

論文

林相の違いが表層土壌内の水の浸透に及ぼす影響

Effects of Forest Types upon Water Infiltration in Surface Soils

竹田 泰雄* 片岡 順* 飯田 修*
YASUO TAKEDA JUN KATAOKA OSAMU IIDA

Abstract

Landslides occur as a result of combination of many causative factors such as topography, geology, vegetation, and the like. Of these factors, it is the biological one that we are able to control to prevent the outbreak of landslides.

In order to investigate the possible relationship between the occurrence of landslides and the age of the forest stand covering the ground, we made a comparison in porosity and water infiltration in surface soils between a mature stand and a neighboring juvenile one artificially planted after clearcutting of preceding old one, and obtained the following results.

- 1) Infiltrated water through the surface soils in juvenile stand reached deeper layer more rapidly and abundantly than in mature one.
- 2) Standard deviation of porosity in juvenile stand was larger than in mature one.
- 3) It was considered that the difference in porosity was due to qualitative in surface soil through changes in micro-meteorology and interruption in the supply of fresh organic matters caused by clearcutting of the preceding old stand.

1. 緒言

山地が国土の3分の2を占めるわが国では、集中豪雨に起因した表層崩壊により、毎年のように各地で災害が発生している。

表層崩壊は豪雨などの誘因と地形、地質などの素因が複雑にからみ合って発生するものであるが、豪雨の発生時期、規模などを予測することは難しく、また素因である地形、地質をコントロールすることもできない。しかし、素因のうちでも、ある種の崩壊発生に対しては植生の影響は少なくないといわれており、統計的にみても伐採跡地あるいは幼齢林地域における崩壊発生頻度は、天然林、壮齢林地域のそれよりも大きい

という結果が得られている¹⁾。その主な理由として、伐根の腐朽による水みちの形成と剪断抵抗力の低下があげられている。この水みちの形成は水の急激な地中への浸透をもたらす、それによって間隙水圧の発生と土壌粘着力の低下を招き、崩壊発生に対する抵抗力の減少の因をなしている。

森林の伐採は、伐根の腐朽による水みちの形成のみならず、伐採地の微気象（気温、地中温度、湿度、風など）を変化させ、林地の表層土壌を変質させることが十分考えられる。また伐採によって落葉落枝の供給が少なくなることもA₀層を含む表層土壌の変質に与える影響は決して小さくない。このような表層土壌の変質が水の浸透に影響を与え、間隙水圧の発生、剪断抵抗力の減少などによる崩壊発生につながっていることも推察される。

植生は我々がコントロールできる重要な素因であり、

* 名古屋大学農学部

Faculty of Agriculture, Nagoya University.

その取扱い方によっては土砂災害の防除，軽減にもつながると考えられる。そこで崩壊発生機構解明の基礎資料を得る目的で，林相の違いが表層土壌内の水の浸透にどのような関連をもつかを調べるために，林相別に微気象の違い，林地 A₀ 層の変化，水の浸透状況（自然降雨による土中含水比の変化，人工注水による水の浸透状況の違い），さらに水の浸透に影響する表層土壌の孔隙等について現地調査および実験を行った。

2. 自然降雨による水の浸透状況

2.1 調査地および調査方法

調査地は名古屋営林局中津川営林署管内の国有林 109 林班で，標高 700 ~ 800 m の間に位置する北向きの斜面であり，地質は深層風化を受けた古期の角閃黒雲母花崗岩である。この地域は 74 年生のヒノキ林で占められていたが，109 林班の一部が 1978 年夏に伐採され，その年の秋にヒノキが植栽されている。

調査方法は壮齢林地域と幼齢林地域における微気象および水の浸透状況の違いを調査する目的で，図-1 に示したように，1979 年 6 月に隣接する壮齢林地および幼齢林地に誘電式土壌水分計の感体を各 20 本ずつ，深さ別に埋設した。さらに地上 30 cm の位置に 1 ヶ月巻自記温湿度計，週巻自記地中温度計などを設置し，その地域の降雨量も計測した。また微気象の変化の影響を直接的に受ける林地 A₀ 層の層別分布状況および表層土壌の孔隙についても調査の対象とし，1981 年

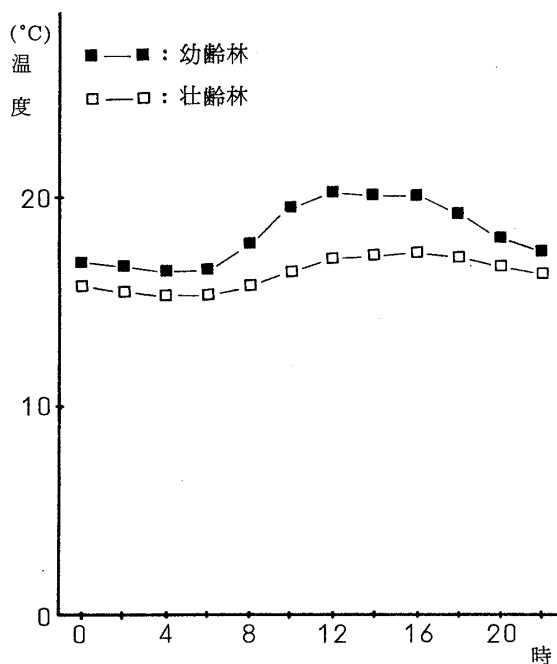


図-1 調査地概要

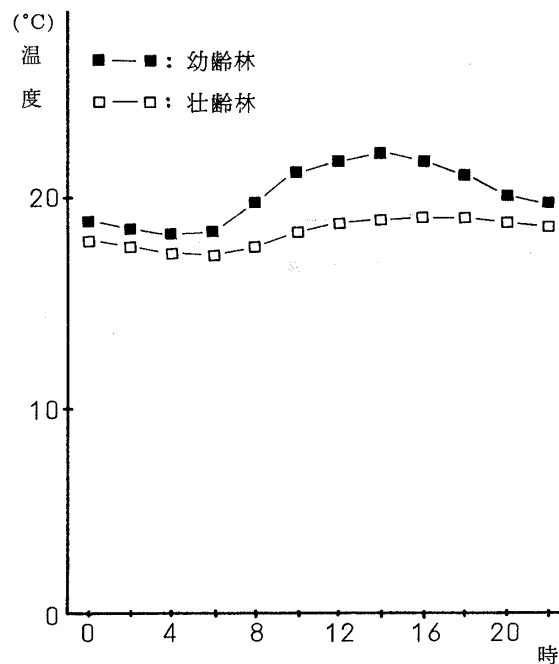
での 3 年間にわたって調査を継続した。

2.2 林相別微気象

林相別微気象の違いについては，自然降雨による土壌含水比変化との関係で，1981 年 6 月 10 日から 7 月 13 日までの梅雨期についてまとめたものであり，主な微気象は次のようである。



6月11日～16日の平均値



7月1日～6日の平均値

図-2 温度の日変化(1981年)

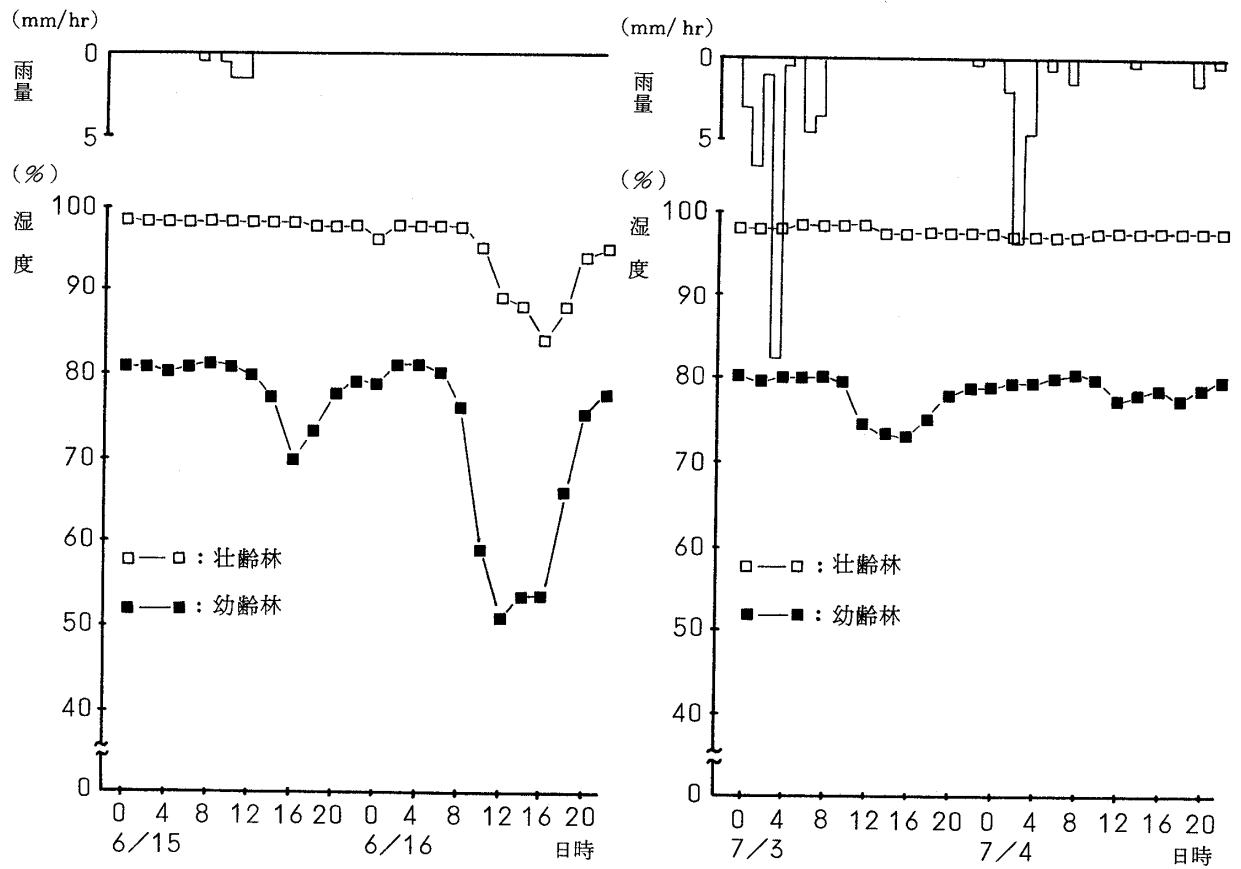


図-3 湿度の日変化(1981年)

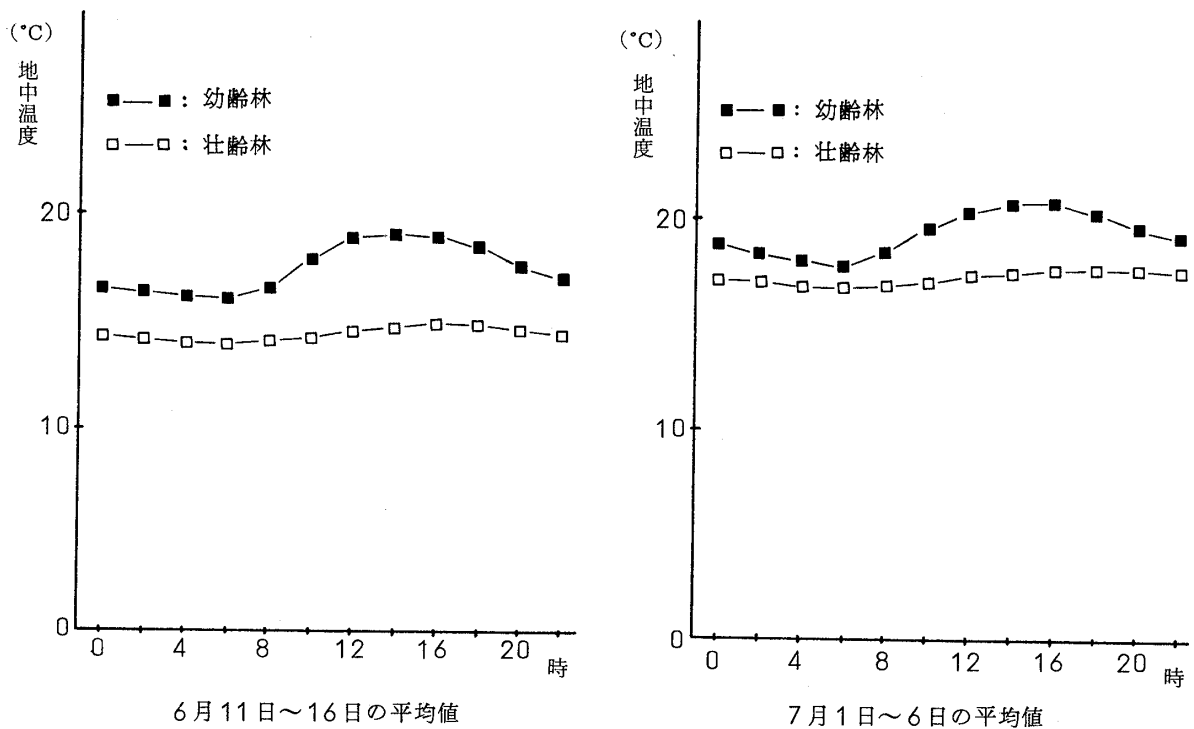


図-4 地中温度の日変化(1981年)

(1) 気温

6月中旬および7月上旬の気温の日変化を林相別に示したものが図-2である。いずれの期間においても日中では幼齢林地が壮齢林地に比較して3~4℃高くなっている。

(2) 湿度

気温と同時期の2日間について湿度の日変化を示したものが図-3である。湿度では壮齢林地が100%近い値を示しているのに対し、幼齢林地では80%程度であり、また無降雨日では変化が大きく、50%程度まで下降している。

(3) 地中温度

気温と同時期における深さ5cmに埋設した地中温度について日変化を示したものが図-4である。地中温度は気温と同様の傾向を示し、幼齢林地が壮齢林地に比較して地中温度も高くなっている。

2.3 伐採によるA₀層の変化

林地において伐採による落葉落枝の供給停止あるいは温湿度等の微気象の変化の影響を直接受けるものはA₀層およびA層付近である。とくにA₀層は落葉落枝およびその腐植層であるため、伐採による影響を最も強く受け易い。そこで図-1に示した調査地の壮齢林地および伐採後1年経過した隣接の幼齢林地においてA₀層を構成する各層の存在率を調査した。

A₀層はL層、F層およびH層に大別でき、L層(落葉層)は落葉落枝がほとんど分解されずにほぼ原形を保ったままで堆積している層、F層は落葉落枝がかなり分解されているものの多少原形をとどめ、植物の組織が認められる程度に破碎分解されている層、H層はかなり分解が進み、肉眼では植物の組織が識別できないほど黒変している有機物の層である。これら3層のうちで、F層およびH層について分解の程度によりF層をF₁およびF₂層に、F層とH層の間をFH層、H層に鉱物質が少し混在しているHA層に細分した。したがって、A₀層内の判別層としてはL、F₁、F₂、FH、HおよびHAの6層とし、A₀層の存在が割合多いと認められる地点を選んで壮齢林地内66箇所、幼齢林地内48箇所における各層の存在状況を調査した。調査地点のA₀層は5cm前後の厚さがあるが、L層以外の層は薄いため、約50cm²の範囲で上部より各層を順次取り除いて、F層以下の下部の層が存在するか否かのみを判別した。調査地点のうちでそれぞれの層の出現割合を存在率として林相別にまとめたものが図-5である。

この図において林相別に各層の存在率を比較してみると、最も違いがみられる層はF₂、HおよびHAであ

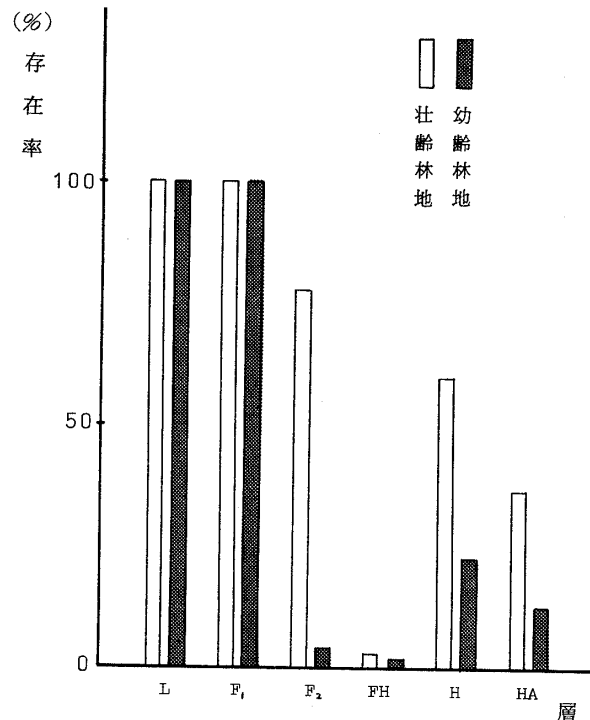


図-5 A層中の各層の存在率

り、いずれも幼齢林地内での存在率が小さくなっている。存在率の違いが大きいこれらの層は、落葉落枝などの有機物がpH、気温、水分、微生物その他の土壤環境条件に支配されて徐々に腐植していく層であるため、気温、湿度、地中温度などの微気象の変化の影響を受け易い。伐採により落葉落枝などの有機物の供給が中断されたことによる影響もあろうが、壮齢林地に比較して幼齢林地では気温、地中温度とも高いため微生物の活性が高まり、有機物の分解が速まって、漸移層であるF₂、H、HAなどの層の欠落したA₀層が多くみられたものと推察される。

2.4 自然降雨による土中の含水比変化

林地に降雨があった場合、水の浸透は表層土壤の影響を受けるので、林相毎に異なった反応を示すと考えられる。また表層での浸透状況の違いがさらに下部の層へも影響を及ぼす。そこで壮齢林地および幼齢林地において土壤水分測定用感体を5本を1組として深さ5、25、45、65および85cmに埋設した。埋設方法としては等高線方向およびそれに直交する斜面方向に2組ずつ、計4地点ずつとした(図-6参照)。各深さの土壤は埋設地点によって若干異なるが、5および25cmの位置はA層、45cmの位置はA層からB層に移行するAB層、65ないし85cmではB層がほとんどである。感体の含水比計測部分には、埋設深と同じ地点の土壤を2mmの篩にかけて通過した土壤を充填した。感体の土壤水分測定は随時行い、測定値は各感体の較正直線に

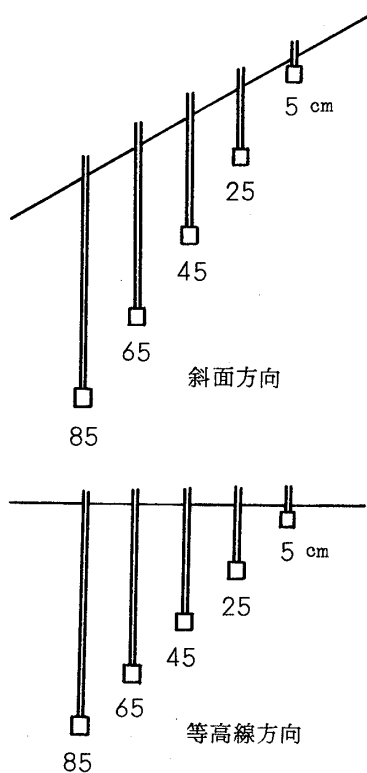


図-6 水分測定用感体埋設方法

基いて含水比に換算した。

各感体の較正直線の求め方は、2 mm篩通過分の現地土壌試料を用い、一定量の風乾土壌に水を加えてある含水比の土壌を調製し、それを感体に充填して、測定値が一定となる20分後の値を計測した。さらに充填した土壌の含水比を求め、感体の測定値と含水比の較正直線を作成した。実験に用いた充填土壌の含水比は12, 18, 25%前後、充填密度は1.3~1.5 g/cm³であり、較正直線の相関係数はいずれの感体についても0.98以上であった。

これらの測定は1979年から1981年の3年間にわたって行ったが、降雨との関係で1981年6月10日から13日までの梅雨期の結果をまとめた。

1981年6月11日から17日までの期間において、林相別、深さ別の含水比の変化状況と降雨状況を対比したものが図-7である。壮齢林地における計測地点Aでは、深さ5および25cm付近で含水比が大きく変化しているものの、深さ45cm以上では大きな変化はみられない。これに対し、幼齢林地における計測地点Cでは、深さ45~65cm付近まで含水比の増減がみられる。これらの結果より、壮齢林地では測定期間中の降雨が深さ20~30cmの範囲まで浸透して含水比の増加に影響を与えているのに対し、幼齢林地では50~60cm程度の深さまで到達していると推察される。

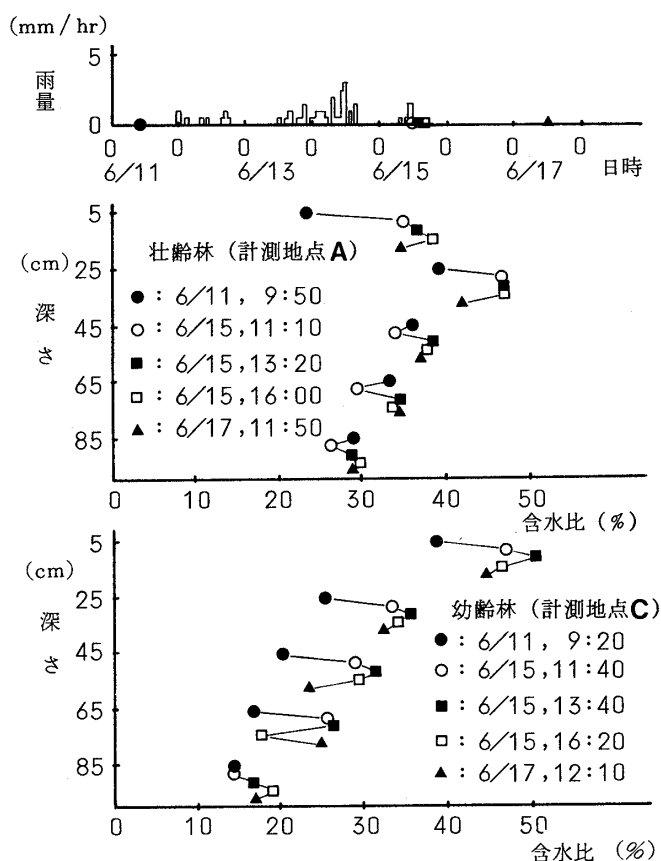


図-7 林相別、深さ別の含水比の変化

次に1980年および1981年の2年間における土中の含水比と、それに影響を与えたと考えられる降雨量との関係を調べたものが図-8~10である。これらの図は縦軸に含水比、横軸に先行降雨指数をとって描いたもので、先行降雨指数としては、a), 含水比計測時より2時間前までの降雨量に係数1を乗じ、2時間以上で4時間未満までの降雨量に係数0.9を乗じ、以下時間の経過とともに係数を減じて、18時間以上で20時間未満の降雨量に係数0.1を乗じて、これらを合計したもの(先行降雨指数A), b), a)と同様の方法で求めたものであるが、時間間隔を0.5日としたもの(先行降雨指数B), c), a)と同様の手法を用い、時間間隔を1日としたもの(先行降雨指数C), の3種類とした。

図-8は先行降雨指数Aに対する含水比の変化状況を壮齢林地の計測地点A(深さ45cm)および幼齢林地の計測地点C(深さ45cm)について比較したもので、両軸に同等の誤差をもつものとして最小自乗法により直線回帰式を求め、相関係数も算出した。図-9, 10についても同地点における先行降雨指数BおよびCについて、含水比との対応を例示したものである。これらの回帰式における勾配を表わす係数の大きさは降雨に対するその地点、深さにおける含水比の反応状況を

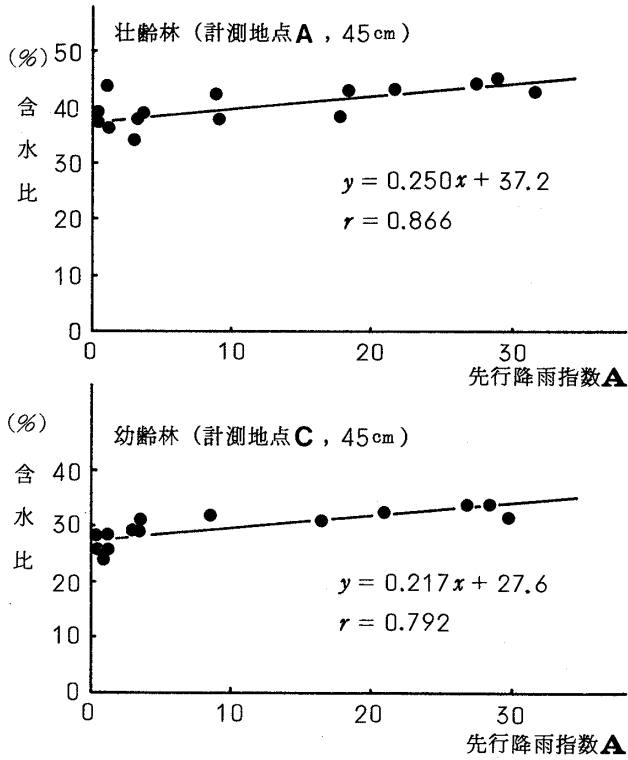


図-8 先行降雨指数と含水比の関係(I)

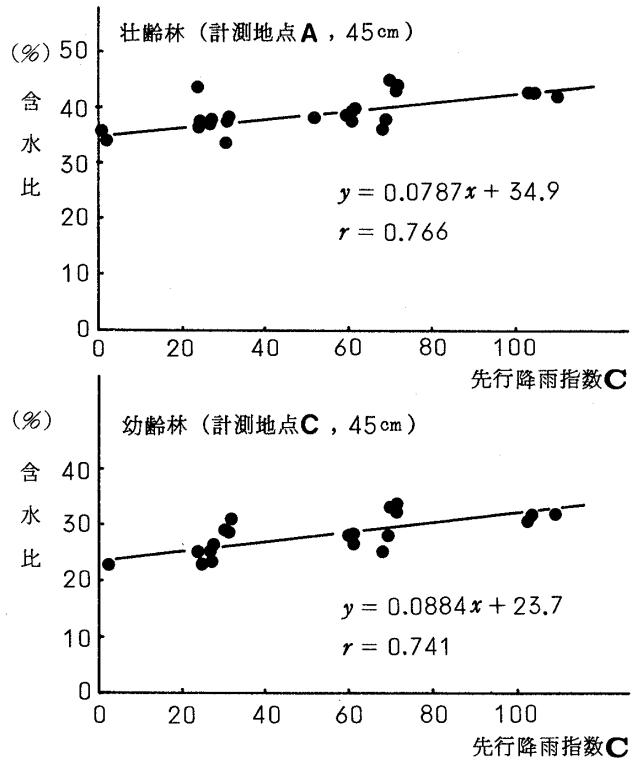


図-10 先行降雨指数と含水比の関係(III)

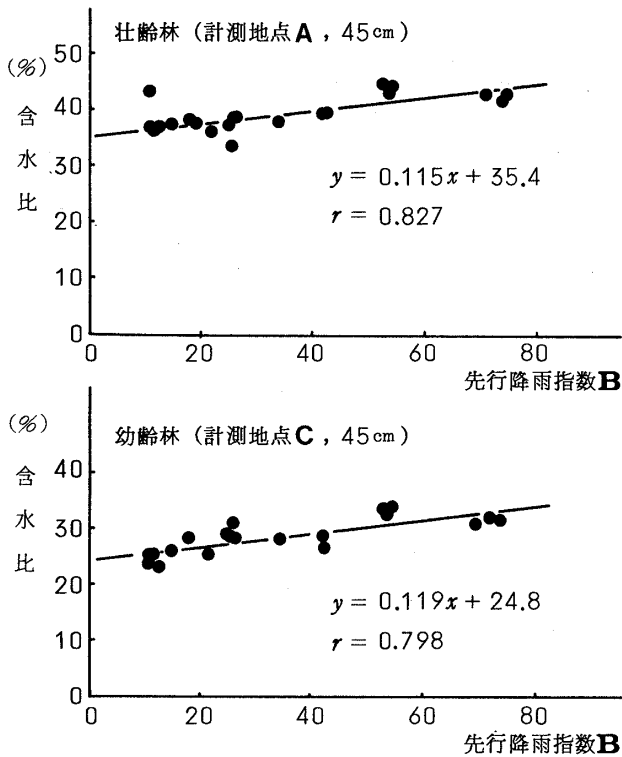


図-9 先行降雨指数と含水比の関係(II)

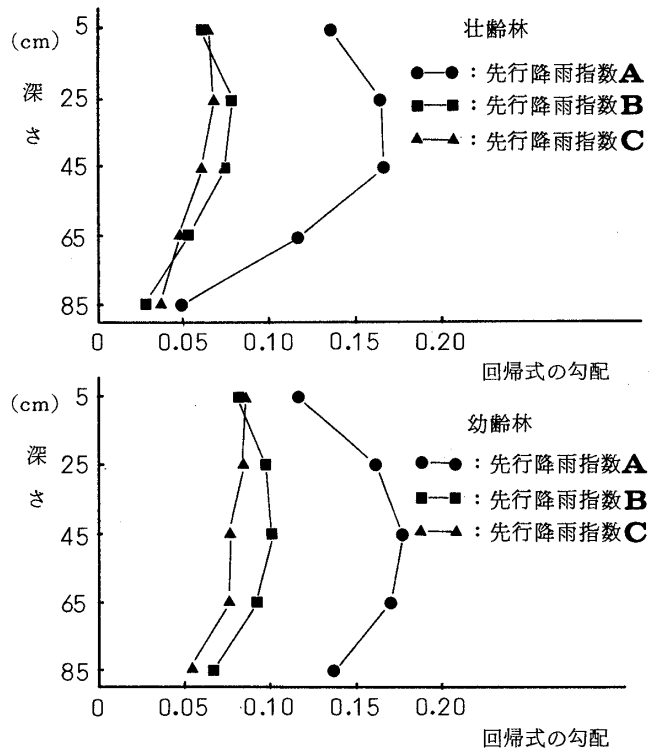


図-11 林相別、深さ別の回帰式の勾配

示し、切片の大きさは無降雨状態がある程度続いたときの含水比の値を表わしている。

これらの勾配について、図-1に示した壮齢林地内

の計測地点A, B, F, Gの深さ別平均値と、幼齢林地内の測点C, D, H, Iの深さ別平均値をまとめたものが図-11である。この図における回帰式の勾配と

先行降雨指数との関係では、他の指数に比較して短期間に直接土中の含水比に大きな影響を与える先行降雨指数Aにおける含水比の反応が最も大きく、先行降雨指数B、Cではほとんど差異はみられない。また回帰式の勾配を深さ別に考察してみると、一降雨における含水比の変化の場合と同様に、壮齢林地では深さ45cm程度までが降雨量に反応するのに対し、幼齢林地では深さ65cm程度までが影響範囲と考えられる。また先行降雨指数Aにおいて、壮齢林地、幼齢林地とも深さ5cmで勾配が小さいのは地面蒸発の影響が考えられ、とくに幼齢林地では顕著である。

次いで回帰式の相関係数について、勾配と同様にまとめたものが図-12である。相関係数については、降雨が地中へ連続的にかつ徐々に浸透していけば、各深さにおける含水比の上昇と与えられた降雨との相関関係は高くなると考えられ、降雨による浸透水が途中で貯留されるなど不連続な浸透状況を示せば、相関係数は小さくなると思われる。そこで林相別、深さ別に相

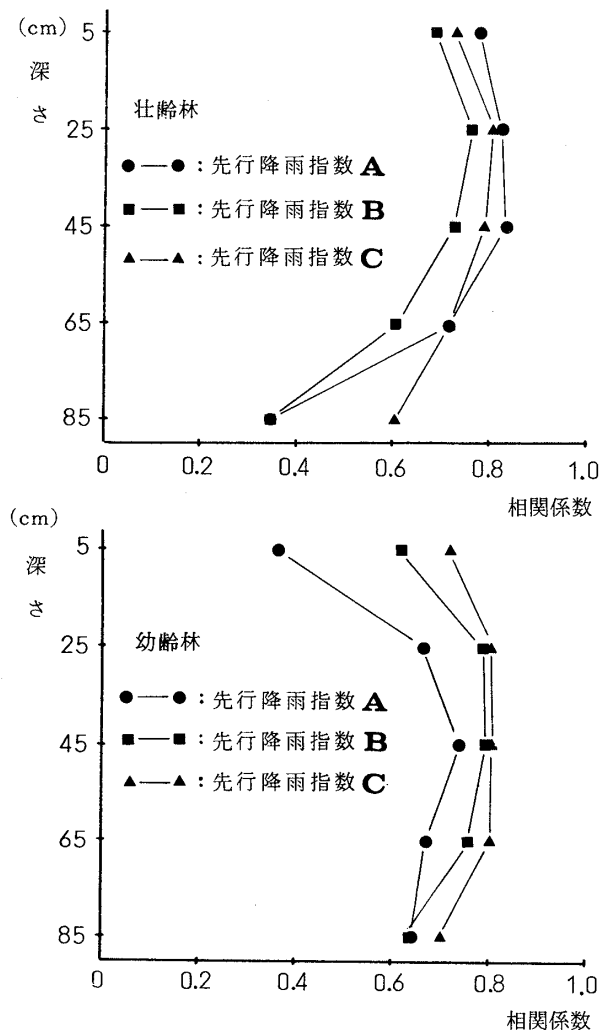


図-12 林相別、深さ別の相関係数

関係数を検討してみると、壮齢林地では深さ25、45cm付近における相関係数が大きく、深さが増すにつれて小さくなっているのに対し、幼齢林地では深さ65ないし85cmまで割合高い値を示している。このことは、降雨の影響がそれぞれの深さまで及んでいて、土中の含水比の変化と降雨量が対応していることを表わしている。

2.5 簡易注水試験による浸透のパラツキ

降雨による含水比の変化状況は測定地点の地形、土壌等の影響を受け、流域全体の平均であるとはいえない面もある。そこで表層土壌における水の浸透状況およびそのパラツキを林相別に把握するため、1981年に壮齢林地および幼齢林地において各50点ずつを対象にして簡易注水試験を行った。

実験方法は、内径5cm、深さ5cmの円筒(100cc)を半分程度土中に挿入し、この円筒を通して100ccずつ水を注入して水が浸透し終るまでの時間を計測した。この操作を連続して行い、浸透時間が一定となった時点で注水を終了した。このような実験方法では浸透能を求めることはできないが、壮齢林地と幼齢林地における相対的な水の浸透状況を比較することはできると考え、この実験方法を採用した。その結果、各測点において100ccの水が浸透するのに要する時間の一定値を階級値ごとにまとめ、それを出現頻度として表わしたものが図-13である。

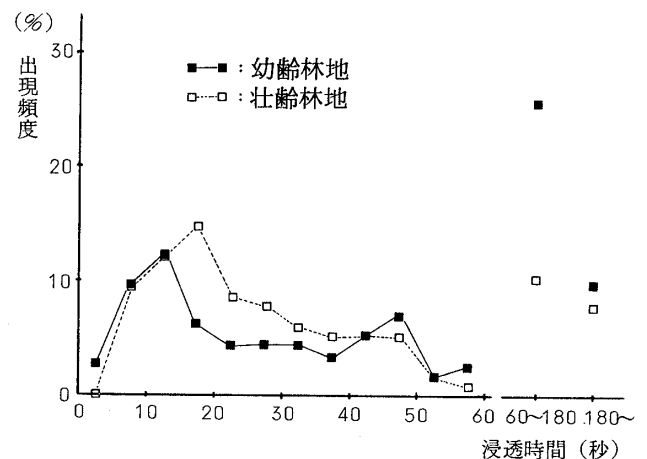


図-13 林相別の浸透速度分布

全体的にみれば、一定となった最終浸透時間が1分以内である個所数は幼齢林地に比較して壮齢林地で多く、曲線のピークにも両者に幾分のずれがある。1分以上3分未満の範囲での出現頻度は逆に幼齢林地で大きな値を示している。これらの傾向は、幼齢林地では壮齢林地に比較して水の浸透の良好な地点と不良な地

点のバラツキが大きいことを表わしている。

3. 人工注水による水の浸透状況

3.1 実験地および実験方法

自然降雨による土壌含水比の時間的変化の各先行降雨指数に対する反応状況について、深さにより壮齡林地域と幼齡林地域ではかなりの差異がみられた。これらの結果に基づき、1982年10月に林相別の相対的な水の浸透状況について現地実験を試みた。

実験地は愛知県北設楽郡稲武町の民有林であり、標高は920～940m、地質は深層風化を受けた先新生代の両雲母花崗岩である。実験地の地形はいずれも北向き斜面で、傾斜は36°である。

実験地の林相は、a), スギおよびヒノキの約100年生の森林が1979年に伐採され、翌年にスギが植栽されている幼齡林、b), a)に隣接するスギ21年生の壮齡林(壮齡林A)、c), ヒノキ75年生の母樹林(壮齡林B)の3種類であり、各実験地において、約7×7mの範囲内で位置、深さともランダムに土壌水分測定用感体を9本ずつ計27本埋設し、その埋設深は14～62cmの範囲である。幼齡林および壮齡林A地域の土壌は、深さ25cm程度までがA層であり、以下65cm程度までがB層で構成されている。また壮齡林B地域では、深さ50cm程度までがA層であり、以下B層となっている。

実験方法は図-14に示したように、斜面に垂直方向

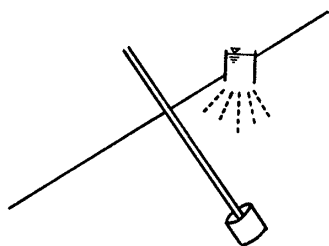


図-14 注水による浸透実験

に感体を埋設し、受感部の直上に設置した内径10cmの円筒に毎分100ccずつ10分間注水した。各注水における100ccの水の浸透に要する時間は回を重ねるごとに徐々に増加するが、注水開始数分後にはほぼ一定となり、多くの測点では1分以内に地中へ浸透していた。感体の水分測定は、注水開始後11分間は30秒毎、その後は1分毎に計20分間行い、測定値は感体較正直線により含水比に換算した。埋設した各感体の注水による含水比変化状況測定は期日を変えて2回ずつ行った。

この種の実験において、地表面から注水した水は下方へ浸透するもの他に横方向へも移動するため、浸

透率そのものの計測ではないが、林相別、深さ別に同じ条件で実験すれば、相対的な下方への水の移動状況を比較することができると考えられる。

3.2 人工注水による土中の含水比変化

注水による含水比変化状況測定結果について、代表的なものを例示すると図-15～17である。

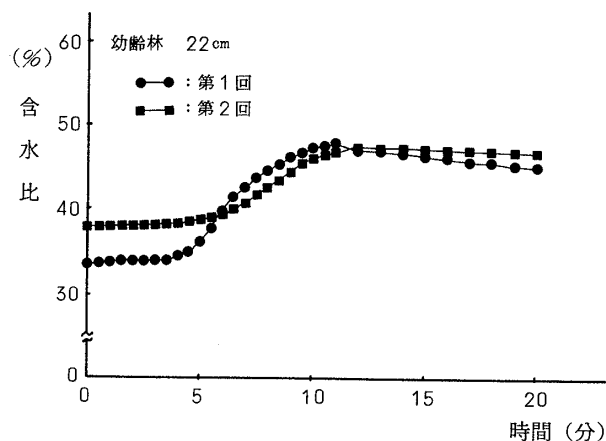


図-15 注水による含水比変化状況(I)

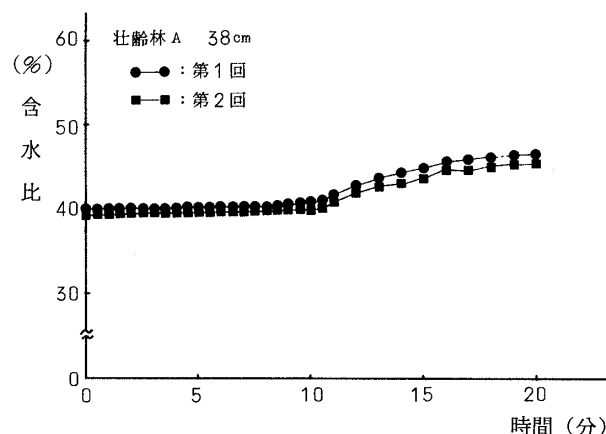


図-16 注水による含水比変化状況(II)

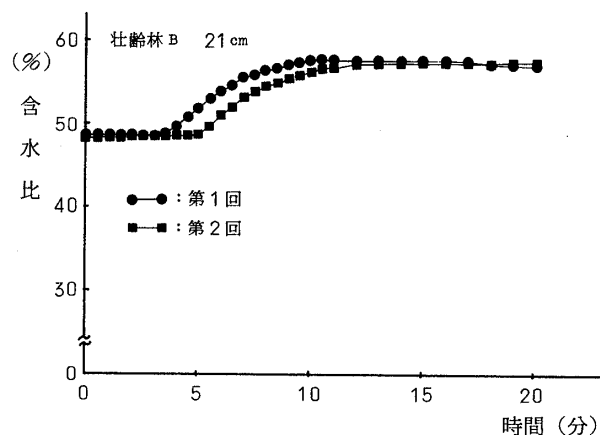


図-17 注水による含水比変化状況(III)

図-15は割合早い時期に含水比の上昇が始まり、初期含水比に比較して数分間に10~15%の上昇がみられ、しかも含水比上昇割合が大きく、注水終了後の含水比減少も大きくなっている。この変化状況より浸透水の動きを推察すると、土壌表面より注入した水がA層内を速く移動し、注水停止直後に測定地点の含水比がピークを迎え、注水終了により上部からの水の供給がなくなるため、徐々に減少していくタイプであると考えられる。

図-16は注水開始後10分前後より含水比の上昇がみられるものの上昇割合が小さく、20分経過後も、徐々にではあるが含水比の上昇が続いているタイプである。このタイプは表層土壌内に水が貯留されることなどにより水の移動が遅く、注水終了後も徐々に下方へ移動しているものと推定される。

図-17は早い時期に含水比の上昇がみられるが、上昇割合は10%未満と割合小さく、注水終了後の減少は非常に小さい。この変化状況によると、浸潤前線の到達時間からみた水の移動速度は割合速いが、途中で貯留されるため、感体への浸透水量はそれほど多くないと考えられる。

これらの含水比変化曲線における含水比上昇開始時間および含水比上昇率について、林相別に深さとの関係をまとめた。ただし、対象とした測定結果は、注水において10回とも1分以内に100ccの水が土中に浸透したものだけであり、幼齡林は延10地点、壮齡林A 7地点および壮齡林B 5地点の計延22地点である。

含水比上昇開始時間、すなわち浸透水到達時間については、ある測定時間の含水比と次のそれを比較して0.2%以上の上昇があった場合を上昇開始時間とした。この上昇開始時間を横軸に、埋設深さを縦軸にとって林相別にプロットし、さらに最小自乗法により求めた回帰曲線を図示したものが図-18である。

回帰曲線を求めるにあたっては、浸潤中に土壌体積変化のない場合、水の浸潤前線の到達距離は到達時間の平方根に比例する³⁾といわれているため、これを参考にして深さと到達時間との関係を次式で近似した。

$$y = \alpha t^\beta$$

ただし、 y は到達深さ、 t は到達時間、 α 、 β は定数である。

その結果、いずれの林相においても相関係数0.9以上の高い相関がみられ、 β も1/2~2/3という値が得られた。

これらの結果より水の到達深さと到達時間との関係を検討してみると、深さ14~40cmの範囲内では、当然のことながら深さが増すにつれて注水による浸透水が

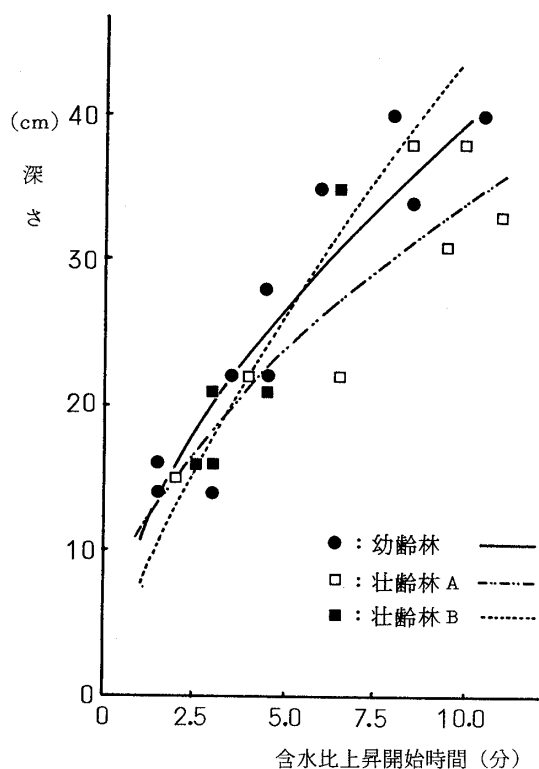


図-18 注水による含水比上昇開始時間

到達する時間は遅くなり、深さ20cm未満では2~3分で含水比が上昇し始め、深さ40cm程度でも10分前後で反応が現われる。林相別に考察を加えると、浅い層での浸透水到達時間にはそれほど差はないが、深くなるに従って壮齡林B地域で速く、次いで幼齡林地域となっている。ただ、壮齡林B地域での測定数が少なく、信頼度には疑問が残っている。

次に深さ別にみた水の浸透量については、ある一定時間内の含水比上昇率をとり、林相別に深さとの関係で調べてみた。含水比上昇率としては、含水比変化曲線における任意の3分間の平均上昇率をとり、この値を横軸に、深さを縦軸にとって林相別に示し、さらに回帰直線を図示したものが図-19である。

図-19にみられるように、一定時間内に一定量の水を浸透させた場合、全体的な傾向として土壌深の大きい地点での含水比上昇率が小さくなっている。林相別にみても、最も上昇率が高いのが幼齡林地域であり、壮齡林地域ではいずれも小さくなっている。

以上の結果より、水の浸透速度、浸透量について、幼齡林地域では壮齡林地域に比較して一般的に大きな値を示している。この原因としては、壮齡林地域では厚いA₀層内および団粒構造を形成しているA層内に一時的に水分が貯留されるのに対し、幼齡林地域では伐採に伴う落葉落枝の供給中断および微気象の変化に

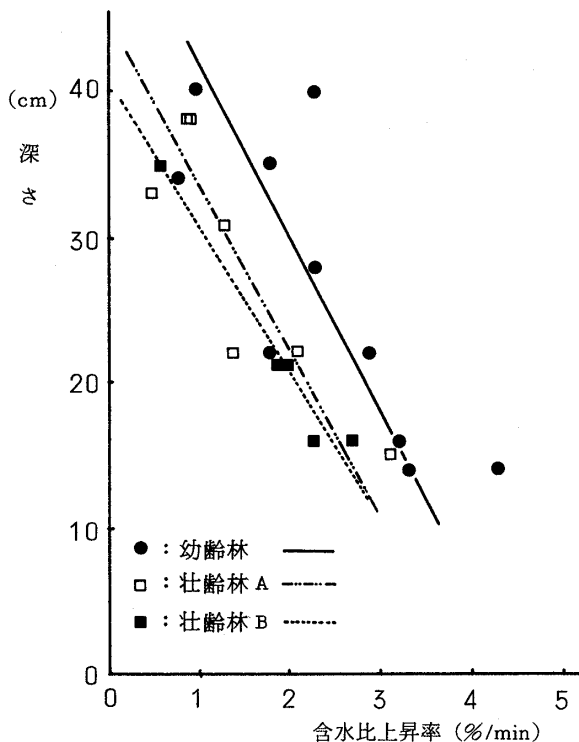


図-19 注水による含水比上昇率

より、変質を受けた A_0 層あるいは一部団粒構造が破壊されているであろう A 層内で貯留される量が少なく、より深い層まで水が浸透し易くなっているのではないかと推察される。

4. 表層土壌の孔隙

不飽和土壌中の水の浸透に関する大きな支配因子としては、土壌の孔隙量および孔隙の大きさ分布がある。そこで表層土壌において、伐採の影響を強く受け、その結果、水の浸透に多大の影響を及ぼしていると考えられる A 層上部の孔隙について調査した。

調査方法は図-1に示した調査地において、深さ10 cmの位置から100 cc採土円筒を用いて林相別に10地点の試料を採取し、実容積測定装置により孔隙比を求め、さらにpF測定装置により孔隙の大きさ別の量的分布を求めた。

林相別にみた孔隙比の平均値および標準偏差は、壮齡林地で 1.49 ± 0.19 、幼齡林地で 1.46 ± 0.37 であった。また孔隙の大きさ別に孔隙量およびそれぞれの百分率の平均値および標準偏差を図示したものが図-20である。

孔隙比については、その平均値では林相別に大きな違いはないが、標準偏差ではかなりの差異がみられた。また図-20で示された孔隙の大きさ分布でも、幼齡林地における標準偏差が壮齡林のそれに比較して大きい

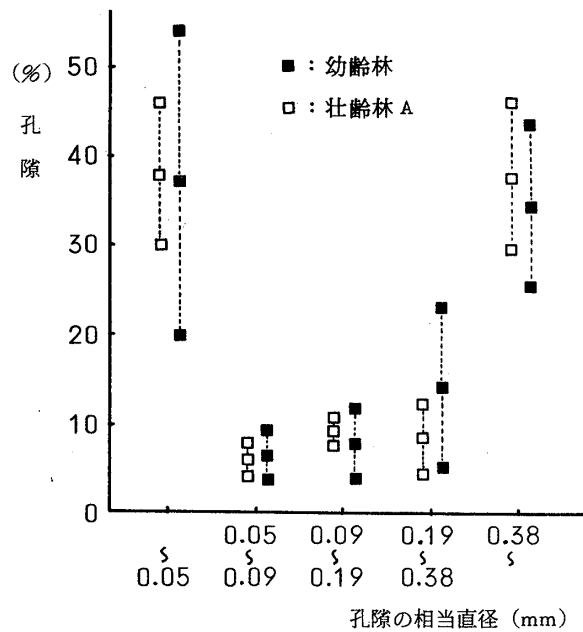


図-20 林相別の孔隙分布

という結果が得られた。

これらの結果より、平均的な孔隙量あるいはその大きさ分布には大きな差異はみられないものの、個々の地点でみた場合、幼齡林地では透水性の良好な地点と不良な地点があり、水の浸透に適した孔隙網に添って浸透水が地中へ供給され易くなっているものと推察され、2.5の項で述べた簡易注水試験結果とも適合すると思われる。

5. まとめ

森林が伐採されれば微気象が変化し、落葉落枝の供給がなくなることなどの影響を受けて表層土壌に変質が起こることが考えられ、このような現象が崩壊の発生に深く関与する水の浸透に影響を与えると推察された。

森林が伐採されると、まず落葉落枝の供給が激減することにより、 A_0 層中の F_2 層および H 層の存在率が減少し、それに伴って A 層への有機物の供給が少なくなる。また気温、地中温度の上昇、湿度の減少による表層土壌の変質も行われる。このような伐採の影響が水の浸透にどのような影響を与えているかを調べるため、自然降雨に基く土中の含水比の変化を林相別、土中深さ別に現地調査を行った。その結果、自然降雨の影響範囲としては、壮齡林地域では割合浅い層にとどまっているのに対し、幼齡林地域ではさらに深い層にまで及んでいるという結果が得られた。この原因としては、上記の A_0 層を含めた表層土壌の変質の結果、孔隙の分布に変化が起り、浸透のより良好な地点と

不良な地点ができるため、同じ降雨でもその浸透水が幼齢林地域では壮齢林地域に比較してより深い層にまで到達していることが推察された。また林相別に人工注水による土中の含水比変化を現地実験によって求めたところ、深さ毎の含水比の変化についても、幼齢林地域では壮齢林地域に比較して浸潤前線が速く移動し、また浸透量も多いと判断された。

6. 結 語

崩壊発生に関係する浸透水の動き、とくに不飽和土中の水の動きに関しては、供給される降雨量、表層土壌の初期含水比、孔隙の大きさ、その分布、さらに土層の厚さ分布など影響因子が多く、また室内実験、現地実験および自然現象としての土中水の動きなどの間にはまだ大きなギャップがあり、数多くの課題を含ん

でいるので、今後もさらに多くのデータの積み重ねが必要であろうと考えている。

参 考 文 献

- 1) 林野庁監修：治山調査法，千代田出版， p. 313, 1970
- 2) 片岡 順・竹田泰雄・飯田 修・木村時政：森林の伐採による土砂生産変化の評価，第17回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集， pp. 763～764, 1980
- 3) R. N. ヤング・B. P. ワーケンチン著，山内豊聡・竹中肇・東山 勇・前田 隆監訳：土質工学の基礎，鹿島出版会， pp. 86～87, 1978
- 4) 岩元 賢・村上公久・梁瀬秀雄：山地斜面における土壌水分と土層の変動について，第91回日本林学会大会発表論文集， pp. 399～401, 1980

(1983年11月5日受理)