

治山工施工と森林の成立に伴う流況変化

中野秀章・山村烈也

信州大学農学部 森林工学科

はじめに

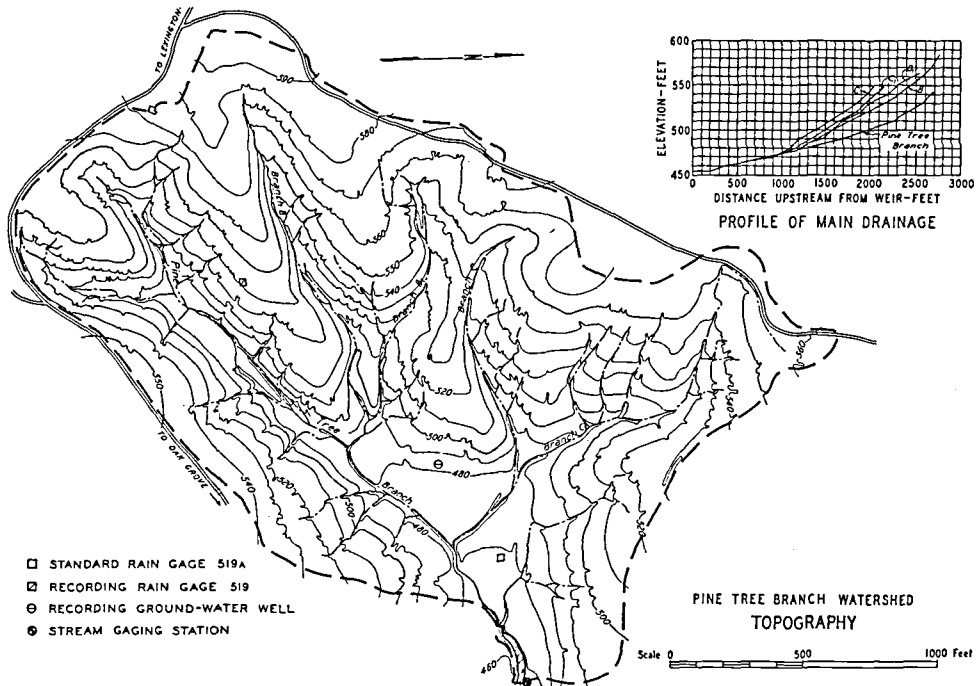
治山工施工の水保全効果についてはいくつかの調査研究成果がある。しかしそのほとんどは短期のいわゆるプロット試験によるもので、現実流域で長期にわたって調査した例、ことに荒廃流域に治山工を施工し、樹木を導入して森林を造成し、うっ閉林の成立をみるまで経年的に調査した例は、従来、わが国にはみられない。しかし近年重要水源山地整備治山事業その他で、林野庁によってこの種の調査が進められており、その成果がおおいに期待される。外国でもこの種試験の成果はほとんどないと思われるが、アメリカ合衆国に一つの例がある。すでに筆者はかがしばしば紹介してきた¹⁾パイントゥリーブランチ (Pine Tree Branch) 試験である。

さきの大戦後世界各国の国土総合開発事業のモデルになったテネシー (Tennessee) 河流域開発事業の中で行われた、荒廃流域への森林復旧の水保全効果を究明するための試験である。その報告書の一つ²⁾には重要な成果が詳しく報告されており、貴重な参考資料である。しかもその際治山工施工前の5年を含めて荒廃流域からうっ閉林成立に至る20年間の水文資料のうち日降水量と日流出量、直接流出量の日合計量、基底流出量の日合計量が表示・公表されている。

そこでこれらの資料を用いて原報告では行われていない、流況に関する検討を試みたのでその結果をここに報告する。なおこの資料の信頼性については原報告の記述及び現地視察で認められている。この長期試験にあたられた研究者に深甚の敬意を表する。

1. 試験流域と試験の概要

この試験流域はテネシー州ヘンダーソン (Henderson) に位置し、面積35.7ha、起伏の少ない丘陵性の流域である (図一1)。高度137~181m、地質は未固結砂質岩で、土壤はシルトローム、シルティークレイローム、ファインサンディーローム等である。水文観測開始の1941年現在で、地被は森林23%、畑地16%、放牧草地9%で、放棄された畑地と荒廃地が50%、その他2%であった。放棄された畑地と荒廃地には雑草におおわれた部分もあり、樹木の点在も見られたが、深さ3mにも及ぶガリー侵食を含み、侵食の激しい裸地が点在していた。元来この土地は全面的に森林であったが、本試験開始のほぼ100年以前に開拓され、わた・とうもろこし等の栽培が行われてきたもので、その後放棄された一部耕地がやがてホワイトオーク (*Quercus alba*)、レッドオーク (*Q. borealis*) 等オーク類を主とし、多様な広葉樹の混交林に、極小部分のある種のマツ林分を含むぎわめて低質の二次林にもどったも



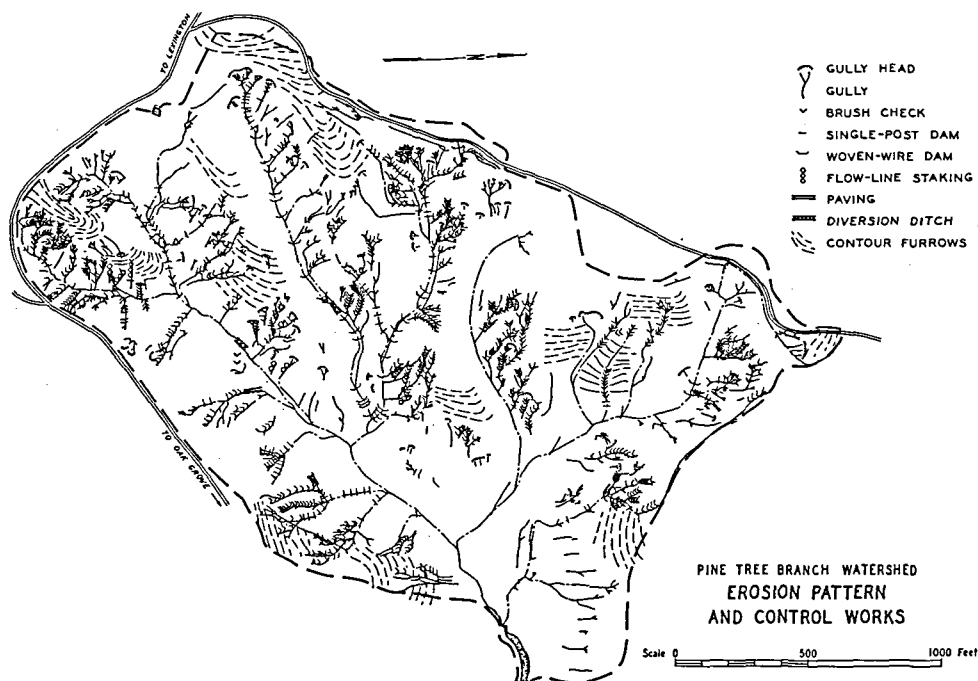
図一 試験流域の地形

のであった。草地も重度の放牧で荒されたものであった。以上のような地被状態は本試験開始当時の当該地方の典型であり、テネシーバレイ開発公社 (Tennessee Valley Authority) はこの土地を買いとり、ここに森林を復旧したとき水流出と土壌の侵食・流出がいかに変化するかを試験することとしたのである。

試験は1941年1月水文本観測開始で始められたが、1945年までキャリブレーション期間として流域は地被荒廃の原状のままおかれた。その後簡易な治山工が施工された上、治山造林が行われ、終了時未定で水文観測等がつづけられたが、1960年までの20年間の結果が中間報告²⁾として公刊された。

地被については1945年まで森林は23%で推移したが耕地が9%に減少し、放棄された農地と荒廃地が47%に減少して放牧草地と野草地が20%に増加した。そして1945年11月から1946年3月にかけて治山工が行われた。すなわち金網谷止工36か所、杭打そだ積谷止工185か所、そだ立工919個、流路床被覆工1,800m²、そだ伏工80m²、木柵工2,800m、等高線溝工3.3ha等が施工された (図一2)。

ついで1946年春から樹木植栽が開始され、この年計画面積の90%が行われ、1947~1948年に残り10%が行われた。植栽木の樹種別本数はロブローパーイン (*Pinus faeda*) 78,200本、ピッチパイン (*P. rigida*) 8,100本、スラッシュパイン (*P. elliotii*) 4,200本、ロングリーフパイン (*P. longifolia*) 5,200本、ニセアカシア (*Robinia pseudoacacia*) 3,800本、イエローボプラ (*Liriodendrom fulpifera*) 1,100本等約100,700本であった。とくにニセアカシアは谷止工等の周辺とガリーの中に植栽された。そして1950年には96%被覆率の天然生二次



図一 試験流域の侵食パターンと治山工

林が33.2%、植栽マツ林が被覆率99%の優良林52%、あわせて面積率85%となり、植栽林でいちおう被覆率45%になったもの7.2%、被覆率25%で疎なもの6.0%、あわせて13%で、ほぼ全域に森林が復旧した。そして、たとえばロブローパインは胸高直径平均5 cm、樹高3.4mに達した。ピッチパイン、スラッシュパイン等もこれに近い生長をとげた。しかしロングリーフパインは生存率が低く、イエローポプラは雑草に被圧され、獣害をうけて残存率・生長とも不良であったし、また過去激しい侵食をうけた区域の林木生長は不良であった。これらのため約5 haは被覆率は50%以下で、ここにはアフリカラブグラスの播種による草本の追加導入が行われた。

ともかく、かくして森林はしだいに良好なものとなり、1961年春には100%被覆率の森林面積率が75.5%、70~99%被覆率のそれが21.4%、40~69%のそれが1.5%、その他1.6%となり、流域の大半がうっ閉林でおおわれた。樹種別にみると流域の85%が常緑のロブローパインを主とするマツ林で占められ、その胸高断面積合計17.8m²/ha、材積118m³/haで、残余25%がサザンレッドオークを主とする広葉樹で胸高断面積合計は10.6m²/haであった。本数は胸高直径1.3cm以上のもの2,050本/haで、このうち90%はマツであり、同じく18cm以上のそれは10%であった。なおこの時期には林床のほとんどが2.5cm前後の厚さの林床物でおおわれた。

つぎに降水量測定は普通雨量計1個、自記雨量計1個で行われた(図一1)。また流量測定はコロンバス型量水堰に自記水位計を設置して行われた(図一1)。

2. 水 文 資 料

前記報告書に水文観測結果のうち各年の月降水量、年降水量、各年の月流出量、年流出量、基底流出量の各月及び各年合計量（以降年もしくは月基底流出量と呼ぶこととする）、直接流出量の各月及び各年合計量（以降年もしくは月直接流出量と呼ぶこととする）がin単位の水高で表示されており、これをmm単位に換算してこの検討の資料とした。

ここで年降水量の経年傾向をみると図-3のとおりで、平均年降水量1,280 (719~1,722) mmである。なお雪はほとんどなく平均でわずか2%である。同様にして年流出量の経年傾向をみると図-4のとおりで、年降水量のそれに符合する傾向がかなり認められるが、その上でさらに強い経年傾向の変動がみられる。さらにその直接流出量と基底流出量の配分関係をみると全期間の初期と後期では大きく異なっていることが一見して認められる。このこと

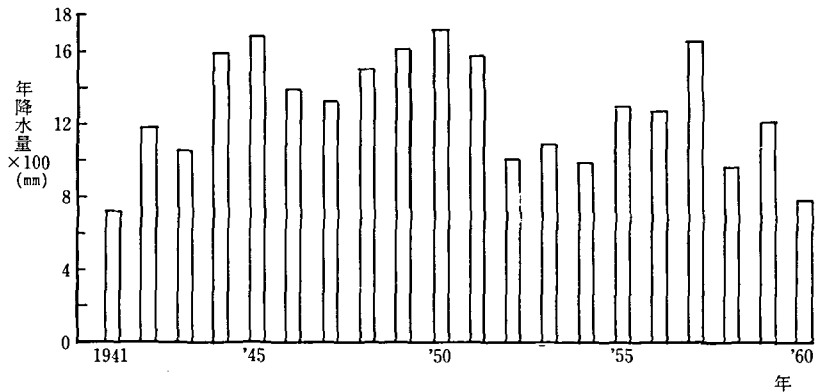


図-3 年降水量の経年傾向

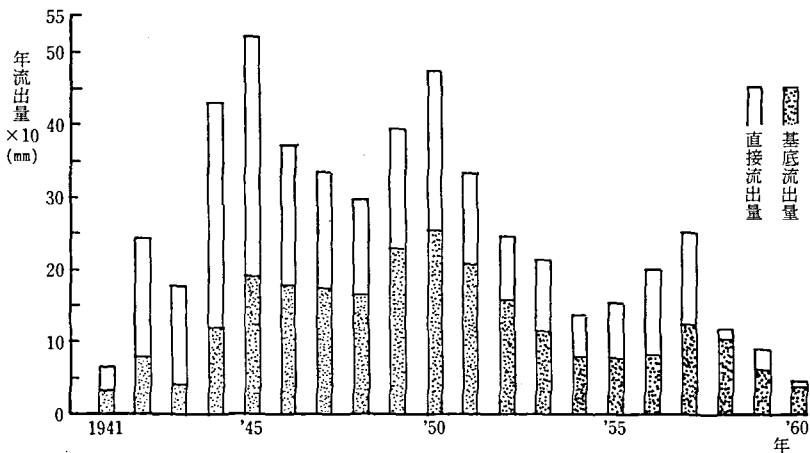
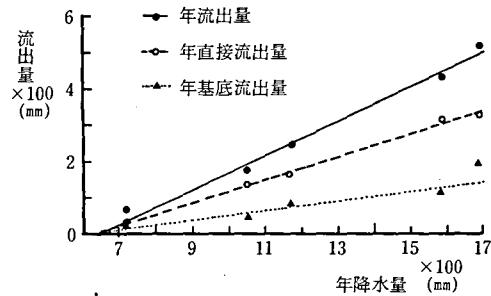


図-4 年流出量・年直接流出量・年基底流出量の経年傾向

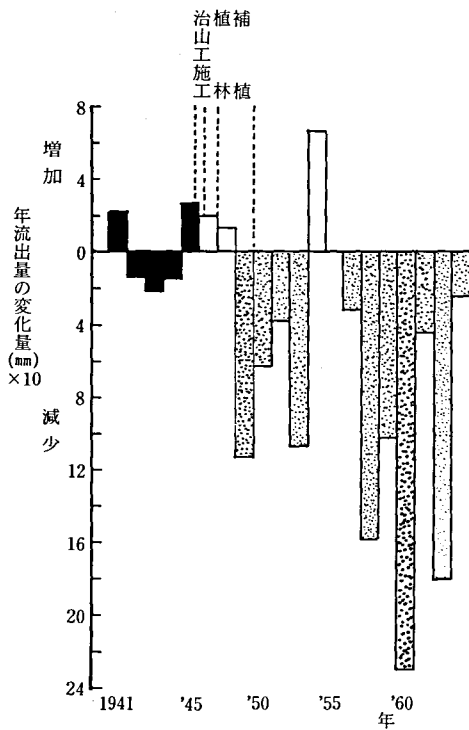
に着目して以下検討する。

3. 治山工施工及び成林による流況の変化

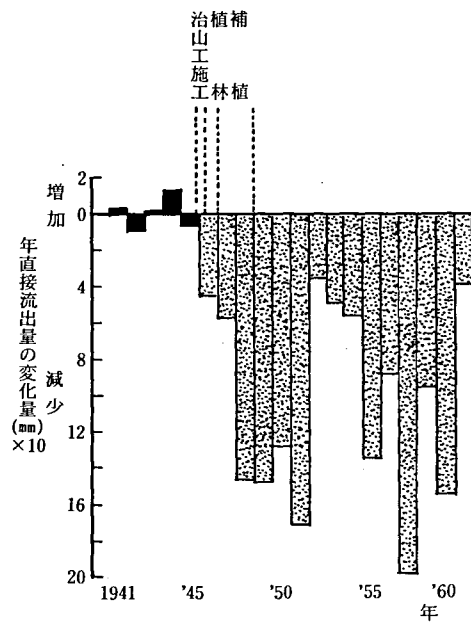
まず基準期間（地被条件の経年変化のきわめて少ない期間）、すなわち治山工施工以前の1941～1945年期間における年降水量（P）と年流出量（R），年直接流出量（ r_d ），年基底流



図一五 基準期間（1941～1945）における年降水量と流出量の関係



図一六 処理期間（1946～1960）における年流出量の経年変化



図一七 処理期間（1946～1960）における年直接流出量の経年変化

出量 (r_b) との関係を見ると図-5のとおりで、いずれも直線関係で認められる。

$$R = 0.4663P - 292.6 \text{ (相関係数 } 0.993)$$

$$r_d = 0.3167P - 198.9 \text{ (" } 0.997)$$

$$r_b = 0.1495P - 93.7 \text{ (" } 0.915)$$

この各関係を用いて、1946年以降1960年までの各年のもし試験処理すなわち治山工施工及び植林が行われなかったとしたときの各流出量を推定し、その推定値に対する各年の推定値との差を試験処理の影響と考え、その経年変化を求めると図-6, 7, 8のとおりである。年流出量は治山工施工、植栽が終了した1948年以降1年を除いてすべて減少した。減少量は年による変動が大きいが年降水量の大小に多少の関連が認められる。この年流出量のうち直接流出量についてみると治山工施工の当年から各年すべてに減少となっている。当然この場合もその減少量は年降水量の大小に多少の関連が認められる。しかし年基底流出量については治山工施工の当年から1954年まで9年間は増加量の小さい年もあるがすべて増加となっており、その後は減少もしくは増加で、変動量は概して小さく、前述推定式の誤差の範囲かも知れない。年直接流出量と年基底流出量の変動の結果が年流出量の変動結果となっているこ

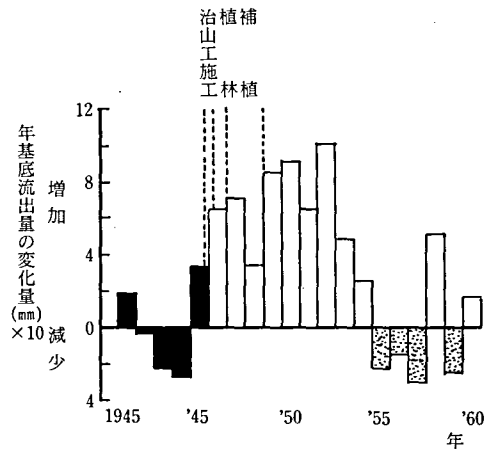


図-8 処理期間 (1946~19960) における年基底流出量の経年変化

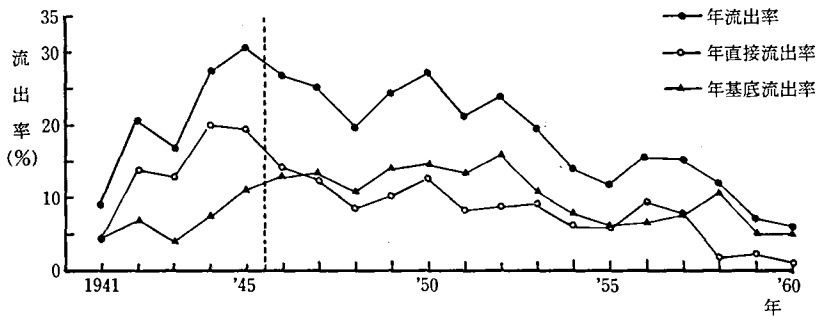


図-9 年流出率・年直接流出率・年基底流出率の経年傾向

とは当然である。数値は推定式の誤差のため完全には一致していないがほぼ整合している。とくに1952年には年基底流出量の増加が大きく、一方年直接流出量の減少が小さいため年流出量が増加となっていることが注目される。

年流出量のうち量的に大きい部分を占める年直接流出量の経年変動は年降水量のそれに多少の関連がみられ、したがって年流出量のそれも同様の関連がみられるが、年基底流出量のそれにはほとんどそれがない。そこでつぎに各流出率の経年傾向をみると図-9のようである。個々の年についてみるとやはり年降水量の大小に関連した変動が、とくに年流出率、年直接流出率について多少みられるが全体の経年傾向としては後年ほど両者は小さくなる傾向が明らかである。しかし年基底流出率についてもわずかに類似の傾向がみられるが前二者に比べて後年の減少程度が比較的小さいことが認められる。このことをさらに少し詳しくみるためそれぞれ流域の荒廃地期（基準期間、1941～1945年）、治山工施工後の幼齢林期（試験処理後の前期間、1946～1953年）、うっ閉林期（試験処理後の後期間、1954～1960年）の3期間に便宜的に区分して年降水量との関係を見ると図-10のようになる。これによって年流出率、年直接流出率、年基底流出率のいずれも荒廃地期には年降水量とともに増加する傾向が程度の差はあるが認められる。これに対して幼齢林期ではいずれもこのような傾向はきわめて少ない、ことに年基底流出率についてはほとんど認められない。

つぎに各年の流況をかりに月流出量、月直接流出量、月基底流出量によってみると、図-

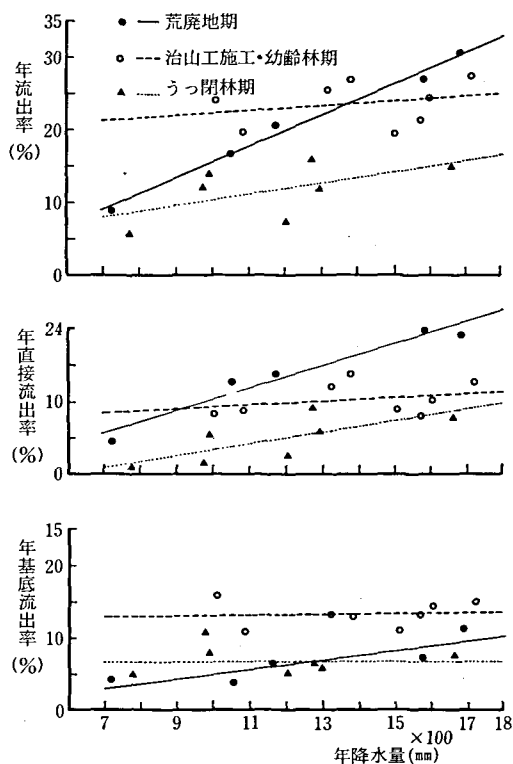


図-10 年降水量と年流出率・年直接流出率・年基底流出率の関係

11, 12, 13のとおりである。月流出量による流況曲線は荒廃地期には年降水量の多少にかかわらず比較的直線的であるが、治山工施工・植栽期、幼齡林期、うっ閉林期にはL字型曲線となり、しかも小さくて変動の少ない月が多くなっていることが認められる。このうち荒廃地期における流況曲線の直線性については図-14に示す月降水量の各月分布態様にも関係があることが推定される。しかし後期に月流出量の小さい値の月が増加していることは月降水量各月分布態様からは推定できない。同様にして月直接流出量による流況曲線についても荒廃地期のそれは月流出量のそれと類似であるが、治山工施工以降森林の成長とともに明らかに小さい値の月が増加し、かつ流況の安定化が進んだことが認められる。このことについて月降水量の各月分布態様との関係はあまり認められない。

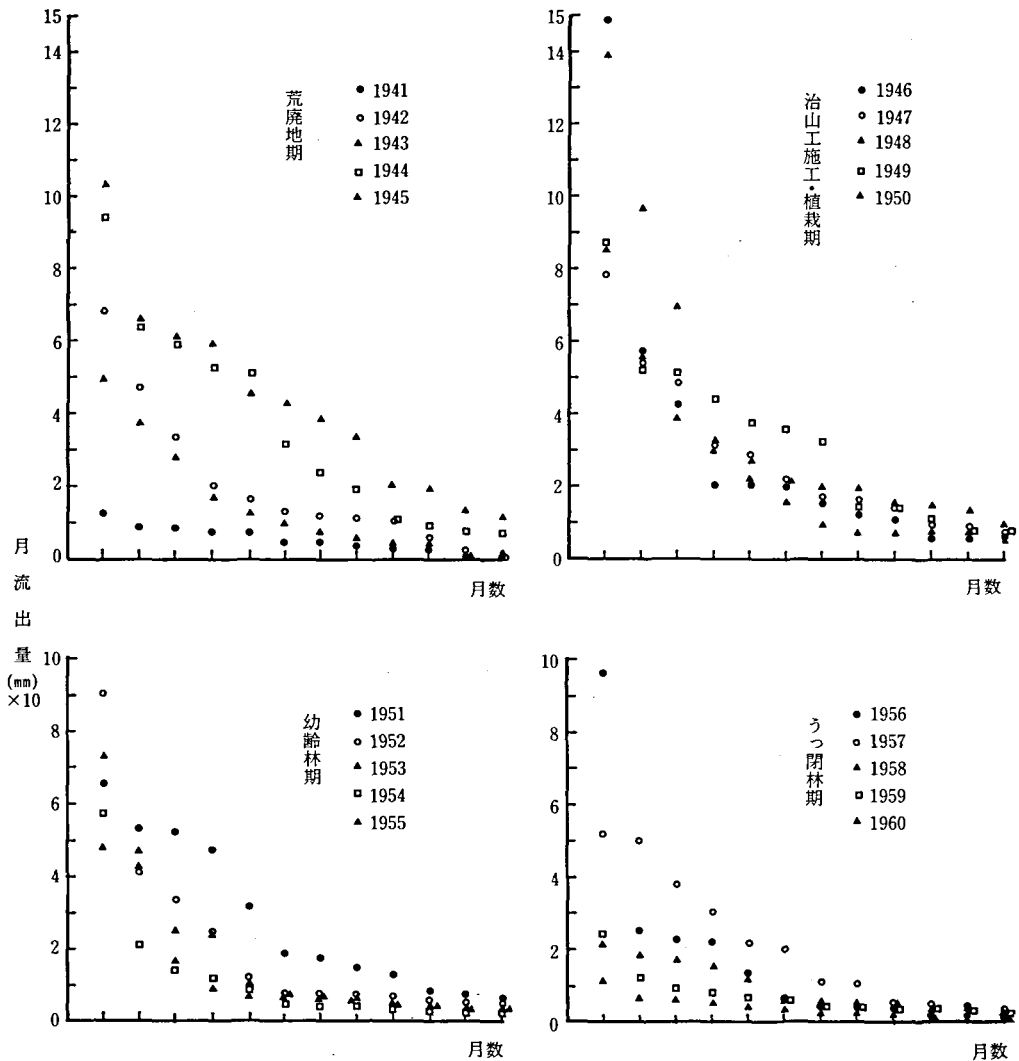


図-11 月流出量による流況

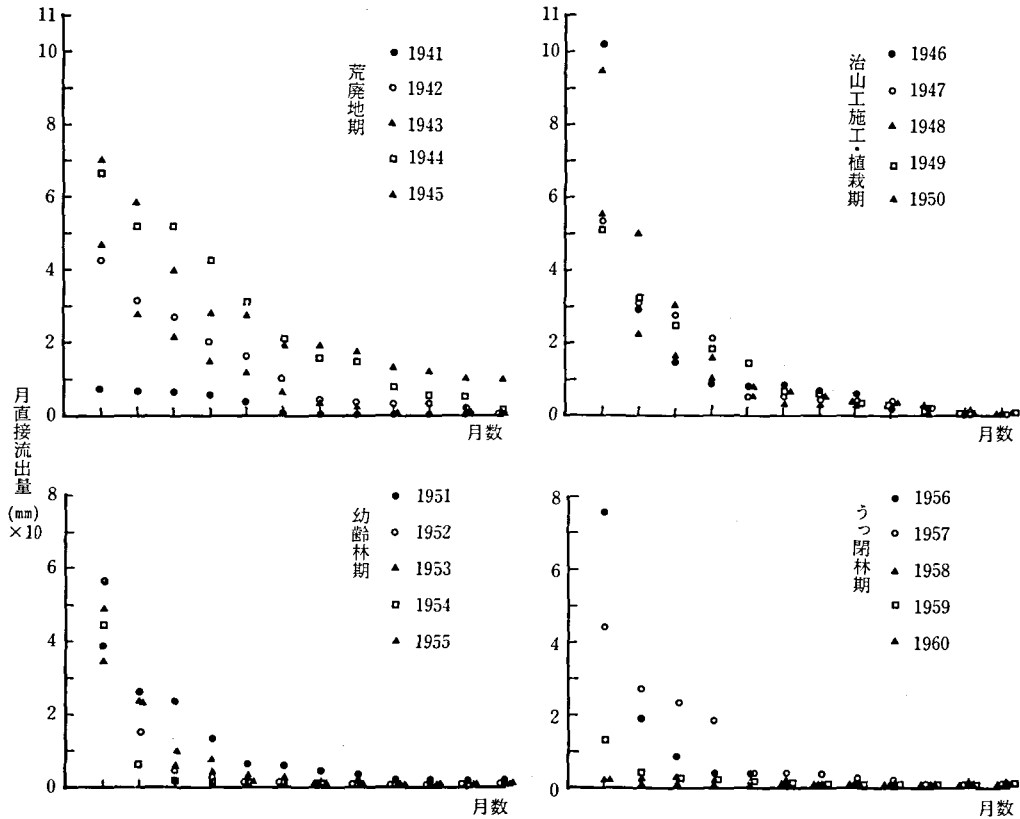


図-12 月直接流出量による流況

さらに月基底流出量についてみると、荒廃地期については前二者の場合に類似の直線的流況がみられるが治山工施工以降流出量の少ない各月で増加し、しかも安定化傾向を示すことがみられ、これらと月降水量の各月分布態様との関係はほとんど認められない。

さらに各年の最大月流出量と最小月流出量の比の経年傾向をみる(図-15)と、荒廃地期では非常に大きい値もあり、変動が大きい、治山工施工以後1956年の1例を除いて他は小さく、かつ変動はほとんどない。同様にして最大月直接流出量と最小月直接流出量の比の経年傾向をみる(図-16)と、非常に大きな値は荒廃地期に3か年、治山工施工以降に2か年であるが、これらはいずれも極端に月降水量の少ない月のある年にあらわれている。これら以外でも変動が大きく、簡単な傾向を認めがたい。これに対して最大月基底流出量と最小月基底流出量の比の経年傾向(図-17)は荒廃地期にはいずれも値が大きく、かつ変動が大きい、治山工施工後は後年の2か年を除いて他は値が小さく、かつ変動がきわめて少ないことが認められる。とくに治山工施工後10年間に顕著である。これらに対して年最大月降水量と年最小月降水量の比の経年傾向は図-18にみられるとおりで、1951年;1952年に他の年より大きい比がみられるが、全体としてこの20年間に特別の変動はみられない。上記の経年傾向に降水量が強く影響していることは考えられない。

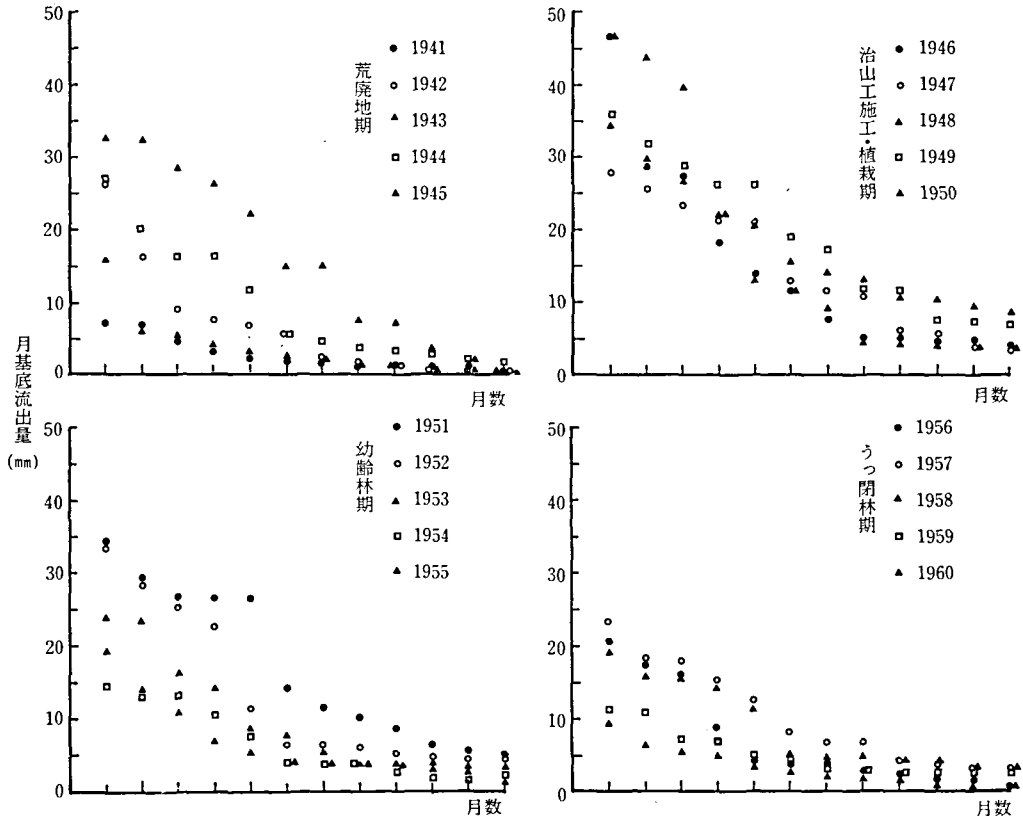


図-13 月基底流出量による流況

以上治山工施工後年直接流出量が減少し、逆に年基底流出量が少なくとも8~10年間について増加したものと考えられる。年流出量の主体を成す年直接流出量の減少から多くの年で年流出量は減少した。ただしとくに年基底流出量の大きい年では年直接流出量の減少にもかかわらず増加傾向の年も3か年ある。

以上のことを流出率の経年傾向でみると、年による変動はあるが、年をおって年流出率及び年直接流出率は減少傾向が認められるのに対して年基底流出量は後年に減少する傾向が前二者より少ない。さらに各流出率を年降水量との関係でみると治山工施工幼齢林成立時までは年流出率、年直接流出率の安定化傾向がみられ、ことに年基底流出率の安定化傾向が明瞭にみられる。また月流出量、月直接流出量、月基底流出量により年間流況をみると、やはり月流出量、とくに月直接流出量については小流出量の月でその量が減少し、月数は増加し、かつ安定化の傾向を示し、基底流出量については逆に小流出量の月でその量が増加し、月数は増加し、かつ安定化の傾向を示している。流況安定化の傾向は年最大月流出量と年最小月流出量の比、年最大月直接流出量と年最小月直接流出量の比、年最大月基底流出量と年最小月基底流出量の比をそれぞれ河況係数に準じて考えるとき、比は小さく、かつ変動も小さくなって長期流出の平準化が治山工施工以後森林の成立とともに進んだことを示すと考えられる。

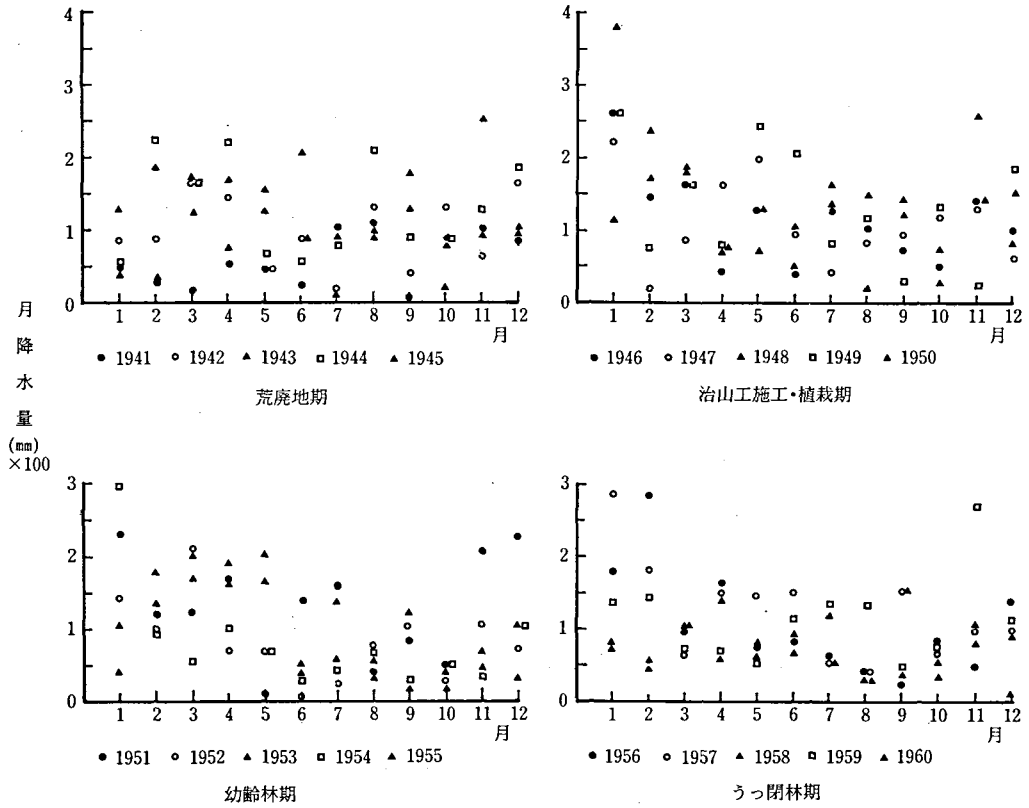


図-14 各年の月降水量

以上の事実に降水の態様に関係することも部分的に考えられるが、すべてが降水の態様と符合するとは認められないし、事実治山工施工と植栽と植栽木の生長に符合して起こっている変化であり、両者が関連しているものと考えられる。その理由としてつぎのことが考えられる。

前述のような治山工を比較的高密度に施工したとき、谷止工等自体による、またこれらによる土砂堆積体により流域の一時保水量は増加し、また溝工でも一時保水量は増加し、ついで浸透量が増加すると考えられるから直接流出量は減少する。また植栽に伴う多少の浸透の増加が考えられるが、一方土壌水分の蒸散の増加が考えられ、これらも直接流出量の減少につながる。したがって治山工施工と造林により直接流出量が荒廃地期に比べて減少することは当然考えられる。ただし年々の減少量は降水量の多少にかなり左右され（両者間に直線関係が認められ、相関係数 -0.727 ）、雨の多い年は減少量が小さい。

ところで治山工施工による一時保水量の増加は蒸散を伴うことがないからこれが直接的に基底流出量の増加にまわったものと考えられる。しかし植林は浸透水量の増加にもはたらくが植栽木の生長とともに蒸発散量が増加するため後年にはその影響があらわれ、年基底流出量減少の年が現われるようになったものと解される。年降水量が $1,300\text{mm}$ 弱のこの流域では年蒸発散能との差が小さく、このような結果になることは既往の研究成果にてらして十分

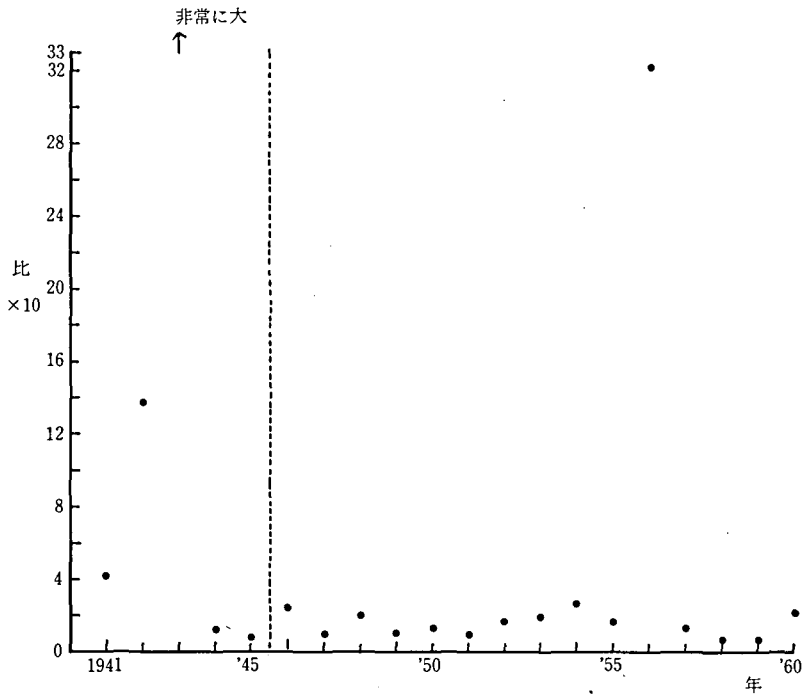


図-15 年最大月流出量と年最小月流出量の比の経年傾向

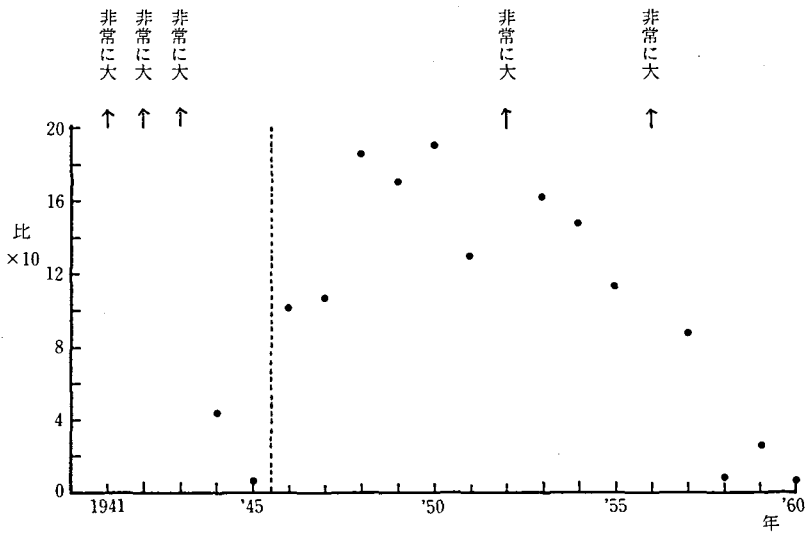


図-16 年最大月直接流出量と年最小月直接流出量の比の経年傾向

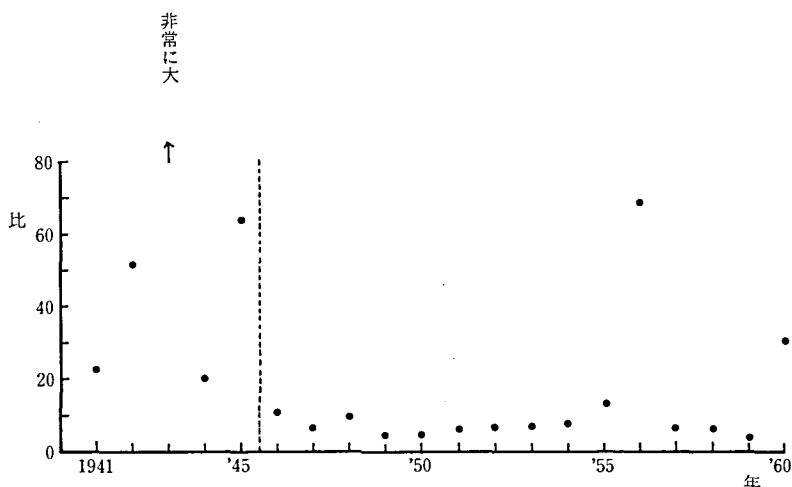


図-17 年最大月基底流出量と年最小基底流出量の比の経年傾向

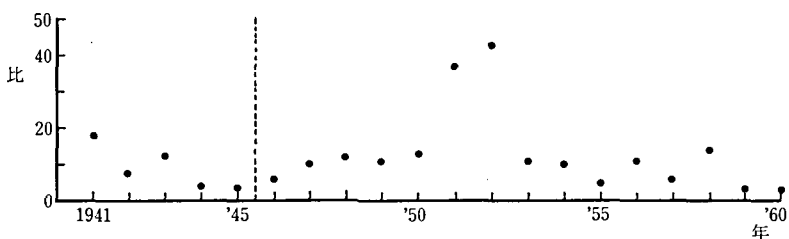


図-18 最大月降水量と最小月降水量の比

ありうることである。

ともかく以上から簡易なものではあるが比較的高密度に一時保水量の増加に貢献する溪間横工や山腹溝工等の施工と治山造林によって直接流出量が減少し、基底流出量が増加して長期流出の平準化が行われたことは明らかである。しかし幼齢・若齢時に生長の旺盛な暖地性マツの植栽木の生長とうっ閉林の成立によって蒸発散量の増加が10年くらいで基底流出量の増加の限界をうかがわせることも認められた。

おわりに

このポイントツリーブランチ試験は治山工施工と治山造林の水流出への影響を信頼できる方法で長期にわたって行った、世界でほとんど唯一の試験の成果として貴重なものである。森林・気象・地文等諸条件がかなり異なり、わが国に原報告書に示された結果やここでその資料を用いて別途求めた上述の結果がそのまま直接適用できないことは当然のことであり、残念であるが、しかしわが国におけるこんごの研究に示唆するところはきわめて多いと考えられる。ともかくこの検討結果は特定の流域条件下で、かつある限度はあるとしても荒廃地

への治山工施工と森林の造成が基底流出のかん養と直接流出の低減, したがって長期流出の平準化に寄与することを示した, ほとんど唯一の事例として重要と考えられる。少なくともこんごこの種の研究に大いに参考になると考えられる。

引用文献

- 1) 中野秀章：森林と水一流出の平準化と総量と—水利科学 29(1) 1～34 1985
- 2) Tennessee Valley Authority: Reforestation and Erosion Control Influences upon the Hydrology of the Pine Tree Branch Watershed-1941 to 1960, pp. 98, Tennessee Valley Authority, Knoxville, Tennessee 1962

**Changes in Stream Regime following Reforestation
and Erosion Control Works**

By Hidenori NAKANO and Retsuya YAMAMURA

Laboratory of Soil Conservation Engineering, Fac. Agric., Sinshu Univ.

Summary

A study was made on the influences of reforestation and erosion control on a devastated watershed on the stream regime by the analysis of hydrological data from a paper mentioned below,

Tennessee Valley Authority : Reforestation and Erosion Control Influences
upon the Hydrology of the Pine Tree Branch Waterhed-1941 to 1960-,
Tennessee Valley Authority 1962

When erosion control works were executed and successively reforestation with pine tree and others was practiced on a experimental denuded watershed, the yearly total amount of direct runoff decreased and on the cotrary the one of base runoff increased and consequently streamflow through the year was made even, while both the annual runoff and it's percentage to annual precipitation decreased. And the amount increased of base runoff showed a decreasing tendency from around ten years after erosion control works were executed, it is presumed that is related to the growth of planted trees.