

花崗岩山地の2つの小流域について

——地形・植生・水収支・流出減衰曲線からみた特性——

福嶋義宏・加藤博之・松本 潔・西村武二*

The Two Small Catchments in Granite Region

——The Characteristics of Topography, Vegetation, Water Balance
and Depletion Curves of Run-off——

Yoshihiro FUKUSHIMA, Hiroyuki KATO, Kiyoshi MATSUMOTO
and Takeji NISHIMURA

目	次
要 旨	193
はじめに	194
第1章 概況	194
第2章 地形	195
1. 本流域及び試験地の概要	
2. 本流域内における試験地の地形 的位置	
3. 試験地地域内の微地形	
3-1, 河川網図・流域形 3-2, 河床	
3-3, 傾斜分布 3-4, 荒廢地と傾斜	
3-5, 斜面の方向と傾斜 3-6, 起伏 量 3-7, Hypsometric curve	
第3章 植生	208
1. 川向試験流域の植生状況	
2. 桐生試験流域の植生状況	
3. 両試験流域の植生状況について	
第4章 水収支	215
1. 水収支式各項の測定と算定	
2. 水収支表の分析	
2-1, シャ断量 2-2, 蒸発散項 e_i の修正 2-3, 流出率 2-4, 総雨量 に対する各成分の累積百分率	
第5章 流出減衰曲線	220
第6章 総括	223
引用文献	225
Résumé	226

要 旨

琵琶湖東南部の2つの山地小流域について地形・植生・水収支・減衰曲線の面から検討を加えて、次の結果を得た。

桐生・川向両試験流域は同じ粗粒花崗岩から成り、距離もたかだか数 km 以内に近接し、外部的な環境条件はほとんど変わらないと思われるが、地形的にはかなりの差異を示す。すなわち形態的には、桐生は老年期、川向は満壮年期の特徴を示している。また、この地形的な差異が植生や水循環に大きな影響を与えていると推定される。桐生流域では、森林によってほぼ閉鎖されており、 A_0 層も全面にみられ、かつ地下水の貯留機能にすぐれているが、川向では森林の生育が悪く、 A_0 層も発達していない、かつ地下水の貯留機能も劣っている。

* 高知大学農学部

はじめに

山地は雨水流出現象の生起する場であり、土砂生産源としての場でもあり、又一方、森林生態系として、樹木が存在し、物質が循環する場でもある。これらの異なる角度から見た場の概念は、実際には有機的な関連を持っており、同じ事象の別な表現にすぎないと思われる。ところが、各専門的研究からの場の把握の様式は、今だに結合したものとなっていない。

われわれは以上の点を動機として琵琶湖東南部の山地をフィールドとした。そして、各方面からの場の把握を試み、その関連を追究したいと考えている。われわれの行なった作業は、まだその緒についたばかりだといえる。しかし今後の作業に対する方向づけを得るものとして、この報告をまとめた。

1章と5章を福嶋、2章を松本、3章を加藤、4章を西村が分担し、6章は討論の上福嶋がまとめた。3章の中で、桐生については堤利夫氏の調査結果を使用した。

第1章 概 況

本研究の対象とする場は、琵琶湖東南部に位置する標高 400~600 m の比較的低い花崗岩山地である。位置図と地質図を〔図-1-1〕、〔図-1-2〕に示す。この一帯に源を発する水は、草津川を経て琵琶湖へ流れるものと、吉祥寺川、天神川を経て大戸川へ合流し、その後瀬田川へ出るもの、信楽川を経て瀬田川へ出るものに分類される。

われわれは〔図-1-1〕で大戸川より北側山地を栗太、南側を田上と呼ぶ。この一帯¹⁾は、千数百年前、一大美林であったということだが、その後、乱伐や兵火によって荒廃し、江戸時代より砂防工事が行なわれ始めた。明治以降、内務省・農商務省¹⁾²⁾・滋賀県によって治山・砂防工事は本格化した。現在、栗太では一応の回復状態にあり、治山工事は行なわれていない。それに対して、田上は以前から

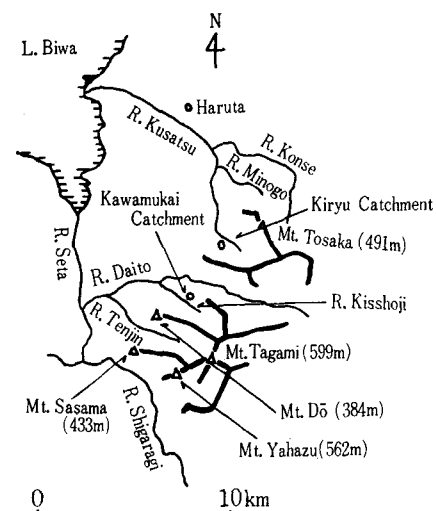


図-1-1 位置図
Fig.-1-1 Location map

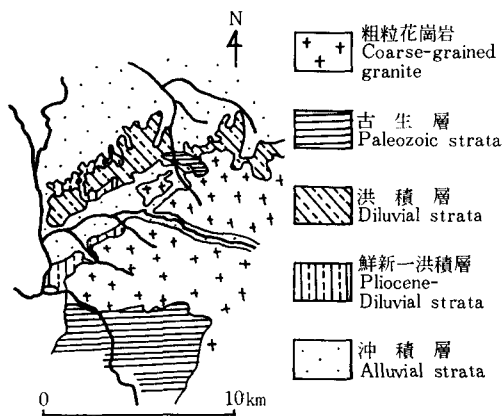


図-1-2 地質図
Fig.-1-2 Geologic character

に残る裸地と、植栽工事を施した山腹の再荒廃地化したところがあり、建設省琵琶湖工事事務所によって、工事が続けられている。

栗太・田上一帯には、明治以降の砂防工事の痕跡である、山腹階段工・石積工・谷止堰堤が数多くみられる。植生についても、人為的に搬入したと思われるマツ類・肥料木等が、程度の差はあるが見られる。

我々は 1967 年文部省科学研究費を得て、草津川上流の大津営林署管内・一丈野外五国有林内に小流域を設け、桐生試験地とした。一方、建設省はその調査の一環として 1961 年吉祥寺川流域に、川向試験地を設け、流出水量・土砂量の観測を行なっている。

今回の報告は、桐生・川向両試験流域における各種資料をもとに行なったものである。また両試験流域の対照として、気温・降雨の記録は、農林省治田観測所のものを使用した。

これら 3 地点の流域面積、位置、3 年間の平均気温、平均降雨量の値を〔表-1-1〕に示す。また月別の気温・降雨量・Thorntwaite の蒸発散位の分布を〔図-1-3〕に示す。

気温については、桐生が最も低いが、川向の値は通気性の悪い観測小屋での値であるから、もう少し桐生に近づくものと思われる。

降雨量については、夏多雨型を示し、6～9月までの期間に、年間降雨量の半分以上が降っている。降雨量の月別分布を見ても、ほとんど変わりなく、平地の治田に比べても、8

～9月の局地的なしゅう雨などで差が出る以外は、ほとんど同じである。

積雪は、1～2月に、両流域とも数回みられるが、川向では4～5日、桐生では1週間以内に消えている。

これら 3 地点の気温・降雨量を気候帯で分類すると、ケッペン³⁾の方式では温帯多雨気候地域に入り、吉良⁴⁾による植生の分類では、照葉樹林帯となる。

表-1-1 2流域と対照区の諸元
Table-1-1 Each factors at two catchments and control station

		桐 生 Kiryu	川 向 Kawamukai	治 田 Haruta
流 域 面 積 Catchment area (ha.)		5.99	2.66	—
位 置 Location	北 緯 N. latitude	34°58′	34°56′	35°02′
	東 経 E. longitude	136°00′	135°58′	135°58′
平 均 高 度 (m) Average altitude		234	202	95
1968年4月～ 1971年3月 の3年平均 Apr. 1968– Mar. 1971	気温 (°C) Average air temperature	12.2	13.7	14.1
	降水量 (mm) Annual precipitation	1792.6	1769.0	1684

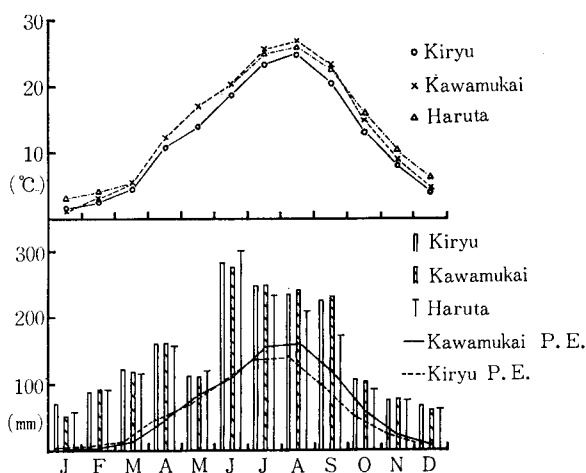


図-1-3 平均降雨量・平均気温・P.E.の月別分布
Fig.-1-3 Monthly distribution of average precipitation, average air temperature and potential evapotranspiration

第2章 地 形

1. 本流域及び試験地の概要

桐生試験地をその中に含む第3 order 流域 (1 : 1,000 地形図による) は面積 7.05ha であって、

第5 order の草津川 (971 ha) (この報告書中では美濃郷川との合流点までを指す) に直接注ぐ小流域である。草津川流域は高度 110~570 m に分布し、試験地を含む流域は 175~255 m に位置している。その中の高度 190 m の地点に量水堰は設置されており、高度 190~255 m, 流域面積 5.99 ha が今回の試験区域である。

川向試験地をその中に含む第3 order 流域は面積 3.78 ha であって、第5 order の吉祥寺川 (323 ha) に直接注ぐ小流域である。吉祥寺川流域は高度 100~550 m に分布し、試験地を含む流域は 140~230 m に位置している。その中の高度 175 m の地点に量水堰は設置されており、高度 175~

230 m, 流域面積 2.66 ha が今回の試験区域である。

地質¹⁾は両地区ともに、この辺一帯、田上山塊を構成する黒雲母花崗岩で、粗粒のものが多く、細粒のものも、斑状のものもある。主成分は正長石、石英、灰曹長石、黒雲母である。年齢は明らかではないが、約8千万年、白亜期中期のものであると推定されている。なお、草津川下流から中流にかけて沖積層、洪積層と一部古生層、吉祥寺川下流に古琵琶湖層(鮮新-洪積層)が分布しているが、今回の調査地域には含まれない。

2. 本流流域内における試験地の地形的位置

田上山塊について 250 m 方眼に

よる 1:25,000 の切峯面図²⁾〔図-2-1〕を書く、花崗岩山塊の斜面はほぼ N45°E の走向を持ち、NW 方向に傾斜している。吉祥寺川はこの傾斜方向に流れており、草津川も地質の異なる部分ではその傾斜方向へ流れているが、花崗岩の所ではやはり吉祥寺川と同様の方向に流れており、いずれも切峯面図に表われた花崗岩斜面の傾斜に従って流れている必従谷である。そして、両試験地流域は各本流によって開析された谷壁斜面に沿って流れる斜従谷である。

このように、両本流流域は同一の花崗岩斜面に同じ必従谷として発達しているにもかかわらず、その地形にはかなりの相違が見られる。その相違点について述べてみたい。

河床縦断面形は一般に一つの指数関数に近似した型で表わされるとされている³⁾が、各々の縦断面図及び高度を対数でとった〔図-2-2〕を書いてみると、高度を対数でとった図において、草津川では3本、吉祥寺川では5本の勾配の異なる直線が認められ、これはそれぞれの直線の数に応じた指数関数の組み合わせから河床が成立していることが考えられる。また、草津川の方がその直線の一本が長い。これらは草津川よりも吉祥寺川の方が小刻みな地殻構造の変化を多く受けた、または、草津川も吉祥寺川と同様の变化を受けたが何らかの原因で現在はそれが残っていないものと考えることができる。

流域の傾斜分布を 250 m 方眼による方眼法³⁾を用いて測定した結果が〔図-2-3-1〕〔図-2-3-2〕で、これによれば、草津川では上流部の流域境界附近に急傾斜部のほとんどが分布しており、開

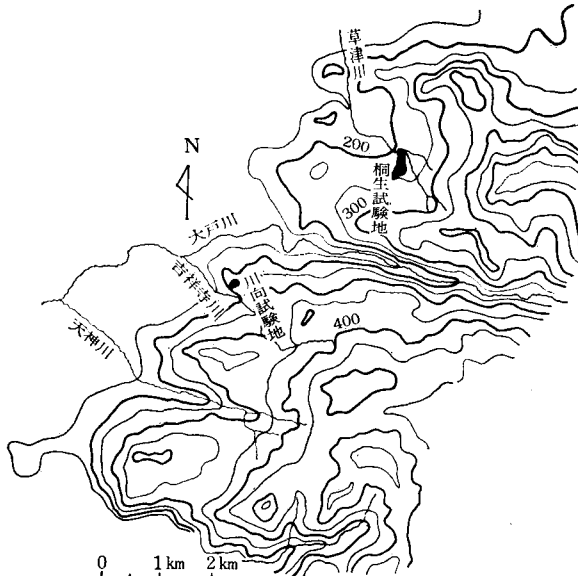


図-2-1 田上山塊切峯面図

Fig.-2-1 Summit level map of Mt. Tanakami

析された、いわゆる壮年期^註以後の標準的な型を示しているのに対して、吉祥寺川では中流部に急傾斜部があり、更にはその上流にいったん緩傾斜部が認められる。これは現在侵入しつつある最下段の谷の作用が流域上流部へは及んでいないことを示している。(註、ここで言う、壮年期、老年期という言葉は谷の現在観察できる形態的な特徴を表現する意味で使用し、必ずしも Davis 流地形学における、河食輪廻途上の、時間的な変化を含めた意味でのステージを表わすものではない。以下同様の意味で使用する。)

次に、各流域に対して河川網図

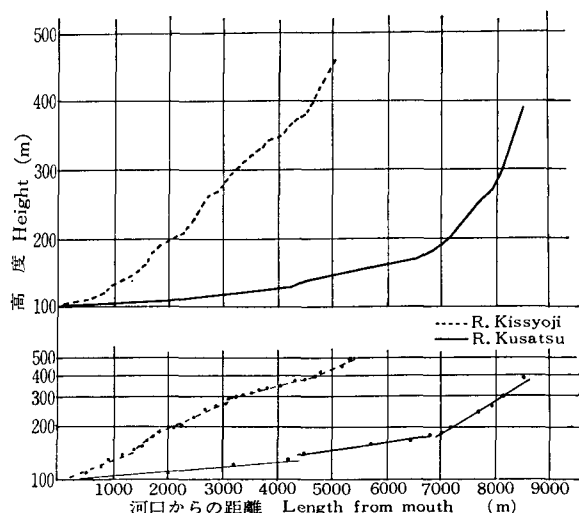


図-2-2 河床縦断面図

Fig.-2-2 Longitudinal stream profiles

(図略)を描き、order 解析、水路分布、谷密度などの測定を行なう。河川網図を描くには 1:5,000 地形図を用い、谷幅よりも谷の奥行きの大い谷を、谷として規定した。order 決定法は Strahler に従った⁴⁾。但し、草津川流域については全域にわたる 1:5,000 地形図がないため、上流の第 4

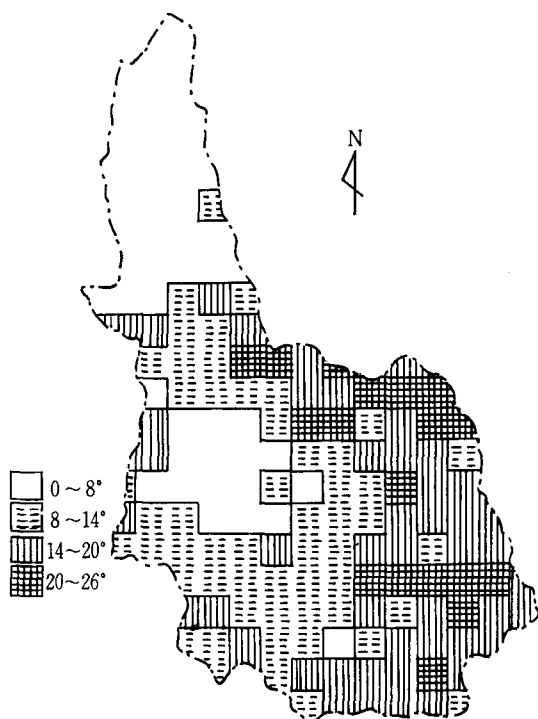


図-2-3-1 草津川流域傾斜分布図

Fig.-2-3-1 Distribution map of slope angle in the drainage basin of R. Kusatsu



図-2-3-2 吉祥寺川流域傾斜分布図

Fig.-2-3-2 Distribution map of slope angle in the drainage basin of R. Kisshoji

order の 2 流域、(草津川 A, B) 高度 190 m 以上の地域を調査の対象とした。

水路の order と水路総延長 ΣL 、平均水路長、水路数、流域面積 A 、谷密度²⁾ $Dd(Dd = \Sigma L/A)$ に関する各流域のデータは〔表-2-1〕の通りである。また、第 1 order 水路の水路長の頻度分

表-2-1-1 水路総延長
Table-2-1-1 Total stream length (m)

流域 Drainage basin	order 5	4	3	2	1	計 Total	流域面積 (ha) Basin area	谷密度 (m/m ²) Drainage density
草津川 A 流域 R. Kusatsu A		1,100	2,730	4,360	11,070	19,260	128	
草津川 B 流域 R. Kusatsu B		1,770	3,970	4,030	14,980	24,750	178	
計 (A+B) Total (A+B)		2,870	6,700	8,390	26,050	44,010	306	0.0142
吉祥寺川流域 R. Kisshoji	3,100	2,490	6,350	13,100	34,330	59,370	323	0.0184

表-2-1-2 水路数
Table-2-1-2 Stream number

流域 Drainage basin	order 5	4	3	2	1	分岐比 Bifurcation ratio
A		1	3	21	100	
B		1	7	26	123	
A+B		2	10	47	233	4.8
吉祥寺川 R. Kisshoji	1	5	20	86	408	4.5

表-2-1-3 平均水路長
Table-2-1-3 Mean stream length (m)

order	5	4	3	2	1
A		1,100	910	208	111
B		1,770	567	155	122
A+B		1,435	670	178.5	116.8
吉祥寺川 R. Kisshoji	3,100	498	318	152	84

布を描くと〔図-2-4〕のようになる。谷密度は草津川の方が小さい。第 1 order の水路長は草津川の方が吉祥寺川より平均約 30 m, 最多頻度の位置で 60 m 長い。この相違の解釈, 原因についての考察は後で行なう。

次に, percentage hypsometric curve (3-7参照) を比較する〔図-2-5〕。hypsometric integral は草津川で 31%, 吉祥寺川で 46% となり, また曲線は草津川で下に凸で一樣であるのに対して, 吉祥寺川では S 型を示している。これは, 草津川流域は老年期に近いのに対して, 吉祥寺川流域は満壮年期位であることを示している。

なお, 桐生, 川向両試験地の量水

堰より上の平均高度は hypsometric integral 法³⁾によれば各々 234, 202 m であって, 両試験地間の高度にはほとんど差はないとみなしてさしつかえない。

以上, 両本流流域について相違点を列挙してきたのであるが, 次に本流流域と各試験地流域の地形的位置関係の考察を行なってみたい。

上に述べたように, 各試験地流域は本流の侵食によって成立した谷壁面に沿って流れる斜従谷流域であるが, その合流点も本流地形との位置関係において類似した位置にある。即ち, 両流域とも本流流域口から続く堆積地域が山間に入って河床勾配が急上昇する附近 (高度を対数でとったグラフが河口から初めて屈折する附近) で合流している。これを谷幅で観察すると, 山間の谷が平野部へ出る附近で徐々に谷幅を拡げて行く附近である。また表-2-1 のデータの平均値を用いて仮想の第 3 order の流域を各本流流域について想定してみると, 両試験地ともその仮想の平均的流域から目立ったずれを示さない。多少ずれる値はあっても, その傾向は類似しており, 従って, 各試験地流域は本流流域内でも平均的な流域であるといえる。このことは, 両試験地流域

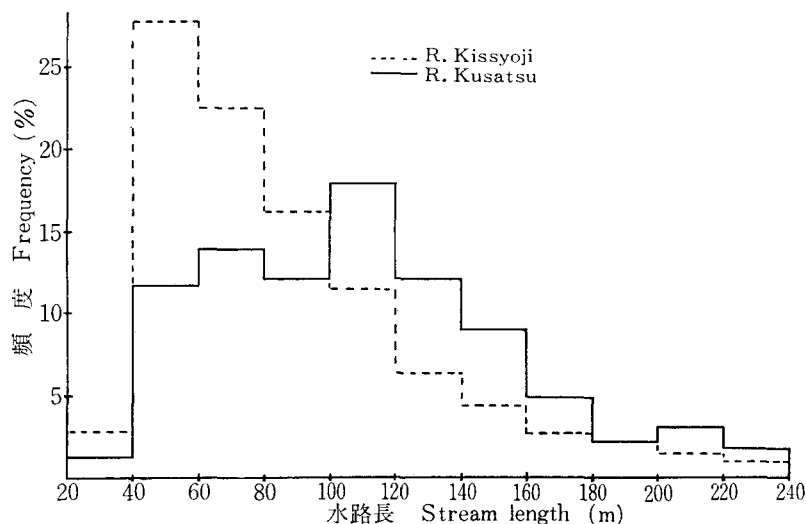


図-2-4 第1 order 水路頻度分布
Fig.-2-4 Frequency-distribution histograms of first order streams

とも本流流域に作用した各種営力の他には特に局地的な作用は受けていないということになる。これらをまとめると、両試験地流域は本流流域との関係において、地形的に類似した位置にあり、そこに局地的な特別条件は存在していない。従って、両試験地間の地形の差は本流流域の全体的な特徴によって表現できると予想することができる。どの要素が本流流域の相違に起因しているかという点についてはまだ充分明らかではないが、少なくとも切峯面から想定した流域の傾斜及びそれに対応する流域平均傾斜、河床勾配などの相違は草津川流域が老年期に近いため谷壁面が緩傾斜になっており、そのために桐生試験地の傾斜も緩傾斜であり、それに比べて、壮年期にある吉祥寺川流域内の川向試験地は急傾斜であること、及び谷密度の相違などは本流流域全体の傾向と一致していることで説明できると思われる。

草津川、吉祥寺川両流域の最も顕著な差異は、hypsothetic curveによって示されるように前者は後者に比べ、著しく開析が進んでいる点にある。この両流域は距離においてたかだか数km以内にある、きわめて近接した地域であり、外部的な環境条件の差はほとんど考えられず、しかも同一の花崗岩によって構成されており、かつその間に顕著な構造線が存在は記録されていない。従って、このような現地形の差を生じた原因を明確に指摘することは困難であるが、これについて2、3の可能性を考えることができる。

すなわち、大戸川本流がこの両地域の間を貫流していることは、ここに地質的な弱線が存在しその両側で地殻運動に何等かの差があったことが考えられる。松田・奥西が指摘しているように〔3-2参照〕大戸川より南部の田上山塊では数回にわたる地形回春の痕跡がみられるに対し、大戸川より北部に位置する草津川流域ではこのような形態は不明瞭である。従って草津川流域に

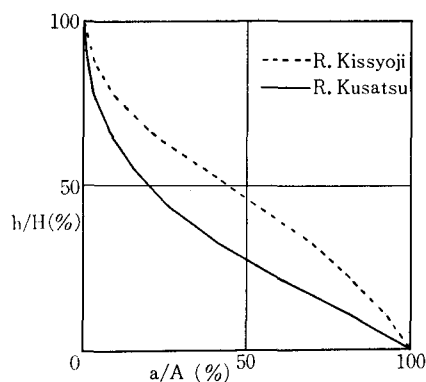


Fig.-2-5 Percentage hypsothetic curve

おいては、地形の若返りが行なわれることなく連続的に侵食が進行し、開析が一方的に行なわれたのに対し、吉祥寺川流域は数次にわたる地形の回春と漸進的な開析のため、現在比較的若いステージを示す形態をとると考えることができる。

また、現地形において吉祥寺川流域は草津川流域に比べ、より大きい谷密度を示している。その数値の差は地質的な差であると判定しうるほど大きくはないが（3-1 参照）地形発達に関連する因子についての一般的常識にしたがえば²⁾、後者は前者に比べより浸透性の大きい地域であることを示している。現地における踏査観察によれば、草津川流域は吉祥寺川流域にくらべ、深層風化がより進行し脆弱な基盤によって構成されているようにみられる。そのため前者は、水による侵食をより受けやすい素因を有し、その結果全く同様の営力を受けながら侵食は急速に進行し、いわゆる老年期に近い地形になったと考えることもできる。

さらにまた、谷の分布をみると、第 1 order の谷に最も明瞭にみられるように、吉祥寺川流域には短小な谷が多数存在し、全体的に分岐区間の単距離が短いことが指摘される。各発達の過程を考えると、支谷の出現は単一斜面が mass movement によって複合斜面に分割されてゆく過程と考えることができる。すなわち、山塊全体が比較的均等な耐侵食性（強度）を有する場合、短小な谷は発達し難く、主谷が次第にその深さと幅を増大してゆくであろうし、また多くの弱い部分が帯状あるいは点状に存在する地域においては小支溪が数多く発達するものと考えられる。このような過程を考えると、草津川流域は全般的に比較的深層までマサ状風化が発達しており、一方吉祥寺川流域は比較的強固な岩塊がブロック状に風化した地域であるとするならば、現在みられるような谷地形の差が現われると同時に山体全体の侵食に対する抵抗性の差が、開析程度の差を生じたものと説明することができるであろう。

以上列举した 3 つの可能性は単独に存在すると考えるよりは、むしろ複合して作用する場合を考慮すべきであろうが、いずれも現在までの調査ではこれを実証するに十分な資料を持たない。しかしながら、試験地における観測結果を解析し、またこの地域における土砂生産、水収支の問題を考察するためには閑却できない問題点が含まれているものと考えられる。

3. 試験地地域内の微地形

これまでの章では草津川流域における桐生試験地、吉祥寺川流域における川向試験地の地形的位置、特性などについて考察したが、この章では水文、植生などと地形の関連を検討するために、両試験地内の微地形について相違点を対比しながら、かつ、各地形解析要素が出来るだけ有機的な関連を持つよう考慮しながら考えてみたい。

3-1 河川網図、流域形

河川網図及び流域形は〔図-2-6-1〕〔図-2-6-2〕のようになる。この河川網図は 1 : 1,000 地形図より得られたもので、恒常流 (permanent channel) 及び伏流 (ephemeral channel) の水路を含んでいる。谷の認定は本流流域の場合と同様の規準で行なった。河川網図の特徴は、桐生では主流の側方から短かい支流が 4 本合流しているのに対して、川向では類似した長さの主流方向の谷が一カ所に合流している。

また、Horton の提案した流域形状係数 $F^3)$ を考える。流域平均幅を B 、面積 A 、最長水路長 L とすると、

$$F = B/L = A/L^2$$

となる。これは流域幅と河川長との比を表わすもので、流域形が方形になる程 $F=1.0$ に近くなる。桐生では $F=0.18$ 、川向では $F=0.24$ となり、両流域の面積の差を考慮しても川向の方が多

少幅の広い流域と言える。

これらのことから当然、流出量、時間に影響を与えることが予想されるが、流域面積が双方とも小さいので、降雨継続時間が長くなると、影響がほとんど現われなくなる可能性も高い。

また、水路保持の定数⁵⁾ (the constant of channel maintenance) C_m を考える。これは Schumm の提案した値で、前出の谷密度の逆数である。従って、

$$C_m = A / \sum L$$

となる。これは、単位水路当りの集水面積を表わしており、また $C_m/2$ は流域内の河床から分水界の平均距離を表わしている。桐生において、流域全体からは $C_m=55.5$ 、量水堰より上では 51.2、川向では流域全体から $C_m=40.6$ 、量水堰より上では 40.4 であり、量水堰より上の部分では河床から分水界までの平均距離は桐生の方が川向より約 1.4 倍長い。従って、桐生より川向の方が流域が細分化されていることになる。

谷密度は桐生の量水堰より上では、0.0195、川向では 0.0238 (この値が本流流域で求めた平均値と大きく異なるのは使用地図のスケールの違いに原因している) であるが、Strahler によれば⁴⁾、同質の地質の地域、例えば massive な砂岩、火成岩と変成岩、badland などでは各々類似した値を示すと述べており、この事から考えると、上の値の両流域間の相違は特に植生状態の反映とも考えられない。また、松田・奥西⁶⁾ による同じ田上山塊の露岩・壁岩地、流土地、森林の三カ所に分類調査した結果でも各々、0.0146, 0.0137, 0.0148, という値を示し、谷密度は三者とも余り変わらない、と結論しているので、谷密度が林地の荒廃度を表わす指標として利用できる可能性は少ない。

3-2 河床

河床平均勾配は桐生試験地全流域では 7° 、試験地内では $7^\circ 30'$ 、川向試験地全流域では 10° 、試験地内では 11° となり、川向の方が約 3° 急である。また、縦断形 [図-2-7] について比較しても著しい違いが見られる。即ち、桐生ではほぼ一様な形を見せているのに対して、川向では急部と緩部が交互に見られ、試験地内では高度 180~200 m の区間において 19° という急勾配を示している。そして、桐生においては河床勾配の変化と斜面の勾配は特に目立った相関関係を示してい

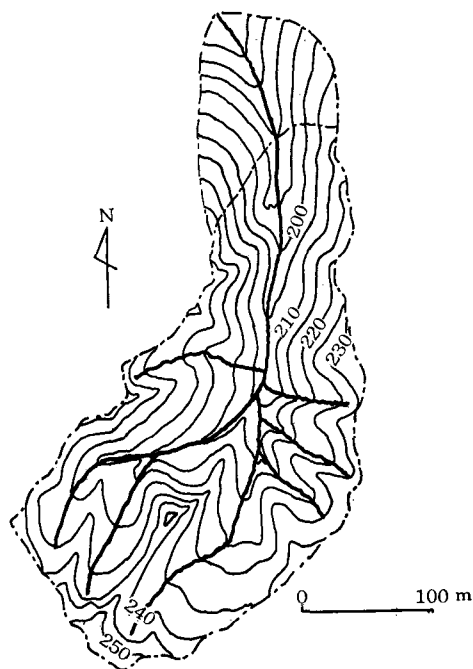


図-2-6-1 桐生試験地の河川網図
Fig.-2-6-1 Drainage network map at Kiryu catchment

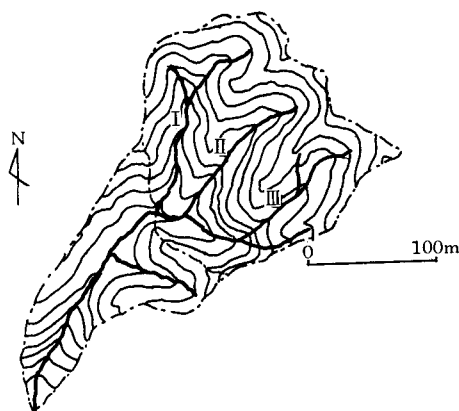


図-2-6-2 川向試験地の河川網図
Fig.-2-6-2 Drainage network map at Kawamukai catchment

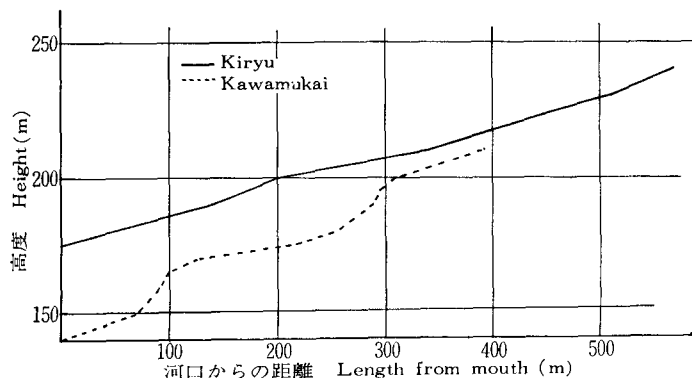


図-2-7 河床縦断面図

Fig.-2-7 Longitudinal stream profile

の未分離の原因はこのように、この高度に侵食に対する抵抗力の強い層が分布していて、そのため、侵食の進行がこの高度で一時的に止められていると考えられる。これに対して、桐生では全流域にわたって、川向よりも安定した状態（3-6、起伏量の項参照）にあるといえる。松田・奥西⁶⁾による田上山塊の地質構造の変化による多輪廻地形の解釈に基づいた研究によると、禿嶺地は地殻構造の変化によって出来た各小起伏面の山麓面、谷底面の位置関係のずれ、即ち、地形の若返り現象（回春）に密接な関連がある。そして、回春作用の結果、起伏、傾斜の増大を伴い、山地斜面の侵食が旺勢になるが、その回春形態の違いが露岩・壁岩地、流土地、森林地、の異なる景観を示す、と述べている。河床縦断面形から、桐生では一カ所、川向では三カ所の河床勾配遷移点が観察される。このような遷移点を生じた機構については早急な結論を求めることはさしひかえて、この勾配の遷移点の存在によって侵食の急速な進行が促されるという論点だけにに基づけば、遷移点の多い川向の方が桐生よりも荒廃しやすい性質を持っている、といえるであろう。

実際に河床の状態を観察すると、川向では上記の岩の露出した滝状になっている地区を除いては、多数の砂防ダムが設置されているせいもあって、1.5~4 m 位の幅で裸出したまま堆砂しており、

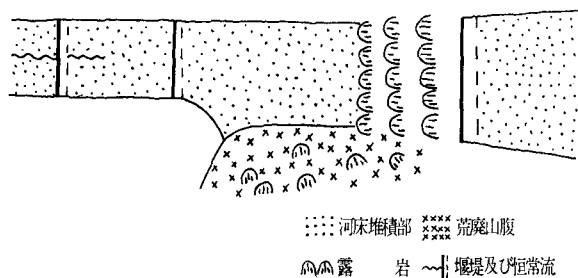


図-2-8 川向試験地河床模式図

Fig.-2-8 Model map of stream bed

大部分は伏流となっている。特に側方に荒廃山腹のある個所では、河床堆積の幅、厚さともに大きくなっていることが見られた。これは、山腹で生産された土砂は、直下の河床へいったん堆積され、流量の増加した時一時に下方に運搬されるものと考えられる。普段の状態では流水による運搬よりも、山腹からの移動土砂量の方が多いのであろう〔図-2-

8〕。一方、桐生では水路附近が裸出しているのみで、砂防ダムによる過去の堆砂地帯と思われる場所も川向よりはるかに固っており、その上には草、低木などが生育し、水ごけがあったりする。水路は恒常流である。

これら、両河床の相異は河床勾配のみでなく、流域全体の植生状態や他の地形要因にも起因していると思われる。

3-3 傾斜分布

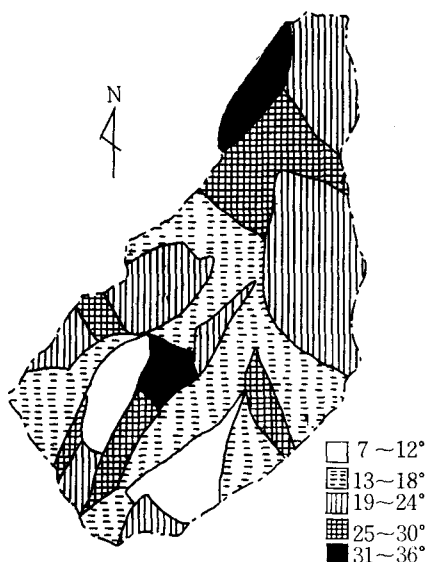


図-2-9-1 桐生試験地傾斜分布図
Fig.-2-9-1 Distribution map of slope angle
at Kiryu catchment

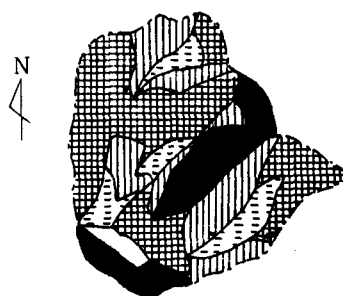


図-2-9-2 川向試験地傾斜分布図
Fig.-2-9-2 Distribution map of slope
angle at Kawamukai catch-
ment

流域内傾斜の測定は、従来大面積地域で利用されてきた寺田法、方眼法その他は、このような小流域を扱うには不適当と考えられるので、勾配の変化及び斜面の方向を目安として、桐生では 44、川向では 32 の地形区に分割して行なった。

その結果を 5 段階に分類して試験地内の分布を書くと〔図-2-9-1〕〔図-2-9-2〕。また、 2° 区分で面積による頻度分布を書くと〔図-2-10〕のようになる。〔図-2-9〕によれば、桐生では流域下流部の主流へ直接入る斜面が急勾配であり、上流部に緩傾斜部が認められる。川向では量水堰附近にわずかに緩傾斜部が見られるのみで、それ以外は全体に急斜面が分布している。〔図-2-10〕から求めた流域平均傾斜は桐生では 20.3° 、川向では 25.1° 。桐生での最多頻度は $21\sim 23^{\circ}$ 、川向では $27\sim 29^{\circ}$ となり、川向の方が平均で約 5° 急傾斜である。

ところで、川向における調査によれば、花崗岩崩壊土砂の山腹直下における堆積角は 25° 前後であることが分かった。この

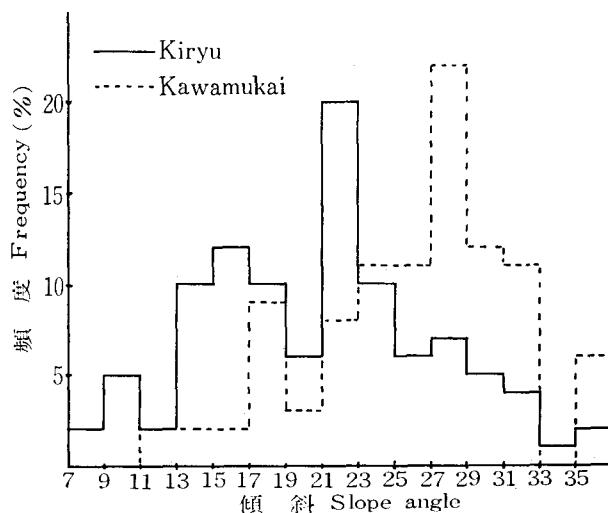


図-2-10 傾斜別頻度分布
Fig.-2-10 Frequency-distribution histograms of slope angles

角度はこの辺の花崗岩風化土の内部摩擦に起因する安息角と一応考えられるので、両流域における上記の傾斜の約 5° の相違はかなり重要な意味を持ってくる。 25° を境として両試験地の斜面の分類を行なうと、桐生では 25° 以下の斜面が全面積の 83% を占めているのに対して、川向では 25° 以上の斜面が 62% もある。即ち、全流域を花崗岩の乾燥した風化土でおおったと仮定すれば、桐生ではほとんどの地域で重力の作用のみによる自然崩落は起こらないのに対して、川向では全

流域の半分以上が他のどんな侵食営力が加わらなくとも山腹から土砂は落下しつづけることになる。現実にはこのようなことにはならず、水分、植生、風化の仕方などによって、更に急な勾配でも一時的な安定を保つことは可能であるが、長い目で見ると、全体的には上で述べたような安定状態に達する方向に向かって土砂移動が行なわれていると考えられるので、川向では全面積の半分以上が不安定状態にあり、桐生では大部分の地域がそれよりもはるかに安定した状態にあると言える。

但し、上に述べた 25° の角度はいわゆる山崩れなどの崩壊角ではなく、表層土の移動に関連した角度である。

3-4 荒廃地と傾斜

ここで言う荒廃地とは、第3章植生調査で定めた、Type 3 の一部及び Type 4 を示している。この地区は表土が被覆されていないので、通常侵食 (normal erosion) ではなく、加速侵食 (accelerated erosion) を受けていると考えられる。桐生ではこのような荒廃地は全く認められなかったが、川向では全面積の約 30% を占めている。

斜面と傾斜に関して、川向での観察と前項で述べた 25° の角度とを関連させて考えてみると、荒廃地の大部分が 25° 以上の傾斜を持つ山腹に分布している。 25° 以上の所にも植生状態の良い所は見られるが、 25° 以下の所では河床堆積部を除けば植生状態は全体に良好である。また、 30° 以上の斜面になると、植栽工が一応成功して植生状態が良好になっていても、下層木、落葉層が著しく少なく、遠くから眺めると、木の間から白い山肌が点々と見えるようになっている。こういった場所はそのまま放置しておくとも再び裸地化する恐れがあるから、落葉を流下させないような手段を構すべきであろう。これは、Type 2 と Type 3 の中間位の状態であると思われる。

このように、一般的に急斜面の方が植生にとって環境条件は悪いといえることができるであろう。これは、或る勾配以上（この角度は今回の調査では明らかでない）の斜面では山腹工も余り成功していないように見られる点からも裏付けされるのであるが、流域最上部の谷幅の広がった部分では他の場所に比べて勾配が類似していても、植生状態は良好である。これは、施工の仕方、表土の堆積条件、水分状態などに関係していると思われる。

桐生では全域にわたって落葉層が認められる。また、不完全なデーターであるが、勾配の急な場所の方が土壌が薄くなっているため、急斜面の方が生長が悪いと考えられるが、全体に植生状態が良好なために、特に斜面の傾斜との相関関係は見出されなかった。

これらのことから、山腹荒廃に関連している植生状態の良悪は、単にその斜面の傾斜だけに支配されるものではなく、竹下⁷⁾が、斜面上の点に対する（水分、土砂礫、その他の土壌物質の）供給源の大きさは、地表、地下の両面から規制され、その点の土に存在する山体の規模と形態により三次元的に関連づけられるものと解される、と述べているように、様々の環境要因の相互作用の結果であると考えられる。従って、或る場所で何度以上かの斜面が荒廃していても、環境条件の異なる他の場所では同じ傾斜でも荒廃するとは限らないし、また、傾斜に応じて徐々に植生状態も変化するのではなく、いわゆる限界条件をもって段階的に変化するものと考えられるが、これらの点については今回は明らかにできなかった。

しかし、花崗岩地帯において、 25° を越える斜面における皆伐は森林の再生を著しく困難にするであろうし、階段工施工の際にも花崗岩砂の安定角が 25° 付近にあるということなどは、一応考慮しておいても良いのではないだろうか。

以上、傾斜と荒廃地との関係を考察したのであるが、両試験地とも多数のダム工、階段工、植栽工が施工されており、これらの考察は自然状態の観察に基づくものではないといわねばならな

い。

3-5 斜面の方向と傾斜

斜面の方向と傾斜及び植生状態等を考えてみたい。斜面の方向、角度、及びその面積を〔表-2-2〕に示した。面積は試験地全面積中に占める割合で表わしてある。この表に基づいて、主流

表-2-2-1 斜面方向別傾斜及び面積(%) — 桐生
Table-2-2-1 Slope angles and areas (%) of different slope directions — Kiryu

方向 Direction	角度 Slope Angle	7~12°	13~18°	19~24°	25~30°	31~36°	面積合計(%) Total Area	平均傾斜 Mean Slope Angle
N		8 %	4 %	5 %	1 %	2 %	19 %	17.4°
NE		2	5	3	0	0	10	16.6
E		0	8	0	6	4	18	23.1
SE		0	6	6	0	0	12	20.6
S		0	0	0	2	0	2	29
SW		0	3	6	0	0	9	19.2
W		0	0	6	6	1	13	24.9
NW		0	6	9	2	0	7	19.2

全城平均傾斜 Mean slope angle of whole area 20.3°

表-2-2-2 斜面方向別傾斜及び面積(%) — 川向
Table-2-2-2 Slope angles and areas (%) of different slope directions — Kawamukai

方向 Direction	角度 Slope Angle	7~12°	13~18°	19~24°	25~30°	31~36°	面積合計(%) Total Area	平均傾斜 Mean Slope Angle
N		0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	3 %	35°
NE		0	0	0	0	0	0	/
E		0	0	0	3	0	3	28
SE		0	3	6	9	0	18	22.9
S		0	2	6	12	0	20	23.8
SW		0	3	4	12	4	23	26.0
W		0	6	7	8	0	21	22.7
NW		2	0	0	0	10	12	29.9

全城平均傾斜 Mean slope angle of whole area 25.1°

方向を上にとり、中心から方向別に放射状に面積%に応じた長さを直線で表わせれば〔図-2-11-1〕〔図-2-11-2〕のようになる。これらの図は両流域の相違を明瞭に表わしている。即ち、桐生では主流と反対方向を除いては比較的均等に各方向の斜面が分布しており、主として支流により形成されたとみられる斜面(SE, SW, S方向)が31.8%を占めているが、川向では支流による斜面(N, NE, E方向)は6%にすぎない。この事は、川向では主流に支配される谷が多いのに対して、桐生では支流が発達し、様々の方向の斜面が形成されていることを示している。支流によって形成された斜面は緩傾斜になることが予想されるが、事実、桐生では25°を越える斜面は大部分が主流に支配される斜面であり、それ以下の斜面は流域上部、支流部で形成された斜面である。従って、桐生に比べ川向に急斜面の分布が高いのは、この支流発達の存否に原因しているものと考えられる。

また、松田・奥西⁶⁾による天神川流域の、斜面方向と禿山の研究によれば、具体的実証は今後の課題としながらも、禿山率の最も高いのは南向き斜面で50%に近く、北に近づくにつれてそ

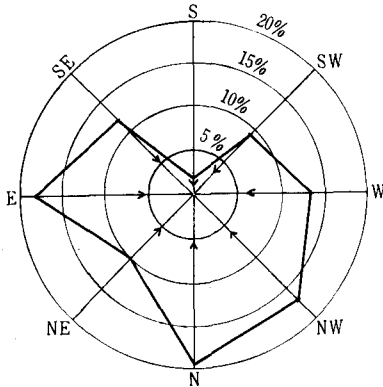


図-2-11-1 桐生試験流域の斜面方向別面積分布

Fig.-2-11-1 Area distribution diagram of different slope directions at Kiryu catchment

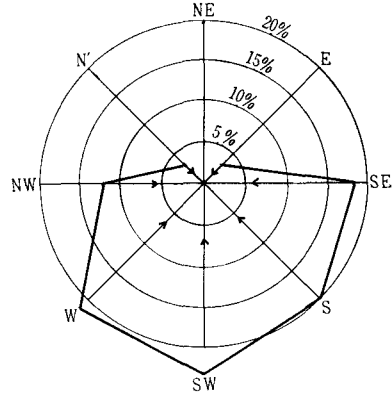


図-2-11-2 川向試験流域の斜面方向別面積分布

Fig.-2-11-2 Area distribution diagram of different slope directions at Kawamukai catchment

の率は減少し、北向き斜面では約20%を示すとし、その原因の主なものはいずれも日射、地表温度など環境条件の差によって生ずる侵食機構の相違による可能性が強いとしている。しかし、もっと大きな原因として、日照の相違によって生ずる蒸発散量の違いが、南向き斜面で土中水分の減少を招き、そのために植生条件が悪くなるということも考えられる。また、やや可能性は薄いですが、地質構造または、地形発達過程で、何らかの原因で南向き斜面の方が侵食が激しいなどの、植生に悪条件をひき起こす要因が存在することなども考えられる。以上の点については、草津川流域についても調査する必要があるだろう。いずれの仮説も実証するデータがないので、今後検討しなければならない事柄であろう。

また、桐生と川向の流域全体の方向を考えると、桐生はN方向の流域で植生状態が良く、川向はSW方向の流域で、その中でもW, SW, S方向の斜面に多くの荒廃地が分布していることから、一見、上の方向と秃山の関係のデータを用いるだけで両者の植生状態が説明できるようにも見えるが、もちろん、これはそのように単純な問題ではないだろう。いずれにせよ、この点については、今回の小流域を対象としただけの調査では一般的なことはいえない。

3-6 起伏量

起伏量の大小は地形の開析程度を示す重要な指標である。即ち、起伏量は満壮年期で最大の値を示し、侵食ステージの変化に伴ってそれ以前では増加、それ以後では減少すると一般的に言われている。多田は起伏量及び山頂、谷底の高さを用いて図表的に開析度を表わし、侵食輪廻における山地のステージの区分を行なった²⁾。それによれば、分布によって山塊のステージは明瞭に示されるのであるが、これをそのまま今回のような小流域に適用しても、有効な解析手段となるとは思えない。今回はグラフの分布によって両試験地の比較を行なうだけにとどめておく。

起伏量をここでは、切峯面と切谷面の差として定義する²⁾。切峯面は今回は試験地流域界の尾根相互の等高度点を結んだ直線群によって形成される面として決定する。本来、この方法は第1 order 流域に適用されることが理想的であろうけれど、今回の試験地にこれを用いても特に難点は見出されなかったもので、そのまま使用した。これによって出来た斜面はほぼ主流方向の傾斜を持った全流域を覆う斜面となるので、仮想の原面を復元しているものとみなしてさしつかえないであろう。

これによって求めた起伏量及び切峯面、切谷面の高さをを用いて書いたのが〔図-2-12〕である。これによれば、起伏量は川向で 5~24 m 桐生で 13~30 m に分布しており、桐生の方が約 10 m 大きい。起伏量は流域界と谷との高度差、つまり、谷の深さを表わしているから、桐生の方が谷が深い、即ち、桐生の方が川向よりも大きな侵食を受けた

ことが考えられる。この事と、河床勾配などを考え合わせると、川向ではまだ河床低下の余地を桐生より多く持っており、桐生では今後河床の低下よりも尾根部の低下の方が相対的に大になって行くことが考えられる。

3-7 Hypsometric curve³⁾⁸⁾

Hypsometric curve (高度一面積曲線) は流域内の任意の高度より上部の面積を横軸に、縦軸に高度をとって表わした曲線である。これを、高度差や面積の絶対値の異なる流域相互の比較に便利のように、面積、高度を各々流域全面積、流域全体の高度差との比で表わしたものが percentage hypsometric curve (百分率高度一面積曲線) で、ここではこれを用いる。

この曲線は本来一つの完結した流域に対して適用されるべきであるが、流出と関連する、量水堰より上部の流域高度と面積に関して考察を行なうために、量水堰より上の流域について曲線を描いてみた〔図-2-13〕。これによれば、座標軸で囲まれた正方形の面積を 100% とした時、percentage hypsometric curve 下の面積 (hypsometric integral) は桐生で 53.4%, 川向で 44.3% となり、また、両者とも S 字型をしていて、余り差は見られないが、桐生の方が多少上流部に広い面積が分布している。例えば、高度 50% 以上の面積は桐生では 60%, 川向では 45% であり、15% の差が認められる。これは傾斜分布の項で述べたように、桐生では上流部に緩傾斜部が見られることに原因しているであろう。ここから、桐生の方が川向より高い高度での貯留が多いことが考えられ、従って、流出時間に多少の相違が生ずることが予想される。しかし、これも河川網の項で述べたように、現実に目立った差が表われるかどうかは分からないし、今回の測定ではこれを実証するデータも得られなかった。

以上、試験地の微地形について、様々の地形計測要素に関して両流域の相違点を列挙した。それら地形上の相違がどのように他の環境に影響を及ぼすか、何をもってその流域の特性を表現する指標とし得るか、などが基本的な視点であったが、実際には、十分にはできなかった。これら

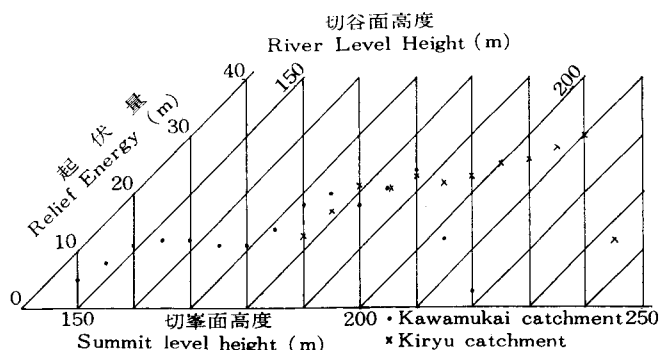


図-2-12 起伏量図
Fig.-2-12 Relief energy diagram

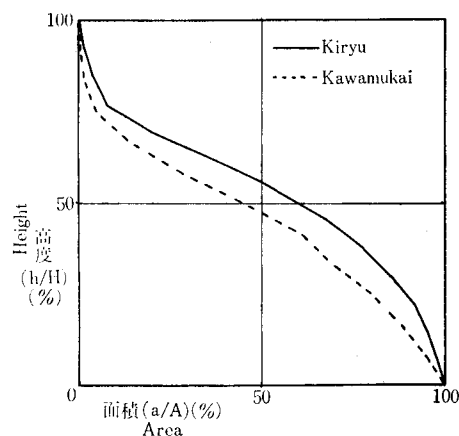


Fig.-2-13 Percentage hypsometric curve

をより完全なものとするためには、調査方法の確立、その下でのデータの集積などが望まれるが、そういった方向を今後とも目指して行きたいと思う。

第3章 植 生

1. 川向試験流域の植生状況

調査流域 2.66 ha 全般は、建設省砂防工事の対象にあたり、ほぼ全域にわたって、昭和 26 年施行のクロマツを主とする山腹工が整っている。流域内には、それより以前に設置されたと思われる石積が各所に存在するが、施行年度などは判然としない。流域の 90% 以上が植物体に被覆されるが、一部に露岩地が存在し、全体として植生は貧弱である。流域全域は、花崗岩の風化地帯であるが、桐生試験流域よりは風化は浅いと思われる。調査流域内の 2 カ所に、堤らが施肥試験をおこなった部分が存在し、これらの箇所のみは、マツ類の生育が特に良いが、全体として植生の生育状態も良くない。

山腹部においては、アカマツ、クロマツのほかに、ネズミサシ、ヒメヤシャブシ、オオバヤシャブシ、コガネビ、などが混在しており、溪流部では、コバノミツバツツジ、イヌツゲ等の、落葉、常緑広葉樹が優占していることが多い。なおⅢ沢には、わずかであるが、ヒノキをまじえることがある。

最下層を構成する種としては、コシダ、ウラジロがあり、ススキなどが一部に混入しているが、これは前記の施肥試験の際に導入したものが残ったものと思われる。

全般に土壌の状態は悪く、 A_0 層がみられるのは流域中にわずかであり、それも L 層 F 層のみで、H 層が存在することはまれである。これは流域内の山腹工にもかかわらず表土とともに落葉が流亡するためであろう。

調査流域の林相を典型的に次の 4 種類に区分した。

Type 1. 上層をクロマツ、アカマツが優占し、下層は広葉樹の生育が良く密度も大きい。

Type 2. Type 1. 同様、上層をクロマツ、アカマツが優占するが、下層は、広葉樹の生育が貧弱であるか、またはコシダ、ウラジロが優占する。

Type 3. 上層のアカマツ、クロマツは生育悪く、およそ樹高は 5 m に達しない。下層の植生状態も貧弱であるか、表土は被覆されていない。

Type 4. 植生が全く存在しないか、またはわずか存在し、基岩が露出している。

これらの区分を地図上で位置を示すと〔図-3-1〕で示してある。つぎにこれら 4 タイプの植生状態の概要を示しておこう。

1) Type 1.

流域の最下流附近およびⅠ沢の上部にみられる植生の比較的豊富な地区である。上層林冠を構成するアカマツ、クロマツは、ほぼ閉鎖に近い状態を示しているものの完全とはいいがたく、ネズミサシ、ヒサカキ、ヤマウルシ、ヌルデなどの広葉樹がところどころに占有している。この流域全体についても同様であるが、マツ類の伸長生長は、極端に悪く、年間 20 cm 未満の伸長が観察されるにすぎない。

それゆえ、上層のクロマツ、アカマツで樹高は 5~8 m にすぎない。上層以下の樹冠層には、ヒメヤシャブシ、オオバヤシャブシ等の砂防植栽時に導入された肥料木のほかに、コバノミツバツツジ、ヤマウルシ、ヌルデなどの落葉広葉樹、イヌツゲ、ヒサカキ等の常緑広葉樹が優占している。林床は、コシダ、ウラジロが密生し、ほぼ全体を被覆して裸地化しているところはない。またこの区分に属する地区では一般に A_0 層の発達がみとめられた。

2) Type 2.

流域中、比較的上部、尾根筋を中心とした範囲にひろがり、砂防植栽当時の造林状況がよく残っている。この区域より下部、谷筋との間には、ところどころ裸地化した箇所がみられる。上層林冠を構成するマツ類は、クロマツがアカマツよりも成立本数の点で多い。

閉鎖状態は谷の源頭では不完全ながら一応の閉鎖がみとめられるが、尾根上部あるいは裸地化した箇所と隣接しているところでは疎林化していることが多い。上層のアカマツとクロマツでヘクタールあたり3000～3500本程度で以下の層に属する広葉樹はType 1にくらべて種・数ともに少な

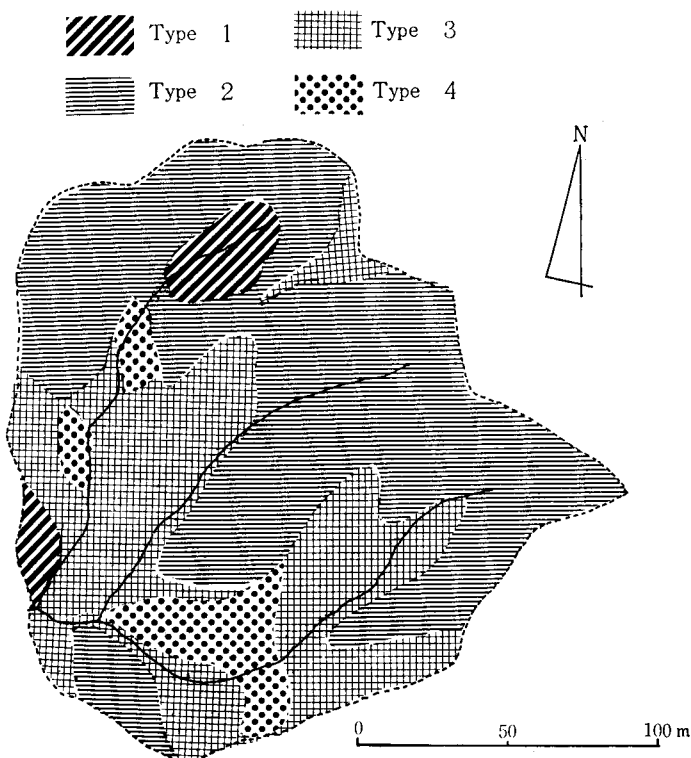


図-3-1 川向試験流域の林相区分図
Fig.-3-1 Diagram of vegetation types at Kawamukai catchment

表-3-1 川向試験流域の林分状況
Table-3-1 Condition of vegetation in each plot. (註 () %)

		Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
Tree Density	<i>Pinus densiflora</i>	1100(31.4)	600(42.9)	300(7.9)	500(16.1)	200(6.5)	0
	<i>Pinus Thunbergii</i>	2100(60.0)	800(57.1)	3500(92.1)	2400(77.4)	2700(87.0)	2700(64.3)
	Other coniferous trees	100(2.9)	0	0	0	0	0
	Broad-leaved trees	200(5.7)	0	0	200(6.5)	200(6.5)	1500(35.7)
	TOTAL (No./ha)	3500	1400	3800	3100	3100	4200
Total Basal Area	<i>Pinus densiflora</i>	4.8(41.4)	1.0(20.1)	1.7(17.5)	3.3(24.8)	0.8(9.0)	0
	<i>Pinus Thunbergii</i>	6.5(55.8)	4.1(79.9)	8.2(82.5)	10.0(74.4)	7.9(88.3)	12.5(90.0)
	Other coniferous trees	0.1(1.0)	0	0	0	0	0
	Broad-leaved trees	0.2(1.8)	0	0	0.1(0.9)	0.2(2.7)	1.4(10.0)
	TOTAL (m ² /ha)	11.6	5.1	9.9	13.4	8.9	13.9
Mean Diameter at Breastheight (cm)	<i>Pinus densiflora</i>	6.7	4.3	7.8	8.7	7.2	—
	<i>Pinus Thunbergii</i>	5.5	8.2	5.1	6.8	5.6	7.2
	Other coniferous trees	3.8	—	—	—	—	—
	Broad-leaved trees	3.5	—	—	2.7	4.0	3.4
Mean Height (m)	<i>Pinus densiflora</i>	5.4	2.5	4.5	8.3	6.7	—
	<i>Pinus Thunbergii</i>	7.0	4.1	3.5	6.3	5.3	6.8
	Other coniferous trees	4.3	—	—	—	—	—
	Broad-leaved trees	2.9	—	—	3.0	4.1	4.4

かった。また Type 1 では、ヌルデ、ヤマウルシ、ヒサカキ、イヌツゲ、ネズミサシ、などの乾生の土地に自生しやすい種が多かったのに対して、この地区では、コガンビ、ヒメヤシャブシ、オオバヤシャブシ、ヤマナラシ等の砂防工事と共に導入されたものが中間層の代表種となっていた。一般にこの地区では、樹冠はかなり不連続で、特に第2層は、ほとんど孤立化していた。なおⅢ沢の下部、北斜面に、このタイプに属すると判断された地区が存在するが、ここは、ヒメヤシャブシとクロマツが均一に上層クローネを構成し、山腹工はよく成功していた。しかし列間には、ほとんど他の植生は侵入していなかった。この地区の土壌化は、一般にあまりよくなく、表土の上部にL層、F層がややみられる程度でA₀層は全体として非常にうすかった。

3) Type 3.

Ⅲ沢を中心としてひろがる生育不良地である。このタイプでは、やや疎林化がすすみ、表土にわずかのリターの集積がみられる Type 2 の移行型と、ほとんど立木が疎立化し、表土は裸地化しているものを含む。上層木であるマツの樹冠は不連続、不均一であり、各植栽木間に出現する下木もほとんどみあたらない。ヘクタールあたり1000~2000本ほどの疎林で、極端にわい生化しているところが多い。

断面積合計は多い所でも10(m²/ha)をこえないと思われる。

4) Type 4.

Type 3 よりもずっと疎林となり、ほとんど裸地化している箇所である。クロマツ、ヒメヤシャブシ、ネズミサシがところどころに散在する。また基岩が露出している箇所も多い。

全体からみると面積も7%程度で広くはない。一般にこの地区は、傾斜の大きいところにみられた。

以上の各タイプをさらに細かく知る目的で昭和46年8月に流域内にタイプにつき1~3個のコードラートを設け調査をおこなった。

結果は表-3-2に示すとおりであるが、これらのプロットのタイプ別は Type 1. (No. 1. No. 5) Type 2 (No. 3. No. 4 No. 6) Type 3 (No. 3) となる。

表-3-2 川向試験流域のタイプ別面積割合
Table-3-2 Area percentage of each type
at Kawamukai.

Type	Area (ha)	Percentage
1	0.109	4.1
2	1.335	50.2
3	1.020	38.3
4	0.196	7.4
	2.660	100.0

なお Type 4 については調査はおこなわなかった。

まず密度であるが、No. 2 プロット以外の総成立本数は3000~4000本でかなり高密度である。

本数割合は区ごとに相違しているがおおよそクロマツが60%以上を占め、アカマツがついで多く、6~30%程度。肥料木を含める広葉樹は多いところで35%に達した。しか

しながら〔表-3-2〕からもわかるように区ごとにかなりの差がある。このような差は、流域内での遷移の差によるものであろう。岡本による報告¹⁾は田上山系における砂防植栽工事後の遷移状況は、植栽木、肥料木とともに導入あるいは侵入した草本類がしだいに消滅し、ついで肥料木の衰退がみられ、植栽木の生長停止へと動くとしている。また天然生のアカマツは引き続き良い生育を示すという。上記の調査は、植栽後、数カ年の経過によって一般にみとめられた現象であるが、田上山系のようなせき悪地で、植物にとって生育条件の過酷なところでは、他の条件のわずかな差がプロットごとの差になってくるものと思われる。胸高断面積合計は15(m²/ha)に達せず、林令から考えても、非常な生育不良である。クロマツよりもアカマツの方が生育が良いことは、

平均直径からうかがうことができる。アカマツは、あとから侵入したものであるか、天然生のものであるか、どちらにしても本数は少ないが、往々にしてクロマツよりも直径は大である。一方、平均樹高はアカマツ、クロマツで差は大きくなく、ともに同じ林冠を形成していることが多い。また各タイプごとに平均直径をプロットしてみると〔図-3-2〕のようになり、各タイプの差が樹高によく示されているのがわかる。以上の結果から考えると、Type 2 は著しく密度が高く、共倒れ型の林型であり、Type 3 は、極端な疎林で、最も安定しているのは、沢の下流ないし、たい砂地にみられる、Type 1 であるというふうに判断できよう。このことが田上山系すべてにあてはまるかどうか、今後、再考を要するところである。

2. 桐生試験流域の植生状況（昭和42年11月調査）

調査流域約 6 ha の地域は、花崗岩を母材とする深層風化地帯であって、古い砂防地である。溪流の下流にむかって、左岸の方が施行年度が古く、明治30年の山腹治山施行地であり、右岸は、大正5年度の施行地である。

流域全般にわたって治山はよく成功しており、アカマツ、クロマツのほか、ヒノキをまじえた林分となっている。流域の上部の一部は、すでに約10年前、マツ類が伐採され、その跡地には再びマツ類、ヒノキが植栽され、天然に侵入したマツ類を加えた幼令林がある。

現在の林相を類型的におおわけすると、つぎの5種類に区分できる。

- 1) 明治30年度施行のアカマツ、ヒノキ混交林
- 2) 大正5年度施行のアカマツ林
- 3) 明治30年度施行のうちマツ類のみが伐採されたヒノキ疎林
- 4) マツ類幼令林
- 5) 溪流域林

これらの分布は〔図-3-3〕に示してあるが、おのおのについて植生の概要を示しておこう。

1) アカマツ、ヒノキ混交林

現在の上層林冠を構成するものはマツ類で

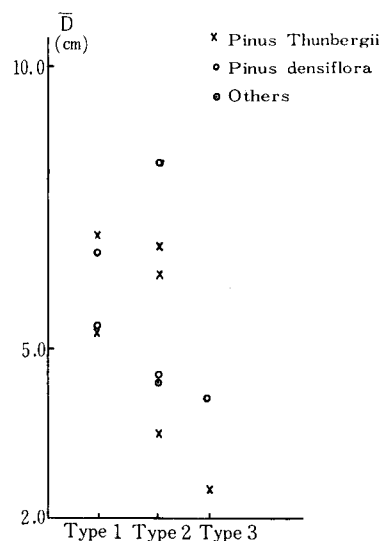


図-3-2 各タイプ別平均胸高直径
Fig.-3-2 Distribution of mean diameter at breast height of each types

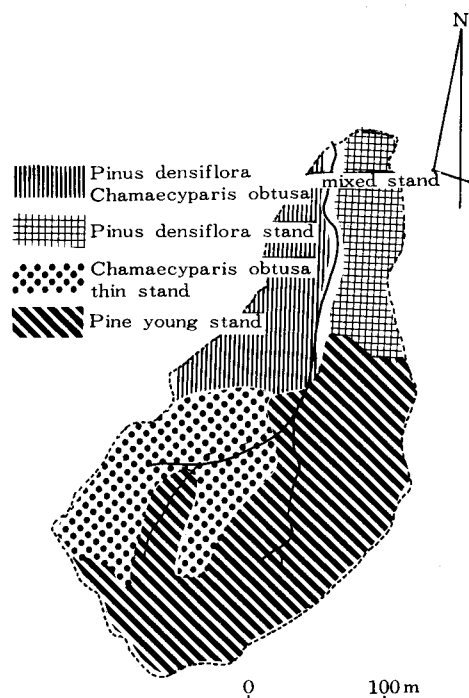


図-3-3 桐生試験流域の林相区分図
Fig.-3-3 Diagram of vegetation types at Kiryu catchment

ある。それも大部分が、アカマツで、クロマツは少ない。砂防植栽は、クロマツを主体として行なわれたと推定されるから、これらのアカマツは主に砂防植栽後の侵入によるものであろう。上層林冠を形成するマツ類の樹高は、18~20 m に達し、ヒノキはマツ類より平均して樹高がやや劣り、その樹冠は、マツ類の下部にある。これらのマツ類とヒノキとで上層林冠はほぼ閉鎖されている。その他の広葉樹類は上層林冠の閉鎖の不完全な部分に主にあらわれ、第3層を形成するが、これらは散在していて樹冠は連続ではない。林床の下層植生はマツ類、ヒノキによる閉鎖がほぼ完全であることの影響をうけて一般に乏しい。

第3層を形成する樹種のうち主なものは、ヒサカキ、ソヨゴなどの常緑広葉樹類のほかヒメヤシャブシ、アオハダ、コナラ、ヤマウルシなどの落葉広葉樹類である。下層植生としては、ヒサカキ、ヤマツツジが多く、クチナシ、タラヨウ、イヌツゲ、アラカシ、ヤブコウジなどで一部にゴキダケ、ウラジロを含んでいる。

ツル類としてサルトリイバラ、ミツバアケビがみられるが多くはない。

地表面は A_0 層が厚く発達し、全面をおおっている。

このなかでコードラートをおいて上層木の毎木調査をおこなった (表-3-3)。

表-3-3 アカマツ・ヒノキ混交林の林分状況
Table-3-3 Outline of a mixed stand of *Pinus densiflora* and *Chamaecyparis obtusa*.

	Tree Density	Percentage of Trees	Basal Area	Percentage of Basal Area	Average of D. H.
<i>Pinus densiflora</i>	360	16	32.2	53	25.8
<i>Pinus Thunbergii</i>	85	4	2.2	5	
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	745	33	16.4	37	15.4
Total of Coniferous Trees	1190	53	41.8	95	
Deciduous Broadleaved Trees	800	36	1.9	4	4.9
Evergreen Broad-leaved Trees	250	11	0.5	1	4.3
Total of Broad-leaved Trees	1050	47	2.4	5	
TOTAL	2240		44.2		

表-3-4 アカマツ・ヒノキ混交林の直径分布
Table-3-4 Distribution of a diameter at breast height in mixed stand

d. b. h.	<i>Pinus densiflora</i> <i>Pinus Thunbergii</i>	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	Broadleaved trees
6.0	0	3	28
6~10	1	5	9
10~14	0	3	1
14~18	3	3	0
18~22	1	8	0
22~26	2	5	0
26~30	4	0	0
30~34	2	0	0
34~38	1	0	0
38~42	2	0	0

樹高 3 m 以上の広葉樹まで含めると、〔表-3-3〕に示すように、成立本数は ha あたり 2000 本をこえるが、このうちマツ類、ヒノキの本数割合は約半分である。しかし広葉樹類は、小径木が多いから断面積で比較するとその占める割合はずっと減ってしまい、全体のなかで 5 % を占めるにすぎず、現存量としては無視しうるほど小さいことがわかる。〔表-3-4〕は直径

の頻度分布を樹種群に区分して示したものである。直径と樹高に比例関係が成立するものとすれば、この林分の階層構造をおおよそ表示するものといえる。

なお胸高断面積合計は全部で $44 \text{ m}^2/\text{ha}$ 、マツ、ヒノキで $42 \text{ m}^2/\text{ha}$ であり、ほぼよく閉鎖した林分であるといえよう。

2) アカマツ林

前者に比較すると年令としては約 20 年若い林分であるが、このことを考慮してもマツ林としての生育状態はずっと劣る。これはおそらく土壌条件の違いによるものであろう。また前者がほぼ東斜面であるのに対して、この林分が西斜面であることが土壌の性質を介して影響を与えていることも考えられる。

アカマツ、クロマツの混交林でヒノキを混えない。上層林冠はおよそ 15 m 程度で、閉鎖しておらず、当然その下層に落葉広葉樹を主体とした第 2、第 3 層が密に成立し、この層ではほぼ閉鎖している。第 2 層は 2~4 m 程度でその主なものは、ヒメヤシャブシ、リョウブアオハダ、ネジキ、タカノツメ、ヤマザクラ、ヤマウルシなどの落葉広葉樹とヒサカキ、イヌツゲ、ソヨゴなどの常緑広葉樹であり、連続した林冠をつくっている。さらにその下層に樹高 1.5~2.0 m のヤマツツジ、コバノミツバツツジ、イヌツゲ、シャシャンポなどの灌木層が続き、第 2 層とあわせて密である。従って、その下方での植生は乏しく、地床では部分的にウラジロ、ヤブコウジなどがみられるにすぎない。

地表面は A_0 層が厚く発達し、裸出していない。

なお全般的に尾根部でマツ類の樹高が低く谷または凹型地形で高くなる傾向をもつ。

表-3-5 アカマツ林の林分状況
Table-3-5 Outline of *Pinus densiflora* stand.

	Tree density (No./ha)	Total Basal Area (m^2/ha)	Mean diameter at Breastheight (cm)	Mean Height (m)
<i>P. densiflora</i>	870	23.8	17.5	12.6
<i>P. Thunbergii</i>	230	8.5	20.2	13.8
TOTAL	1100	32.3		

コードラート調査区の結果を示せば〔表-3-5〕〔表-3-6〕のようである。

マツ類の成立本数は前者に比して少ないとはいえないが、直径や樹高が小さいから、相対的にずっと疎立していることがうかがわれ、胸高断面積合計も $32 \text{ m}^2/\text{ha}$ ですくない。

3) ヒノキ疎林

マツ類、ヒノキ混交林のうち、マツ類のみが伐採され、ヒノキが残されている部分である。

残存しているヒノキの密度は局部的に著しく異なり、ほとんどヒノキの純林に近いところから、散在するにすぎぬものまでを含む。〔表-3-3〕の結果からヒノキのみをとりだせば、本数としてはヘクタールあたり 750 本となる。〔表-3-3〕におけるヒノキはマツ類の林冠の下にあるのに対し、ここではほとんど孤立しているため、直径は全般的に〔表-3-3〕のそれより大きい。

表-3-6 アカマツ・クロマツの直径分布
Table-3-6 Distribution of a diameter at breast height of *Pinus densiflora* and *Pinus Thunbergii*.

D. B. H. (cm)	<i>P. densiflora</i>	<i>P. Thunbergii</i>
6~10	4	1
10~14	7	1
14~18	4	1
18~22	5	1
22~24	5	1
24~26	3	1
26~28	1	1
28~30	0	0
30~	1	1

樹高はおよそ 15~17 m 程度にすぎない。

ヒノキの疎立している部分では下層植生が密立して、地表面をおおっている。その高さはおよそ 2 m で、ヤマツツジ、コバノミツバツツジ、コナラ、コバノガマズミ、ネジキ、タカノツメ、ヤマウルシ、ヤマザクラなどの落葉広葉樹に、ソヨゴ、ヒサカキ、アラカシ、カナメモチ、シャシャンボなどの常緑広葉樹をまじえ、サルトリイバラ、アケビ類などのツル植物も多い。

なおヒノキの疎密はとくに地形と関係がない。

4) アカマツ幼令林

植栽後約 10 年の幼令林である。現在、アカマツが最も多く、クロマツがこれと混交し、一部にヒノキが植えられている。

これらの幼令木の樹高は 1.5~3 m で、成立本数も局部的にかなり異なる。植栽後以外に天然下種によって成立したものがかなり多いとみられる。とくにアカマツのなかには、天然下種によるものが多いであろう。現存成立密度は斜面下部や凹地形において低い傾向がわずかに認められる。

いわゆる雑草木の繁茂はかなり密であるが現在マツ類やヒノキはおよそ下生えを抜いている。

雑草木の種類は多いが、ゴキダケ、サカキ、ソヨゴ、イヌツゲ、シャシャンボ、ツツジ類、ガマズミ類、コナラ、とくに尾根筋の乾燥地にヒノキ、アキシバなどが多い。

5) 渓流域林

渓流の下流にむかって左岸はアカマツ、ヒノキ混交林であるが、斜面下部では上層木の密度が低く、下層木の繁茂が多い。また右岸はアカマツの疎林であるため、渓流をはさむ巾 10 m 程度の部分は、上層木がほとんどなく、渓流沿いに成立した広葉樹の散生地帯となっている。

ここではソヨゴ、イヌツゲ、クリ、リョウブ、アカメガシワ、タカノツメ、コナラなどが樹高 5~7 m 程度に達し、そのほかにウツギ、ネジキ、コバノガマズミ、ムラサキシキブ、コバノミツバツツジ、シャシャンボ、イヌツゲ、ヒサカキ、サカキ、などが混生し、岩石地には、ネズミサシ、アカマツなどが成立している。また、部分的にゴキダケ、ミヤコザサが多い。

これら 5 つのグループの面積割合は〔表-3-7〕のとおりである。

表-3-7 桐生試験地流域の植生タイプ別面積割合
Table-3-7 Area percentage of each forest type at Kiryu

Forest Type	area (ha)	%
<i>Pinus densiflora</i> , <i>Chamaecyparis obtusa</i> mixed stand	0.91	15.2
<i>Pinus densiflora</i> stand	0.73	12.2
<i>Chamaecyparis obtusa</i> thin stand	1.29	21.2
Young Pine stand	2.84	47.4
Streamside Forest	0.22	3.6
Total	5.99	100

マツ類幼令林が最も多く、約半分を占めており、主にマツ類で閉鎖した林分は合計で 1.64 ha 約 27% を占めるにすぎない。

3. 両試験流域の植生状況について

桐生および川向両試験流域の特性をあきらかにするため

には、両流域の植生状態の相違を、明確に把握することが必要であろう。しかるに両流域とも全く原植生を異にする区域ではないと思われる。また、明治以前の乱伐による荒廃をみたのも、同条件であったと思われる。そこでまず考えうる条件から考察したいと思う。

現在の林相を呈するに至った過程には、最初に明治以後の両試験流域における造林事業の記録をつかむ必要があるが、残念ながら、川向試験流域においては、大正、明治の事業に関する記録がさだかでない。しかしながら現在の林相は、昭和26年施行によるものであるから、それ以前の荒廃状況を適確につかめないにしても、少なくとも、現在の植生状態からの比較は可能であると

思われる。

一方、桐生試験流域は、前記のごとく、明治時代からの植栽事業から今日に至っているものであり、そこに現在のほぼ安定した森林をみることができるのである。

いままで述べてきたように、川向試験流域のような、せき悪林地と桐生試験流域のような森林との差はどのような要因から生じてきたのかそれにはまず、両流域の気象条件、地形学的位置、さらに流域内での水分条件、地質学的条件などを考える必要がある。

地形上の位置でまず問題になるのは、方位である。すなわち、桐生試験流域は溪流方向はおおよそ北向きであり、川向試験流域では南向斜面が大半を占めるという事実である。斜面の向きは、日射量に大きな影響を与える。

両試験流域が最初、まったくの裸地であったとすると、表土は、南向きの方が乾燥しやすく、植物の生育には不利であるという点を無視することはできないであろう。一般に田上山系の土壌は粗粒で、通気性に富み、保水力の小さいことが報告されている²⁾。このことは平均傾斜が桐生よりも大きい川向においてはさらに不利な条件となる。すなわち降雨の表面流によって、地表有機物を流亡せしめ、 A_0 層の発達を阻止することになる。

事実、調査の結果でも、川向では A_0 層の存在する箇所は、きわめてわずかで、表土も、桐生に較べてうすいことが観察された。

一方、砂防植栽のほぼ成功した桐生試験流域では、年々の風化量は、川下へ移動されずそのままとどまり、植物体によって吸着されていくのであるから、流失による損失はわずかととなる。

今後、これらの相違点を裏づけるためには両流域の土壌条件とそれからの損失量の測定結果が必要であると思われる。

第4章 水 収 支

森林に降った雨は樹冠層を通過する際、一部しゃ断されそこから蒸発していく。地表に達した雨は地中に浸透し、土壌中の水分不足を補い、さらに下層へ透過して地下水帯へ貯留される。残りは地表水となって河道へ流出する。浸透、透過した水は土壌水帯、地下水帯から中間水、地下水となって河道へ流出してくる。さらに、これらの層から水が植物に利用されて蒸散し、また地表面から蒸発し、大気中に戻っていく。このように森林生態系では、水がたえず循環している。森林の水循環におよぼす影響をしらべるには、ある一定期間に森林生態系内へ降った雨量と、系外へ出た流出量、蒸発散量の総決算である水収支を検討し、各成分の動きをとらえることが必要である。このような森林生態系の水の動きを量的にとらえるのに、その系のモデルとして植物被覆のあるライシメーターを使うと有効であるが、森林で覆われた山地小流域はさしずめ自然のつくりあげたライシメーターといってよいだろう。地質、気象条件が類似し、地形土壌や植生状態を異にする桐生、川向両流域での水収支の調査は、森林の水循環におよぼす影響をみるのに適しているだろう。今回は両流域での水文現象の概略を知るため、1968年4月から1969年3月までの1水年の水収支を比較、検討した。

1. 水収支式各項の測定と算定

ある流域で一定期間、他流域からの水の流入がなく、測水点以外で漏出がないとすれば次の水収支式が成立する。

$$P = D + E + \Delta S \quad (1)$$

P : 降水量, D : 流出量, E : 蒸発散量 ΔS : 貯留量変化

いま水支期間を1年とすれば, $\Delta S=0$ とみなせて

$$P=D+E \quad (2)$$

(2)式において年間の P と D を実測すれば年間の E が計算できる。

P の測定: 桐生流域では流域のほぼ中央にある露場の自記雨量計の記録を採用した。欠測部分は同じ場所の貯留型雨量計と水位観測小屋の自記雨量計で補った。川向流域では, 水位観測小屋の自記雨量計の記録を用いた。

D の測定: 桐生, 川向流域ともに, 量水堰の直角三角ノッチを越流する水位を自記水位計で記録し, 別に求めた水位一流量の関係式より1時間ごとの流出量を求め, これを合計して月流出量を求めた。

E の算定: (2)式より年間の蒸発散量が求められる。これを各月に配分するのに次の手法によった。まず THORNTHWAITE の蒸発散位¹⁾²⁾ (potential evapotranspiration, $P.E.$) を両流域について, それぞれ1968年4月~1971年3月までの3年間の平均気温から求めた。THORNTHWAITE 法は土壌水分が年中野外保水容量の状態を保っているところでは, 実用性が高いと考えられている³⁾。両流域の $P.E.$ と月平均降雨量〔図-1-3参照〕をくらべてみると, 降雨量の方が多く気候学的な意味で水不足はないと考えられる。しかし, 夏に雨が非常に少なかった1967年, 1969年には $P.E.$ より小さい降雨量があったが, 不足分は土壌水分貯留で十分補われる程度である。川向の年間の $P.E.$ は桐生のそれより大であるが, 冬の川向の $P.E.$ は桐生のより小さい〔表-4-1〕。求めた年間の $P.E.$ に対する月別の $P.E.$ の比率を(2)式から求めた蒸発散量 E に乗じてその月の蒸発散量 (e_i) とした。すなわち

$$e_i=(P-D) \times \frac{P.E.i}{P.E.}$$

ここで添字 i は月別の意味をあらわし, 添字のないものは年間の値を示すものとする。

ΔS の算定: さきに求めた各月別の P_i , D_i , e_i を(1)式に代入すると各月別の ΔS_i が求まる。

2. 水収支表の分析

以上により求めた水収支式各成分の月別変化を〔表-4-1〕に示した。

2-1 シャ断量

桐生流域では同じ水年に林内雨と樹幹流を測った。流域の林相は5区分されたが, このうち溪流流域林を除く4つの林内にそれぞれ代表的な地点を選んで5個ずつ角トユを集水面とする林内雨量計を置いた。また樹幹流は, アカマツ・ヒノキ混交林に10m×10mの方形区を設定しこの中の上層を占めるアカマツ, ヒノキの幹に切開したビニールパイプをらせん状にまきつけて固定し, 樹幹流をパイプの内壁に沿って流下させ, これをパイプで樹脂製のボトルに導き貯水量をはかった。貯水量は林内雨についてはトユの集水面積で, 樹幹流については方形区の面積でそれぞれわって水高(mm)の単位で表わした。林外の降雨量から林内雨, 樹幹流を引いたものが樹冠シャ断量で, これは水収支式の蒸発散量の項 E に含まれる。桐生の水収支表には, 測定したシャ断量(I)を示した。12月以降をのぞけばシャ断量は蒸発散量(e_i)の35%~68%で, 平均すれば約半分である。しかし冬期にはシャ断量が蒸発散量(e_i)の3~7倍にもなる。さらにこのシャ断量は冬の $P.E.$ よりも大きい。針葉樹林で冬のシャ断量が THORNTHWAITE 公式や PENMAN 公式で求めた蒸発散位よりも数倍大きくなる現象は, RUTTER⁴⁾, PATRIC⁵⁾ HELVEY⁶⁾ らも報告している。RUTTER⁷⁾ はこの現象について, *Pinus sylvestris* の森林で気孔からの蒸散とぬれた葉面から大気への蒸発の場合の水蒸気の拡散抵抗の違いから証明を試みている。シャ断現象は林地に降雨があれば必ず起こり, その量は桐生では年間降雨量のほぼ20%, 月降雨量の19~33%である。

一方 THORNTWAITE の蒸発散位は夏に過大、冬に過小になる傾向がある⁸⁾。したがって冬の降雨量が多いと、しゃ断された雨の蒸発速度が蒸散速度の数倍高い⁷⁾ということからも冬のしゃ断量が蒸発散位より大きくなる。桐生の場合、冬のしゃ断量はその月の $(P_i - D_i)$ よりも小さいので、これへの給源は存在する。そのため各月の e_i の算定方法を修正しなければならぬ。

2-2 蒸発散項 e_i の修正

上述したような不都合を修正するのにしゃ断によらない蒸発散は $P.E.$ に比例すると仮定してつぎの手法を試みた。年間の $(E - I)$ より年間のしゃ断量以外の蒸発散量を求め、これに $P.E.$ の各月への配分比率を乗じて各月のしゃ断によらない蒸発散量を求め、これに各月の I_i を加えその月の蒸発散量 E_i とした。すなわち

$$E_i = (P - D - I) \times \frac{P.E. \cdot i}{P.E.} + I_i$$

このように修正した蒸発散項 E_i を正規の蒸発散項に採用し、以下 e_i を無視して考察をすすめる。川向流域では I_i の実測値がないのでこの流域の植生状態を考慮して $I/P=5\%$ とみなし各月の降雨量にこの比率をかけてその月のしゃ断量を求めた。

KITTREDGE⁹⁾によれば、胸高断面面積合計と I/P の間にはほぼ正の直線関係がなりたつ。そこで桐生、川向両流域について両流域を覆っている林の平均的な胸高断面面積合計を求めてみた。桐生流域の場合、アカマツ・ヒノキ混交林の胸高断面面積合計 44.2 m²/ha [表-3-3参照] とアカマツ林の 32.3 m²/ha [表-3-5参照] にそれぞれの林の面積 0.91 ha, 0.73 ha [表-3-7参照] を重みづけて平均を求めると 38.9 m²/ha となった。一方、川向流域の場合は、

表-4-1 水収支表

Table-4-1 Monthly water balances at Kiryu and Kawamukai catchments.

		1968				1969								Year
		Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Year
Kiryu	P	134.0	134.5	140.5	352.5	359.5	186.0	130.5	36.5	111.5	55.0	116.0	169.0	1925.5
	D	85.2	124.5	56.3	241.7	196.1	137.1	130.0	48.5	60.3	31.8	66.1	94.9	1272.5
	$\uparrow E^{(1)}$	44.9	52.5	69.5	117.3	121.3	72.6	42.8	20.4	31.3	13.6	27.3	39.5	653.0
	ΔS	3.9	-42.5	14.7	-6.5	42.1	-23.7	-42.3	-32.4	19.9	9.6	22.6	34.6	0
	S	3.9	-33.6	-23.9	-30.4	11.7	-12.0	-54.3	-86.7	-66.8	-57.2	-34.6	0	0
	P.E. $\uparrow e^{(2)}$	45	69	102	138	139	98	50	23	10	3	4	13	694
Kawamukai	$\ast I$	28.9	28.0	33.3	68.3	72.0	37.8	25.1	12.2	27.8	12.5	25.9	34.9	406.7
	P	144.5	122.5	145.0	342.5	343.0	177.5	127.0	37.0	98.5	58.0	107.5	154.0	1857.0
	D	67.0	95.9	44.5	241.3	185.8	107.5	101.9	33.0	51.8	30.2	68.2	74.7	1101.8
	$\uparrow E^{(1)}$	46.3	78.3	103.2	150.4	154.7	107.4	53.1	20.6	10.8	3.7	8.8	17.9	755.2
	ΔS	31.2	-51.7	-2.7	-49.2	2.5	-37.4	-28.0	-16.6	35.9	24.1	30.5	61.4	0
	S	31.2	-20.5	-23.2	-72.4	-69.9	-107.3	-135.3	-151.9	-116.0	-91.9	-61.4	0	0
	P.E. $\uparrow e^{(3)}$	46	85	113	157	162	116	55	22	7	1	4	12	780
		7.2	6.1	7.3	17.1	17.2	8.9	6.4	1.9	4.9	2.9	5.4	7.7	93.0

P: precipitation, D: discharge, E, e: evapotranspiration, ΔS : change of storage,

S: storage, P.E.: potential evapotranspiration, I: interception

$\uparrow E^{(1)}$, (2), (3): calculated for each month by the following equations,

(1) $E_i = (P - D - I) \times P.E. \cdot i / P.E. + I_i$, (2) $e_i = (P - D) \times P.E. \cdot i / P.E.$ and (3) $I_i = P_i \times 0.05$.

E_i , P.E. i , e_i and P_i represent monthly values.

* observed.

plot 1~6 の各プロットの胸高断面積合計のデーター〔表-3-1参照〕から Type 1~4 までの各区の平均的な胸高断面積合計を求め (Type 4 は 0 とみなした) これにそれぞれの区の面積〔表-3-2参照〕を重みとして平均を求め $8.7 \text{ m}^2/\text{ha}$ を得た。桐生の $38.9 \text{ m}^2/\text{ha}$ に対する I/P が 21% であるから、これと比例的に川向では $8.7 \text{ m}^2/\text{ha}$ に対して I/P は 4.7% となった。それで川向のを約 5% として計算をおこなった。こうして川向でのしゃ断量が求めればしゃ断によらない蒸発散量の求め方は桐生の場合と同様である。蒸発散項を修正した水収支について考察をすすめよう。

2-3 流出率

両流域とも降雨量と流出量の季節的配分は類似している。流出率の季節的な変化〔図-4-1〕を

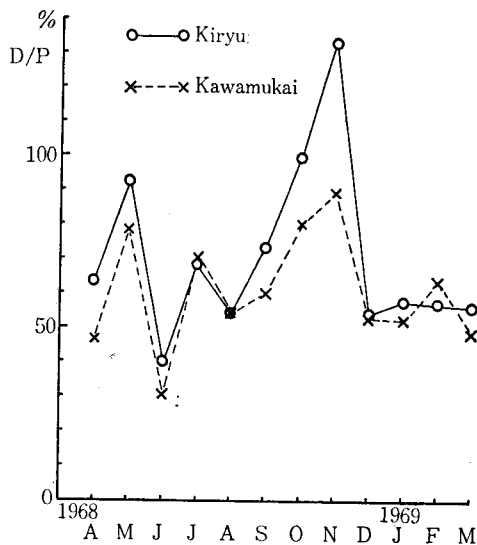


図-4-1 流出率の季節変化

Fig.-4-1 Seasonal fluctuation of rate of run-off at Kiryu and Kawamukai catchments

見ると両流域ともほぼ同じ傾向を示し、桐生の方が高い。桐生の 11 月は降雨量より流出量の方が多いが、これは 10 月末の降雨による流出が 11 月の流出に含まれているからである。流出率のピークが 5 月、7 月、11 月にあらわれている。他の水年の桐生、川向両流域のデーターについて流出率の変化をしらべると、11 月のピークが 12 月にずれることはあるが、変化のパターンは類似している。半年間ごとの流出率をみると桐生では、前半 (4 月—9 月) で 64%、後半 (10 月—3 月) で 70%、川向ではそれぞれ 58% と 62% となり、両流域とも前半の流出率の低いのがわかる。これは前半の蒸発散量が年間蒸発散量の桐生では 73%、川向では 85% にも達することに対応している。年間の流出率は桐生で 66%、川向 59% となり桐生が高い。

植生の項で述べられたように両流域における

植生状態の違いから当然、蒸散量としゃ断による蒸発量は桐生の方が多く、したがって流出率は低くなるはずであるがここでは逆の結果となっている。桐生は川向とくらべると樹冠の発達がよく、林床は A_0 層で覆われ直接風や日射にさらされることが少ない。また林内での飽差はより疎開な林である川向より小さい。一方川向は地表面が直接風や日射にさらされる面積が広い。また植生、地形の項で述べられたように桐生流域は北向き、川向流域は南向きであるため流域の受ける日射量、純放射量にはかなりの差が生じ蒸発散能に差異があらわれるだろう。したがって地面蒸発量は川向の方がずっと多いだろう。この地面蒸発量の差が蒸散量、しゃ断量の差以上にあるため川向の蒸発散量が多く、流出率が低くなったのかもしれない。また土壌の深さ、土の組成の違いや、今のところチェックできない漏出が関係しているかもしれない。さらに検討の必要があらう。

2-4 総雨量に対する各成分の累積百分率

$(P_i - D_i)$ と E_i の季節変化を図示した〔図-4-2-1〕〔図-4-2-2〕。 $(P_i - D_i)$ と E_i の差が ΔS_i だから、両曲線の上下の位置関係から ΔS_i の正負がわかる。一般的傾向として、春から秋にかけては ΔS_i は負となり貯留量が減少していく時期にあたる。桐生では夏に一時 ΔS_i が正となって土壌水分の貯留が起こる。冬から春にかけて ΔS_i は正となり貯留が増えていく。

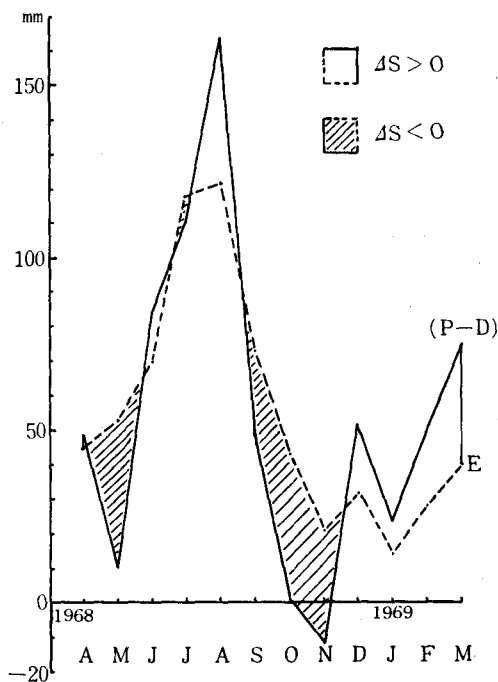


図4-2-1 (P-D) と E の季節変化——桐生
Fig. 4-2-1 Seasonal fluctuation of (P-D) and E at Kiryu

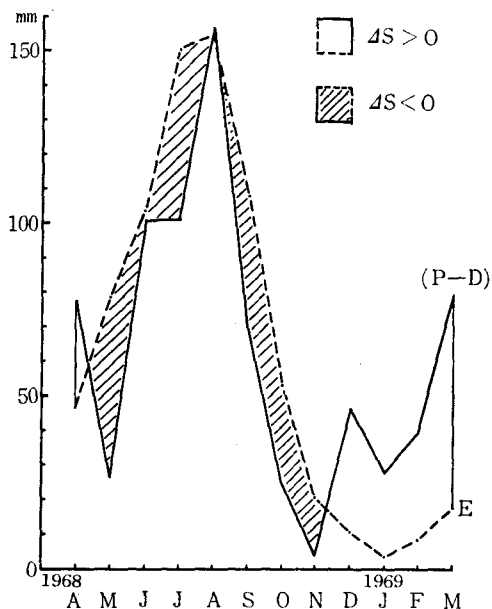


図4-2-2 (P-D) と E の季節変化——川向
Fig. 4-2-2 Seasonal fluctuation of (P-D) and E at Kawamukai

4月から翌年3月まで水収支表の各成分を積算していくと、各月までの降雨量、流出量、蒸発散量の積算値、および各月の貯留量が得られる。これを年間総雨量に対する百分率であらわすと各月までの降雨の各成分への配分状態、貯留の相対的な様相がわかる¹⁰⁾ [図4-3]。雨量の変化は両流域ともほとんど同じである。蒸発散量については、川向では桐生にくらべて雨量に対する蒸発散量の割合が高く、とくに春から夏にかけて著しい。また秋から冬にかけて川向の雨量に対する蒸発散量の割合はほとんど変わらないが、桐生では増加している。これはしゃ断による蒸発量の蒸発散量にしろる割合がこの時期に大きいことを示している。このような蒸発散量の変化のちがいは ΔS_i の積算値、すなわち貯留量の変化に反映している。

ΔS_i の積算値は各月の貯留量 S_i を与えるが、これは絶対量ではなくて、あくまでも水年はじめの貯留量を0とみなした相対的な値である。桐生についてみると、貯留量が春から夏にかけて

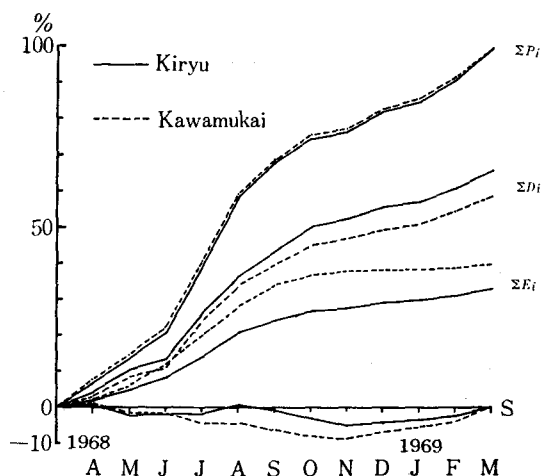


図4-3 年間総雨量に対する水収支式各成分の累積百分率の季節変化
Fig. 4-3 Seasonal progress of ΣP_i , ΣD_i , ΣE_i and S as percentage of total annual precipitation

減少し、一時8月に回復するがすぐ減少し、11月に最低となり、冬期蒸発散量が小さくなるにつれて回復し水年ははじめの状態にもどる。川向では桐生のように8月に回復することなく春から秋の11月の極値まで減少し、冬から春にかけて回復する。川向のこのような植物生育期における土壤水分の変化はあきらかに桐生にくらべ植物の生活にとって都合が悪いだろう。また年間を通じ川向の雨量に対する貯留量の割合は、桐生よりも小さく、水収支表において貯留量の負の極値は、桐生で 86.7 mm, 川向で 151.9 mm とかなりの差がある。水年はじめの土壤水分状態が両流域とも等しいとすれば、植物にとり川向流域は水分条件の悪さを示しているようだ。ところで貯留量には他の項 P_i , D_i , E_i , の誤差が集積されるのでこの貯留量の変化がそれらの誤差の範囲内にはいるおそれがある。そのため土壤水分測器により土壤水分の動きをとらえて貯留量変化の傾向をチェックすることがぜひとも必要となるだろう。

以上、桐生、川向両流域での水収支について考察してきたが、水収支式において今回は年間の E を P と D の差によって求める方法をとった。このように測定可能な成分の残差によって測定困難な成分を求める方法は、前者の測定誤差が後者にしわよせされることになる。また各月の D_i をそのまま D_i の項に計上することは検討を要する。ある月に降った雨はすべてその月に流出してしまうことはなく、一部は翌月以降にくり越すし、また先月の雨による流出分は一部今月の流出に含まれる。このようなくり越し分は水年のように十分長い水文期間をとれば等しくなるが一カ月という短期間では等しくない。厳密に各月ごとの水収支を求めるには、ハイドログラフの分離によりその月の降雨による流出量を求めねばならないだろう。さらに P_i , D_i , E_i , ΔS_i ともに独立に測定してそれぞれの誤差をチェックできるような方法の確立が今後に残された大きな課題である。

第5章 流出減衰曲線

桐生・川向両試験流域における無降雨期間中の流出の減衰曲線は、両流域の基底流出の特性をあらわし、地下水の貯留・流出機構の解明について示唆を与えてくれる。今回の報告では、その全般的な特性と今後の解析方法の検討を目的とした。

流出量の時間的な変化、すなわち減衰曲線の形状については、野口¹⁾・FRANCIS²⁾らによって報告されているが、流域によって変わる。しかしこの両流域における減衰曲線は、部分的には複数の指数関数で近似できることがわかった。

すなわち

$$\log Q_0 - \log Q_t = t \cdot \tan \theta_c \quad (1)$$

(Q_0 , Q_t ; 片対数紙上で直線とみなせる部分のそれぞれ初期流量, 終期流量 (m^3/hr), t ; Q_0 から Q_t までの継続日数 (day), θ_c ; 計算上の減衰勾配 ($^\circ$))

となる。

資料として、桐生では1968年3月～1970年11月(1969年6～7月分を欠く)、川向については、1968年3月～1970年10月の期間で、3日間以上無降雨日が続く流出を選び、これらすべてを片対数紙上にプロットした。この片対数紙上で直線とみなせる部分には線を引き、初期流量(Q_0), 継続日数(t), 紙上で読み取った減衰勾配(θ)をそれぞれ t , θ は0.5日, 0.5° きざみで、又、 Q_0 は2桁で記録した。計算上の減衰勾配 θ_c と紙上で読み取った減衰勾配 θ との関係は

$$\tan \theta_c = 0.384 \tan \theta$$

となる。以後、減衰勾配と言う場合、 θ を意味するものとする。この操作の例として、1970年8

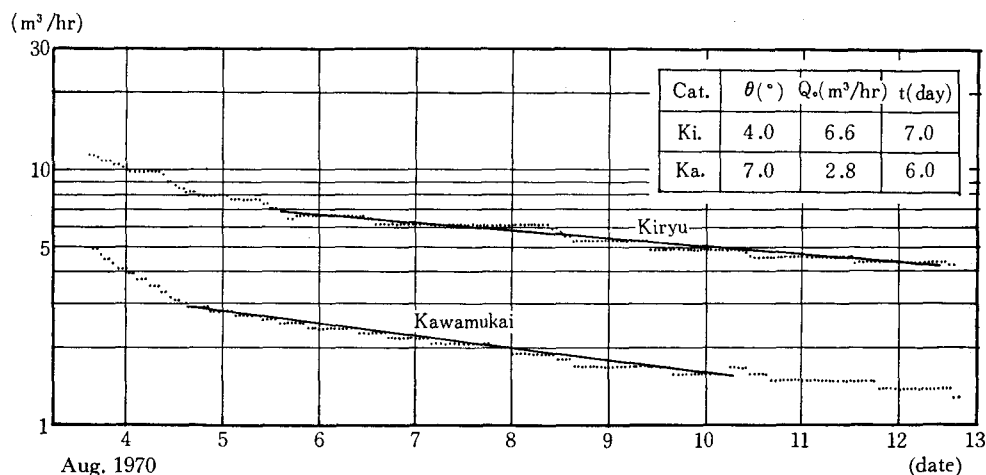


図-5-1 減衰曲線の1例

Fig.-5-1 An example of depletion curves

月3日の減衰曲線を〔図-5-1〕に示す。

以上のような操作で選んだ記録の内、継続日数が3日より少ないものは省き、3日間以上の全標本（桐生78点、川向65点）について、その減衰勾配の分布を示したのが〔図-5-2〕である。この図によると、分布の幅は両流域ともあまり変わらないが、ピークの違いが目立っている。即ち、桐生では 2° にピークがあるのに対し、川向では 5° であり、又、平均値でみると、前者で 4.1° に対し、後者で 5.3° となっており、川向の方が減衰勾配が大きいことがわかる。

次に、この傾向が継続日数の長さで、どう変化するかを見るために、横軸に継続日数の下限をとり、縦軸にそのグループの平均減衰勾配をとって、図示したのが〔図-5-3〕である。これを見ると、川向は桐生よりも平均勾配が大きく、7日以上続く標本については、もう減衰勾配が一定値に近づくものと思われる。一方、桐生では、7日以上継続日数で長くなれば、まだ平均減衰勾配は減少する。ただ、川向の10日以上継続日数の標本が7, 9, 11月の3点であるのに対し、桐生では10-2月の時期に8点が集中しているので、各季節の資料が等しくあれば、後者の最終平均勾配はもっと上がるものと思われる。

継続日数が短い標本は、数が多いが、基底流出以外の成分が入っており、信頼がおけない。

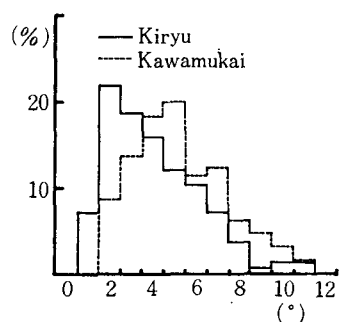


図-5-2 減衰勾配の分布（継続期間3日間以上）

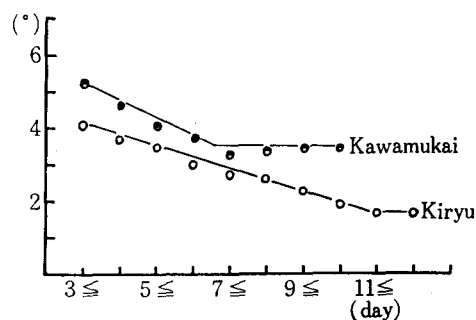
Fig.-5-2 Histogram of gradient (θ) ($t \geq 3$)

図-5-3 継続期間の増加に対する平均減衰勾配の関係

Fig.-5-3 Relation between duration (t) and average gradient (θ)

また、日数の長い標本は、基底流出による特性が顕著にはなるが、標本数が減り、季節的なパランスがとれない。

以上の点を考慮して、便宜的に継続日数が6日以上 of 標本について、更に検討を進めることにする。

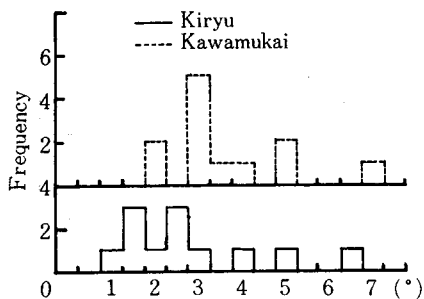


図-5-4 減衰勾配の分布 (継続期間6日以上で同年月日に発生した標本のみ)

Fig. 5-4 Histogram of gradient (θ) ($t \geq 6$, only samples at the same day)

次に、季節的な減衰勾配の変動をみるために、横軸に、3カ月ごとに1年を4区分し、縦軸に、それぞれの平均値を取って図示したのが〔図-5-5〕である。参考として野口⁴⁾の結果から東大愛知演習林内の東山、穴の宮流域の減衰勾配を記入した。減衰曲線の季節的な変動については、遠藤³⁾・野口⁴⁾らによって報告されている。桐生、川向両流域とも夏に勾配が高く冬に低い傾向は、東山、穴の宮と比較しても、良く似ている。但し、その変動は桐生の方が、川向よりも大きい。

また、横軸に初期流量を水高で表わし、それと、勾配の関係を示したのが〔図-5-6〕である。一応、両流域とも、初期流量の増大に対して勾配が大きくなる傾向がみられる。この中央と思われるところに直線を引いてみると、桐生よりも、川向の方が、流量の増大に対する勾配の変化率が大きい。また、この傾向のばらつきは、明らかに桐生の方が大きい (流量 5×10^{-2} mm の時、川向で $2^\circ \sim 5.5^\circ$ に対し、桐生 $1^\circ \sim 5.5^\circ$ 、又 $10 \times$

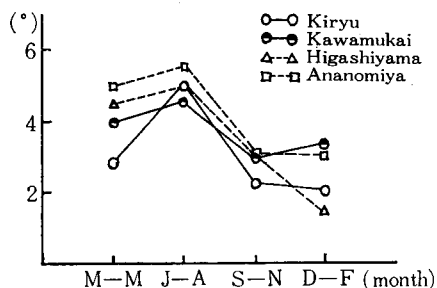


図-5-5 平均減衰勾配の季節的变化

Fig. 5-5 Seasonal fluctuation of average gradient (θ) ($t \geq 6$)

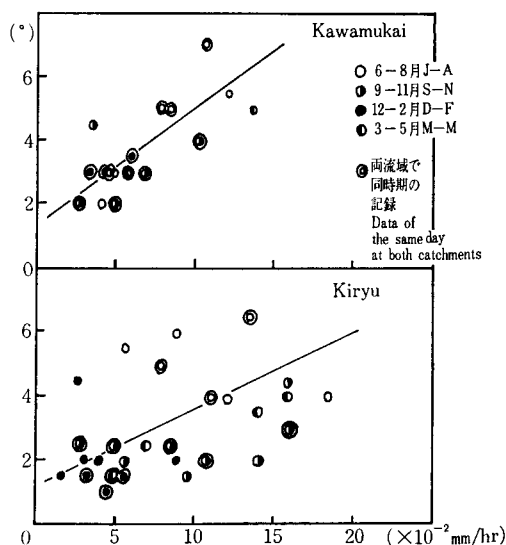


図-5-6 初期流量と減衰勾配の関係

Fig. 5-6 Relation between initial discharge (Q_0/A) and gradient (θ) ($t \geq 6$)

10^{-2} mm の時、川向で $4^{\circ}\sim 7^{\circ}$ に対し、桐生 $1.5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 。◎印は両流域とも同時期に起こった減衰曲線の勾配であるが、これでも、ばらつきは桐生の方が大きくなっている。

以上の結果から以下の事を推測できる。

1) 概して、桐生の方が、川向に較べて減衰曲線がゆるやかに変化している。すなわち、地下水貯留量の変化が少なく、流域としての貯留能力が大きいといえる。

2) 桐生で、片対数紙上で直線とみなせる期間が7日以上続く資料では、まだ定まった減衰勾配を表わさないが、川向で、同じ7日以上資料では、ほぼ安定した勾配を表わしている。これは、桐生の方が、地下水貯留機構がより複雑で、浸透してから流出するまでの所要日数が、より長いと考えられる。

3) 減衰勾配の季節的な変動について、夏に勾配が大きくなり、冬に小さくなる傾向、すなわち、夏には流出量の減少が早い傾向は野口の結果とも似ているが、現在の資料では、それよりも変動は少ない。この傾向をもたらす原因としては、蒸発散量の季節変動と、夏に強雨が多く、初期流量が大きくなり、従って減衰勾配が大きくなるという両面の影響があるので、量的な問題になると、即断はできない。

4) 桐生の方が、川向に較べて地下水貯留量が多く、かつ、より深いところに地下水層が存在すると推定できることから、蒸発散量の季節変動が減衰勾配に影響するとしても、川向と同じぐらいか、むしろその変動は小さいと考えられる。とすれば、初期流量別にプロットした勾配のばらつきが桐生で大きく、川向で小さいということの原因は、地下水帯へ流入する浸透水量の変化によって起こっているとも考えられる。

5) 川向の場合、季節ごとに標準減衰曲線を作成することによって、基底流出と表面流出を分離することは可能であろう。但し、季節的な蒸発散量を問題とする場合、より多くの資料で、標準曲線を推定する必要がある。何故ならば、標準曲線によって出した基底流出量は、常に、真の基底流出量よりも多くなる傾向があり、蒸発散量を過大に見る危険があるからである。また、この方法で求めた蒸発散量の推定値は、他の方法で得た蒸発散量と比較しておく必要があろう。

6) 桐生の場合、特に冬期以外の季節の資料をもっと加える必要がある。現在のところでは、標準減衰曲線の作成は、季節に別けても、困難である。また浸透から貯留までの機構を、その質と量の点において解明しなければならないであろう。

第6章 総 括

今報告で対象とする桐生・川向両試験流域はそれぞれ、草津川・吉祥寺川流域に含まれる平均的な流域とみなして良いであろう。

草津川・吉祥寺川両流域は、地質的には同じ粗粒花崗岩であり、走向・傾斜ともほぼ等しい。又、距離もたかだか数 km 以内の近接した位置にある。しかし、地形的にはかなりの相異がみられる。前者は急流部が流域境界付近にあり、河床縦断では、ほとんど遷移点がない。後者は中流部に急傾斜部があり、更にその上流に緩傾斜部が認められ、河床縦断でも遷移点が多い。また前者は後者に較べて、order 解析では第1 order の水路長が長く、谷密度が小さい。また *hypsometric curve* から前者は老年期、後者は満壮年期の形態的特長を示している。この地形的な差異は、地殻運動の差があった、もしくは基岩の侵食に対する抵抗性の違いがあった、もしくはそれらが複合している、と考えられる。いずれにせよ、現在の資料からでは断定はできない。

この地形的な差は両試験流域にもあらわれており、河床平均勾配が桐生で $7^{\circ}30'$ に対し、川向

で11°となっている。また前者が、一様な形をみせているのに対し、後者では急部と緩部が交互にみられる。前者では流域下流部の主流へ直接入る斜面が急勾配であり、上流部に緩傾斜部が認められるのに対し、後者では量水堰付近にわずかに緩傾斜部が見られるのみで、それ以外は全体に急斜面が分布している。また斜面の方向では、前者に北斜面が多いのに対し、後者に南西斜面が多い。起伏量については、前者が大きく、大きな侵食を受けたことを示すが、後者は小さく、まだ侵食を受ける可能性が大きいといえる。一方、この観察は、前者でほとんど流出土砂がないのに対し、後者で $40 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}^{1)}$ 程度の土砂が量水堰に出ている事実と矛盾していない。百分率高度一面積曲線においては、高度50%以上の面積が前者で60%に対し、後者で45%となり、前者が後者より、より高い高度での地下水貯留が多いと考えられる。

植生について、桐生は全域にわたって樹冠はほぼ閉鎖しており、 A_0 層がよく発達している。東斜面のアカマツ林が西斜面のヒノキ・アカマツ混交林に較べて生育が劣っていると認められる以外には、斜面の方向と植生の関係、及び傾斜と植生の関係について明らかな相違は見い出されなかった。又、河道部分には土砂が堆積しているが、流路以外は雑草木が良く繁茂している。一方川向では、流域の90%以上が植物体に被覆されているが、一部に露岩地があり、全体としては、植生は貧弱であり、生育状態も良くない。全般に土壌の状態も悪く、 A_0 層がみられるのは流域中にわずかであり、落葉落枝類は表土と共に流亡しているようである。また、河道部分は、土砂の移動が思ったより激しいのか、植物体があまり進入していない。

次に、水収支の結果から両流域をみると、流出率の季節的な変化は類似しており、そのピークは5・7・11月にあらわれる。又、半年間の流出率でみると、桐生では前半(4—9月)で64%、後半(10—3月)で70%、川向ではそれぞれ58%、62%となり、両流域とも夏期の流出率が低い。これは、年間蒸発散量の内、桐生で73%、川向で85%を夏期に占めることになるから、当然の傾向であろう。しかし、前者が後者よりも流出率が高いという点については、後者の地下水が逃げていいる可能性もあり、今回は言及しないでおく。

貯留部分の変動については、両流域共、冬から春にかけて貯留量が増大し、春から秋にかけて減少する。夏に一時的に貯留量が増えることはあるが、11月には最低位となる。

一方、減衰曲線の特性からは、桐生の方がより浸透→貯留→流出の速度が遅く、減衰が緩慢で、流域としての貯留機能が優れていると言える。

次に、研究当初から疑問であった点、すなわち、川向では桐生に較べて、何故、植物の生育状態が悪いのか、また、何故、生産土砂が多いのかという点について、不十分ながらも、現時点なりの解釈はしておく必要はある。

まず、後者に対しては、地形を形態的にみると、桐生の老年期に較べ、満壮年期の特徴を示していると考えられ、その故に現在の侵食活動が活発であると理由づけられる。但し、大きな問題として、同じ粗粒花崗岩であり、かつ外部的な環境条件の差は、ほとんどないといって良いであろう両地域にこのような発展の差が生じたのは何故かという疑問が新たに生じた。

前者に対する解釈としては次のように考えられる。今、田上一帯について南斜面にせき悪地が多いという結果が出ている。川向においてもこの傾向がみられる。しかし、桐生には南斜面があまり存在しないので、草津川流域における南斜面についてみると特に生育状態が悪いと思われる林はない。また両流域の外的環境条件は、先に述べたように、ほとんど同じとみて良いであろう。とすれば、両流域の植生の差はむしろ内的な環境条件の差が影響しているとみた方が合理的であろう。すなわち、桐生の方が侵食に対する抵抗性が小さいとすれば、風化層は川向より厚いと思われる。この点から土壌水分の貯留量が大きくなる。そして現在侵食活動が衰えているから、土

砂や、落葉落枝類の移動が少ない。この結果 A_0 層が形成され、土壌の物理性・化学性からみても、植物にとって良好な環境となってくる。この逆が川向であられるのであって、全般的に流域の内的環境が悪いため、特に、南斜面で水分条件の制約を受けやすい、と考えられる。

いずれにせよ、新たに生じた疑問を解決することが、この解釈の正否を決めることになる。

本研究については、砂防工学研究室、森林生態学研究室の諸氏の協力を得ている。また、特に武居有恒氏、堤 利夫氏、岩坪五郎氏には有益な助言をいただいた。桐生試験流域の開設については大津営林署の、また川向資料の借用については建設省琵琶湖工事事務所の好意を得た。桐生・川向両流域の観測は古川氏一家、北川氏一家の労による。橋本 翠さん、田崎公子さんには資料の整理を手伝っていただいた。誌上を借りて、厚く感謝します。

引用文献

第1章

- 1) 建設省琵琶湖工事事務所：瀬田川の砂防
- 2) 赤木正雄：大正・明治日本砂防工事績に徴する工法論——草津川流域
- 3) 福井英一郎編：自然地理・応用地理第2巻——気候学，(1962)
- 4) 上山春平編：照葉樹林文化，(1969)

第2章

- 1) 松下 進：日本地方地質誌——近畿地方，(1953)
- 2) 中野尊正・吉川虎雄：地形調査法，(1951)
- 3) 山本莊毅編：地球科学講座第9巻——陸水，(1968)
- 4) Strahler, A. N.: Quantitative analysis of watershed geomorphology, A. G. U., **38**, No. 6, 913-920, (Dec. 1957)
- 5) Schumm, S. A.: Evolution of drainage systems and slopes in badland at Perth Amboy, New Jersey, Bull. Geol. Soc. Amer., **67**, 597-646, (1956)
- 6) 松田博幸、奥西一夫：田上山地の禿山の地形学的特性，京大防災研年報，第13号A, 541-555, (1970)
- 7) 竹下敬司：山地の地形形成とその林業的意義，福岡県林業試験場時報，第17号，(1964)
- 8) Strahler, A. N.: Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, Bull. Geol. Soc. Amer., **63**, 1117-1142, (1952)

第3章

- 1) 岡本省吾：田上山の植生調査報告書——瀬田川流域砂防調査報告（その2），71-75，(1957)
- 2) 長谷川秀三：卒業論文，(1968)

第4章

- 1) Thornthwaite, C. W.: An approach toward a rational classification of climate, Geogr. Rev., **38**, 55-94, (1948)
- 2) 吉良竜夫編：生態学大系第II巻上——植物生態学2，185-193，古今書院，(1960)
- 3) 正務 章：山岳集水域の水収支の解析と今後の課題，水利科学，No. 48, 1-18, (1966)
- 4) Rutter, A.: Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions. 1. Measurements of rainfall and interception., J. Ecol., **51**, 191-203, (1963)
- 5) Patric, J. H.: Rainfall interception by mature coniferous forests of south-east Alaska, J. Soil Water Conserv., **21**, 229, (1966)
- 6) Helvey, J. D.: Interception by eastern white pine, Water Resources Res., **3**, 723, (1967)
- 7) Rutter, A.: An analysis of evaporation from a stand of Scots pine. In "Forest Hydrology" (Sopper, W. E. and Lulls, H. W., eds.), Pergamon, Oxford, 403-417, (1967)
- 8) 金子 良：水収支特性の地形別類型 (I)，水利科学，No. 73, 42-61, (1970)
- 9) Kittredge, J.: Forest influences, McGraw-hill, New York, 108-109, (1948)
- 10) 正務 章：山岳地域の水文気象に関する解析的研究，気象庁研究時報，**16**, 1-50, (1964)

第5章

- 1) 野口陽一：森林の影響，地球出版，101, (1963)
- 2) Francis, R. H.: Base-flow recessions—A review, Water Resources Res., **4**, 973-983, (1968)
- 3) 遠藤泰造：森林の伐採と日減水レートについて，67 回日林講，297-302, (1957)

4) 野口陽一：季節的地下水正常漸減および蒸発散量推定への応用，日林誌，185-189, (May, 1960)
第6章

1) 福嶋義宏，武居有恒：荒廃山地の斜面流出土砂について，第5回災害科学総合シンポジウム講演集，21-22, (1968)

Résumé

We continue to study the interaction between hydrologic cycle and forest, in the two mountainous basins, namely, Kiryu and Kawamukai catchments, where located on the south-east of Lake Biwa. The former is 5.99 ha. in area and the latter is 2.66 ha.. Air temperature, precipitation and run-off are measured at both catchments. The observation was started in 1968 at the former and in 1961 at the latter.

In this report, we intend to clarify the characteristics of atmospheric phenomena, vegetation, topography, water balance and run-off depletion curves, in comparision between Kiryu and Kawamukai catchments. Here we will give an outline of results;

1. Kiryu and Kawamukai catchments are the tributary of the River Kusatsu and the River Kisshoji respectively, and both are consisted of weathered granite. The terrain at both catchments is about 180-260 meter in altitude. Moreover, the distance between both catchments is only several kilometers.

2. The annual precipitation and the monthly distribution of the precipitation (Apr. 1968-Mar. 1971) are nearly equal at both catchments. The air temperature at the former faced to the north side is slightly lower than at the latter faced to the south-west side.

3. Formerly, the soil conservation work was done to prevent erosion, and the plants such as *Pinus* and *Alnus* were afforested at both catchments. Now, at the former, the surface coverage of the plants such as *Chamaecyparis obtusa* and *Pinus densiflora* is comparatively satisfactory for the most part. At the latter, however, the denudation or the thinning tendency of the stand is observed as a whole.

4. In regards to topography, the former reveals a low slope angle on an average and a mild change in a longitudinal profile and is small in drainage density, as compared with the latter.

5. The tendency of the observed groundwater storage increaces from winter to spring and decreases from spring to autumn. Nevertheless, it seems that the soil moisture in the summer season at the latter is less than at the former.

6. From the analysis of run-off depletion curves, it seems that the former is better in capacity of groundwater storage than the latter.

The matter that will be conjectured from above results is as follows;

The denudation or the thinning tendency of the stand at Kawamukai catchment seems to be mostly caused by shortage of soil moisture. As the outside condition of the circumstance is hardly different between both catchments, in disregard of exposure difference of two catchments, the remarkable difference of the catchment characteristics may be caused by topography. But the reason why that difference of topography occured is not clear.