2.1	流域地形諸元	14
2.2	伐採前の流域上層木の立木密度及び材積	15
2.3	水位流量換算式定数表	16
2.4	流量観測における欠測日数	19
2.5	欠測の詳細	20
3.1	年水収支 [mm/year]	25
3.2	森林流域の年水収支 [mm/year]	38
3.3	袋山沢流域の年流出量の変化 [mm/year]	47
3.4	森林伐採による年流出量の変化（上川北谷） [mm/year]	50
3.5	森林伐採による年流出量の変化（上川南谷） [mm/year]	51
3.6	森林伐採による年流出量の変化（上川二の沢） [mm/year]	53
3.7	森林伐採による年流出量の変化（釜淵2号沢） [mm/year]	55
3.8	森林伐採による年流出量の変化（釜淵2号沢） [mm/year]	55
3.9	森林回復による年流出量の変化（宝川本流） [mm/year]	56
3.10	森林伐採による年流出量の変化（常陸太田） [mm/year]	58
3.11	森林伐採による年流出量の変化（竜の口山北谷） [mm/year]	59
3.12	森林伐採による年流出量の変化（竜の口山南谷） [mm/year]	60
3.13	森林伐採による年流出量の変化（去川2号沢） [mm/year]	62
3.14	植生変化による係数 $a$ の変化	64
3.15	袋山沢流域の年流出量の変化 [mm/year]	68
3.16	釜淵流域の年流出量の変化	72
3.17	竜の口山流域の年流出量の変化	77
3.18	去川2号沢流域の伐採前後の変化（対照3号沢）	81
3.19	伐採等による年流出量の平均変化量 [mm/year]	84
4.1	伐採前後の平均流況指標 [mm/day]	92
4.2	A流域における伐採前後の平均流況指標 [mm/day]	94
4.3	伐採前後の平均流況指標 [mm/day]	96
4.4	平均豊水・平水・低水・渇水各流出量 [mm/year]	102
4.5	A流域の平均豊水・平水・低水・渇水各流出量 [mm/year]	103
4.6	平均豊水・平水・低水・渇水各流出量 [mm/year]	106
4.7	A流域の流況 [mm/day]	108
4.8	B流域の流況 [mm/day]	108
4.9	袋山沢流域の low-flow days	115
4.10	A流域における各閾値間の相関係数	115



4.11 B 流域における各閾値間の相関係数 . . . . .	116
4.12 豊水・平水・低水・渇水各流出量 . . . . .	118
4.13 各流出量の伐採後期間の推定値と増加量 . . . . .	122
4.14 豊水・平水・低水・渇水各流出率 [%] . . . . .	123
4.15 各流出率の推定値と変化量 [%] . . . . .	127
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 . . . . .	128
4.17 袋山沢 B 流域における伐採前後の流況流量の変化 . . . . .	128
4.18 日流量の増加割合の比較 . . . . .	130
5.1 月降水量 [mm/month] . . . . .	136
5.2 A 流域月流出量 [mm/month] . . . . .	136
5.3 B 流域月流出量 [mm/month] . . . . .	136
5.4 A 流域における月平均水収支 [mm/month] . . . . .	137
5.5 伐採前期間における平均月流出量 [mm/month] . . . . .	141
5.6 平均月流出量の伐採前後の変化 [mm/month] . . . . .	142
5.7 時間流量が 10 mm 以上となる時間の月別集計値 . . . . .	159
5.8 伐採による月流出量の増加量 . . . . .	160
5.9 伐採による月流出量の増加量と月降水量（修正後） . . . . .	166
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] . . . . .	176

# 第1章 はじめに

## 1.1 近年の社会的状況

西暦 21 世紀になって既に数年が経過したが、前世紀末から今日まで、今世紀において人類が直面するであろう諸問題についてさまざまな予測が立てられた。そのうちのひとつに、21 世紀は水の世紀である、というテーゼがある。

日本国内に長年住んでいると実感が薄いのが、世界的に見れば水資源の不足に苦しんでいる地域は多い。世界人口の増加をまかなうための農業用水の需要に加え、発展途上国における急激な都市化・工業化による水需要増加や水質汚染が今後（とも）大きな問題となるという予測が議論されている（川と水委員会編, 2001）。

幸いにしてわが国はユーラシア大陸東岸のモンスーン地帯に位置しており、瀬戸内海一帯など一部の地域を除けば比較的豊富な降雨に恵まれている。そのため、わが国では渇水問題よりもむしろ洪水問題の方がより社会的に深刻な問題であると意識されてきた。

しかしながら、危険河川における砂防施設が充実化するにつれ、水害・土砂災害による被害は年々少なくなった（沼本ら, 1999）。一方では、工業の発展による工業用水の需要増や、都市への人口集中による上水道水の消費量の増加を背景として、資源としての水に対して関心が高まっている。

近代日本は水資源確保のために近代的手段、すなわちコンクリートダム建設を推進してきた。今後さらに利水ダムを建設しようにもダム建設に適した立地はもう多くは残されていない。それに加えて長野県で話題となった「脱ダム運動」に代表されるようなポストモダン的な環境意識の市民的高まりによって、コンクリートダムのような人工建造物を山中に建築することは困難になりつつある。

そういった中で、水資源問題の解決策として、「緑のダム」すなわち森林流域の水源涵養機能に期待するべきである、という論調が近年急速に高まっている。森林水文学者たちは今や「緑のダム」について何も語らずに済ませることを社会的に許されなくなりつつある。

## 1.2 森林水文学における問題関心

森林水文学において、森林と水資源の関係は古くて新しい問題である。

古さという点では、この分野でよく引き合いに出される平田・山本論争が起こったのが 1930 年代であるから（後藤, 2001、遠藤, 2004b）、70 年前には既に水資源確保のために森林の状態を制御しようという方法論が存在はしていた。実際、江戸時代に瀬戸内地方の農民は、河川流量を確保するために山の樹木を積極的に伐採することを伝統的に行なっていたようである（遠藤, 2004a）。しかし、水資源の確保のために森林植生を操作しようというパラダイムは、明治以降長らく現実的に考えられて来なかった。その原因としてひとつには、利水ダムの方が効果が高くまたニーズに応じたきめ細かい制御が可能であること、もうひとつには森林に対して防災面の期待や木材生産の需要

の方が大きく水源涵養機能に対する期待は相対的に低かったことが考えられる。

近年になって、国産材に対する需要が低くなり、木材生産を高効率で行なう必要性がなくなったことにより、水源涵養機能に焦点を合わせて森林を維持管理するという方法論が現実的に検討されるようになった。中には針葉樹林を広葉樹林に樹種転換する政策も検討されているが、これは用材需要の低下がなければ発生しなかった議論であろう。村井(1980)、塚本・太田(1984)など一連の論文が発表され始めたのは1980年代であるが、近年ますます真剣に議論がなされている(服部ら, 2001; 蔵治, 2003 など)。

### 1.3 既往の研究成果

森林と水流出の関係を実験的に検証するための主要な方法論は流域試験である。すなわち、植生状態を人為的に改変したり、あるいは山火事などの非人為的なイベントによる森林荒廃や、また幼齢林・荒廃林からの植生回復の前後で流出量の観測を行ない、林況の変化にともなう流出量の変化を検出するという方法である。流域試験は100年ほど前から世界各地で多数行なわれており(古いものについては野口(1984)、最近のものについては蔵治(2003)に詳しい)、それらの結果を取りまとめた論文が発表されている。

サマリ論文として最も古典的なものは、森林伐採による年流出量の変化を取りまとめた Hibbert(1967) である。Bocsh and Hewlett(1982) は Hibbert(1967) をさらに発展させ、世界各地の94流域の結果を整理した。その結果、次のような結論を得た。すなわち、森林を伐採すると伐採率に比例して年流出量が増加する。増加量は針葉樹林で最も大きく、落葉広葉樹林、灌木林の順に小さくなる。針葉樹林と灌木林の伐採では、年降水量が多いほど増加量は大きくなる(福嶋, 1992の要約を参考にした)。

Bocsh and Hewlett(1982)の結果は、Hornbeck *et al.*(1993)やStednick(1996)、Brown *et al.*(2005)などの後続の研究によってアップデートされた。特に Brown *et al.*(2005)は世界各地166ヶ所の対照流域法の結果を取りまとめたもので、現時点における最も包括的なサマリ論文である。また Brown *et al.*(2005)では、年流出量の変化だけでなく、季節流出量の変化と流況曲線(Flow duration curves)の変化についても関心が払われていることも特徴的である。これらの論文の結論はほぼ Bocsh and Hewlett(1982)の結果をなぞるものであった。

国内の事例についてまとめた研究をしているものとして中野(1971)が挙げられる。国内の数流域の観測データを再解析して、林況と水年、夏期・冬期、豊水・平水・低水・渇水の各流出量の変化について論じている。結果を簡単に要約する。水年流出量は伐採によって増加し、皆伐の場合、日本では約200~300mmの増加量とみられる。夏期・冬期流出量はともに増加することが認められたが、増加量が夏期と冬期でどちらがより多いかは流域によって異なった。豊水・平水・低水・渇水各流出量は伐採によって増加したことが認められたが、豊水流出量と平水・低水・渇水流出量の比率は伐採によって後者が高まり、流出の年間一様性は伐採によって高まった。

蔵治(2003)は、現代日本における森林の「緑のダム機能」に対する市民の理解は非科学的な思い込みの要素が強いとし、これに対して科学的な研究成果のレビューを取りまとめている。森林のダム機能として洪水緩和機能と渇水緩和機能の2点に着目し、世界各地の流域試験の結果を収集して整理したところ、ほぼ例外なく、森林の存在は洪水緩和機能にはプラスの効果があり、渇水緩和機能にはマイナスの効果があることが示された。

以上の論文から明らかのように、これまでの流域試験の結果から、林況の変化にともなう流出量の変化について一般法則が既に明らかにされている。しかしながら、これらの一般則は基本的に定性的

なものにとどまっている。たとえば伐採による年流出量の変化をまとめた Bosch and Hewlett(1982)にしても、増加量は流域によって大きくばらついているが、そのばらつきを説明するところまでは到っていない。この点は Brown *et al.*(2005)に到っても解消されていない。

流域試験の結果は各流域の水文学的特徴（気象条件や地文条件など）によってバイアスを受けるため、各試験の結果を定量的に統一化することは容易なことではないことは確かである。しかしながら、水資源を確保するために森林の状態を操作しようという時、どのような操作を加えればどの程度の量の水資源が得られるかという予測が立たなければ、政策として成り立たない。林況と流出量の関係が定量的に把握されないうぎり、森林を操作して水資源を確保するというアイデアはアイデア倒れに終わってしまう。

森林の改変による流出の変化を定量的に把握することはまた、森林水文学の最終目標のひとつでもある。現状の学問水準は残念ながらまだそこまで達してはいないが、少しでもそこに近付くために、まだまだ流域試験を継続し、データを蓄積して行く必要がある。

## 1.4 本論文の目的

本論文は、東京大学千葉演習林袋山沢試験地において実施された皆伐実験のデータを用いて、森林伐採によって流出量がどのように変化したかを解析したものである。森林伐採の影響は水流出以外にも、土砂流出、渓流水質、斜面崩壊などにも及び、これらの変化について解析することも重要な課題であるが、本研究では、先述したような背景を受けて、水流出量の変化に焦点を当てて解析を行なった。解析にあたって、解明するべき論点としたのは「どこで、どれくらい、どうして」の3点である。

**どこで** 伐採による流出量の変化は、ハイドログラフのすべての部分に均等に現れるわけではない。また林況を操作することによって流出量増加を図る場合においても、特に流量の増加を期待する部分とそうでない部分とがあるであろう。そこで、ハイドログラフを幾つかの区間に区分して、各部分ごとに流出量の変化を把握することが必要となる。

本論文においては、ハイドログラフを区分する観点として、流量の大小（高水時か低水時か）、および季節の2点に着目して行なう。

**どれくらい** 前節でも述べた通り、流出量の変化は量的に把握される必要がある。そこで本論文では変化量を算出することに解析の重点を置くこととした。

**どうして** 流出量の変化量は流域ごとにバラツキがあるが、流出変化を予測するためにはこのバラツキがなぜ発生するか説明できなければならない。森林伐採によって流出量が増加するのは植生量減少によって蒸発散量が減少するからである、という理解が今までの研究によって確立しているが、蒸発散の中でも遮断蒸発を重視する研究者と蒸散の影響を重視する研究者とがおり、現在まで定説はない（塚本編, 1992）。そこで本論文では、蒸発散各項（遮断蒸発、蒸散、地表面蒸発）の変化を量的に推定し、流出の増加量を決定する要因がなんであるのかを推測することとした。

従来から流域からの流出量の解析には、タンクモデルや貯留関数法をはじめとする流出モデルを用いて検討するという方法が多く用いられている（例えば谷・阿部, 1987）。伐採試験が単独流域で行なわれた場合には、伐採しなかった場合の流出量を推定するため、流出モデルを用いる必要がある。しかし本研究では、解析対象とした袋山沢試験地で対照流域法がほぼ理想的な水準で実施されたため、この目的のために流出モデルを利用する必要はない。また流出モデルは、

流出の変化を同定されたモデルパラメータの変化として検討する目的でも使用されるが、本研究では、流域の流出特性の変化ではなく、水流出が実量としてどう変化したのかを明らかにすることを主眼としたため、流出モデルは使用しなかった。

## 1.5 本論文の構成

最後に本論文の構成について述べる。

この第1章では、本研究の背景と目的について記した。

第2章では、本研究で対象とした袋山沢試験地について概要を述べる。試験地の地文的データや、伐採試験の経過、観測方法などのほかに、観測データをハイドログラフとして示した。

第3章では年流出量について解析を行なった。この章では2つのことを目的とした。ひとつは、年水収支を国内の森林小流域のデータと比較し、袋山沢試験地の水文学的特性を把握することである。これは、袋山沢試験地の水文データについてのまとまった研究論文が未だないため、本論文で取り扱うこととしたものである。もうひとつは、伐採による年流出量の変化を解析し、国内他流域の実験例と比較することである。

第4章では、流量の大小と伐採による流量変化の関係を解析した。解析手法として主に流況曲線を使用した。中野ら(1963)によって提案された豊水・平水・低水・濁水流出量を用いて流出の年間一様性の変化も検討した。

第5章では、主に月流出量データを用いて、伐採による流量変化の季節性について解析した。また流量変化に季節性が生じる原因について、蒸発散の変化という観点から考察を行なった。

第6章では、袋山沢試験地で行なわれた他の観測データを用いて、伐採による年水収支の変化を推定した。また月蒸発散の変化を推定し、流量の各種変化について統一的に説明できる原因の推察を行なった。

第7章では本論文で得られた知見をまとめた。

## 第2章 試験流域について

### 2.1 流域概要

#### 2.1.1 試験流域

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

流域は東西に細長いふたつの流域が南北に隣接する形状になっており、北側を A 流域 (0.802ha)，南側を B 流域 (1.087ha) と称している (図-2.1)。A 流域は森林植生を保持する対照流域，B 流域は皆伐処理を施す処理流域と設定した。流域の諸元を表-2.1 に (一部を白木ら (1999) より引用)，流域ヒソグラフ曲線を 図-2.2 に示した。図-2.2 で、両流域は上部から中部にかけて地形的特徴がよく似ているが、下部では B 流域の方が傾斜が緩やかである。

なお流域内に林道や作業道などは敷設されていない。

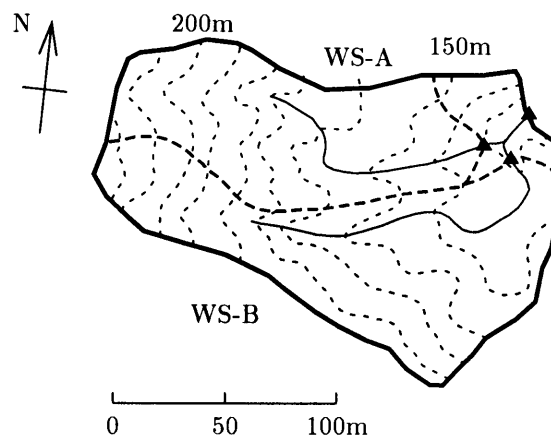


図 2.1: 袋山沢試験地流域地形図

Topographical map of the watersheds

▲: 量水堰

▲: Weir

表 2.1: 流域地形諸元

Topographic characteristics of the watersheds

地形因子 Topography	A 流域 (対照流域) WS-A (control)	B 流域 (処理流域) WS-B (treatment)
流域面積 [ha] Area	0.802*	1.087*
標高範囲 [m] Range of altitude	129.2~224.5*	128.4~230.2*
平均傾斜 [°] Average slope	34.2	33.4
主流平均勾配 [°] Average slope of main stream	25.5*	23.5*
平均土壌深 [m] Average depth of soil	2.87*	2.22*
形状係数 Form factor	0.283	0.253
円状率 Circularity ratio	0.592	0.478
細長率 Elongation ratio	0.600	0.566
起伏比 Relief ratio	0.5659	0.4904

\*: 白木ら (1999) から引用

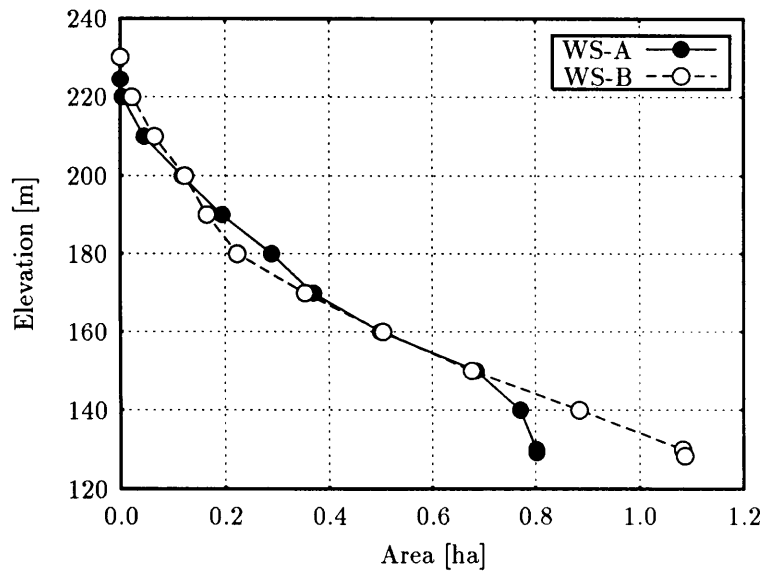


図 2.2: 袋山沢試験地の流域ヒソグラフ曲線  
Hypsographic curve of the watersheds

表 2.2: 伐採前の流域上層木の立木密度及び材積

Stand density and stock of the canopy trees on the watersheds before cutting

樹種 Species	A 流域 WS-A		B 流域 WS-B	
	立木密度 Stand density [number/ha]	材積 Stock [m <sup>3</sup> /ha]	立木密度 Stand density [number/ha]	材積 Stock [m <sup>3</sup> /ha]
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	750.6	666.7	321.1	348.4
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	341.6	151.7	351.4	144.3
計 Total	1092.3	818.4	672.5	492.8

(1998 年調査)

(Measured in 1998)

### 2.1.2 植生状態と伐採経過

伐採以前の植生は A, B 両流域ともスギ・ヒノキ人工林である。この人工林は 1928 年から 1931 年にかけて植栽された一斉林であり、伐採時においては約 70 年生の樹冠がほぼ閉鎖した壮齢林であった。樹高はおよそ 20~25 m で、立木密度および材積は表-2.2 の通りである。下層木は少なく、アオキ (*Aucuba japonica*), ユズリハ (*Daphniphyllum macropodum*) などが若干見られる程度である。

1999 年春に B 流域の上層木・下層木すべてが皆伐された。施業方法については、植生除去の影響のみを検討するために、地表面の攪乱が最小限にとどまるよう索道を用いた架線集材によって搬出を行なった。伐採に際して刈り払われた枝葉は、流域内に放置された。鹿および猪による食害を防ぐため 2000 年 1 月にシカ防護柵を設置した後、伐採の翌年にあたる 2000 年 3 月には新たにスギ・ヒノキの苗木が植栽された (植栽密度約 3000 本/ha)。草本植物が繁茂したため植栽の翌年には、下草刈りが行なわれた。植栽樹の生育は順調で、植栽 4 年目の 2003 年には樹高が尾根部で約 2 m, 谷部で約 4 m に達している。

シカ防護柵は高さ 1.5m、網目 5cm のネット製で、袋山沢試験地の外周全体に張り巡らされた。防護柵の内外で植生調査を行なった結果、柵内は植生の現存量が多く、また食害に遭ったヒノキが少ないことが明らかとなり、防護柵の効果が実証された (蒲谷ら, 2001)。

伐採後、B 流域の斜面では表面侵食がほとんど発生しておらず、また B 流域量水堰に堆積した流出土砂量も目立った増加はなかった。

## 2.2 観測について

### 2.2.1 観測方法

降水量は、当流域から東へ約 200m 離れた位置にある新田観測点の露場で観測された。測器は口径 20cm, 一転倒 0.5mm の転倒マス式雨量計 (大田計器製), 及び口径 21cm の貯留式雨量計 (自作) を併用している。転倒マス式雨量計は自記観測で、貯留式雨量計は週一回の定期観測時に貯留量をメスシリンダーを用いて計測している。転倒マス式雨量計は、マスに貯留した雨水が無降雨期



表 2.3: 水位流量換算式定数表

堰	$a$	$H_1(m)$	$H_2(m)$	$Hd(m)$	$b$
堰 A	1.50970	0.0013	0.056	0.2	1.0
堰 B	1.44684	0.0020	0.120	0.2	1.0
堰 C	1.60075	0.0017	0.043	0.2	1.2

間中に蒸発することにより、また左右のマスが転倒時に切り替わる際に流下する雨水がマスに捕捉されないことにより、降水量を過小評価することが知られている。一方の貯留式雨量計は、雨水を貯留するタンクからの蒸発はほとんど無視できる量であり、観測期間中の総降水量を転倒マス式雨量計よりも精度良く計測できる。そこで本研究では、転倒マス式雨量計の自記記録を、総量が貯留式雨量計に一致するように補正することで降水量データを作成した（白木ら、1999）。

年降水量は、1993～2002年の平均で2170.1 mm/yearである。また同地点における年平均気温は14.2℃、純放射量は平均で約2500 MJ/m<sup>2</sup>/yearとなっている（1998～2000年）。

流量は、A,B流域の末端地点と、欠測時のバックアップを目的としてA,B両流域を包含する地点に量水堰を設けて観測している。量水堰は、いずれも基岩にコンクリートを岩着させている。ノッチの形状は、90°三角ノッチである。堰水位は、フロート式自記水位計（池田計器製）を用いてチャート紙上に記録している（巻取り速度18 mm/hour）。加えて週1～2回の定期観測時に堰の水位を0.5mm単位で読み取り、チャート紙上に記録される水位と実際の越流水深及び時刻の補正を行なっている。堰水位は、1997年6月までは堰のコンクリート壁に取り付けられたものさしを目視で読み取り、1997年6月以降は新たに設置されたポイントゲージを使用して読み取っている。その水位記録をデジタイザを用いて読み取り、堰水位と越流水量の実測値から得られた水位流量換算式によって実流量に変換することで流出量を得ている。

流域が設定されたのは1991年で、1993年途中から信頼できる流出量データが得られるようになった。また、B堰において1998年9月よりKADEC-MIZU（コーナースステム製）を使用した水深の自記記録も開始した。

水位流量換算式は流域設定当初に白木克繁氏らによって作成され、白木ら（1998）に詳しい。ここで原報告から要点のみ引用すると、水位と流量の実測値が得られた範囲では近似曲線を算出し、それ以上の流量範囲では沼知式を適用するものとする。すなわち、堰水位が $H(m)$ の時、流量 $Q(m^3/sec)$ への換算式は

$$\begin{cases} Q = 0 & (H \leq H_1) \\ Q = a(H - H_1)^{2.5} & (H_1 < H < H_2) \\ Q = \left\{ 1.354 + \frac{0.004}{H} + \left( 0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{Hd}} \right) \left( \frac{H}{b} - 0.09 \right)^2 \right\} H^{2.5} & (H_2 \leq H) \end{cases}$$

である。ただし、 $a, H_1, H_2, b$ は堰ごとに固有のパラメータで、値は表-2.3の通りである。

水位流量換算式は、量水堰の劣化などの要因により経年変化することが考えられる。筆者は2001、2002年に流量実測を行ない、白木ら（1998）の換算式の検定を行なった。

観測は次のような方法で行なった。まず容量が既知であるプラスチックの容器を用意する。次にプラ容器を量水堰の直下に水平に設置し、堰のノッチからの越流水を漏らさずすべてプラ容器に誘導する。そしてプラ容器が満水になるまでの時間をストップウォッチで計測する。プラ容器の容量

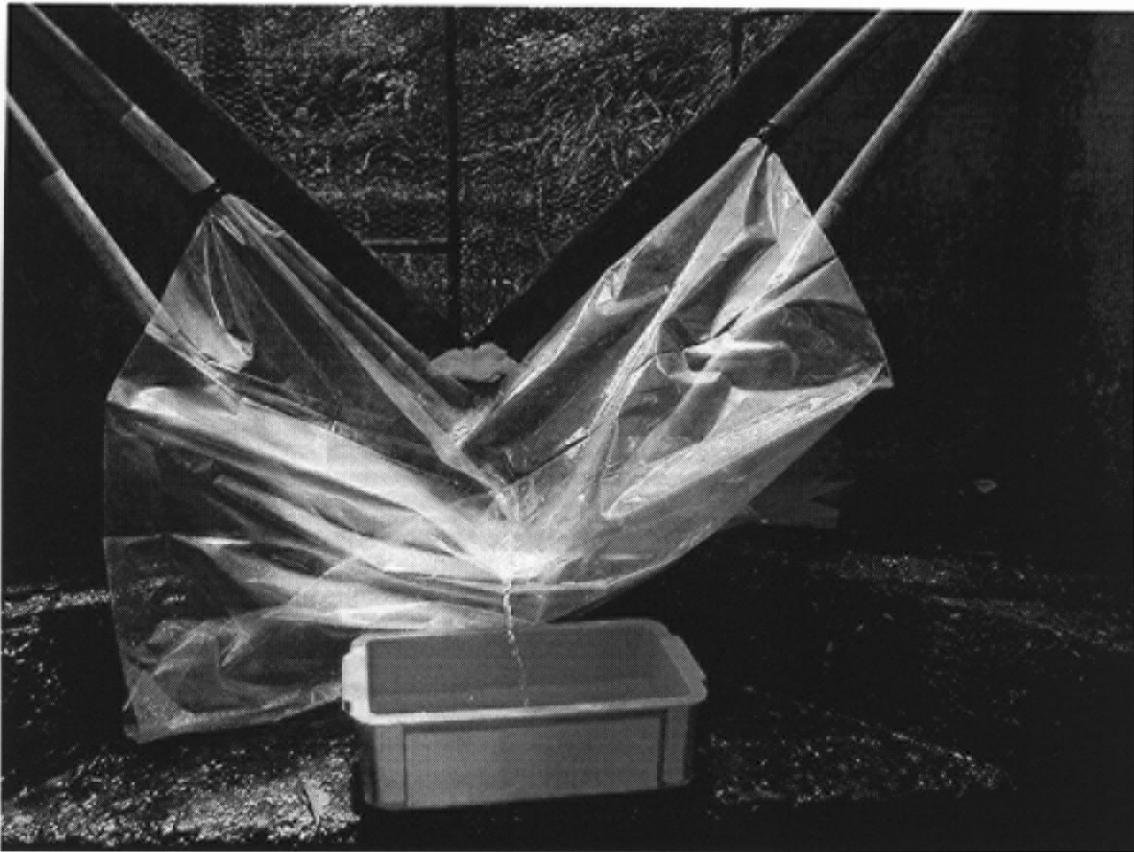


図 2.3: 流量実測試験の様子 (2001 年 7 月 11 日、筆者撮影)

は既知であるから、単位時間あたりの流量がただちに算出される。これと同時に堰水位をポイントゲージで測定し、堰水位と越流流量の関係が得られる。

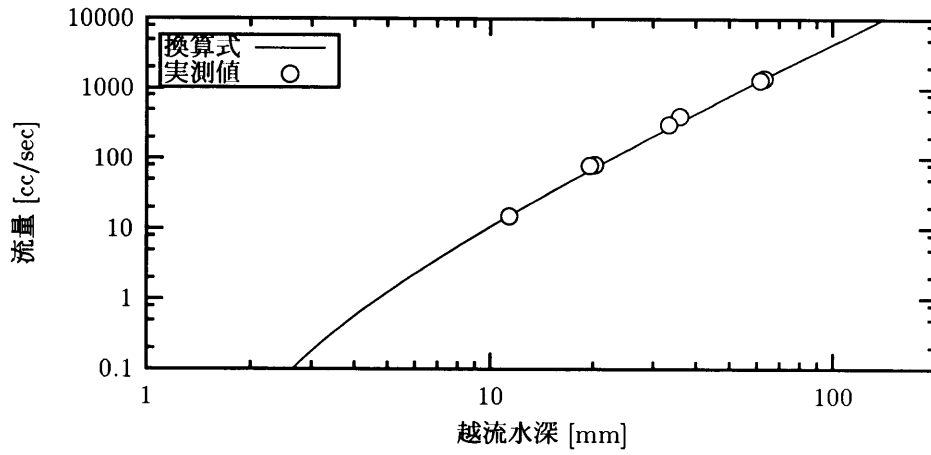
参考のため、図-2.3に、流量観測の様子を写した画像を示す。測定に使用したプラ容器は2種類で、測定時の流量の大きさに応じて使い分けた。容量はそれぞれ 4370 cc、9152.5 cc である。

測定結果を白木ら (1998) の水位流量換算式と比較したグラフを図-2.4に示す。A,B,C各堰とも、実測値と換算式とがよく一致しており、量水堰の経年変化は特段認められない。そこで本研究では1994~2002年の全期間において、流出量の算出には白木ら (1998) の換算式を使用した。

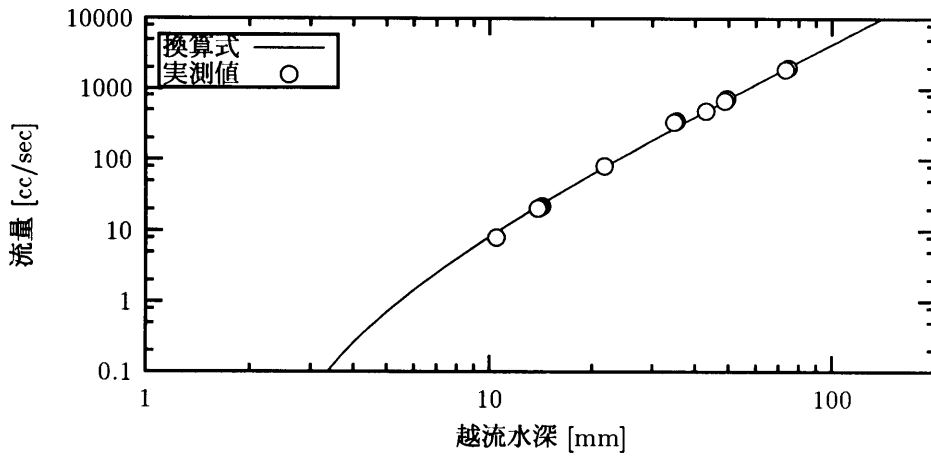
### 2.2.2 観測成績

1996年までの流量データは白木克繁氏の手によって整理されており (白木ら, 1999)、1997年以降は筆者が整理を行なった。ここでは、1997年から、本研究で解析対象とする2002年までの流量観測の成績について記す。

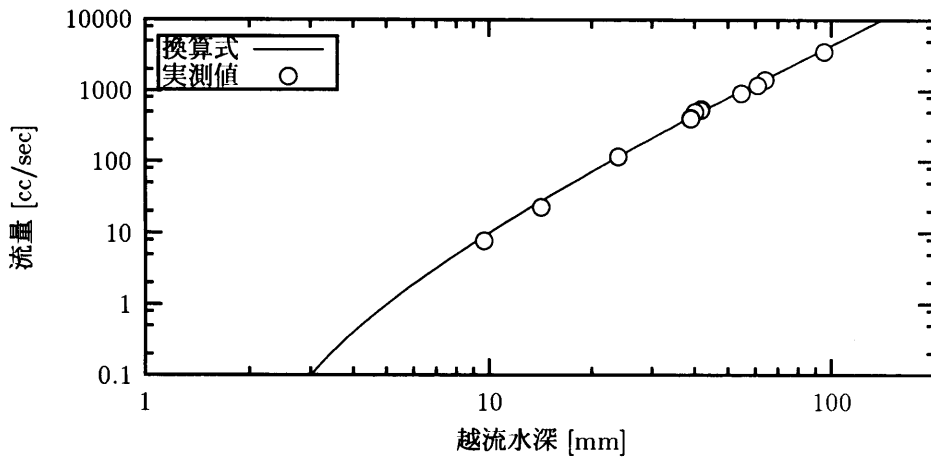
まず表-2.4に、該当期間における欠測日数を掲げた。A,B堰では2001,2002年、C堰では2002年は年間を通じて欠測が発生しなかったが、それ以外の年では欠測日が生じた。3堰6年間で欠測の延べ日数は177日であった。欠測の原因は主に水位計の不調によるものであったが、堰の葉詰まりによって生じた異常値を欠測扱いとしたものもある。



(a) A 流域



(b) B 流域



(c) C 流域

図 2.4: 水位流量換算式の検定結果

表 2.4: 流量観測における欠測日数

年	A	B	C	延べ
1997	3	7	25	35
1998	13	52	8	73
1999	2	1	24	27
2000	8	8	10	26
2001	0	0	17	17
2002	0	0	0	0
計	26	68	84	178

欠測期間のデータは次の方法によって推定した。

- KADEC-MIZU データを用いた補完

1998年9月以降のB堰は、フロート式水位計と水圧式水位計(KADEC-MIZU)の2系統で観測が行なわれた。両者のデータは正常時においては非常に良好な一致をみている。水圧式水位計にも機器の不調などの理由で欠測が発生したが、水圧式水位計設置以降のフロート式水位計の欠測期間はちょうど水圧式水位計の正常稼働期間の範囲にあったので、その部分の水圧式水位計データで補った。

- 他堰データから変換

A,B,C流域の流出量はそれぞれ比較的安定した一定の関係にある。その関係の近似式を一年ごとに求め、他堰のデータを近似式で変換して欠測を補った。しかし季節(湿乾)によって近似の精度が変化する為、欠測期間の前後の正常データと整合性・連続性が取れるように変換データに一定値を乗算する操作を加えた期間もある。

表-2.5に、欠測の発生日、原因、およびデータの推定に使用した方法の一覧を掲げた。

欠測補完後の流量データをハイログラフとして示したのが図-2.5である。参考までに白木氏が整理した1993~1996年までのデータも併せて図示した。図-2.5から、雨量、流量ともに良好にデータが取得されたことがわかる。

### 2.2.3 解析期間

データが得られた1993~2002年のうち、1993年は観測が安定せず欠測が多かった。また1996年は9月に台風が直撃し、豪雨によって発生した流出土砂が3流域とも量水堰を埋没させたために欠測の補完が不可能であった(1996/9/22~25)。そこで1993, 1996年は本研究の解析からは除外し、両年を除く期間を全期間、伐採前の1994, 1995, 1997, 1998年を伐採前期間、1999年を伐採年、伐採後の2000~2002年を伐採後期間と呼ぶこととする(伐採年は年の途中で伐採が実施されたため伐採前期間にも伐採後期間にも含めないこととした)。また当流域は積雪がほとんどなく冬季の降水量が少ないことから、水年は暦年と同じとした。

表 2.5: 欠測の詳細

## (a) A 流域

年	月日	原因	推定法
1997	5/25-28	機器故障	B → A 変換
	3/27-28	機器不調	C → A 変換
1998	4/2-8	機器不調	C → A 変換
	6/11-13	機器不調	C → A 変換
	12/4	機器不調	C → A 変換
1999	5/20-21	機器不調	C → A 変換
	3/04-05	機器不調	C → A 変換
	3/12	機器不調	C → A 変換
2000	3/16-17	機器不調	C → A 変換
	3/24	機器不調	C → A 変換
	3/28-29	機器不調	C → A 変換

## (b) B 流域

年	月日	原因	推定法
1997	8/6-11	葉詰まり?	C → B 変換
	11/21	葉詰まり?	C → B 変換
1998	1/8-10	機器不調	C → B 変換
	1/12-13	機器不調	C → B 変換
	1/15-16	機器不調	C → B 変換
	1/18-19	機器不調	C → B 変換
	2/20-21	機器不調	C → B 変換
	4/6-28	機器不調	C → B 変換
	5/17-19	機器不調	C → B 変換
	5/24-27	機器不調	C → B 変換
	5/29-31	機器不調	C → B 変換
	6/3-10	機器不調	C → B 変換
1999	10/27	用紙切れ	KADEC-MIZU
2000	8/30-9/06	機器不調	KADEC-MIZU

## (c) C 流域

年	月日	原因	推定法
1997	1/20-24	葉詰まり?	B → C 変換
	4/19-23	葉詰まり	B → C 変換
	4/28-30	葉詰まり?	A → C 変換
	6/28-30	機器不調	A → C 変換
	7/18-22	葉詰まり?	B → C 変換
	10/8-11	葉詰まり?	B → C 変換
1998	3/6-7	機器不調	B → C 変換
	12/8-13	機器不調	B → C 変換
1999	4/10-12	バッテリー切れ	B → C 変換
	6/24-7/1	機器内に蛙侵入	B → C 変換
	7/16-7/21	機器不調	B → C 変換
	11/3-11/9	機器不調	B → C 変換
2000	5/9-12	葉詰まり?	B → C 変換
	5/19-24	機器不調	B → C 変換
2001	10/17	土砂さらい	B → C 変換
	10/19-24	紙ヨレのため停止	B → C 変換
	11/2-7	紙送り不調	B → C 変換
	11/11-14	紙送り不調	B → C 変換

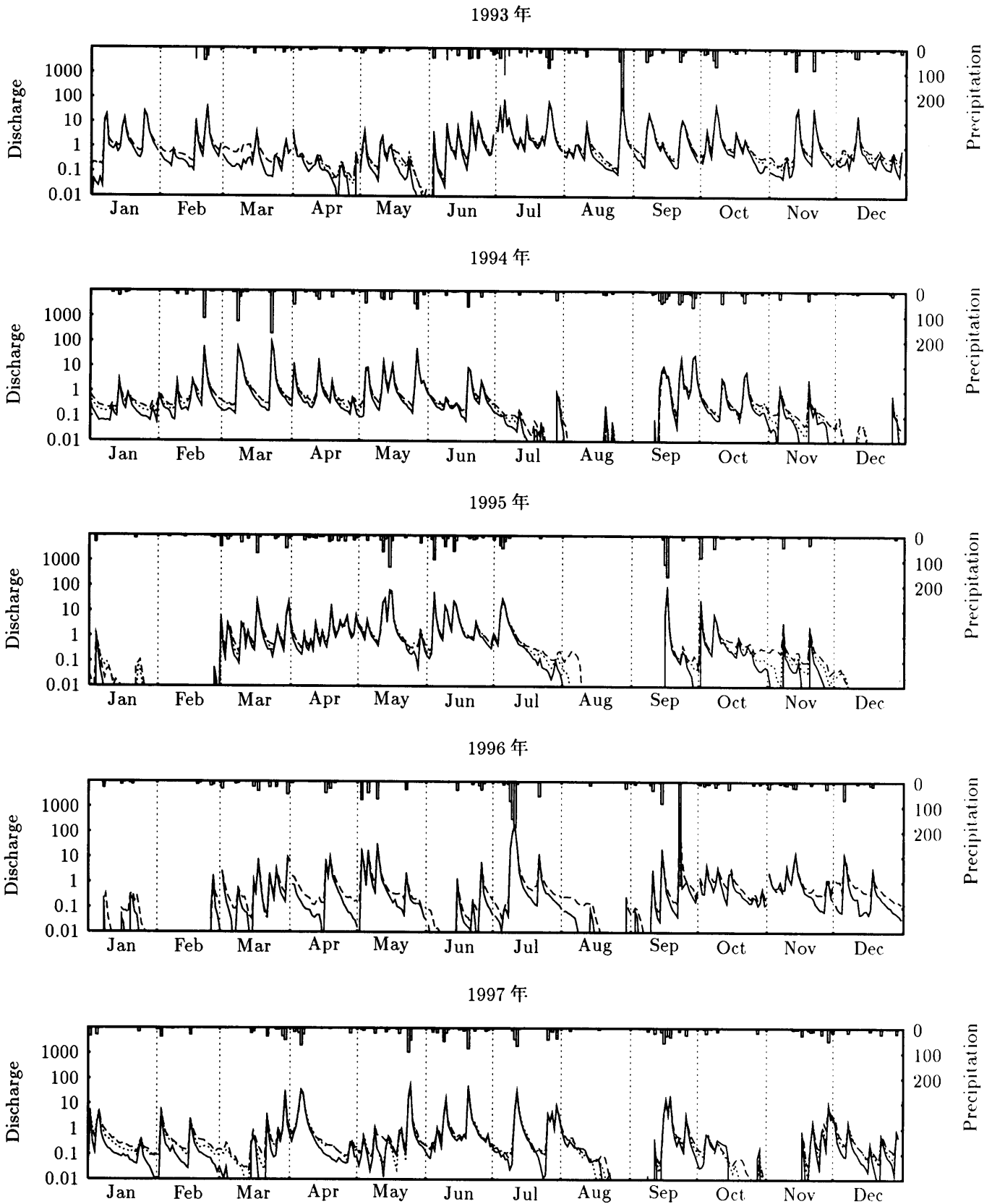


図 2.5: 袋山沢流域のハイドログラフ [mm/day]  
 (垂線・雨量、点線・A 流出、実線・B 流出、破線・C 流出)

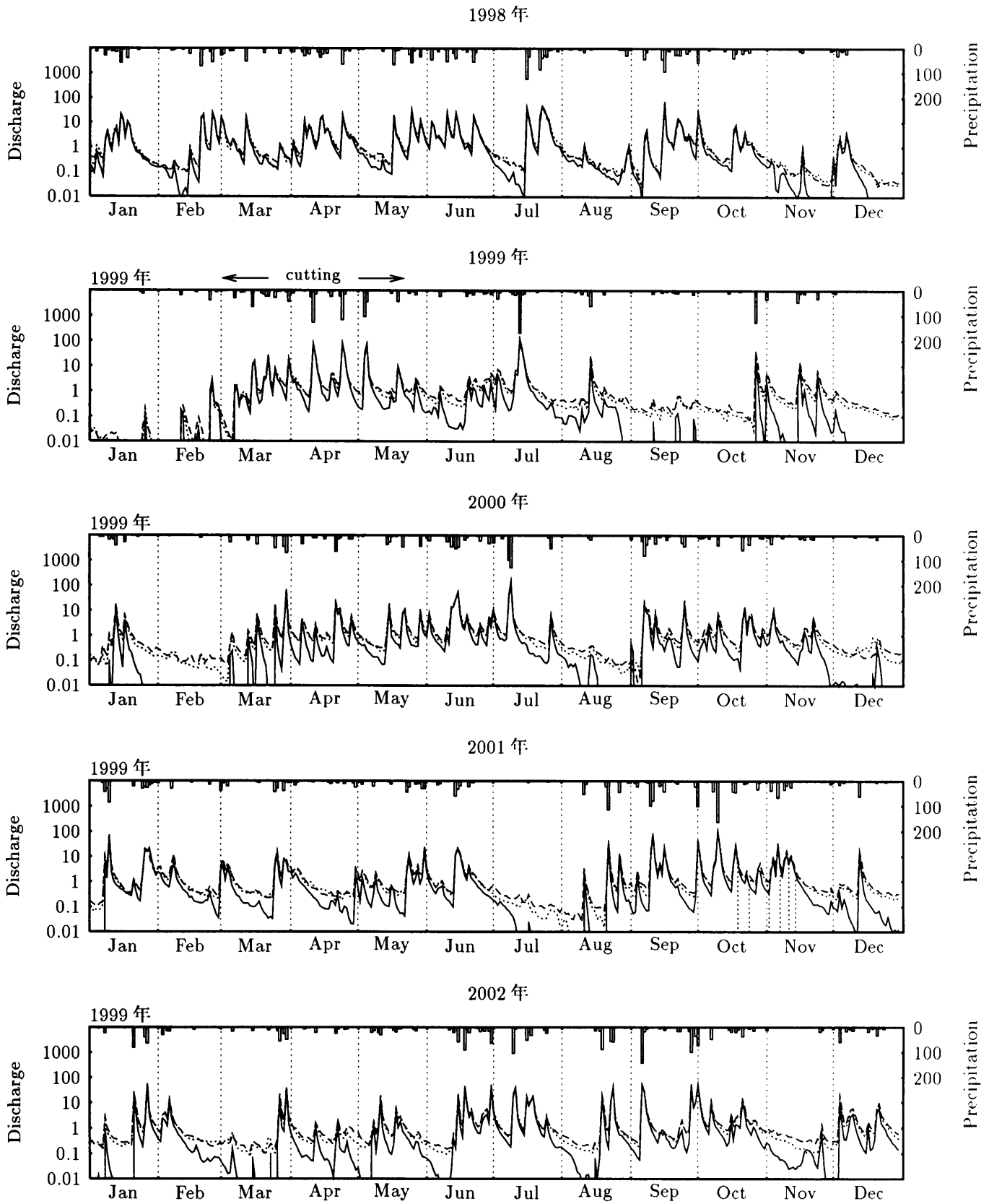


図-2.5: 袋山沢流域のハイドログラフ (続き)

### 2.2.4 ハイドログラフ概観

ここで、A,B 流域の流量について、図-2.5 から読み取れることを簡単に述べておく。

森林状態での当流域のハイドログラフは基底流出の遞減が急であり、 $0.1 \text{ mm/day}$  以下の流量がしばしば観測された。また当流域では寡雨時に流出が停止する現象が見られた。夏と冬の寡雨期には A,B 両流域ともに毎年のように流出が止まり、時には 1 カ月以上の間まったく流出がないこともあった。

伐採前には A,B 両流域のハイドログラフはよく似た曲線を示していたが、伐採後には A 流域に比べて B 流域の流出量は増加した。なお、図-2.5 は対数目盛であるため、伐採による変化が渇水側で大きく現われている。また流出停止については、伐採前は A 流域とともに B 流域も流出が停止することが多かったのに対して、伐採後は A 流域の流出が涸渇している時でも B 流域は安定して流出が続くようになった（たとえば 2001 年 7~8 月など）。

日ハイドログラフから変曲点法を用いて直接流出・基底流出を分離して、伐採による変化を比較した。A 流域は、伐採前期間の平均年直接流出量・基底流出量はそれぞれ  $720.6, 37.7 \text{ mm/year}$ 、伐採後期間は同じく  $836.3, 38.9 \text{ mm/year}$  で、直接流出量が伐採後に大きくなったのに対して基底流出量にはほとんど変化が見られなかった。一方 B 流域は、伐採前期間はそれぞれ  $636.9, 72.3 \text{ mm/year}$ 、伐採後期間は同じく  $964.0, 152.6 \text{ mm/year}$  で、直接流出量・基底流出量ともに伐採後の方が大きかった。

年直接流出率の変化を見ると、A 流域は伐採前期間平均で  $95.2 \%$ 、伐採後期間平均で  $95.5 \%$  で、両期間でほとんど変化はなかった。一方 B 流域は、伐採前期間平均で  $90.0 \%$ 、伐採後期間平均で  $86.2 \%$  となり、伐採によって直接流出率は低下した。



## 第3章 年流出量とその変化

本章では、袋山沢流域の年流出量について解析と考察を行なう。まず第1節では、袋山沢流域で得られた年水収支の観測結果を示し、その概観を記述する。

第2節では、袋山沢流域の森林状態における年流出特性、特に対照流域であるA流域のそれについて解析する。本章の目的とするところは、袋山沢流域において森林伐採によって年流出量がどれほど変化したかを明らかにすることであるが、その為にはまず、そもそも袋山沢流域の年流出特性がいかなるものであるのかを把握しておく必要がある。そこで袋山沢流域と国内の他流域での観測事例との比較を行ない、袋山沢流域の年流出特性について考察する。

第3節および第4節では、森林伐採による年流出量の変化について解析を行なう。第3節では、年降水量を用い、単独流域法によって伐採前後の年流出量の変化を解析する。また第4節では、対照流域の年流出量を用い、対照流域法によって解析を行なう。

一般に、単独流域法と対照流域法を比較した場合、対照流域法の方が厳密な試験方法であるとされている(前述の通り)。本章で、対照流域法による解析に加え、精度に劣る単独流域法も用いるのは、流出量自体が降水量に強く支配されているのであるから、流出量の変化と降水量との関係を明らかにすることは森林が年流出に及ぼす影響を理解する上で不可欠であると思われるからである。

第3節および第4節では、加えて、国内の他流域での試験結果との比較を行ない、袋山沢流域での試験結果についてその特徴の考察を行なう。

### 3.1 袋山沢流域の年水収支(観測結果)

#### 3.1.1 観測結果の概観

まず、観測によって得られた袋山沢流域の水収支を表-3.1に示す。ただし、水年は暦年と同じとしている。なぜなら袋山沢流域は、冬に降水量が少なく、また積雪がほとんどないからである。また表-3.1において損失量とは降水量から流出量を引いた残余を意味する。

表-3.1では1993~2002年の10年間のデータを示してあるが、そのうち1993年および1996年は流量データに欠測があるため年流出量を算出することができなかったため、該当欄を空白にしてある。欠測の理由であるが、1993年は初頭の期間はまだ流量観測が安定しておらず、信頼できるデータが継続的に取られるようになったのが1993年の途中からであるという理由による。また1996年は、9月22日に大型台風が襲来し、斜面の表層上が流出して量水堰が上砂で埋没したために欠測が生じたものである。この欠測はA,B,Cすべての量水堰で発生したため、欠測を補完することができず、やむなく欠測のままにしてある。

さて、表-3.1をもとに、対照流域であるA流域の年水収支を概観してみる。年降水量はおおよそ1800~2500 mm/yearの範囲にあり、観測された10年間の平均では2182.9 mm/year、欠測年を除いた8年間の平均値は2143.2 mm/yearであった。それに対して年流出量はおおよそ500~1050 mm/yearで、欠測年を除く8年間の平均では808.0 mm/yearであった。年損失量はおおよそ1200~1500 mm/yearで、欠測年を除く8年間の平均では1335.2 mm/yearであった。

### 3.1. 袋山沢流域の年水収支（観測結果）

表 3.1: 年水収支 [mm/year]  
Annual water budget

年 Year	降水量 Precipitation	流出量 Discharge		損失量 Loss		
		A 流域 WS-A	B 流域 WS-B	A 流域 WS-A	B 流域 WS-B	
1993	2409.9					欠測 lack of data
1994	1943.9	701.0	652.2	1242.9	1291.7	
1995	1974.1	791.9	724.6	1182.2	1249.5	
1996	2273.3					欠測 lack of data
1997	1799.4	504.6	481.6	1294.8	1317.8	
1998	2509.8	1035.7	978.5	1474.1	1531.3	
1999	2000.5	804.7	977.2	1195.8	1023.3	伐採（春） cutting in spring
2000	2151.0	768.2	996.3	1382.8	1154.7	
2001	2403.6	962.4	1206.1	1441.2	1197.5	
2002	2363.2	895.1	1147.3	1468.1	1215.9	
伐採前期間平均	2056.8	758.3	709.2	1298.5	1347.6	94,95,97,98年
伐採後期間平均	2305.9	875.2	1116.6	1430.7	1189.3	2000～2002年
全期間平均	2143.2	808.0		1335.2		93,96年除く8年間
観測期間平均	2182.9					1993～2002年

年流出量と年損失量を比較すると、いずれの年も年損失量の方が大きかった。年流出率はおよそ 28～40% の値を取り、50% を下回った。年流出率の平均は 37.7% であった。

続いて、処理流域である B 流域の水収支を見る。年降水量は A 流域と共通である。年流出量は、伐採前の 4 年間では およそ 500～1000 mm/year、伐採年以降の 4 年間ではおおよそ 1000～1200 mm/year であり、伐採年以降の方が大きな値を示した。年損失量は、伐採前 4 年間ではおおよそ 1250～1550 mm/year、伐採年以降の 4 年間ではおおよそ 1000～1200 mm/year で、年流出量とは逆に伐採年以降の方が小さかった。

年流出量と年損失量を比較すると、伐採前では A 流域と同様に、いずれの年も年損失量の方が大きな値を示した。しかし伐採年以降は、4 年間のうち 3 年は年損失量の方が大きかったが、2001 年は逆に年流出量の方が大きな値を示した。年流出率は、伐採前ではおおよそ 27～40%、伐採年以降は 46～50% で、伐採年以降の方が年流出率が高かった。

#### 3.1.2 A,B 2 流域の水収支の比較

表-3.1 をもとに、袋山沢流域の 2 流域の水収支を比較してみる。

表-3.1 を図示したものを図-3.1 および図-3.2 に示す。図-3.1 は年流出量を図示しており、図-3.2 は年損失量を図示したものである。

両図とも、伐採前の 4 年間は A 流域と B 流域の点がほぼ重なっている。すなわち、B 流域が伐採される前の、両流域ともに森林状態であった時には、両流域の水収支はほぼ同じであったことが

3.1. 袋山沢流域の年水収支（観測結果）

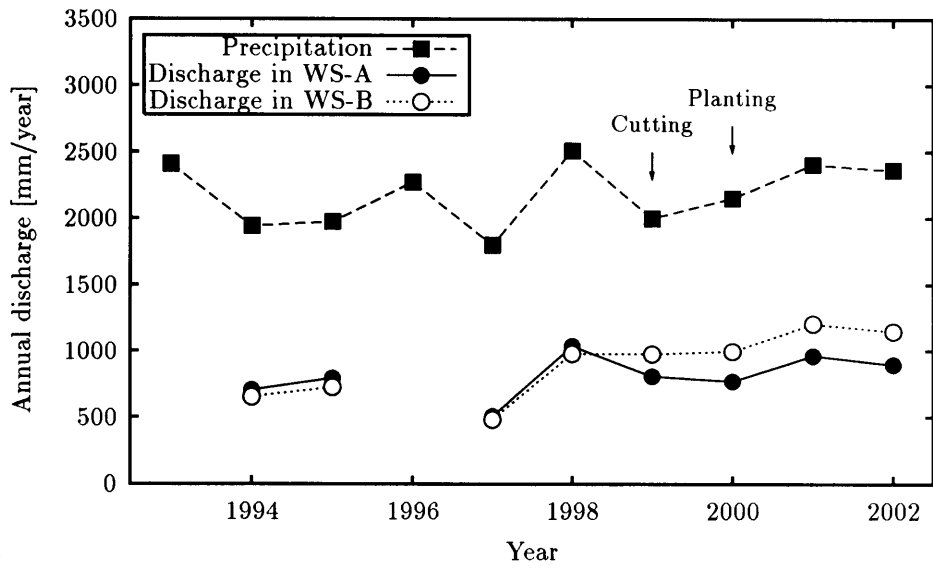


図 3.1: 袋山沢流域の年降水量および年流出量

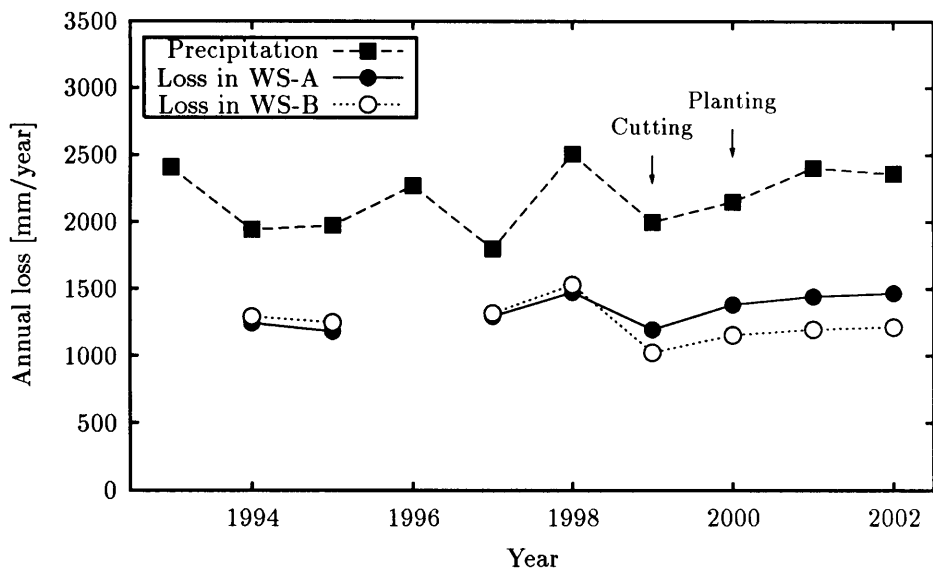


図 3.2: 袋山沢流域の年降水量および年損失量

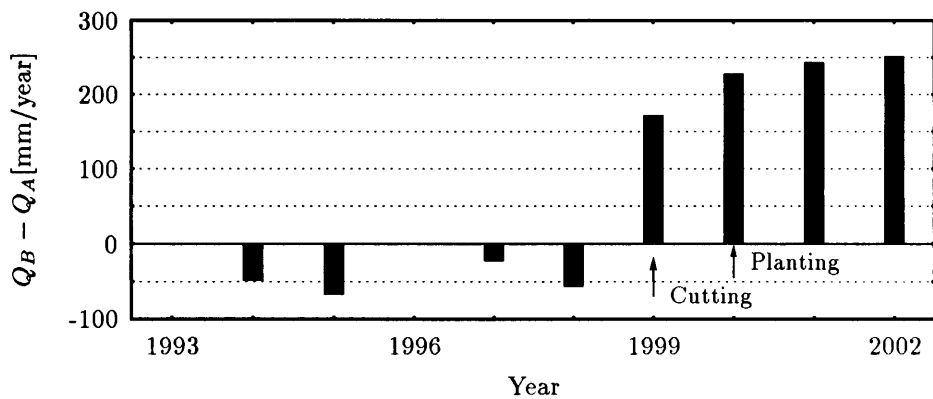


図 3.3: 袋山沢 A,B 流域の年流出量差

示されている。

一方、伐採年以降の4年間では、両流域の点は伐採前に比べて明らかに離れている。図-3.1で見ると、B流域の年流出量は伐採年以降A流域に比べて大きくなっている。また図-3.2で見ると、B流域の年損失量は伐採年以降A流域に比べて小さくなっていることがわかる。

A, B 両流域の差をより厳密に議論するために、B流域年流出量からA流域年流出量を引いた値を算出した。図-3.3にその値の時系列変化を示す。以下、 $Q_A$  をA流域年流出量、 $Q_B$  をB流域年流出量の意で用いる（単位は mm/year）。

伐採前の4年間は、いずれの年もA流域の方が年流出量が多く、 $Q_B - Q_A < 0$  となった。 $Q_B - Q_A$  の値はおよそ -70～-25 mm/year で、4年間の平均は -49.1 mm/year であった。一方、伐採年以降の4年間は、伐採前とは逆に、いずれの年もB流域の方が年流出量が多かった。 $Q_B - Q_A$  の値は、伐採前が 172.5 mm/year、伐採後の3年間がおよそ 230～250 mm/year、伐採後の3年間の平均値は 241.3 mm/year であった。

### 3.1.3 伐採前後の水収支差

続いて、伐採前後で水収支を比較する。比較の対象とするのは、伐採前の4年間と、伐採後の3年間（2000～2002年）である。1999年は年の途中で伐採実施が行なわれたため、伐採前にも伐採後にも含めなかった。

まず年降水量が伐採前後でどれだけ異なるのか見てみる。表-3.1に示した通り、伐採前の年降水量は平均で 2056.8 mm/year で、観測期間10年間の平均値 2182.9 mm/year よりも 100 mm/year 以上少ない値であった。一方、伐採後の年降水量は平均で 2305.9 mm/year で、伐採前とは逆に観測期間平均値よりも 100 mm/year 以上多い値であった。伐採前と伐採後の平均値の差は 249.1 mm/year であった。

これに対してA流域の年流出量は、伐採前の平均で 758.3 mm/year、伐採後は平均で 875.2 mm/year で、年降水量と同じく伐採後の方が大きな値を示した。伐採前と伐採後の平均値の差は 116.9 mm/year であった。

またA流域の損失量は、伐採前の平均で 1298.5 mm/year、伐採後の平均で 1430.7 mm/year で、年降水量、年流出量と同じく伐採後の方が大きな値を示した。伐採前と伐採後の平均値の差は 132.2 mm/year であった。

以上のように、A流域においては、年降水量、年流出量、年損失量のすべてで伐採前に比べて伐採後の方が大きかった。ここで、年流出率を伐採前後で比較してみると、伐採前の平均で 36.9 %、伐採後の平均で 38.0 % と、ほとんど差が見られなかった。A流域の水収支は、量的には伐採後の方が多かったが、比率的には伐採前後で同じであったと言えるだろう。

続いてB流域の水収支であるが、年流出量は伐採前の平均で 709.2 mm/year、伐採後は平均で 1116.6 mm/year で、伐採前に比べて伐採後の方が多かった。伐採前と伐採後の平均値の差は 407.4 mm/year であった。伐採後の方が大きかったのはA流域と同様であるが、伐採前後の差でみると、B流域の差は年降水量の差 249.1 mm/year よりも大きく、この点ではA流域とは異なっていた。

B流域の年損失量は、伐採前の平均で 1347.6 mm/year、伐採後は平均で 1189.3 mm/year で、年降水量やB流域流出量とは逆に、伐採前に比べて伐採後の方が小さかった。伐採前と伐採後の平均値の差は 158.3 mm/year であった。

以上のように、B流域では、年降水量、年流出量は伐採後の方が大きく、年損失量は逆に伐採後の方が小さい結果となった。A流域と同様に年流出率を伐採前後で比較してみると、伐採前の平均で 34.5 %、伐採後は平均で 48.4 % で、伐採前後で大きく異なった。伐採前の年流出率はA流域

に対して 2.4 % 小さい値であったが、伐採後は A 流域よりも 10.4 % 大きい値であった。このことから、B 流域の水収支は伐採前後で異なり、伐採前は A 流域とほとんど同じであったが、伐採後には流出量が多くなった、とすることができる。

ここで、B 流域の年流出量が伐採前後でどれだけ差があるのか A 流域年流出量の伐採前後の差基準として算出してみる。A 流域流出量の伐採前後の差は 116.9 mm/year であった。B 流域は同じく 407.4 mm/year であった。両者の差を取ると、290.5 mm/year が得られる。A 流域年流出量の差を、年降水量の差に起因する分であると仮定すると、A 流域年流出量の差を除いた結果得られた 290.5 mm/year という値は、森林伐採の影響による年流出量の増加量であると解釈できる。

以上のように、年水収支の解析では、森林伐採によって B 流域の年流出量は 290.5 mm/year 増加したという結論が得られた。

## 3.2 森林状態での年流出量

### 3.2.1 目的と方法

本節では、森林状態における袋山沢流域の年流出の特性を明らかにすることを目的とする。伐採による年流出量の変化を検出するためには、もともとの袋山沢流域の年流出特性を把握しておくことが不可欠だからである。具体的には、森林状態の袋山沢流域の年流出特性が他の森林流域と比較してどのような特徴を持っているか、という点と、袋山沢流域において対照流域である A 流域と処理流域である B 流域の年流出特性が伐採が実施される前においてどのように異なっていたのか、という点を把握しておかなければならないだろう。本節では、対照流域である A 流域と他流域との比較、および伐採前期間における袋山沢 A, B 流域の比較を行なう。

ところで、年流出特性と一口で言っても、さまざまな項目・論点があるだろう。しかし本章では年水収支データを用いて流出量を議論するのが基本方針であるから、本節（および次節以降）では、年降水量と年流出量・年損失量との関係について解析を行なうこととする。

具体的には、ここで年流出特性として取り上げるのは以下の 2 点である。

1. 平均年降水量に対する平均年流出量および損失量の大きさ
2. 年降水量に対する年流出量の応答性

一点目では流域水収支の平均値を議論する。流域からの流出は、一般に、人力となる降水に対して、流域のさまざまな条件（地理的・地質的・地形的・生物的……）が作用して形成されるものである。その結果として、年降水量が同じであっても流域によって年流出量は異なるという現象が生じる。したがって、平均年降水量に対する平均年流出量の大小は流域の年流出特性であると言えるのである。

しかし、流域の年流出特性としては、流出量よりも損失量で表示する方がより適切であると考えられる。流出量は降水量の大小に強く支配されるのに対し、損失量は降水量に対して比較的一定の値を取ることが知られているからである。そこで、袋山沢流域と他流域との比較に際しては、降水量よりも損失量に基づいて議論をすることとする。

二点目では、年降水量の年変動に対する年流出量の応答について議論する。

森林流域においては、一般に、年降水量  $P$  (mm/year) と年流出量  $Q$  (mm/year) は直線関係

$$Q = aP + b \quad (3.1)$$

に近似できることが経験的に知られている（中野，1976）。ここで、係数  $a, b$  の値は流域ごとに異なることから、 $a, b$  を流域の流出特性の指標と考えることができる。

本節で議論の対象とするのは特に  $a$  の値である。 $a$  値は年降水量の年変動に対して年流出量がどのように応答するかを示す係数であり、流域の降雨流出過程を要約的に示していると考えられるからである。また  $a$  に関しては伝統的に  $a \equiv 1$  であるとされている（たとえば中野，1976）ため、帰無仮説  $H_0: a = 1$  の検定を行ない、 $a \equiv 1$  と見做せるかどうかを確かめる。

さて、袋山沢の A, B 流域において、回帰式 (3.1) に差があるかどうかを調べる必要があるが、その検定は次のように行なう。

まずはじめに係数  $a$  の違いを検定する。流域を示すダミー変数  $t$  を用いて、次のモデル式を当てはめる。

$$Q = \alpha P + \alpha' Pt + \beta + \beta' t \quad (3.2)$$

式 (3.2) において、流域間の係数  $a$  の差は  $\alpha'$  として与えられる。この  $\alpha'$  が 0 と有意に異なれば、ふたつの流域の  $a$  値に差があると言えることになる。したがって式 (3.2) において帰無仮説  $H_0: \alpha' = 0$  の検定を行なえばよい。

$\alpha'$  の検定において帰無仮説が棄却された場合は、ふたつの回帰式に差が検出されたということ、解析はそこで終了する。しかし帰無仮説が棄却されなかった場合、続いて係数  $b$  の差の検定を行なう。

$b$  の違いを議論するためにはふたつの回帰式において  $a$  が等しくなければならない。傾きが異なる 2 直線に対して切片の大小を議論しても意味がないからである。そこで、 $a$  の検定において帰無仮説  $\alpha' = 0$  が支持されたことから、式 (3.2) に  $\alpha' = 0$  を代入して次のモデル式を導く。

$$Q = \alpha P + \beta + \beta' t \quad (3.3)$$

式 (3.3) において、ふたつの流域の  $b$  の違いは  $\beta'$  として与えられる。ここで帰無仮説  $H_0: \beta' = 0$  の検定を行い、帰無仮説が棄却されれば 2 流域の  $b$  値は有意に異なるということになり、逆に帰無仮説が棄却されなかった場合は ( $a$  値に有意な差が認められなかったことも含めると) 2 流域の回帰式には有意な違いが検出できなかったことになる。

### 3.2.2 袋山沢の結果

先に挙げた一点目の論点、平均年水収支については前節において解析したので省略することとし、ここでは二点目の論点について解析を行なう。

まず初めに、基準流域である A 流域について年降水量と年流出量の関係を調べる。図-3.4 に全期間の散布図を示した。図-3.4 から明らかに、A 流域において年降水量と年流出量は直線関係で表すことができる。回帰直線を求めると次式が得られた。

$$Q_A = 0.5931P - 463.13 \quad (R^2 = 0.8532, p < 0.01) \quad (3.4)$$

式 (3.4) において得られた  $a = 0.5931$  に対して、帰無仮説  $H_0: a = 1$  の検定を行なうと、 $p < 0.01$  となる。すなわち、袋山沢 A 流域の係数  $a$  の値は有意水準 1% で 1 と有意に異なった。

3.2. 森林状態での年流出量

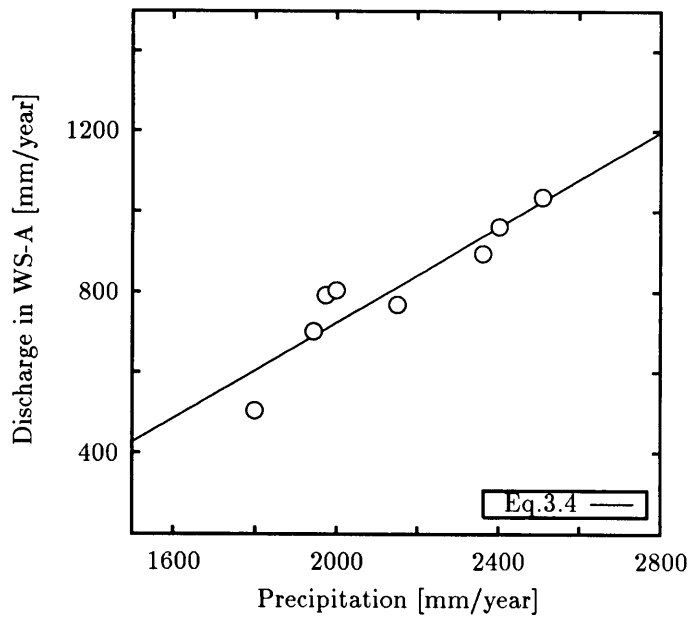


図 3.4: 袋山沢 A 流域の年降水量と年流出量の関係

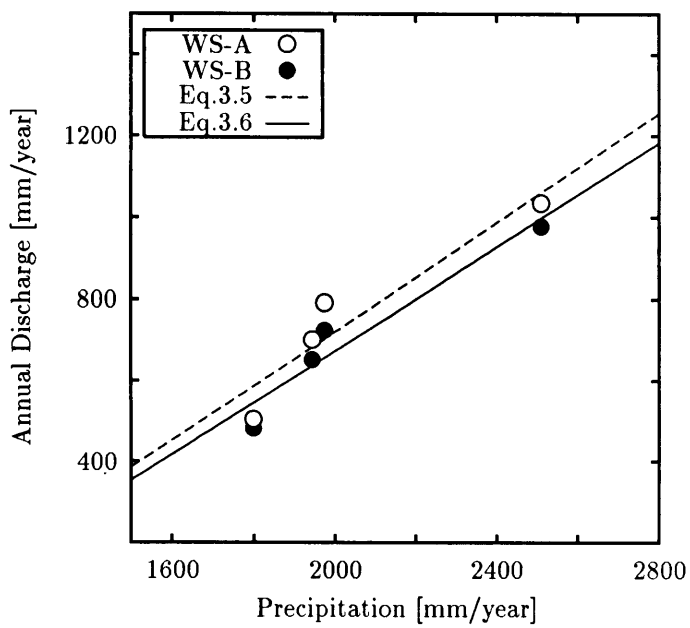


図 3.5: 伐採前期間における袋山沢 A,B 流域の年降水量と年流出量の関係

### 3.2. 森林状態での年流出量

続いて、A,B 流域がともに森林状態であった伐採前期間における、A,B 両流域の違いを検討する。両流域の年降水量と年流出量との散布図を図-3.5 に示す。両流域それぞれで回帰直線を求めると次式が得られた。

$$Q_A = 0.6688P - 617.30 \quad (R^2 = 0.8934, p = 0.055) \quad (3.5)$$

$$Q_B = 0.6382P - 603.36 \quad (R^2 = 0.9274, p = 0.037) \quad (3.6)$$

森林状態において A,B 流域の回帰直線に差があったのかどうか、すなわち式 (3.5) と式 (3.6) に有意な差が検出されるかどうかを調べよう。

まず係数  $a$  の検定を行なう。伐採前期間の両流域に対してモデル式 (3.2) を当てはめると次式のようにになった。

$$Q = 0.6688P - 0.0306Pt - 617.30 + 13.93t \quad (R^2 = 0.9108, p = 0.014) \quad (3.7)$$

ただしダミー変数  $t$  は、A 流域に対しては 0 を、B 流域に対しては 1 を取るものとした（以下同じ）。

式(3.7)において  $\alpha' = -0.0306$  と求められた。帰無仮説  $H_0: \alpha' = 0$  の検定を行なうと、 $p = 0.8892$  となった。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却されず、 $\alpha'$  は 0 と有意に異なるとは言えないことがわかった。

次に  $\alpha' = 0$ 、すなわち A,B 両流域で係数  $a$  に違いがないものとして係数  $b$  の差の検定を行なった。モデル式 (3.3) を当てはめると次式のようにになった。

$$Q = 0.6535P - 585.79 - 49.08t \quad (R^2 = 0.9103, p < 0.01) \quad (3.8)$$

式 (3.8) において  $\beta' = -49.08$  と求められた。帰無仮説  $H_0: \beta' = 0$  の検定を行なったところ、 $p = 0.37$  であった。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却されず、 $\beta'$  は 0 と有意に異なるとは言えないことがわかった。

以上により、式 (3.5) と式 (3.6) との間には係数  $a, b$  ともに有意な違いがなかった。

#### 3.2.3 考察 1・袋山沢 A 流域の年損失量

流域からの流出量を議論する場合、まず問題となるのは、流出水のすべてが量水堰で計測されているかという点である。言い方を換えれば、袋山沢流域において流域水収支が閉じているかどうかをまず検討する必要があるだろう。

一般に流域水収支は次式で表現される。

$$P = Q + L + \Delta S \quad (3.9)$$

ここで  $P$ : 降水量、 $Q$ : 流出量、 $L$ : 損失量、 $\Delta S$ : 流域貯留量である。水収支期間を適切に定めれば  $\Delta S$  を無視することができるので、式 (3.9) は結局

$$P = Q + L \quad (3.10)$$



と書くことができる。このうち降水量  $P$  と流出量  $Q$  は現地観測によって比較的容易に測定することができる（流域面積が大きい場合の流域降水量の推定など、一筋縄ではいかない問題もあるが、ここでは無視する）。その結果、 $P$  と  $Q$  から損失量  $L$  を算出することができることになる。

さて、流域からの損失は、主に蒸発散および深部浸透によると考えられる。森林水文学の観点からすれば、森林植生の関与の低い深部浸透という現象よりも、森林の存在が直接的に影響する蒸発散という現象に対してより大きな関心が向けられるのが通常である。そこで損失量  $L$  の内訳を蒸発散量  $E$  と深部浸透量  $D$  とに分離しようというモチーフが生まれることになる。

流域からの蒸発散量が直接かつ正確に測定できるならばこの問題は根本的に解決することになる。森林からの蒸発散量を直接測定する技術は近年、渦相関法やバルク法など高度なものが開発されているが、それらは点的な測定に留まっており、面的な流域蒸発散量を測定するところまでは至っていない。

一方、深部浸透量については、現象の生起場が地中、しかも基盤岩内部のことであるから、直接測定することは難しい。結局、損失量  $L$  を蒸発散量  $E$  と深部浸透量  $D$  に精確に分離することは、少なくとも現在までにおいては不可能である。

ここで、深部浸透は無いか、あったとしても無視しえる程度の量だという仮定を置くことができれば、 $E = L$  という等式を仮説的に導くことができる。したがって  $D = 0$  と見做せるかどうかは流域試験においては重要な論点となるのである。

さて、袋山沢 A 流域における深部浸透量  $D$  がどれほどの量なのか検討してみよう。

先に述べた通り、流域からの損失は主に蒸発散および深部浸透によると考えられる。このうち蒸発散はエネルギー収支的に概量を推定することができる。ここでは Oldekop の推定式を用いて袋山沢流域の蒸発散量を推定する。

Oldekop (ブディコ, 1973) は流域からの蒸発散量  $E$  (mm/year) を純放射量  $R_n$  (MJ/m<sup>2</sup>/year) の関数として次式で表した。

$$E = P \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{R_n}{lP} \right) \right\} \quad (3.11)$$

ただし  $P$ : 年降水量 (mm/year),  $l$ : 蒸発潜熱 (MJ/kg)。

新田露場の観測より  $R_n \cong 2500$  MJ/m<sup>2</sup>/year、年平均気温 14.2 °C であることから 14 °C での蒸発潜熱  $l = 2.466$  MJ/kg を (3.11) 式に代入すると、袋山沢流域の流域蒸発散量の推定式として次式が得られる。

$$E = P \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{1013.8}{P} \right) \right\} \quad (3.12)$$

深部浸透が無い場合、水収支式は  $P = Q + E$  と書くことができる。したがって、深部浸透が無く、また蒸発散が (3.12) 式に従うと仮定すると、袋山沢流域の年流出量  $Q$  は

$$Q = P \exp \left( -\frac{1013.8}{P} \right) \quad (3.13)$$

と推定される。

(3.12) 式、(3.13) 式と袋山沢 A 流域の実測値を対比したものを図-3.6 に示した。

図-3.6 によると、一見して、Oldekop 式による推定値と袋山沢流域の実測値が大きく異なることがわかる。

推定された年蒸発散量は、年降水量が大きくなるに従って増加する傾向を見せるが、年降水量に対する変動量は比較的小さく、概略として一定値と言ってもよさそうである。袋山沢流域において

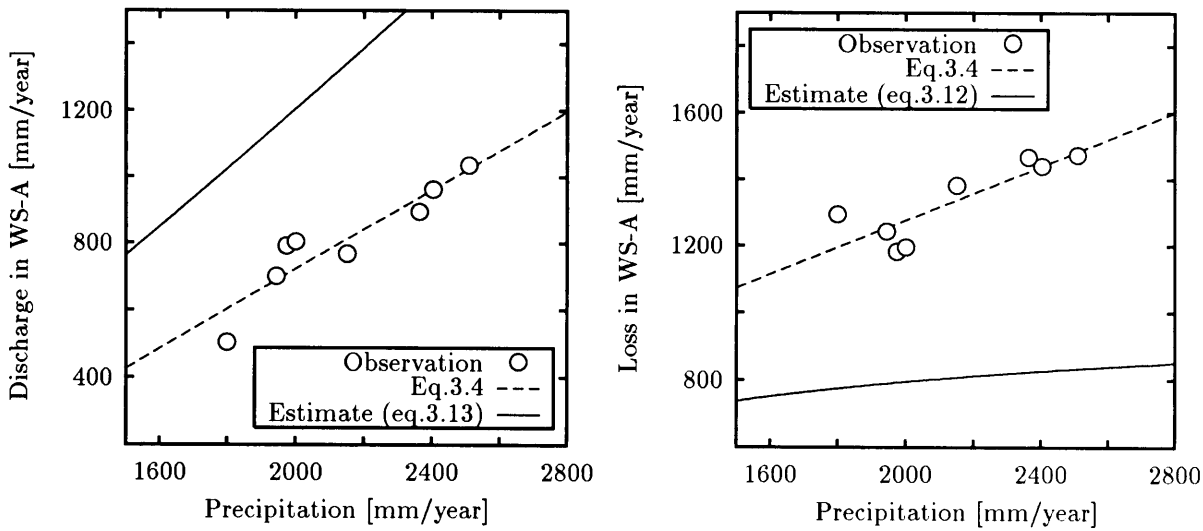


図 3.6: 袋山沢 A 流域の実測値と Oldekop 式による推定値の比較

実測された年降水量の範囲 (1800~2500 mm/year) では、およそ  $E = 750 \sim 850$  mm/year の値を得る。それに対して、水収支から算出された袋山沢 A 流域の損失量は、表-3.1 にも示したように、およそ 1200~1500 mm/year であり、また年降水量に対して一定とならず、年降水量の大小と年損失量の大小が連動している。

Oldekop 式による年蒸発散量の推定値と実測された年損失量とを比較すると、実測された年損失量の方が 400~600 mm/year 程度大きい。損失は主に蒸発散と深部浸透によって起こると考えられるから、年蒸発散量推定値と年損失量実測値との差が数百 mm/year あるということは、年損失量の中に数百 mm/year のオーダーで深部浸透量が含まれていることを示唆するものである。また、図-3.6 から、深部浸透量は年降水量が大きくなるほど大きくなる傾向があることも示唆されている。

また近藤ら (1992) は全国の気象官署のデータを用いて熱収支的な方法を用いて森林における蒸発散量を見積もっている。これによると、南日本ではおよそ 800~900 mm/year の蒸発散があると見積もられた。この値は袋山沢試験地の損失量に比べて明らかに小さく、袋山沢試験地の損失量に数百 mm/year のオーダーの深部浸透が含まれていることを示唆している。

袋山沢流域の深部浸透に関しては、他に、塩素イオン濃度の解析から深部浸透量を推定した小田 (2004) の研究がある。塩素イオンは、流域内からの湧き出しが無く、樹木や土壌粒子に吸収・吸着されにくいという性質を持つ。したがって、系が定常である場合、降雨による塩素イオンの入力量と、渓流流出や深部浸透による流亡量は等しいはずである。ここで降雨および渓流流出の塩素イオン量を観測すれば、深部浸透の規模を推定することが可能となる。

小田 (2004) は、深部浸透水の塩素イオン濃度は渓流水のものと等しいという仮定のもとで、袋山沢流域の塩素イオン収支の算定を行なった。その結果、袋山沢 A 流域の深部浸透量は、全期間 (1994~2002 年) の平均で 396 mm/year となったと報告している。

小田による深部浸透量の推定値は、Oldekop 式を用いた推定値と近い値である。しかし小田は、A 流域の単年の深部浸透量の推定値は  $\pm 80$  mm/year で、ほぼ一定と見做せると述べており、図-3.6 で示唆されたような、深部浸透の規模が年降水量の大小に連動している可能性には否定的である。

Shiraki and Igarashi (2004) は、袋山沢試験地の近傍にある鳥居沢流域 (基岩地質・新第三系堆

積岩)において、主流の流量を数ヶ所で計測することにより、集水面積と比流量の関係を調べた。その結果、集水面積が小さいほど比流量が小さいことがわかった。原著者らはこの原因を、流域上流部で基岩への深部浸透が多くあり、これが下流の河道に湧出しているためであると結論した。

また太田・窪田(1992)は山体地下水の考察の中で、固結度の低い第三系の堆積岩地質では不透水層の位置によって地下水帯の形成が規定されるとしており、地表付近に不透水層が存在しない第三紀層流域では浸透水が深部に漏洩する可能性があることを示唆している。

以上のことを勘案すると、袋山沢 A 流域において深部浸透が存在し、その量は少なくとも年間 400 mm/year 程度である、という点は疑いないと言ってよいだろう。深部浸透量が一定量なのか年によって異なるのかは、今後のさらなる解析に任せることとする。

### 3.2.4 考察 2・袋山沢 A 流域の年流出量

年降水量が比較的多い森林流域においては、一般に、年降水量と年流出量を(3.1)式で直線回帰した時、係数  $a$  は 1 に近似できると言われている(中野, 1976)。

ところが袋山沢 A 流域では、(3.4)式で示したように、係数  $a$  の値は約 0.6 であった。さらに  $a$  の真値が 1 である確率は 1%以下であることを含めると、袋山沢 A 流域では係数  $a$  は 1 よりも有意に小さいと考えられる。

ここでは、一般に森林流域で  $a \cong 1$  であると言われている理由と、袋山沢 A 流域で  $a$  が 1 よりもかなり小さい値となる理由を考察する。

さて、(3.1)式

$$Q = aP + b \quad (3.1)$$

と、水収支式(3.10)式を変形して得られる

$$L = P - Q \quad (3.14)$$

から、

$$L = (1 - a)P - b \quad (3.15)$$

が得られる。すなわち、 $a = 1$  であることと年損失量  $L$  が年降水量  $P$  によらず一定値であることは同値の関係にある。

流域からの損失が主に蒸発散と深部浸透によって生じることは既に述べた通りである。このうち蒸発散については、年降水量がある程度以上ある流域では年蒸発散量はその流域の蒸発散能にほぼ相当し、したがって年蒸発散量はほぼ一定値となると言われている。年蒸発散量がほぼ一定となる条件について、中野(1976)は年降水量 1700~1800 mm/year 以上としている。これに対し、袋山沢流域の平均年降水量 2182.9 mm/year であり、中野の条件を越えている。

ここで、仮に流域の深部浸透が無いかもしくは無視できるくらい小さいならば、年蒸発散量が一定であることは直ちに年損失量が一定であることを意味する。したがって、年降水量がある程度多く、かつ深部浸透が無い流域では  $a \cong 1$  となると考えられる。これが森林流域では一般に  $a \cong 1$  であると言われている理由である。

厳密に言えば、蒸発散、中でも樹冠遮断蒸発は降水量に比例することが知られており、年蒸発散量はある程度は年降水量と相関する。年蒸発散量が年降水量と正の相関関係にあるとすると、年流出量は年降水量が多くなるほど相対的に少なくなることになる。仮に遮断蒸発率を  $i$  ( $0 < i < 1$ ) とし、遮断蒸発以外の損失量が各年とも一定であるとすると、係数  $a$  の値は  $a = 1 - i$  で与えられ、 $a < 1$  であることが導かれる。

袋山沢試験地の場合、樹冠遮断率の実測値は約 17% と報告されている (田中ら, 2005)。従って係数  $a$  の値が  $a = 1 - 0.17 = 0.83$  程度ならば、 $a$  の値が 1 よりも小さいことを遮断蒸発の降水量依存性によって説明することが可能である。しかし袋山沢 A 流域の実際の値は約 0.6 であり、0.83 よりもかなり小さい。すなわち袋山沢 A 流域において係数  $a$  の値を遮断蒸発のみで説明するのは無理がある。

ここで、係数  $a$  の値に影響を与えている要因のひとつとして深部浸透の存在が考えられる。より多くの降水量が与えられ、土壌がより湿潤な状態に置かれれば、より多くの水分が基岩中に浸透する機会が増えると考えるのが自然である。前節で論じたように、袋山沢試験地では深部浸透が年間数百 mm のオーダーで生じていると考えられるから、深部浸透の降水量依存性によって係数  $a$  が影響を受けているという仮説には妥当性があると思われる。ただし、深部浸透量は直接の測定が難しく、その降水量依存性についても定かなことはわからない。袋山沢試験地における係数  $a$  の決定要因については更なる議論が必要であろう。

### 3.2.5 考察 3・袋山沢 2 流域の比較

続いて、袋山沢 A, B 流域の年流出量の違いについて検討をする。

まず前節での結果を確認しよう。2 流域の年流出量を単純に比較すると、すべての年で A 流域の方が大きく、2 流域の年流出量の差は およそ 25~70 mm/year、平均すると 49.1 mm/year であった。

次に、年降水量と年流出量の回帰式 (3.1) であるが、(3.5)~(3.8) 式において解析したように、A 流域と B 流域とでは回帰式間に統計上有意な差は検出できなかった。しかし、このことから直ちに両流域の回帰式は同一と認められると言うことはできない。この解析はそれぞれ 4 年分のデータしか用いておらず、回帰式の差を検出するにはサンプル数が少なかったということも考えられるからである。

そこで、解析結果を詳しく見てみる。

まず係数  $a$  は、A 流域に比べて B 流域の方が 0.0306 だけ小さい結果となった。この値は A 流域の  $a = 0.6688$  に対して 4.6% の大きさしかない。図-3.5 においても、両回帰直線に傾きの差は確かにあるが、その差はわずかなものである。また両流域の点の分布を見ても、年降水量の大小で分布の違いがあるとは見えない。したがって、両流域で係数  $a$  に違いがなく、両直線が平行であると見做すことに妥当性はあると思われる。

一方、係数  $a$  が等しいと仮定すると、係数  $b$  は A 流域の方が B 流域よりも 49.08 大きい結果となった。この値は、前節で求めた両流域の年流出量の差の平均値 49.1 mm/year と非常に近い値である。図-3.5 においても、両流域の点の分布には A 流域の点が上方に分布するという傾向が見られることや、また両回帰直線が図の範囲では交わることなく、A 流域の回帰直線の方が常に上方を通っていることが見て取れる。これらのことから、係数  $b$  は、統計上の有意性は検出できなかったにしても、B 流域に比べて A 流域の方が大きいという傾向があることは明白であると言えよう。

以上のことから、袋山沢 A, B 流域は、年降水量の変動に対する応答特性に違いはないが、年流出量には定性的な違いがある、と言えるだろう。

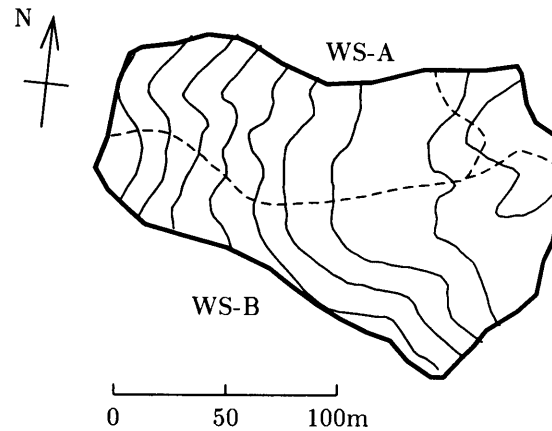


図 3.7: 袋山沢流域の水文学的基盤の地形 (白木ら,1999 より)

ここで、両流域の年流出量に違いが生ずる原因について考察してみる。考えられる可能性としては、流域界が不正確であること、および損失量が両流域で異なることの2点が挙げられる。順に検討する。

まず流域界の問題である。流域の集水面積は、地上地形の分水嶺ではなく、水文学的基盤と呼ばれる地中の不透水層の地形によって規定されるものである。通常は地上地形と水文学的基盤の地形とが対応しているものとして地上地形の分水嶺を用いて流域界を決定している訳だが、現実には地上地形と水文学的基盤が対応していない可能性がある。

袋山沢流域においては、白木ら (1999) によって、貫入試験の結果が報告されている。白木ら (1999) によると、袋山沢流域の水文学的基盤は地形が平坦で流域界が明瞭でない (図-3.7)。したがって各流域の集水面積の真値は地上地形のそれとは異なっているとも考えられる。

2点目は損失量の問題である。A,B 両流域は同一林分に属しており、同一の地質的条件、同一の地上植生を有していると認められるが、地形的にみると若干の差異が存在する。

第2章で論じた通り、袋山沢 A,B 流域は、流域の上中部では類似しているが、流域下部において起伏に差が認められる。図-2.2 に示したヒブグラフ曲線からもわかる通り、流域下部は B 流域の方がゆるやかで、A 流域は急である。この差は各流域の量水堰付近の地形の違いに起因する。A 流域は量水堰に流入する流路の勾配が急で、そのために量水堰周辺に恒常的な帯水層が存在しない。一方 B 流域は、量水堰のすぐ上流側に平坦な堆積地形が存在し、流路の勾配がゆるやかになっている。また恒常的に帯水層が存在することが井戸観測から確かめられている。

流域下部に帯水層が存在することによって B 流域の損失量が A 流域よりも多くなっている可能性がある。まずひとつに、帯水層の存在によって流域の貯留量が増加し、流出せずに蒸散に回る水分が多くなるということが考えられる。またひとつには、帯水層に常時飽和地下水が存在することによって土壌水分が深部浸透する機会が増えるということが考えられる。

小田 (2004) は、塩素イオン収支を用いて袋山沢流域の深部浸透量を推定した結果、B 流域の深部浸透量は A 流域に比べて約 70 mm/year 多かったと報告している。小田の推定が正しいとすれば、A,B 両流域の年流出量の差 (平均 49.1 mm/year) は深部浸透量の差によって説明できることになるが、深部浸透量の差が帯水層の有無に起因しているのかどうかまでは不明である。

いずれにしても、滞水帯の面積は流域全体に比べると小さく、流域水収支を年間数 $\pm$ mmのオーダーで変化させるほどの効果があるのかどうかは不明であり、ここでは可能性のひとつとして指摘しておくにとどめる。

### 3.2.6 袋山沢 A 流域と他流域との比較

では次に、以上において解析した袋山沢流域の年流出特性と、わが国における流域試験の結果と比較し、袋山沢流域の特徴を把握することを試みる。

まず、国内の森林試験流域で得られた平均年水収支、および年流出量に対する年流出量の回帰式(3.1)の係数を一覧表にまとめたものを表-3.2に示す。

表-3.2には、国内の森林試験流域のべ50流域と、袋山沢流域を代表して袋山沢 A 流域のデータを、緯度が高い順に並べてある。表に載せたデータの内容について説明しておく。左側のコラムから順に、まず  $P, Q, L$  とはそれぞれその流域の平均年降水量、流出量、損失量、すなわち平均年水収支である。ただし  $L$  は  $L = P - Q$  として求めたものである。単位はすべて mm/year である。

次に  $a, b$  とはそれぞれの流域の各年の年降水量・年流出量に対して回帰式(3.1)を当てはめて得られた回帰係数を表す。表中に  $a, b$  が空白となっている流域は、降雨流出データが1年分しか入手できなかったため回帰式(3.1)の当てはめができなかった流域である。

$R^2$  および  $p_0$  は、それぞれ、回帰式(3.1)の当てはめにおける回帰の決定係数、および回帰の有意性を表す  $p$  値である。回帰の有意性を  $p_0$  と表記してあるのは、2変量の直線回帰の場合、回帰の有意性は回帰係数  $a$  に対して帰無仮説  $H_0: a = 0$  の検定を行なうことと同等だからである。つまり、表-3.2の文脈において、 $p_0$  の値は、回帰の有意性と言うよりはむしろ係数  $a$  の有意性を表す数値として掲載してある。

$p_1$  とは、回帰係数  $a$  に対して帰無仮説  $H_0: a = 1$  の検定を行なった時の  $p$  値である。§3.2.3でも述べた通り、一般に試験流域では  $a = 1$  であることが期待されるので、この期待が各流域において満たされているのかどうかを検証する目的で  $p_1$  を算出したのである。

表中、 $R^2, p_0, p_1$  が空白となっている流域があるが、これは、降雨流出データが1年分しか集まらなかったために回帰分析自体が行なえなかった流域、およびデータが2年分しか集まらなかったために  $R^2, p_0, p_1$  を算出する自由度が足りなかった流域である。さらに、回帰の決定係数  $R^2$  が低かった流域についても  $p_1$  は計算しなかった。

統計期間とは以上の統計に用いたデータのうちに最も古いものと最も新しいものの水年である(歴年ではなく水年で示してある)。統計年数とは統計に用いた水年の数を表す。統計期間よりも統計年数の方が小さいことがあるが、それは期間中に欠測のために統計に使用できなかった水年があることを意味する。

文献とは、各流域の年水収支データの出典となった文献を示す。文献リストは本節の最後に付けておく。

図-3.8に、表-3.2に掲げた各流域の位置を示した。また併せて各流域の平均年損失量を記した。図-3.8から、今回蒐集したデータは関東・近畿・九州のものが多く、北海道・東北・北陸中部・中国・四国は比較的少ないことがわかる。

さてこれから、表-3.2を基に解析を行なう訳であるが、その前に、袋山沢以外の流域を、 $p_0, p_1$  を基準にして3グループに区分しておくことにする。すなわち、

I.  $p_0 \leq 0.05$  かつ  $p_1 > 0.05$  である流域

II.  $p_0 \leq 0.05$  かつ  $p_1 \leq 0.05$  である流域

## 3.2. 森林状態での年流出量

表 3.2: 森林流域の年水収支 [mm/year]

流域	北緯	P	Q	L	a	b	R <sup>2</sup>	p <sub>0</sub>	p <sub>1</sub>	統計期間 (年数)	文献
上川北谷	43°50'	1453.5	805.7	647.7	0.687	-193.5	0.94	< 0.01	< 0.01	1943-1953(11)	(1,2)
上川南谷	43°50'	1388.2	699.0	689.3	0.400	+143.7	0.71	0.16	0.08	1940-1943(4)	(1,2)
上川一の沢	43°50'	1116.3	522.9	593.5	0.142	+364.3	0.03	0.88		1943-1945(3)	(1)
上川二の沢	43°50'	1271.3	710.6	560.8	0.463	+121.5	0.93	0.17	0.14	1943-1945(3)	(1)
定山溪時雨1の沢	42°58'	1252.9	845.3	407.6						1991-1998(8)	(41)
御明神	39°38'	1840.1	1061.8	778.3	0.711	-245.8	0.57	0.02	0.26	1931-1942(9)	(3)
岩手山南面	39°50'	1938.6	1355.4	583.2	0.550	+289.2	0.85	0.08	0.11	?(4)	(4)
宝川本流	36°51'	3673	3117	546	0.786	+230.4	0.80	< 0.01	0.17	1938-1947(10)	(5)
宝川初沢	36°51'	2659	1850	809	0.561	+357.3	0.77	< 0.01	< 0.01	1938-1947(10)	(5)
釜淵 I 号沢	38°57'	2439.9	1999.6	440.3	1.032	-519.2	0.84	< 0.01	0.62	1940-1993(53)	(6,7,8)
釜淵 II 号沢	38°57'	2534.5	2075.2	459.3	1.169	-888.2	0.97	< 0.01	0.09	1940-1947(8)	(6)
足尾広葉樹林	37°	2363	1148	1215						?(2)	(42)
笠間針葉樹林	36°	1673.8	575.6	1098.2	-0.146	819.7	0.05	0.71		1907-1911(5)	(9)
笠間広葉樹林	36°	1687.0	498.6	1188.4	0.118	299.7	0.05	0.72		1907-1911(5)	(9)
太田針葉樹林	36°34'	1661.6	750.0	911.6	0.153	495.1	0.08	0.65		1907-1911(5)	(9)
太田広葉樹林	36°34'	1593.3	926.5	666.8	0.250	528.4	0.25	0.50		1907-1911(5)	(9)
太田幼齢林	36°34'	1651.6	869.0	782.6	-0.724	2065.2	0.54	0.16		1907-1911(5)	(9)
常陸太田	36°34'	1342.9	797.2	545.7	0.819	-302.8	0.97	< 0.01	0.11	1981-1985(5)	(10)
筑波	36°20'	1338.3	590.4	747.9	0.589	-198.0	0.50	0.051		1979-1987(8)	(11)
裏筑波		1497	858	639						1970-1998(22)	(12)
秩父矢竹沢		1820.0	1339.5	480.5						1993(1)	(13)
秩父大血川東谷		1769.5	1334.9	434.6						1993(1)	(13)
秩父久度沢		1676.3	1191.3	485.0	1.639	-1556.3				1991,1992(2)	(13)
袋山 A 流域	35°12'	2143.2	808.0	1335.2	0.593	-463.1	0.85	< 0.01	< 0.01	1994-2002(8)	
大洞沢	35°17'	2271	1134	1137	-0.229	1652.8				1994-1995(2)	(14)
愛知穴の宮	35°15'	1634.3	988.2	646.1	0.997	-640.8	0.92	< 0.01	0.93	1930-1991(62)	(15-20)
愛知東山	35°14'	1833.2	1020.1	813.1	0.887	-605.9	0.85	< 0.01	0.02	1930-1991(62)	(15-20)
愛知白坂	35°12'	1869.4	1011.0	858.4	0.930	-727.1	0.94	< 0.01	0.03	1930-1991(62)	(15-20)
愛知数成		1546.2	892.5	653.7	0.955	-583.4	0.96	< 0.01	0.38	1930-1945(16)	(15,16)
比奈知	34°36'	1419.0	810.2	608.8						1988(1)	(21)
ぬたの谷	34°27'	2454.3	1646.6	807.7						1988-1996(9)	(41)
川向	34°58'	1670.9	910.2	760.7	0.587	-71.1	0.95	< 0.01	< 0.01	1966-1971(6)	(22)
桐生	34°58'	1692.8	964.3	728.5	0.800	-390.6	0.93	< 0.01	0.14	1972-1977(6)	(22)
竜王山 No.2	35°01'	2200.9	1566.7	634.2	1.500	-1734.5	0.90	0.20	0.50	1983-1985(3)	(23)
梁ヶ谷	35°17'	2273.8	1661.5	612.3	0.678	120.9				1979,1980(2)	(24)
由良川上谷	35°20'	2885.3	2448.1	437.2	1.059	-606.5				1992,1993(2)	(25)
五條吉野		1414	664	750	0.627	-223.4	0.77	< 0.01	< 0.01	1980-1991(12)	(26)
竜の口山南谷	34°42'	1152.9	292.9	860.0	0.543	-333.4	0.87	< 0.01	< 0.01	1937-1943(7)	(27)
竜の口山北谷	34°42'	1113.2	289.6	823.6	0.578	-353.8	0.91	< 0.01	< 0.01	1937-1944(8)	(27)
江田島 A	34°16'	1461.6	762.1	699.5						1981-1998(18)	(41)
大洲	33°28'	1741.0	954.3	786.7	0.738	-331.1	0.96	< 0.01	< 0.01	1985-1994(10)	(28)
去川 1 号沢	31°51'	3086.8	1978.0	1108.8	1.034	-1213.5	0.98	< 0.01	0.70	1959-1964(6)	(29)
去川 2 号沢	31°51'	2781.5	1726.1	1055.4	0.896	-791.0	0.91	< 0.01	0.23	1967-1981(14)	(30,31)
鹿北 III 号		2166	1243	923						1992-1999(7)	(32)
大藪	33°30'	2486.1	1889.4	596.7						1985-1997(13)	(41)
大藪川		4143.7	3339.1	804.6	1.005	-824.6				1991,1992(2)	(36)
郡山	31.69°	2522.7	1620.6	902.1	1.019	-949.2	0.92	< 0.01	0.89	1983-1989(7)	(33)
高隈 1 号沢	31°32'	2787.1	1922.0	865.2	0.640	137.8	0.99	< 0.01	< 0.01	1985-1988(4)	(37)
高隈 2 号沢	31°32'	3332.5	2329.3	1003.2	0.324	1251.0				1987,1988(2)	(38)
桜島西道川	31.56°	2779.5	511.0	2268.5	0.411	-631.4	0.99	< 0.01	< 0.01	1993-1996(4)	(34)
桜島有村川	31.56°	2370.3	143.5	2226.8	0.105	-106.2	0.92	0.04	< 0.01	1993-1996(4)	(34)
屋久島土面川	30°20'	5266.0	3999.2	1266.8	0.980	-1158.8	0.93	< 0.01	0.90	1992-1996(5)	(35)
沖繩南明治山	26°31'	1785.1	690.9	1094.2	0.720	-588.8	0.93	< 0.01	0.04	1984-1993(6)	(39)
沖繩辺土名	26°43'	2896.5	1783.3	1113.2	0.603	51.7	0.97	< 0.01	< 0.01	1987-2002(11)	(40)

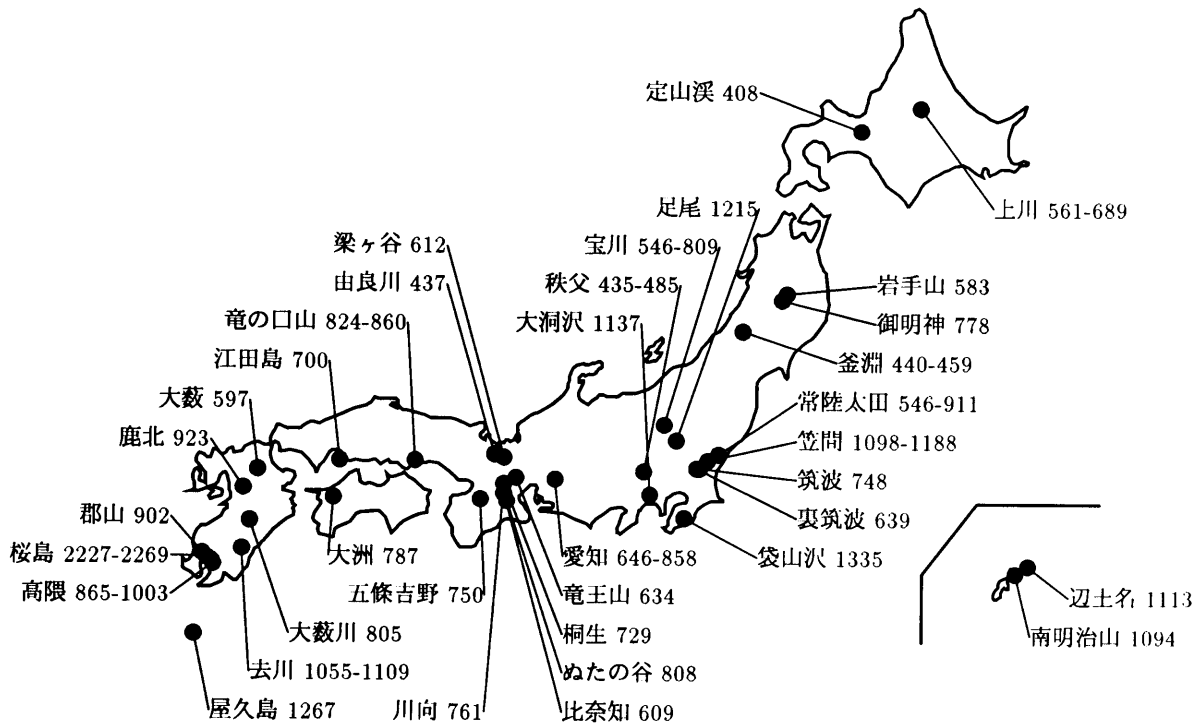


図 3.8: 森林流域の年損失量 [mm/year]

III.  $p_0 > 0.05$  もしくは  $p_0, p_1$  が算出できなかった流域

である。

このグループ分けが意図するところは次の通りである。

まず、 $p_0$  の値によってグループ I, II とグループ III を区分する。

グループ III は、回帰式 (3.1) の当てはめが良くなかったか不可能だった流域である。つまり、年降水量と年流出量の対応が直線関係にならなかった流域、および入手できたデータの統計年数が3年分に満たなかった流域、がこのグループに区分される。このグループに分類された流域は、平均年水収支のみを解析に使用し、回帰式 (3.1) の係数  $a$  の議論には使用しないこととする。

一方グループ I, II は回帰式 (3.1) の当てはめが良好であった流域であり、平均年水収支に加えて回帰式 (3.1) の係数  $a$  の議論に使用するグループである。

グループ I とグループ II は  $p_1$  の値によって区分される。グループ I は  $p_1 > 0.05$ 、すなわち5%の水準で係数  $a$  の値が1と異なるとは言えない流域を表す。他方グループ II は、 $p_1 \leq 0.05$ 、すなわち5%の水準で係数  $a$  の値が1と有意に異なる流域を表す。グループ I とグループ II とを比べた場合、グループ II の方がきつい条件となっている。グループ I は「 $a$  が1と有意に異なるとは言えない」のであって「 $a$  は1であると言える」訳ではないからである。したがってグループ I の中には、本来ならグループ II に区分されるべきでありながら、統計年数が少ないなどの理由で帰無仮説の検定において有意性が検出できず、結果としてグループ I に区分されてしまった流域も含まれている可能性がある。この点には注意されたい。



この基準に従って、表-3.2に挙げた流域を以上の3グループに区分すると次のようになる。

- グループ I ( $p_0 \leq 0.05, p_1 > 0.05$ ) 12 流域  
御明神、宝川本流、釜淵 I 号沢、釜淵 II 号沢、常陸太田、愛知穴の宮、愛知数成、桐生、去川 1 号沢、去川 2 号沢、郡山、屋久島土面川
- グループ II ( $p_0 \leq 0.05, p_1 \leq 0.05$ ) 14 流域  
上川北谷、宝川初沢、愛知東山、愛知白坂、川向、五條吉野、大洲、竜ノ口山南谷、竜ノ口山北谷、高隈 1 号沢、桜島西道川、桜島有村川、沖縄南明治山、沖縄辺上名
- グループ III ( $p_0 > 0.05$  もしくは不明) 24 流域  
上川南谷、上川一の沢、上川二の沢、定山溪時雨 1 の沢、岩手山南面、足尾広葉樹林区、笠間針葉樹林区、笠間広葉樹林区、太田針葉樹林区、太田広葉樹林区、太田幼齡林区、筑波、秩父久度沢、秩父矢竹沢、秩父大血川東谷、大洞沢、ぬたの谷、由良川上谷、竜王山 2、梁ヶ谷、江田島 A、大薮、大薮川、高隈 2 号沢

この区分を用いて表-3.2を図化したものが図-3.9および図-3.10である。

両図はいずれも点と直線で構成されている。点は各流域の平均年水収支を表しており、グループ I, II, III すべての流域がプロットされている。これに対して直線は、各流域の回帰直線を、それぞれの流域での年降水量の観測値の範囲で描いたものであり、グループ I および II の流域のみ図示されている。

図-3.9は年降水量と年流出量の関係を示したものである。まず点の分布の全体的な傾向を見ると、ほとんどの流域が 1:1 ラインの下側 500~1000 mm/year 付近の帯状区間に集中していることがわかる。この帯状区間から大きく外れている流域は 2 流域あるが、これらの流域は桜島にある火山灰地質の流域である。

点の分布にはグループごとに違いが見られた。グループ I の点はグループ II の点に比べて、より 1:1 ラインの近くに分布する傾向があった。

袋山沢 A 流域の点は大多数が集中する帯状区間の下限側の境界線あたりに位置している。桜島の流域を除くと、袋山沢 A 流域の点は 1:1 ラインからもっとも離れたところに分布している。

回帰直線の分布にもグループ間で違いが見られた。グループ I の回帰直線は、比較的 1:1 ラインの近くで、1:1 ラインに沿うように分布しているが、グループ II の回帰直線は、比較的 1:1 ラインから遠い位置で、年降水量が大きくなるにつれて 1:1 ラインから離れるように分布している。

図-3.10は年降水量と年損失量の関係を示したものである。年損失量は年降水量から年流出量を引いた残余であるから、図-3.10は図-3.9における 1:1 ラインと各点・各直線の距離を図示したものであると見ることができる。

まず点の分布をみると、大多数の流域は年損失量 400~1000 mm/year の帯状区間に集中している。この帯状区間から上側に大きく外れた流域が 2 流域あるが、これは先にも述べた桜島の流域である。帯状区間に含まれる流域の中では、袋山沢 A 流域はもっとも上端に分布する流域である。

点の分布はグループによって異なる。グループ I の点は横軸に比較的近い位置にあり、それに対してグループ II の点は横軸から離れた位置に分布している。グループ I と、グループ II に袋山沢 A 流域を含めたもので平均年損失量の平均値を求めると、それぞれ 760.9, 1067.5 mm/year となり、後者の方が大きい（ただし平均値に有意な違いがあるかどうか t 検定で調べると  $p = 0.057$  となり、5%水準で有意に異なるとは言えない）。平均値ではなく中央値で比較すると、それぞれ 691.1, 858.4 mm/year となる。

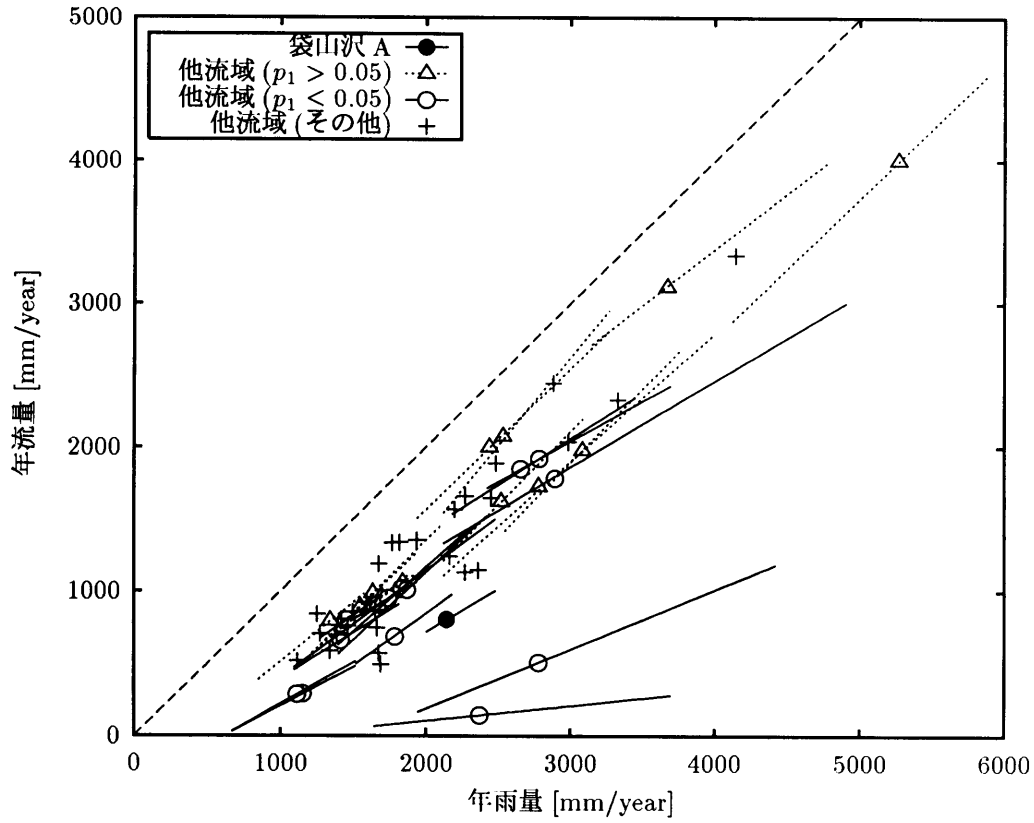


図 3.9: 森林流域における平均年降水量と平均年流出量の関係

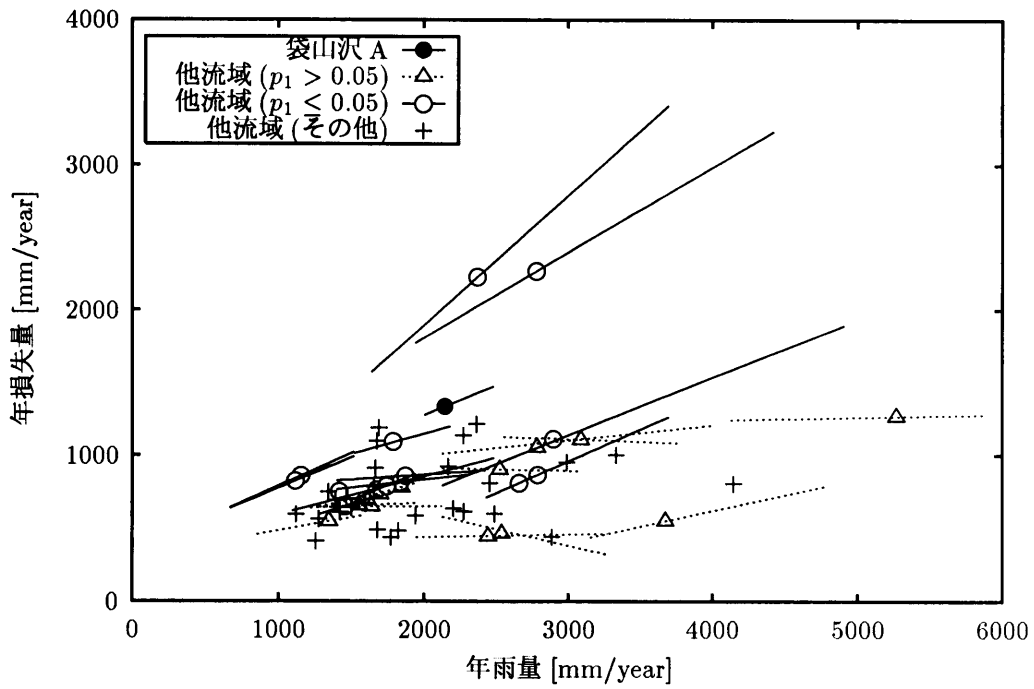


図 3.10: 森林流域における平均年降水量と平均年損失量の関係

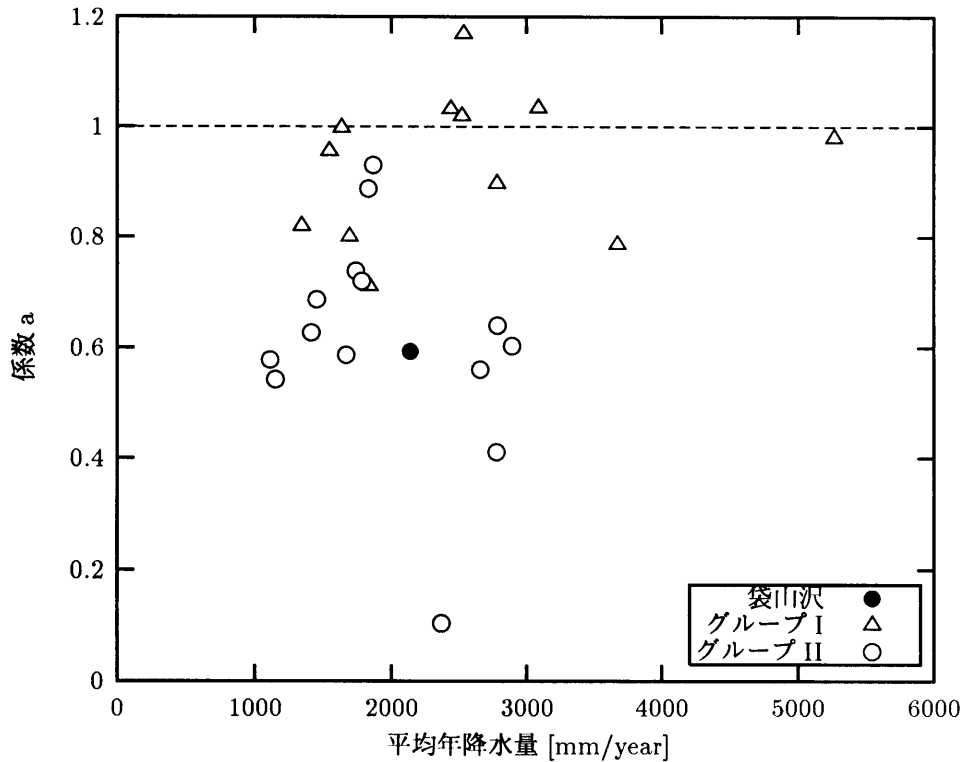


図 3.11: グループ別の係数 a の分布

回帰直線の分布はグループによって傾向が異なった。グループ I の直線は比較的横軸に近い位置で、横軸に比較的平行な線を描いているが、グループ II の直線は、横軸から比較的遠い位置で、年降水量が大きくなるにつれて横軸から上側に外れていくように線を描いている。

続いて、グループ I, II および袋山沢 A 流域を対象に、係数  $a$  の値の分布を図示したものが図-3.11 である。グループ I の流域の係数  $a$  は、0.711~1.169 の範囲に分布し、平均値 0.933、中央値 0.9675 であった。グループ II の流域は、0.105~0.930 の範囲に分布し、平均値 0.6051、中央値 0.598 であった。

グループ I とグループ II とで平均値に有意な差があるかどうかを  $t$  検定で調べたところ、 $p < 0.01$  すなわち 1% の水準で有意に異なるという結果になった。

### 3.2.7 考察 4・袋山沢 A 流域と他流域の比較

ここでは、国内の他流域との比較を通じて袋山沢 A 流域の年流出特性の特徴を把握することを試みる。

まず、年損失量についてであるが、袋山沢 A 流域の年損失量は他流域と比較して大きいということが指摘できる。図-3.10 にも示した通り、火山灰土壌である桜島の 2 流域を除くと、今回収集した流域の中で袋山沢 A 流域は年損失量が最大であった。このことは、袋山沢 A 流域における深部浸透量が他流域に比べて大きい、ということを示唆している。

次に、回帰式 (3.1) における係数  $a$  の値について論ずる。係数  $a$  はこれまで、年降水量が多い流域 (中野 (1976) は 1800 mm/year 程度以上としている) においては  $a \cong 1$  に近似できると言われ

てきた。しかるに、袋山沢 A 流域で求められた  $a = 0.5931$  という値は 1 から大きく隔たっており、また 5% 水準で  $a = 1$  とは有意に異なるという結果となった ((3.4) 式)。この文脈において、袋山沢 A 流域の係数  $a$  は他流域と比較して小さい値なのかどうかを論ずる必要が生ずる。

そこで実際に他流域の係数  $a$  を調べてみたものが表-3.2 である。まず国内の森林流域において一般に係数  $a$  を 1 に近似可能かどうか検討しよう。表-3.2 をもとに、帰無仮説  $H_0: a = 1$  を棄却できるかどうかでグループ I, II を区分した。ここで、グループ I は帰無仮説が棄却できなかったグループであるから、 $a \cong 1$  という近似が統計上可能なグループである。一方のグループ II は帰無仮説が棄却されたグループであり、 $a \cong 1$  という近似に無理があると考えられる。

さて、区分の結果、どちらのグループも 10 以上の流域が区分され、数としてはわずかにグループ II の方が多かった。このうち平均年降水量が 2000 mm/year 以上の流域のみを抽出すると、グループ I に 7 流域、グループ II に 5 流域が区分され、グループ II の方がやや少数ではあるが、ほぼ同数と言える数である。つまり、 $a \cong 1$  という近似に無理があると考えられる流域が約半数に上る、ということである。このことから、袋山沢 A 流域の結果は特異的なものではなく、一般に  $a \cong 1$  という近似が成立する、という想定が現実的ではない、ということができよう。

続いて、袋山沢 A 流域と他流域の係数  $a$  の値の大小を比較する。袋山沢 A 流域においては帰無仮説  $H_0: a = 1$  が棄却されているため、袋山沢 A 流域はグループ II に区分されるべき流域である。したがってグループ II の流域と比較することとする。袋山沢 A 流域の係数  $a$  は 0.5931 であるが、この値はグループ II の係数  $a$  の中央値 0.598 に近い。図-3.11 に図示した係数  $a$  の値の分布を見ると、袋山沢 A 流域の点は確かにグループ II の点の分布域の中央付近にあることがわかる。ただ、下方に離れた 2 点、すなわち桜島の 2 流域の値を除くと、0.55 ~ 0.6 付近に 6 流域の点が集中しているあたりがグループ II における係数  $a$  の最小値になる。袋山沢 A 流域の値はちょうどこの範囲に入ることから、火山灰土壌のような浸透性の高い流域を除外すると、袋山沢 A 流域の係数  $a$  の値は国内での最小の部類に含まれる、と言える。

袋山沢 A 流域において係数  $a$  が 1 より小さい原因として深部浸透が多いことが考えられるため、他流域の事例を含めて係数  $a$  と深部浸透量の関係を論ずる必要があるが、しかし一般に流域試験において深部浸透量を正確に算出することは難しく、また深部浸透はないものと仮定して試験が行なわれている場合が多々あることから、議論を行なうことができなかった。この点については今後の課題としたい。

## 文献リスト

表-3.2 の作成に用いた文献の一覧を以下に示す。

1. 井上桂・高田岩次・勝見精一・増田久夫, 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, 1956.
2. 勝見精一, 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, 1956.
3. 武田進平, 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, 1950.
4. 太田岳史・平山健一, 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, 1991.
5. 武田繁俊, 年流出量と主なる降雨の増水量に就て (實川森林治水試験第 2 回報告), 林試研報 50, 1-87, 1951.
6. 林業試験場, 森林理水試験地観測報告 (日降水量・日流出量), 66-118, 1961.
7. 東北支場山形試験地, 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, 1980.

### 3.2. 森林状態での年流出量

8. 細田育広・大丸裕武・村上亘・北田正憲・齋藤武史, 釜淵森林理水試験地観測報告-1・2号試験流域-(1979年1月~1993年12月), 森林総研研報 376, 1-52, 1999.
9. 櫻井莊三, 年流出量並びに年流出率と年雨量との関係, 砂防 42, 1-18, 1935.
10. 藤枝基久・野口正二・小川真由美, 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, 1996.
11. 森林総合研究所水資源保全研究室・水流出管理研究室, 筑波森林水文試験地観測報告(1978年5月~1987年12月), 森林総研研報 364, 125-168, 1993.
12. 深見和彦・手計太一・廣瀬葉子・松浦直・吉谷純一, 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, 2002.
13. 秩父演習林, 秩父演習林量水観測結果報告(1989~2000年), 演習林 41, 83-121, 2002.
14. 矢部和弘・中嶋伸行・西尾邦彦, 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, 2002.
15. 愛知演習林・演習林研究部, 愛知演習林量水観測結果報告(I), 演習林 20, 39-64, 1976.
16. 愛知演習林・演習林研究部, 愛知演習林量水観測結果報告(II), 演習林 21, 48-89, 1977.
17. 愛知演習林, 愛知演習林量水観測結果報告(III), 演習林 22, 84-191, 1981.
18. 東大愛知演習林, 愛知演習林量水観測結果報告(IV), 演習林 23, 57-88, 1984.
19. 東京大学農学部愛知演習林, 愛知演習林量水観測結果報告(V), 演習林 25, 135-151, 1987.
20. 愛知演習林, 愛知演習林量水観測結果報告(VI), 演習林 38, 127-146, 1999.
21. 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.
22. 福島義宏・鈴木雅一・谷 誠・加藤博之, 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, 1978.
23. 鈴木雅一・福島義宏・窪田順平, 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, 1987.
24. 福島義宏・鈴木雅一・友村光秀, 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, 1981.
25. 中島皇・福島義宏, 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, 1994.
26. 瀧本裕士・堀野治彦・渡辺紹裕・丸山利輔, 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, 1994.
27. 関西支場防災研究室・岡山試験地, 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, 1979.
28. 竹下伸一・高瀬恵次, 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, 2003.
29. 白井純郎・竹下 幸, 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, 1968.
30. 九州支場防災研究室, 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, 1982.
31. 竹下幸・清水晃・宮縁育夫, 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, 1996.
32. 清水 晃・清水貴範・宮縁育夫・小川泰浩, 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, 2002.
33. 地頭蘭隆・下川悦郎, 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, 1991.
34. 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳, 桜島における土石流河川の流出特性, 鹿大演研報 25, 9-20, 1997.
35. 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳, 屋久島土面川流域の降雨・流出特性, 鹿大演研報 28, 13-25, 2000.
36. 井倉洋二・久保田勝義, 大蔵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, 1995.

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

37. 地頭蘭隆・下川悦郎, 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, 1990.
38. 地頭蘭隆・下川悦郎, 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, 1990.
39. 藤枝基久・志水俊夫・金城勝・寺園隆一, 沖縄本島の水源地域における水文環境, 日林誌 77(2), 145-152, 1995.
40. 漢那賢作・新垣 隆・金城 勝, 森林流域における水土保持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, 2001.
41. 服部重昭・志水俊夫・荒木 誠・小杉賢一朗・竹内郁雄, 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, 2001.
42. 中野秀章, 森林水文学, 共立出版, 162-165, 1976.

## 3.3 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

### 3.3.1 目的と方法

本節では、森林伐採による年流出量の変化について、年降水量と年流出量の関係に着目して解析を行なう。

まず、年降水量と年流出量との関係を表す回帰式 (3.1) を伐採前後で比較し、変化を調べる。伐採前の回帰式と伐採後の回帰式の間には差異があるかどうかは、前節と同様の方法で解析する。すなわち、まず係数  $\alpha$  の差をモデル式 (3.2)

$$Q = \alpha P + \alpha' Pt + \beta + \beta' t \quad (3.2)$$

における  $\alpha'$  の有意性検定によって調べ、 $\alpha'$  が有意ではなかった場合は次に係数  $b$  の差をモデル式 (3.3)

$$Q = \alpha P + \beta + \beta' t \quad (3.3)$$

における  $\beta'$  の有意性検定によって調べる。ただし、ここで  $t$  は伐採前後を示すダミー変数である。

次に、伐採前後の A, B 各流域の回帰直線を用いて、伐採による流出量の変化量と年降水量との関係を調べる。A 流域の伐採前期間・伐採後期間、B 流域の伐採前期間・伐採後期間それぞれの回帰式を  $Q_{Ab}(P)$ 、 $Q_{Aa}(P)$ 、 $Q_{Bb}(P)$ 、 $Q_{Ba}(P)$  とする。伐採による流出量の変化量  $\Delta Q(P)$  は、処理流域である B 流域の変化量  $Q_{Ba}(P) - Q_{Bb}(P)$  から基準流域である A 流域の変化量  $Q_{Aa}(P) - Q_{Ab}(P)$  を消去することで求められる。各回帰式が  $P$  に対して線形であることを考慮して書けば、すなわち、

$$\begin{aligned} \Delta Q(P) &= (Q_{Ba}(P) - Q_{Bb}(P)) - (Q_{Aa}(P) - Q_{Ab}(P)) \\ &= a''P + b'' \end{aligned} \quad (3.16)$$

である。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

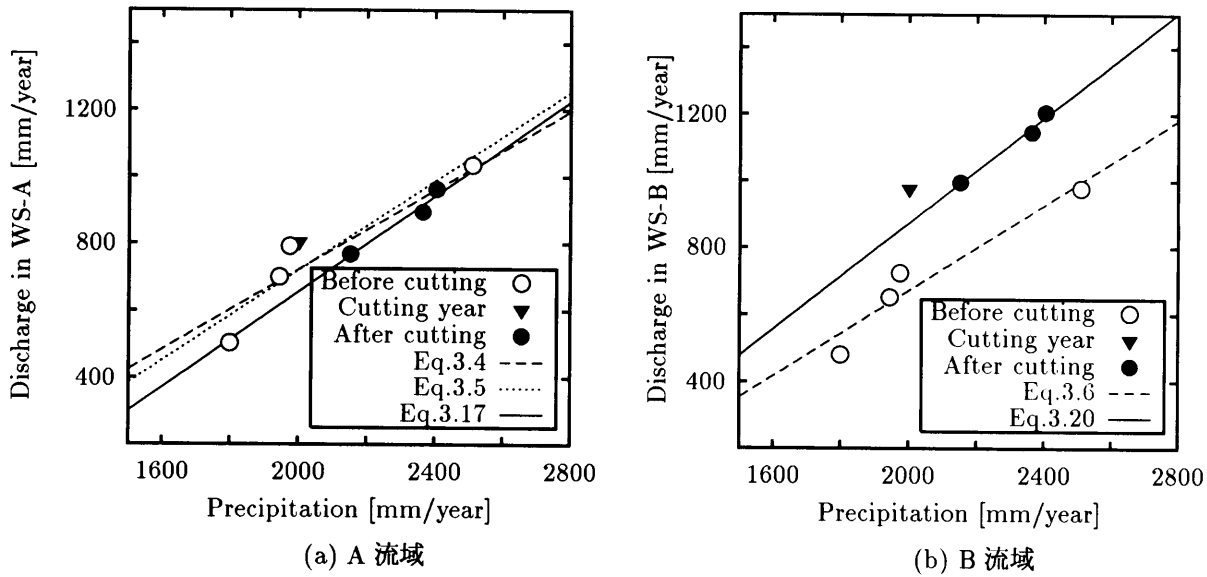


図 3.12: 袋山沢流域における伐採前後の流出量

#### 3.3.2 袋山沢の結果

図-3.12 に、袋山沢 A,B 流域における年降水量と年流出量の散布図を示す。伐採前期間（1994, 1995, 1997, 1998 年）、伐採年（1999 年）、伐採後期間（2000～2002 年）で点種を変えてある。

まず、基準流域である A 流域について、伐採前期間と伐採後期間それぞれで回帰直線を求めると以下の式を得る。

$$\text{前) } Q_{Ab} = 0.6688P - 617.30 \quad (R^2 = 0.8934, p = 0.055) \quad (3.5)$$

$$\text{後) } Q_{Aa} = 0.7124P - 767.61 \quad (R^2 = 0.9610, p = 0.127) \quad (3.17)$$

続いて、伐採前期間と伐採後期間とで回帰式に差があるかどうかを調べた。まず係数  $a$  の違いを見るためにモデル式 (3.2) を当てはめると次式が得られた。

$$Q_A = 0.6688P + 0.0436Pt - 617.30 - 150.32t \quad (R^2 = 0.9136, p = 0.04199) \quad (3.18)$$

(3.18) 式において  $\alpha' = 0.0436$  と求められた。帰無仮説  $H_0: \alpha' = 0$  の検定を行なうと  $p = 0.9215$  となる。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却されず、 $\alpha'$  は 0 と有意に異なるとは言えない。

そこで  $\alpha' = 0$  であるものとして係数  $b$  の差を調べた。モデル式 (3.3) を当てはめると次式のようにになった。

$$Q_A = 0.6737P - 627.38 - 50.91t \quad (R^2 = 0.9133, p < 0.01) \quad (3.19)$$

(3.19) 式において  $\beta' = -50.91$  と求められた。帰無仮説  $H_0: \beta' = 0$  の検定を行なうと  $p = 0.4164$  となる。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却されず、 $\beta'$  は 0 と有意に異なるとは言えなかった。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.3: 袋山沢流域の年流出量の変化 [mm/year]

流域	期間	状態	a	b	a の変化		b の変化	
袋山沢 A	1. 1994-1998	森林	0.6688	-617.30	0.0436	$p = 0.92$	-50.91	$p = 0.42$
	2. 2000-2002	森林	0.7124	-767.61				
袋山沢 B	1. 1994-1998	森林	0.6382*	-603.36	0.1531	$p = 0.66$	244.07	$p < 0.01^{**}$
	2. 2000-2002	伐採後	0.7913	-708.12				

続いて、処理流域である B 流域に対して同様の解析を行なった。伐採前期間と伐採後期間で回帰直線を求めると、

$$\text{前) } Q_{Bb} = 0.6382P - 603.36 \quad (R^2 = 0.9274, p = 0.037) \quad (3.6)$$

$$\text{後) } Q_{Ba} = 0.7913P - 708.12 \quad (R^2 = 0.9843, p = 0.08) \quad (3.20)$$

が得られる。両式の間有意な違いがあるかどうか調べるために、まず係数  $a$  の差を検定するモデル式 (3.2) を当てはめた。次式はその結果である。

$$Q_B = 0.6382P + 0.1531Pt - 603.36 - 104.76t \quad (R^2 = 0.9779, p < 0.01) \quad (3.21)$$

(3.21) 式より  $\alpha' = 0.1531$  と求められる。帰無仮説  $H_0: \alpha' = 0$  の検定を行なうと  $p = 0.66$  となる。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却されず、 $\alpha'$  は 0 と有意に異なると言えないことがわかった。

そこで次に係数  $b$  の差を検定するモデル式 (3.3) を当てはめると、次式のようにになった。

$$Q_B = 0.6554P - 638.73 + 244.07t \quad (R^2 = 0.9761, p < 0.01) \quad (3.22)$$

(3.22) 式より、 $\beta' = 244.07$  となった。帰無仮説  $H_0: \beta' = 0$  の検定を行なうと  $p < 0.01$  となった。したがって帰無仮説は有意水準 1% で棄却され、 $\beta'$  は 0 と有意に異なるという結果となった。

以上の解析結果を一覧にしたものを表-3.3 に示した。

さて、(3.5) 式、(3.17) 式、(3.6) 式、(3.20) 式を用いて、伐採による年流出量の変化量  $\Delta Q$  を年降水量  $P$  の関数として求めよう。(3.16) 式に (3.5) 式、(3.17) 式、(3.6) 式、(3.20) 式を代入して、

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_{Ba} - Q_{Bb} - Q_{Aa} + Q_{Ab} \\ &= 0.7913P - 708.12 \\ &\quad - 0.6382P + 603.36 \\ &\quad - 0.7124P + 767.61 \\ &\quad + 0.6688P - 617.30 \\ &= 0.1095P + 45.55 \end{aligned} \quad (3.23)$$

が得られる。



## 3.3.3 考察 1・袋山沢流域における伐採の影響

袋山沢流域において、伐採によって年降水量と年流出量との関係に生じた変化を解析した。

A 流域では伐採前期間と伐採後期間の 2 期間の回帰直線に有意な違いが見られなかった。A 流域は森林植生が保持された流域であるから両期間で回帰直線に変化が見られないのは当然の結果であり、また基準流域として期待するところでもある。

一方、B 流域では、2 期間の回帰直線の間、係数  $a$  には有意な違いが見られなかったが、係数  $b$  に有意な違いが見られた、という結果が得られた。したがって、袋山沢 B 流域において、森林伐採によって年降水量と年流出量の関係が変化したと言える。

回帰直線の変化についてより具体的に検討しよう。

まず係数  $b$  についてだが、係数  $b$  の変化は 2 期間の年流出量の量的な差を示している。まず A 流域について見てみると、伐採前期間に比べて伐採後期間の方が係数  $b$  が 50.9 mm/year 少ないという結果になった。A 流域は森林植生が保持された流域であるから、係数  $b$  すなわち年流出量が少なくなったのは両期間で気象条件等が異なったためであろう。

ところで、年水収支を示した表-3.1 によると、A 流域の年流出量は伐採前期間が平均 758.3 mm/year、伐採後期間が平均 875.2 mm/year であり、伐採後期間の方が約 120 mm/year 多いという結果になっている。この結果は回帰直線の変化と一見矛盾するよう見える。しかし、同量の降水に対する流出の量は少なくなったが、降水量がそれ以上に大きかったために流出量の実量は多くなったと理解すれば矛盾はない。

一方、B 流域における係数  $b$  は、伐採前期間よりも伐採後期間の方が 244.1 mm/year 多いと算出された。伐採しなかった A 流域では係数  $b$  が伐採後に 50.9 mm/year 少なくなっているから、B 流域でも流出量が同量だけ少なくなっていると考え、結局 B 流域では伐採によって年流出量が 295.0 mm/year 増加したと結論されることとなる。

§3.1.3 において水収支から算出した増加量は 290.5 mm/year であった。これと回帰直線の解析から得られた数値とはほぼ等しく、本節の解析が妥当なものであることを示している。

さて次に、係数  $a$  の変化について検討しよう。係数  $a$  は A, B 両流域ともに伐採前後で有意な変化が見られなかったが、有意とは言えなくとも、A 流域と B 流域では変化の具合が異なっている。A 流域は伐採後期間の方が係数  $a$  が 0.044 大きくなっている。B 流域は伐採後期間の方が 0.153 大きい。両流域はともに伐採後期間の方が係数  $a$  が大きい、変化の大きさは B 流域の方が大きい。A 流域と B 流域の変化の違いが有意なものであるとは言えないが、B 流域の変化の方が大きいことが伐採の影響である可能性はある。

伐採によって回帰式 (3.1) の係数  $a$  が大きくなる、ということは、換言すれば、伐採による年流出量の増加量は年降水量に依存するというを意味する。(3.23) 式によれば、年降水量が大きいほど伐採による年流出量の増加量は大きく、年降水量に対して約 11% の割合で増加量が増えることが示されている。

Bosch and Hewlett(1982) は、世界各地で行なわれた対照流域法による森林伐採試験の結果をサマライズした結果、伐採による年流出量の増加量は、流域の平均年降水量と、伐採後の年々の降水量の両方に依存しており、年降水量が多い方が流出量の増加量も多いと結論している。

袋山沢流域における (3.23) 式の結果は、Bosch and Hewlett(1982) の結論と整合している。このことから、B 流域の係数  $a$  の増加は、統計上有意な変化ではなかったが、伐採の影響によって増加したものであると理解することは蓋然的であると言えるだろう。

### 3.3.4 他流域の結果

国内の森林流域の中で、伐採や山火事、台風による倒木など、森林植生に変化があった流域を対象に、年降水量と年流出量の関係の変遷を調べた。

#### 3.3.4.1 上川流域

北海道上川郡上川町、北緯 43°50′、東経 142°58′ に位置する流域である。標高範囲は約 400～800 m、年平均気温は約 5 °C、年平均降水量約 1440 mm/year のうち 40% ほどにあたる 600 mm/year は雪として降る。

流域全体は北谷・南谷と呼ばれる隣り合ったふたつの流域に分かれており、流域面積はそれぞれ 645.4 ha、572.9 ha である。流域の形状はともに東西に長く南北に狭い。南谷の中には更に一の沢・二の沢小流域が設定されており、流域面積はそれぞれ 8.9 ha、73.3 ha である。

原植生は天然の針広混交林で、エゾマツ・トドマツを主とする針葉樹が約 40%、ミズナラ・カバ類・シナノキ・カツラなどを主とする広葉樹が約 60% であった。流量の観測は南谷において 1939 年から始められたが、それ以前の 1926～1936 年に主に南谷で択伐が行なわれており、観測開始時点の植生が北谷と南谷とで異なることに注意を要する。

降水量および流出量データは林業試験場 (1961)、遠藤・勝見・舟木 (1961)、井上ら (1956) から採った。雨量観測点が複数存在するが、そのうち二の沢露場で観測された雨量を降水量データとして用いた。

水年の区切りは、勝見 (1956)、井上ら (1956)、中野 (1971) らに倣い、10 月と 11 月の間に設定した。したがって一水年には前年 11 月から当年 10 月までが含まれる。

#### 北谷流域

1926 年頃に択伐が行なわれたが、規模は小さかったようである。その後、南谷に対する対照流域として、植生に手を加えず原生林のまま残されてきた。1954 年 9 月 26 日、台風 15 号 (洞爺丸台風) により蓄積の 90% に相当する立木が被害を受けた。被害木は約 1 年間放置され、1955 年 9 月頃から作業道付設、被害木の伐倒・搬出が開始され、以降 1958 年まで被害木整理が行なわれた。伐倒・搬出後に人工造林はされなかったが、ササなどの草本類が繁茂して伐採跡地を被覆したため、土壌の露出はほとんどなかった。

以上のような植生変化から、期間を次のように区分した。

1. 1943-1954 年 森林期間
2. 1956-1959 年 処理期間

年降水量と年流出量の散布図を図-3.13 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.4 に示した。

図-3.13 からわかる通り、森林期間・処理期間ともに、年降水量と年流出量はそれぞれ直線関係を示している。回帰直線の決定係数は、森林期間が  $R^2 = 0.92$ 、処理期間が  $R^2 = 0.95$  と、いずれも高い。両期間の回帰直線の違いを検討すると、係数  $a$  に 1% の水準で有意な違いが見られた。係数  $a$  は、森林期間に 0.665 であったものが、処理期間には 2.622 となり、台風被害によって値が大きくなった。係数  $a$  が異なるために係数  $b$  の違いを検討することはできないが、図-3.13 を見ると、台風後のプロットはすべて森林期間の回帰直線よりも上側に分布しており、台風の風害によって年流出量が増加したことがわかる。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.4: 森林伐採による年流出量の変化 (上川北谷) [mm/year]

期間	状態	a	b	a の変化	b の変化
1. 1943-1954	森林	0.665**	-147.6	1.957 p < 0.01**	
2. 1956-1959	被害木処理	2.622*	-2673.1		

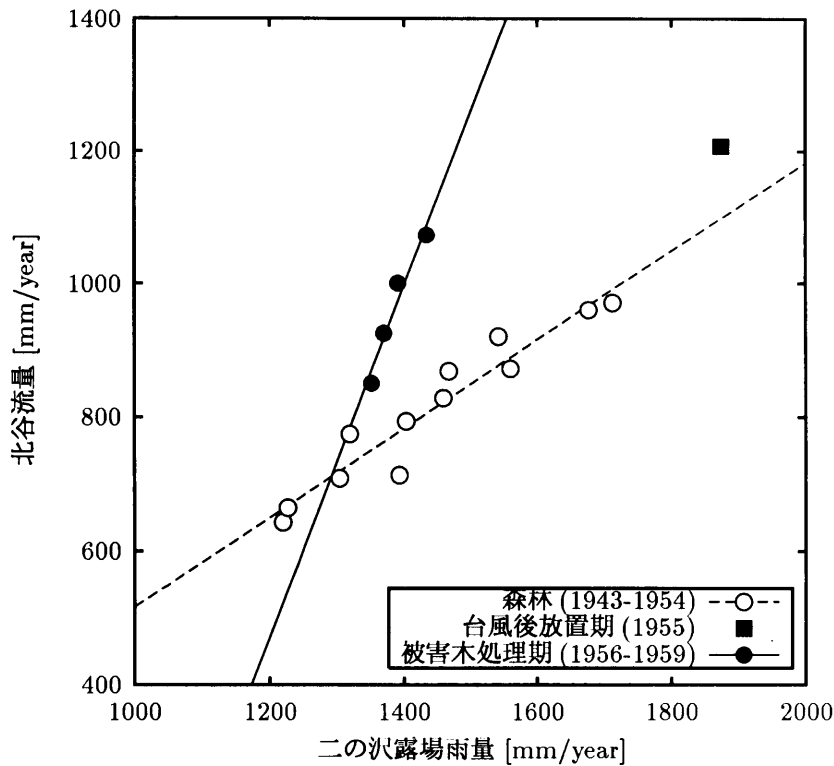


図 3.13: 上川北谷流域における伐採と台風被害の影響

以上のことから、上川北谷流域において、台風による風害によって年流出量は増加し、またその増加量は年降水量に連動していることがわかった。

#### 南谷流域

原植生は北谷と同様であったと思われる。1926年頃に第1回目の伐採が行なわれ、1932年から1936年にかけては全流域にわたり20%の択伐が行なわれた。さらに1944年から1949年まで材積の45%が択伐され、風害直前の蓄積で比べると南谷は北谷の44%であった。1954年には北谷同様台風15号によって倒木被害を受けた。被害面積は90%に達し、残された立木蓄積は原生林時代の3%程度と推定されている。1955年度から部分的にトドマツの造林が行なわれたが、造林面積は流域面積の約20%ほどである。

以上のような経緯から、期間を次のように区分した。

1. 1940-1943 森林期間

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.5: 森林伐採による年流出量の変化（上川南谷）[mm/year]

期間	状態	a	b	a の変化		b の変化	
1. 1940-1943	森林	0.399	141.1	0.384	$p = 0.222$	27.7	$p = 0.51$
2. 1944-1949	択伐中	0.783**	-370.3	0.689	$p = 0.077$	96.4	$p = 0.04^*$
3. 1950-1954	択伐後放置	1.473**	-1264.5	0.965	$p = 0.173$	220.5	$p < 0.01^{**}$
4. 1956-1959	被害木処理	2.438*	-2386.9				

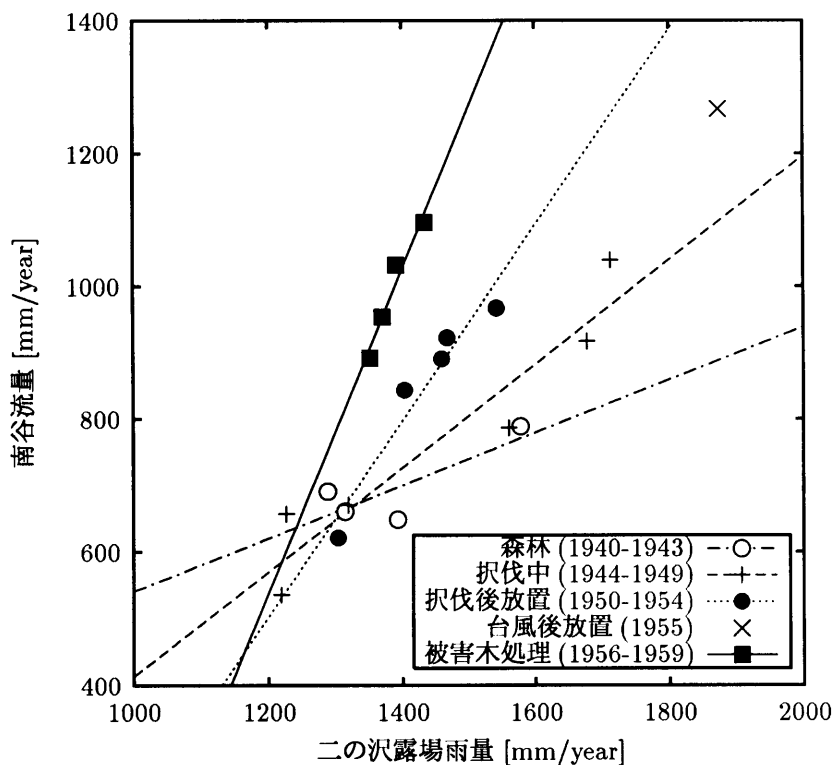


図 3.14: 上川南谷流域における伐採と台風被害の影響

2. 1944-1949 択伐施業期間
3. 1950-1954 択伐後放置期間
4. 1956-1959 台風後処理期間

年降水量と年流出量の散布図を図-3.14 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.5 に示した。

図-3.14 を見ると、各期間ごとに点の分布が異なっていることがわかる。択伐後や台風後の点は森林期間の回帰直線よりも上側に分布しており、植生減少によって年流出量が増加したことが示されている。各期間の回帰直線はそれぞれ異なっており、植生の変化につれて年降水量と年流出量の関係が変化していったことがわかる。

表-3.5 にしたがって回帰直線の変化を追っていく。まず森林期間だが、回帰直線の係数  $a$  は 0.399 と非常に小さい。回帰の決定係数が  $R^2 = 0.67$  と小さく、また  $a$  の有意性も 5% に不足、回帰の当てはまり自体が悪いため、この数値は検討から除外するべきと思われる。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の変化

択伐施業期間は 1% 水準で有意な回帰が得られた。決定係数も  $R^2 = 0.90$  と高い。係数  $a$  は森林期間に比べて 0.384 大きくなっているが、森林期間の回帰は不良であるので、この増加が意味のあるものであるのかは判断できない。

続いて択伐後放置期間は 1% 水準で有意な回帰が得られた。決定係数も  $R^2 = 0.93$  と高い。係数  $a$  は択伐施業期間に比べて 0.689 大きくなった。 $a$  の変化、すなわち  $a'$  の有意性は 5% にやや足りなかった。 $b$  の変化、すなわち  $b'$  は 5% 水準で有意となり、択伐施業期間に比べて年流出量が有意に増加したことが示された。

台風後処理期間は 5% 水準で有意な回帰が得られた。係数  $a$  は択伐後放置期間に比べて 0.965 大きくなったが、 $a$  の変化は有意ではなかった。係数  $b$  は 220.5 大きくなり、この変化は 1% 水準で有意であった。

以上のことから、上川南谷流域において、係数  $a$  は植生の減少につれて大きくなる傾向を示したことがわかった。

## 二の沢流域

二の沢流域は強度伐採区として 1946-1948 年に蓄積の 70% を択伐した。伐採後には広葉樹の中小径木、副木が散生シクマイザサが林床に密生する林分となった。

北谷・南谷については 1959 年までのデータが公表されているが、二の沢については 1953 年までしか収集できなかった。また予備解析において択伐前と択伐中とで回帰直線に差が認められなかったので同一期間にまとめた。

結果として、次のように期間を区切ることとした。

1. 1943-1948 森林・択伐施業期間
2. 1949-1953 択伐後期間

なお、一の沢流域においても伐採施業は行なわれたが、解析の結果、年降水量と年流出量との対応がよくなかったため、本研究では解析の対象から除いた。

年降水量と年流出量の散布図を図-3.15 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.6 に示した。

図-3.15 を見ると、森林・択伐施業期間、伐採後期間ともに年降水量と年流出量は直線関係を示していることがわかる。森林・択伐施業期間は回帰が 1% 水準で有意であり、決定係数は  $R^2 = 0.96$  と高い。伐採後期間は、回帰の有意性が 5% に不足 ( $p=0.06$ )、決定係数は  $R^2 = 0.74$  で、回帰の当てはまりが森林・択伐施業期間に比べて不良である。

両期間の点の分布を見ると、伐採後期間の点は森林・択伐施業期間の回帰直線を跨いで分布している。年降水量が 1400 mm/year 以上の範囲では択伐後期間の点は森林・択伐施業期間の回帰直線の上側に分布しているが、1400 mm/year 以下の範囲では逆に下側に位置している。このことから、択伐によって年流出量が定性的に増加したとは言えなかった。

表-3.6 より、択伐による回帰直線の変化を見ると、係数  $a$  に変化が見られた。森林・択伐施業期間は 0.407 であったものが、択伐後期間は 1.102 となり、係数  $a$  は択伐によって 0.695 大きくなった。この増加は 5% 水準で有意な変化であった。

#### 3.3.4.2 釜淵流域 (2 号沢)

釜淵森林理水試験地は山形県最上郡真室川町、北緯 38°57'、東経 140°16' に位置する試験地である。最上盆地のほぼ北端にあたり、標高はおよそ 160 ~ 240 m の範囲である。年平均降水量は

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の変化

表 3.6: 森林伐採による年流出量の変化（上川二の沢） [mm/year]

期間	状態	a	b	a の変化	b の変化
1. 1946-1948	森林・伐採中	0.407**	191.6	0.695	$p = 0.044^*$
2. 1949-1953	伐採後	1.102	-755.2		

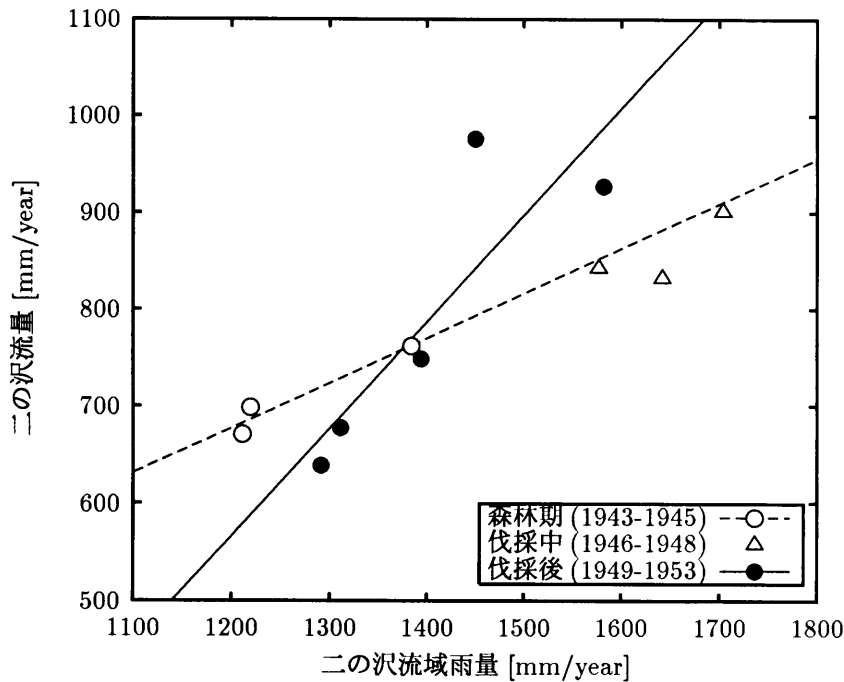


図 3.15: 上川二の沢流域における伐採の影響

2600 mm/year 程度で、そのうちの約 40% が 12 月から 3 月の間に雪として降る。年平均気温は 10 °C 弱である。

試験地には 4 流域が設定されており、1,2 号沢は 1939 年から、3,4 号沢は 1960 年から観測されている。このうち 1 号沢は対照流域として植生に人工処理が加えられていない。一方の 2,3,4 号沢は処理流域として伐採施業が行なわれている。

3,4 号沢の流量データは現時点で未公表であるので、ここでは 1,2 号沢を解析の対象とする。

1,2 号沢は南北に隣接する小流域で、流域面積はそれぞれ 3.060ha, 2.482ha とほぼ同じで、地形的にも類似している。植生はもともと広葉樹天然林であったが、燃料用材を得るための部分的皆伐が行なわれ、1912~1916 年に伐採跡地にスギ・ヒノキなどが植栽された。観測開始時点（1939 年）ではナラ・ブナなどの広葉樹天然林中に団地状にスギ・ヒノキの人工林が散在した森林となっていた。

降水量・流出量データは林業試験場（1961）、東北支場山形試験地（1980）、細田ら（1999）から採った。歴年では 1939~1993 年、水年では 1940~1993 年のデータである。なお 1979 年秋に気象露場が移動された（南西方向に約 100m）。

水年の区切りは、丸山・猪瀬（1952）、中野（1971）に倣い、11 月と 12 月との間に設定した。す

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の変化

なわち一水年は前年12月から当年11月までが含まれる。

1号沢は、1948年9月アイオン台風による小崩壊の復旧工事が1950年に行なわれた以外、流域内に人工処理が加えられていない。

一方2号沢は1947年12月から翌年夏までに皆伐が行なわれ、以降1958水年まで下刈・火入れが行なわれた。1960年に全域に切取階段工が築設された。階段の合計面積は流域面積の7%弱に相当し、切取土砂は斜面下方に捨てられた。階段上にはただちにスギが植栽された。以降は処理が加えられず放置されているが、急傾斜地では雪崩や積雪のグライドにより植生の自然侵入が困難となっており、1978年当時、流域は崩壊地を含むスギ若齢林分となっていた。

以上の植生変化をもとに、予備的に回帰直線を検討したところ、次のように期間を区分するのが妥当と思われた。

1. 1940-1947 森林期間
2. 1948-1959 伐採等処理期間
3. 1960-1979 階段工影響期間
4. 1980-1989 放置期間1
5. 1990-1993 放置期間2

年降水量と年流出量の散布図を図-3.16に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.7に示した。

図-3.16を見ると、植生の変化に合わせて点の分布が移動していることがわかる。まず森林期間から階段工影響期間にかけては、期間が進むにつれて点の分布は上側に移動して行った。すなわち、植生の減少および地表面の改変につれて年流出量は増加した。一方、階段工影響期間から放置期間2にかけては、期間が進むにつれて点の分布は下側に移動して行った。すなわち、植生の回復にともなって年流出量は減少した。

回帰直線を比較すると、森林期間と放置期間2、および伐採等処理期間と放置期間1がほぼ同じ軌跡を示している。森林期間、階段工影響期間および放置期間2に比べ、伐採等処理期間および放置期間1の回帰直線は傾きが緩やかである。しかし、表-3.7に示した通り、回帰直線の変化を解析すると、係数 $a$ の変化は有意なものではない。一方係数 $b$ の変化は各期間の間ですべて有意性が検出された。

表-3.8は、対照流域である1号沢流域を基準として2号沢流域の回帰直線の変化を解析したものである。表-3.8によると、森林期間から伐採等処理期間にかけて2号沢の係数 $a$ に比較的大きな増加が見られるが、伐採等処理期間から階段工影響期間にかけてはほぼ無変化である。階段工施工以降の放置・植生回復期には増加と減少の双方が見られ、変化の傾向が一定していない。

以上のことから、釜淵2号沢において、森林伐採によって係数 $a$ は大きくなったが、階段工や植生の回復過程においては係数 $a$ に定性的な変化は見られなかった、と言える。

#### 3.3.4.3 宝川本流流域

宝川流域は群馬県利根郡水上町、北緯 $36^{\circ}51'$ 、東経 $139^{\circ}01'$ に位置する流域である。標高範囲は800～1945 m、年平均気温 $5.0^{\circ}\text{C}$ である。

流域面積は1905.66 haと試験流域としては大きい。流域が広く、また標高の較差が大きいため、基地露場での降水量観測値と流域降水量の真値とが大きく異なっていると考えられる。武田(1951)

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.7: 森林伐採による年流出量の変化 (釜淵 2 号沢) [mm/year]

期間	状態	$a$	$b$	a の変化		b の変化	
1. 1940-1947	森林	1.169**	-888.2	-0.227	$p = 0.098$	106.0	$p = 0.036^*$
2. 1948-1959	伐採	0.942**	-220.6	0.175	$p = 0.344$	240.4	$p < 0.01^{**}$
3. 1960-1979	階段工後	1.117**	-403.2	-0.103	$p = 0.744$	-189.0	$p < 0.01^{**}$
4. 1980-1989	放置期 1	1.015**	-344.3	0.214	$p = 0.475$	-199.9	$p = 0.024^*$
5. 1990-1993	放置期 2	1.228*	-1082.4				

表 3.8: 森林伐採による年流出量の変化 (釜淵 2 号沢) [mm/year]

期間	状態	II 号沢		I 号沢		2 流域の差		差の変化 $\Delta\alpha'$
		$a$	$b$	$a$	$b$	$\alpha'$	$\beta'$	
1. 1940-1947	森林	1.169**	-888.2	1.239**	-1124.3	-0.070	59.0	
2. 1948-1959	伐採	0.942**	-220.6	0.870**	-239.3	0.072	191.7**	0.142
3. 1960-1979	階段工後	1.117**	-403.2	1.072**	-540.5	0.045	247.1**	-0.027
4. 1980-1989	放置期 1	1.015**	-344.3	0.909**	-178.3	0.105	85.3	0.060
5. 1990-1993	放置期 2	1.228*	-1082.4	1.181*	-911.2	0.047	-47.9	-0.058

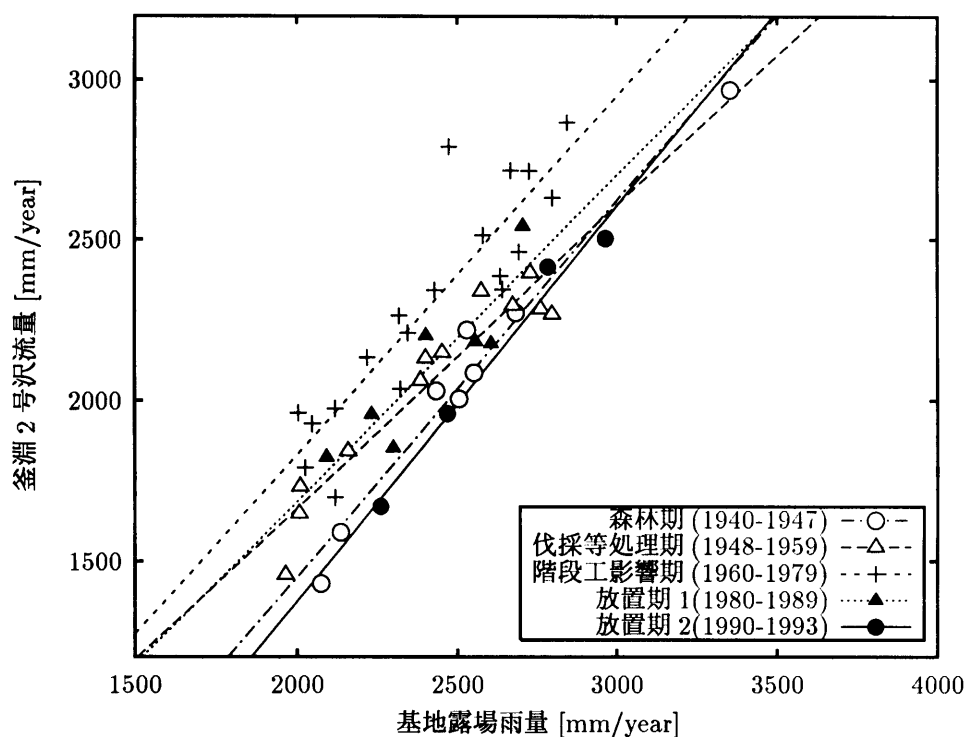


図 3.16: 釜淵 2 号沢流域における伐採等の影響



### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.9: 森林回復による年流出量の変化（宝川本流） [mm/year]

期間	状態	a	b	a の変化	b の変化
1. 1938-1947	伐採影響期間	1.466**	-61.2	-0.222	$p = 0.63$
2. 1948-1958	無処理期間	1.244**	97.3		$p < 0.01^{**}$

は 1938～1947 水年について、基地年降水量 2158 mm/year に対して流域降水量 3673 mm/year と推定している。そのうちの 60% ほどが、だいたい 11 月から 4 月にかけて雪が降る。

水年の区切りは、武田 (1951)、中野 (1971) に倣い、10 月と 11 月の間に設定した。したがって一水年には前年 11 月～当年 10 月が含まれる。

降水量・流出量データは藤枝・野口・小川・志水・坪山・細田 (1996) から採った。流域降水量の推定法が不明であったため降水量としては基地露場観測値をそのまま用いた。なお 1959 水年から冬期の降水量観測を中止したため、1958 水年までを解析の対象期間とする。

原植生はブナが優占種で、ヒバ・ミズナラなどが混交する天然林であった。ただし森林限界以上では無立木地が見られ、その面積割合は 31% である。観測開始以前の 1934 年から 1938 年までに、下流域の優良林分約 300 ha において択伐（部分的に皆伐）が行なわれ、伐採率は蓄積の 70% に達した。その後は 1960 年まで伐採がなかった。

解析期間の区分は、吉野・菊谷 (1985) を参考に、次のように定めた。

1. 1938-1947 伐採影響期間
2. 1948-1958 無処理期間

年降水量と年流出量の散布図を図-3.17 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.9 に示した。

図-3.17 において、伐採影響期間と無処理期間とで点の分布に差が見られた。伐採影響期間に比べて無処理期間の点は下側に分布している。すなわち、植生回復によって年流出量が減少したことを示している。すべての点において、年降水量よりも年流出量の方が大きな値を示しているが、これは年流出量として用いた基地露場雨量が流域降水量の真値よりも小さいためであると思われる。回帰直線の傾きが 1 より大きくなっているが、これも同じ理由によるものと考えられる。回帰直線の決定係数は伐採影響期間が  $R^2 = 0.83$ 、無処理期間が  $R^2 = 0.57$  とあまり高くないが、原因のひとつとして基地露場雨量と流域降水量の対応が良くないことが考えられる。

続いて、表-3.9 をもとに、伐採影響期間から無処理期間にかけての回帰直線の変化を見る。係数  $a$  は 1.466 から 1.244 へと 0.222 小さくなったが、この変化は有意ではなかった。係数  $a$  に変化がなかったとした場合、係数  $b$  の変化は 312.9 の減少であった。係数  $b$  の変化は 1%水準で有意な変化であった。

以上のことから、宝川本流流域では、部分択伐からの植生回復過程において年流出量は減少し、また係数  $a$  は小さくなる傾向を示した。

#### 3.3.4.4 常陸太田流域

常陸太田森林水文試験地は茨城県常陸太田市、北緯 36°34′、東経 140°35′ に位置する。標高範囲 280～330 m、流域面積 15.7 ha の山地小流域である。年平均降水量は 1487.9 mm/year、2,3 月に降雪が観測されるが積雪となることは少ない。年平均気温は 13.7 °C である。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

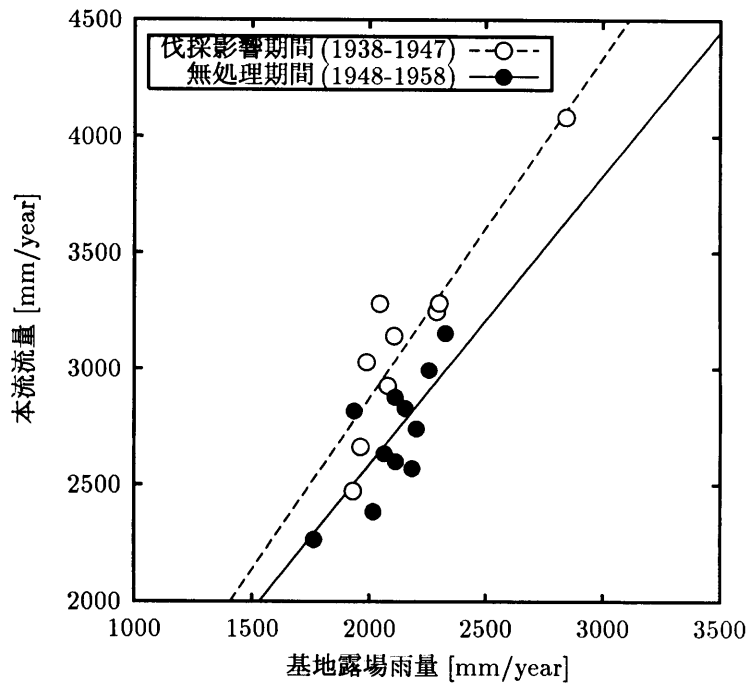


図 3.17: 宝川流域における伐採の影響

常陸太田流域では伐採試験が2回行なわれている。初回は大正時代に実行され、2回目は昭和末期に行なわれた。

初回の試験では伐採が1915年8月1日から1916年6月20日にかけて行なわれた。伐採前の植生は広葉樹の壮齢林で、伐採後には部分的に高さ数尺の広葉樹が散生する草地に変わった。

2回目の試験では、初回の伐採後に植栽された59年生のスギ・ヒノキを1985年4月から1986年2月にかけて皆伐した。ただし流域の一部(2.48ha)は伐採されなかった。その後1987年に伐採跡地にスギ・ヒノキの造林が行なわれた。

降水量・流出量データは、初回の試験のものは東京大林区署(1923)から、2回目の試験のものは藤枝・野口・小川(1996)および村上(2000)から採った。

期間の区分は以下の通りにした。

1. 1911-1914 森林期間1
2. 1917-1919 伐採後期間1
3. 1981-1985 森林期間2
4. 1991-1996 伐採後期間2

年降水量と年流出量の散布図を図-3.18に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.10に示した。

図-3.18を見ると、初回の伐採試験では伐採後期間1の点が森林期間1の点よりも上側に分布しており、伐採によって年流出量が増加したことが示されている。しかし2回目の伐採試験においては、年降水量1600 mm/year以下の範囲では森林期間2および伐採後期間2の点の分布に大差は

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.10: 森林伐採による年流出量の変化 (常陸太田) [mm/year]

期間	状態	a	b	a の変化		b の変化	
1. 1911-1914	森林	0.771	-329.5	0.360	$p = 0.68$	91.1	$p = 0.19$
2. 1917-1919	伐採後	1.130	-757.5				
3. 1981-1985	森林	0.818**	-302.0	0.395	$p = 0.13$	88.8	$p = 0.24$
4. 1991-1996	幼齢樹林	1.213**	-764.8				

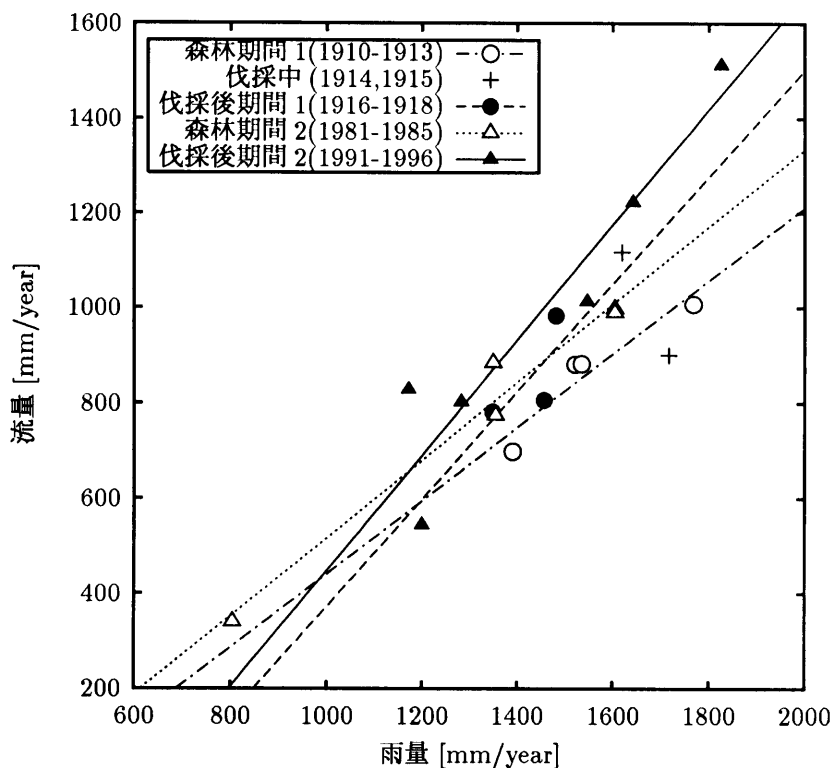


図 3.18: 常陸太田流域における伐採の影響

なく、年流出量の増加は見られないが、1600 mm/year 以上の範囲では伐採後期間 2 の点の方が上方に分布しており、年流出量の増加が見られる。

森林期間 1 と森林期間 2 を比べると、森林期間 2 の方が 100 mm/year ほど年流出量が多い。植生は森林期間 1 が広葉樹林、森林期間 2 が針葉樹林であり、一般的に広葉樹林よりも針葉樹林の方が蒸発散が多いということ考えると森林期間 2 の方が流出量が少なくなるはずであるが、図-3.18 は逆の傾向を示している。両期間は約 70 年の時間差があるから、観測精度に違いがあることが考えられるし、降水量の観測点異なる可能性も考えられる。しかしここでは各伐採試験の前後の変化を見るのが目的であるので、森林期間同士の違いについてはこれ以上考えないこととする。

表-3.10 から伐採による回帰直線の変化を見る。まず初回の伐採においては、森林期間 1 と伐採後期間 1 とで回帰直線に有意な差は見られなかったが、係数  $a$ 、係数  $b$  ともに伐採によって大きくなる傾向が見られた。ただし、伐採後期間 1 の回帰は当てはまりが不良で、決定係数は  $R^2 = 0.53$  と低く、また回帰自体も有意ではなかった。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の変化

表 3.11: 森林伐採による年流出量の変化 (竜の口山北谷) [mm/year]

期間	状態	a	b	a の変化		b の変化	
1. 1937-1944	森林・虫害期間	0.578	-353.8				
2. 1945-1954	伐採影響期間	0.738**	-396.8	0.160	$p = 0.21$	156.8	$p < 0.01^{**}$
3. 1955-1982	放置期間	0.842**	-595.3	0.103	$p = 0.43$	-65.3	$p < 0.01^{**}$

2 回目の伐採においては、初回と同様、森林期間 2 と伐採後期間 2 とで回帰直線に有意な差は見られなかったが、係数  $a$ 、係数  $b$  ともに伐採によって大きくなる傾向が見られた。

以上のことから、常陸太田流域において、森林伐採によって年流出量は増加する傾向があり、また回帰直線の係数  $a$  が大きくなる傾向が見られたと言える。

#### 3.3.4.5 竜の口山流域

竜の口山森林理水試験地は岡山県岡山市、北緯 34°42'、東経 133°58' に位置する流域である。瀬戸内気候区に属するため降水量が少なく、平均年降水量は約 1200 mm/year である。年平均気温は 14.3 °C で、降雪・積雪はほとんどない。標高は 35 ~ 260 m である。

試験地は北谷・南谷と呼ばれる 2 流域が設定されており、南北に隣接している。流域面積は北谷 17.274ha、南谷 22.611ha である。両流域とも 1937 年から観測が開始された。

降水量・流出量データは関西支場防災研究室・岡山試験地 (1979)、阿部・谷 (1985) および谷・阿部 (1987) から採った。

#### 北谷流域

原植生は 100~120 年生アカマツの天然林であった。観測開始時点では、北谷を対照流域として南谷に伐採施業を行なう計画であったが、1940 年頃に松くい虫が発生し、被害が甚大となったため、両谷においてアカマツが皆伐された。北谷では 1945 ~ 1947 年に伐採が行なわれた。その後、1962, 1964 年に溪岸の再生林木が伐採除去されたが、規模は小さかった (計 0.8ha)。それ以降は放置された。

以上の植生変化を踏まえ予備解析したところ、虫害前の森林期間と虫害期間で回帰直線に差が認められなかったため、結果として期間を次のように区分した。

1. 1937-1944 森林・虫害期間
2. 1945-1954 伐採影響期間
3. 1955-1982 放置期間

年降水量と年流出量の散布図を図-3.19 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.11 に示した。

図-3.19 を見ると、各期間の点の分布域は異なっており、植生の変化にしたがって年流出量が増加したことがわかる。森林・虫害期間から伐採・影響期間にかけては点の分布域が上側に移動しており、伐採によって年流出量が増加したことが示されている。一方伐採・影響期間から放置期間にかけては点の分布域が下方に移動しており、植生の回復によって年流出量が減少したことを示している。

3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

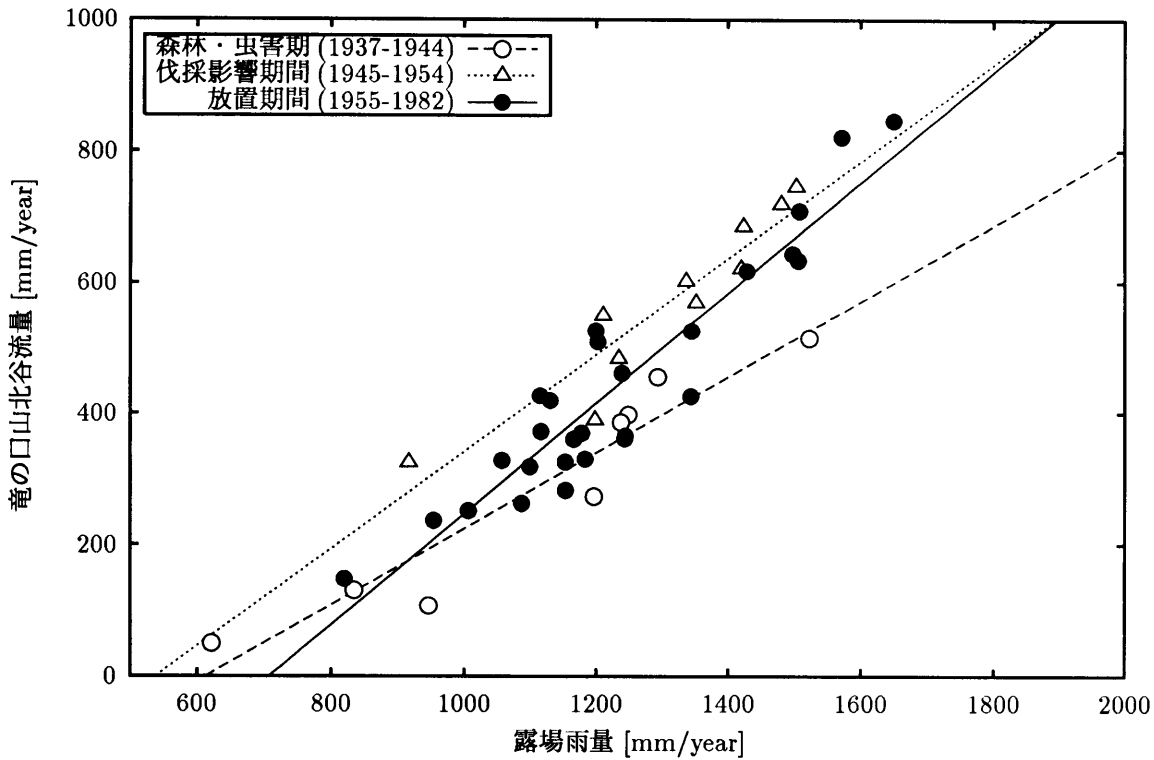


図 3.19: 竜の口山北谷流域における伐採と火事の影響

表 3.12: 森林伐採による年流出量の変化 (竜の口山南谷) [mm/year]

期間	状態	$a$	$b$	$a$ の変化		$b$ の変化	
1. 1937-1943	森林・虫害期間	0.543**	-333.4				
2. 1944-1953	伐採・影響期間	0.710**	-444.4	0.167	$p = 0.23$	89.9	$p = 0.02^*$
3. 1954-1958	ヒノキ植栽	0.901**	-663.6	0.191	$p = 0.28$	8.7	$p = 0.78$
4. 1959-1968	山火事・植林	1.039**	-831.3	0.138	$p = 0.54$	-0.7	$p = 0.98$
5. 1969-1979	放置	0.656**	-432.2	-0.383	$p = 0.04$		
6. 1980-1984	虫害期間	0.995*	-725.9	0.339	$p = 0.10$	118.1	$p = 0.02^*$

表-3.11 をもとに回帰直線の変化を見る。まず森林・虫害期間から伐採・影響期間にかけて、係数  $a$  が大きくなったが有意な変化ではなかった。係数  $b$  は 1% 水準で有意に増加した。伐採・影響期間から放置期間にかけて係数  $a$  は大きくなったが有意な変化ではなかった。係数  $b$  は 1% 水準で有意に減少した。

係数  $b$  の変化は植生の変化に対応している。すなわち、伐採によって  $b$  は増加し、放置に植生回復によって  $b$  は減少している。一方、係数  $a$  は伐採および放置ともに増加の傾向を示し、植生変化との対応が一定していなかった。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の変化

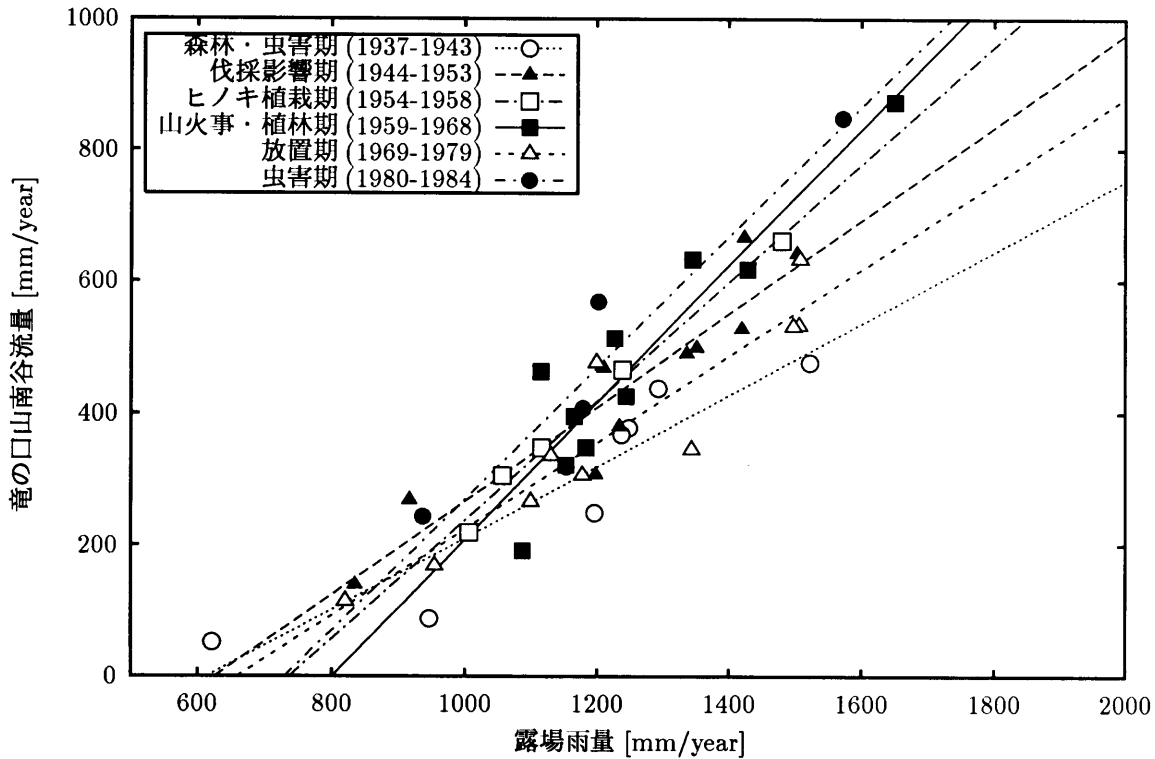


図 3.20: 竜の口山南谷流域における伐採と火事の影響

#### 南谷流域

原植生は 100～120 年生アカマツの天然林であった。観測開始時点では、北谷を対照流域として南谷に伐採施業を行なう計画であったが、1940 年頃に松くい虫が発生し、被害が甚大となったため、両谷において 1944～1947 年にアカマツを皆伐した。南谷においては 1944～1945 年に皆伐が行なわれた。その後 1953 年まで放置され、ササや低木類が繁茂した。1954～1957 年、ヒノキの植栽が行なわれた。1959 年 9 月、隣接流域から山火事が延焼し、南谷全域の植生が消失した（北谷は被害を免れた）。1960 年、南谷のほぼ全域にクロマツが植栽され、1962 年まで下刈が行なわれた。それ以降は放置され、1974 年に山火事で部分的に類焼被害を受けたが、大半は順調に生長した。1970 年代の後半から松くい虫被害が起こり始めたが、1974～1977 年の 4 年間は薬剤の散布により被害は広がらなかった。しかしその後は被害が拡大し、1980 年夏に流域全域のクロマツがすべて枯損した。

以上の植生変化から、期間を次のように区分した。

1. 1937-1943 森林・虫害期間
2. 1944-1953 伐採影響期間
3. 1954-1958 ヒノキ植栽期間
4. 1959-1968 山火事・植林期間

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.13: 森林伐採による年流出量の変化 (去川 2 号沢) [mm/year]

期間	状態	$a$	$b$	$a$ の変化		$b$ の変化	
1. 1967-1981	無処理	0.896**	-791.0	-0.114	$p = 0.62$	-39.1	$p = 0.65$
2. 1982-1986	部分皆伐	0.782*	-491.7				

5. 1969-1979 放置期間

6. 1980-1984 虫害期間

年降水量と年流出量の散布図を図-3.20 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.12 に示した。

図-3.20 において各期間の点の分布について見ると、点が中央付近に密集しており、分布域の変化が判然としない。図-3.20 から植生の変化による年流出量の変化について論じるのは難しい。

一方、表-3.12 において各期間の回帰直線について見ると、連続する 2 期間の間で係数  $a$  に有意な変化が見られたのは山火事・植林期間から放置期間にかけてのみであった。この期間の植生変化は山火事後に植林した植生が生長していくという回復傾向の変化であったが、それに対して係数  $a$  は 5% 水準で有意に減少した。一方、それ以外の期間の植生変化はすべて、伐採・植栽施業・虫害枯損という植生減少方向の変化であったが、その植生変化に対して係数  $a$  は、有意性は検出されなかったものの、傾向としては値が大きくなる変化を見せた。このことから、竜の口山南谷流域において、植生の変化に対応して係数  $a$  は変化した、と言えるだろう。

係数  $b$  は、森林・虫害期間から伐採・影響期間にかけて 5% 水準で有意な増加が見られた。伐採・影響期間からヒノキ植栽期間にかけて、およびヒノキ植栽期間から山火事・植林期間にかけては係数  $b$  はほぼ変化無しであった。また放置期間から虫害期間にかけては 5% 水準で増加が見られた。このことから、係数  $b$  は植生量の減増に対応して増減した、と言える。

#### 3.3.4.6 去川試験地 (2 号沢)

去川森林理水試験地は宮崎県東諸県郡高岡町、北緯 31°51′、東経 131°13′ に位置する試験地である。流域の標高は 200 ~ 370 m の範囲にあり、平均年降水量は約 3000 mm、年平均気温は 12.9 °C である。

試験地には 3 つの試験流域が設置されており、I 号沢 ~ III 号沢と呼ばれている。流域面積はそれぞれ 6.556, 9.174, 8.181 ha である。

観測は 1959 年に開始された。観測開始時点での植生は、I, II 号沢は樹齢約 45 年のシイ・カシを上層木とする常緑広葉樹林で、両流域の林相に大差はなかった。III 号沢流域は約 50 年生のスギを主林木とする針広混交林で、スギと広葉樹の混交割合は面積比でほぼ 1:1 であった。

その後、I 号沢の照葉樹林は 1965 年 7 月 ~ 1966 年 5 月に、III 号沢の針広混交林は 1965 年 7 月 ~ 1966 年 7 月にそれぞれ皆伐処理が行なわれ、I 号沢にはヒノキ、III 号沢にはヒノキ・スギが、1967 年 2 月 ~ 3 月に植栽された。さらにその後、II 号沢において 1982 年 5 月 ~ 7 月に沢筋を中心に 3.97ha (流域全体の 43%) について部分皆伐が行なわれた。

年降水量・年流出量データは九州支場防災研究室 (1982) および竹下ら (1996) から取った。データの公表期間が 1967 ~ 1986 年であるので、I 号沢および III 号沢の伐採試験は期間外である。したがってここでは II 号沢で行なわれた伐採試験について解析する。

前述した植生の変化から、解析期間を次のように区分した。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の変化

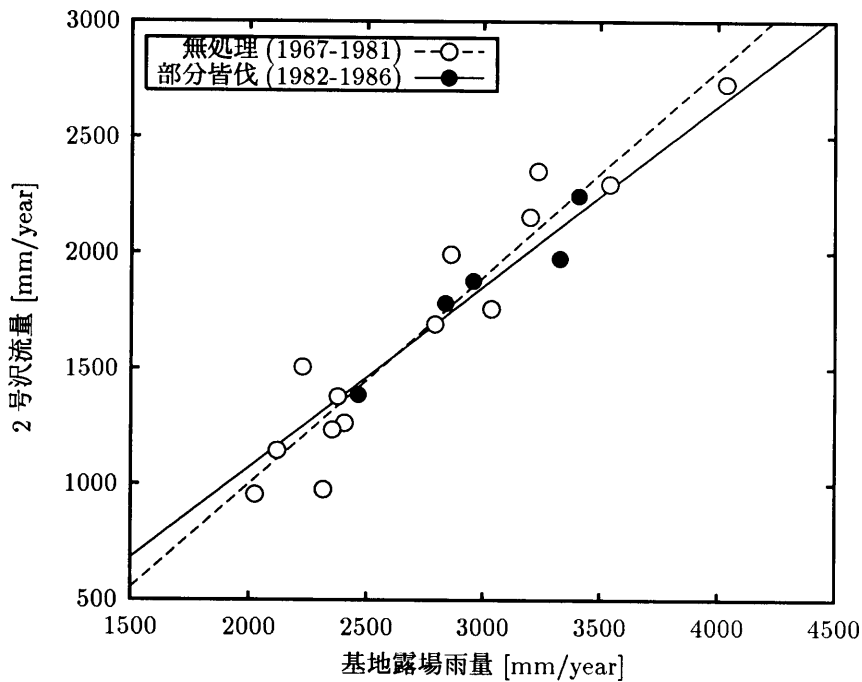


図 3.21: 去川 2 号沢流域における伐採の影響

1. 1967-1981 森林期間
2. 1982-1986 部分皆伐期間

年降水量と年流出量の散布図を図-3.21 に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.13 に示した。

図-3.21 を見ると、森林期間と部分皆伐期間とでは点の分布の違いが見られなかった。部分皆伐期間の 5 点のうち 4 点までもが森林期間の回帰直線の上に乗っており、残り 1 点の変動は森林期間の点の変動の範囲内にある。

表-3.13 から両期間の回帰直線を比較すると、2 直線の間には有意な違いは認められなかった。傾向としては、係数  $a$ 、係数  $b$  ともに減少の方向に変化した。この変化は、部分皆伐期間の 5 点のうち森林期間の回帰直線上に乗っていない 1 点が引っ張ったために起こったものであると考えられる。したがって、部分皆伐による植生の変化と回帰直線の変化が対応しているとまでは言えないと思われる。

以上のことから、去川 II 号沢においては、部分皆伐は年降水量と年流出量の関係を変化させなかったものと思われる。

#### 3.3.5 考察 2・伐採による係数 $a$ の変化について

以上、複数の流域について、伐採等の植生改変と年降水量・年流出量の回帰直線の変化との対応を解析した。ここで係数  $a$  の変化の結果を一覧にまとめると表-3.14 のようになる。

変化の不明瞭であった去川 II 号沢を除くと、解析対象とした流域のすべてにおいて、伐採などの植生改変によって係数  $a$  の増加の傾向が見られた。そのうち上川北谷と上川二の沢では係数  $a$  の変化に有意性が検出されたが、それ以外の流域では変化は有意ではなかった。



### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

表 3.14: 植生変化による係数  $a$  の変化

	植生改変過程	植生回復過程
増加	上川北谷 **      上川南谷 上川二の沢 *      釜淵 2 号沢 常陸太田          竜の口山北谷 竜の口山南谷	竜の口山北谷
変化不明確	去川 II 号沢	釜淵 2 号沢
減少		宝川本流、竜の口山南谷 *

森林伐採に伴う係数  $a$  の変化について、先行研究としては次に挙げるものがある。

勝見 (1956) は上川南谷について、1940～1953 水年のデータを用い、択伐前後の回帰直線の変化を解析している。係数  $a$  は伐採前が 0.704 であったが、伐採後には 1.105 へと増加した。勝見はこの変化を伐採の影響によるものとしている。

永見ら (1964) は宝川初沢流域において行なわれた 50% 択伐施業の前後で解析をしている。ただし、解析の対象は年降水量・年流出量ではなく、溪流に融雪水の影響がなくなった暖候期間 (8 月～10 月) の降水量・流出量である。降水量は基地露場および流域内の数箇所で観測した降水量をもとに流域平均降水量を推定している。また、各年の解析期間の初日と末日とで流域貯留量の差  $\Delta S$  が極小となるように初日および末日を決定した。

さて宝川初沢流域の植生であるが、原植生はブナを主とする天然林であった。観測が開始された 1938 年から 1947 年まではまったく伐採は行なわれず原生林の状態が保たれた。1948 年から流域全域にわたる 50% 択伐施業が始められ、1953 年に伐採搬出などの作業が完全に終了した。

1938～1947 年を伐採前期間、1949～1960 年を伐採後期間として係数  $a$  を求めたところ、択伐前は 0.734 であったが、択伐後には 1.002 となり、択伐によって係数  $a$  が増加したと永見らは結論している。

白井ら (1954) は竜の口山北谷・南谷流域を対象に、虫害発生を受けて行なわれた伐採施業の前後で回帰直線を求めている。それによると、伐採前 (1937～1943 年) には北谷・南谷の回帰直線はほぼ同じであったが、伐採後 (1946～1951 年) には北谷のみに係数  $a$  の増加が見られ、南谷の係数  $a$  は伐採前と同じであった。北谷と南谷とで伐採前後の回帰直線の変化が異なる原因について、白井らは、両流域の傾斜・面積の差の影響であろうと推測している。

白井ら (1954) の解析結果に対して、本節の解析では竜の口山北谷・南谷両流域ともに伐採によって係数  $a$  が増加する傾向が見えた。白井ら (1954) と本節とで解析結果が異なる原因は、解析の対象期間が異なること (白井ら (1954) は伐採後期間を 1946～1951 年としたのに対して、本節では 1944～1953 年とした)、および使用したデータの数値が異なることによると思われる。

以上の先行研究を踏まえて本節の解析を位置付けるならば、本節では先行研究の解析結果を再確認したことに加え、これまで各流域ごとに行なわれてきた解析を複数流域に広げることによって結果の一般性を示すことができたと言えよう。

すなわち、伐採などによる森林の植生量減少は、一般的に、年降水量と年流出量の回帰直線における係数  $a$  を増加させる傾向がある、と結論付けられる。このことから、袋山沢流域において森林伐採によって起こった係数  $a$  の増加は、袋山沢流域特有の現象ではなく、森林流域の一般的な現象であることが示された。

ではここで、伐採などによる植生量減少によって係数  $a$  が増加する原因について考察を加える。

### 3.3. 伐採による年降水量と年流出量の関係の変化

係数  $a$  の増加は、流出量の年増加量と年降水量との間に相関関係があるということを意味している。伐採による年流出量の増加量が年降水量の多寡に依存していることは、Bosch and Hewlett(1982) や中野ら (1963)・中野 (1971) によって既に指摘されている。特に Bosch and Hewlett(1982) は世界各地から集めた対照流域法の伐採実験結果をサマライズしたものであり、年増加量の年降水量依存性は森林伐採における一般的性質であると言っているものと思われる。しかし、Bosch and Hewlett(1982) は現象を指摘するだけにとどまり、年増加量が年降水量に依存する原因については触れていない。

一方中野ら (1963) は、伐採などによる流出量の増加の原因として、植生量減少による蒸発散量の低下と、伐採搬出の施業によって生ずる地表面攪乱による直接流出量の増加の 2 点を挙げた上で、水年流出量の増加は主に後者が原因であるとしている。この見解に従えば、仮に攪乱地表面への降雨は浸透せずすべて直接流出するとした場合、攪乱された地表面の面積率を  $d$ 、年降水量を  $P$  とすると、年流出量は  $dP$  増加することになり、年増加量の年降水量依存性が説明できる。しかし、袋山沢流域においては、伐採搬出施業による地表面攪乱は微小であったにもかかわらず、やはり同様の依存性が見られたことを考えると、中野ら (1963) の見解は受け入れ難い。

年流出量の変化を降雨イベント単位の流出量変化から説明している研究もある。

白井ら (1954) は、竜の口山試験地を対象に、雨量散布度と年流出量の関係を調べている。その結果、雨量散布度と年流出量とは相関関係があり、相関の度合は伐採後により顕著になることがわかった。白井らは、雨量散布度と年流出量の相関関係を、年流出量は大降雨による出水に影響されるからだとして解釈しているが、この解釈に従えば、相関の度合が伐採後により顕著になるということは、年流出量の増加量は大降雨に影響されているということの意味しよう。

中野ら (1963) は、釜淵試験地の伐採事例の解析において、年流出量の増加量のばらつきは大降雨（一連続雨量 30 mm 以上）の回数に影響されていると述べている。また中野 (1971) は、一降雨の増水量（直接流出量）の増加量は連続雨量に依存していることを示し、大降雨ほど伐採による流出量増加が大きいことを明らかにした。

白井ら (1954)、中野ら (1963) および中野 (1971) から、年流出量の増加量の年降水量依存性は、それぞれの降雨イベントにおける増水量（直接流出量）の増加量が一連続降水量に依存していることに由来すると推測できる。しかし、白井ら (1954)、中野ら (1963) および中野 (1971) は、その原因については言及していない。

他には、年水収支の観点から、蒸発散項の変化として年流出量の変化を説明する立場がある。

谷・阿部 (1985) は、伐採によって蒸発散量が低下し、土壌水分が豊富になることによって、直接流出・基底流出問わず、流出量が増加する、としている。しかし、この記述では流出量の増加と降水量の多寡がどう関係するのか明らかでなく、流出増加量の降水量依存性は説明されない。

山口 (1962) は、森林流域からの流出量が、裸地・草地流域からのそれよりも少ないのは、森林の遮断蒸発量の多さが主要因であるとしている。また近藤・中園 (1993) は気象学的方法によって森林地と芝生地との蒸発散量を比較した結果、南日本においてはおおそ遮断蒸発量の分だけ森林の方が芝生地よりも蒸発散量が多いとしている。また藤枝・野口・小川 (1996) は、常陸太田流域における伐採事例の解析から、年流出量の増加は遮断量の減少によって流域に人力される水分量が多くなることが原因だとしている。

山口 (1962) および近藤・中園 (1993) に従うなら、森林伐採によって流出量が増加するのは遮断蒸発量が少なくなるからということになる。年樹冠遮断量は年降水量とほぼ比例関係にあることが知られているから、伐採によって減少した樹冠遮断量が年流出量の増加に寄与するならば、年流出量の増加量は年降水量に依存することになる。

以上のことを総合すると、伐採などの植生量減少によって係数  $a$  が増加する現象は、樹冠遮断

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

が減少するからである、と理解するのが妥当であると思われる。この点については、後に、次章、次々章の解析を加えてさらに考察を進めることにする。

## 3.4 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

### 3.4.1 目的と方法

前節においては、年降水量  $P$  と年流出量  $Q$  との関係に注目し、回帰式 (3.1) を用いて伐採の影響の解析を行ってきた。

本節では、近接する2つの流域の年流出量の関係に注目し、一方を対照流域として、もう一方の流域の年流出量変化を解析する。この解析方法は対照流域法と呼ばれるが、対照流域法は単独流域法に比べて気象の年々変動に対して頑強な解析法であり、伐採による流出量変化を調べる上ではより精確である。そこで、本節においては、伐採によって年流出量がどれだけ変化したか、変化量の定量的評価を解析の中心課題とする。

具体的には、解析の対象とするのは、伐採等の森林改変による

- 年流出量の平均増加量
- 年流出量の増加量の経年変化

である。解析手法としては回帰分析を用いる。

§3.4.2 では袋山沢流域の結果を解析し、§3.4.3 では袋山沢流域の解析結果に対して若下の考察を加える。また §3.4.4 では他流域の事例について解析を行なう。続く §3.4.5 において袋山沢流域と他流域の結果との比較をし、もって袋山沢流域の特徴を明らかにする。

以下、本節で用いる解析方法について記す。

まず初めに、対照流域法において、2つの流域の年流出量が直線関係になることを示す。

森林流域においては、一般に、年降水量  $P$  mm/year と年流出量  $Q$  mm/year は直線関係に近似できることが経験的に知られている（中野，1976）、ということは既に述べた。 $P$  と  $Q$  の関係は前出の式 (3.1) のように表される。すなわち、

$$Q = aP + b \quad (3.1)$$

いま、年降水量  $P$  が等しいふたつの流域 A, B があったとする（流域 A を対照流域としよう）。この2つの流域においてそれぞれ式 (3.1) が成り立つとすると、

$$Q_A = a_A P + b_A \quad (3.24)$$

$$Q_B = a_B P + b_B \quad (3.25)$$

から

$$Q_B = a' Q_A + b' \quad (3.26)$$

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

$$a' = \frac{a_B}{a_A}, \quad b' = -\frac{a_B}{a_A}b_A + b_B$$

が導かれる。すなわち、年降水量の等しいふたつの流域においてそれぞれ年降水量と年流出量が直線関係を示す場合、両流域の年流出量どうしの関係もまた直線関係を示すのである。

伐採前と伐採後でそれぞれ式 (3.26) が成り立つ時、伐採前後で回帰直線の違いを検定するには、式 (3.2) および式 (3.3) と同様の方法を用いることができる。§3.2.1 の記述とほぼ重複するが、検定方法を記しておく。

まずはじめに係数  $a'$  の違いを検定する。伐採前後を示すダミー変数  $t$ （伐採前: 0, 伐採後: 1）を用いて、次のモデル式を当てはめる。

$$Q_B = \alpha Q_A + \alpha' Q_A t + \beta + \beta' t \quad (3.27)$$

式 (3.27) において、伐採前後の係数  $a'$  の差は  $\alpha'$  として与えられる。この  $\alpha'$  が 0 と有意に異なれば、伐採前後の  $a'$  値に差があると言えることになる。したがって式 (3.27) において帰無仮説  $H_0: \alpha' = 0$  の検定を行なえばよい。

$\alpha'$  の検定において帰無仮説が棄却された場合は、ふたつの回帰式に差が検出されたということで、検定はそこで終了する。しかし帰無仮説が棄却されなかった場合、続いて係数  $b'$  の差の検定を行なう。

$b'$  の違いを議論するためにはふたつの回帰式において  $a'$  が等しくなければならない。傾きが異なる 2 直線に対して切片の大小を議論しても意味がないからである。そこで、 $a'$  の検定において帰無仮説  $\alpha' = 0$  が支持されたことから、式 (3.27) に  $\alpha' = 0$  を代入して次のモデル式を導く。

$$Q_B = \alpha Q_A + \beta + \beta' t \quad (3.28)$$

式 (3.28) において、伐採前後の  $b'$  の違いは  $\beta'$  として与えられる。ここで帰無仮説  $H_0: \beta' = 0$  の検定を行い、帰無仮説が棄却されれば伐採前後の  $b'$  値は有意に異なることになり、逆に帰無仮説が棄却されなかった場合は（ $a'$  値に有意な差が認められなかったことも含めると）伐採前後の回帰式には有意な違いが検出できなかったことになる。

さて、伐採による年流出量の変化量であるが、その算出法は、以上に示した回帰直線の検定の結果によって 2 つの方法を使い分けることとする。

まず、係数  $a'$  に変化が見られる場合。伐採前後でそれぞれ式 (3.26) に示された回帰直線が、

$$\text{前) } Q_B = a'_1 Q_A + b'_1 \quad (3.29)$$

$$\text{後) } Q_B = a'_2 Q_A + b'_2 \quad (3.30)$$

のように得られた時、伐採による流域 B の年流出量の変化量  $\Delta Q_B$  は、式 (3.30) から式 (3.29) を引いて

$$\Delta Q_B = (a'_2 - a'_1) Q_A + b'_2 - b'_1 \quad (3.31)$$

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

表 3.15: 袋山沢流域の年流出量の変化 [mm/year]

期間	状態	$a'$	$b'$	$a'$ の変化		$b'$ の変化	
1. 1994-1998	森林	0.9348**	0.3445	0.1597	$p = 0.23$	295.83	$p < 0.01**$
2. 2000-2002	伐採	1.094*	158.59				

となる。ここで、式 (3.31) の  $Q_A$  に、流域 A 年流出量の伐採後平均値を代入すれば、 $\Delta Q_B$  の平均値を得ることができる。

係数  $a'$  の変化が有意ではなかった場合には、もうひとつの算出法を用いる。

モデル式 (3.27) において係数  $a'$  に有意な変化が見られなかった場合、モデル式 (3.28) の適用が妥当となる。ここで、式 (3.28) とは、伐採前後の回帰直線が平行であると仮定された場合における両回帰直線間の y 軸方向の距離を検定している式である。つまり、式 (3.28) における  $\beta'$  の値がそのまま伐採前後の年流出量の変化量  $\Delta Q_B$  の平均値を意味することになる。

この方法は実質的には共分散分析と同一である。式 (3.29)、式 (3.30) に即して言えば、 $Q_A$  を共変量、 $Q_B$  を目的変量、伐採を処理水準として共分散分析を適用した場合に相当する。

年流出量の増加量の経年変化については次のように解析する。

年流出量の単年増加量は、年流出量の実測値と、伐採前の回帰直線から求めた「伐採しなかった場合の年流出量の推定値」との差を各水年ごとに算出することで求められる。この単年増加量を時系列で表示することで経年変化の検討を行なう。

単年増加量の変化を論ずるひとつの基準として、伐採前の回帰直線について、予測値の 95 % 信頼区間を求める (Reinhart, 1967)。この信頼区間は、もし伐採しなかった場合は新たな観測データの 95 % はこの区間内に含まれるであろうと期待される区間である。逆に言えば、もし伐採後のデータが信頼区間外にプロットされるのであれば、伐採によって年流出量は 5% 水準で有意に変化した、と言えることになる。

一般に、独立変数  $X$  から従属変数  $Y$  を推定する回帰直線が得られた時、新たな成員  $X'$  に対する予測値の  $(1 - \alpha)100\%$  信頼区間の上限値・下限値は次式で求められる。

$$\hat{Y} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S_r \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X' - \bar{X})^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad (3.32)$$

ただし、 $\hat{Y}$ :  $X'$  における  $Y$  の推定値、 $t_{\frac{\alpha}{2}}$ : 自由度  $n - 2$  の t 分布において上側確率が  $\alpha/2$  になる値、 $n$ : 回帰直線の算出に用いた標本数、 $S_r$ : 誤差標準偏差。

#### 3.4.2 袋山沢の結果

図-3.22 は A, B 流域の年流出量を対比して図示したものである。この図から明らかに、伐採前期間において B 流域年流出量  $Q_B$  は A 流域年流出量  $Q_A$  に対して直線関係を示しており、回帰直線を求めると

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

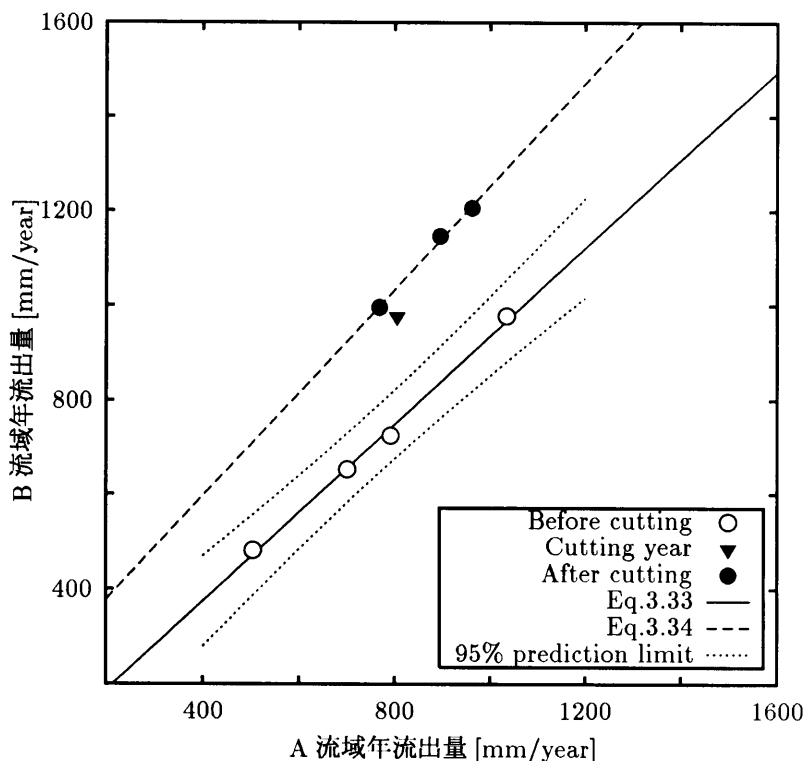


図 3.22: 袋山沢 A,B 流域の年流出量の関係

$$Q_B = 0.9348Q_A + 0.3445 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.9964) \quad (3.33)$$

が得られた。一方伐採後期間についても同様に

$$Q'_B = 1.094Q_A + 158.59 \quad (p < 0.05, R^2 = 0.9947) \quad (3.34)$$

を得た。

(3.33) 式の回帰の結果から、伐採しなかった場合に新たな観測値の 95 % が含まれると期待される信頼区間を算出し、図-3.22 に信頼区間の上限・下限を図示した。図-3.22 を見ると、伐採年、および伐採後期間のデータはこの信頼区間から上側に外れており、 $Q_B$  は伐採によって有意に増加したことがわかる。

続いて、伐採前後の回帰直線に有意な違いが見られるかどうかを調べる。まず係数  $\alpha'$  の違いを見るためにモデル式 (3.27) を当てはめると次式が得られた。

$$Q_B = 0.9348Q_a + 0.1597Q_{at} + 0.34 + 158.25t \quad (R^2 = 0.9987, p < 0.01) \quad (3.35)$$

(3.35) 式において  $\alpha' = 0.1597$  と求められた。帰無仮説  $H_0: \alpha' = 0$  の検定を行なうと  $p = 0.2308$  となる。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却されず、 $\alpha'$  は 0 と有意に異なるとは言えない。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

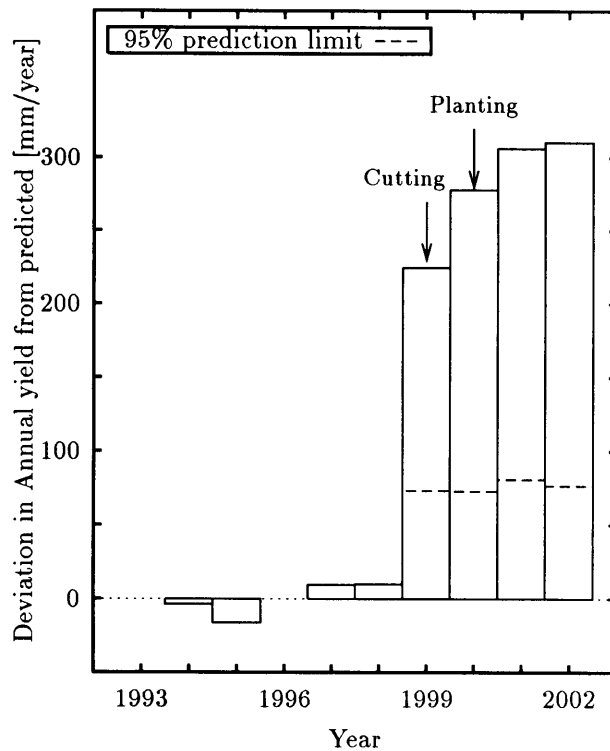


図 3.23: 伐採後の年流出量の増加量

そこで  $\alpha' = 0$  であるものとして係数  $\beta'$  の差を調べた。モデル式 (3.28) を当てはめると次式のようにになった。

$$Q_B = 0.9536Q_a - 13.92 + 295.83t \quad (R^2 = 0.9977, p < 0.01) \quad (3.36)$$

(3.36) 式において  $\beta' = 295.83$  と求められた。帰無仮説  $H_0: \beta' = 0$  の検定を行なうと  $p < 0.01$  となる。したがって帰無仮説は有意水準 5% で棄却され、 $\beta'$  は 0 と有意に異なると言えた。

以上の解析を一覧にすると表-3.15 のようになる。

係数  $\alpha'$  に有意な変化が見られなかったことから、係数  $\beta'$  の変化量を伐採による年流出量の平均変化量として扱うことができる。よって、袋山沢流域において森林伐採による年流出量の平均増加量は 295.83 mm/year であった。

続いて単年増加量とその経年変化を調べた。

図-3.23 に、 $Q_B$  の実測値と、(3.33) 式から得られた  $Q_B$  の推定値との差を時系列で示した。伐採前期間の値は (3.33) 式を求めた時の回帰残差であり、伐採年以降の値は伐採による  $Q_B$  の増加量の推定値を意味する。また伐採年以降のグラフには図-3.22 に示した信頼区間の上限値を描き入れた。図-3.23 によると、伐採によって  $Q_B$  は 200 mm/year 以上の増加を示した。水年の途中で伐採実施が行なわれた伐採年を除外して伐採後期間のみで見ると約 277 ~ 310 mm/year の増加となり、3 年間の平均では 298.0 mm/year の増加であった。

また時系列的な変化をみると、 $Q_B$  の単年増加量は伐採してから年々大きくなる傾向を示した。

続いて、単年増加量を年降水量に対してプロットした散布図を図-3.24 に示した。単年増加量は年降水量の多寡と連動しており、回帰直線を求めると

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

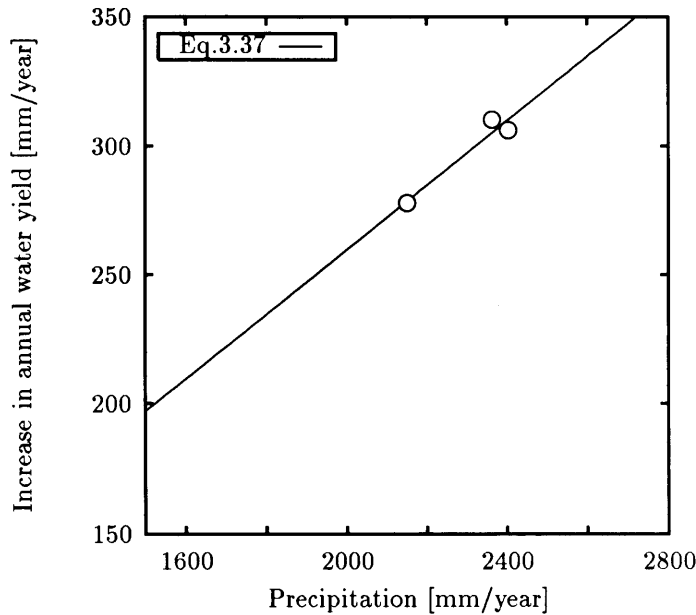


図 3.24: 年降水量と伐採伐採による年流出増加量

$$\Delta Q_B = 0.1253P + 9.10 \quad (p = 0.1696, R^2 = .9307) \quad (3.37)$$

が得られた。

#### 3.4.3 考察 1・袋山沢流域の結果

本実験では森林の伐採によって年流出量が有意に増加したという結果が得られた。同様の結果は既に多くの先行研究によって報告されており、本実験は既往の研究結果を補強するものである。

増加量の大きさについて言うと、本実験で得られた平均増加量は約 300 mm/year であった。単独流域法によって数流域の伐採例を解析した中野 (1971) は、わが国の森林流域で植生を皆伐すると年流出量は 200~300 mm/year 増加すると推定しているが、本実験の数値は中野による推定値の上限にあたり、本実験の結果はわが国の他事例に対して比較的大きい増加であったと言える。中野が解析の対象とした流域には積雪地帯（釜淵、宝川）や寡雨地帯（竜ノ口山）の流域が含まれているが、当流域は積雪がなく降水量も比較的多いため、これらの気象条件の違いが増加量の差に現れているとも考えられる。

さて次に、伐採後の年流出量の経年変化について検討する。既往の類似した試験では、伐採後 1 年目に流出量の著しい変化が認められ、2 年目以降は変化量が指数関数的に急速に小さくなる事例が報告されている（たとえばカウイータ No.13 の事例。Swank, 1988）。それに対し、当流域においては逆に、伐採してから時間が経つにつれて流出量が大きくなる傾向が見られた。伐採年である



### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

表 3.16: 釜淵流域の年流出量の変化

期間	状態	$a'$	$b'$	$a'$ の変化		$b'$ の変化	
1. 1940-1947	森林（戦時除く）	0.961**	200.7				
2. 1948-1959	皆伐期	1.073**	55.5	0.113	$p = 0.09$	65.4	$p = 0.03^*$
3. 1960-1968	階段工期	1.080**	106.3	0.007	$p = 0.93$	64.8	$p = 0.016^*$
4. 1969-1982	放置期 1	0.878**	437.0	-0.202	$p = 0.33$	-89.2	$p = 0.16$
5. 1983-1993	放置期 2	0.992**	-4.6	0.114	$p = 0.62$	-207.5	$p < 0.01^{**}$
1. 1940-1947	森林（戦時除く）	0.961**	200.7				
3. 1960-1968	階段工期	1.080**	106.3	0.119	$p = 0.09$	153.7	$p < 0.01^{**}$
5. 1983-1993	放置期 2	0.992**	-4.6	-0.088	$p = 0.41$	-299.6	$p < 0.01^{**}$

1999 年は、伐採施業が水年の途中に行われたために年流出量に対する伐採の影響が比較的小さいと考えられるから、2000 年以降に比べて増加量が小さいことは当然であろう。しかし 2000 年以降だけをみても増加量は経年的に大きくなる傾向を示している。

原因のひとつとしては、年降水量の変動が挙げられる。Bosch and Hewllet(1982) は伐採による流出量の単年増加量の大小は年降水量の大小に依存すると述べているが、図-3.24 に示した通り、袋山沢流域においても（統計的に有意ではないものの）その傾向が見られる。2000 年以降の 3 年間の年降水量を見ると、2000 年がもっとも少なく、2001, 2002 年がほぼ同程度であり、単年増加量の経年変化とほぼ一致している。

ただし、細かく見ると、2001 年と 2002 年は単年増加量と年降水量の大小が逆になっており、年降水量の変動によって単年増加量の変動のすべてが説明できていない。他に考えられる原因としては、次のようなことが考えられるであろう。

伐採後も土壌が健全に保持された場合、森林伐採によって流出量が増加するのは植生量の減少によって蒸発散量が減少するからであると考えられる（塚本・城戸, 1985）。本実験においては伐採後に幼樹が植栽されたため、植栽樹の生長に伴い蒸発散量が経年変化したものと思われる。蒸発散項のうち樹冠遮断と蒸散は植生の生長とともに増加するが、地表面蒸発は逆に樹冠による被覆が増えることで減少するであろう。前者の増加に比べて後者の減少が優勢であった場合、植栽樹が生長するにしたがって蒸発散量は減少し、流出量は増加するということが起こる。以上の仮説は現時点では検証することができないが、今後の研究に期待したい。

#### 3.4.4 他流域の結果

ここでは、森林改変による年流出量の変化を対照流域法によって解析可能な試験流域として、釜淵 2 号沢、竜の口山南谷、去川 2 号沢各流域を取り上げる。

##### 3.4.4.1 釜淵試験地

試験地の位置・気象・植生等は先述したので省略する。

釜淵試験地では、1 号沢を対照流域とし、2 号沢に対して皆伐処理や階段工などが施された。植

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

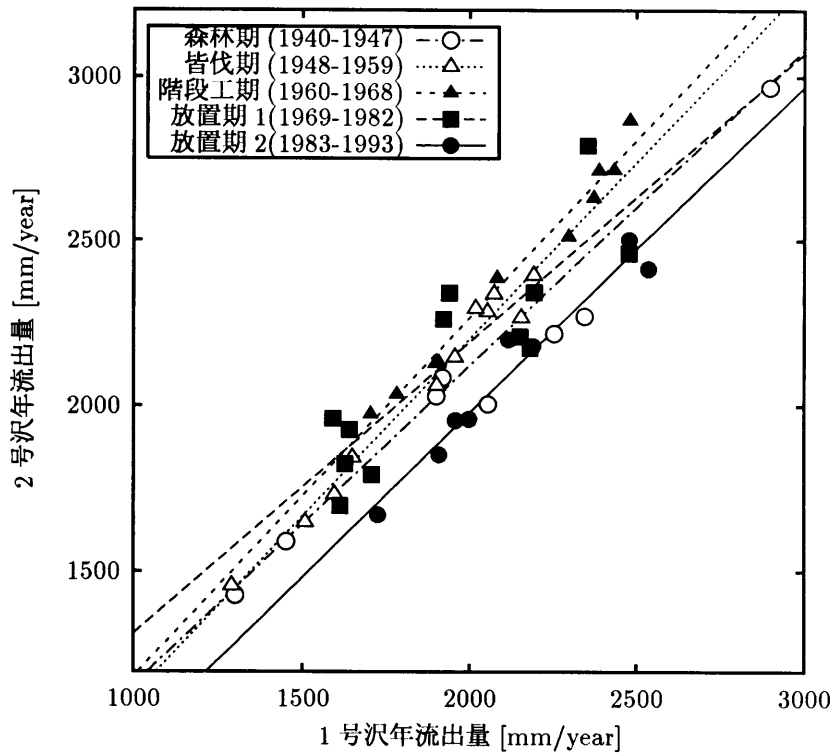


図 3.25: 釜淵 2 号沢流域における伐採等の影響

生の変遷を考慮し、以下のように期間を区分するのが妥当と思われた。

1. 1940-1947 森林期間
2. 1948-1959 皆伐期間
3. 1960-1968 階段工期間
4. 1969-1982 放置期間 1
5. 1983-1993 放置期間 2

1,2号沢流域の年流出量の散布図を図-3.25に、各期間の回帰直線とその変化を表-3.16に示した。

図-3.25を見ると、植生の変化に合わせて点の分布が移動していることがわかる。森林期間から階段工期間にかけては、期間が進むにつれて点の分布が上側に移動している。すなわち、2号沢の植生の改変につれて2号沢の年流出量は増加した。一方、階段工期間から以降は、期間が進むにつれて点の分布は下側に移動して行った。すなわち、2号沢の植生の回復につれて2号沢の年流出量は減少した。

森林期間と放置期間2を比べると、放置期間2の方が回帰直線が下側に位置している。つまり2号沢の年流出量は植生の回復によって当初の森林状態の時よりも少なくなった。この減少は、原植生が広葉樹天然林であり、放置期間2はスギ人工林という、両期間の樹種の違いによるものとも考えられる。

次に、植生の変化に伴う回帰直線の変化について論ずるが、その前に、森林期間の回帰直線の取り方について検討したい。図-3.26に森林期間(1940-1947)のデータを抜き出してプロットした。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

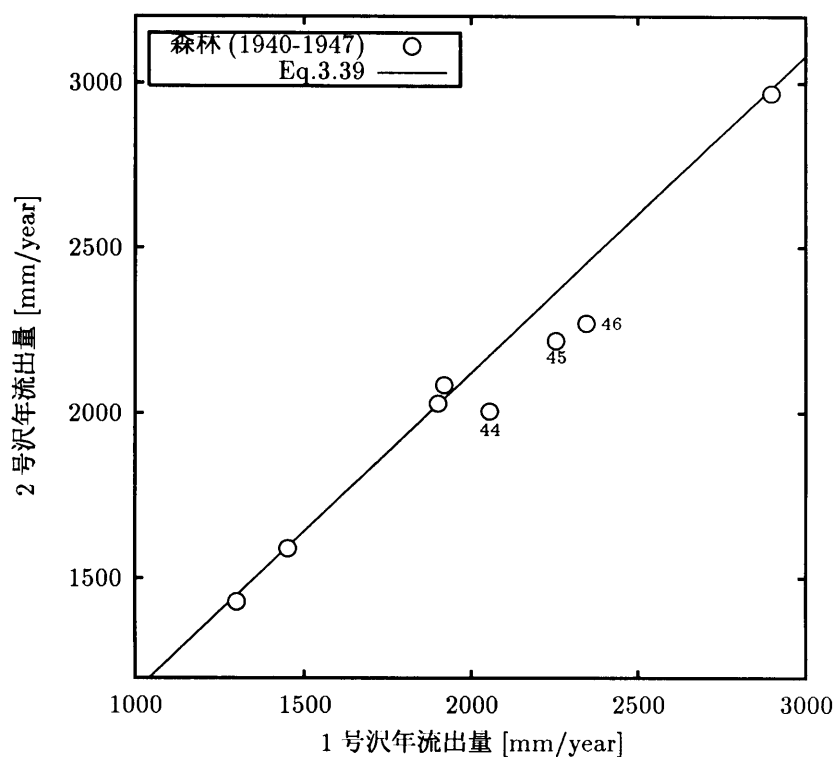


図 3.26: 森林期間における 2 流域の流出量

図-3.26 において、点の分布は全体的には直線状になっているが、8 水年のうち 3 水年のデータは他の水年に比べて下側に位置していることがわかる。下側に位置する 3 点の水年は 1944～1946 水年である（図中に 44～46 として示した）。つまり、太平洋戦争末期および敗戦直後のデータのみ他の 5 水年のデータと異なる傾向を示している訳である。

釜淵試験地において本論文とほぼ同様の解析を行なった中野 (1971) は、1940～1947 水年の全水年を用いて基準期間の回帰直線を求めている。用いたデータおよび回帰した期間ともに本論文と同じであるが、中野は 1944～1946 水年のデータに関して特に言及しておらず、考慮の末に全水年を用いたのか、それともこの点について特に注意を払わなかったのか、判断がつかない。

また加えて、細田・村上 (2002) もやはり 1940～1947 水年の全年を基準期間と定めている。細田・村上 (2002) は降水量・流出量の水年値を再集計しているため、得られた回帰式は中野 (1971) のものと若干異なるが、違いはごく僅かである。

これに対して、本論文では、1944～1946 水年のデータは戦争の影響によりデータの信頼性が低いものと判断して、森林期間の回帰には用いないこととした。参考のために、全水年で求めた回帰式と、1944～1946 水年を除いた 5 水年で求めた回帰式を記載しておく。全水年の回帰式 (3.38) は中野 (1971) のものと同一である。

$$\text{全水年) } Q_2 = 0.904Q_1 + 252.8 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.97) \quad (3.38)$$

$$\text{戦時除) } Q_2 = 0.961Q_1 + 200.7 \quad (p < 0.01, R^2 > 0.99) \quad (3.39)$$

なお表-3.16 には既に後者の (3.39) 式を載せてある。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

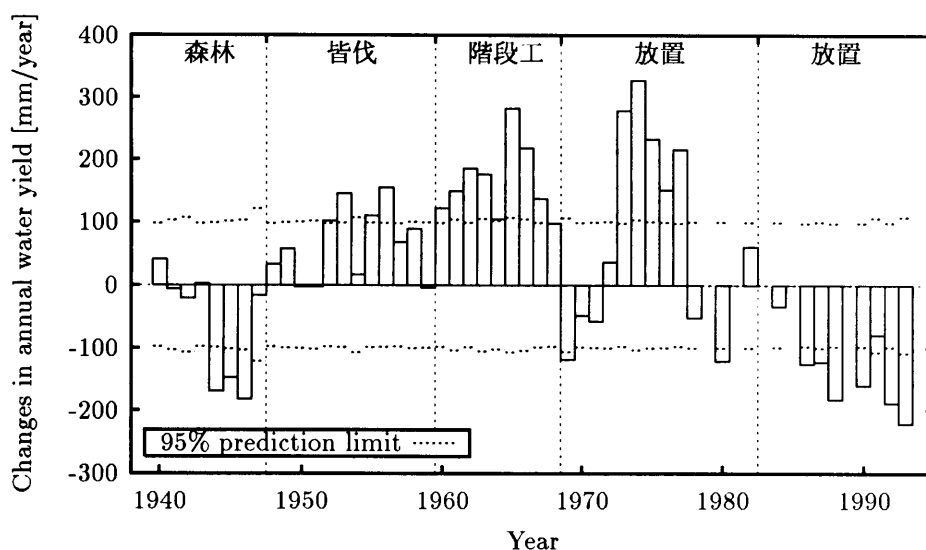


図 3.27: 釜淵 2 号沢流域における伐採による年流出量の増加量の経年変化

さて、表-3.16 上段において、回帰直線の変化を見ると、係数  $a'$  には全期間を通じて有意な変化は検出されなかった。一方、係数  $b'$  には、階段工期間～放置期間 1 の間には有意な変化が見られなかったが、それ以外は変化に有意性が検出された。有意性が検出されなかった階段工期間～放置期間 1 は、放置期間 1 の点の分布にばらつきが大きかった（決定係数  $R^2 = 0.75$ ）ことが有意性検定に影響したと思われる。  $b'$  の変化の絶対値だけを見ると、値自体は皆伐期間～階段工期間よりも大きい。

係数  $a'$  に有意な変化が見られなかったことから、植生の変化にともなう年流出量の変化量には係数  $b'$  の変化量をあてることができる。さてその係数  $b'$  の変化であるが、森林状態から皆伐、階段工と流域に改変が加わるごとに  $b'$  が正方向に変化していった。一方、階段工後に放置した間は逆に  $b'$  が負方向に変化していった。すなわち  $b'$  の変化の方向と流域の植生状態の変化は対応している。

年流出量の平均変化量は、天然林の皆伐によって 65.4 mm/year の増加、さらに階段工施工によって 64.8 mm/year の増加であった。2 つの変化を合わせ、森林期間と階段工期間との間で係数  $b'$  の変化を調べると（表-3.16 下段）、増加幅は 153.7 mm/year であった。一方回復過程においては、階段工期間から放置期間 1 にかけて 89.2 mm/year の減少、放置期間 1 から放置期間 2 にかけてはさらに 207.5 mm/year の減少が見られた。2 つの変化を合わせ、階段工期間と放置期間 2 との間で係数  $b'$  の変化を調べると、表-3.16 下段に示した通り、299.6 mm/year の減少であった。

改変過程の増加幅 153.7 mm/year と回復過程の減少幅 299.6 mm/year とを比べると、後者の方が約 150 mm/year 絶対値が大きいが、これは先述した通り、原植生の広葉樹天然林と階段工後のスギ人工林との植生の差に起因するものと思われる。

続いて、年流出量の変化量の経年変化について調べた。変化量とは、2 号沢流域の年流出量の実測値から、1 号沢流域の年流出量を (3.39) 式に代入して得られる「当初の森林状態が維持されたとした場合の 2 号沢流域の年流出量の推定値」を引いて得られる値である。図-3.27 に変化量の経年変化を示した。

図-3.27 によると、まず森林期間において流出量が 200 mm/year 程度少なくなる年が 3 水年あ

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

るが、これは先述した戦争末期・敗戦直後の1944～1946水年である。他の5水年の変化量は0の近辺に分布している。

続く皆伐期間は、12水年中3水年がわずかに負の変化を示しているものの、大半が正方向に変化していることがわかる。すなわち、森林皆伐によって2号沢流域の年流出量が増加した。その量は水年によってまちまちであり、ほとんど0に近い水年から、最大では150 mm/year程度の増加を示す水年もある。変化量に経年的な変化は見られない。特に、伐採直後に変化量が大きく、時間が経つにつれて伐採前の状態に近付いて行くという変化は図-3.27からは読み取れない。この期間、2号沢流域では下刈や火入れなどの施業が行なわれており、継続的に植生が改変されていることが、経年的なトレンドが見られないことの原因のひとつであろう。

続く階段工期間は、9水年すべてが正方向の変化を示した。変化量は約100～300 mm/yearである。経年的なトレンドは見られない。

続く放置期間1は、負の変化を示す水年と正の変化を示す水年が混じっている。まず1969-1971水年は変化がマイナスで、続く1972水年は値がプラスであるが1973水年以降に比べて量が小さい。1969-1972水年とその前後とでは変化の傾向が異なっていることは明らかである。東北支場山形試験地(1980)には、2号沢流域において1969、1970年に切盛階段工がそれぞれ1ヶ所施工されたが、1973年に施工部所が崩落した、と記載されている。この記載を念頭に置けば、1969-1972水年の挙動は切盛階段工の影響であるとも考えられるが、工事の規模は明らかでなく、流域の年流出量を100 mm/yearあるいはそれ以上の規模で変化させるに十分な改変であったのか、判断がつかない。

1973-1977水年の間は変化がプラスで、1974水年には全期間を通じて最大の変化が現れている。しかし1978～1982水年になると値が再び小さくなり、0を中心に負値と正値がどちらも出現している。結局、放置期間1(1969～1982水年)全体としては、4.5水年ごとに値の傾向が急変しており、特定の傾向を見出しがたい。

続く放置期間2は、全水年がマイナスの値を示している。植生の回復にともない2号沢の流出量が減少したためであると考えられる。変化量がマイナス値であるということは、伐採前の状態に戻ったのではなく、伐採前よりも年流出量が少なくなったことを示しているが、これは伐採前(広葉樹林)と階段工後(針葉樹林)で植生の樹種が異なることが原因として考えられる。また時間の経過とともに値が小さくなって行く傾向が見られる。Kendallの順位相関係数を用いてトレンドの有意性を調べると、1983水年からの年数と変化量との相関係数は $r = -0.57$ 、 $r$ の有意性は $p = 0.06$ と求められ、5%水準で有意とはならなかった。

以上のことを要約すると、皆伐期間および階段工期間には流出量が増加したが、増加量にはトレンドが見られなかった。放置期間1には流出量の変化は一定ではなかった。放置期間2には流出量は減少し、有意ではなかったが負のトレンドが見られた。

続いて、年流出量の変化量を年降水量に対してプロットした散布図を図-3.28に示した。

図-3.28によると、皆伐期間および階段工期間の変化量は年降水量の多寡に連動しているように見える。両期間で回帰直線を求めると、

$$\text{皆伐) } \Delta Q = 0.106P - 191.3 \quad (p = 0.05, R^2 = 0.33) \quad (3.40)$$

$$\text{階段工) } \Delta Q = 0.155P - 230.2 \quad (p = 0.04, R^2 = 0.47) \quad (3.41)$$

が得られる。両式ともに決定係数は高くなく、回帰直線の当てはめはあまり良くないが、傾きの有意性については階段工期間が5%水準で有意であり、皆伐期間は $p$ 値が5%をわずかに上回ったものの低い値となった。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

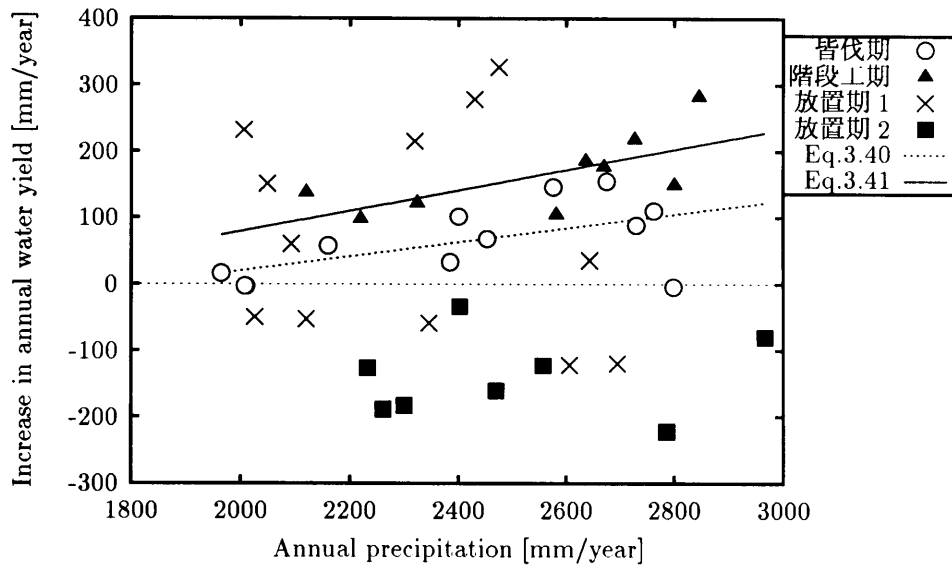


図 3.28: 釜淵 2 号沢流域における伐採による年流出量の増加量と年降水量の関係

表 3.17: 竜の口山流域の年流出量の変化

期間	状態	$a'$	$b'$	$a'$ の変化		$b'$ の変化	
1. 1937-1940	森林健全期	0.950**	-5.1	-0.014	$p = 0.89$	-0.9	$p = 0.96$
2. 1941-1947	虫害伐採期	0.937**	-2.3	0.011	$p = 0.91$	-58.1	$p < 0.01^{**}$
3. 1948-1953	放置期 1	0.947**	-66.1	-0.004	$p = 0.96$	61.7	$p < 0.01^{**}$
4. 1954-1958	南谷桧植栽	0.943**	-2.3	0.060	$p = 0.62$	62.6	$p < 0.01^{**}$
5. 1959-1967	南谷山火	1.004**	33.5	-0.086	$p = 0.27$	-109.7	$p < 0.01^{**}$
6. 1968-1979	放置期 2	0.918**	-37.1	0.060	$p = 0.32$	120.2	$p < 0.01^{**}$
7. 1980-1982	南谷虫害期	0.978*	52.9				

放置期間 1 の点は大きくばらついており、特定の傾向を見出すことができなかった。放置期間 2 は変化量と年降水量との間に相関関係は見られなかった。

#### 3.4.4.2 竜の口山

試験地の位置・気象・植生等は先述したので省略する。

植生の変遷を考慮した結果、以下のように期間を区分するのが妥当と思われた。

1. 1937-1940 森林健全期
2. 1941-1947 虫害伐採期
3. 1948-1953 放置期 1
4. 1954-1958 南谷桧植栽期

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

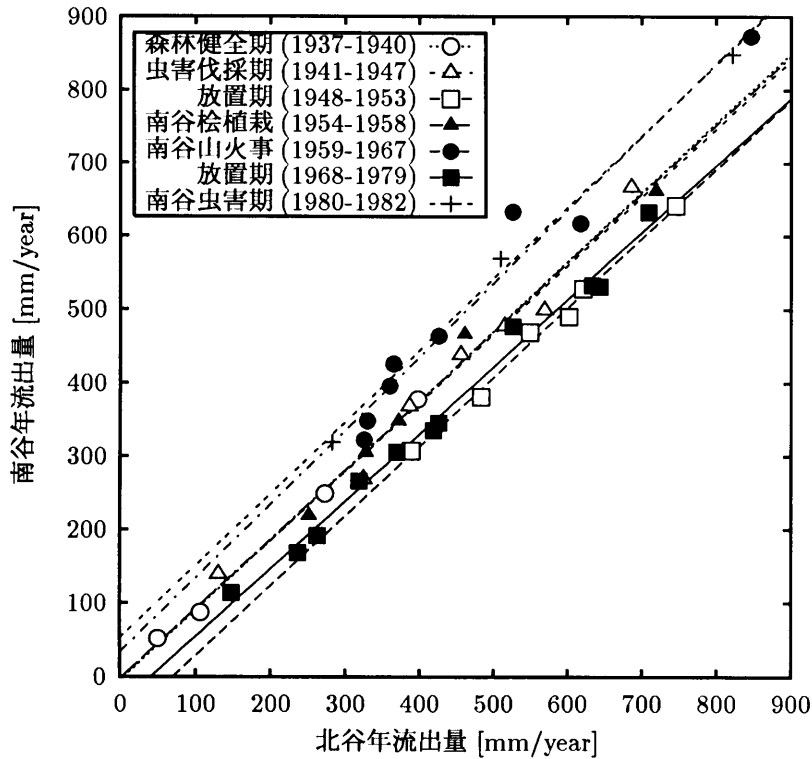


図 3.29: 竜の口山流域における伐採と火事の影響

5. 1959-1967 南谷山火期
6. 1968-1979 放置期 2
7. 1980-1982 南谷虫害期

このうち、1940年代の虫害による伐採は北谷・南谷両流域に対して行なわれたため、対照流域法として扱えるのは南谷松植栽期（1954年）以降である。

まず始めに、北谷・南谷両流域の年流出量の散布図を図-3.29に示した。図-3.29を見ると、植生の変化に合わせて点の分布が移動していることがわかる。森林期間の分布を基準にすると、虫害期間・南谷松植栽期間は森林期間と分布が重なっており、南谷山火事期間および南谷虫害期間は森林期間よりも分布域が上側で、放置期間1および放置期間2は森林期間よりも下側に点が分布している。各期間の回帰直線を図中に示してあるが、7本の回帰直線は今述べた3グループに分類されようである。

次に、植生の変化にともなう回帰直線の変化であるが、各期間の回帰直線とその変化を表-3.17に示した。表-3.17からわかる通り、各期間の回帰直線の傾き  $a$  はどれも値が近く、係数  $a'$  には全期間を通じて有意性が検出されなかった。実際、図-3.29において、各回帰直線は互いにほぼ平行の関係にあることが見て取れる。一方、 $b'$  は、森林期間と虫害期間の間では値がほぼ0であったが、それ以外の変化には1%水準で有意性が検出された。虫害期間～放置期間1～南谷松植栽期間～南谷山火事期間の各変化においては、 $b'$  の絶対値はどれも60前後の値を示した。南谷山火事期間～放置期間2～南谷虫害期間の各変化においては、 $b'$  の絶対値はともに100を超えた。全期間を通じて最大の値を取ったのは放置期間2～南谷虫害期間の変化で、その値は120.2であった。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

係数  $a'$  に有意性が見られなかったことから、植生の変化にともなう年流出量の変化量には係数  $b'$  の値を当てることができる。まず森林期間～虫害期間～放置期間 1 にかけては、北谷・南谷両流域ともに虫害被害が発生した被害木の伐採が行なわれたため、両流域の植生に大差はなかったと考えられる。しかし、この期間の  $b'$  の値を見ると、森林期間～虫害期間はほぼ 0 で両流域の年流出量に差は見られないが、両流域が伐採された後の虫害期間～放置期間 1 では約 -60、すなわち北谷に比べて南谷の年流出量が 60 mm/year ほど少なくなり、この変化は 1% 水準で有意な変化であった。森林伐採は一般的に年流出量の増加を惹起することを考慮すると、両流域ともに被害木の伐採によって年流出量が増加したものの、南谷の増加量に比べて北谷の増加量が約 60 mm/year 多かった、と理解するのが妥当であろう。両流域で増加量が異なった原因についてははっきりとはわからないが、植生に大差がなかったとするならば、両流域の流出特性の差異が原因であるということになる。白井ら (1954) は両流域の年流出量変化の差異について、北谷の方が面積が小さく平均傾斜が大きいことを原因として挙げている。

次に、主に南谷流域のみに施業が行なわれた 1954 年以降の変化を見る。放置期間 1～南谷松植栽期間は  $b'$  は 61.7 の値を取り、この値は 1% 水準で有意であった。南谷にヒノキを植栽するに際して地ごしらえや下刈が行なわれたことによって地表面の改変や植生量の減少が起り、南谷年流出量が増加したと思われる。あるいはこれに加えて北谷の植生の回復による北谷流量の減少が起ったとも考えられる。

南谷松植栽期間～南谷山火事期間では  $b'$  は 62.8 の値を取り、この値は 1% 水準で有意であった。すなわち、1959 年の山火事によって南谷流域の年流出量は約 60 mm/year 増加した。

南谷山火事期間～放置期間 2 では  $b'$  は -111.2 の値を取り、この値は 1% 水準で有意であった。すなわち、南谷において植生が回復すると年流出量は減少し、減少量の平均値は約 110 mm/year であった。

放置期間 2～南谷虫害期間では  $b'$  は 120.2 の値を取り、この値は 1% 水準で有意なものであった。すなわち、南谷においてクロマツ林が松くい虫の被害を受けて枯死したことにより、年流出量は増加し、増加量の平均値は約 120 mm/year であった。

さて、竜の口山試験地において、伐採等の植生変化によって年流出量がどれだけ変化したかを算定しよう。それにはまず基準となるべき期間をいつに定めるかが問題となる。基準期間の候補としては、森林期間と、北谷の植生が虫害被害から回復したと思われる放置期間 2 とがある。しかし、図-3.29 において両者を比べると、両期間の回帰直線には違いが見られ、放置期間 2 の方が下側に来ている。両期間の回帰直線に違いが見られる原因としては、北谷・南谷両流域の植生の樹種構成が異なることが考えられる。当初の森林期間においては、両流域ともにアカマツ天然林が成立しており、両流域の植生に差はなかった。しかし放置期間 2 においては、北谷は虫害によって伐採が行なわれたのちに放置され、アカマツと広葉樹の混交林が成立していた。一方南谷は山火事後にクロマツが植栽され、針葉樹人工林となっていた。つまり放置期間 2 の植生は両流域で異なっていたのである。

しかしながら、当初のアカマツ天然林は虫害によって北谷・南谷両流域ともに伐採されたため、森林期間を基準期間として使用することはできない。結局、放置期間 2 を基準として南谷山火事期間および南谷虫害期間の年流出量の変化を算出するのが妥当と思われる。

表-3.17 より、南谷山火事期間と放置期間 2 で  $b'$  は -111.2 の値を取る。すなわち、南谷流域において、山火事後にクロマツ林が成立したことにより年流出量は 111.2 mm/year 減少した。また、放置期間 2 と南谷虫害期間とでは  $b'$  は 120.2 であることから、クロマツ林が虫害により枯死したことにより年流出量は 120.2 mm/year 増加した。クロマツ林の成立と枯死とで年流出量にほぼ同量の変化が生じていることが注目される。



### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

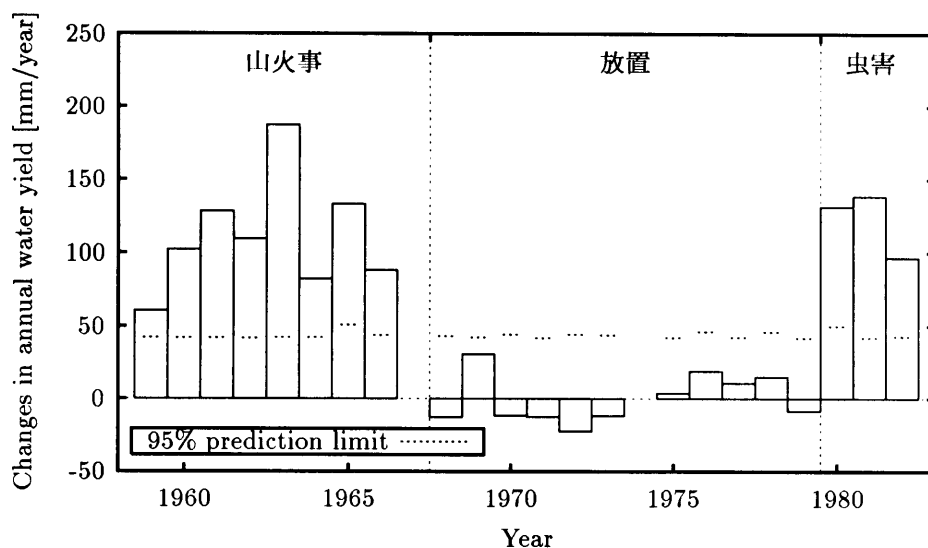


図 3.30: 竜の口試験地における伐採による年流出量の増加量の経年変化

続いて、南谷山火事期間における南谷の年流出量の変化量の経年変化を調べた。ここで変化量とは、南谷山火事期間もしくは南谷虫害期間の年流出量の実測値と、森林が回復したと思われる放置期間2の回帰直線の差によって求められた値である。図-3.30 に変化量の経年変化を示した。比較対象として放置期間2の年流出量のばらつき（回帰直線の回帰残差）を併せて示した。

さて図-3.30によると、南谷山火事期間においては全ての年で変化量がプラスの値を取っている。すなわち南谷の年流出量は山火事によって増加した。しかし、その変化量に特定の経年的な変化傾向は見出せない。年の途中（9月）に山火事が発生した1959年の変化量が他の年に比べて小さいのは蓋然性があるが、1960年以降、山火事から時間が経つにつれて変化量が小さくなっていく傾向は特段見られない。

南谷虫害期間においても、全ての年で年流出量の変化量がプラスの値を取っており、植生の枯死により南谷の年流出量が増加したことが示されている。増加量の経年的な変化に着目すると、1.2年目に比べて3年目（1982年）の値が小さくなってはいるが、経年的な遞減傾向があるとまでは言えない。

続いて、南谷山火事期間および南谷虫害期間の変化量を年降水量に対してプロットしたものを図-3.31に示した。まず南谷山火事期間を見ると、点の分布は1963年以前と1964年以降とで異なっていることがわかる。年の途中で山火事が発生した1959年を除くと、1960～1963年の点は比較的上部に分布しており、他方1964～1966年の点は比較的下部に分布している。すなわち、年降水量を基準にすると、山火事後間もない時期の方が増加量が多かったことになる。その理由としては当然山火事による植生減少の影響が考えられるが、それに加えて、1960～1962年の間は毎年下刈作業が行なわれたが、1963年以降は無処理であったことも原因として考えられる。

ここで、図-3.31のプロットを、1960～1963年と1964～1966年の2期間に分けて、それぞれ回帰直線を求めると次のようになる。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

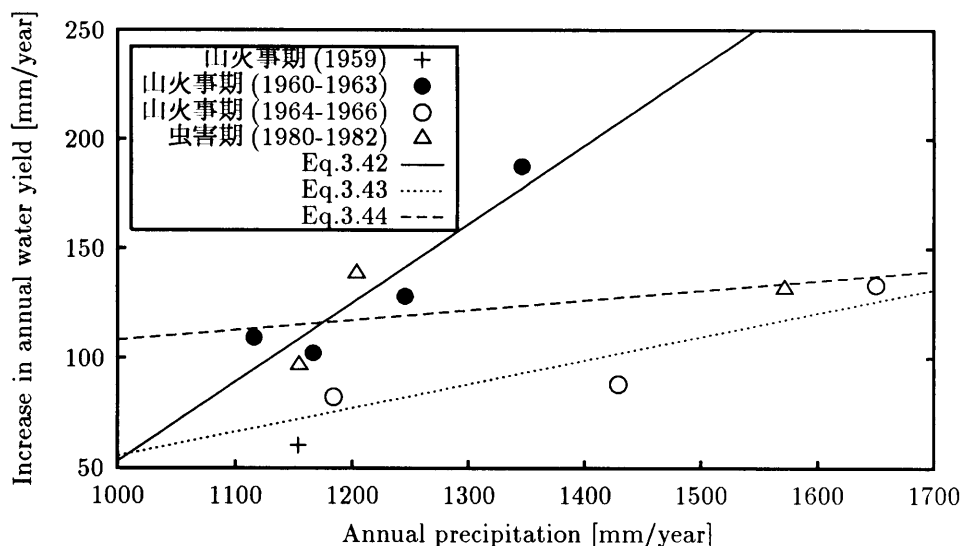


図 3.31: 竜の口山における伐採による年流出量の増加量と年降水量の関係

表 3.18: 去川 2 号沢流域の伐採前後の変化（対照 3 号沢）

期間	状態	$a'$	$b'$	$a'$ の変化	$b'$ の変化
1. 1977-1981	2 号沢伐採前	0.854**	96.3		
2. 1982-1986	伐採後	0.730**	506.0	-0.124 $p = 0.39$	187.2 $p = 0.02^*$

$$60 - 63) \quad \Delta Q = 0.360P - 306.6 \quad (p = 0.07, R^2 = 0.87) \quad (3.42)$$

$$64 - 66) \quad \Delta Q = 0.108P - 52.3 \quad (p = 0.29, R^2 = 0.81) \quad (3.43)$$

どちらの回帰式も 5% 水準で有意な回帰ではないが、傾向としては変化量は年降水量に対して正の傾きがあった。

次に南谷虫害期間の変化量であるが、点の分布を見ると、年降水量に対して特定の傾向は持っていないようである。回帰直線を求めると

$$80 - 82) \quad \Delta Q = 0.045P - 62.9 \quad (p = 0.70, R^2 = 0.21) \quad (3.44)$$

が得られるが、回帰の有意性および決定係数が悪く、有効な回帰にならなかった。

#### 3.4.4.3 去川 2 号沢流域

試験地の位置・気象・植生等は先述したので省略する。

去川試験地内には 1~3 号沢の計 3 流域が設定されている。このうち 2 号沢流域が部分皆伐が行なわれた流域である。1 号沢と 3 号沢を比べると、地形的に見てより 2 号沢に似ているのは 3 号沢

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

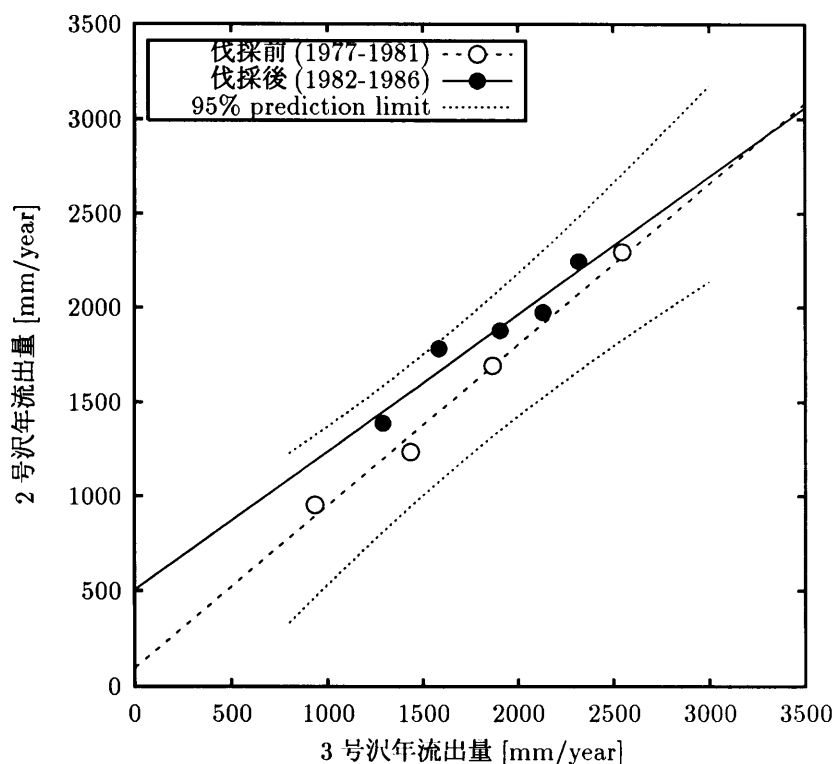


図 3.32: 去川 2 号沢流域における伐採の影響

である（九州支場防災研究室, 1982）。したがって以下では、3号沢を基準流域、2号沢を処理流域として解析を行なう。

解析期間は、2号沢流域において部分皆伐が行なわれたのは1982年であることから、1981年までを基準期間、1982年以降を処理期間とする。ただし、基準流域である3号沢は、1965～1966年に森林植生が皆伐され、1967年にヒノキ・スギが植栽された流域であり、1982年時点では植栽後15年目であった。したがって、3号沢流域の植生の生長を考慮すると、解析期間として長い期間を取ることは不適切であると考えられた。そこでここでは、解析期間を以下のようにした。

1. 1977-1981 伐採前期間
2. 1982-1986 伐採後期間

初めに、2,3号沢の年流出量を対比した散布図を図-3.32に示した。図-3.32を見ると、伐採前後で点の分布が異なっており、伐採によって2号沢流域の年流出量が増加したことがわかる。ただし伐採後の点の位置は95%信頼区間の内側にあることから、伐採による単年の増加量は統計的に有意なものではなかった。

表-3.18に各期間の回帰直線とその差を示した。伐採前後の回帰直線を比較すると、係数 $a'$ の値には有意性が見られなかったが、係数 $b'$ は5%水準で有意性が検出された。従って、伐採による年流出量の変化量として $b'$ の値を当てることができる。表-3.18より、去川2号沢において部分皆伐により年流出量は平均で187.2 mm/year増加した。

次に、2号沢流域の年流出量の単年変化量の経年変化を示したグラフを図-3.33に示した。ここで単年変化量とは、実測された2号沢流域年流出量から、3号沢流域の年流出量を伐採前期間の回

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

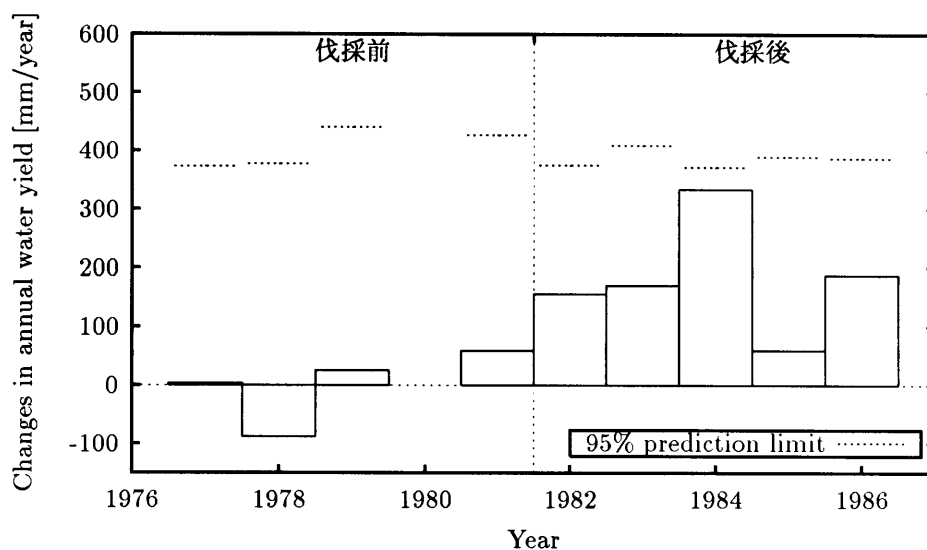


図 3.33: 去川試験地における伐採による年流出量の増加量の経年変化

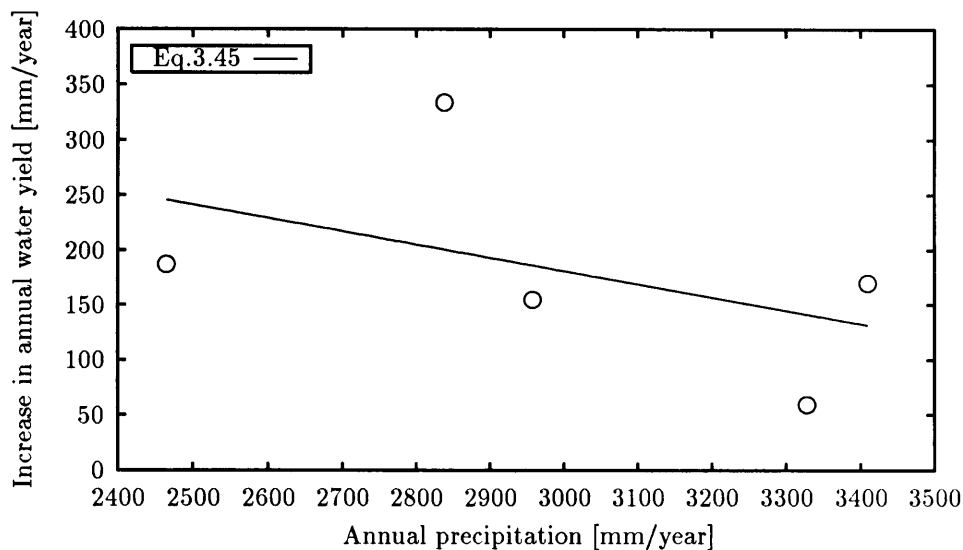


図 3.34: 去川流域における伐採による年流出量の増加量と年降水量の関係

帰式に代入して得られた「伐採しなかった場合の2号沢流域年流出量の推定値」を引いて得られたものである。図-3.33において伐採前期間のグラフは伐採前期間の回帰式の回帰残差である。

さて図-3.33を見ると、伐採後期間の単年変化量はすべて値がプラスであるものの、特定の経年的な変化傾向を見出すことはできない。

図-3.34に、単年変化量を年降水量に対してプロットしたグラフを示した。図-3.34において、単年変化量と年降水量の関係は大きくばらついており、両者の間に相関関係を見出しがたい。他の試験地での解析に倣い、回帰直線を求めると次式が得られる。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

表 3.19: 伐採等による年流出量の平均変化量 [mm/year]

流域	植生変化	平均変化量	平均降水量
袋山沢 B	針葉樹林皆伐	295.8	2305.9
釜淵 2	落葉広葉樹林皆伐	153.7	2546.7
	針葉樹林回復	-299.6	2546.7
竜の口山南谷	山火事後針葉樹林回復	-109.7	1286.2
	松くい虫被害	120.2	1309.7
去川 2	常緑広葉樹林 43% 部分皆伐	187.2	2999.8
	(100% 換算)	432.3	

$$\Delta Q = -0.1208P + 543.4519 \quad (p = 0.42, R^2 = 0.22) \quad (3.45)$$

(3.45) 式において回帰の有意性および決定係数は低く、(3.45) 式の回帰を有効と判断するには無理がある。去川 2 号沢においては、部分伐採による年流出量の単年変化量と年降水量との間には関連が見られなかったとするのが妥当であると思われる。

#### 3.4.5 考察 2・袋山沢流域と他流域との比較

以上の解析結果を踏まえ、他流域の結果と比較して袋山沢流域の伐採試験結果がどのように位置付けられるのか検討しよう。検討するべき論点は、年流出量の平均増加量、単年増加量の経年変化、および単年増加量と年降水量の関係である。

##### 3.4.5.1 伐採による年流出量の平均増加量

本節の解析によって得られた結果を表-3.19にまとめた。変化量算出の対象としたのは 4 流域 6 期間であるが、樹種に着目すると、4 期間が針葉樹林の植生変化であり、残り 2 期間のうち常緑広葉樹林と落葉広葉樹林がそれぞれ 1 期間ずつである。また植生の変化の方向、つまり伐採等の植生減少なのか植林等の植生回復なのか、については、4 期間が植生減少であり、2 期間が植生回復を対象としている。

さて各流域各期間の平均変化量であるが、変化の符号（プラスもしくはマイナス）を見ると、伐採等植生が減少した期間はすべてプラスすなわち年流出量の増加が起こり、逆に植生が回復した期間はどちらもマイナスすなわち年流出量の減少が起こったことがわかる。

伐採等の植生減少によって年流出量の増加が起こることは、既に中野 (1971) や Bosch and Hewlett (1982) などによって報告されている。本節の解析結果はそれらの先行研究の内容を再確認したことになる。一方、植栽木の生長などによる植生回復により年流出量の減少が起こることについては、蔵治 (2003) のレビューや、竜の口山試験地を対象にした藤枝・阿部 (1982) の研究などから、植生回復によって年流出量が減少するという現象は一般的な現象であると考えられる。

次に平均変化量の量的な値を検討しよう。表-3.19 に示した通り、わが国の 4 流域 6 期間において、植生変化によって年流出量は約 110 ~ 300 mm/year の範囲で変化した。ただし、去川 2 号沢

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

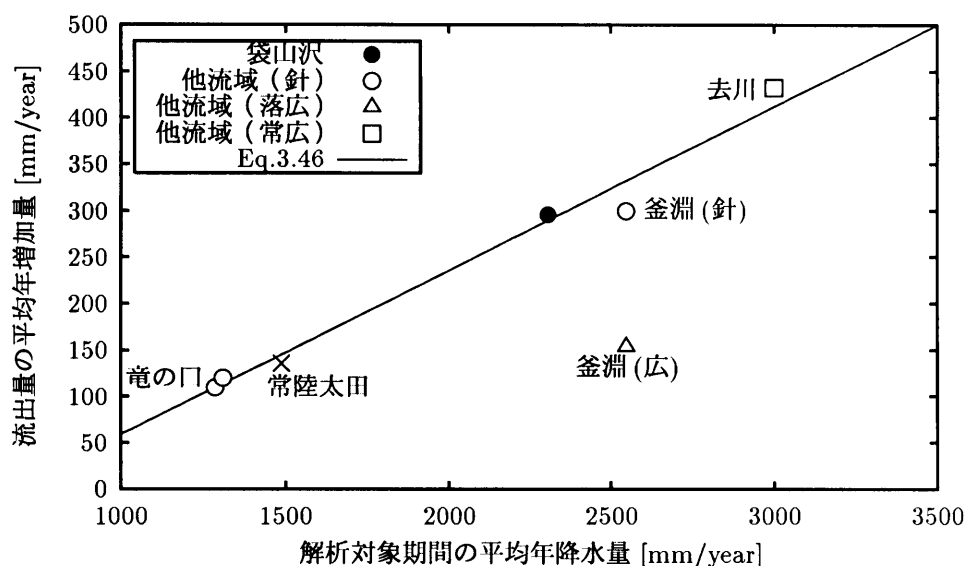


図 3.35: 伐採等による年流出量の平均増加量と平均年降水量の関係

流域において、皆伐が行なわれたのは流域の 40% 程度に過ぎない。Bosch and Hewlett(1982) は、伐採による年流出量の変化量は伐採面積率に比例するとしており、このことを考えると、去川 2 号沢の結果を他と比較するには伐採面積率 100%（すなわち皆伐）における結果を推定する必要がある。そこで表-3.19 にはその推定値を併記しておいた。この推定値を考慮すると、植生変化による年流出量の平均変化量の範囲は約 110 ~ 420 mm/year である。

国内 4 試験地 5 流域および国外 1 試験地 1 流域を対象にして、伐採による各種流出量の変化を解析した中野 (1971) は、年流出量に関して主に最大増加量（伐採後数年間の単年増加量のうち最大の値を示したものを）を議論の対象にしており、伐採後数年間の平均増加量はほとんど考慮されていない。しかし中野 (1971) で扱われている流域は本節の解析対象とした流域と重なるところが多いので、参考までに中野 (1971) の結果を引用しておく。当該論文の中で中野は、日本の場合、皆伐による年流出量の増加は 200 ~ 300 mm/year 程度であるとみてよいと論じている。これに対し、本節で解析された各流域の解析結果を見ると、中野 (1971) の解析対象でない袋山沢 B 流域および去川 2 号沢のうち、袋山沢 B 流域の最大増加量は約 310 mm/year であるから中野の言う範囲内にはほぼ入っていると言えるが、去川 2 号沢流域については、43% 部分皆伐による実増加量の最大が約 330 mm/year であるが、伐採面積率との比例性を仮定して 100% 皆伐に換算すると約 760 mm/year にもなる。去川 2 号沢流域の結果を踏まえると、中野 (1971) で提出された 300 mm/year という上限値は低すぎるのではないと思われる。

話を戻して、平均増加量の議論を続ける。Bosch and Hewlett (1982) は、伐採による年流出量の増加量は平均年降水量の大小に依存していると述べている（ただし、そこで言われている増加量が最大増加量なのか平均増加量なのかは不明である）。そこで、表-3.19 をもとに平均増加量を平均年降水量に対してプロットしたグラフが図-3.46 である。ただし、部分皆伐が行なわれた去川 2 号沢については、実変化量ではなく 100% 皆伐の場合の推定変化量をプロットした。また植生回復過程における減少は、時間的前後関係を逆に取れば植生減少による増加と見ることができるので、平均変化量の符号を無視して絶対値でプロットした。さて図-3.46 を見ると、表-3.19 に掲げた 4 流域 6 事例のうち、4 流域 5 事例は、植生減少か植生回復かを問わず、ほぼ一直線上に分布していること

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

がわかる。残り 1 事例、すなわち釜淵 2 号沢における皆伐の事例はこの直線から下側に外れている。前者の 5 事例と後者の 1 事例とで点の分布に差異がある原因は、両者の植生に相違があるためと思われる。直線状に分布している 5 事例は針葉樹林もしくは常緑広葉樹林が変化した事例であるが、他の 1 事例は落葉広葉樹林の皆伐である。おそらく植生の相違による蒸発散特性の差に起因して増加量に差が生じているのであろう。

直線状に分布している 5 事例を用いて回帰直線を求めると、

$$\Delta Q = 0.176P - 117.1 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.98) \quad (3.46)$$

が得られる。回帰の決定係数が高いことから、点の分布の直線性が強いことがわかる。直線状に分布する 5 事例のうち、袋山沢 B・竜の口南谷・去川 2 号沢の点は回帰直線の上にほぼ乗っているが、釜淵 2 号沢の針葉樹林回復の事例は他の点に比べて回帰直線から離れた位置にある。他の 3 流域は降雪・積雪がほとんどない流域であるのに対して、釜淵試験地は冬期に降雪・積雪が起こる流域であることが原因のひとつとして考えられる。

参考までに、藤枝・野口・小川(1996)から、常陸太田試験地における針葉樹林皆伐の事例を引用してみよう。常陸太田試験地では、15.7 ha の流域において、約 60 年生のヒノキ・スギ林がほぼ全面積で皆伐された。藤枝・野口・小川(1996)はこの伐採による流出の変化を水収支モデルによって解析した。森林状態を再現するモデルと伐採後状態を再現するモデルの出力を比較した結果、伐採によって年流出量が年降水量の 9.1 %（平均年降水量 1487.9 mm/year に対して 136.1 mm/year）増加したと論じている。この結果を図-3.46 にプロットしたものが図中の×点である。図から明らかなように、×点で表した常陸太田試験地の伐採事例は(3.46)式の回帰直線にほぼ乗っている。このことから、藤枝・野口・小川(1996)の結果は(3.46)式の一般性を補強するものであると言えるだろう。

さて、では、袋山沢 B 流域における伐採試験の位置付けについて考察しよう。まず、既往の研究によって明らかにされている通り、森林を伐採すると年流出量は増加するが、袋山沢 B 流域においても同様に伐採によって年流出量の増加する現象が発生した。その増加量の平均値の評価であるが、図-3.46 に示した通り、袋山沢 B 流域の平均増加量は他流域と同様に(3.46)式上に存在していることがわかる。すなわち、袋山沢 B 流域の平均増加量は、国内他流域と同様に、平均年降水量の大小によって説明できる訳である。袋山沢試験地の平均年降水量はわが国の全国平均値約 1800 mm/year（桑原, 1975）よりもやや大きい。従って伐採による年流出量の平均増加量も全国平均値よりもやや大きいものと考えられる。

#### 3.4.5.2 単年増加量の経年変化

既往の研究では、伐採後の年流出量の単年増加量は、伐採直後の方が大きく、時間が経つにつれて小さくなっていくとされる。たとえば中野(1971)は、最大増加量は少数の例外を除いて皆伐が完了した年、またはその翌年に発生しており、いわゆる伐採後第 1 年の増加量と言ってよい、と述べている。この説の根拠は、伐採したあと、時間の経過とともに植生が回復し、植生が回復するにしたがって年流出量は伐採以前の水準へと戻って行く、と考えられることにある。

しかし、§3.4.2 で見た通り、袋山沢 B 流域の皆伐試験の結果はその説に反するものであった。袋山沢 B 流域では、むしろ逆に、伐採後年数が経つにつれて増加量が大きくなっていくという現象が見られた。また §3.4.4 で扱った 3 流域 5 事例のうち 4 事例においても、伐採直後に最大の増加量が出現するという結果は得られなかった。

### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

ここで、中野(1971)における本人の解析を再考する必要があるだろう。当該論文で §VI-1-1 が増加量の経年変化を解析した箇所であるが、この部分を読むと、本人が言うほど伐採後第1年に最大増加量が生じてはいないのではないかとと思われる。例えば上川北谷および竜の口山北谷では皆伐が完了する以前に最大増加量が生じているし、また釜淵2号沢では伐採後5年目に増加量のピークが生じている。中野(1971)で解析対象とされている流域の中で、伐採後第1年目に最大増加量が生じているのは竜の口山南谷のみである。この結果は、本人の主張とは逆に、伐採後第1年目に最大増加量が生じることの方が少数例であることを示しているのではないか。

中野本人は、当該論文の §VI-1-1 において、年流出量の増加を、植生量の減少だけでなく地表面の攪乱とも関連付けて分析を加えている。特に最大増加量の発生についてはむしろ地表面攪乱の方に関連付けて論じられている。しかし、伐採施業などにおいて両者は同時に発生することもあるが、そうでないこともあろう。たとえば、地表面攪乱を抑制した施業を行なえば植生量の減少のみが起こるであろうし、また伐採後の草地に対して火入れや階段工施工などを行なえば植生量の変化をほとんど伴わずに地表面攪乱が起こることになる。そう考えると、伐採後の増加量の経年変化は伐採直後が最大で以降は次第に低減して行く、と単純には言えないことになる。

翻って袋山沢 B 流域の伐採施業について述べれば、地表面攪乱を最小限に抑えるために架線集材が用いられたのであった。さらに伐採後には植栽樹の保育のために下草刈りが行なわれ、植生量の急激な回復が妨げられたものと考えられる。以上のことから、袋山沢 B 流域では、伐採後の数年間、流域の表面状態はほぼ同一に保たれたと考えてよいだろう。袋山沢 B 流域において伐採後数年間に増加量が逡減しなかった理由は以上のように説明できるとと思われる。

#### 3.4.5.3 単年増加量と年降水量

世界各地の流域試験をサマライズした Bosch and Hewlett(1982) は、伐採などの森林消失を原因とする年流出量の単年増加量は年降水量の大小に依存している、と述べている。中野(1971) は日本の事例を解析し、わが国においてもまた同様であることを明らかにした。

ここで、比較のために、中野(1971)の解析結果を引用しておく。該当論文において原著者は、伐採跡地の植被を同じ状態に保持すると年流出量の増加量  $\Delta D$  の大小は年降水量  $P$  で決まる、とし、以下の回帰直線を提示している。

$$\text{釜淵 2(1949 - 1959)} \quad \Delta D = 0.1836P - 340 \quad (3.47)$$

$$\text{釜淵 2(1960 - 1964)} \quad \Delta D = 0.1881P - 303 \quad (3.48)$$

$$\text{竜の口山南 (1946 - 1958)} \quad \Delta D = 0.2006P - 209 \quad (3.49)$$

$$\text{竜の口山北 (1948 - 1961)} \quad \Delta D = 0.2135P - 164 \quad (3.50)$$

これらの式に対して中野(1971)は、 $P$ の係数の値が各式で大差がないことを指摘している。

翻って、本節で行なわれた解析の結果を見てみよう。



### 3.4. 伐採による年流出量の変化（対照流域法）

$$\begin{aligned} \text{袋山沢 B} \quad \Delta Q &= 0.1253P + 9.10 \\ \text{釜淵 2 (皆伐)} \quad \Delta Q &= 0.106P - 191.3 \\ \text{釜淵 2 (階段工)} \quad \Delta Q &= 0.155P - 230.2 \\ \text{竜の口山南 (60 - 63)} \quad \Delta Q &= 0.360P - 306.6 \\ \text{竜の口山南 (64 - 66)} \quad \Delta Q &= 0.108P - 52.3 \end{aligned}$$

$P$  の係数に着目すると、ひとつの例外を除き、およそ 0.1 ~ 0.15 の範囲の値を取っていることが見て取れよう。中野 (1971) の言う通り、 $P$  の係数の値は流域や時期を問わずほぼ一定値を取るようである。袋山沢 B 流域について他流域と比較して言うと、袋山沢 B 流域の  $P$  の係数は 0.1 ~ 0.15 の範囲の中に含まれており、わが国における標準的な値であると言える。

中野 (1971) の解析結果と本節の結果を比較すると、 $P$  の係数の値が異なることが注目される。中野 (1971) の回帰式では  $P$  の係数はおよそ 0.18 ~ 0.21 であるが、それに対して本節の解析ではおよそ 0.1 ~ 0.15 であり、本節の結果の方が値が小さい。このような違いが生じた原因としては、解析対象とした時期が異なることや、解析方法（単独流域法と対照流域法）の違いなどが考えられる。従って中野 (1971) の結果と本節の結果を単純に比較することはできない。さらに、回帰の精度を考えれば、両者の結果に有意な違いがあるとは言えないだろう。従ってここでは、中野 (1971) と本論文とを比較してどちらがより正確な解析であるのかは不問に伏しておくことにする。

ところで、単年増加量が年降水量の大小に依存するのはどうしてだろうか。この点については、§3.3.5 で議論したように、伐採による年流出量の増加の主原因が樹冠遮断量の減少である、と理解することによって説明できるだろう。