

林地の水および土壌保全機能 に関する研究(第1報)

——森林状態の差異が地表流下,
浸透および侵食に及ぼす影響——

村 井 宏⁽¹⁾・岩 崎 勇 作⁽²⁾

Hiroshi MURAI and Yûsaku IWASAKI: Studies on Function
of Water and Soil Conservation based on Forest Land (I)

——Influence of difference in forest condition upon
water run-off, infiltration and soil erosion——

要 旨: 林地の持つ理水および侵食防止機能の定量化と保全を目的として、東北地方を対象に長期間実施した研究成果の総括である。まず、理水機能については、浸透能が有力な支配因子となるのではないかと考えて、森林や他の地被を持つ場所における地表流下や浸透の態様を究明するとともに、個別の地被の持つ浸透能を具体的に明らかにするために、可搬式測器を用いて多くの現地測定や、傾斜浸透装置を用いた室内の実験を行なった。林地の持つ侵食防止機能については、落葉地被物、根系、表土の条件などが有力な支配因子と考えて、人工降雨などを用いた侵食実験や現地における拔根強度の測定などを行なった。

これらの研究を通じて、森林は草地や耕地などに比べて大きな浸透能を持っており、また、森林のなかでもかく乱されない広葉樹の天然生林は最大であることがわかった。そして、森林の成立に由来する立地条件たとえば地形、土壌型や地位などとの関係についても明白にした。さらに、落葉地被物の侵食防止効果を確認するとともに、危険降雨に対しての必要な被覆量についても提示することができた。土壌条件と侵食の関係については、母材の種類より、圧結状態など物理性が強く関与することがわかった。根系による表土の緊縛効果は、一般に針葉樹よりも広葉樹の方が大きいようで、なかでもミズナラ、クヌギは根系形態からみた土砂のかかえこみ量、萌芽性や拔根強度などからみて、土砂かん止上好ましい樹種であると判断できた。

目 次

1. 緒 言	24
2. 理水および侵食防止の面からみた森林の働き	24
3. 林地における地表流下・浸透および侵食の現象	25
4. 地表流下・浸透および侵食の測定法	29
5. 多数地点で測定した地被別の浸透能の比較	37
6. 同一立地条件下の植被別浸透能の比較	43
7. 地形および土壌型別の浸透能の比較	50
8. 同種の森林植被の地位別浸透能の比較	55
9. 浸透能と地表状態および土壌の物理性との関係	56
10. 地表下の土層中の流出	60
11. 表面侵食抑止に及ぼす地被物の効果	64
12. 樹種別の拔根抵抗力の比較	68
13. 土壌の母材や物理性と受食度との関係	71
14. 総括および結論	76
文 献	79
Summary	81

1. 緒 言

近年、わが国における経済の飛躍的な成長にともなって、各地で水資源に対する需要が急激に増大し、また、一方では山地開発の伸展により豪雨時における中小河川の氾らんや流出土砂による被害が、ひんぱんにみられるようになってきた。水資源の確保、洪水の緩和や山地傾斜地の侵食防止のために、森林が重要な役割を果たしていることは、一般に広く知られているところである。

しかし、一言に森林といっても、樹種や林相により、さらにその成立する立地条件などによって、上記の機能に差異があるものと考えられる。森林の状態はそれ自体、放置していても自然に推移していくものであり、まして、立木の伐出や家畜の放牧などのような、各種の開発やかく乱行為によって、植生や土地条件は明白に変化する。このように森林状態が著しく変化した場合、その森林が保有していた水と土壌の保全機能に、無視できない変化を与えることは確かで、その結末としていままで安定していた林地が破壊への道をたどり、極端な場合には荒廢地にも移行しかねない。たとえ、そこまで達しなくとも、永年森林がつつかってきた有益な諸機能を、著しく減退させることは確かである。

この研究は、上述のような観点に立って、東北地方の表日本側をおもな対象に、1953年から1972年までの20年間にわたって実施している。すなわち、各種状態の個別の森林の持つ水および土壌保全機能を、定量的に表現しようとするともに、森林の伐採搬出などの人為的なかく乱によって生ずるこれらの影響を明白にし、林地保全上の指標をはあくするとともに、具体的な荒廢防止対策も含めている。

研究の手段としては、山地流域内における個々の場所での調査測定やモデル状態を造成した比較試験が中心で、これを補足するために若干の室内外の実験が加えられている。これらの流域内における個別現象の積み上げた結果は、広域の流域末端で集約されたものと、定量的に結びつき難い傾向は否定しないが、このような研究手法に基づく場合は、流域内の森林状態の差異や変化にともなう水や土砂移動の態様や経路を、具体的に解明するうえで好都合である。ここに本研究結果の一部として、森林状態の差異が流下、浸透および侵食に及ぼす影響について報告する。本報に引き続き、森林の伐採搬出、林内放牧や林地の草地化、林野火災などにより森林状態が変化した場合の影響について報告する予定である。これらの成果が、森林の保全的施業のために参考になれば幸いである。

本研究実施に際し、ご指導賜った川口武雄林試防災部長ほか関係各位に、また、実行面でご協力された当研究室北田健二、北田正憲両技官および岩手大学石井正典教官に深甚な謝意を表する次第である。

2. 理水および侵食防止の面からみた森林の働き

森林の理水機能として、通常洪水防止と水資源確保の2つの働きがあげられる。すなわち、森林を皆伐すれば直接流出量と洪水ピーク流量が高まり、また、大流域では森林の良好な流域からの低水流量は、森林の不良な流域からのそれよりも大きいということが知られている。森林のどのような部分が、このような働きに対して関与しているかを考察してみると、①樹冠や下層低木、地表植生、落葉地被物などによるしゃ断作用、②高木、低木、地床植生による蒸散作用、③落葉地被物、樹幹基部、地表植生などによる地表流停たい、阻止作用、④森林土壌特有の多孔性に基づく浸透増加作用などが考えられる。森林に期待されている洪水防止と水資源確保の機能には、相反する面を持っており、上記の4項目を考えてみても、それぞれプラスとマイナスの作用をなしている。たとえば、降水のしゃ断作用について考えてみると、洪水

防止のためにはプラスであるが、水資源確保のためには、むしろマイナスといえるわけで、このことは蒸散作用についても同様である。これらの作用は、それぞれ林地水文の研究の一環として、いままで個別的な説明がかなりされてきている。洪水防止と水資源確保の両面にプラスの働きを示すのは、主に③と④の浸透増加作用であり、しかもそれには生物活動孔や腐朽根跡のような粗大孔隙に富む森林土壌が、有力な支配因子となると考えられている。浸透増加作用が理水効果にどのように結びつくか、その場所の土地条件によって異なるが、落葉地被物を含む土壌の保水容量の増加や、物理性良好な土壌を通しての地下水への供給能力の増大に関連するものと考えられる。

一方、森林は他の地被に比べて表面侵食防止効果が大きいことは、国外的における多数の実験や調査から知られている。この場合についても、森林の働きを考えてみると、①樹冠、低木、地表植生、落葉地被物などによる雨滴の衝撃防止効果、②落葉地被物、樹幹基部、地表植生などが土壌粒子の運搬を阻止する作用、③土壌浸透能を増大させ地表流下を減少させる作用、④樹木や地表植生などによる表土の緊縛作用、⑤落葉地被物や樹冠などによる土壌凍結低減作用、⑥落葉などで供給される有機物による耐食性の高い土壌の効果などがあり、これらはすべてプラスの働きである。この中で落葉地被物の被覆効果と植物の根系による緊縛効果は高く評価されており、また、間接的ではあるが、浸透増加作用も無視できないものとされている。これらの各作用は理水の問題と同様に土壌保全の研究の一環として、いままでに個別的にある程度説明されているといえよう。

理水および侵食防止の面からみたこのような森林の働きは、どちらかといえばきわめて短時間に起こる現象に基づくものであり、また、個別的なとらえかたといえる。したがって、ある期間のけい流の流量や侵食量、たい積量などを考えた場合にも、上記の個々の働きの総合が直接的に関連するものかどうか、明白にされているとはいえない。しかし、山地流域からの水や土砂の流出現象の観察調査や観測値の統計的吟味によって、ある程度確かめられているといえよう。

森林の持つ理水機能や侵食防止機能を、単位林分について評価しようとする場合には、上記のように落葉地被物、根系や粗大孔隙を含む土壌などが、共通的に重要な対象物となることが理解できる。このために、わたしたちは理水機能についての主要な定量指標として土壌浸透能を、侵食防止機能については地表保護物（落葉・地床植生）や根系の発達量を取りあげることにした。そしてこれらの付帯的な因子として、土壌の物理性を参考にすることとした。以下、これらの諸要因に重点をおいて考察を進めていきたい。

3. 林地における地表流下、浸透および侵食の現象

3-1. 地表流下および浸透

降雨による地表流下とは、地表面を流れる水流をさしている。しかし、林地では多くは落葉地被物などの植物遺体が地表を被覆しており、水がその表面を広範囲に薄層を形成して連続的に流下することはまれである。しかし、降雨がある程度連続し、十分地表が湿ったときには落葉層直下の地表部に、一様な薄層流を見かけることがある。また、降雨の初期においては落葉地被物の質的条件によって、下の土壌層の水分条件とは無関係に、地被物の上を水滴が筋状に流下する場合をしばしば見かける。

HORTON, R. E. の浸透説⁹⁾¹⁰⁾によれば、降雨強度がその土地の浸透能を超過するようになったら、降雨余剰の現象が生じ、その一部は地表面のくぼみの溜りを満たし、他は地表流下となる。そして、地表流下

が生ずるためには、地表に水の薄層があって流れを支え、雨が長びくと降雨余剰と地表残留量がほぼ等しくなり、地表残留量は一定になるとしている。

この説に従えば、土地の浸透能以下の強度の降雨では、全部地中に吸収されて地表流下が生じないことになる。しかし、実際には浸透能よりはるかに低いと考えられる降雨強度でも、斜面の一部から水みちを形成して流下が生ずることが一般的に見られる。

このような事実を、平田¹⁴⁾、片岡¹⁸⁾らはつぎのように説明している。すなわち、山地の地表面は不整一な状態から構成されており、ある区画内の地表はいくつかの異なった浸透能をもった小区分の集合体からなっているため、区域全面の浸透を越えなくとも、それ以下の浸透能をもった小区分から地表流下が発生すると判断した。

そして、降雨強度が全域の各部分の最大の浸透能を超過するまで、両者の間に関数関係が成立し、つぎのような一次式で表現できるものとした。また、この区間の浸透レートを浸透度または浸透強度 (Infiltration index or Infiltration intensity) と呼び、いわゆる浸透能 (Infiltration capacity) と区別している。

$$\phi_m = i_m \left(1 - \sum_1^m \alpha\right) + \sum_1^m f \cdot \alpha \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 ϕ_m : 降雨強度 i_m のときの浸透度、 α : 区域全面積に対する浸透能 f なる部分の面積率、 $\sum_1^m \alpha$: i_m の降雨で地表流下の起こる部分の面積率をさす。

上記の考え方は、原則的にわたしたちの研究によっても確かめられた。すなわち、ある区画内の降雨強度と浸透レートの関係は、Fig. 1 に示すように降雨強度が弱い間は、 $\phi = i$ の直線に沿って上昇し、漸次 x 軸に平行して減衰し、一定値に近づくのが一般的である。したがって、实际的に ϕ_m は自然降雨強度の範囲では、 ϕ_m は i_m との間の直線回帰式で表わしても、大きな問題は生じないようである。ただ、この直線範囲は地被条件によって異なり、浸透性の高い林地は低い裸地よりも広範囲である。

つぎに、一定の降雨強度のもとでは、浸透レートは時間とともに変化していくが、一般的には Fig. 2 に示すように消耗現象に特有な減衰曲線を描く。Horton¹¹⁾ はこの時間と浸透レートの関係を、

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

の式で表現した。ここで f : 任意の時刻 t における浸透レート (in/hr), f_0 : 初期最大浸透能 (in/hr), f_c : 終期最小浸透能 (in/hr), t : 経過時間 (hr), K : 土壌その他に関する常数である。

このあと、MUSGRAVE, G. W.²⁵⁾ らは (2) 式より簡便な (3) 式を提案している。すなわち、 Y を吸収された水の深さ (in), t を給水経過時間 (min), c と n を常数とし、

$$Y = c f^n \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

の放物線式で表現した。この式も浸透経過を代表する基本式として、灌がい数値決定などに用いられているが、Horton の場合のように傾斜地の地表流下区で人工散水方式で求めたものではなく、フラディングタイプの円筒浸透計で注水方式で行なった実験結果に基づいている。

浸透曲線の減衰傾向は、先行土湿条件や土性などによってかなり変化するが、林地は裸地に比べれば急激でないのが特徴といえよう。林地は落葉地被物や良好な土壤条件を持つのが一般的であり、このため高い浸透性が維持される結果である。地表が極端に乾燥している場合には、基本型と逆の傾向の曲線を描く、すなわち、乾いた地被物や土粒に、当初雨水がなじまず空気と水の交換がスムーズに行なわれないた

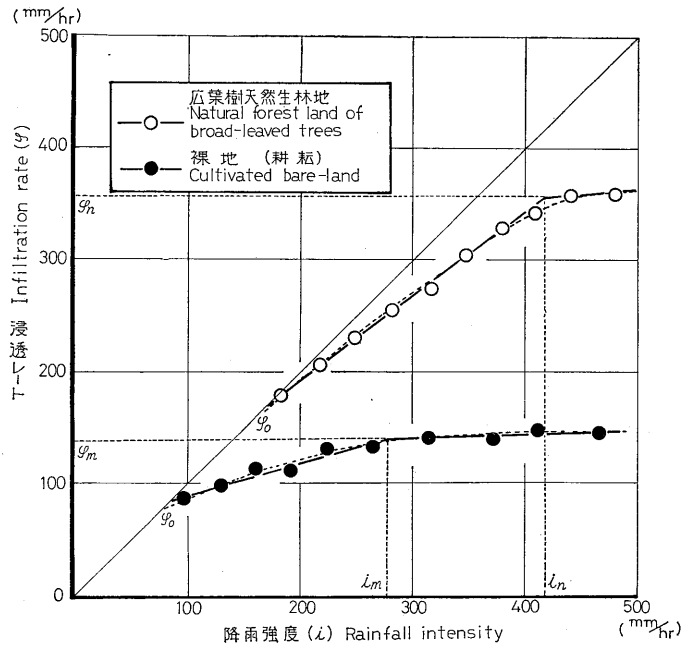


Fig. 1 降雨強度と浸透レートとの関係 (山地浸透計による測定例)
Relation of infiltration rate to rainfall intensity (Measuring examples by the mountain infiltrometer).

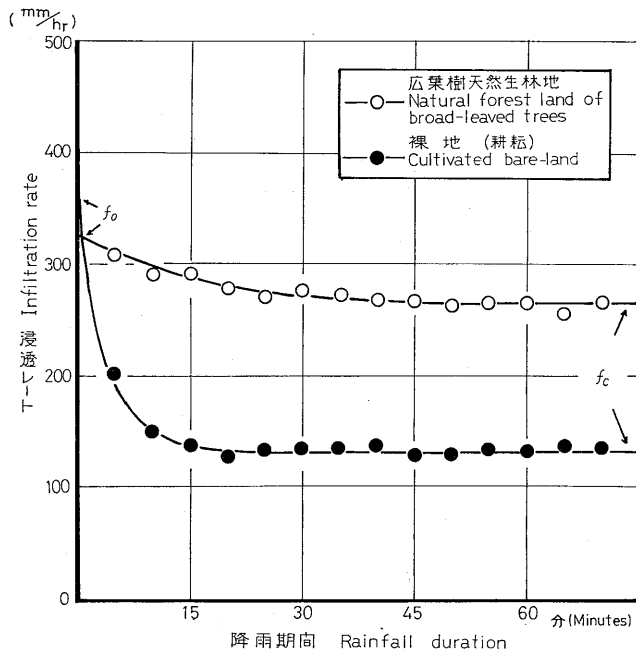


Fig. 2 降雨期間と浸透レートとの関係 (山地浸透計による測定例)
Relation of infiltration rate to rainfall duration (Measuring examples by the mountain infiltrometer).

め、撈水現象を起こすことによる。以後時間の経過とともに、しだいに湿潤化し浸透レートが高まり、一定値に近づくようになる。山火事跡地などのような乾燥地では、このような浸透経過をたどることを確認しているが、この詳細については後述する。

本研究においては、区域全体の浸透能を越す降雨強度で測定した f_c (その土地の絶対的な浸透能力を表わす)、それ以下の降雨強度で得られる浸透度直線の方角係数 α (その土地の浸透性の高低を表わす)、浸透度直線と $f=i$ の直線の交点 ϕ_0 (流下開始点) などの値を、その土地の浸透性を具体的に表現する因子と考えた。なかでも、測定時の土湿など先行諸条件にあまり動かされない f_c は、相対的な比較の測値として最重視している。もちろん、一定の降雨強度で得られる浸透強度も、比較のために用いている。

なお、ここでいう地表とは土壤表面のことをさしており、農耕地のような裸地では地面と一致するが、林地や草地などでは落葉地被物の直下に存在する。地表流量とは土壤表面の流去水はもちろんのこと、地被物の表面や地被物中を流出する分も総括している。ただ、地表流水水といっても、一たん地中に浸透し、それがふたたび地表に出て流れるような、いわゆる中間流水水などは実際に分離できないので、それぞれの測定位置で地表を流下するものを地表流水水として規定している。

3-2. 侵食

土壤侵食は一般的に降雨、傾斜角、斜面長、土質および地被が主要な関連因子として指摘されている。降雨の作用としては、雨滴の地表衝撃、雨水による土壤分散、地表流水水の運搬などがあげられる。したがって、降雨の量的質的両面が侵食量に関与しているといえよう。傾斜角や斜面長と侵食量との関係は、NEAL, J. H.³¹⁾ をはじめ HORTON¹³⁾ や田中ら³⁸⁾ の既往の報告の多くは、いずれも曲線回帰式で表現されている。

土質との関係は、けっきょく粒径や物理性との関係であって、MIDDLETON⁸⁾ の分散比 (Erosion ratio) をはじめ Bouyoucos²⁾ の粘土比 (Clay ratio) などの受食性指標が提案されている。これらはいずれも土壤の分散と集合の性質状態との関係で表現しているが、難波ら³³⁾ は前記の (3) 式の指数を土壤の透水性との関連で侵食と結びつくことを確認し、受食性指標として提案している。この指標は自然状態の土壤構造の受食性を直接的に表示するもので、実用価値が高い。

地被は侵食を左右する有力な因子とされており、森林、草地、耕地という大区分による侵食量の観測結果から、良好な森林ほど他の地被に比較して僅少であることが明らかにされている。地被を落葉や地床植生という地被物の有無状態で細区分した場合には、地被大区分の同一な伐採跡地であっても、夏山のトラクター運材地は、冬季の雪上運材の場所に比べて、侵食土量に顕著な差異がみられる。

森林と土壤侵食との関係については、すでに川口らによって国内外の文献からの統計的な吟味¹⁰⁾ がなされ、また、実験¹⁹⁾ や調査³⁴⁾ が行なわれ、その多くの面について解明されたといっても過言ではない。実際問題として、かく乱されない成林地においては、通常侵食は発生せず、したがって流出土砂もほとんど認められない。しかし、例外的なものとして、傾斜地に成立したヤマハシノキやヒノキなどの一斉林では、地被物が乏しいため表面侵食が見られることがある。明白な形で侵食が見られるのは、立木が伐採され、何らかの原因で地表保護物 (落葉層や地表植生) が失なわれた場合が多い。地表かく乱の影響はとくに大きく、表土が固結した場合には水みち (Erosion pavement) が形成されるのでいっそう顕著となる。

上述のような水食現象のほかに、少雪寒冷地帯の当地方では、凍結氷現象による表土の運動 (Solifuction) をも無視することができない²⁹⁾。家畜の踏圧のようなわずかに発生した裸地が、凍上によって拡

大破壊し、春の乾燥した強風によって飛散し、また、夏の豪雨によって雨裂をつくる。この場合においても、成林し地被物が十分発達しているような場所は、侵食が拡大するようなことはまずない。

このように、既往の報告からみて、また、わたくしたちの現地観察から判断しても、森林と侵食の関係では、地表保護物（落葉地被物と地表植生）の有無や、表土のかく乱状況（裸地化と表土の圧結）が主要な支配因子となるようである。

4. 地表流下、浸透および侵食の測定法

4-1. 地表流下および浸透測定法と測定値の比較検討

流域内の一小区画の地表流下や浸透量を測定する方法については、既往国内外において種々考案され試用されてきた。これを大別すると固定設備式のもの、可搬式ないし携帯式のものになる。わたくしたちは、さきに平田式斜面浸透計¹⁴⁾を改良し、「新しい型の山地浸透計」として、その試用成績を報告している³⁶⁾³⁹⁾。

本研究においては、固定設備式のものとして、比較的小規模の散水降雨装置を付帯した地表流下区（屋外）（Photo. 1）、可変傾斜式の小型浸透装置（屋内）（Photo. 2）、比較的大規模の固定傾斜式大型浸透装置（屋外）（Photo. 3）や自然降雨による地表流下区などを用いた（Photo. 4）。また、携帯式ないし可搬式のものとしては、平た

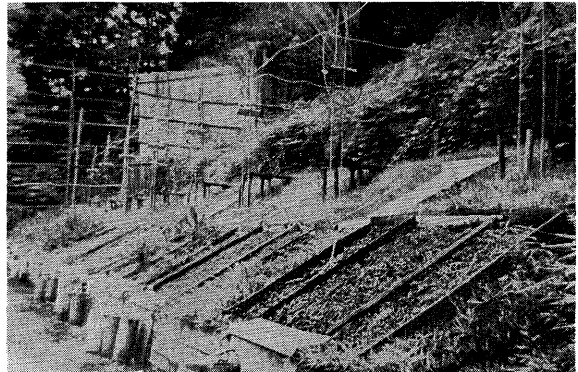


Photo. 1 人工降雨を付帯する屋外地表流下区設備
The outdoor run-off plots with the artificial rainfall apparatus.

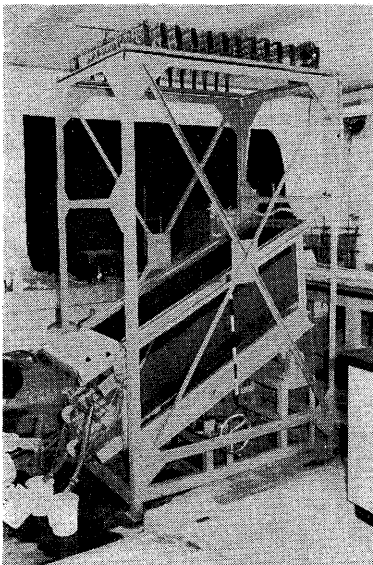


Photo. 2 人工降雨装置を付帯する屋内可変傾斜式浸透装置
The indoor lysimeter with the artificial rainfall apparatus which is possible to change the inclinent angle.

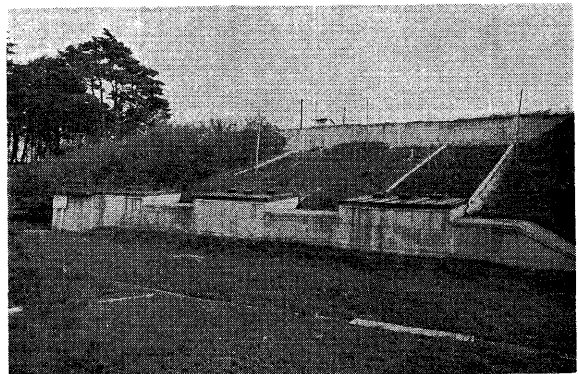


Photo. 3 3種の傾斜角をもつ屋外大型浸透装置
The big outdoor lysimeter which have inclinent angles of three grade.



Photo. 4 自然降雨による屋外地表流下区
The outdoor run-off plot which is the
object of natural rainfall.



Photo. 5 マスグレイブ円筒浸透計
The MUSGRAVE's tube infiltrometer.



Photo. 6 平田式を改良した山地浸透計
The mountain infiltrometer which was
improved the HIRATA's type.

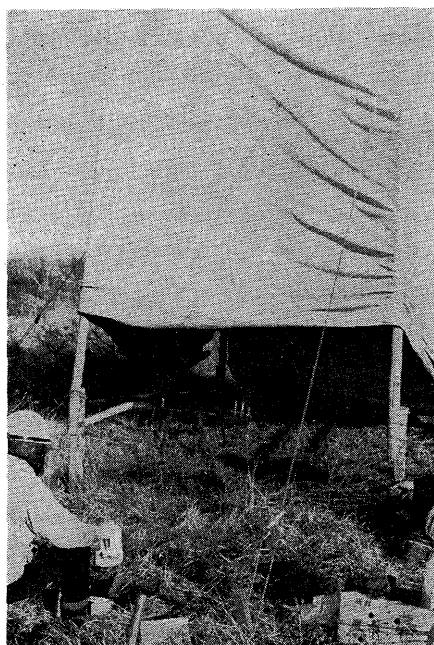


Photo. 7 ロッキーマウンティン型浸透計
The Rocky Mountain infiltrometer.



Photo. 8 人工降雨装置を付帯する林試
東北型浸透計
The Rinshi-Tohoku type infiltrometer which has the artificial rainfall apparatus.

ん地向きの単環の円筒浸透計^{5b)} (Photo. 5), 傾斜地向きの前記の注水式山地浸透計 (Photo. 6), 米国製 Rocky Mountain 型浸透計 (Photo. 7)⁶⁾, 試作した散水式の山地浸透計 (Photo. 8) などを用いた。このうちフラディングタイプの円筒浸透計以外は、実験時に生ずる流出土砂も捕そくできる。

浸透レートの決定は、次式に基づいて計算した。

$$f = (\Delta P - \Delta Q) / (t'' - t') \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 f は任意の時刻 t' より t'' までの期間の概略の浸透レートで、 ΔP はこの期間の降雨量、 ΔQ はこの期間の地表流下量である。ただし、フラディングタイプの円筒浸透計は地表流下というものはないので、給水レートがそのまま浸透レートを示すことになる。なお、上式には地表残留分の計算は含まれていないが、通常この量は微量なので、いちおう無視している。

前節で述べたように、降雨強度が一定の場合には、浸透レートは降雨開始から 30 分以上経過すれば、ほぼ一定の最小値に近づくので、本研究では原則として一降雨期間を 1 時間として、各測定を行なった。そしてこの期

間中、降雨量および地表流下量は 3~10 分ごとに実測した。

上記の測定方法はそれぞれ大きさや形態が異なり、また降雨方式に差異があるため、同一地点の測定値でも必ずしも一致しない。測器差を明確にすることは、測定値の解析の際に必要なことである。Fig. 3 と

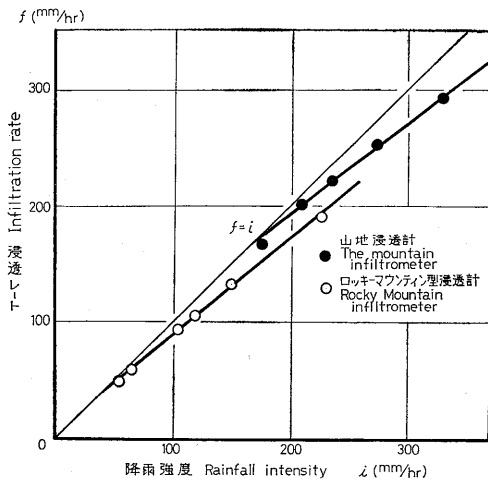


Fig. 3 山地浸透計とロッキーマウンテン型浸透計で求めた浸透レートの比較(カラマツ林地)
Comparison of infiltration rates between the mountain infiltrometer and Rocky Mountain infiltrometer at the Karamatsu forest land.

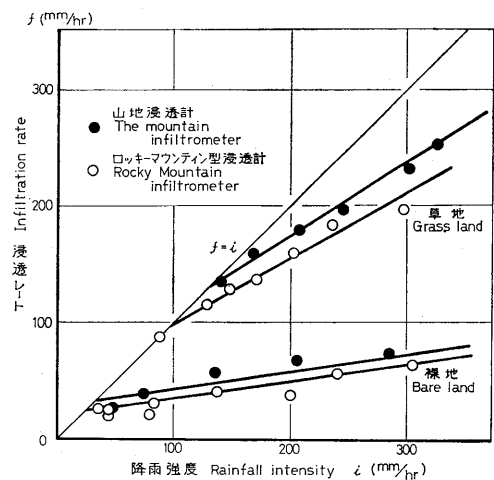


Fig. 4 山地浸透計とロッキーマウンテン型浸透計で求めた浸透レートの比較(裸地と草地)
Comparison of infiltration rates between the mountain infiltrometer and Rocky Mountain infiltrometer at the bare land and grass land.

Fig. 4 は注水式山地浸透計と Rocky Mountain 型の浸透計を、同一場所（當場好摩実験林・新期火山灰土）で測定した結果である。

前者の浸透わくは 30 cm の方形で、深さ 15 cm であるのに対し、後者のそれは 30 cm×80 cm で深さ 8 cm である。また、降雨方式は前者がガラス毛细管によるわく上端からの注水式であるのに対し、後者はノズルから吹き上げる全面散水式である。各降雨度に対する浸透レートは、前者は後者よりもいくらか大きい値を示している。そして、裸地・草地の両区や林地で A_0 層を除去した状態では、両者の浸透度直線が平行し、方向係数に大きな差異がないのに対し、流下開始点 (ϕ_0) が Rocky Mountain 型の方が一般に低く、とくに林地の場合が著しい。

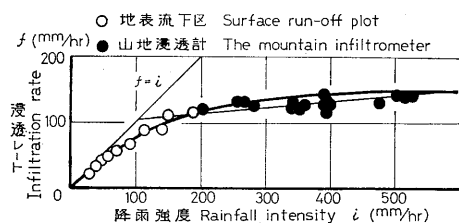


Fig. 5 裸地における山地浸透計と地表流下区で求めた浸透レートの比較

Comparison of infiltration rates between the mountain infiltrometer and surface run-off plot with similar rainfall apparatus at bare land.

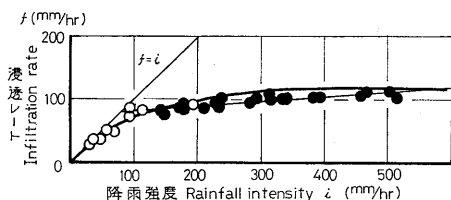


Fig. 6 草地における山地浸透計と地表流下区で求めた浸透レートの比較

Comparison of infiltration rates between the mountain infiltrometer and surface run-off plot with similar rainfall apparatus at grass land.

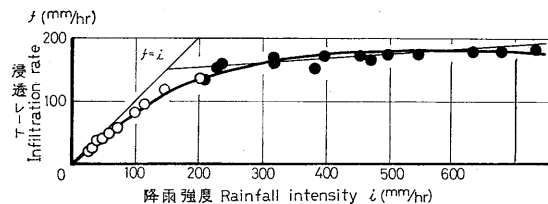


Fig. 7 カラマツ林地における山地浸透計と地表流下区で求めた浸透レートの比較

Comparison of infiltration rates between the mountain infiltrometer and surface run-off plot with similar rainfall apparatus at Karamatsu (*Larix leptolepis*) forest land.

この原因は両者の降雨方式の差異に基因するものと考えられ、プロット全面に散水する方がどうしても流下開始が早くなる。また、注水式の場合では現実の降雨強度に近い低い降雨強度での測定は困難である。

同様に、Fig. 5, 6, 7 は、散水降雨による地表流下区の測定値と、山地浸透計の測定値を比較した結果である。前者のプロットは斜面長 1.5 m、幅 1 m、傾斜角 30° であるが、測定の終了後プロット内に後者を据えつけ測定した。両者の測定値はほぼ同一線上にのる傾向を示しているが、地表流下区の場合は比較的低い降雨強度の範囲にプロットされ、山地浸透計の場合には高い降雨強度の範囲にプロットされる。この場合でも明らかなように、注水式の方は散水式に比べて、流下開始点が高い。

円筒浸透計は平たん地向きにつくられたもので、直径 9 in、深さ 18 in の鉄管からなっている。10~15° という緩斜地で円筒浸透計と斜面型の山地浸透計で同時測定したところ、土壌が十分湿潤化した状態

で得られた最終浸透レートには、有意な差異が認められなかった。このことについては、すでにさきの報告³⁶⁾において触れたが、Table 1 に示すとおりである。

注水式山地浸透計や円筒浸透計は、軽便で操作が簡単であり、山地流域において多数地点の浸透能を測定するために好適である。しかし、両者とも、現実の降雨に近似する比較的低い降雨強度に対応する浸透強度の測定には不向きである。なお、これら

Table 1. 山地浸透計と円筒浸透計による測定値（最終浸透レート）の比較
Comparison of measuring values (f_e) by the mountain infiltrometer and the tube infiltrometer.

No.	林 地 Forest land (mm/hr)				裸 地 Bare land (mm/hr)	
	自 然 状 態 Natural condition		A ₀ 層 除 去 状 態 Excepted A ₀ layer		自 然 状 態 Natural condition	
	A	B	A	B	A	B
1	246	310	217	224	236	209
2	269	288	239	230	222	241
3	251	273	223	226	196	220
4	259	306	212	218	191	217
5	222	290	199	192	242	196
6	266	287	236	246	218	220
平均値 (mm/hr) Mean value	252.2 ^{a*}	292.3 ^a	221.0 ^b	222.6 ^b	217.5 ^c	217.0 ^c
相 対 値 (%) Relative value	100.0	115.9	100.0	100.7	100.0	99.8

Aは山地浸透計による測定値，Bは円筒浸透計による測定値。

A : Mountain infiltrometer. B : Tube infiltrometer.

* 同一符号は5%の有意水準で差異の認められなかったことを示している。

* Means with the same letter superscript are not statistically different from other at the 0.05 level of significance.

の測器を使用する場合，とくに留意すべき事項としては，わくまたは円筒を地面に据えるとき内部の自然状態の土壌構造を破壊するおそれがあるので，できるだけいねいに対象区画の根系や石礫を切断除去して，セットしなければならない。

散水式浸透計や地表流下区設備などを用いる場合には，現実の降雨に近似した条件に対応する浸透強度が求められる。また，土壌侵食は雨滴の衝撃力や流水の地表掃流力によって，おもに支配されるから，地表流下や浸透とともに流出土砂の測定を行なう場合には，この種の方式が適当といえよう。ただ，自然降雨による地表流下区は別として，人工的に散水する場合には，遮風を十分にしない限り一定の降雨強度を持続することができない。携帯用のものとくらべ，装備が重く，散水に動力を要するなど短時日に多数点の測定を行なうことは容易ではない。

4-2. 浸透能決定のための測点抽出数

同一の植被，土壌および取扱いの一地区を，Cook, H. L.⁴⁾ は複合区 (Complex) と呼んでいる。一流域は通常多複合区から構成されている。ほぼ同一条件を示すとみられる一地区内でも，部分的には浸透能にかなりの差があることは容易に推測される。事実，この測定値にはかなりの分散がみられるのが一般的である。もちろん，この中には測定誤差も含まれるが，地表の比較的均一な農耕地などにくらべて，天然林地などでは場所による測定値の変動が顕著である。

一地区の平均浸透能を決定する場合，測定値をある定めた範囲内に落とすためには，最少限何点の測定を必要とするかということは，きわめて重要な問題である。すなわち，経費や人員の数からいっても，測点の数ができるだけ少なくすめばこれにこしたことはない。しかし，変動の大きいものから決定値を導くためには，どうしてもサンプリング数を多くしないと，信頼できる母集団の値を推定することが困難であ

る。一つの方法として標準偏差の知識⁹⁵⁾から、この目やすを定めることとした。

いま、標本標準偏差を s 、標本平均を $\bar{x}$ 、母平均を m 、標本数を n とすれば、信頼限界を定める式は

$$\frac{\bar{x}-m}{s}\sqrt{n}=t \quad \cdots \cdots (5)$$

となる。この式から逆に n を求めるために変換すると、

$$\frac{t^2 s^2}{(\bar{x}-m)^2}=n \quad \cdots \cdots (6)$$

となる。 $\bar{x}-m$ をいくらとすればよいか、たとえば浸透能から流出量を推算する場合に、それがどの程度まで許容できるかということにつながる。

また、精度 a をあたえて、標本の変化係数をもとに、無制限無作為抽出の標本数 n を求める場合には

$$n \geq \frac{N}{1+N\frac{a^2}{c^2}} \quad \cdots \cdots (7)$$

の式が用いられる。ここで、 N は母集団の構成数であるが、 $N \gg 1$ であれば、(7) 式は

$$n \doteq \left(\frac{c}{a}\right)^2 \quad \cdots \cdots (8)$$

で表わしても、大きな差異が生じないことが知られている¹⁵⁾。

これらの式をもとに、注水式山地浸透計と円筒浸透計を用いて、実際に特定地区の浸透能を測定した事例を検討してみる。まず、山地浸透計の場所は好摩実験林（新期火山放出物地帯）で、うっ閉した 30 年前後のコナラを主とする広葉樹林地と、アカマツ天然林の伐採跡の裸地である。各地区の面積はおおよそ 1,000 m² で、地表傾斜角は 30° 前後である。降雨強度は林地 400 mm/hr、裸地で 200 mm/hr として、十分湿ったあとの最終浸透レートを求めた。サンプリングは単純無作為抽出法により、斜面中腹部から各 12 点とった。浸透わくの埋め込みなど測定操作はできるだけ慎重にして、測定誤差を最小限になるよう留意した。

一方、円筒浸透計の測定場所は、平笠混牧林試験地（新期火山放出物地帯）のカラマツ幼齡造林地で、その放牧区を対象としている。放牧区は家畜の行動によって、地表がかなりかく乱され、地点によって地被状態に差異が認められる。地表傾斜角はいずれも 0~5° で、平たん地といってもさしつかえない。対象面積は重度牧区 1.5 ha、軽度牧区 1.6 ha、禁牧区 0.4 ha であり、測点は系統抽出法によってサンプリングした。

Table 2 は上記の測定値を示したもので、Table 3 は、(6) および (8) の式で計算したそれぞれの規定条件における必要な標本数を示している。標本平均値 ($\bar{x}$) の計算にあたっては、全測定値をそのまま用い、棄却検定しなかった。地表状態の比較的整一な場所ほど、測定値の分散が小さいから、標本抽出数が少なくてすむ。それに対し、放牧地では家畜の行動による地表かく乱が顕著なので、標本抽出数を多くしなければならないことがわかる。

この結果はどこにでも適用できるということにはならないが、これらの測器を用いた場合のサンプリングの目安になると考えられる。放牧地やその他特別のかく乱地では、やはりそのつど予備的測定を行なって、適切な抽出数を定めるべきである。なお、本研究における浸透能測定では、上記の結果を参考に自然状態の林地では 6 点以上、農耕地・崩壊地・歩道などでは 3 点以上取ることとした。

Table 2. 山地浸透計と円筒浸透計の測定値

The measuring values of the mountain infiltrometer and the infiltrometer

No.	山地浸透計の測定値 Mountain infiltrometer		No.	円筒浸透計の測定値 Tube infiltrometer		
	林地 Forest land	裸地 Bare land		禁牧区 Non-grazed	軽度牧区 Light grazed	重度牧区 Heavy grazed
1	280	139	1	198	162	117
2	264	128	2	148	168	252
3	245	123	3	222	326	191
4	270	124	4	155	285	184
5	255	156	5	194	239	62
6	260	136	6	229	135	92
7	225	124	7	238	231	115
8	280	144	8	138	167	103
9	275	138	9	138	146	163
10	309	129	10	227	171	145
11	230	145	11	179	137	189
12	260	154	12	229	127	200
			13	161	121	152
			14	198	207	122
			15	217	106	113
			16	161	106	124
			17	182	46	131
			18		117	263
			19		186	95
			20		106	236
			21		128	88
測定の数 Number of measuring point	12	12		17	21	21
平均値 Mean value	262.8	136.9		188.9	162.7	149.4
標準偏差 Standard deviation	23.0	11.4		34.1	65.6	56.3
変化係数 Coefficient of variation	0.087	0.083		0.180	0.403	0.376

Table 3. 計算した精度と測点の抽出必要数

The calculated precision and needed sampling number of measuring point

測定方法 Measurement method	地 区 Plot	標 本 抽 出 の 数 (n) Values of "n" show number of sampling					
		$\bar{x}-m=10$	$\bar{x}-m=20$	$\bar{x}-m=30$	$a=0.01$	$a=0.05$	$a=0.1$
山地浸透計の 測定値 Mountain infiltrometer	林地 Forest land	25.6	6.4	2.9	75.7	3.0	0.8
	裸地 Bare land	6.2	1.6	0.2	68.9	2.8	0.7
円筒浸透計の 測定値 Tube infiltrometer	禁牧区 Non-grazed	52.3	13.1	5.8	324.0	13.0	3.2
	軽度牧区 Light grazed	187.0	46.8	20.8	1,624.0	69.3	16.2
	重度牧区 Heavy grazed	137.7	34.4	15.3	1,413.8	56.6	14.1

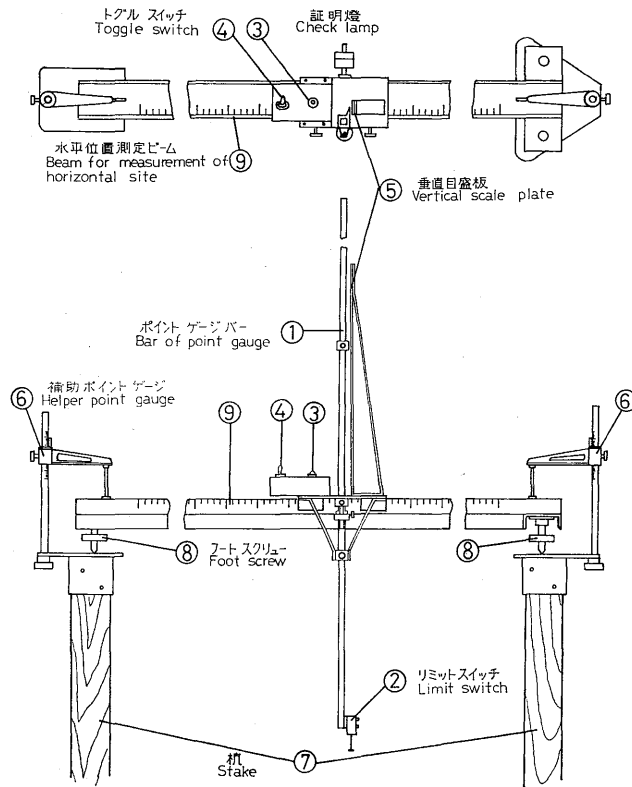


Fig. 8 土 壌 侵 食 計 Soil erosion gauge.

4-3. 侵 食 測 定 法

侵食を量的に表現する場合、局部的には一定期間中にえぐられた面積や深さが基準となる。ある広がりをもつ面積を対象にしては、下流の一地点で捕そくされる流出土砂量を、関係流域面積で割り平均損失深で示すのが一般的である³⁴⁾。本研究においても、特定地点のミクロ的な地表変動と、比較的広域な面積を

対象としたマクロ的な変動を、その目的に応じて区分して表現している。

局所の地表変動を測定する方法としては、測定地点に「杭」、「鉄棒」、「ピン」などを埋め込んで、これを基準として一定期間の地表変動を計測するのが一般的な方式である。この測定の際に露出頭をスケールで読み取る程度のラフな方法から、対応する杭頭を結ぶ水準線からの垂線を測器を用いて精密に測定する方法³⁵⁾まで種々である。

これらの諸法を現地で試みた結果、当



Photo. 9 林試東北型土壌侵食計
The Rinshi-Tohoku type erosion gauge.

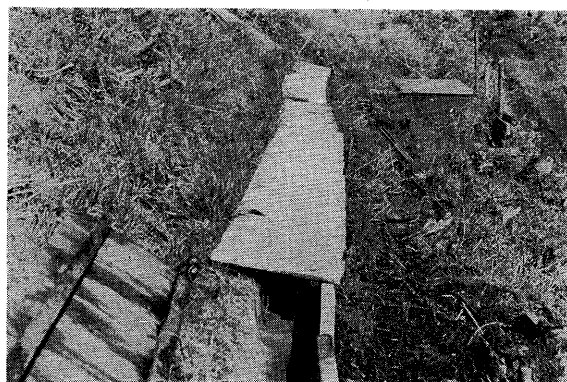
Photo. 10 木堰堤を用いた流出土砂捕そく装置

The catching apparatus of soil sediment load which used the wooden dam.



Photo. 11 コンクリートU字溝を用いた流出土砂捕そく装置

The catching apparatus of soil sediment load which used concrete ditch of the U type.



地方のような積雪寒冷地では、簡単に打ち込んだ「杭」や「ピン」が凍土によって転倒流出したり、1 cm の丸鋼棒が積雪のクリープで曲がったりして、いろいろ障害が多いことがわかった。これらの経験の中で、比較的確実な測定値が得られたのは後述の「杭」法である。すなわち9 cm 角の長さ120 cm の木製杭を、およそ1.5 m 間隔に対応して2本ずつ埋め込み（埋め込み深さ杭長の1/2以上）、

杭頭を水平としてこれを基準とし、土壌侵食計を用いて地表面までの高さを精測する方法である。

測定する対象地の大きさにもよるが、一斜面の上・中・下の3位置に測定用杭を各10組以上設置した。この測器はわたくしたちが考案したもので⁸⁰⁾、詳細は Fig. 8 に示したとおりである。この測器の特色は、測針の接地状況をマイクロスイッチにより電氣的に標示させ、遊尺によって0.1 mm 単位までの変化深をはあくできる。2人1組で5～6分で装置し、7～10点の記録ができる（Photo. 9）。4人の測定者の精度テストでは標準誤差の平均値は0.044 mm であった。

水食に基づく流出土砂量の捕そくは、自然流域を対象にした場合は、流域下端に簡単な「ダム」を設置し（Photo. 10）、区画を対象にしてはプロットの下端に「箱」や「コンクリートU字溝」（Photo. 11）を設置して行なった。なお、各地区の受食性を比較する場合、前述の地表流下や浸透測定の際に（たとえば散水式山地浸透計や Rocky Mountain 型浸透計など）発生した、流出土砂量が有用である。この場合、一定強度（現実には発生する可能性のある最大値）で、1時間雨を降らせたときに発生する流出土砂の累加量を侵食率（Erosion ratio）と呼び、比較のための基準値とした。

5. 多数地点で測定した地被別の浸透能の比較

浸透測定にもっとも軽便な注水式山地浸透計を用いて、岩手、宮城両県下の山地流域を対象に、地被別の浸透能を測定した。調査流域の選択に際しては、当地方に分布する代表的な地質を基準とした。地被区分は、森林（針広別の成林地）、伐採跡地（幼齢造林地および天然更新地、低木そう地を含む）、草地

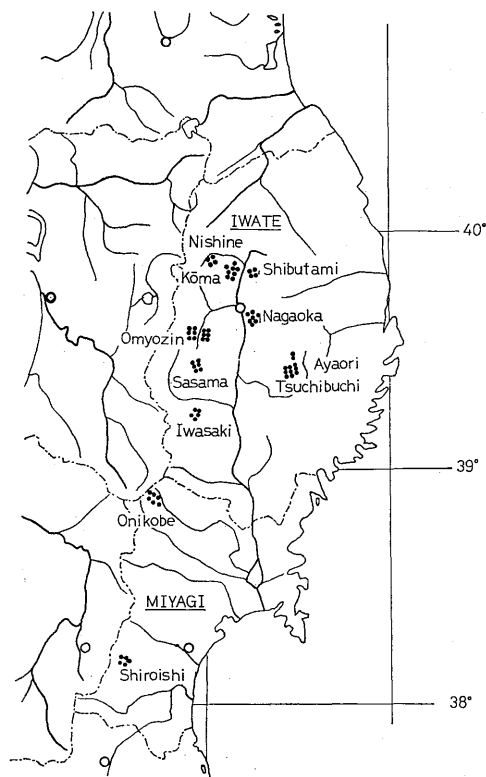
Table 4.
The locality andFig. 9 山地浸透計による浸透測定をした位置
The sites of infiltration measurement by
the mountain infiltrometer.

Table 4. 注) Note)

地被地区 The classification of land cover type :

(F. n. n.) 針葉樹天然生林地 Natural forest land of
needle-leaved tree.(F. n. p.) 針葉樹人工植栽林 Planting forest land of
needle-leaved tree.(F. b. n.) 広葉樹天然生林地 Natural forest land of
broad-leaved tree.(C. l.) 軽度かく乱伐採跡地 Cut-over land of lightly
disturbed condition.(C. h.) 重度かく乱伐採跡地 Cut-over land of heavy
disturbed condition.

(G. n.) 自然草地 Natural grass land.

(G. a.) 人工草地 Artificial grass land.

(B. d.) 崩壊地 Disintegrated land.

(B. f.) 歩道 Foot path.

(B. c.) 畑地 Cultivated land.

地区 Area	位置 Locality	地被 Cover type	植被 Vegetation type
No.			
1	岩手 Iwate 長岡 Nagaoka	F. n. n.	Akamatsu— Konara—Kuri
2	" "	F. n. p.	Sugi
3	" "	F. b. n.	Konara—Kuri
4	" "	G. n.	Kashiwa
5	" "	G. a.	Susuki
6	" "	B. f.	Orchard grass
7	" "	B. c.	
8	笹間 Sasama	F. b. n.	Buna—Mizunara
9	" "	B. d.	
10	" "	B. d.	
11	" "	C. l.	
12	" "	C. b.	
13	" "	B. d.	
14	岩崎 Iwasaki	C. h.	
15	" "	F. b. n.	
16	" "	F. b. n.	Buna—Mizunara
17	" "	F. b. n.	Buna—Tochi— Katsura
18	" "	F. b. n.	Buna— Sawagurumi
19	好摩 Kōma	B. c.	
20	" "	G. n.	Shiba
21	" "	G. n.	Susuki
22	" "	G. a.	Orchard grass
23	" "	F. b. n.	Konara— Uwamizuzakura
24	" "	F. n. n.	Akamatsu
25	" "	C. l.	
26	" "	F. n. p.	Karamatsu
27	西根 Nishine	F. n. n.	Akamatsu
28	" "	B. c.	
29	" "	G. n.	Susuki
30	" "	G. a.	Orchard grass
31	宮城 Miyagi 鬼首 Onikobe	F. n. p.	Akamatsu
32	" "	F. n. p.	Sugi
33	" "	F. b. n.	Buna—Mizunara
34	" "	C. l.	
35	" "	G. n.	Susuki
36	" "	B. d.	
37	白石 Shiroishi	F. n. p.	Hinoki

測定地の位置ならびに自然概況
 natural condition of the measurement area

林 齡 Stand age (Years)	疎密度 Crown density (%)	胸高直径 D. b. h. (cm)	樹 高 Tree height (m)	標 高 Eleva- tion (m)	傾斜角 Inclina- tion angle (°)	方 位 Bearing	地 質 構 造 Geological structure	母 材 Country rock	土 壤 型 Soil type
23~26	70~75	14~18	10~15	160	24	S S W	古 生 層 Palaeozoic system	粘 板 岩 Clay slate	Bc
30	80~85	8~25	9~18	270	27	W	"	"	B _D (d)
13~18	70~75	3~14	4~11	140	24	N E	"	"	Bc
				120	26	W	"	"	B _D
				130	20	W	"	"	B _D (d)
				150	28	W	"	"	B _D (d)
				120	22	W	"	"	B _D (d)
40~90	65~75	28~70	17~26	420	33	N W	第 3 紀 層 Tertiary system	凝 灰 岩 Tuff	B _D (d)
				430	38	N W	"	"	B _D
				430	38	N W	"	"	Im
				470	29	N E	"	"	Im
				490	88	S E	"	"	B _D (d)
				400	39	S W	"	砂岩, 頁岩 Sandstone, Shale	B _D (d)
				490	29	N	"	凝灰岩 Tuff 砂 岩	B _D (d)
80~130	80~90	20~80	16~28	520	23	S E	"	Sandstone 砂岩, 頁岩 Sandston, Shale	B _D
60~110	70~75	24~48	18~23	530	28	S W	"	"	B _E
60~100	70~75	22~60	16~24	500	23	W	"	"	B _E
60~100	70~75	26~60	18~26	690	25	E	"	"	B _D (d)
				210	23	N E	火山放出物 Volcanic product	火山灰, 火山砂 Volcanic sand, Ash	B _D (d)
				220	23	E	"	"	B _D (d)
				220	23	E	"	"	B _D (d)
				220	23	E	"	"	B _D (d)
25~30	70~75	10~25	8~16	220	23	N E	"	"	B _D (d)
35~40	80~85	12~18	8~20	220	23	N E	"	"	B _D (d)
				220	23	N E	"	"	B _D (d)
15	80~85	11~16	10~16	220	23	S W	"	"	B _D (d)
40~60	60~70	12~20	11~15	340	35	S	"	"	B _D (d)
				270	22	S W	"	"	B _D
				270	23	S W	"	"	B _D (d)
				210	22	S	"	"	B _D (d)
28	50~60	8~14	7~11	460	33	W	第 4 紀洪積層 Quaternary system	砂岩, 頁岩 Sandstone, Shale	B _D (d)
22	70~80	6~12	7~14	440	33	W	"	"	B _D
60~90	80~90	20~80	16~22	380	35	W	"	"	B _D
				380	28	W	"	"	B _D (d)
				410	28	S W	"	"	B _D (d)
				400	33	W	"	"	Im
45	75~85	16~24	11~13	340	23	S W	第 3 紀 層 Tertiary system	凝 灰 岩 Tuff	B _D (d)

Table 4. (つづき) (Continued)

地区 Area No.	位 置 Locality	地 被 Cover type	植 被 Vegetation type	林 齢 Stand age (Years)	疎密度 Crown density (%)	胸高直径 D. b. h. (cm)	樹 高 Tree height (m)	標 高 Eleva- tion (m)	傾斜角 Inclina- tion angle (°)
38	宮城 Miyagi	F. n. p.	Akamatsu	38	60~70	12~24	13~16	460	33
39	白石 Shiroishi	C. h.						780	23
40	" "	F. b. n.	Buna—Mizunara	60~90	70~80	20~80	16~20	880	35
41	" "	C. l.						740	28
42	岩手 Iwate	F. n. p.	Sugi	40	80~90	12~26	11~16	460	26
43	土淵 Tsuchibuchi	F. n. p.	Hinoki	40	80~90	8~22	10~16	460	33
44	" "	F. n. p.	Akamatsu	40	70~80	14~35	15~18	570	38
45	綾織 Ayaori	F. n. p.	Karamatsu	40	70~80	14~30	16~22	570	33
46	" "	F. b. n.	Buna	60~90	80~90	16~45	12~20	660	28
47	" "	C. l.						660	32
48	" "	C. l.						620	28
49	" "	C. h.						620	38
50	" "	C. h.						620	28
51	" "	B. d.						620	33
52	" "	B. f.						560	28
53	土淵 Tsuchibuchi	F. n. n.	Akamatsu	20~40	70~80	12~20	11~13	260	28
54	波民 Shibutami	C. l.						260	28
55	" "	C. n.	Susuki					260	28
56	" "	B. f.						260	28
57	" "	B. c.						260	38
58	御明神 Omyôzin	F. n. p.	Sugi	29	80~90	8~24	8~20	260	30
59	" "	F. n. p.	Tôhi	36	80~90	6~24	5~13	260	30
60	" "	F. n. p.	Karamatsu	40	75~85	8~21	8~26	250	30
61	" "	F. n. n.	Akamatsu	57	55~65	22~58	7~25	260	25
62	" "	F. b. n.	Konara— Uwamizuzakura	30~35	75~85	6~14	5~9	260	28
63	" "	F. b. n.	Buna—Mizunara	30~80	80~90	6~26	8~20	300	35
64	" "	C. l.						300	35
65	" "	F. b. n.	Buna— Hakuunboku	40~120	80~90	20~46	16~24	340	38
66	" "	F. b. n.	Mizunara— Hakuunboku	40~120	80~90	20~46	16~24	340	35
67	" "	C. l.						350	35
68	" "	C. l.						350	40
69	室根 Murone	F. n. p.	Akamatsu	26	80~90	14~18	8~12	620	25
70	" "	G. n.	Susuki					620	25
71	" "	G. a.	Orchard grass					620	25
72	外山 Sotoyama	F. b. n.	Konara—Kuri	40	75~85	30~50	10~14	680	25
73	" "	G. n.	Shiba					700	25
74	" "	G. a.	Orchard grass					700	25
75	" "	G. a.	Orchard grass					680	25

方位 Bearing	地質構造 Geological structure	母材 Country rock	土壌型 Soil type
SE	第3紀層	凝灰岩	B _D (d)
S	"	"	B _D
SE	"	"	B _D
SW	"	"	B _D (d)
NE	火成岩類	花崗岩	B _B
E	Eruptive rocks	Granite	B _D
SE	"	"	B _D (d)
S	"	"	B _D
E	"	"	B _D
ESE	"	"	B _D (d)
E	"	"	B _D (d)
E	"	"	B _D (d)
E	"	"	B _D (d)
E	"	"	Im
NE	"	"	B _B
SSW	火山放出物	火山灰, 火山砂	B _l b(d)
SSW	Volcanic product	Volcanic sand, Ash	B _l b(d)
NW	"	"	B _l b(d)
SSW	"	"	B _l B
W	第3紀層	砂岩, 頁岩	B _D
WNW	Tertiary system	Sandstone, Shale	B _D (d)
S	"	"	B _D (d)
NE	"	"	B _D (d)
SSW	"	"	B _D (d)
SW	"	"	B _D (d)
ENE	"	"	B _D
ESE	"	"	B _D
NW	"	"	B _D
SSE	"	"	B _D
NW	"	"	B _D (d)
ESE	"	"	B _D (d)
NE	火成岩類	花崗岩	B _l b(d)
NE	Eruptive rocks	Granite	B _l b(d)
NE	"	"	B _l b(d)
S	古生層	粘板岩	B _D (d)
S	Palaeozoic system	Clay slate	B _D (d)
S	"	"	B _D (d)
S	"	"	B _D (d)
N	"	"	B _D (d)

（自然草地および人工草地）、裸地（崩壊地、歩道、畑地など）とした。降雨強度は原則として、プロットの全面から地表流下の生ずるような 200~400 mm/hr の高い降雨強度を用い、地表傾斜角は 30° を基準としている。なお Fig. 9 に測定地区の概略位置を示した。

Table 4 は測定した 75 地区の立地条件を要約したもので、Table 5 は浸透能測定値を地被区分別に整理した結果である。このなかには、さきに報告した分も含んでいる。ここでいう浸透能とは、降雨 1 時間の終期における安定した浸透レートをさし、全面が降雨余じょうに達しているの、降雨強度によってはほとんど変化しない値と考えてよい。

1 測定地区は前述した複合区に相当するもので、地形、地質、土壌、植生や土地の取り扱いなどの諸条件がほぼ同一とみなされる区域である。これによると、林地が他の地被よりも明らかに高い浸透性を持っていることがわかる。すなわち、林地平均が 258 mm/hr、伐採地平均が 158 mm/hr、草生地平均が 128 mm/hr、裸地平均が 79 mm/hr となり、林地を 100% とした場合、裸地は 30% 程度の値である。

また、森林では広葉樹の方が針葉樹より大きく、なかでもブナ天然林が最大で 400 mm/hr に近い値を示している。裸地では、地表の踏み固められた歩道が極端に小さく、10 mm/hr 前後の値である。人工草地は自然草地にくらべて、浸透性がいくらか低い傾向があるが、地区による変動が大きい。草地の場合、家畜の放牧によって踏圧されているか否か、また、大型機械が高ひん度導入されているか否かによって、顕著な差異が生ずるようである。

上記の結果は、地質や土壌などの土地条件をまったく考慮しない、地被別の検討である。土壌との関連については別項で詳述するが、地質区分別に上記の測定値を Table 6 のようにまとめたところ、火山放出物や洪積層地帯が第 3 紀層や火成岩地帯に比べて、いくらか浸透能の値が大きい傾向が認めら

Table 5. 地被区分別の浸透
Infiltration capacity (f_c)

林 地 (F.)						伐 採 跡 地 (C.)			
針 葉 樹 (F. n.)				広葉樹天然林 (F. b. n.)		軽 度 か く 乱 (C. l.)		重 度 か く 乱 (C. h.)	
天然林 (F. n. n.)		人工林 (F. n. a.)							
Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)
1	146	2	284	3	87	11	180	12	30
24	351	26	208	8	173	25	204	14	76
27	153	31	259	15	341	34	178	39	90
44	131	32	297	16	204	41	289	49	37
53	276	37	256	17	145	47	272	50	15
		38	259	18	262	48	177		
		42	387	23	360	54	175		
		43	236	33	358	64	242		
		45	104	40	395	67	123		
		58	240	46	390	68	282		
		59	340	62	213				
		60	345	63	355				
		61	315	65	302				
		69	118	66	341				
				72	148				
(5)** 211.4		(14) 260.6		(15) 271.6		(10) 212.2		(5) 49.6	
林 地 平 均 (34) Mean of forest land : 258.2**						伐 採 跡 地 平 均 (15) Mean of cut-over land : 158.0 ^b			

* 同一符号をもった平均値は5%の水準で、統計的に有意な差異がない。

Means with the same letter superscript are not statistically different from other at the 0.05 level of

** 括弧内の数値は測定した地区数を示す。

Values in parentheses is showing the number of measurement area.

Table 6. 地質構造で区分した地被別浸透能
Infiltration capacity (f_c) of each land-cover type which
was divided into geological structure

地 質 構 造 Geological structure	地 被 区 分 Land cover type			
	林 地 Forest land	伐 採 跡 地 Cut-over land	草 生 地 Grass land	裸 地 Bare land
火 山 放 出 物 Volcanic product	(5)* 269.6	(2) 189.5	(6) 159.3	(3) 72.7
火 山 岩 類 Eruptive rocks	(6) 227.7	(4) 125.3	(2) 55.5	(2) 100.0
古 生 層 Palaeozoic system	(4) 166.3	—	(5) 88.0	(2) 21.5
第 3 紀 層 Tertiary system	(16) 280.4	(8) 164.0	—	(4) 95.0
第 4 紀 洪 積 層 Quaternary system	(3) 304.7	(1) 178.0	(1) 281.0	(1) 109.0

* 括弧内の数値は測定地区の数を示している。

Values in parentheses is showing number of measurement area.

能 (最終浸透レート: f_c)
of each cover type

草 生 地 (G.)				裸 地 (B.)					
自 然 草 地 (G. n.)		人 工 草 地 (G. a.)		崩 壊 地 (B. d.)		歩 道 (B. f.)		畑 地 (B. c.)	
Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)	Area No.	f_c (mm/hr)
4	43	5	281	9	140	6	2	7	41
20	24	22	102	10	22	52	7	19	96
21	270	30	191	13	57	56	29	57	161
29	102	71	17	28	93				
35	281	74	32	36	109				
55	267	75	21	51	193				
70	94								
73	63								
(8)	143.0	(6)	107.3	(6)	102.3	(3)	12.7	(3)	99.3
草 生 地 平 均 (14) Mean of grass land : 127.7 ^b				裸 地 平 均 (12) Mean of bare land : 79.2 ^c					

significance.

れたが、有意な水準まで達していない。

6. 同一立地条件下の植被別浸透能の比較

6-1. 樹種植栽試験地における測定

樹種別の浸透能の差異を明らかにするには、同一立地条件下に同時に導入した林地を対象に、各地で測定を行なうことが望ましい。当场好摩実験林（岩手県下、火山放出物地帯）に、1939年設定の土砂かん止のための適樹試験地があって、この地方に適当と考えられる16樹種の高木類が導入されている。

この中から、植栽によって成林した広葉樹5、針葉樹6、あわせて11樹種の小林分を対象として、注水式の山地浸透計を用いて浸透能を測定した。測定地は東面する25°の整一な斜面で、植栽前の土壤条件には差異がなかったと考えてよい。測定した時点において、林齢は28年生であった。樹種の特色にはおもに落葉地被物が関与するという判断から、自然状態とA₀層除去状態について測定した。なお、各区の林分構成はTable 7、地表状態はTable 8、土壌の諸性質はTable 9に示すとおりである。

各樹種区の浸透能（最終浸透レート: f_c ）を示したのが、Fig. 10のごとくである。これによるとクヌギ、スギ、ニセアカシアなどが、周辺の既存天然生広葉樹林（コナラ、ウワミズザクラなど）に匹敵する

Table 7. 樹種別林地の林分構成
The stand composition of each tree species plot

試験区 Plot No.	樹 種 Tree species	疎密度 Crown density (%)	立木密度 Tree density (Number /ha)	胸高直径 Diameter breast high (cm)	樹 高 Tree height (m)
1	クヌギ <i>Quercus acutissima</i>	64	1,760	9	12
2	クリ <i>Castanea crenata</i>	86	1,920	9	9
3	ミズナラ <i>Quercus crispula</i>	77	1,720	9	8
4	ニセアカシア <i>Robinia pseudoacacia</i>	81	1,960	9	9
5	ヤマハンノキ <i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i>	77	1,680	16	11
6	チョウセンゴヨウ <i>Pinus koraiensis</i>	77	2,000	11	8
7	モミ <i>Abies firma</i>	55	1,600	10	8
8	リギダマツ <i>Pinus rigida</i>	70	3,360	15	10
9	カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	75	3,120	13	11
10	スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	50	1,960	10	8
11	アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	90	3,200	13	22
12	広葉樹天然生林 Natural forest (Broad-leaved trees)	85	2,750	16	12
13	裸地(無処理) Bare land (Non-treatment)	—	—	—	—

注) No. 1~11 の試験区の林齢は28年生で, No. 12 はおよそ40年生である。

Comment) The stand age of the plot No. 1~11 is 28 and that of the No. 12 is about 40.

Table 8. 樹種別林地の地表状態
Surface cover condition of each tree-species stand

試験区 Plot No.	落葉地被 物の被度 Coverage of A ₀ layer (%)	落葉地被物の厚さ Thickness of A ₀ layer (cm)				地床植被率 Coverage of ground floor plant (%)	地床植被の組成 Composition of ground floor plant
		L	F	H	計 The total		
1	100	3.1	1.4	0.3	4.8	87	ヒカゲスゲ <i>Carex lanceolata</i> (2)* ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (2)
2	87	2.7	1.9	0.2	4.8	85	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (2) ヒカゲスゲ <i>Carex lanceolata</i> (2)
3	85	2.4	1.1	0.2	3.7	92	ヒカゲスゲ <i>Carex lanceolata</i> (2) ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (2)
4	80	2.9	1.4	0.3	4.6	72	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (3) アケビ <i>Akebia quinata</i> (1)
5	80	4.6	3.2	0.4	8.2	73	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (4) アケビ <i>Akebia quinata</i> (2)
6	90	5.3	3.2	0.1	8.6	53	チゴユリ <i>Disporum smilacinum</i> (2) アケビ <i>Akebia quinata</i> (2)
7	63	3.2	2.8	0.1	6.1	47	チゴユリ <i>Disporum smilacinum</i> (2) ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (1)
8	100	5.2	4.8	0.2	10.2	66	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (3) アケビ <i>Akebia quinata</i> (2)
9	100	3.0	3.0	0.1	6.4	73	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (2) ヒカゲスゲ <i>Carex lanceolata</i> (2)
10	61	4.0	3.1	1.4	8.5	55	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (3) チゴユリ <i>Disporum smilacinum</i> (2)
11	100	5.0	4.2	0.2	9.4	65	アケビ <i>Akebia quinata</i> (2) ホタルカズラ <i>Lithospermum Zollingeri</i> (2)
12	100	4.6	3.2	0.4	8.2	80	ミヤコザサ <i>Sasa nipponica</i> (2) コマユミ <i>Euonymus alatus</i> f. <i>ciliato-dentatus</i> (1)
13	—	—	—	—	—	—	—

* 優占度階級 Dominance class.

Table 9. 樹種別林地の土壌の諸性質
Soil properties of each tree species stand

試験区 Plot No.	試料採取深 Sampling depth (cm)	圧結度 Compactness (%)	孔隙量 Porosity (%)		透水性 Percolation rate (cc/min)	団粒化率 Aggregation (%)	有機物 Organic matter (%)	粘土+微砂 Clay + Silt (%)	地被物の重量 Weight of total litter (Air dry kg/m ²)
			非毛管 Non-capillary	全 The total					
1	0~5	70.2	16.8	74.1	139	32.0	16.0	12	1.7
	20~25	75.6	13.4	68.6	66	28.0	4.9	11	
2	0~5	75.6	11.9	72.1	89	31.3	12.9	12	2.0
	20~25	63.3	13.6	72.4	82	26.4	6.5	10	
3	0~5	74.0	11.7	71.9	133	30.1	14.1	11	2.1
	20~25	61.6	14.3	69.5	48	23.6	5.8	11	
4	0~5	61.8	19.7	79.1	132	36.6	20.1	11	2.3
	20~25	61.2	11.8	72.0	59	26.8	6.4	10	
5	0~5	60.9	12.8	76.7	90	35.4	19.7	12	2.3
	20~25	64.2	11.9	71.7	50	24.9	6.8	10	
6	0~5	61.2	6.5	75.9	81	31.6	21.5	12	2.0
	20~25	68.7	12.4	71.5	53	29.5	6.5	11	
7	0~5	67.3	16.9	75.8	162	26.4	13.2	10	2.0
	20~25	65.9	10.7	75.3	45	37.7	6.8	11	
8	0~5	75.5	10.2	71.8	96	40.9	11.0	12	1.3
	20~25	72.3	14.9	72.7	49	32.9	3.7	11	
9	0~5	83.9	10.5	68.6	91	23.5	11.3	12	2.3
	20~25	72.7	10.1	68.2	48	24.6	4.3	12	
10	0~5	79.5	19.4	70.8	209	33.1	11.5	13	2.2
	20~25	89.9	10.8	67.4	128	26.5	4.1	12	
11	0~5	80.3	15.8	74.5	149	39.0	12.6	13	2.4
	20~25	87.7	12.6	66.9	83	20.8	4.8	10	
12	0~5	60.2	7.9	76.9	128	41.7	14.1	12	2.4
	20~25	84.0	12.1	63.2	81	48.4	5.5	11	
13	0~5	90.2	11.2	69.3	76	19.0	5.7	10	—
	20~25	94.2	11.1	69.5	92	26.5	6.8	12	

Table 10. 樹種別林地における自然状態と A₀ 層除去状態の浸透能と浸透指標
Infiltration capacity (f_c) and indexes (k , ϕ_0) on the condition of natural and excepted A₀ layer for each tree species stand

試験区 Plot No.	自然状態 Natural condition (A)			A ₀ 層除去状態 Condition of excepted A ₀ layer (B)			相 対 値 Relative value ($\frac{B}{A} \times 100$) (%)		
	f_c	ϕ_0	k	f_c	ϕ_0	k	f_c	ϕ_0	k
1	369	291	0.722	279	192	0.443	75.6	66.0	61.4
2	356	240	0.770	257	133	0.426	72.2	55.4	60.9
3	318	198	0.640	222	95	0.383	69.8	48.0	59.8
4	377	291	0.776	274	169	0.468	72.7	58.1	74.9
5	270	153	0.470	211	88	0.322	78.1	58.0	68.5
12	342	217	0.742	266	176	0.400	77.8	81.1	53.9
広葉樹平均 Broad-leaved trees (Average)	338	232	0.686	250	142	0.407	74.4	61.1	63.2
6	313	180	0.611	228	125	0.319	72.8	69.4	52.2
7	226	129	0.399	231	124	0.344	102.2	96.1	86.2
8	287	164	0.502	232	115	0.378	80.8	70.1	75.3
9	165	92	0.340	215	82	0.360	130.9	89.1	105.9
10	352	287	0.710	257	136	0.417	73.0	47.4	58.7
11	340	205	0.712	216	85	0.369	63.5	41.5	51.8
針葉樹平均 Needle-leaved trees (Average)	281	176	0.546	230	111	0.365	87.2	68.9	71.7
13 裸 地 Bare land	217	146	0.372	—	—	—	—	—	—

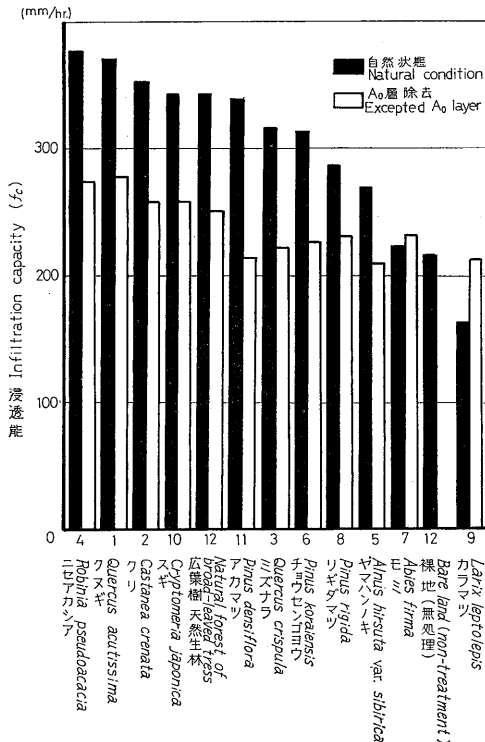


Fig. 10 各樹種区の浸透能
Infiltration capacity (f_c) at each tree-species plot.



Photo. 12 乾燥した立地条件下に成立するカラマツ林地の A_0 層直下には撓水性の白色菌糸網層があらわれる

The white mycelia-net layer which has a repellency appeared in directly under A_0 layer of Karamatsu (*Larix leptolepis*) forest land on dried habitat.

大きい値を示している。これに対し、カラマツ、モミなどの針葉樹が小さい値を示している。とくに、カラマツは無被覆の裸地よりも小さいことは注目に値する。なお、各区の測定値は Table 10のとおりである。

A_0 層を除去した場合、全体的に浸透能が 20~30% 減退した。このことは落葉地被物のそなえるフィルターおよびスポンジとしての働きが、雨水の浸透性を高めたものとして評価できるが、例外的にカラマツやモミのように、逆に A_0 層を除去することによって、浸透性が高められるものもある。これは乾性土壌 (Bld(d)) のため、両樹種の落葉は腐朽しがたく、 A_0 層の内部または直下に、撓水性の菌糸網層が発達していたことに基因する (Photo. 12)。

このように、さほど明確でないが、樹種によって浸透能に多少の差異が生じた原因には、落葉層の質的構成 (分解状態) やそれが影響すると考えられる表土の構造などをあげることができる。たとえば、ニセアカシアやクスギのように落葉の分解の速やかな樹種は、有機物が地中に浸入し、表土には耐水性の団粒構造が発達している。

6-2. 人工降雨による地被別流下区実験

この設備は 1 プロットが幅 1 m, 斜面長 1.5 m, 深さ 0.5 m の大きさを持ち、傾斜角は 30° としている。プロットの中には、自然状態の表層土を現地から採取し、できるだけ構造を破壊しないようにしてはめ込んだものである。深さ 0.5 m の底部には現場土壌が密着しており、透水性は比較的良好である。降雨

Table 11. 人工降雨による地表流下区の試験区とその状態
Experimental plots by the similar rainfall apparatus and
those conditions

試験区 Experimental plot		状 態 Condition
A	裸 地 (耕うん) Bare land (Cultivated)	落葉地被物を除去し、深さ 0.5m まで耕うんした。 Excepted A ₀ layer and cultivated to 0.5 m in depth
B	裸 地 (無処理) Bare land (Non-treatment)	落葉地被物を除去した。 Excepted A ₀ layer
C	草 生 地 Grass land	シバの純群落 Siba (<i>Zoysia japonica</i>) simple community
D	伐 採 跡 地 Cut-over land	アカマツ天然生林の伐採 2 年後 After two years of cutting of Akamatsu (<i>Pinus densiflora</i>) natural forest
E	林 地 (針葉樹) Forest land (Needle-leaved tree)	25 年生のカラマツ植栽林地 Karamatsu (<i>Larix leptolepis</i>) planting forest of 25 years of age
F	林 地 (広葉樹) Forest land (Broad-leaved tree)	コナラウワミズザクラのおよそ 25 年生の天然生林 Konara (<i>Quercus serrata</i>) and Uwamizuzakura (<i>Prunus grayana</i>) natural forest of about 25 years of age
G	サ サ 生 地 Sasa covered land	スズタケの純群落 Suzutake (<i>Sasamorphia purpurascens</i>) simple community

は散水式で、降雨強度は 50~200mm/hr の
範囲で散水器の交換によって変化できる。
試験区は 7 区で、その地被状態の詳細は
Table 11 に示すとおりである。供試土壌
は岩手火山灰であり、3 年間入れかえて試
験を繰り返した。各区の土壌断面は Fig.
11, 土壌の諸性質は Table 12 のとおりで
ある。

Fig. 12 は各試験区の降雨期間と浸透レ
ートの関係を示したものである。これは平
均降雨強度 180 mm/hr の 12 回の実験例
を平均した結果である。各区の浸透経過と
も、前記の HORTON²¹⁾ の提案した $f=f_0 +$
 $(f_0 - f_e)e^{-kt}$ の式に、おおむね適合する。
この式に基づき初期浸透レート (f_0)、終期
浸透レート (f_e) および定数 k を求めた
のが Table 13 である。これによると、浸
透性の高い広葉樹林地、ササ生地などでは
 f_0 と f_e の差は比較的小さいのに対し、浸
透性の低い裸地両区や草地などでは差が
大きく、浸透レートが急減する傾向がある。

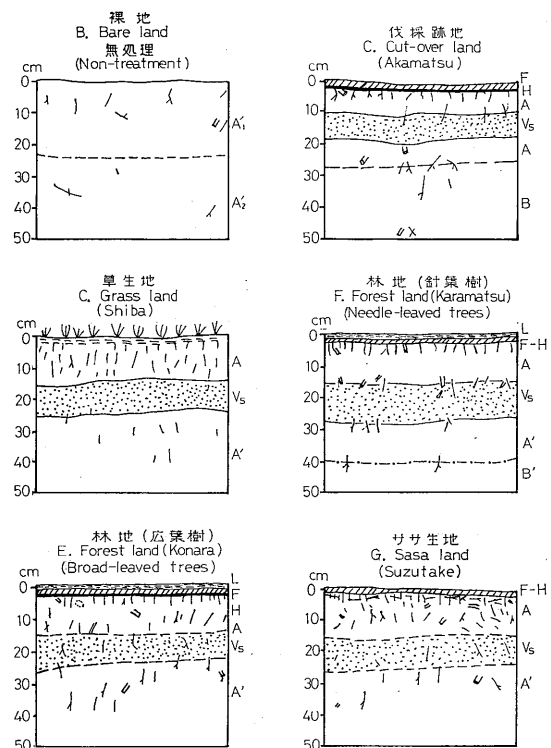


Fig. 11 各試験区の土壌断面
The soil profiles of each run-off plot with
similar rainfall apparatus.

Table 12. 人工降雨による地表流下区の土壤の諸性質
Soil properties of each experimental plot by the similar rainfall apparatus

試 験 区 Plot	層 位 Layer	容積重 Volume weight (%)	圧 結 度 Compact- ness (%)	全孔隙量 Total porosity (%)	最大含水量 Water holding volume (%)	微妙+粘土 Silt+ Clay (%)	透 水 性 Percola- tion rate (cc/min)	有機物 Organic matter (%)
A	裸地耕うん Bare land (Cultivated)	Upper 63.1 Middle 58.4 Lower 56.5	69.1 67.9 67.6	76.8 78.9 79.2	71.1 74.1 74.5	44.9 56.6 54.9	80	6.1 7.6 6.4
	裸地無処理 Bare land (Non-treatment)	Upper 68.1 Middle 53.6 Lower 58.6	82.7 70.7 78.5	74.1 79.9 78.4	71.1 77.8 68.3	59.5 69.6 65.1	100	7.4 10.6 8.2
	草 地 Grass land	A 93.2 Vs 90.7 A' 66.9	101.2 81.2 81.7	64.3 69.8 74.8	59.5 69.8 72.8	47.5 33.5 52.5	23	8.2 4.1 6.5
D	伐採跡地 Cut-over land	A 95.0 Vs 94.0 A' 82.4	87.3 75.5 83.0	69.1 66.1 71.4	59.5 91.0 62.2	33.2 29.7 31.5	157	5.0 3.0 2.9
	広葉樹林地 Forest land (Broad-leaved)	A 67.8 Vs 99.5 A' 68.3	74.8 84.6 82.8	76.8 64.2 76.6	68.8 58.0 69.9	43.4 22.3 52.1	156	8.0 2.7 5.5
	針葉樹林地 Forest land (Needle-leaved)	A 81.6 Vs 103.5 A' 71.4	79.7 81.1 84.2	70.1 65.0 73.0	66.5 54.0 77.8	42.9 18.0 53.3	111	4.9 1.7 5.3
G	ササ生地 Sasa covered land	A 56.9 Vs 91.5 A' 90.5	64.0 74.6 81.7	78.1 68.6 67.0	73.6 66.5 69.2	39.5 24.2 47.3	156	7.3 4.7 2.4

Table 13. 降雨強度 180 mm/hr での浸透指数 (k), 初期浸透レートおよび最終浸透レート
Infiltration index (k), initial (f_0) and final infiltration rate (f_c) for
180 mm/hr rainfall intensity

地 被 Cover type	裸 地 A. Bare land (耕うん) (Culti- vated)	裸 地 B. Bare land (無処理) (Nontrea- tment)	草 生 地 C. Grass land	伐採跡地 D. Cut- over land	林 地 E. Forest land (広葉樹) (Broad- leaved)	林 地 F. Forest land (針葉樹) (Needle- leaved)	ササ生地 G. Sasa covered land
区 分 Classification							
初期浸透レート (f_0) Initial infiltration rate (mm/hr)	135.0	174.0	146.2	173.4	185.1	161.3	185.7
最終浸透レート (f_c) Final infiltration rate (mm/hr)	71.6	80.3	100.7	140.9	162.8	125.3	172.2
浸 透 指 標 (k) Infiltration index	5.1	4.7	5.5	7.7	7.8	8.5	9.1

Fig. 13 は 3 年間の供試全降雨について、各区分に降雨強度階級別の浸透レートをプロットしたものである。これらの値は、降雨 2 時間の終期 30 分の平均レートである。各区とも、降雨強度が高まるにつれて、浸透レートも対応して大きくなっていく。しかし、各区によってその傾向に若干の差異が認められる。すなわち、浸透性の高い広葉樹林地やササ生地では、 $f=i$ の直線に沿って上昇する直線型で表わされ、変曲点が認めがたい。これに対し、浸透性の低い草生地や裸地区では、変曲点はかなり低く 50 mm/hr 前後とみなされ、裸地耕うん区ではそれ以上の高い降雨強度が継続された場合には、地表の土壤構造に変化を来たして、逆に浸透レートが低下する傾向さえみられる。

このように、ササ生地＞広葉樹林地＞アカマツ
林伐跡地＞カラマツ林地＞草生地＞裸地無処理＞
裸地耕うん の順に、浸透性が高いことがわかつた。ササ生地が浸透性が高いのは、地表に密に発達する地下茎とそれから発生する細根が、大いに
関与しているように観察された。ササ生地や広葉
樹林地地区では、表土が膨軟で地中生物の活動孔な
どが多く、雨水の浸透に好影響を与えている
(Photo. 13)。

カラマツ林地の浸透性の低いのは、地表にち密
にたい積した落葉があたかも畳表のようになり、
雨水の流下をむしろ促進している。とくに乾いた
状態では撈水性を増すことは、前節の現地測定
の事例と同様であった。裸地両区を比較した場合、
全期間を通じて無処理区よりも耕うん区の方が、
浸透性が低かった。耕うん当初は、土壌の物理性
が良くなったが、降雨が長期化したり、繰り返され
ることによって、主に雨滴の打撃で地表面に難透
水性の皮膜 (Crust) が形成され、以後これが水み
ちとなり、しだいに雨裂が発生した (Photo. 14)。

とくにこの供試土壌は降下年代の
異なる火山灰のたい積のために、耕
うんの結果として微粒の有機物を含
む埋没表層土が地表に露出し、雨滴
の打撃で粗孔隙をつぶすことも影響
している。いずれにしても、落葉地
被物のない裸地の浸透能は小さく、
地表面が変化しやすいため浸透レ
ートが降雨期間中安定しない場合がある。

シバの優占する草生区の浸透性が
かなり低くあらわれているが、これ
はシバの根系が表土を緊縛すること
によって、地表が固結したことも十
分に考えられるが、もともと物理的
に固結されたところにシバが発達し
たという判断が適切かもしれない。

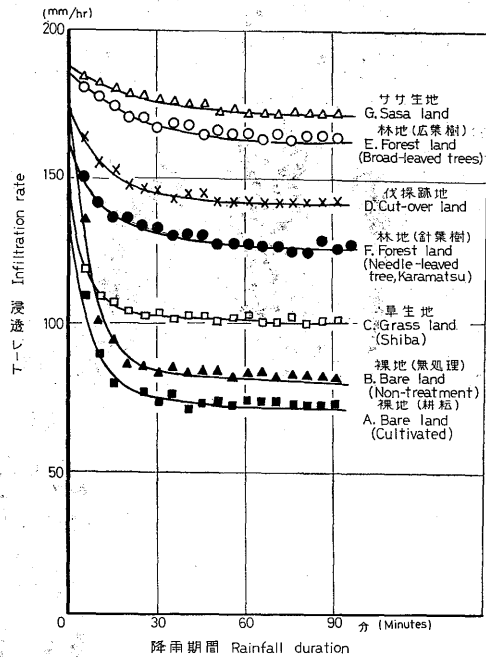


Fig. 12 降雨期間と浸透レートの関係
Relation of infiltration rate to rainfall
duration by the run-off plots with similar
rainfall apparatus.

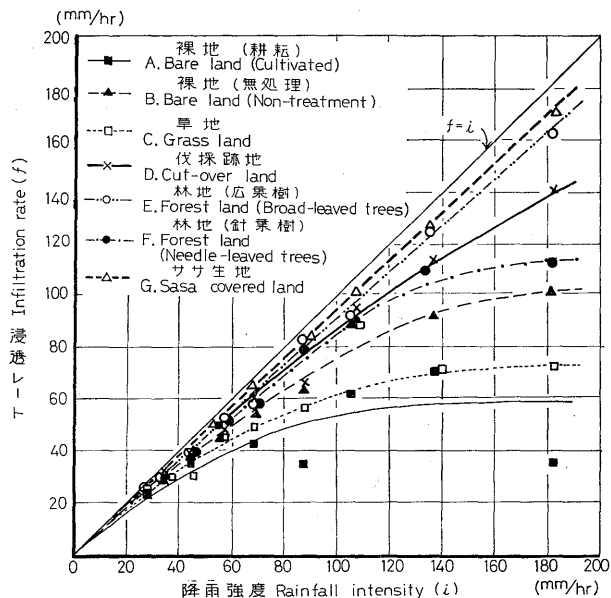


Fig. 13 降雨強度と浸透レートの関係
Relation of infiltration rate to rainfall
intensity.



Photo. 13 最高の浸透能を示した広
葉樹林地の表層土壌の状態
Surface soil condition of the
broad-leaved tree stand, which
have the highest infiltration
capacity.

Photo. 14 人工降雨装置を付帯し
た屋外地表流下区におけ
る耕起線地区の侵食状況
Eroded condition of the culti-
vated bare-land plot in the
outdoor run-off plots with the
artificial rainfall apparatus.



7. 地形および土壌型別の浸透能の比較

浸透能の大小を根本的に支配するのは、土壌と考えるのが妥当である。土層の形成や土壌水分の環境は、地形と密接な関係があるので、浸透の問題を大局的に判断するためには、地形条件も考慮に入れなければならない。

ほぼ同種の植被で、地形および土壌型などの土地条件が顕著に異なる場所を選び、注水式山地浸透計で浸透能の測定を行なった。すなわち、ブナを主とする天然生林地と、アカマツ天然生林地およびカラマツ人工林地について、その中に典型的な土地条件を持つ各9か所の調査区を選んだ。各地区の選択にあたっては、斜面上の位置を基準としており、それぞれの地区の土壌型は水分環境から、乾性、適潤性、湿性の3群に大別している。

ブナを主とする広葉樹林地は、岩手県下の北上川支流和賀川流域であり、標高700m前後の山岳地帯である。降水量はおおよそ2,000mmで、新第3紀層（凝灰岩）を母材とする土壌は、その生成の過程から褐色森林土が主体で、一部ポドゾルが出現する。アカマツ天然生林およびカラマツ人工林は、北上川本流ならびに支流赤川流域にあり、標高200～400mの丘陵地帯で、降水量1,200mmで、岩手山噴火にともなう新期火山灰を母材としている。土壌は生成の過程から、草原性黒色土に属している。各地区の自然概況は Table 14, 地表状態は Table 15, 土壌諸性質は Table 16 に示すとおりである。

測定の結果得られた各地区の浸透能 (f_e) は、Table 17 に総括した。この表中に斜面上の位置によ

Table 14. 測定地区の自然概況
The natural condition of measurement areas

地区 Area No.	地形因子 Orographic factor			方位 Bearing	土壌型 Soil type	植生型 Vegetation type	林齢 Stand age (Years)	疎密度 Crown density (%)	胸高直径 D. b. h. (cm)	樹高 Tree height (m)
	斜面形 Slope form	斜面上の位置 Position on slope	地表傾斜角 Inclination angle (°)							
1	Convex	Upper	33	SW	B _B	Buna-Mizunara	100	85	50	22
2	Balance	Upper	31	SW	B _D (d)	Buna-Mizunara	110	85	55	21
3	Concave	Upper	33	W	B _D	Buna	120	80	55	23
4	Convex	Middle	30	SW	B _D (d)	Buna	100	85	55	23
5	Balance	Middle	31	SW	B _D	Buna-Mizunara	110	90	60	24
6	Concave	Middle	32	W	B _D	Buna	90	80	50	22
7	Convex	Lower	26	SW	B _E	Buna-Tochi	80	75	40	18
8	Balance	Lower	24	SW	B _E	Buna-Katsura	110	85	55	20
9	Concave	Lower	26	W	B _F	Tochi-Katsura	85	80	45	22
10	Convex	Upper	35	S	B _I A	Akamatsu	104	85	28	23
11	Balance	Upper	35	S	B _I c	Akamatsu	43	80	18	13
12	Balance	Upper	30	S	B _I c	Akamatsu	32	80	12	10
13	Convex	Middle	30	S	B _I D(d)	Akamatsu	108	75	38	27
14	Balance	Middle	25	SW	B _I D(d)	Akamatsu	52	80	23	17
15	Balance	Middle	28	SW	B _I D(d)	Akamatsu	40	85	14	16
16	Convex	Lower	30	SW	B _I D	Akamatsu	106	75	43	29
17	Balance	Lower	25	SW	B _I D	Akamatsu	52	80	34	24
18	Concave	Lower	30	SW	B _I D	Akamatsu	53	75	36	21
19	Convex	Upper	35	S	B _I B	Karamatsu	32	85	15	14
20	Balance	Upper	33	SW	B _I B	Karamatsu	38	80	17	16
21	Concave	Upper	35	SW	B _I B	Karamatsu	25	85	14	12
22	Convex	Middle	30	S	B _I D(d)	Karamatsu	32	85	16	15
23	Balance	Middle	25	S E	B _I D(d)	Karamatsu	38	80	18	17
24	Concave	Middle	25	SW	B _I D(d)	Karamatsu	25	85	15	13
25	Convex	Lower	28	S	B _I D	Karamatsu	32	80	17	16
26	Balance	Lower	24	SW	B _I D	Karamatsu	38	80	19	18
27	Concave	Lower	28	SW	B _I D	Karamatsu	25	80	16	14

注) Comment

Convex: 上昇斜面 (凸) Balance: 平衡斜面 Concave: 下降斜面 (凹)

Table 15. 各測定地区の地表状態
Surface cover condition of each measurement area

地区 Area No.	A ₀ 層の被率 Coverage of A ₀ layer (%)	落葉地被物の厚さ Thickness of A ₀ layer (cm)				地床の植被率 Coverage of ground- floor plant (%)	記 事 Remark
		L	F	H	計 Total		
1	100	2.3	1.5		3.8	45	菌糸網層 (一部) Am layer (a part)
2	100	1.0	3.4	1.1	5.5	65	" "
3	100	1.3	2.5	1.0	4.8	70	
4	100	1.0	3.5	0.9	5.4	55	
5	100	1.4	2.7	1.3	5.4	65	
6	100	1.5	2.4	1.0	4.9	60	
7	100	2.0	2.2	2.0	6.2	45	
8	90	0.8	1.0	1.4	3.2	60	
9	80	1.0	1.5		2.5	35	
10	100	3.8	2.7	1.5	8.0	25	菌糸網層 (一部) Am layer (a part)
11	100	2.5	2.2	1.3	6.0	45	" "
12	100	3.0	2.2	0.8	6.0	50	" "
13	100	1.2	2.0	1.1	4.5	65	
14	100	1.0	2.0	1.0	4.0	55	菌糸網層 (一部) Am layer (a part)
15	100	1.0	2.0	1.0	4.0	65	
16	100	0.8	1.6	1.6	4.0	65	
17	100	1.5	1.5	1.5	4.5	70	
18	100	1.5	1.8	1.2	4.0	60	
19	100	2.0	1.5	0.5	4.0	25	菌糸網層 (全面) Am layer (overall)
20	100	2.0	1.5	0.0	3.5	25	菌糸網層 (一部) Am layer (a part)
21	100	1.5	1.5	0.3	3.3	35	" "
22	100	2.0	1.5	0.5	4.0	35	
23	100	1.0	1.5	0.5	3.0	40	
24	100	1.5	1.5	1.0	4.0	45	
25	100	1.0	1.0	1.0	3.0	40	
26	100	1.5	0.5	1.5	3.5	55	
27	100	1.5	1.0	1.3	3.8	50	

て3区分した平均値が示されているが、アカマツ、カラマツの両林地は、 f_c の値が下部>中部>上部の順となつて、斜面下部は上部のおよそ3倍の高い値を示している。ブナを主とする広葉樹林地では、むしろ中部が最大で、上部と下部では顕著な差異が認められない。

山地斜面の一般的なたい積様式としては、尾根を含む上部は侵食を受けた残積土であり、中腹は崩落または剥落とたい積が平衡した匍行土である。そして、下部は斜面からの崩積土と比較的新しい水積土の複合から形成されている。アカマツ、カラマツの両林地でみられたように、下部>中部>上部の順に浸透性が高くなるのが一般的なものと考えられる。しかし、山腹斜面自体その規模においても、形態からみても種々である。ブナを主とする天然生広葉樹林地では、いずれも山岳地帯の大きな斜面であつて、中腹部分においても崩積状のたい積様式を示しており、アカマツ、カラマツなどの丘陵林地の下部斜面に類似する様相を呈している。そして、広葉樹天然生林地帯の最下部斜面は、沢沿いの緩傾斜の湿潤地で、崩積土と水積土が組み合わさったたい積地である。地表および土壌形態からみて、雨水の浸透性があまりよくない。

斜面の形状別に整理してみると、凸型 (Convex) は平衡 (Balance) や凹型 (Concave) よりも、浸透性がやや低い傾向が認められるが、必ずしも明らかなものではない。本測器のようにある地点の小区内

Table 16. 各測定地区の土壌の諸性質
Soil properties of each measurement area

地区 Area No.	試料採取深 Sampling depth (cm)	圧結度 Compact- ness(%)	孔 隙 量 Porosity (%)		透 水 性 Percola- tion rate (cc/min)	団粒化率 Aggre- gation (%)	有 機 物 Organic matter (%)	粘土+微砂 Clay+Silt (%)
			非 毛 管 Non- capillary	全 Total				
1	0~5	82.3	7.0	68.4	16	18.5	7.7	42.0
	20~25	86.0	8.9	64.9	22	7.5	3.2	41.5
2	0~5	74.3	19.6	77.5	66	22.7	8.5	40.1
	20~25	68.4	9.5	74.3	47	9.5	4.9	38.9
3	0~5	65.7	22.9	78.3	78	18.5	7.3	42.9
	20~25	66.5	11.5	72.7	50	8.8	5.2	36.5
4	0~5	59.9	21.2	75.6	180	50.6	17.3	50.6
	20~25	64.0	29.7	74.6	67	42.0	7.6	42.0
5	0~5	54.8	23.8	80.4	189	43.9	16.5	51.9
	20~25	67.7	18.9	78.9	56	36.0	7.8	43.7
6	0~5	44.8	30.1	84.3	205	54.9	16.7	50.8
	20~25	65.7	22.8	80.7	77	28.7	5.4	54.8
7	0~5	63.8	22.8	78.5	101	36.9	11.6	42.7
	20~25	67.8	16.4	75.2	48	18.4	5.3	48.9
8	0~5	68.4	20.7	75.8	79	38.9	15.3	44.0
	20~25	73.1	13.2	74.9	39	19.9	6.2	53.7
9	0~5	70.4	11.8	76.6	44	37.9	15.4	51.5
	20~25	78.5	8.9	72.5	28	27.0	7.8	40.0
10	0~5	62.8	15.0	75.6	64	17.5	7.5	44.1
	20~25	69.5	23.1	80.6	80	12.0	2.7	61.6
11	0~5	77.2	29.5	78.6	84	33.1	11.9	33.0
	20~25	61.4	30.7	80.8	60	21.2	4.5	35.7
12	0~5	57.3	26.7	81.9	146	35.9	9.3	29.0
	20~25	63.9	18.6	76.5	95	23.0	6.0	16.8
13	0~5	54.8	36.3	80.7	45	14.7	15.4	42.7
	20~25	63.2	21.8	84.6	76	15.3	5.0	29.0
14	0~5	77.1	19.7	74.0	110	24.0	11.2	42.8
	20~25	82.2	11.7	71.9	24	7.6	2.4	61.7
15	0~5	84.6	17.0	79.8	34	10.5	9.9	16.0
	20~25	53.2	21.9	83.0	71	18.0	5.6	37.1
16	0~5	54.5	33.6	85.6	112	26.4	14.6	37.0
	20~25	54.7	35.4	85.4	58	11.9	5.3	31.5
17	0~5	78.2	23.1	79.1	149	35.1	14.7	49.9
	20~25	70.2	29.8	71.3	26	9.0	9.5	39.1
18	0~5	41.9	16.1	85.5	201	32.7	12.5	38.7
	20~25	57.8	23.4	81.8	72	15.0	14.4	45.5
19	0~5	59.2	30.7	80.8	84	28.9	9.3	45.3
	20~25	74.7	26.8	88.3	64	17.6	10.4	37.7
20	0~5	64.9	20.8	78.6	44	23.4	7.5	34.7
	20~25	68.1	16.9	74.3	57	11.9	4.9	36.7
21	0~5	67.1	17.4	74.8	38	24.0	6.9	41.4
	20~25	72.7	20.5	76.5	47	10.0	5.3	35.2
22	0~5	59.8	25.7	87.0	91	26.7	5.9	42.5
	20~25	45.7	16.4	85.5	30	11.3	6.2	36.3
23	0~5	53.7	26.0	86.9	111	26.0	7.5	40.2
	20~25	67.3	19.4	83.7	53	13.7	5.9	35.7
24	0~5	51.8	28.4	83.9	121	25.4	8.5	41.8
	20~25	63.0	17.5	87.2	67	15.0	5.1	40.6
25	0~5	39.2	26.8	88.3	76	22.8	9.3	36.3
	20~25	74.7	16.5	82.7	45	11.9	10.4	29.1
26	0~5	45.2	34.0	86.9	168	29.0	14.4	40.0
	20~25	50.4	22.8	85.1	73	22.0	7.9	25.8
27	0~5	34.9	33.9	87.8	206	32.1	15.6	35.9
	20~25	44.7	22.8	85.2	90	24.7	8.5	30.1

Table 17. 斜面上の位置別の浸透能と浸透指標
Infiltration capacity (f_c) and indexes (k, ϕ_0) for each
position on the slope

ブナを主とする天然生林広葉樹林地 Forest land of broad-leaved trees, mainly composed by Buna				アカマツ天然生林地 Akamatsu natural forest land				カラマツ人工林地 Karamatsu planting forest land			
地 区 Area No.	f_c (mm/hr)	ϕ_0	k	地区 Area No.	f_c (mm/hr)	ϕ_0	k	地区 Area No.	f_c (mm/hr)	ϕ_0	k
1	70	56	0.085	10	42	28	0.037	19	62	48	0.090
2	174	110	0.260	11	187	168	0.082	20	148	83	0.214
3	203	143	0.215	12	153	84	0.218	21	104	69	0.132
上部斜面 Upper 平均 (Average)	149	103	0.187		127	93	0.112		105	67	0.145
4	370	331	0.587	13	236	188	0.227	22	236	172	0.300
5	352	305	0.498	14	260	206	0.278	23	250	177	0.312
6	331	269	0.480	15	315	265	0.373	24	271	232	0.276
中 腹 Middle 平均 (Average)	351	301	0.520		270	220	0.293		252	194	0.296
7	164	126	0.175	16	364	350	0.286	25	271	214	0.333
8	145	80	0.221	17	387	369	0.567	26	290	175	0.526
9	93	76	0.102	18	293	257	0.250	27	378	354	0.452
下部斜面 Lower 平均 (Average)	134	94	0.162		348	325	0.368		313	248	0.437

の浸透能を測定する場合には、斜面の形状のような大きな因子よりも、その部分の地表や土壌状態などが直接的に関与するものと考えられる。

つぎに、土壌型と浸透能の関係を検討してみる。現行の土壌型は、水分環境を基準にして分類されているから、本来地形と密接な関係があるはずである。前掲の Table 17 から、土壌型別に整理して浸透能 (f_c) の値を示したのが Fig. 14 である。

これによると、各樹種とも適潤性の B_d または B_{ld} 型が最大の浸透能を示しており、乾性または湿性などの極端な土壌型は、かなり小さくなっている。崩積土が主体となる B_d または B_{ld} 型は、圧結度が小さく、非毛管孔隙量が多く、耐水性の団粒の形成が著しい。これに対し、斜面上部の B_A, B_B および B_{lb} などの型に属する崩積土は、全般的に固結しており、A₀ 層は乾燥しマット状を呈している。そして、その層中または直下に撈水性の外生菌根 (Ectotrophic mycorrhiza) を発達させ、地表流下を促進させている。このような場所では、Fig. 15 に示すように降雨の初期浸透レート (f_0) が著しく小さく、時間の経過とともに徐々に浸透レートが大きくなる傾向がある。

B_F 型に属する湿性土壌は広葉樹天然生林のみであったが、全体的に A₀ 層がうすく、地区 No. 9 のトチーカツラ林地では部分的に欠除していた。土壌形態は全体的に微粒子によって表土の粗孔隙を充てんされた様相を呈し、また、土壌中の有機物含量が著しく多い。土湿不足がないため、初期の浸透レート (f_0) と終期の浸透レート (f_c) との差が、ほとんどないのが特徴である。

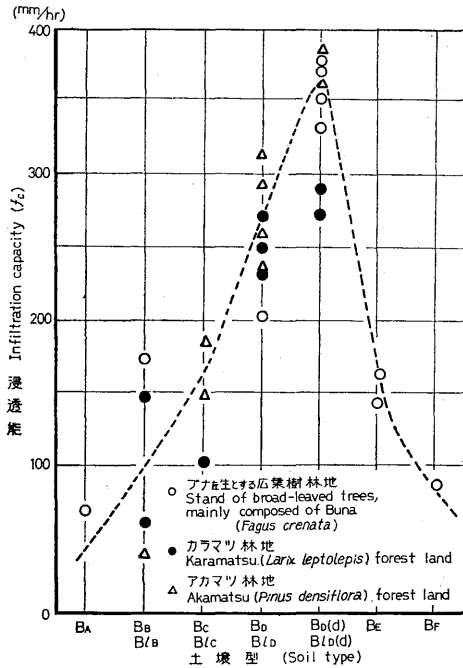


Fig. 14 土壌型別の浸透能の関係
Relation of infiltration capacity (f_e) to each soil type.

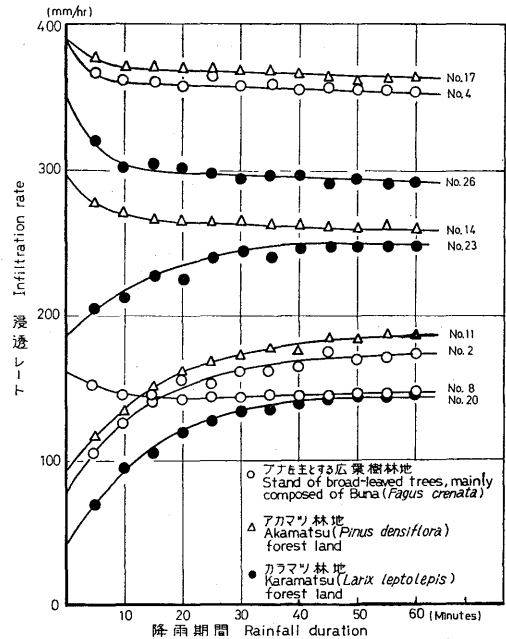


Fig. 15 土地条件別の各林地の降雨期間と浸透率の関係
Relation of infiltration rate to rainfall duration on the forest lands at each ground condition.

8. 同種の森林植被の地位別浸透能の比較

地位は森林の材積生産力を表現する位級概念であり、地形、土壌などの環境因子によって、その優劣が支配されると考えられている。すでに真下ら²⁷⁾は、土壌型別の透水と地位指数とを結びつけて、有意な関係のあることを明らかにしている。著者は、前項で触れたアカマツ天然生林地の9地区がおおむね地位別に代表されているので、浸透能との関係を検討してみた。地位区分は岩手地方アカマツ収穫表¹⁾によったが、Fig. 16に地位別の樹高曲線と各地区の平均樹高を挿入してみた。これによると、地区 No. 16, 17, 18 は地位「上」に、No. 13, 14, 15 は地位「中」に、地区 No. 10, 11, 12 は地位「下」に該当する。

この地位3区分によって、測定した浸透能(f_e)を再整理して平均したのが Table 18 の結果である。また、あわせて A_0 層除去状態

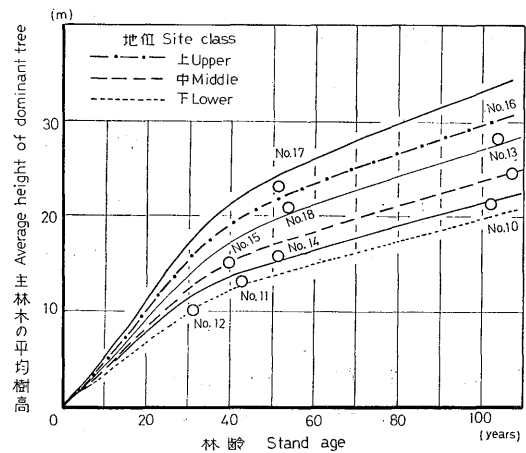


Fig. 16 収穫表による樹高曲線と各地区の主林木の平均樹高

Relation of the height curves, by the yield table to the average height of dominant tree at each area.

Table 18. アカマツ天然生林地における地位別の浸透能と浸透指標
Infiltration capacity (f_c) and indexes (k , ϕ_0) for each site class of
the Akamatsu forest land

地位 Site class	地区 Area No.	浸透能(最終浸透レート) Infiltration capacity			浸 透 指 標 Infiltration indexes					
		f_c			ϕ_0			k		
		自然状態 Natural condi- tion	A ₀ 層除去 Except- ed A ₀ layer	(%)	自然状態 Natural condi- tion	A ₀ 層除去 Except- ed A ₀ layer	(%)	自然状態 Natural condi- tion	A ₀ 層除去 Except- ed A ₀ layer	(%)
上 Upper	16	364	248	68.1	350	232	66.3	0.286	0.095	33.2
	17	387	222	57.1	369	188	50.9	0.567	0.160	28.2
	18	293	244	33.2	257	232	90.3	0.250	0.070	28.0
	平均 (Average)	348	238	68.4	325	217	66.8	0.368	0.108	29.8
		(mm/hr)			(mm/hr)					
中 Middle	13	236	203	86.0	188	163	86.7	0.227	0.170	74.9
	14	260	199	76.5	206	186	90.3	0.278	0.059	21.2
	15	315	195	61.9	265	179	67.5	0.373	0.073	19.6
	平均 (Average)	270	199	78.3	220	176	80.0	0.293	0.101	34.5
下 Lower	10	42	42	100.0	28	27	96.4	0.037	0.041	101.8
	11	153	183	119.6	84	121	144.0	0.218	0.222	101.8
	12	187	158	84.2	168	118	70.2	0.082	0.047	57.3
	平均 (Average)	127	128	100.8	93	89	95.7	0.112	0.103	92.0

の測定値も併記している。これによると測点数が少ないが、地位別の浸透能にかなりはっきりした差異が認められる。すなわち、生育の良好な場所は不良な場所よりも、雨水の浸透性が高いといえよう。そして、一般的にみて地位は地形と土壌に関連することは確かで、斜面下部の適潤な崩積土に成立した林木の生育は良く、しかも浸透能が大きく、反対に、斜面上部の乾燥した残積土に成立したものは概して生育が不良である。地位「下」に属する No. 11 では、自然状態より A₀ 層除去状態の方が、一般的傾向と異なり大きな値を示している。これらはいずれも斜面上部のきわめて乾燥した立地条件下にあり、前述のように A₀ 層の中および直下に菌糸網層 (Am) が発達している。Am 層は著しい撓水性を示し、これらを除去し地表露出することによって、むしろ浸透性が逆に高まる場合のあることがわかった。

9. 浸透能と地表状態および土壌の物理性との関係

浸透は植被および立地条件別に有意な差異がみられることは上述のとおりである。このような差異を生じさせる因子として、地表植被の発達状態、落葉などの植物遺体の質や量、地中の根系、表土の孔隙、土性など多くの因子があげられよう。いままでおもに農耕地の浸透研究の過程において、BAVER³⁾をはじめ LINSLEY²³⁾ などにより、浸透能と土壌物理性との相関関係がほぼ明らかにされている。これらによると、浸透には非毛管孔隙量と容積重に強い結びつきがみられる。

DORTIGNAC⁷⁾ は放牧地の終期浸透レートを予測するために、植物遺体重と非毛管孔隙量の2変数を用いた重回帰式を求めている。MEEUWING²⁸⁾ は高海拔の草地を対象に、土壌の団粒化率、容積重、土湿などの5変数を導入した重回帰式を求めている。これらの重回帰式の精度はかなり高く、比較的単純な地被と土地条件である草地などの浸透能予測に適合するようである。しかしながら、各種の地被と土地条件が複雑に重合する自然山地を対象にした場合には、定量しがたい種々な因子を包括するために、高精度の回帰式

Table 19. 各測定地区の土壌の諸性質
Soil properties of each measurement area

地区 Area No.	圧 結 度 Compact- ness		最大容水量* Water- holding capacity		孔 隙 量* Porosity		透 水 性** Percola- tion		粘土+微砂 Clay+ Silt		有 機 物 Organic matter		落葉地被物重量 Weight of total litter		
					全 Total		非 毛 管 Non- capillary		rate						
	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	(air dry kg/m²)
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(cc/ min)	(cc/ min)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	58.6	69.9	52.4	66.1	80.4	75.3	12.6	10.4	79	70	37.3	42.8	10.7	2.4	2.43
2	50.4	68.2	53.4	63.8	83.2	72.0	16.7	13.3	115	75	32.9	41.5	13.6	3.8	4.13
3	64.5	78.3	55.6	65.2	79.0	74.4	10.9	5.7	63	67	41.6	45.1	11.3	3.5	3.75
4	75.8	78.5	50.3	52.7	54.6	58.7	5.3	8.3	47	66	36.0	39.7	15.9	7.4	0.94
5	66.0	70.0	63.4	65.6	74.5	78.4	18.4	12.7	114	75	31.1	30.9	9.2	0.8	0.75
6	77.0	78.0	43.0	50.8	45.7	54.6	2.9	8.8	6	36	37.4	40.0	4.2	2.1	0.00
7	75.8	76.0	51.7	66.5	55.3	68.5	7.6	10.3	46	66	37.6	41.3	11.8	3.8	0.00
8	65.9	74.9	61.8	69.5	82.7	73.4	13.9	7.2	86	71	36.0	37.9	20.7	6.8	2.63
9	77.6	78.1	53.4	50.0	58.3	56.7	12.6	4.8	77	69	30.1	32.9	4.2	0.8	0.00
10	76.0	78.4	46.9	60.2	50.1	61.5	4.0	5.4	42	65	37.6	40.8	3.5	0.7	0.00
11	62.8	70.5	51.7	69.5	84.4	78.5	18.6	16.5	88	72	37.0	40.3	13.9	2.4	82.3
12	68.0	69.4	58.7	62.7	61.2	66.3	7.2	10.1	44	65	35.5	37.3	9.3	1.8	1.31
13	75.0	78.0	58.7	66.7	66.2	70.4	4.2	21.0	51	67	34.3	36.8	2.0	0.2	0.00
14	67.5	77.4	52.8	54.4	55.7	58.6	6.5	13.0	56	67	34.1	36.4	8.2	2.1	2.25
15	62.3	74.5	51.3	69.5	83.9	78.2	22.0	12.1	130	77	34.3	33.0	22.4	2.6	3.19
16	64.5	76.8	72.1	71.4	84.5	78.4	19.0	12.2	94	72	33.9	43.9	19.6	1.8	2.25
17	70.4	78.5	71.2	66.3	76.6	72.5	10.0	16.8	78	70	41.5	40.0	18.0	3.5	2.25
18	68.9	78.5	61.7	58.0	76.3	72.5	16.4	14.9	108	74	34.0	37.9	17.7	2.7	0.75
19	69.5	68.1	73.3	75.4	76.8	80.9	7.8	10.4	63	68	39.2	37.9	6.7	3.7	0.00
20	89.1	86.0	68.1	68.9	67.6	69.7	3.8	7.6	34	64	32.7	31.9	8.3	4.8	0.00
21	65.2	82.3	67.1	52.4	78.1	64.1	19.3	14.9	101	74	30.8	14.5	6.4	4.0	0.94
22	76.2	82.5	50.2	65.2	71.7	73.0	24.1	11.3	80	68	24.7	14.6	5.9	6.5	0.75
23	72.7	67.8	61.2	60.2	70.8	68.4	27.3	24.6	60	84	15.3	20.1	8.6	4.0	2.06
24	77.2	81.8	79.8	51.9	70.3	65.5	28.6	13.8	136	78	19.2	8.0	6.4	4.0	2.25
25	68.3	68.0	70.8	71.5	76.3	72.5	20.0	18.8	94	72	24.8	9.2	5.9	6.5	1.50
26	68.0	68.3	68.5	60.6	76.6	64.1	11.6	16.3	95	68	28.1	14.3	5.7	4.2	0.94
27	57.3	63.9	79.1	76.5	81.9	76.5	26.7	18.6	146	95	29.0	16.8	9.3	6.0	1.88
28	73.0	81.8	64.0	62.9	71.4	68.1	10.4	7.9	65	66	25.5	19.4	11.8	4.1	0.00
29	72.2	74.5	69.0	64.0	76.3	70.0	17.3	14.3	66	67	34.3	27.4	13.5	6.0	0.94
30	69.0	71.0	70.3	64.7	74.4	68.5	10.8	21.6	91	58	24.1	25.4	12.7	5.5	0.75
31	78.2	79.8	72.9	69.9	74.4	68.0	16.9	8.8	106	80	47.4	24.1	10.7	2.9	5.62
32	71.1	64.5	76.3	63.8	77.0	67.6	22.6	12.0	118	78	28.4	25.1	10.1	0.8	2.63
33	63.4	71.8	69.7	62.9	82.4	68.6	24.1	30.5	134	84	51.5	33.9	7.4	2.1	1.69
34	77.9	68.8	58.8	53.9	70.9	61.7	13.5	16.2	87	72	40.1	29.3	5.4	0.0	1.34
35	66.4	65.1	75.8	66.0	75.8	69.1	21.3	9.9	114	78	41.9	9.2	9.2	1.9	0.00
36	86.1	79.8	38.5	68.0	50.2	70.7	24.0	14.6	69	67	28.1	28.1	0.0	2.0	0.00
37	63.3	82.9	82.0	75.0	77.9	68.1	11.3	26.7	104	78	56.6	42.6	7.7	1.1	0.38
38	76.7	87.3	64.0	67.9	68.6	65.3	27.0	25.7	108	75	52.5	49.4	11.8	4.1	1.50
39	62.4	63.7	69.0	74.0	81.8	82.6	16.3	7.7	64	68	47.3	47.4	13.5	6.0	1.50
40	64.0	72.4	74.3	68.7	80.8	76.1	20.2	22.8	143	79	44.1	35.4	12.7	5.5	1.50
41	64.6	76.2	69.6	66.2	79.2	74.2	22.0	16.3	116	76	49.0	35.7	15.9	3.8	0.75
42	53.9	54.4	83.0	82.3	86.5	86.1	27.6	34.5	179	100	67.9	46.8	2.8	11.9	0.56
43	62.4	60.6	79.1	81.4	81.9	81.0	10.8	16.6	140	183	48.0	40.3	10.5	7.6	0.75
44	70.1	77.0	63.0	70.8	80.3	71.1	10.6	5.7	122	113	33.3	20.3	8.9	2.0	0.94
45	67.4	77.2	67.3	66.6	71.4	68.1	12.7	24.8	58	100	27.3	23.3	5.3	3.5	1.31
46	45.2	78.7	89.4	72.9	88.1	78.4	24.6	24.5	233	48	56.8	37.2	25.5	3.2	2.81
47	46.8	64.3	89.9	76.5	87.3	83.1	20.1	18.9	235	90	59.0	40.4	29.6	9.0	1.50
48	45.2	69.7	87.5	78.5	87.5	78.2	24.8	16.6	93	64	62.9	22.4	30.8	2.3	0.94
49	68.0	76.4	82.3	69.6	83.4	77.3	19.0	26.7	11	41	57.0	34.4	20.6	3.4	0.00
50	78.0	87.0	48.2	56.3	50.1	60.7	4.5	11.5	20	65	43.5	32.6	9.5	2.0	0.00
51	76.0	77.0	36.2	46.7	60.0	61.7	6.8	16.4	52	72	31.9	31.9	0.8	0.1	0.00
52	92.9	89.2	38.2	56.0	42.2	58.3	4.2	4.6	38	65	38.6	44.4	5.6	0.8	0.00
53	67.8	79.3	70.3	65.7	79.4	78.0	24.2	18.6	112	77	31.9	45.9	9.5	2.0	1.69
54	82.5	77.3	74.9	69.2	76.7	80.4	21.5	21.3	85	70	45.9	32.5	9.0	3.1	0.00

Table 19 (つづき) (Continued)

地区 Area No.	圧 結 度 Compact- ness		最大容水量* Water- holding capacity		孔 隙 量*		Porosity		透 水 性** Percola- tion rate		粘土+微砂 Clay+Silt		有 機 物 Organic matter		落葉地被物重量 Weight of total litter
					全 Total		非 毛 管 Non- capillary								
	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	cm 0~5	cm 20~25	air dry kg/m ²)
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(cc/ min)	(cc/ min)	(%)	(%)	(%)	(%)	
55	78.2	77.3	77.0	72.2	77.3	80.0	21.2	29.7	110	74	45.6	30.1	10.0	6.3	0.00
56	102.5	93.9	60.0	66.2	65.8	68.0	7.8	14.1	44	60	37.3	37.3	5.6	0.2	0.00
57	78.0	71.8	69.8	68.8	69.8	68.8	20.1	18.9	46	42	42.9	52.1	5.9	6.1	0.00
58	49.4	61.9	79.7	80.3	79.7	80.3	20.8	5.7	110	37	56.9	45.0	18.2	12.7	1.31
59	74.7	82.3	62.8	58.3	62.8	58.3	19.0	26.7	58	80	51.3	49.4	10.7	3.7	1.69
60	58.5	55.2	58.2	63.0	58.2	63.0	27.7	34.5	104	127	57.3	46.8	16.3	9.7	1.69
61	65.8	81.6	82.2	62.8	87.0	62.8	24.0	36.4	380	142	61.5	58.0	10.9	15.6	1.31
62	82.9	63.1	62.5	72.3	62.5	72.3	28.0	21.6	77	61	57.6	50.9	7.9	2.9	0.75
63	71.8	69.7	69.5	76.3	69.5	85.1	20.2	8.6	60	33	72.5	65.5	15.2	3.6	2.06
64	54.9	66.5	85.4	75.6	87.9	75.6	21.5	21.3	80	37	55.3	50.4	20.6	5.8	0.94
65	59.9	64.0	74.5	70.0	74.5	70.0	21.2	29.7	64	64	51.7	43.4	17.3	6.3	1.50
66	54.9	66.8	68.1	66.2	68.1	66.2	4.3	30.0	111	73	49.4	57.3	19.8	6.9	1.69
67	62.6	71.3	72.0	66.4	72.0	66.4	24.2	15.4	72	31	31.6	30.1	12.6	6.9	0.56
68	54.7	50.2	67.1	70.7	67.1	70.7	9.4	31.1	117	83	43.0	46.0	14.5	11.1	0.75
69	109.8	88.0	36.3	56.0	67.7	72.2	17.5	5.3	172	30	38.9	43.7	15.4	6.7	1.57
70	121.6	97.0	78.1	85.4	73.1	70.0	12.5	2.8	75	12	51.9	61.4	17.4	8.5	0.76
71	84.2	76.2	93.8	88.8	72.2	67.3	4.6	4.9	45	36	37.8	45.6	8.3	3.5	0.00
72	74.5	66.1	76.1	77.4	76.8	82.8	5.6	7.8	10	17	47.6	39.4	8.8	5.5	1.60
73	72.8	65.0	77.8	78.7	78.5	81.8	9.8	9.1	23	38	47.4	40.1	8.6	6.3	0.00
74	84.6	65.0	75.9	77.9	74.3	82.3	4.3	6.5	8	14	46.8	37.4	10.4	6.2	0.00
75	79.8	61.0	73.6	81.9	75.9	82.6	5.1	8.3	13	17	43.3	36.7	10.3	3.7	0.00

* 自然状態の細土の占める容積に対する %。

Expressed percentage of the volume of fine soil.

** 真下の方法で測定した。 Measured by MASHIMO's method.

Table 20. 浸透能と 0~5 cm の深さの土壌因子との相関関係
Correlation of infiltration capacity and some soil
properties at 0~5 cm depth

浸透能 Infiltration capacity															
圧結度 Compactness		−0.494***													
容水量 Water-holding capacity		0.330**	−0.346**												
孔隙量 Porosity	全 Total	0.447***	−0.495***	0.687***											
	非 毛 管 Non-capillary	0.678***	−0.312**	0.298*	0.436***										
透水性 Percolation rate (cc/min)		0.617***	−0.475***	0.518***	0.551***	0.459***									
粘土+微砂 Clay+Silt		0.275*	−0.220	0.428***	0.251*	0.183	0.314*								
有機物 Organic matter		0.271*	−0.417***	0.376**	0.474***	0.233*	0.269*	0.421***							
落葉地被物重量 Litter		0.442***	−0.336**	0.013	0.362**	0.309**	0.268*	−0.000	0.347**						

* 5%水準で有意 Significant at the 0.05 level.

** 1%水準で有意 Significant at the 0.01 level.

*** 0.1%水準で有意 Significant at the 0.001 level.

Table 21. 浸透能と 20~25 cm の深さの土壌因子との相関関係
Correlation of infiltration capacity and some soil properties at 20~25 cm depth

浸透能 Infiltration capacity								
圧結度 Compactness		-0.230*						
容水量 Water-holding capacity		0.027	-0.303**					
孔隙量 Porosity	全 Total	0.181*	-0.388***	0.745***				
	非毛管 Non-capillary	0.597***	-0.207	0.019	0.002			
透水性 Percolation rate (cc/min)		0.292*	-0.158	0.113	0.0	0.315*		
粘土+微砂 Clay+Silt		0.038	0.099	0.275*	0.125	0.117	-0.053	
有機物 Organic matter		0.234*	-0.366**	0.370**	0.255*	0.310**	0.297*	0.283*
落葉地被物重量 Litter		0.442***	-0.050	-0.025	0.105	-0.025	0.114	0.026
								0.345**

*, **, *** Table 20 参照。See Table 20.

で表現することが困難なようである。

各地で測定した浸透能 (f_c) の値 (前掲 Table 5) と、同地点で調査分析した地表および土壌因子との関係を検討してみた。Table 19 は、浸透能を測定した各地の地表および土壌因子を総括したものである。土壌試料は 400 cc の円筒で採取し、物理性は自然状態のままで分析している。この調査分析方法は、国有林土壌調査方法書²²⁾ にもとに準拠している。これらの結果と、対応する f_c の値との相関関係を示したのが、Table 20 と Table 21 のとおりである。

これによると、土壌因子との間には明らかに表層 (0~5 cm) の方が、下層 (20~25 cm) よりも、浸透能に影響する程度が高いことがわかる。そして、非毛管孔隙量、透水性、全孔隙量、圧結度、容水量などとの間に、有意な高い相関関係が認められる。地表の植物遺体重 (主として落葉地被物で、1 m 方形内の総量を風乾量で示したもの) との関係は、思ったより密接なつながりがみられない。これはその量ばかりでなく、質的なものが強く影響しているものと推察される。たとえば、いくら厚く堆積しても、乾燥し菌糸などが発達する状態であれば、かえって阻水性を示す場合のあることは前述したごとくである。このほか、定量しがたくしかも浸透現象を大きく左右すると考えられるものに、地中動物の活動孔、腐朽根跡などがある。これらはかく乱されない天然生林の表土に多く分布している。

前掲の測定資料をもとに、浸透能 (f_c) を従属変数とし、相関係数の高い地表および土壌の諸因子を独立変数とみなし、川端のプログラム²²⁾ にしたがって変数選択型の重回帰分析を試みた。すなわち、深さ別に、また両層の平均値を用い、落葉地被物重量、非毛管孔隙量、透水性、圧結度などの諸因子を取り入れ、順次変数を選択した。この中でもっとも適合度の高いのは、3 変数 (0~5 cm と 20~25 cm の両位置の平均値) を用いた次式である。

$$f_c = 8.11 X_1 + 0.75 X_2 + 28.32 X_3 - 32.32 \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 f_c : 最終浸透レート (mm/hr), X_1 : 非毛管孔隙量 (%), X_2 : 透水性 (cc/min), X_3 : 落葉地被物重量 (kg/m²)。

上記の重回帰式は統計的には有意なものであるが（重相関係数 0.813）、標準誤差の大きさ（68.0）からして、この式による推定値はあまり精度が高くないといえよう。前述のように、立地条件が複雑な山地を対象にしてこの種の試みを行なう場合には、実測データ数がより多数を得て、これを地被条件別に大区分して検討すること、さらに、独立変数となる因子のはあくの仕方などにも、なお、吟味が必要と考えられる。

10. 地表下の土層中の流出

降雨による直接出水には、地表流下のほかに、地表下土層中を斜面方向に移動する流れが関与すると考

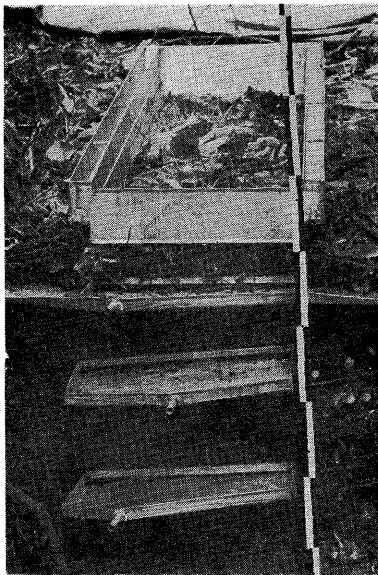


Photo. 15 地表下流出量の測定装置
The measurement apparatus of subsurface flow.

えられている。この流れを中間流出（Inter flow）または地表下流出（Subsurface flow）と呼ばれる。前項まで論述してきた地表流下とは、地表面からのものに限っており、この地表面とは落葉地被物と土壌の界面部をさしている。測定した林地の浸透能が予想以上に大きく、かつ、現実の降雨に際して、林床表面より地表流下が目だたないことなどから、地表下の土層中または、腐朽根跡などを通しての流出が大きいのではないかという推測に立ち、実験的測定を行なった。

実験には Rocky Mountain 型の浸透計装置を利用した。プロットの鉄わくをそのまま埋め込むと、斜面下部に位置する正面のわく壁がかんじんの地表下流出を妨げることになる。このため正面のわく壁を除去した鉄わくを特製し、また、地表部および各層位別に受水板を挿入した（Photo. 15）。降雨装置は、Rocky Mountain 型のものをそのまま用いた。ただし、区域外の上部斜面からの浸入水を排除するため、その部分の降雨を完全にしや断するようにした。

降雨強度を 100 mm/hr 前後にし、降雨期間は 1 時間として

Table 22. 測定地区の自然概況
The natural condition of measurement areas

地区 Area No.	地被区分 Cover type	植生型 Vegetation type	林 齢 Stand age (years)	疎密度 Crown density (%)	胸高直径 D. b. h. (cm)	樹 高 Tree height (m)	方位 Bear- ing	地表傾斜角 Inclina- tion angle (°)	堆積様式 Deposit- form	土壌型 Soil type
1	針葉樹林地 F. n. p.	Sugi	45	85	22	16	SW	30	匍行土 Creeping	B ₀ (d)
2	針葉樹林地 F. n. n.	Akamatsu	75	70	30	18	SW	30	匍行土 Creeping	B ₀ (d)
3	針葉樹林地 F. n. n.	Akamatsu— Konara	50	70	26	16	NE	38	匍行土 Creeping	B ₀
4	広葉樹林地 F. n. b.	Kuri-Uwa- mizuzakura	45	75	20	15	NE	32	崩積土 Colluvial	B ₀
5	裸地(歩道) B. f.	—	—	—	—	—	SW	30	匍行土 Creeping	B ₀ (d)

各深さ別の流出量を3分間隔に測定した。一定降雨強度の実験終了後に、降雨強度を20~200 mm/hrの範囲に変化させて、各深さ別の流出量の変動も測定した。測定地はTable 22に示すように、岩手大学御明神演習林(岩手県下)内にあるスギ、アカマツ、アカマツコナラ、クリーウミズザクラの4種の林地と裸地(歩道)の5地区である。測定地区の地表状態はTable 23に示した。土層は新第3紀の砂岩を基岩とする風化残積土であり、深さ別の土壌の諸性質はTable 24、各地区の土壌断面と各受水位置は、Fig. 17のとおりである。

各地区の深さ別の流出レートおよび浸透レートは、Table 25に示した。また、降雨期間と深さ別の流出率の代表的な関係として、スギ林地と歩道の両地区の結果をFig. 18に示した。これによると供試降雨強度に多少の差異があるとしても、スギ林地よりも歩道の地表流出率が明らかに大きい、地表下の流出は深さ15 cmと30 cmの両位置で測定したが、歩道ではスギ林地よりもかなり少なく、前者では深さ30

Table 23. 測定地区の地表状態
Surface cover condition of each measurement area

地区 Area No.	落葉地被物の被度 Coverage of A ₀ layer (%)	落葉地被物の厚さ Thickness of A ₀ layer (cm)				地床植被率 Coverage of ground-floor plant (%)	地床植被の構成 Composition of ground-floor plant
		L	F	H	Total		
1	100	2.3	1.0		3.3	76.0	クマイザサ <i>Sasa palmata</i> (5)* トリアシショウマ <i>Astilbe thunb. var. congesta</i> (1) リョウブ <i>Clethra barbinervis</i> (1)
2	100	1.3	3.0	1.8	6.1	72.0	クマイザサ <i>Sasa palmata</i> (5) リョウブ <i>Clethra barbinervis</i> (1) オオバクロモジ <i>Lindera umbellata</i> f. <i>membranacea</i> (1)
3	100	1.3	3.5	1.5	6.3	100.0	クマイザサ <i>Sasa palmata</i> (5) シンガシラ <i>Spicantopsis niponica</i> (2) オオバクロモジ <i>Lindera umbellata</i> f. <i>membranacea</i> (1)
4	95	2.3	2.0	2.3	4.7	70.0	クマイザサ <i>Sasa palmata</i> (4) シンガシラ <i>Spicantopsis niponica</i> (3) トリアシショウマ <i>Astilbe thunb. var. congesta</i> (1)
5	—	—	—	—	—	—	—

* 優占度階級 Dominance class

Table 24. 各測定地区の深さ別土壌の根量、石礫量および土壌の諸性質
Amounts of root, gravel and soil properties for each soil depth

地区 Area No.	生 根 量 Living root (%)			石 礫 量* Gravel (%)			透 水 性 Percolation rate (mm/hr)			非毛管孔隙率 Non-capillary porosity (%)			圧 結 度 Compactness (%)		
	0~5 (cm)	15~20 (cm)	30~35 (cm)	0~5 (cm)	15~20 (cm)	30~35 (cm)	0~5 (cm)	15~20 (cm)	30~35 (cm)	0~5 (cm)	15~20 (cm)	30~35 (cm)	0~5 (cm)	15~20 (cm)	30~35 (cm)
1	10.5	2.3	1.2	4.8	8.8	10.6	110	58	37	20.7	15.6	7.8	55.9	74.7	82.3
2	11.7	4.0	0.5	5.7	9.6	10.7	127	44	34	23.9	11.9	8.2	61.9	70.8	81.0
3	15.3	6.1	0.9	7.0	7.9	11.0	133	46	29	28.6	9.9	7.7	58.1	73.0	77.5
4	18.4	7.7	2.1	4.7	5.6	7.9	222	90	59	34.5	18.5	18.0	47.3	58.4	70.1
5	4.2	0.9	0.3	4.9	9.7	15.1	34	55	35	7.6	10.4	8.0	96.4	78.2	83.1

* 粒径の大きさ Particle size : >2 mm

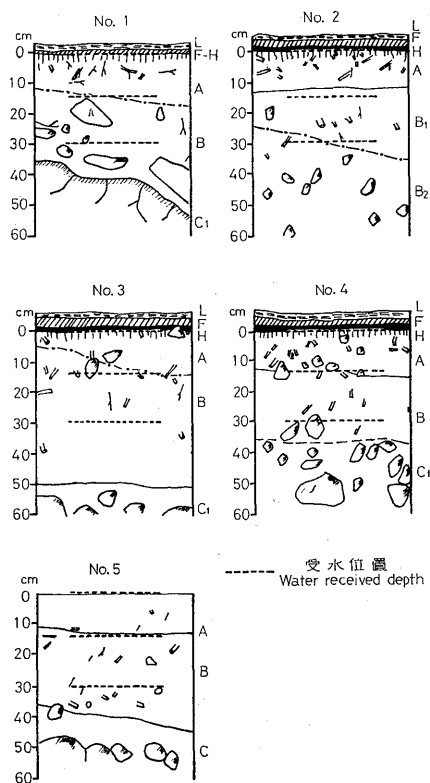


Fig. 17 地表下流出を測定した各地区の土壌断面図

The soil profiles of each area where were measured subsurface flow.

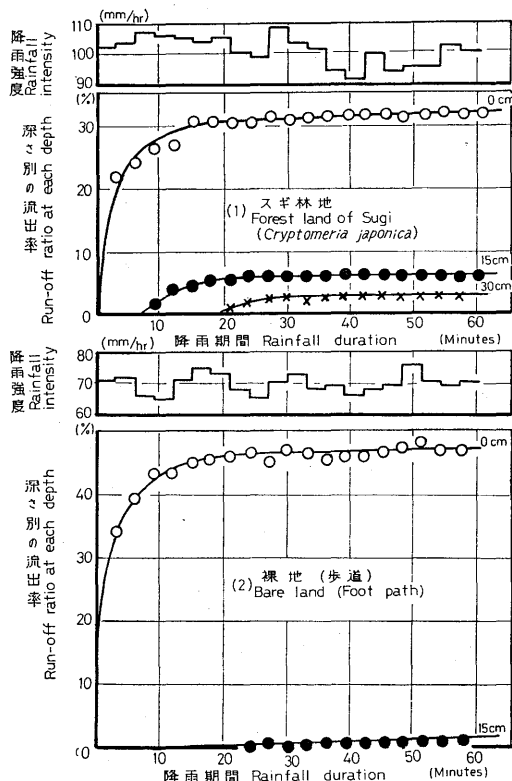


Fig. 18 降雨期間と深さ別の流出率
Relation of rainfall duration to run-off ratio at each depth.

Table 25. 各測定地区の深さ別流出レートおよび浸透レート
Rates of run-off and infiltration for each soil depth

地区 Area No.	降雨強度 Average rainfall intensity (mm/hr)	流出レート Run-off rate* (mm/hr)			流下率 Run-off ratio (%)			浸透レート Infiltration rate* (mm/hr)		
		0 cm	15 cm	30 cm	0 cm	15 cm	30 cm	0 cm	15 cm	30 cm
1	97.7	30.8	5.4	2.7	31.5	5.5	2.8	66.9	61.5	58.8
2	97.2	6.5	28.8	7.6	6.7	29.6	7.8	90.7	61.9	54.3
3	71.2	14.3	9.5	3.8	20.1	13.3	5.3	56.9	47.4	43.6
4	96.2	13.0	9.9	2.3	13.5	10.3	2.4	83.2	73.3	71.0
5	69.1	33.2	0.7	—	48.0	1.0	—	21.1	20.4	20.4

* 降雨期間の終期の安定した値。 Stability values at the final rainfall duration.

cm の位置からの流出はなかった。

両区とも、地表流下レートは流下開始後およそ20分で、ほぼ一定値に近づく。地表下流出も同傾向を示すが、林地ではその開始時点が早いようである。歩道の地表面の圧結度は、Table 26において明らかなように、林地の同じ位置に比べて著しく大きい。林地の地表下流出は根系の周囲、地中動物の活動

孔、腐朽根跡などから浸出してくることが観察される。ただ、測定断面を設定する際に、横走する根系を切断するため、その周辺に不自然な間隙をつくるのが、地表下流出の増加にいくぶん影響しているかもしれない。なお、歩道では表土の膨軟な林地と異なり、表層と下層の物理性に顕著な差異がなく、かつ、浸透性が全体的に悪いいため、地表下の流出分は少ない。

スギ林地においては、降雨強度およそ 100 mm/hr の降雨 1 時間の後期において、林地の地表面から降雨のおよそ 30%、深さ 15 cm の A 層の直下からおよそ 10%、さらにその下の深さ 30 cm の B₁ 層の直下からおよそ 5% の流出が認められた。しかし、歩道のような裸地面からは、地表面流出率が大いのに対し地表下がほとんどない。すなわち、地表面からは降雨のおよそ 50% 流出するのに対し、深さ 15 cm の位置からわずか 1% 流出するにすぎない。

降雨強度を 20~200 mm/hr の範囲で変化させて深さ別の流出レートを求めたところ、Fig. 19, 20 に示すような結果が得られた。すなわち、供試降雨強度の範囲において、降雨強度が増大するとともに、ほぼ直線的に各深さとも流出レートが上昇している。その上昇程度は地表面ほど急激であるのに対し、地表下ではそれほど著しくない。そして、降雨強度が 200 mm/hr に接近しても、歩道の深さ 30 cm の位置からは流出がなかった。地表流出の開始点 (流下するための最低降雨強度) は、林地と歩道によってほとんど差異がないが、15 cm の位置からの地表下流出にかなりの差異が認められ、林地の方が著しく早くなっている。

このように、林地における地表下流出水量は無視できない量であり、裸地と比べてその出方にもはっきりした特徴が察知できる。これがいわゆる中間流出と規定してよいか否か問題が残るが、いずれにしても直接流出分に含まれるものであろう。土壌の堆積様式などによって変化すると考えられるが、林地における地表下流出という現象は、洪水調節や水質保全の面からみて有益な役割を果たしているものと考えられる。

なお、山地における中間流出を取り扱った報告をみると、たとえば、HURSH¹²⁾ らが米国の Bet Creek 実験林の広葉樹林地で行なった観測では、およそ 10 mm/hr の降雨で、地表下はおよそ 2.5%、A 層の直下からおよそ 12.5% に達したと報告している。また国内でも塚本⁴²⁾ は東大愛知演習林のマツおよび広

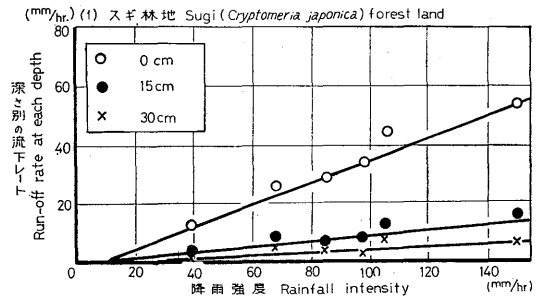


Fig. 19 降雨強度と深さ別の流下レートの関係(1)
Relation of rainfall intensity to run-off rate at each depth.

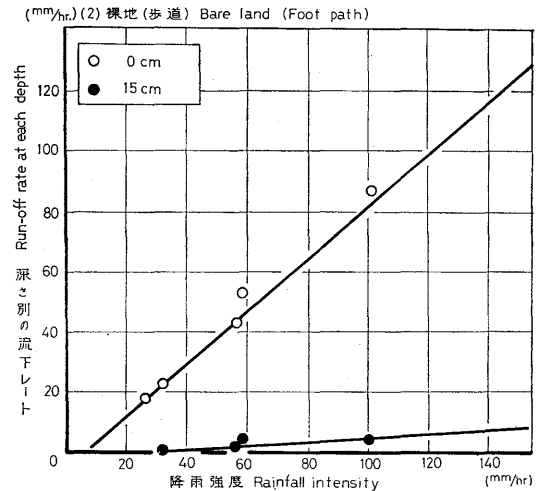


Fig. 20 降雨強度と深さ別の流下レートの関係(2)
Relation of rainfall intensity to run-off rate at each depth.

葉樹林地の観測で、地表流下に比べて B 層（深さ 40 cm と 115 cm）からの流出が著しく多かったことを確認している。武田ら⁴⁾も、岩大御明神演習林の広葉樹林地で、固定施設により観測したところ、地表流下よりも浅い表土と、風化した基岩層との界面からの流出が、かなり多くみられることを確認している。

11. 表面侵食抑止に及ぼす地被物の効果

11-1. 人工降雨による地被別流下区実験

この実験や設備については、すでに 6-2 の項において詳しく述べた。ここでは地被状態の相違が侵食に対して、どの程度の違いを与えるかを知るために行なったものである。地被の種類は前と同じ裸地無処理、裸地耕耘、草生地（シバ）、広葉樹（コナラ・サクラ）林地、カラマツ林地、アカマツ林伐跡地、ササ生地の 7 処理区である。いずれも上木のない地床の小区画が供試対象となっており、地表保護物の完全にはないのは裸地区のみで、他の 5 区は地床植物か落葉地被物によって、ほぼ 100% 地表がおおわれている。降雨強度は 20~200 mm/hr の範囲で数段階に変化させて実験を行なっている。この場合、1 回の降雨期間は原則として 2 時間としている。なお、地表傾斜角は各区とも 30° である。

76 回の人工降雨による地表流下区の実験で、流出土砂が認められたのは裸地両区のみであって、他の有植生ないし落葉被覆区では、測定できるほどの量に至らなかった。このように、林冠層がない状態でも、ある程度以上の地表保護物によって、ほぼ全面がおおわれている限り、100 mm/hr 以上の豪雨が長時間連続し、しかもそれが繰り返されても、地表侵食が発生しないことを確認した。

降雨侵食は前述のように、雨滴の地表打撃と掃流運搬のエネルギーによることが知られているが、この人工雨の場合は雨滴の粒径が 0.1~3 mm で現実降雨のそれに近似するが、水頭から地表まで 2 m 足らずであり、現実降雨に比べれば落下速度が不十分である。しかし、本設備は屋外に施設されており、実験期間の 3 か年間に来襲した豪雨に際しても、実験と同様に裸地両区以外は流出土砂がなかった。

土砂が流出した裸地両区についてみると、Table 26 に示したように初年度の実験では裸地耕耘区が同無処理区よりも多かったが、2, 3 年めでは逆の傾向となり、3 年間の単純平均で後者の方がいくらか多くなっている。しかし、これらは統計的に有意差がなかった。なお、流出土砂量に関係が深いと推察される降雨総量、平均降雨強度、10 分間最大雨量、地表流下量などとの相関関係を求めたのが Table 27 のと

Table 26. 裸地 2 区からの土砂流出
Soil loss from two plots of bare land

年 Year	裸地 (耕うん) A. Bare land (cultivated)				裸地 (無処理) B. Bare land (non-treatment)			
	降雨の数 Number of rainfall	積算降雨量 Accumulated precipitation (mm)	積算流出土砂量 Accumulated weight of soil loss (ton/ha)	積算流出土砂深 Accumulated depth of soil loss (mm)	降雨の数 Number of rainfall	積算降雨量 Accumulated precipitation (mm)	積算流出土砂量 Accumulated weight of soil loss (ton/ha)	積算流出土砂深 Accumulated depth of soil loss (mm)
第 1 年目 The first	27	6,776	69.8	11.6	25	5,975	56.5	9.4
第 2 年目 The second	31	9,433	113.7	19.0	31	8,699	129.1	21.5
第 3 年目 The third	18	5,191	26.6	4.4	18	5,062	70.5	11.8
計 Total	76	21,400	210.1	35.0	74	19,736	256.1	42.7

Table 27. 裸地両区からの土砂流出量と降雨量，地表流下量との相関関係
Correlation between total precipitation, average rainfall intensity, maximum precipitation for ten minutes, amount of surface run-off and soil loss from both plots of bare land

地 被 区 分 Cover type	降 雨 総 量 Total precipitation	平均降雨強度 Average rainfall intensity	10分間最大強度 Maximum precipitation for ten minutes	地 表 流 下 量 Amount of surface run-off
裸 地 (耕うん) Bare land (Cultivated)	0.619**	0.614**	0.650**	0.531**
裸 地 (無処理) Bare land (Non-treatment)	0.708**	0.705**	0.689**	0.381**

** 1%の水準で有意。 Significant at the 0.01 level.

おりであって，これによれば降雨総量および平均降雨強度との間に，密接な関係が認められている。

11-2. 小型可変傾斜浸透装置による侵食実験

前項の結果のように，ある程度の地表保護物があれば，地表侵食はまず発生しないとみてよいことがわかったが，なかでも落葉地被物の効果はとくに大きいようである。果たしてどの程度の量が安全なのか，また，それは樹種によって差異があるかどうか不明である。川口ら¹⁹⁾は野外および室内実験の結果から，流出土砂量は降雨強度が大なほど，また傾斜大なほど多量で，落葉被覆度が大なほど少ないこと，そしてその影響度は落葉被覆度，降雨強度，傾斜の順に大きく，なかでも落葉被覆度は雨滴侵食に対する抑止効果が顕著であることを明らかにしている。

ここでは，上記の成果をもとに，落葉の種類や厚さ（被覆量）と侵食抑止効果の差異を究明しようとするもので，樹種はアカマツ，カラマツ，コナラ（サクラを含む）で，落葉は主としてL～F層を用いた。厚さは約5 cm（気乾量 1.6 kg/m²），約3 cm（同 0.8 kg/m²），約1.5 cm（同 0.4 kg/m²），約0.8 cm（同 0.2 kg/m²），約0.4 cm（同 0.1 kg/m²）の5段階とした。最小被覆量でも，地表面は95%以上カバーされる状態であった。地表傾斜角は25°とし，降雨強度は15～120 mm/hrの範囲内において5段階変化させた。

実験装置は Photo. 2 に示したように，特製の雨滴発生装置と可変傾斜小型ライシメーターを用いた。この降雨装置は前述の散水式山地浸透計（可搬式）と同構造であるが，やや規模が大きく降雨範囲は1.5 m×1.0 mである。これは連通管に取りつけた多数のノズルから，水滴を落下させるもので，ノズルには所定の振動が加わるようになっているので，雨滴の降下点は不確定となり降雨分布はほとんど均一化できる。

雨滴の粒径分布は Fig. 21 に示すとおりで，粒径範囲は0.05～2.5 mm となり，三原²⁶⁾が表現した自然降雨の粒径頻度分布曲線にあてはめれば，強雨型に属

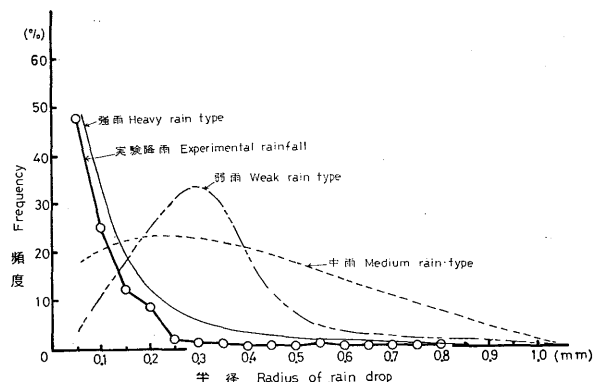


Fig. 21 雨滴の粒径分布
Distribution of rain drop size.

する。ただ、雨滴の発生位置から地表までは、およそ 2 m にすぎず落下加速度が不十分なため、地表打撃力において自然降雨とへだたりがあることは無視できない。

小型ライシメータは、槽の一側面は透明なガラス板で、浸透水の行くえがある程度追跡できる。プロットの大きさは幅 0.5 m、長さ 1.5 m、深さ 0.5 m で、傾斜角は 0~30° まで自由に変化できる。また、流出水は地表のほか 0.1, 0.3, 0.5 m の各位置から捕そくできるようになっている。供試土壌は岩手火山灰で、地表部 0.1 m はその黒色表層土、それ以下の 0.2~0.4 m の範囲にはその褐色下層土を入れ、最下層には 0.1 m の厚さで川砂を入れた。この火山灰土壌は表層、下層とも微砂質壤土で比較的受食性が高い。ライシメーターに供試土壌を充てんする場合には、自然状態の容積重にできるだけ近づけるようにし、地表部はほぼ 0.6 kg/cm² の荷重で均等に加圧した。

各種の落葉被覆状態と裸地を対象とした 80 回の侵食実験の結果は、Table 28 にまとめたとおりである。とくに流出土砂量（単位面積あたりの降雨期間 1 時間の累加量＝侵食率）と降雨強度との関係を、わかりやすく対数変換して示したのが Fig. 22 である。

Table 29 の流出土砂量の分散分析の結果をみてわかるように、降雨強度ならびに落葉量との間に、また、その交互作用には著しく有意な差異が認められる。全般に、降雨強度が高まれば流出土砂量は急激に増大し、その関係はほぼ放物線回帰にのっている。落葉の被覆量が増加すれば、流出土砂量は急激に減少する。樹種別にみるとカラマツの流出土砂量が比較的少ないようにみられるが、5%水準では有意な差異と認めがたい。つまり、樹種間には顕著な差異がないということになる。

落葉の被覆量との関係をみた場合、各樹種とも 0.1 kg/m²（厚さおよそ 0.4 cm 程度で、全面を疎におおう状態）では、かなりの量の流出土砂量がみられる。しかし、この 2 倍の 0.2 kg/m² ともなれば急激に減少することが明らかである。表面侵食を防止するために、落葉はどの程度たい積していなければならないかということに対して、この結果からおよそつぎのようなことがいえるであろう。すなわち、現実に発生する最大の降雨強度を 100 mm/hr として、侵食係数を 0.1 ton/ha 以下におさえるためには、カラマツとコナラ（サクラを含む）の場合は 0.2 kg/m²（厚さおよそ 0.8 cm）以上、アカマツでは 0.4 kg/m²

Table 28. 落葉地被物と流出土砂量の関係
Relation of eroded soil to litter cover of some tree species

樹 種 Tree species	裸 地 Bare land	広葉樹（コナラ・ウツギ） ミズザクラ Broad-leaved trees (<i>Quercus serrata</i> and <i>Prunus grayana</i>)	ア カ マ ツ Akamatsu (<i>Pinus densiflora</i>)	カ ラ マ ツ Karamatsu (<i>Larix leptolepis</i>)
落 葉 地 被 物 Litter (Air dry) (kg/m ²)	0.0	0.1 0.2 0.4 0.8 1.6	0.1 0.2 0.4 0.8 1.6	0.1 0.2 0.4 0.8 1.6
降 雨 強 度 Rainfall intensity (mm/hr)	流出土砂量 Eroded soil (kg/ha/hr)			
15	54	3 1 0 0 0	22 5 0 0 0	2 0 0 0 0
30	518	21 3 0 0 0	175 27 4 0 0	10 2 0 0 0
50	2,551	89 7 3 0 0	829 92 22 2 0	35 3 0 0 0
75	9,506	270 15 6 0 0	2,850 250 15 8 0	95 5 0 0 0
120	40,010	1,031 30 15 11 6	12,306 780 108 28 9	315 10 0 0 0

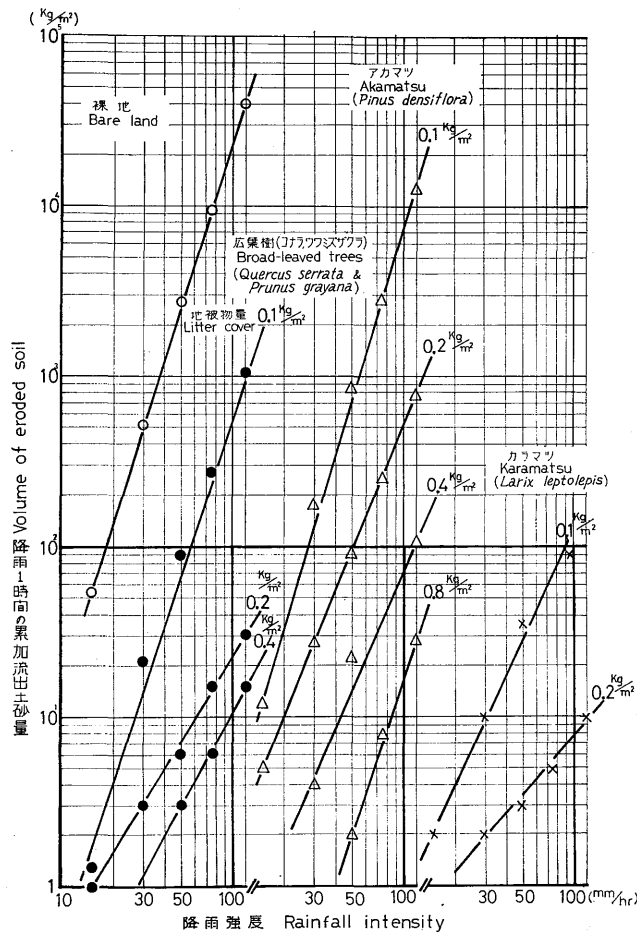


Fig. 22 落葉地被物と流出土砂量の関係
Relation of eroded soil to litter cover of some tree species.

Table 29. 流出土砂量の分散分析
Analysis of variance on the volume of eroded soil

要因 Factor	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	不偏分散 Unbiased variance	F_0	F (0.05)	P
A. 樹種 Tree species	6,095,718	2	3,547,859	2.71	3.23	
B. 落葉量 Litter	1,334,528,021	5	266,905,604	203.72	8.45	***
C. 降雨強度 Rainfall intensity	719,292,674	4	179,823,169	137.25	2.61	***
交互作用 Interaction						
A × B	25,158,880	10	2,515,888	2.68	2.07	*
A × C	12,420,676	8	1,552,584	1.19	2.18	
B × C	2,756,333,744	20	137,816,687	105.19	1.85	***
誤差 Error	52,405,715	40	1,310,143			
計 Total	4,906,235,428	89				

*, **, *** Table 20 参照。See Table 20.

(厚さおよそ 1.5 cm) 以上となる。

TRIMBLE, G. R. ら³⁹⁾ の報告によると、蒸発や侵食防止に必要な落葉地被物の厚さとして、1/2 in 程度 (およそ 1.3 cm) あればよいとしており、上記の結果とはほぼ一致している。

12. 樹種別の抜根抵抗力の比較

山崩れを含む厚層侵食 (間接的には表面侵食にも) に対して森林の影響を考える場合、樹木の根系による土壌緊縛力が問題になる。根系の緊縛力を直接測定することが困難なために、抜根抵抗力が代替されている。これは根系の緊縛力が抜根抵抗性に比例するという考え方に立っている²¹⁾⁴²⁾。わたくしたちも同様な考え方で、同一の立地条件に成立した同齡、同径級の 11 樹種 (針葉樹 6 種・広葉樹 5 種) の抜根調査を行なった。同時に別個に標本木をとって、根系の発達状態を定量的に解析した。

調査対象地は、6-1. で述べた當場好摩実験林の土砂かん止のための適樹試験地である。伐倒時の樹齡は 28 年生で、供試木の胸高直径は 10~12 cm に規定し、各樹種とも 3 本ずつ取った。この供試木の詳細は Table 30 に示したとおりである。抜根調査の方法は、山腹傾斜地 (およそ 15°) の最大傾斜方向の下方に、2 本のアンカーになる立木を求め、この 1 本に張力計を取りつけ、他の 1 本にはテルホールを固定する。そしてワイヤーロープを供試木に取りつけ、スナッチブロックを通して、テルホールを始動し伐根を引張り、その経過中で張力計による最大抵抗力を読みとる。

Table 30. 抜根引き試験の供試木の諸因子
Some factors of the experimental tree, which was
used to stumping power test

樹 種 Tree species	胸高直径 Diameter breast high (cm)	根元直径 Basal diameter (cm)	樹 高 Tree height (m)	材 積 Volume (m ³)	樹冠投影 面積 Area of shaded area by crowns (m ²)	根系発達深 度 Develop- ment depth of root system (m)	根系発達 面積 Develop- ment area of root system (m ²)	根重 (気乾) Root weight (Air dry) (kg)
クヌギ <i>Quercus acutissima</i>	11	18	12	0.07	1.2	1.6	7	15
クリ <i>Castanea crenata</i>	11	13	8	0.04	1.9	1.2	11	9
ミズナラ <i>Quercus mongolica</i> var. <i>grosseserrata</i>	10	15	8	0.05	2.2	1.8	19	12
ニセアカシア <i>Robinia pseudoacasia</i>	11	15	10	0.06	2.8	0.8	20	10
ヤマハシノキ <i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i>	10	16	10	0.05	4.4	1.4	7	7
チョウセンゴヨウ <i>Pinus koraiensis</i>	10	12	8	0.04	2.5	1.2	7	6
モミ <i>Abies firma</i>	11	14	8	0.05	2.5	1.8	11	6
リギダマツ <i>Pinus rigida</i>	11	16	11	0.05	0.9	2.2	7	11
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	11	15	9	0.05	1.9	1.3	7	7
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	11	16	8	0.04	1.6	1.1	14	4
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	11	15	11	0.05	0.9	1.6	7	5

供試樹種の根系形態を苜蓿²⁰⁾の方式に準じて類型化して結びつけてみたのが、Table 31 のとおりである。必ずしも明確ではないが、斜出根の分岐の多いクヌギ、ミズナラ、ヤマハンノキなどは、比較的大きい値を示している。これらの樹種は抜根時において土砂のかかえこみ量が、とくに多いことが観察された。これに対し、水平根の発達著しいニセアカシア、チョウセンゴヨウなどはいずれも小さい値を示し、また土砂のかかえこみ

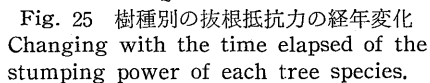
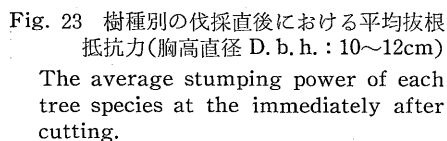
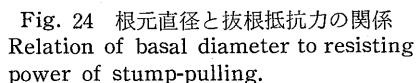


Table 31. 供試樹種の根系形態と拔根抵抗力の関係
Relation between root-system form of sampling tree species
and resisting power of stump-pulling

区 分 Classi- fication	根系形態の特徴 Character of root-system form	供 試 樹 種 Sampling tree-species	拔根抵抗力の順位 Order of stumping power
形 Form	I. 少数の太くて長い垂下根が発達するもの Few long and large pendent root	アカマツ <i>Pinus densiflora</i> リギダマツ <i>Pinus rigida</i> モミ <i>Abies firma</i>	IV > I > II, III
	II. 太い斜出根と短い垂下根によって特徴づけられるもの Marked large oblique root and short pendent root	スギ <i>Cryptomeria japonica</i> カラマツ <i>Larix leptolepis</i> クナリ <i>Castanea crenata</i>	
	III. 水平根の発達が著しいもの Development of level root is marked	ニセアカシア <i>Robinia pseudoacacia</i> チョウセンゴヨウ <i>Pinus koraiensis</i>	
	IV. 斜出根の分岐が多いもの Many forking root of oblique root	ヤマハンノキ <i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i> クヌギ <i>Quercus acutissima</i> ミズナラ <i>Quercus mongolica</i> var. <i>grosseserrata</i>	
深 浅 Depth	I. 浅い根の型 Shallow root type	ニセアカシア <i>Robinia pseudoacacia</i> チョウセンゴヨウ <i>Pinus koraiensis</i>	III > II > I
	II. 中間の型 Medium root type	ヤマハンノキ <i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i> カラマツ <i>Larix leptolepis</i> スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	
	III. 深い根の型 Deep root type	アカマツ <i>Pinus densiflora</i> リギダマツ <i>Pinus rigida</i> モミ <i>Abies firma</i> クヌギ <i>Quercus acutissima</i> ミズナラ <i>Quercus mongolica</i> var. <i>grosseserrata</i>	

Table 32. 拔根強度と地上地下部諸因子との相関関係
Correlation between power of stump resistance and some
factors of the shoot system, the root system.

要 因 Factors	相 関 係 数 Correlation coefficient	要 因 Factors	相 関 係 数 Correlation coefficient
胸 高 直 径 Diameter of breast high	0.76***	深さ別の根の発達量 Root amount of each depth	0.81***
根 元 直 径 Basal diameter	0.77***	0~ 30 cm	0.96***
樹 高 Tree height	0.61***	30~ 60 cm	0.91***
材 積 Volume	0.65***	60~ 90 cm	0.65***
根 重 Root weight	0.68***	水平方向の根の発達量 Root amount of horizontal direction	0.78***
根系発達深 Depth of rooting net work	0.47**	0~ 30 cm	0.72***
根系発達面積 Development area of rooting net work	0.13	30~ 60 cm	0.68***
		60~ 90 cm	0.84***
		90~ 120 cm	0.91***
		山側の根の発達量 Root amount of upward side	
		谷側の根の発達量 Root amount of downward side	

, * Table 20 参照。See Table 20.

量も少ない。しかし、少数の太く長い垂下根の発達するアカマツ、リギダマツなどは抜根強度が比較的高いものの、土砂のかかえこみ量がほとんどない。

つぎに、抜根強度と地上部、地下部の諸因子との相関を求めたのが、Table 32 のとおりである。樹冠投影面積、根系発達面積以外は、いずれも高い相関関係が認められた。根の張り方については、水平方向の発達量よりも、垂直方向の発達量がやや強く影響しているようである。また、谷側発達総量が山側発達総量よりも高い相関が認められた。同一直径のものの比較では、地ぎわ直径の太いもの、根系発達量の多いものが抜根強度が大きくなっている。

抜根強度と相関の高い根元直径との関係を、カラマツ、アカマツ、ヤマハンノキ、ニセアカシアの4樹種について図示したのが、Fig. 24 である。これによると、各樹種とも根元直径が大きくなるにつれて、抜根強度も増大し、とくに針葉樹の2樹種は直線回帰にほぼのっている。広葉樹類は根元直径と根の張り方の関係が不整なせいか、ちらばりが著しい。

この調査は1967年11月に行なうたものであるが、伐採後3年経過した1970年の11月と、同6年経過した1973年11月に、岩手大高橋宏治助教授と共同で、伐根強度の経年変化を調査した。この結果によると、Fig. 25 に示したように3年後ではチョウセンゴヨウ、モミ、リギダマツが伐採直後より20~30%低下したが、他の樹種はわずかに低下するか、または、むしろいくらか増大する傾向が見られた。ニセアカシア、クスギ、ミズナラ、カラマツ以外は、伐採直後の50%以下に低下した。低下しなかった広葉樹3樹種は、萌芽し生存しているものである。

このように、根系による厚層侵食防止ないし地盤支持という観点から、供試11樹種を考えた場合に、深い根と斜出根の分岐が多く、しかも伐採後においても長期に緊縛力を維持できるクスギ、ミズナラなどが好ましいといえよう。針葉樹ではカラマツ、アカマツなどが土砂かん止効果が高いといえるが、上記の広葉樹類とちがって土砂のかかえこみ量が少なく、しかも、萌芽力がないため効果の持続性が乏しい。

13. 土壌の母材や物理性と受食度との関係

土壌侵食には土地条件としての傾斜や、斜面長などの地形因子のほか、土質や物理性などの土壌因子が関与することは前述のとおりである。現地の荒廃状況を観察した場合、岩層の種類によって、侵食の進行過程ならびにその形態が異なることも確かである¹⁷⁾。土壌粒子の侵食に対する抵抗力は、一般的に粒径の大なるものほど、また、コロイド含量の多いものほど大きいとされている¹⁸⁾。つまり、土質との関係は、主として母材に由来する土性（粒径組成）が、重要な役割を果たしているといえよう。一方、同じ土質であっても、その物理性とくに圧結の度合いによって、浸透能に顕著な差異を生ずることから、土壌の受食性も明らかに変化する。これらのことを明らかにしようと、可変傾斜式小型ライシメータを用いて、屋内の人工降雨実験を行なった。

人工降雨の実験装置は11の項で記したものと同一であるが、試験区は幅30cm、長さ100cm、深さ25cmの鉄槽で、地表流出量、底部流出量および流出土砂量が測定できるようになっている。傾斜角は0~40°まで変化できるが、この実験では30°に固定した。供試土壌は東北地方における土壌母材の分布面積比の高い凝灰岩、粘板岩、花崗岩、火山灰の4種の表土と下層土とした。表土には腐植がかなり含有しているが、下層土はほとんど含まず母材の風化物からなっている。

供試土壌はあらかじめ7mmメッシュで篩別し、石れきや根系などを除去した。土壌物理性との関係を

調べるために、試験区内への土壌の充てんは、密・中・疎の3段階に区分して行なった。この場合、一般的森林土壌が持っている容積重をもって疎の段階とし、人為的に詰め込み可能な最高密度状態を密の段階とした。中の段階は疎と密のほぼ中間値とした。そして、あらかじめ各密度ごとに充てんすべき土量(容積)を定め、実際の詰め込みには槽中の圧結の度合いが、できるだけ均一となるようにした。実験降雨強度は 25 mm/hr, 60 mm/hr, 120 mm/hr の3段階とし、流出土砂量は一定降雨強度での一降雨期間(1時間)の累加量を捕そくした。なお、供試土壌の土性および物理性などは、Table 33 に示したとおりである。

供試土壌の分析結果を検討してみると、表層土と下層土を通して母材別に 0.002 mm 未満の微小粒径(粘土分)の組成率に大差がない。しかし、0.002 mm 以上の粒径では、母材別にかなりの差異があり、たとえば粘板岩と火山灰では細砂や微砂分 (0.2~0.002 mm) がかなり多いのに対し、花崗岩は粗砂や細

Table 33. 母材別土壌の
Structure and some physical properties on

供試土壌 Experimental soil			採取場所 Sampling site	容積重 Volume weight (%)	圧結度 Compactness (%)	全孔隙量 Total porosity (%)	粗孔隙量 Large porosity (%)	透水性 Percolation rate (cc/min)	粘土比 Clay ratio (%)
凝灰岩 Tuff Rock	表層土 Surface soil	疎 L	秋田・藤里 三蓋山中腹 (スギ天然生林皆伐跡地) Middle slope of Mt. Sangai at Fuzisato in Akita prefecture (Cut-over land of Sugi natural forest)	45.2	59.1	77.4	34.1	27.5	7.1
		中 M		57.9	75.7	72.0	21.9	3.0	7.1
		密 H		60.1	78.6	71.3	20.5	1.0	7.1
	下層土 Subsoil	疎 L		63.5	58.3	64.7	24.8	3.0	3.6
		中 M		75.9	69.6	58.7	23.0	1.0	3.6
		密 H		78.8	72.3	56.7	18.8	0.5	3.6
粘板岩 Clay slate Rock	表層土 Surface soil	疎 L	岩手・玉山 早坂高原 (シバ草原) Hayasaka high land at Tamayama in Iwate prefecture (Siba grass land)	36.8	44.9	84.0	35.5	55.5	8.6
		中 M		45.7	55.7	80.1	29.5	33.0	8.6
		密 H		51.6	62.9	77.6	21.8	6.0	8.6
	下層土 Subsoil	疎 L		42.2	49.6	83.2	31.5	43.0	11.5
		中 M		49.2	57.9	78.8	20.6	29.0	11.5
		密 H		57.2	67.3	75.4	15.7	0.5	11.5
花崗岩 Granite Rock	表層土 Surface soil	疎 L	岩手・玉山 姫神山中腹 (広葉樹天然生林) Middle slope of Mt. Himekami at Tamayama in Iwate prefecture (Natural forest of broad-leaved trees)	96.5	68.4	60.0	27.4	50.0	6.5
		中 M		114.8	81.4	52.5	24.1	10.5	6.5
		密 H		124.5	88.3	48.0	20.5	9.0	6.5
	下層土 Subsoil	疎 L		125.9	76.8	45.2	28.7	47.5	3.8
		中 M		137.4	83.8	41.3	23.5	13.0	3.8
		密 H		161.7	98.6	33.0	19.5	5.5	3.8
火山灰 Volcanic ash Ash	表層土 Surface soil	疎 L	岩手・滝沢 岩手山麓 (アカマツ天然生林) Foot of Mt. Iwate at Takisawa in Iwate prefecture (Akamatsu natural forest)	46.6	59.3	79.2	32.7	83.5	5.3
		中 M		52.9	67.4	76.3	25.5	58.0	5.3
		密 H		60.7	77.3	72.9	22.5	48.0	5.3
	下層土 Subsoil	疎 L		53.6	54.1	76.5	27.5	68.5	4.9
		中 M		77.2	78.0	64.5	21.5	37.0	4.9
		密 H		84.1	84.9	61.2	20.3	6.5	4.9

注) Comment) L : Filling up of light condition. M : Filling up of middle condition. H : Filling up of

砂分（2~0.02 mm）が多くなっている。凝灰岩は表層土と下層土の粒径組成に顕著な差異があり、とくに下層土にはれき含有率が著しく高い。このような粒径組成の違いは、母材の風化度を表現しているものと考えられる。

この実験によって得られた侵食率と最終浸透レートを、表層土と下層土別に、Table 34 と Table 35 に示した。侵食率についてのみ、わかりやすく両対数紙に図化したのが Fig. 26 と 27 である。これらによると、各供試土壌とも従来知られているように、流出土砂量は降雨強度が大きくなれば急激に増加していき、また、充てん度の密なものは疎のものより、多くなる傾向がみられる。表層土と下層土別に、母材、充てん度、降雨強度を3元とし、各侵食率の分散分析を行なってみた。この結果が Table 36 に示すとおりであって、表層土では降雨強度との間に、下層土では充てん度と降雨強度の間に、有意な差異が認められる。

土 性 と 物 理 性

the erosion of each mother rock soils.

有機物含量 Organic matter (%)	流亡度 Erodi- bility (sec)	分散率 Disper- sion ratio (%)	土壌硬度 Soil hard- ness (mm)	礫と細土の組成 Composition of gravels and fine soils (%)		細 土 の 粒 径 Particle separation of fine soils			
				礫 Gravels	細 土 Fine soils	2~ 0.2mm	0.2~ 0.02mm	0.02~ 0.002mm	0.002mm 以下
6.5	130	12.6	0.4	9.7	90.3	10.5	30.2	52.6	6.7
6.5	130	12.6	13.6	6.8	93.2	10.5	30.2	52.6	6.7
6.5	130	12.6	14.9	4.5	93.5	10.5	30.2	52.6	6.7
0.6	679	50.5	0.4	32.1	67.9	38.9	53.6	3.9	3.6
0.6	679	50.5	12.9	30.4	69.6	38.9	53.6	3.9	3.6
0.6	679	50.5	17.8	32.9	67.1	38.9	53.6	3.9	3.6
5.9	462	8.5	1.0	2.9	97.1	9.1	52.2	30.7	8.0
5.9	462	8.5	9.9	2.2	97.8	9.1	52.2	30.7	8.0
5.9	462	8.5	19.3	2.2	97.8	9.1	52.2	30.7	8.0
4.5	832	2.9	0.7	4.4	95.6	17.3	50.7	21.7	10.3
4.5	832	2.9	9.5	4.4	95.6	17.3	50.7	21.7	10.3
4.5	832	2.9	14.8	4.7	95.3	17.3	50.7	21.7	10.3
8.1	136	43.0	1.0	3.0	97.0	39.4	46.5	8.0	6.1
8.1	136	43.0	13.3	3.5	96.5	39.4	46.5	8.0	6.1
8.1	136	43.0	19.4	4.5	95.5	39.4	46.5	8.0	6.1
0.3	245	60.5	1.1	15.2	84.8	42.2	45.2	9.0	3.6
0.3	245	60.5	6.0	14.2	85.8	42.2	45.2	9.0	3.6
0.3	245	60.5	14.5	14.3	85.7	42.2	45.2	9.0	3.6
10.1	163	24.2	0.3	0.5	99.5	16.4	31.4	47.2	5.0
10.1	163	24.2	6.3	0.5	99.5	16.4	31.4	47.2	5.0
10.1	163	24.2	8.5	0.5	99.5	16.4	31.4	47.2	5.0
1.3	166	8.9	0.3	0.4	99.6	15.5	49.9	29.9	4.7
1.3	166	8.9	6.5	0.4	99.6	15.5	49.9	29.9	4.7
1.3	166	8.9	14.5	0.4	99.6	15.5	49.9	29.9	4.7

heavy condition.

Table 34. 母材別の土壌の侵食実験の結果 (表層土)
Results of erosion experiment on each mother rock soil (surface soil)

区 分 Classification	降雨強度 (mm/hr)	凝 灰 岩 Tuff			粘板岩 Clay slate			花崗岩 Granite			火 山 灰 Volcanic ash		
		疎 L	中 M	密 H	疎 L	中 M	密 H	疎 L	中 M	密 H	疎 L	中 M	密 H
侵 食 率 Erosion ratio (ton/ha/hr)	25	0.70	1.23	1.00	0.07	0.13	0.33	0.50	0.73	1.43	0.08	0.23	0.35
	60	2.35	3.77	3.83	0.40	1.07	2.13	1.33	2.02	10.80	0.18	2.00	2.83
	120	9.53	11.60	11.00	0.93	3.22	7.47	10.12	18.47	75.73	2.52	6.23	3.80
最終浸透レート Final infiltration rate (mm/hr)	25	4.1	3.0	0.8	25.1	24.6	7.8	24.2	25.6	21.6	25.3	25.2	25.1
	60	14.1	5.7	2.4	26.0	31.2	15.2	55.0	52.6	27.7	57.1	55.3	49.0
	120	32.6	15.1	13.8	57.4	57.5	30.4	85.9	87.2	81.8	100.0	95.0	81.4

(注) Comment)

L : Filling up of light condition. M : Filling up of middle condition. H : Filling up of heavy condition.

Table 35. 母材別の土壌の侵食実験の結果 (下層土)
Results of erosion experiment on each mother rock soil (subsoil)

区 分 Classification	降雨強度 (mm/hr)	凝 灰 岩 Tuff			粘板岩 Clay slate			花崗岩 Granite			火 山 灰 Volcanic ash		
		疎 L	中 M	密 H	疎 L	中 M	密 H	疎 L	中 M	密 H	疎 L	中 M	密 H
侵 食 率 Erosion ratio (ton/ha/hr)	25	0.62	1.27	2.05	0.12	0.27	1.43	0.08	0.83	1.32	0.35	0.63	0.27
	60	3.97	3.40	5.63	2.13	2.35	10.77	3.23	1.45	4.60	0.58	1.00	3.03
	120	5.71	7.03	6.90	7.13	6.40	36.98	7.80	12.93	33.00	2.18	3.00	21.03
最終浸透レート Final infiltration rate (mm/hr)	25	0.3	0.0	1.5	19.8	21.9	5.7	22.9	16.5	13.1	24.9	23.9	23.4
	60	0.0	0.0	3.7	24.3	21.4	1.2	11.6	20.3	12.7	51.0	43.9	31.3
	120	9.3	4.1	8.7	51.5	48.8	16.0	21.5	27.8	15.6	81.1	70.8	48.6

(注) Comment)

L : Filling up of light condition. M : Filling up of middle condition. H : Filling up of heavy condition.

Table 36. 母材別侵食実験の分散分析表
Analysis of variance on the erosion experiments of
each mother rock soil

要 因 Factors	表 層 土 Surface soil				下 層 土 Subsoil				F			
	偏 差 平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	不偏 分散 Unbi- ased	F ₀	偏 差 平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	分散 Var- iance	F ₀	*	**	***	
母 材 A Mother rock	805.97	3	268.66	3.0606	115.58	3	38.53	2.3408	3.49	5.95	10.80	
充てん度 B Degree of filling up	384.03	2	192.02	2.1875	449.37	2	224.69	13.6507	3.88	6.93	12.97	
降雨強度 C Rainfall intensity	1129.54	2	564.77	6.4339*	902.77	2	451.39	27.4235	3.88	6.93	12.97	
交互作用 Interaction												
A × B	782.72	6	130.45	1.4861	152.35	6	25.39	1.5425	3.00	4.82	8.38	
A × C	1138.62	6	189.77	2.1619	200.83	6	33.47	2.0334	3.00	4.82	8.38	
B × C	423.33	4	105.83	1.2056	455.54	4	113.89	6.9192	3.26	5.41	9.63	
誤 差 Error	1053.36	12	87.78		197.49	12	16.46					
計 Total	5717.57	35										

*, *** Table 20 参照。See Table 20.

プロット内に入れた土量をもって、充てん度を疎・中、密の3段階に区分したことは前述のとおりであり、これは土壌硬度や圧結度などと密接な関係が認められるが、母材別に必ずしも同一水準内に含まれていないものもある。しかし、この充てん度は土壌の詰まり、または固めの度合いを表現していると考えてさしつかえない。土壌母材といっても、その鉱物組成や風化程度が種々であり、供試材料をもって代表させることは無理であるが、Table 37 の侵食率と土壌諸性質の相関関係をみてもわかるように、母材よりも土壌の圧結程度が侵食に直接結びつくものと考えられる。

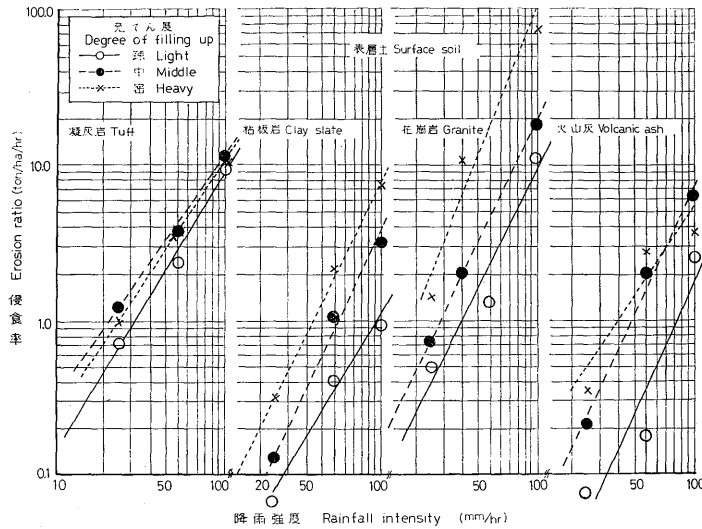


Fig. 26 母材および充てん度と侵食率の関係 (表層土)

Relation of erosion ratio to the mother rocks and the degree of filling up (Surface soil).

Fig. 27 母材および充てん度と侵食率の関係 (下層土)

Relation of erosion ratio to the mother rocks and the degree of filling up (Subsoil).

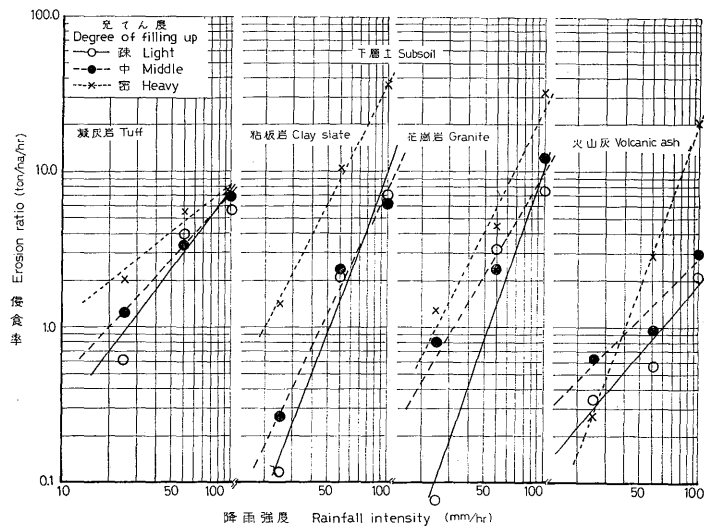


Table 37. 侵食率（降雨強度 100 mm/hr）と土壌諸性質の相関関係
Correlation between erosion ratio (rainfall intensity: 100 mm/hr) and
some physical properties of soils

区 分 Classification	n	容 積 重 Volume weight	圧 結 度 Compact- ness	全孔隙量 Total porosity	粗孔隙量 Large porosity	透 水 性 Perco- lation rate	土 壌 硬 度 Soil hard- ness	微砂 + 粘土 Silt and clay	分 散 率 Disper- sion ratio
表 層 土 (A) Surface soil	12	** 0.7593	* 0.6407	** -0.7723	-0.4405	-0.4189	0.5315	-0.5291	0.5622
下 層 土 (B) Subsoil	12	0.3698	-0.5208	-0.2802	* -0.6046	-0.5209	0.5711	0.0599	0.0043
A + B	24	* 0.5199	** 0.5535	* -0.4672	* -0.4489	* -0.4274	*** 0.5328	-0.3039	0.2199

* 5 %水準で有意 Significant at the 0.05 level. ** 1 %水準で有意 Significant at the 0.01 level.

14. 総括および結論

14-1. 研究の目的と方法

この研究は、山地の開発に対応する保全的観点からの基礎的資料として、個別の森林の持つ理水および侵食防止に関する効果を、定量的に明らかにすることである。これに関連する実験および調査は、東北地方の表日本側の山地帯（岩手・宮城両県下）を対象に、1953年から1972年までの20年間にわたり実施した。

流域内の、森林状態の差異による水および土砂流出の態様や過程を、明確にはあくするために、現地における多数地点での調査測定や、モデル状態をつくって比較試験を繰り返した。量水堰堤による流域対象試験を演えきの方法に基づく研究とするならば、本研究は個々の具体的事実を総括し、一般的な法則を見出そうとする帰納的研究といえよう。

研究の具体的内容としては、林地における地表流下・浸透および侵食の現象解明やそれらの測定法の検討をはじめ、多数地点で測定した地被別の浸透能の比較、同一立地条件下の植被別浸透能の比較、地形および土壌型別の浸透能の比較、浸透能と地表状態および土壌の物理性との関係、地表下の各土層位からの流出、表面侵食抑止に及ぼす地被物の効果、樹種別根系による土砂緊縛効果の比較、土壌母材や物理性と受食度との関係など、12項目に分けられる。

14-2. 研究結果の要約

(1) 地表流下は、区画内の浸透能を越えない降雨強度でも起こり得るし、また、降雨強度の増大にともない浸透レートはほぼ直線的に上昇する。この現象は、区画内が種々の浸透能を持つ部分の複合面と考えることによって理解できる。降雨強度によって変化する範囲の浸透レートを浸透強度、全面に降雨余じょうの状態がみられる場合のほぼ一定した浸透レートを浸透能とし、区別して測定値を取り扱った。

降雨強度が一定の場合、時間の経過にともなう浸透経過は減衰曲線を描き、一定値に近づくのが一般的である。しかし、地表が極端に乾燥したり、表土が著しく分散した場合には、まったく逆の経過をたどることがわかった。この研究では、流下開始の最低降雨強度 (ϕ_0)、浸透強度曲線の方角係数 (α)、一定降雨強度での初期浸透レート (f_0)、最終浸透レート (f_c) などを地区間の比較値とし、なかでも f_c を最重視した。

(2) 地表流下または浸透量の測定には、携帯または可搬用として Musgrave 型の冠水式円筒浸透計、

平田改良型の注水式斜面浸透計、米国 Rocky Mountain 型の散水式浸透計、林試東北型の散水式斜面浸透計などを用い、固定設備としては人工降雨および自然降雨による地表流下区などを用いた。これらの測定方法には種々な得失があり、また、測定値にも多少の差異があることがわかった。注水式の測器による測定値は、散水式の測器・設備のそれよりも、流下開始点がかかなり高くなったが、地被物や表土が十分湿った条件下では、冠水式と注水式測器による最終浸透レート (f_e) はほぼ一致した。

(3) 林地・伐採跡地・草生地・裸地の4地被区分により、岩手・宮城県下の75地区で、注水式斜面浸透計により浸透実験した結果、地被別の浸透能に明らかな差異が認められた。すなわち、浸透能 (f_e) の値は、林地:258, 伐採跡地:150, 草生地:128, 裸地:79 (単位: mm/hr) であった。林地の中では広葉樹は針葉樹よりも浸透能が大きく、とくにブナ天然生林が最大であった。しかし、踏み固められた歩道は最小で林地平均の5%程度にすぎなかった。

(4) 植被別の浸透能差異を明らかにするために、人工降雨式の流下区設備により、76回の実験を行った。これによると、浸透能は、ササ生地>広葉樹(コナラ・ウワミズザクラ)林地>アカマツ林地>カラマツ林地>シバ>裸地の順であった。同一立地条件下に、同時に植栽した11樹種の成林地を対象に、注水式の斜面浸透計により浸透能を測定したところ、樹種別に若干の差異が認められた。すなわち、ニセアカシア、クヌギ、クリが大きいグループに、カラマツ、モミ、アカマツは小さいグループに入る。なかでも、カラマツは阻水性の落葉層と菌糸網の発達のために、裸地土壤よりも低い値を示した。

(5) 地被別の浸透能に差異を与える原因を究明するために、(3)項の地区の測定資料をもとに、地被物および深さ別(0~5 cm と 20~25 cm)の土壌諸因子との相関関係を調べた。この結果、透水性、非毛管孔隙、圧結度、落葉地被物などとの間に、有意な相関が認められた。また、これらの諸因子の相関関係から、浸透能を推定するために重回帰分析を試みたが、その回帰式はつぎのとおり、

$$f_e = 8.11 X_1 + 0.75 X_2 + 28.32 X_3 - 32.32$$

ここで、 f_e : 浸透能 (=最終レート mm/hr), X_1 : 0~5 cm と 20~25 cm の非毛管孔隙量の平均 (%), X_2 : 同上の透水性の平均 (cc/min), X_3 : 落葉地被物 (気乾重 kg/m²)。

(6) 地位および土壌型などと浸透能の関係を明らかにするために、ほぼ同種の植被で立地条件の異なる場所を選んで、注水式斜面浸透計により浸透能を測定した。これによると、斜面中下部の崩積土は、上部の残積土に比べて浸透能が大きかったが、沢沿いの低地の水積土は斜面上部と同様に小さかった。これを土壌型別にみると、適潤性の B₀ および B_{1b} は大きい浸透能を示したのに対し、乾性の B_A, B_B, B_{1a} 型は著しく小さかった。また、これを地位別にみると、生育良好な地位「上」の浸透能は、地位「下」に比較して著しく大きく、およそ3倍の値となることがわかった。

(7) 地表流下と地表下流出(中間流出)との関係を究明するために、Rocky Mountain 型浸透計のプロットフレームを改良し、深さ別の流出量を測定した。およそ 100 mm/hr の降雨強度で、降雨期間1時間の最終値として、林地では降雨のおよそ30%が地表から、およそ10%はA層の直下から、およそ5%は深さ30 cm のB層の直下から流出した。しかし、歩道となっている裸地面では、地表流下がおおよそ50%に達するのに対し、地表下の流出は15 cm の位置からわずか1%認められたのみであった。地表下流出は降雨強度の増大とともに増加したが、その程度は地表流下に比べて明らかに緩慢であった。

(8) 山地斜面における土壌侵食を測定する場合に、「杭」、「箱」、「流下区」、「ダム」などの方法による。この研究のために土壌侵食計を考案した。この測

器は簡便で精度が高く、1/10 mm 単位までの精測が可能である。測器試用の結果、3 人の技術者間の精度テストでは、標準誤差の平均値は 0.0044 にとどまった。

(9) 上述した(4)の人工降雨式の流下区実験で、流出土砂が認められたのは裸地区のみであった。他の有植生ないし落葉被覆区では、測定できるほどの量に達しなかった。この実験のように林冠層がない状態でも、ある程度以上の地表保護物によって、ほぼ全面がおおわれている限り、100 mm/hr を越す強雨が長時間連続しても、地表侵食が発生しないことを確認した。

(10) 侵食防止に及ぼす落葉の樹種別および被覆量別の効果の差異を明らかにするために、雨滴発生装置と小型ライシメーターを用いて室内実験を行なった。樹種はアカマツ、カラマツ、コナラの3種で、被覆量は1.6, 0.8, 0.4, 0.2, 0.1 (気乾重で単位は kg/m^2) の5段階である。この結果は樹種別には顕著な差異がなかったが、被覆量別には有意な差異が認められた。降雨強度を 100 mm/hr として、1 時間に 0.1 ton/ha 以上の土砂を流出させないためには、0.2~0.4 kg/m^2 (気乾重) 程度の落葉被覆が必要なのことがわかった。

(11) 樹種別の根系緊縛力を推定するために、抜根抵抗力を現地で測定した。28年生の針葉樹6種、広葉樹5種の同径級(10~12 cm)の抜根調査の結果では、ミズナラが最大で 2.7 ton で、クヌギがこれにつき 2.4 ton で、これら以外は大差なく、2~1 ton の範囲に含まれた。また、伐採後3年および6年めに、同様に測定した結果では、ニセアカシア、クヌギ、ミズナラ、カラマツ以外は伐採後に、抜根抵抗力は50%以下に低下した。低下しなかった広葉樹の3種は、伐根から萌芽し伐採後6年後においても生存していた。深い根と斜出根の分岐が多く、伐採後においても長期に緊縛力を維持できるクヌギ、ミズナラなどが厚層侵食防止上、ひいては表面侵食防止にも好ましい樹種といえよう。

(12) 土壌母材や土壌の物理性の侵食に及ぼす影響を明らかにするために、屋内の人工降雨実験を行なった。この実験結果では、凝灰岩・花崗岩・粘板岩、火山灰の表層土と下層土とも、受食度に母材別に明らかな差異がみられなかった。しかし、土壌の充てん度(物理性)との間には有意な差異が認められ、各供試土壌とも、密状態は中または疎状態よりも流出土砂量が明らかに多かった。なお、降雨強度が高まれば、いずれの母材および充てん度とも、流出土砂量は急激に増大することもわかった。

14-3. 結 論

森林でおおわれた土地の浸透能は、草地や裸地に比べて明らかに大きく、しかも、人為的にかく乱されない天然林や、生育の良好な森林ほど大きいことが確認された。浸透能が大きいということは、雨水の地下水への供給能力や土壌中の貯水能力が大きいとみてほぼ間違いない。このような観点から、浸透能は土地の理水機能を定量的に表現する有力な指標となり得る。

森林が他の地被に比べて、一般的に高い理水機能を持つ根源として、地上部に発達する植被そのものよりも、植被が永年にわたってつちかった落葉地被や土壌に基づくことが明らかにできた。土壌はこのような植被発達の影響とともに、気象条件や自然の地表変動の過程により生成されたものであり、そのたい積様式や水分状態が理水的効果に密接に関与していることもわかった。

一方、森林の侵食防止機能についてみると、表面侵食に対して落葉層がきわめて有効な役割を果たしていることを確認した。水食を防ぐために、落葉地被物がむらなく地表を被覆することが先決であるが、その厚さはそれほど必要とせず、1.5 cm (気乾 0.4 kg/m^2) 程度でほぼ十分なようである。厚層侵食ひいては表面侵食防止に対しては、林木の根系は重要なものと考えられるが、根系形態や伐採後の抜根抵抗力の

調査結果から、萌芽力を持った広葉樹類が価値が高いことが明らかにされた。

このように、森林の持つ理水および侵食防止効果ともに、地表の落葉地被や表層土の条件が共通的に重要な役割を果たしていることが理解できた。したがって、両機能を維持改善を図るには、地表に落葉地被物をたくわえ、表土の物理性を良好にするため、短伐期施業よりは長伐期施業が望ましいといえよう。地表をかく乱した場合には、たとえ土壌型やたい積様式がまったく変化しなくとも、両機能がかく乱の程度に相応して減退することは間違いない。

文 献

- 1) 青森営林局：岩手地方赤松収穫表，青森営林局，30 pp., (1957)
- 2) BOUYOUCOS, C. J.: The clay ratio as a criterion of susceptibility of soil to erosion. Jour. Amer. Agron., 27, 738~741, (1935)
- 3) BAYER, L. D. (野口・福田共訳)：Soil physics, 朝倉書店，406 pp., (1958)
- 4) COOK, H. L.: The infiltration approach to the calculation of surface run-off. Trans. Amer. Geophys. Union, 27, 726~743, (1946)
- 5) CLEMENT, M. and J. L. SMITH: Soil Erosion-gauge. Jour. Soil and Water Conserv., 17, 1, p. 22, (1962)
- 6) DORTIGNAC, E. J.: Design and Operation of Rocky Mountain Infiltrometer. Rocky Mountain Forest and Range Exp. Sta., 68 pp., (1951)
- 7) DORTIGNAC, E. J. and L. D. LOVE: Infiltration studies on Ponderosa pine ranges of Colorado. Rocky Mountain Forest and Range Exp. Sta. Paper, 59, 34 pp., (1961)
- 8) 船引真吾・青峰重範：土壌実験法，養賢堂，68~69, (1963)
- 9) HORTON, R. E.: The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Amer. Geophys. Union, 14, 446~460, (1933)
- 10) HORTON, R. E.: Determination of infiltration capacity for large drainage-basins. Trans. Amer. Geophys. Union, 18, 371~385, (1937)
- 11) HORTON, R. E.: Analysis of run-off plot experiments with various infiltration capacity. Trans. Amer. Geophys. Union, 20, 693~711, (1939)
- 12) HURSH, C. R. and M. D. HOOVERS: Soil profile characteristics pertinent to hydrologic studies in the Southern Appalachians. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 6, 414~442, (1941)
- 13) HORTON, R. E.: Erosional development of Stream and their drainage basins. Hydro-physical Approach to quantitative morphology. Bul. Geol. Soc. Amer., 56, 275~370, (1945)
- 14) 平田徳太郎：山地浸透計について，日林誌，38, 1, 34~40, (1956)
- 15) 石川栄助：実用近代統計学，槇書店，231~233, (1955)
- 16) 川口武雄：山地土壌侵蝕の研究 (第1報) 従来の資料による統計的研究，林試集報，61, 1~14, (1951)
- 17) 木立正嗣：東北地方に於ける地質と侵食状態に就いて，日林東北支誌，2, 3, 5~15, (1952)
- 18) 片岡 順：斜面の浸透性を表わす示標，東大農演報，47, 111~124, (1954)
- 19) 川口武雄・滝口喜代志：山地土壌侵蝕の研究 (第3報) 地被物の侵蝕防止機能に関する実験，林試研報，95, 91~120, (1957)
- 20) 苅住 昇：樹木の根の形態と分布，林試研報，94, 163~178, (1957)
- 21) 北村嘉一・難波宣士：樹根の抵抗力に関する現地試験，77回日林講，568~570, (1966)
- 22) 川端幸蔵：変数選択型の重回帰分析，農林研究計算センター報告，A-4，農林水産技術会議事務局，103~144, (1969)

- 23) LINSLEY, R. K., M. A. KOHLER and J. L. H. PAULHUS : Applied hydrology. 309~315, (1949)
- 24) MUSGRAVE, G. W. : The infiltration capacity of soils in relation to the control of Surface-runoff and erosion. Jour. Amer. Soc. Agron., 27, 336~345, (1935)
- 25) MUSGRAVE, G. W. and G. R. FREE : Preliminary report on a determination of comparative infiltration rates on some major soil types. Trans. Amer. Geophys. Union, 18, 345~349, (1937)
- 26) 三原義秋 : 雨滴と土壤侵蝕, 農業技術研究所報告, A-1, 10~14, (1951)
- 27) 真下育久・橋本与良・宮川 清 : スギ, ヒノキの成長と土壤条件, 林土調報, 9, 14~43, (1958)
- 28) MEEUWING, R. O. : Infiltration and soil erosion as influenced by vegetation and soil in northern Utah. Jour. Range Management, 23, 3, 186~188, (1970)
- 29) 村井 宏 : 混牧林施業と林地保全, わかりやすい林業解説シリーズ, 49, 日本林業技術協会, 40 pp., (1972)
- 30) 村井 宏・岩崎勇作・北田健二・北田正憲 : 土壤侵蝕計の試作と試用成績, 84回日林講, 379~381, (1973)
- 31) NEAL, J. E. : The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on run-off and soil erosion. Agr. Eng., 19, 213~217, (1938)
- 32) 農林省林業試験場・林野庁 : 国有林野土壤調査方法書, 林野共済会, 47 pp., (1955)
- 33) 難波宣士・葦沢倭子 : 山地土壤侵蝕の研究 (第 2 報) 土壤の受蝕性指標, 林試研報, 95, 91~120, (1957)
- 34) 難波宣士 : 荒廃山地の流出土砂量について, 日林誌, 38, 9, 365~368, (1963)
- 35) SNEDECOR, G. W. (畑村・津村・奥野・田中共訳) : 統計的方法 (上), 岩波書店, 48 pp., (1951)
- 36) 佐藤 正・村上与助・村井 宏・関川慶一郎 : 新しい型の山地浸透計による測定成績 (第 1 報), 林試研報, 83, 39~64, (1956)
- 37) 佐藤 正・村上与助・村井 宏・関川慶一郎 : 新しい型の山地浸透計による測定成績 (第 2 報), 林試研報, 99, 27~57, (1957)
- 38) 田中 茂 : 急斜面の土壤侵蝕の実験的研究, 土木学会論文集, 6, 85~88, (1951)
- 39) TRIMBLE, G. R. and H. W. LULL : The role of forest humus in watershed management in New England. Northwest Forest Exp. Sta. Paper, 85, 34~36, (1956)
- 40) 塚本良則 : 山地流域内に起る水文現象の解析, 東京農工大農演報, 6, 1~79, (1966)
- 41) 武田進平・石井正典 : 中間流の性質に関する研究, 東北地域災害科学研究, 22~28, (1966)
- 42) 高橋宏治 : 保全的見地にたった森林取扱いに関する研究 (第 1 報), 日林東北支誌, 19, 157~161, (1968)

**Studies on Function of Water and Soil Conservation
based on Forest Land (I)**

**—Influence of difference in forest condition upon
water run-off, infiltration and soil erosion—**

Hiroshi MURAI⁽¹⁾ and Yûsaku IWASAKI⁽²⁾

Summary

The studies were undertaken to find out quantitatively the water regulation and erosion control by forest vegetation as fundamental data for conservation of forest land which correspond to the development on mountainous zone. During 1953~1972, the field studies were made in the mountainous zone on the Pacific side of Tohoku district in Japan. In order to comprehend higher precise effects on run-off and soil loss with difference and variation of land cover condition in a watershed, the authors practiced the field investigation in several places and the comparative experiment with some model condition.

The contents of these works are divided roughly into seven categories: the elucidation of phenomena on surface run-off, infiltration and soil erosion in a forest land, the establishment of measurement method on the above phenomena, comparisons on the infiltration capacities which were measured at many locations of each land-cover type, analysis of relation between infiltration capacity and some environmental factors, determination of subsurface flow from some soil layers, and quantitative explication of erosion control function by litter and root system of the forest lands.

The outlines of the method and the results are briefly summarized as follows:

(1) We confirmed that surface run-off occurred under lower rainfall intensity less than infiltration capacity of the land, and the rate varied with the rainfall intensity. These facts could be explained by the presumption that a ground surface was composed of various parts, having different infiltration capacities. When the rainfall intensity rose over a certain degree of value, the surface run-off occurred from the whole area of plot, and infiltration rate approached to the fixed value gradually.

As to the extent which did not reach the infiltration capacity, the relation between rainfall intensity and infiltration rate was expressed with the regression equation of the first degree. The direction coefficient (k) of the straight line was found to be the index of infiltration intensity, and the cross point (ϕ_0) of this straight line of f (infiltration rate) = i (rainfall intensity) showed the starting point of surface run-off.

(2) For the purpose of measurement on the surface run-off or the infiltration, we used various kinds of instruments. The portable infiltrometers used were MUSGRAVE's tube one of water flooding type, the mountain one which was HIRATA's improved sloping one of water pouring type, the Rocky Mountain one and the Rinshi-Tohoku one of water distributing type. The fixed run-off plots were the artificial rainfall system and the natural rainfall one.

A certain extent of difference was observed among these measurement values of surface

run-off or infiltration. For instance, the run-off starting point of the mountain infiltrometer which pours water from the upper end of the frame was higher than that of the Rocky Mountain infiltrometer which sprinkles over the whole area. However, the measurement value (final infiltration rate) of the mountain infiltrometer agreed with that of the MUSGRAVE's tube one of water flooding type under fully wetted condition.

(3) According to the results of measurement at 75 areas by the mountain infiltrometer, there was found a clear difference in the infiltration capacities among some land-cover types. The final infiltration rates and those relative values for that of the forest land were as follows: forest land 258 mm/hr (100%), cut-over land 150 mm/hr (58%), grass land 128 mm/hr (50%), bare land 79 mm/hr (31%).

Still more, when the cover type was subdivided, it was found that infiltration capacity of the broad-leaved tree stand was higher than that of the needle-leaved tree one. The foot path and the cut-over land with heavy disturbance showed the lowest infiltration capacity.

(4) According to the results of the experiment on the run-off plot with the artificial rainfall apparatus, each plot could be arranged in the following order of high infiltration capacity: Sasa (Bamboo grass) covered land > forest land of broad-leaved trees > cut-over land (Akamatsu natural forest) > forest land of needle-leaved tree (Karamatsu planting forest) > bare land (non-treatment) > bare land (cultivated treatment).

From the results of infiltration measurement by the mountain infiltrometer at the planting forest land of eleven tree species, the broad-leaved trees such as Niseakashia (*Robinia pseudoacacia*), Kunugi (*Quercus acutissima*) and Kuri (*Castanea crenata*) have higher values than the other trees. In the measurement of exposed condition on the ground surface, the infiltration capacity decreased 20~30 % compared with the natural condition in general. On the contrary, at the forest land of Karamatsu (*Larix leptolepis*) and Momi (*Abies firma*), it increased a little by containing the mycelium net in the litter there.

(5) As to the relation between the infiltration capacity and the soil physical properties, we recognized that the properties of surface soil at 0~5 cm depth was closely related with the infiltration capacity compared with ones of the subsoil at 20~25 cm depth. Especially, high correlations for the infiltration capacity was recognized among the non-capillary porosity and the compactness in the surface soil. In order to estimate the infiltration capacity from edaphic factors which showed high correlations, we tried the analysis for the selection of the best regression equation. As the result of calculation, which used the KAWABATA's program by means of a computer, we obtained the following equation: $f_c = 8.11 X_1 + 0.75 X_2 + 28.32 X_3 - 32.32$ where, f_c is final infiltration rate (mm/hr), X_1 is average non-capillary porosity (%), X_2 is average percolation rate (cc/min) and X_3 is weight of litter (air-dry kg/m²).

(6) The infiltration measurements by the mountain infiltrometer was done on some Buna (*Fagus crenata*), Akamatsu (*Pinus densiflora*) and Karamatsu (*Larix leptolepis*) stands having different topography factors and soil types. As measurement results, the infiltration capacity of the colluvial soils of the lower or the middle parts on a slope was greater than that of the residual soils of the upper parts. Furthermore, the infiltration capacity of the fluvial soils of the lowland parallel with stream was fairly low. The measured values were arranged by each soil type, and we recognized that infiltration capacities of B_d(B_b) and B_d(d) (B_b(d)) types were greater than those of B_A(B_A) and B_B(B_B) types. Only the Akamatsu forest lands were arranged into three site classes, and the significant difference to the infiltration capacity among each one was recognized. Namely, the average value of infiltra-

tion capacity on the stand of the first site class which showed good growth condition attained to nearly three times that of the third site class which showed poor growth.

(7) The measurement of subsurface flow was performed by the improved Rocky Mountain infiltrometer at the Sugi (*Cryptomeria japonica*) forest land and the bare land of foot path. From the observation result at the forest, we recognized that about 30 per cent for the amount of experimental rainfall run-off from ground surface, about 10 per cent for one run-off from 15 cm in depth which is immediately under A layer, and about 5 per cent for one run-off from 30 cm in depth immediately under B layer. At the bare land, the run-off from the ground surface occurred about 50 per cent for the amount of experimental rainfall and only 1 per cent of that occurred from 15 cm in depth. The intensity of experimental rainfall was about 100 mm/hr and the rate of subsurface flow was the final value of rainfall duration of one hour.

(8) For the purpose of erosion measurement on sloping land, we used the methods of catchment box, fixed stick and run-off plot. The soil erosion-gauge using the fixed stick method was developed as an inexpensive tool for measuring moderate losses and accumulations of soil erosion. Readings from the bar height to ground are made to the nearest 0.1 mm at 10 points and averaged for each sampling location. Accuracy tests between three operators showed a standard error of mean 0.004 mm.

(9) In the above-mentioned experiment of run-off plot with the artificial rainfall apparatus, obvious erosion occurred from the bare land plots and soil losses reached to a depth of 35~42 mm in three years. However, at the other plots which were covered with floor vegetation and litter, water erosion and soil losses could not be observed. By the results of this experiment, we confirmed that erosion did not occur on land having a well protective cover even under heavy rainfall overed 100 mm/hr.

(10) The erosion experiments by the method of small lysimeter with the artificial rainfall apparatus were practiced to determine a prevention function for erosion based on litter cover of each tree-species. Experimental tree-species were Akamatsu (*Pinus densiflora*), Karamatsu (*Larix leptolepis*) and Konara (*Quercus serrata*). The weights of litter cover were in five degrees as 1.6, 0.8, 0.4, 0.2 and 0.1 (air-dry kg/m²). Results of the experiment show that there was no significant difference between the litter kinds and soil losses. However, there was a highly significant difference between the weight of litter and soil losses. It was found that 0.2~0.4 kg/m of litter cover need due to did not occurred soil losses of over 0.1 ton/ha (air-dry) under one hour rainfall of 100 mm/hr.

(11) In order to estimate the power of soil conservation by root system of each tree-species, the stump resistance after the cutting was measured at the experimental planting forest. The experimental trees were six species of needle-leaved and five species of broad-leaved ones at twenty-eight years old. The measurement of the resistance power of Mizunara (*Quercus crispula*) showed maximum value as 2.7 ton, and Kunugi (*Quercus acutissima*) was second to that value. The measurement values of other tree species were from degrees of 2~1 ton. At three years and at six years after the cutting, the same measurement was performed at the above-mentioned stands. The power of stump resistance except for three broad-leaved trees with the sprouting regeneration and Karamatsu (*Larix leptolepis*) dropped to approximately one half of the value after three years of the cutting. Three broad-leaved trees which did not drop the power had lived by the reproductive power from the stump even six years after the cutting. Kunugi and Mizunara which have good root form and big

power of stump resistance are desirable trees to control erosion.

(12) . Indoor erosion experiments utilizing the small lysimeter with the artificial rainfall apparatus were conducted to determine influence in the mother rocks and physical properties of soil on soil erosion. Results of the experiment show that there was no significant difference in the erodibility of the surface soil and subsoil between four mother rocks as green tuff, granite, clay slate and volcanic ash. However, there was a significant difference in the erodibility of ones between degrees of filling up treatment. It was obvious that the heavy condition of filling up leads to more soil losses than the middle or the light ones on each experimental soil. Further, the greater the rainfall intensity, soil losses suddenly increased in all cases of experimental treatment.