

28. スギ人工林の土壌水分保持特性に及ぼす間伐の効果に関する現地比較観測

鈴木 貴幸^{1*}・篠田 成郎²・児島 利治³・渡邊 信剛¹・神谷 浩二⁴

¹岐阜大学大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

²岐阜大学総合情報メディアセンター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

³岐阜大学流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

⁴岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

* E-mail: suzumura@green.gifu-u.ac.jp

森林施業としての間伐が、木材生産のための手段だけでなく、水源涵養機能、土砂流出抑制機能などの多様な森林の公益的機能に及ぼす影響として、適正に評価されるべきであるとの観点から、人工林における間伐の有無による林床土壌水分保持特性の相違が岐阜県郡上市内のスギ林分での3年間にわたる比較観測から検討された。間伐実施済林と間伐未実施林における気象・水文観測データを比較解析した結果、林内環境の相違は、樹冠上部の構造上の違いに起因する光環境と水収支において顕著に表れることが示された。また、土壌の体積含水率および粒度分布の比較から、間伐実施済林では細かい土粒子が多いために毛管作用による土壌中の水分保持能力が高いのに対し、間伐未実施林では細粒土砂の減少により水分を保持できず土壌水分量が小さくなっていることが明らかにされた。

Key Words : *forested mountainous watershed, water balance, fine soil particle, comparative field observation, soil infiltration*

1. 緒言

近年、第二次世界大戦後の拡大造林政策により植林されたスギやヒノキの人工林が、輸入材の価格低下や林業従事者の減少などの理由により放置されている。放置人工林では、樹木1本あたりの受光面積が減少し、良質な木材を確保できなくなるため、莫大な補助金を投入することにより、間伐が進められてきた。しかし、林業の抱える構造的な問題などから、その効果はあまり上がっていない。このため、林野庁は2009年12月に森林・林業再生プランを掲げ、10年後の木材自給率を50%以上とする目標を定めた。このプランやこれを推進するための様々な取り組みの中では、これまでの補助金投入による画一的な間伐実施という施策展開を見直し、木材生産・利用の仕組みやこれを支える人材育成方法などを抜本的に改革しようとしている。

我が国の森林を再生するためには、林業そのものの改革なくしては実現できないという森林・林業再生プランの考え方は理にかなっている。しかしながら、そこでは森林の資源として木材だけが着目されており、森林の持

つ様々な機能を高めることにはあまり触れられていない。これは、炭素固定、水源涵養、土砂流出抑制などの森林が有する公益的環境保全機能の評価方法が定まっていないことが原因である。森林による炭素固定機能については、温暖化抑制施策の一環として各所で研究が進められている。一方、水や土砂の流出に及ぼす人工林放置の影響については、恩田ら¹⁾による研究プロジェクトなどで精力的な検討が行われ、クラストの発生による表面流発生や微細土粒子の流出などのメカニズムが解明されている。しかし、その主な対象が腐植土層(A₀層やA層)が流失してしまったような手遅れの放置人工林であるため、下層植生による樹冠滴下雨の衝撃緩和に寄与するとして間伐の効果が示されている。確かにこうした末期的な放置人工林は少なからず存在しているが、腐植土層が残存し、手遅れになる直前の林分の方がはるかに多く、林床腐植土層での水分状態と間伐との関係を明らかにすることも重要と考えられる。とくに、拡大造林により植林された人工林が40年生以上になってきた現在において、人工林での水収支特性に大きな変化が生じてきているため、水環境に対する間伐の効果を検討することが必要になっ

てきていると大原²⁾は指摘している。また、「緑のダム」という言葉が一般に使われるようになって久しいが、森林域において、どの程度の降水が貯留できるのかについては、降雨流出解析の中でしか検討されてきておらず、間伐の有無などの人工林の状態によってどのような相違が存在するのかについては、まったく明らかになっていない。

篠田ら³⁾は、木曽川水系長良川流域を対象とした検討から、森林管理と温暖化・気候変動が水収支、土砂流出、水生生物生息などの流域環境に及ぼす影響を定性的に明らかにした。また、この結果に基づき、守利ら⁴⁾は、林床土壌の乾燥化と微細土砂流出プロセスとの関係を検討している。これらの一連の研究より、森林管理としての間伐は、水環境の面から見ると、蒸散による林床土壌の乾燥化を防ぐとともに、短時間の大規模降雨時に発生する土砂流出を抑制する効果があることがわかってきた。このため、温暖化による気温上昇・蒸散量増大や気候変動に伴う豪雨多発は、放置人工林において、降雨流出を早め、土砂流出を顕著にする可能性を高めていることが予想される。ただし、これらの検討では、長良川の上流森林域からの流出に関するデータに基づいているため、実際の森林域において、こうした特徴が実際に現れているのか否かについて明らかにすることが必要となっている。

そこで本研究では、間伐の有無による林床土壌の乾燥状態、すなわち土壌水分状態の相違やその原因を明らかにするため、代表的な人工林であるスギ林を対象とした現地観測により検討する。具体的には、間伐実施の有無以外についてほぼ同条件とみなせる2つのスギ人工林を観測対象として、それぞれの土壌水分、浸透および粒度分布に関する特性を比較することにより、間伐の効果を明らかにする。

2. 現地観測の概要

(1) 観測サイトの選定

林分は、樹種、林齢、地形、表層土壌、地質等によって特徴づけられるが、間伐履歴以外の条件が等しい2つの林分はほとんど存在しない。間伐や伐出などの施業は、土地所有者を集め（集約化）、経済性を勘案して行われるため、条件が整えば間伐可能である反面、条件が整わなければ放置される。大学や研究機関の演習林などであれば、こうした比較林分を用意することが可能であるかもしれないが、間伐の有無による比較という発想そのものが存在しなかった。本研究では、間伐履歴以外の条件がほぼ同一と見なせる隣接する2つのスギ林分（それぞ

れ30haほど；郡上市古道市有林）を観測サイトとした。

表-1は2つの林分の特徴を比較したものであり、間伐未実施林を“Site-L”，間伐実施済林を“Site-T”と表記している。間伐実施済林（Site-T）では、1993年、1998年および2003年と5年ごとに間伐が行われているのに対し、間伐未実施林（Site-L）では、1993年を最後にそれ以降の間伐が行われずに放置されている。いずれも3割間伐が実施されていたため、間伐実施済林（Site-T）の立木密度は間伐未実施林（Site-L）の半分ほどとなっている。また、腐植土層厚は林内の場所ごとで大きく異なるが、表中には、谷筋と尾根筋を除いた斜面中腹付近でのFおよびH層およびA層の厚さを記載してある。一般に、有機物層のA₀層は、落葉落枝（リター）の堆積したL層、植物組織の見える粗腐植状態のF層および植物組織の见えない腐食状態のH層で構成され、A層は腐植の入った鉱物質から成る表層土壌として定義される。観測対象林分（Site-TおよびSite-L）内には、空間的ばらつきはあるものの、数cmの厚さで腐植していないリターが堆積していたため、これを排除して現れるF層の上端部を地表面として扱い、腐植の入ったF、HおよびA層を腐植土層として検討対象とする。間伐未実施林（Site-L）での平均的な腐植土層厚は、FおよびH層とA層を併せて約15cmであり、間伐実施済林（Site-T）でのFおよびH層とA層の合計厚さ約30cmに比べれば小さいものの、近年問題となっている手遅れ人工林のような腐植土や表層土が流亡してしまった林分に比べれば、まだなお良好な状態と判断できる。本研究では、間伐の有無による土壌水分の違いに着目するため、このような腐植土層の残存している林分を検討対象としている。なお、これらはスギだけで構成される単層林であるが、林齢に8年の差がある。渡邉ら⁵⁾によれば、林分内の樹木の生長における最大支配要因は樹木配置の空間構造であるため、ここでは、48

表-1 間伐未実施林（Site-L）と間伐実施済林（Site-T）の比較

項目	Site-L	Site-T
樹種	スギ	スギ
林齢（2010年現在）	48年生	40年生
最終間伐年	1993年	2003年
立木密度	0.089 本/m ²	0.053 本/m ²
最高標高	960m	960m
最低標高	800m	800m
斜面方位	西	西
林地傾斜	20° ～ 25°	20° ～ 25°
土壌型	BL	BL
FおよびH層厚	5 ～ 20 cm	10 ～ 30 cm
A層厚	0 ～ 10 cm	0 ～ 10 cm
地質型	新第三紀層	新第三紀層

年生と40年生では大きな違いとはならないと判断することとする。

(2) 観測内容と測点

間伐の有無による森林環境の相違を明らかにするため、間伐実施済林 (Site-T) と間伐未実施林 (Site-L) の各1箇所において、気象・水文諸量 (気温、相対湿度、日射量、降雨量、地温および土壌体積含水率) の連続計測 (サンプリング間隔: 10分) を行った。これらの計測装置設置ポイントを総合観測点と呼ぶこととし、間伐実施済林 (Site-T) および間伐未実施林 (Site-L) におけるそれぞれの測点を“T1”および“L1”と記載する。なお、本論文では言及しないが、気象・水文諸量の空間的な分布状況を把握するための測点 (T2~T6およびL2~L6) も設けている。これら測点の配置状況を図-1に示す。図中の測点E1は林内の気象・水文諸量との比較のために林外に設けられた総合観測点である。これらT1とL1の総合観測点には、標高、斜面の向き、沢からの距離といった地形的な条件が同一となる場所を選定しており、上部植生による樹冠の閉塞状況およびこれに伴う下層植生の繁茂状況が異なるだけとなっている。

総合観測点では、ほぼ同一の場所でのデータと見なせるように、すべての計測器を3m四方のエリアに集中的に配置した。気温および相対湿度については、地表面より100cmの位置に設置した百葉箱の中にセンサー (ティアンドディ社製温湿度計おんどとりRH) を設置して計測を行った。また、下層植生の上部での日射量や雨量を計測できるように、日射センサー (Onset社製S-LIB-M003日射スマートセンサー) および雨量計 (池田計器製作所製転倒杓型雨量計) をそれぞれ地表面上120cmおよび160cmの高さに設置した。土壌水分計 (Onset社製土壌水分センサー; 測点T1およびL1にはS-SMB-M005, 測点E1にはS-SMC-M005) と地温計 (Onset社製地温センサーS-TMB-M006) については、雨量計や日射計などの地上設置計測器による陰やそこからの滴下雨の影響を受けないように少し離れた場所に設置した。なお、土壌水分センサーと地温センサーは、基本的には地表面下5cmの深さに埋設したが、その詳細な設置状況については後述する。こうした現地観測は2007年10月より継続的に実施されており、本論文では、2007年10月から2010年12月までの約3年間にわたるデータを対象とした検討を行う。

(3) 林内環境の相違に関する概観

総合観測点での計測結果を月平均値 (雨量については、月積算値) として図-2に示す。図中、ところどころデータが途切れている箇所は、計測器トラブルなどによる欠測期間を表す。図-2では、10分間隔のデータが1週

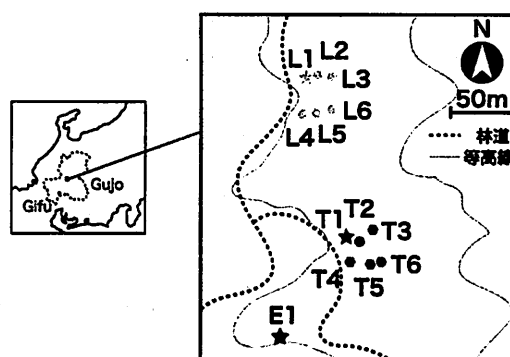


図-1 観測林分の位置と測点の配置

間以上連続して取得された月について、それらの平均値を月平均として示している。なお、1週間以上の連続データではなく、2週間以上や3週間以上の連続データを条件としたケースも検討したが、季節変化や年変化の特徴に大きな相違は見られなかった。土壌水分に関する考察は後述することとして、ここでは、まず、月平均気温 $\bar{T}_a$ 、月平均相対湿度 $\bar{H}_a$ 、月平均日射量 S 、月総雨量 R および月平均地温 $\bar{T}_s$ といった林内環境について、図-2を用いながら、間伐実施済林 (Site-T) と間伐未実施林 (Site-L) との相違を大まかに考察してみる。

林内の測点T1やL1における日射量は、樹冠による日射遮断によって、測点E1に比べて小さい。また、上部植生による樹冠閉塞は、間伐実施済の測点T1に比べて間伐未実施の測点L1の方が顕著であり、これによる日射量の違いも明確に現れている。これに対して、月積算値としての月総降水量については、測点T1での雨量が測点L1および測点E1よりも小さく、樹冠遮断による効果が測点T1と測点L1とで異なる。測点L1の上部はスギの枝や葉で覆われ尽くしており、計測雨量は樹冠からの滴下雨によっている。このため、雨滴サイズや風などの降雨状況によって、測点L1での雨量計で計測される雨量に変動が発生しやすくなっていると考えられる。この問題を検討するため、測点T1とL1において、それぞれ3個の漏斗付き雨水採取ボトル (漏斗直径300mm, ボトル容量20L) を雨量計の周囲 (雨量計から2mの場所) に設置 (雨量計位置を重心とする正三角形の各頂点上に雨水採取ボトルを配置) し、雨量計と雨水ボトルによる2~3週間ごとの積算雨量を比較した。測点T1での雨量計は周囲の雨量に比べて数%少ないものの、両者はほぼ定常的に等しく、測点T1付近では、樹冠がある程度開放しているために、直達雨と樹冠滴下雨の和としての林内雨の構成条件が大きく変動することは少ないと考えられる。図-2では、林外の測点E1に比べ、ほぼ一定の減少割合で林内測点T1での雨量が現れていることから、樹冠滴下雨による林内雨量の変動は少なく、いつも同じ程度の樹冠遮断率で林内に雨量が供給されていると判断でき

る。一方、測点L1での雨量計は雨水ボトルに比べ十数%多い雨量を示す傾向にあるとともに、この割合は測点T1に比べて大きく変動していることがわかった。このことは、測点L1では、樹冠滴下雨の空間的不均一性と空間分布の時間的変動が顕著となっていることを示している。このため、全期間を通じて見れば、概ね $R_{E1} > R_{T1} > R_{L1}$ (R_p : 測点pでの月総降水量) となっているものの、測点L1での変動幅が大きいので、単純な方法による補正は困難と判断し、ここでは、雨量計によって得られたデータを各測点での雨量として扱うことにする。

一方、間伐実施済林 (Site-T) では下層植生が繁茂しているのに対し、間伐未実施林 (Site-L) ではごくわずかであり、下層植生の違いやこれに伴う林床地表面の露出状況の違いによって、測点T1と測点L1での気温、湿度および地温には特徴的な相違が現れることが予想される。しかしながら、図-2で示される気温、湿度および地温の月平均値は、林外測点E1と林内測点T1およびL1との相違は顕著であるものの、測点T1と測点L1との差は小さく、樹冠による閉塞状況の違いに起因する下層植生有無の影響はほとんど現れていない。図としては示さな

いが、これと同様に、10分ごとの変化や日変化などにおいても、日射に伴う林内気温の違いがわずかに存在する以外は、大きな相違は認められていない。これらの差が少ないということは、林床地表面からの蒸発や下層植生による蒸散による熱収支および水収支にも大きな違いはないことを意味している。このため、少なくとも本観測サイトでの間伐有無による月平均で見た林内環境の相違は、樹冠上部の構造上の違い (上部植生の量の違い) に起因する光環境 (林内日射量) と水収支 (上部植生による蒸散量と降雨遮断量) に大きく現れることになっていると判断できる。

3. 土壌水分特性の相違

(1) 誘電率土壌水分センサーによる体積含水率の計測

上述のように、間伐実施済林内測点T1、間伐未実施林内測点L1および林外測点E1に土壌水分センサーを埋設することにより、土壌の体積含水率を連続的に計測し

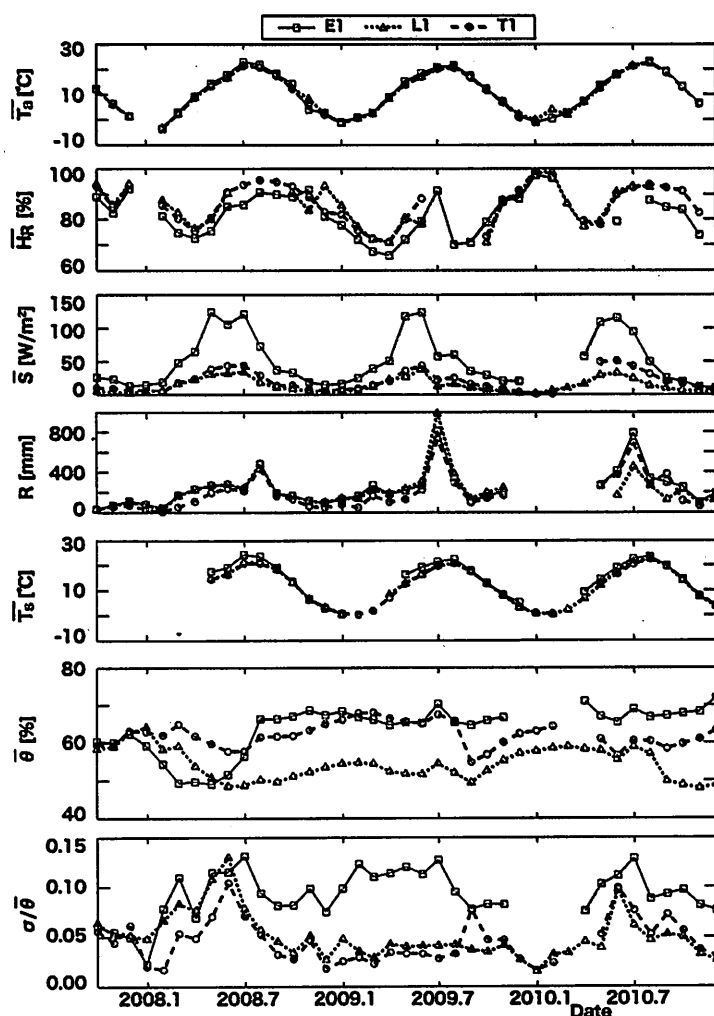


図-2 気象・水文に関わる観測記録の月別の変化

た。測点T1および測点L1には腐植土層が存在するため、センサー長が10cmの誘電率土壌水分センサー（Decagon Device社製ECH₂OセンサーEC-10にOnset社が中継ソケットを取り付けたS-SMB-M005型センサー）を用いた。林外測点E1は集材作業土場であり、表層土の赤土がむき出しとなっていたため、センサー長が5cmの同型センサー（Decagon Device社製ECH₂OセンサーEC-5で構成されるOnset社のS-SMC-M005型センサー）を埋設した。なお、各測点において、計測開始の2007年10月24日から2008年7月18日までは、センサー部がすべて地中に埋まるように鉛直方向にセンサーを差し込むことにより体積含水率を測定した。これは、地表面から10cmまで（林外測点E1では5cmまで）の平均的な土壌水分量を計測することになり、雨水の浸透過程を検討するには不適と判断されるため、2008年7月18日以降は、各測点でのセンサーを地表面下5cmの深さに水平設置した。

(2) 体積含水率の月平均値の時間変化

図-2の下から2段目は、土壌水分センサーにより計測された体積含水率の月平均値 $\bar{\theta}$ の時間変化を表す。センサーを水平設置した2008年7月以降に着目すると、間伐実施済林の測点T1に比べ、間伐未実施林の測点L1での体積含水率が極めて低くなっていることがわかる。上述のように、降雨による林床土壌への水分供給量にはそれほど大きな差は認められないため、こうした土壌水分量の違いは、土粒子間隙での水分保持状態の違いに依存していると考えられる。なお、林外測点E1での体積含水率が高くなっているのは、そこでの土壌が透水性の極めて低い赤土であるために、浸透も排水もされにくい状態であることが予想される。また、2010年5月～7月において測点T1の体積含水率が一時的に低下しているのは、その前に発生した測点T1での土壌水分計ログートラブルへの対応として、新たなセンサーを埋設する作業を行ったために、周囲の土壌を乱してしまったことが原因と思われる。

(3) 降雨に伴う体積含水率の時間変化

上述のように、間伐実施済林の測点T1は間伐未実施林の測点L1よりも月平均という比較的長期間で見た腐植土層での水分保持状態が良好であり、雨水の浸透および排水プロセスに本質的な違いが存在することが予想される。これを確かめるために、一つずつの降雨イベントごとに体積含水率の時間変化を比較検討してみた。図-3はその一部を例として示したものである。図の上段2つは測点T1および測点L1での10分間降雨量 r の時間変化を表す。また、上から3段目は各測点での体積含水率 θ の時間変化を、最下段は体積含水率の時間変化率 $d\theta/dr$ を

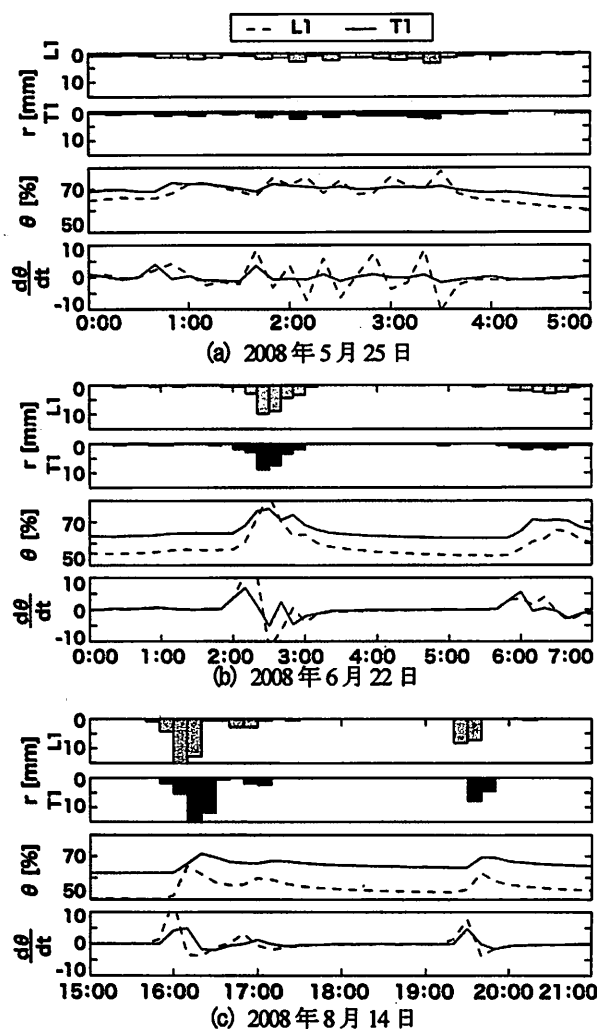


図-3 降雨に伴う土壌体積含水率の時間変化

表す。土壌中への雨水の入力としての浸透と出力としての排水は同時に発生しているので、 $d\theta/dr$ が正であれば排水量に比べて浸透量が大きく、ゼロであれば両者が等しく、負であれば排水量が浸透量よりも小さいと判断できる。

図-3(a)は、数mmの小雨が5時間ほど連続して続いたときの典型的な土壌水分の変化状況を表している。間伐未実施林の測点L1では、降雨の微小な変動に対応して体積含水率が小刻みに変化しているのに対し、間伐実施済林の測点T1では、体積含水率の時間変化は緩やかであり、降雨末期にも測点L1ほどの体積含水率の低下は見られない。こうした傾向は、体積含水率の時間変化率においてより顕著に表れており、測点L1では降雨とともに浸透量と排水量の大小関係が交互に入れ替わって繰り返される反面、測点T1では浸透量・排水量がほぼバランスしており、極めてゆっくりと体積含水率が変化していることがわかる。

図-3(b)は、1時間ほどの間にまとまった降雨が発生したケースであり、いずれの測点においても降雨の発生とともに体積含水率が上昇し、降雨終了に合わせて体積含

水率も減少している。ただし、体積含水率の時間変化には両者に大きな違いが見られる。間伐未実施林の測点L1では、降雨の発生と同時に急激な浸透が起り、降雨のピークを過ぎるとすぐに排水量が卓越する過程に転じている。これに対して、間伐実施済林の測点T1では、測点L1ほどの急激な浸透量・排水量の大小転換は起きていない。図-3(c)では、(b)のケースよりもさらに大きな降雨が発生した場合であり、間伐未実施林の測点L1では、降雨開始20分で急激な浸透量の卓越を示している。一方、間伐実施済林の測点T1では、時間雨量40mmほどの大きな雨水供給があつたにもかかわらず、すぐに排水量が卓越することなく、3時間以上かけてゆっくりとした体積含水率の低減を示しており、高い保水能力を有していると判断できる。

これらの結果より、間伐未実施林の測点L1付近の土壤は降雨に伴う土壤水分の変化が極めて大きく、土壤中に水分を保持しにくい状態になっているのに対し、間伐実施済林の測点T1では土壤中での水分量変化が遅く、保水力が高いという特徴を有することがわかる。なお、これについてさらに明確にするため、原位置での浸透実験も実施したが、これにより得られた透水係数に関しては、それだけで大きなテーマとなるため、別の機会に議論することとする。

(4) 体積含水率の変動係数の時間変化

図-3に示した降雨に伴う体積含水率の時間変化は土壤水分の保持特性（保水性）に対応しており、保水性が低い場合ほど、大きな変動を示す。そこで、体積含水率の月ごとの変動係数（＝標準偏差 σ /平均値 $\bar{\theta}$ ）を用いて、こうした変動の大小を評価してみることとする。図-2の最下段は、各測点におけるこうした体積含水率の月別変動係数の時間変化を表したものである。2009年9月以降に逆転する月が認められるものの、全体的には間伐実施済林の測点T1に比べて間伐未実施林の測点L1の方が大きな変動係数を示している。このことは、測点T1付近の土壤の方が、測点L1に比べて水分保持によるゆっくりとした土壤水分変化を実現できていることを示していると考えられる。なお、2007年10月の観測開始以来、3週間に1回のペースで現地観測を実施し続けた結果として、観測開始から2年ほど経過した2009年秋頃から次第に土壤の踏み固め効果が現れてしまったために、両測点の差が顕著にならなくなったと思われる。

4. 土壤の粒度分布特性の相違

土壤の水分保持特性は、土壤そのものの物理的・化学

的性質に依存する。本観測対象林分での林床土壤は母材としての無機質土壤にリターの腐植分解によって生成された有機質土壤が加わって構成される黒色土壤であり、化学的な組成としては間伐未実施林と間伐実施済林において大きな相違は存在しないと考えられる。物理的に見れば、不飽和土壤中での水分保持は、主として土粒子間隙での毛細管現象に起因し、毛管作用は土粒子の粒径や形状に依存する。そこで、土壤の物理的な性質の違いとして土粒子の粒径に着目し、両林分での土粒子の粒径分布について比較・検討してみることとする。なお、本現地観測では、測点T1やL1のみならず、総合観測点以外でも土壤サンプルを採取しているが、本論文では、総合観測点相互の比較に焦点を絞って検討することとしているため、測点T1および測点L1での土壤の粒径分布について考察することにする。

(1) 土の粒度試験

一般的に土壤構成の季節変化は認識されていないが、リターの腐植分解は季節的に変化するとともに、図-2に示した土壤水分にも季節変化は認められるため、土粒子の大きさが季節的に変わることも否定できない。そこで、季節ごとの土壤構成状況の違いを平均化できるようにするために、2007年11月、2008年10月、12月、2009年5月、7月および8月の6回にわたり、林床土壤のサンプリングを行った。ただし、実際にこれらを調べたところ、粒度分布（構成）において季節変動はほとんど認められず、むしろサンプリング場所による違いの方が顕著となることがわかった。土壤サンプリングには、ステンレス鋼製コアサンプラー（内径50mm、高さ51mmの円筒）を用い、測点T1および測点L1の近傍（土壤水分センサー設置位置から1.5m以内の場所）3カ所で土壤を採取した。この際、地表面にコアサンプラーを差し込むことにより土壤サンプルを得ているので、地表から地表面下約5cmまでの土壤（主にFおよびH層）を分析対象としていることになる。なお、観測当初（2007～2008年前半頃）は、内径56mmの塩ビパイプによる土壤サンプリングを併せて行い、沈降分析に必要な土量を採取していたが、複数箇所から得られる粒度分布の平均と土壤サンプルの混合による粒度分布がほぼ一致したことに加え、土壤水分センサーの周辺林床を攪乱する面積が増えることを避けるために、上記のコアサンプラーによる少量サンプリングを採用することとした。このため、1回の観測につき各測点の周囲3カ所（土壤水分センサー設置箇所から半径約1m以内の場所）で採取した土壤サンプルを混合することで得られる3箇所の平均的な粒度分布を求めることにした。こうして得られた土壤サンプルに対して、土の粒度試験（JIS A 1024）を行い、粒度分布としての粒径加

積曲線を求めた。

(2) 粒径加積曲線

6回分の土壌サンプルから粒径加積曲線を求め、測点ごとに平均した結果を図-4に示す。図中には、それぞれの粒径割合のばらつきを表すために、標準偏差をエラーバーで示してある。0.1mmより小さな細粒分において土壌サンプルごとの変動が大きく現れているものの、全体を通した平均的な粒度分布としては、間伐未実施林の測点L1に比べ、間伐実施済林の測点T1の方が細粒分が多くなっていることがわかる。

大小の粒径存在割合を表す均等係数 U_c および細粒分の粒子存在割合を表す曲率係数 U'_c に関する測点T1と測点L1の比較を表-2に示す。均等係数 U_c および曲率係数 U'_c は次式で定義される土壌特性パラメータ^{7, 8)}である。

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$U'_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}} \cdot D_{60} \quad (2)$$

ここに、 D_p ： p %粒径である。均等係数 U_c が大きいほど粒径の分布幅が広く、大小様々な粒径の土粒子が均等に含まれる土壌であることに対応する。また、曲率係数 U'_c は1~3の範囲内で値が大きくなるほど細粒分の土粒子が相対的に多く含まれることを意味する。表-2では、間伐実施済林の測点T1での均等係数 U_c および曲率係数 U'_c が間伐未実施林の測点L1に比べて大きくなっている。このため、間伐実施済林では細かい粒径の土粒子が多く残存しているのに対して、間伐未実施林では細粒分が存在しにくくなっていると判断できる。

(3) 粒度分布の違いが土壌水分特性に及ぼす影響

図-4および表-2で示した粒度分布特性の違いと前述の土壌水分特性の相違との関係について考察してみる。間伐実施済林の測点T1のように細粒土砂が多く残っている場合には、土粒子の間隙が細かく、毛管作用による水分吸着が顕著になる。一方、間伐未実施林の測点L1のように細粒分が少なく、粗粒分が相対的に多い場合には、土粒子間隙が大きくなり、毛管作用による水分吸着は弱まる。土壌水分量が低下すると、守利ら^{9, 10)}が明らかにしたように、土壌乾燥化に伴う土粒子団塊の収縮形成が進行し、雨水の浸透流出に伴う微細粒径土砂の流出が顕著となる。もちろん、恩田¹¹⁾らが指摘するように、間伐が行われず放置された人工林では林内日射量が減少するために下層植生が失われ、樹冠滴下雨による落下衝撃作用による微細粒径土砂の流出が発生しやすくなることも大きな要因になるであろう。これらのプロセスにより、さらに微細粒子が少なくなるという悪循環に陥ると考え

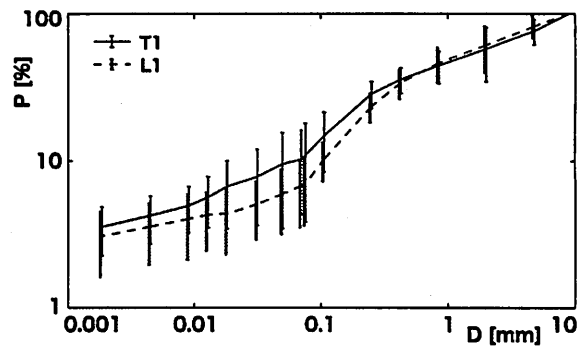


図-4 林床土壌の粒径加積曲線

表-2 間伐未実施林内測点L1と間伐実施済林内測点T1での土壌特性パラメータの比較

	測点L1	測点T1
均等係数 U_c	26.65	64.97
曲率係数 U'_c	0.97	1.60

られる。間伐未実施林では立木密度が高く、蒸散による土壌水分の大気放出量が間伐実施済林に比べ大きくなっている³⁾。このことが、間伐未実施林での土壌の乾燥化のきっかけとなっている可能性は高い。ただし、腐植土においては、微細な土粒子はリターの分解で生成される有機物質でほとんどが構成されるため、腐植分解を行う土壌微生物が活性化すれば微細粒径土粒子は回復し、土壌保水力も改善してくることが期待される。こうした予測に基づけば、間伐は樹木の生長を促すことによる木材生産性を高めるだけでなく、植生による光合成・呼吸およびこれに伴う蒸散作用を適切にコントロールすることによって森林内の水収支を適正化しつつ、土壌微生物の活動による腐植土の醸成を促すことにより、林床土壌での保水力を高める効果を発揮していると考えられる。なお、これについては、土壌微生物の活動状況、流出土砂成分および林内水収支に関するさらなる詳細な観測と解析から明らかにされるべきであろう。

5. 結語

以上、本研究では、人工林間伐の有無による林床土壌水分保持特性の相違を現地スギ林分での3年間にわたる比較観測から検討した。これにより得られた成果は次のようにまとめられる。

- ・ 間伐の有無による林内環境の相違は、樹冠上部の構造上の違いに起因する光環境と水収支において顕著に表れることがわかった。
- ・ 間伐の有無による土壌の体積含水率の比較から、土壌中での降雨浸透に伴う土壌水分変化は、間伐未実施

林において速く、間伐実施済林において緩やかであり、その結果として、間伐未実施林では土壌水分が小さく、間伐実施済林では土壌中に水分が保持されやすいことが明らかとなった。

- ・ 間伐実施済林と間伐未実施林における土壌の粒度分布の比較から、間伐実施済林では細粒分の土粒子が相対的に多く、毛管作用による水分の保持能力が高くなっていることがわかった。一方、間伐未実施林では細粒土砂が少なくなっているために、水分を保持しにくい状態となっていると判断された。
- ・ こうした観測結果に関する考察を通じて、間伐の効果は植生による蒸散作用を含めた水収支の適正化や土壌微生物の活動を基盤とする生態系維持まで及んでいる可能性も指摘することができた。

人工林の間伐は、本来、樹木の生長を促すための木材生産の一環として行われているが、水環境や生物環境の維持にも貢献していることも予想されるため、森林の公益的機能を適切に評価する上で、そのメカニズムをより詳細に解明することが重要になると考えられる。

謝辞：現地観測に際して便宜および助力をいただいた岐阜県郡上市ならびにNPO法人ウッズマンワークショップに深謝する。また、卒業研究として現地観測に携わっていただいた岡田真由美氏、鬼頭浩平氏、今井慎太郎氏、宮内貴正氏および清水宏紀氏（いずれも当時学部学生）に感謝する。なお、本研究の一部は、平成18～21年度科学研究費補助金（基盤研究(B)、課題番号：18310021、研究代表者：岐阜大学 篠田成郎教授）、平成20年度岐阜大学活性化経費（地域連携・一般、研究代表者：岐阜大学 篠田成郎教授）および平成22年度科学研究費補助金

（挑戦的萌芽研究、課題番号：22651012、研究代表者：岐阜大学 篠田成郎教授）の補助を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 恩田裕一：人工林荒廃と水・土砂流出の実態，岩波書店，pp.183-200，2008。
- 2) 大原偉樹：スギ人工林の間伐にともなう林床植生の変化と水土保全機能に関する研究の必要性，「森林総合研究所研究報告」(Bulletin of FFPRI)，Vol6，No2(No.403)，pp.127-134，2007。
- 3) 篠田成郎・守利悟朗・和田祐典・亀原 裕・山川淳平・片桐 猛：気候変動による森林流域の変化—長良川流域を対象として—，第12回地球環境シンポジウム講演論文集，pp.165-170，2004。
- 4) 守利悟朗・篠田成郎：地球温暖化による森林土壌乾燥化及び超微細土粒子融解過程のモデル化，水工学論文集，第49巻，pp.1045-1050，2005。
- 5) 守利悟朗・篠田成郎：長良川における流域特性と微細土粒子生産との関係，第13回地球環境シンポジウム講演論文集，pp.249-255，2005。
- 6) 渡邊仁志・茂木靖和：92年生スギ人工林における成長経過と現存量，岐阜県森林研究所研究報告，No.36，pp.1-7，2007。
- 7) 地盤工学会：土質試験—基本と手引き—，pp.27-38，2000。
- 8) 石原研而：土質力学，丸善，pp.8-13，2001。

(2011.4.11 受付)

(2011.7.26 受理)

The influence of thinning on soil moisture in artificial cedar forests

Takayuki SUZUMURA¹, Seirou SHINODA², Toshiharu KOJIMA³, Nobutaka WATANABE¹ and Kohji KAMIYA⁴

¹Graduate School of Engineering, Gifu University

²Information and Multimedia Center, Gifu University

³River Basin Research Center, Gifu University

⁴Faculty of Engineering, Gifu University

Soil moisture content in an artificial forest was influenced on the condition of forest management such as thinning, which is a kind of lumber production activities. The influence of thinning on soil moisture content was investigated in artificial cedar forests located in the central region of Japan. Hydrological data such as atmospheric temperature, relative humidity, insolation, precipitation, soil temperature, soil moisture and grain-size distribution of soil were obtained at two observation points; one was in the left artificial forest and another in the thinned one. The comparison between the left forest and the thinned one was made for three years. Since there were a lot of fine soil particle in the thinned forest, soil moisture as capillary water became high in comparison with the left forest. Thinning of forest decreased the amount of water loss occurred with the transpiration by plants and the soil moisture was kept.