2.4. 崩壊防止機能区分図の作成

2.4.1. 森林の崩壊防止機能区分に用いる 3 つの指標

昨年度までに以下の 3 つの指標に基づく、森林の「崩壊防止機能区分図」が作成されてきている。

(1)「林野庁手引き 2016」の評価点 P

(2) ΔC(ΣA:胸高断面積合計)

(3) Wr(土塊内に存在する根重量)

今年度は、これまでの調査で得られたデータを基に「崩壊防止機能区分図」を作成するに当たり、どの指標を用いるのが適切であるか、また、森林の「崩壊防止機能区分」を判定するための評価点算出方法や活用方法について検討を行うこととした。

以下に、各崩壊防止機能区分図での概要を示す。

(1) 手引き 2016 の P マップ

「手引き 2016」とは、林野庁の「平成 27 年度流域山地災害等対策調査(流木災害対策手法検討調査」委託事業」において作成された手引書のことで(以下「手引き 2016」という)、この手引き 2016 に記載の、北原の ΔC 研究成果に基づき設定された評価点の配点表(表 2.14)および森林の土砂崩壊防止機能区分判定表(表 2.15)を用いて、樹種評価点 $P1$、立木密度評価点 $P2$、胸高直径評価点 $P3$ をそれぞれ算出し、総合評価点 $P1=P1\times P2\times P3$ から、森林の土砂崩壊防止機能区分 a-d の評価を行うものである。計算は、20m グリッドまたは小班単位で行う。

表 2.14　評価点 P1、 P2、 P3 の配点表 (手引き 2016 より)

樹種(P1)		立木密度(P2)			胸高直径(P3)	
区分	点数	本数 (本/ha)	点数		胸高直径 (cm)	点数
			針葉樹人工林	針葉樹人工林以外		
A (参考樹種:スギ、針・広天然生林)	1.6	400～600	0.5	0.5	10～15	0.2
		600～800	0.8	0.8	15～20	0.5
B (参考樹種:ヒノキ、広葉樹二次林)	1.2	800～1,600	1.0	1.0	20～25	1.0
		1,600～1,800	0.7	1.0	25～30	1.9
C (参考樹種:マツ類)	0.8	1,800～2,000	0.4	1.0	30～35	3.0
					35～40	4.4

表 2.15　森林の土砂崩壊防止機能区分判定表

森林の土砂崩壊防止機能区分	点P	色区分
a	～0.3	
b	0.3～0.8	
c	0.8～1.3	
d	1.3以上	

(2) ΔC(ΣA：胸高断面積合計)

(1)の「崩壊防止区分図」と同様、ΔC を指標とする区分図であるが、評価点 P ではなく、グリッド毎の胸高直径、立木密度より算出した胸高断面積合計(ΣA(m²/ha))をもとに、北原がとりまとめた次の簡易式を用いて ΔC を直接推計する方法である。

$$\Delta C = a'(\Sigma A)^{1.4}$$

(樹種別係数 a': ヒノキ 0.0322、スギ 0.0384、広葉樹 0.0193)

(3) Wr(根重量)

Wr は根重量を指標とするもので、まず、グリッド内の平均胸高直径を基に苅住の単木の現存量式を用いて、単木の根重量(乾重 kg)を算定する。次に、根重量[kg/本]に立木密度を乗じて、単位面積当たりの根重量 Wr [kg/m²]をグリッドごとに算出するものである。

表 2.16　単木の胸高直径と地下部重の関係(苅住、2010)

	スギ	ヒノキ	アカマツ	カラマツ
測定個数	180	61	141	118
係数 a	29.0955	51.4377	82.5245	40.6171
係数 b	2.3015	2.1493	1.8922	2.2251
相関係数	0.90	0.91	0.92	0.94

係数 a, b は、回帰式 $y=ax^b$ を適用した際の係数。y：地下部重量 [g]、x：胸高直径 [cm]

2.4.2. 令和 2 年度調査で作成された森林の崩壊防止機能区分図

図 2.119 は、昨年度の本業務において、LP データ解析により算出した樹種、樹高、立木密度、胸高直径等の情報を基に、上記 3 つの指標を用いて生成した、広島県野路山国有林地の崩壊防止機能区分図である。

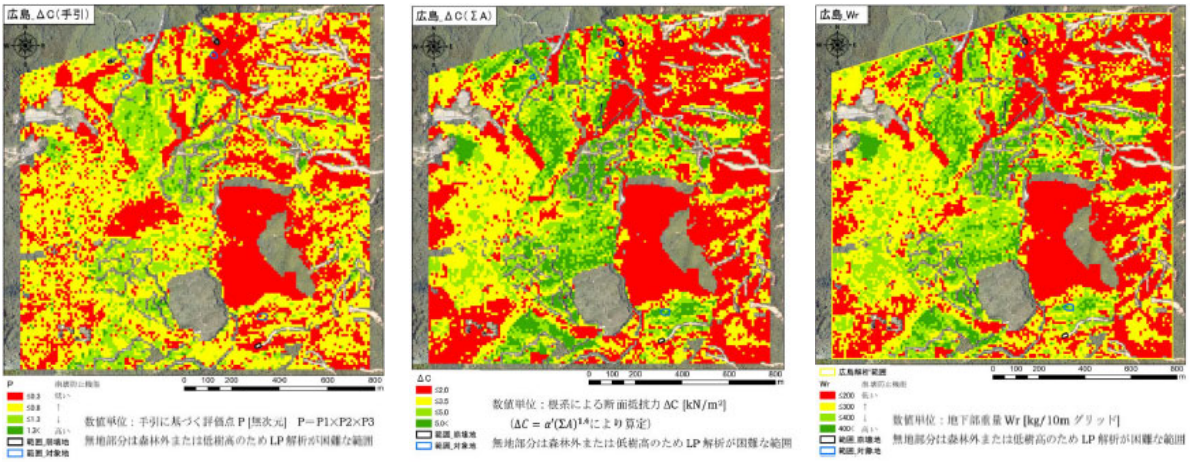


図 2.119　令和 2 年度業務において作成された 3 つの指標に基づく崩壊防止機能区分図
(左：手引き 2016 の P マップ、中：ΔC マップ、右：Wr マップ)

2.4.3. *P*、*ΔC*、*Wr* の使い分け

令和 2 年度業務において、上記の図 2.119 に示す *ΔC* と *Wr* の関係を小班毎の散布図にして検証したところ、両指標は概ね 1 対 1 で対応することが示された。図 2.120 は、ヒノキの散布図の例であるが、広葉樹やアカマツについても同様の結果となった。

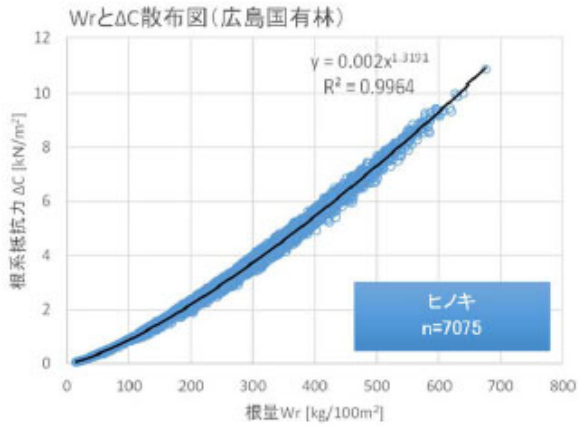


図 2.120　同一の LP データより算定された *Wr* と *ΔC* の関係(10m グリッド)
(令和 2 年度報告書より)

根量 *Wr* は立木密度が高ければ、単位面積当たりの立木本数が増え、根量が増加するが、高密度では小径木となり、1 本当たりの根量は少ない。*ΔC* ではこのトレードオフの関係を胸高断面積合計で表わしており、*ΔC* と *Wr* がほぼ同一の指標と考えられた。

一方、手引きの *P* は、胸高直径の影響が強く、胸高直径が大きい場合に高評価、立木密度が高い場合に低評価となり、小径木よりも大径木を積極評価する等、他の 2 つの指標とは異なる傾向がみられた。令和 2 年度の本調査報告書においては、3 つの指標はそれぞれ、表 2.17 に示す根系効果に相当するものと整理することが提案されている。

表 2.17　指標と対応する崩壊防止機能

指標	根系による崩壊防止機能	必要とする森林
手引きの *P*	杭効果	急斜面、やや規模の大きな崩壊
Wr または *ΔC*(*ΣA*)	ネット効果	緩斜面、侵食が生じやすい斜面

2.4.4. スギ林を対象とした崩壊防止機能区分図の作成

昨年度の *ΔC* や *Wr* に関する整理検討は、現地掘削調査を行った広島国有林のヒノキ根系データに基づくものであったが、実際の森林施業の対象はスギ林が大半であることを踏まえ、スギ林における *ΔC* や *Wr* についての検証も必要と考えられた。そこで、今年度は、根系の掘削調査地となった、宮崎県板谷国有林内の板谷ネルダー試験地を対象に崩壊防止機能区分図を作成した。

(1) 作成方針および事前準備

崩壊防止機能区分図の作成に当たり必要となる、樹種、樹高、立木密度、胸高直径等の森林情報は、昨年度のヒノキ林と同様、LPデータと密度管理図を用いて算出することもできるが、これまでに調査が実施された広島や高知と異なり、板谷国有林エリアにおいては、森林情報解析に適した高密度(1m² 当たり 4 点)の LP データが存在しないこと、また、植栽密度や施業履歴が明らかであるということを活かす観点からも、森林情報は現地実測により収集することとした。

ただし、グリッド毎の立木密度を算出するには、立木位置情報が必要となるが、これについては、現地で UAV 空撮した写真データをもとに作成した DSM(Digital Surface Model)と LP データ(1m^2 当たり 1 点)から算出した DEM の差分から 1m 解像度の DCHM を作成し、これをもとに樹頂点解析を行い、立木位置を特定した(図 2.121)。なお、DEM 生成に用いた LP データは、国土交通省国土地理院が管理する航空レーザ測量データ(平成 25 年日南南部地区航空レーザ計測業務)を利用したものである。

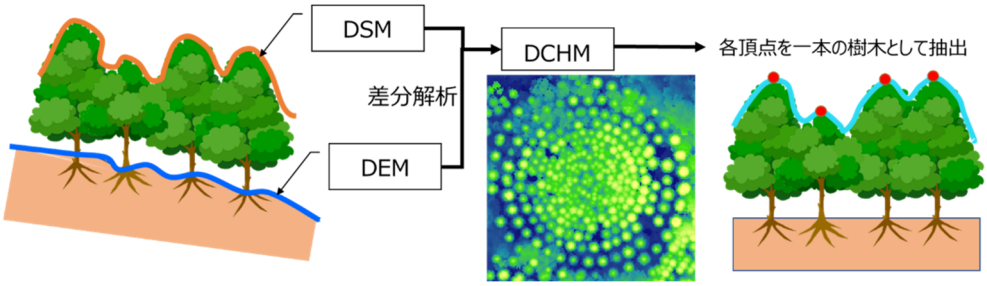


図 2.121　DCHM 解析による樹頂点解析のイメージ

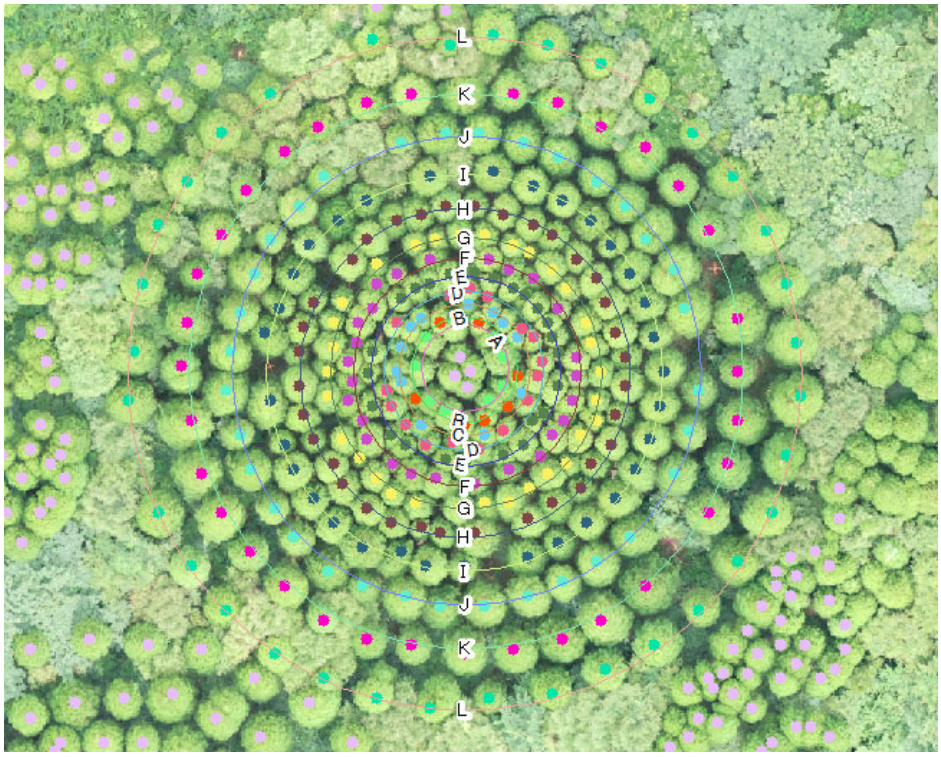


図 2.122　樹頂点解析結果(UAV オルソ画像上に表示)

また、得られた立木本数をグリッド毎の立木密度に変換するため、グリッドのサイズを決める必要がある。広域のマップを作成する際は、グリッドサイズを 20m 程度に設定することが一般的であるが、今回の調査地である板谷ネルダー試験地は、円形試験の直径が 80m 程度とそれほど大きなスケールではないため、10m と 5m の 2 パターンを作成することとした。

(2) 生成した各因子データ

各マップで使用する共通のデータのうち、樹種データは図 2.124 のとおりとなった。板谷ネルダー試験林の外側には広葉樹が分布している。

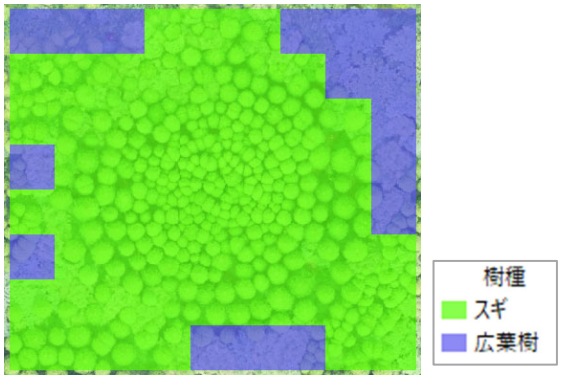


図 2.123　10m グリッド毎の樹種

樹頂点解析により得られた立木位置から、グリッド毎の立木密度を計算した結果は、図 2.124 のとおりとなった。

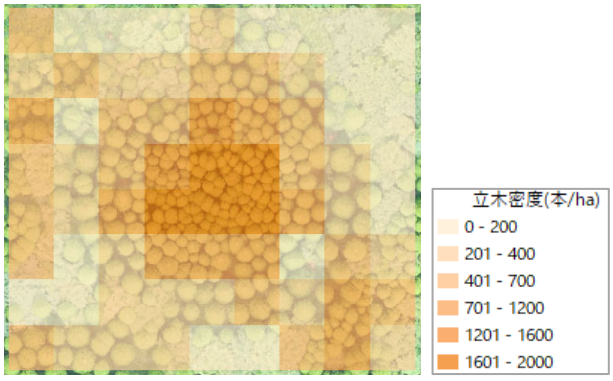


図 2.124　10m グリッド毎の立木密度(本/ha)

グリッド毎の胸高直径は、ネルダー試験林内は毎木調査により計測した値、それ以外のスギ林については、実測の樹高と胸高直径データから回帰式を作成し(図 2.125)、あらかじめ算出しておいたグリッド毎の平均樹高をこれに代入して求めた。作成された 10m グリッド毎の平均胸高直径を図 2.126 に示す。

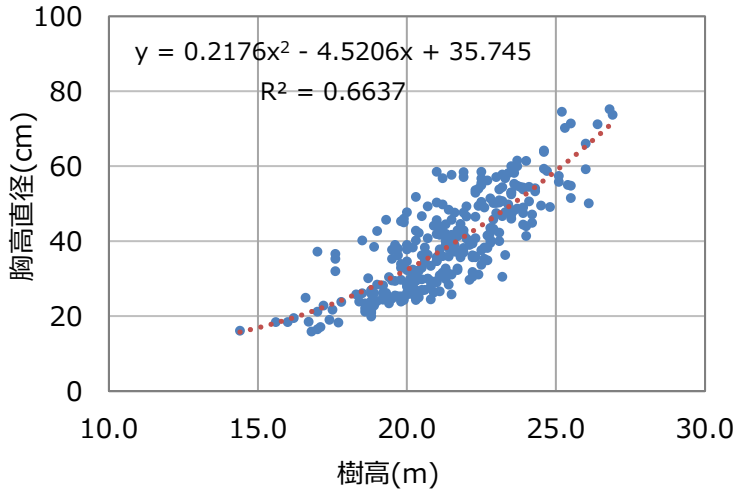


図 2.125　実測の樹高と胸高直径の関係および回帰式

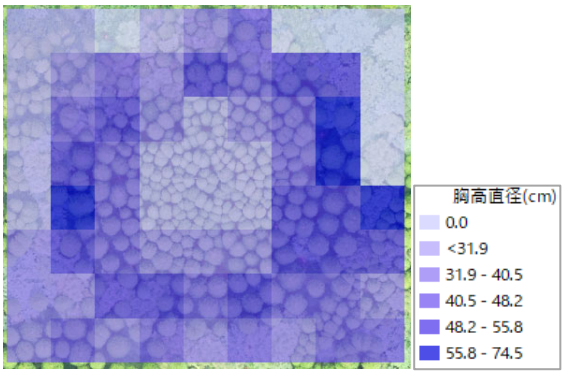


図 2.126　10m グリッド毎の平均胸高直径(cm)

ΔC の計算に必要な胸高断面積合計は、胸高直径データをもとに計算により算出した(図 2.127)。

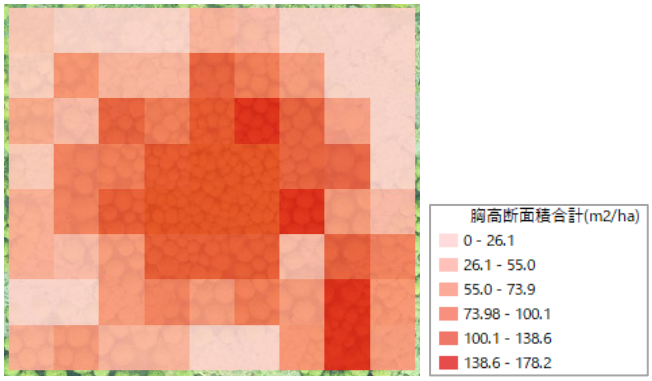


図 2.127　10m グリッド毎の胸高断面積合計(m^2/ha)

Wr の計算に必要な単木根重量(kg)は、*Wr* を算出する空間に位置する立木の平均胸高直径と、苅住の現存量式(表 2.16 参照)にある係数を用いて根量を算出し、それに立木密度を乗じて、単位面積当たりの根量 *Wr* (kg/m^2)を算出している。

今回は、樹頂点解析および毎木調査により、単木位置と胸高直径が分かっていたことから、立木密度は使わず、単木根重量をグリッド毎に足し合わせ、まずはグリッド毎(10m グリッドであれば 100m^2 当たり)の単木根重量合計を算出し(図 2.128 参照)、最後に m^2 当たりの根重量 *Wr* (kg/m^2)に換算することとした。

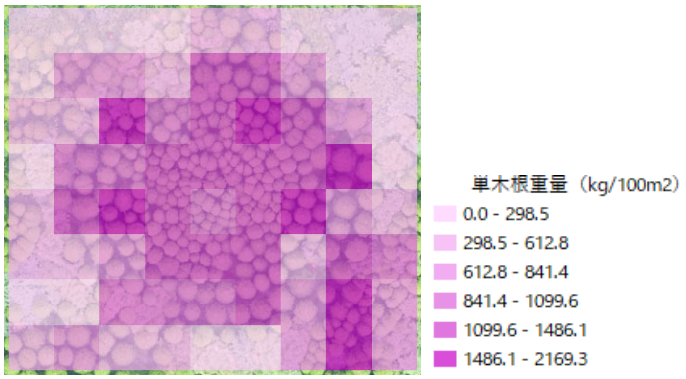


図 2.128　10m グリッド毎の単木根重量(kg/100m^2)

(3) 各指標を用いたマップの作成

図 2.129 から図 2.131 に、生成した各マップを示す。

1) 手引き 2016 の P マップ

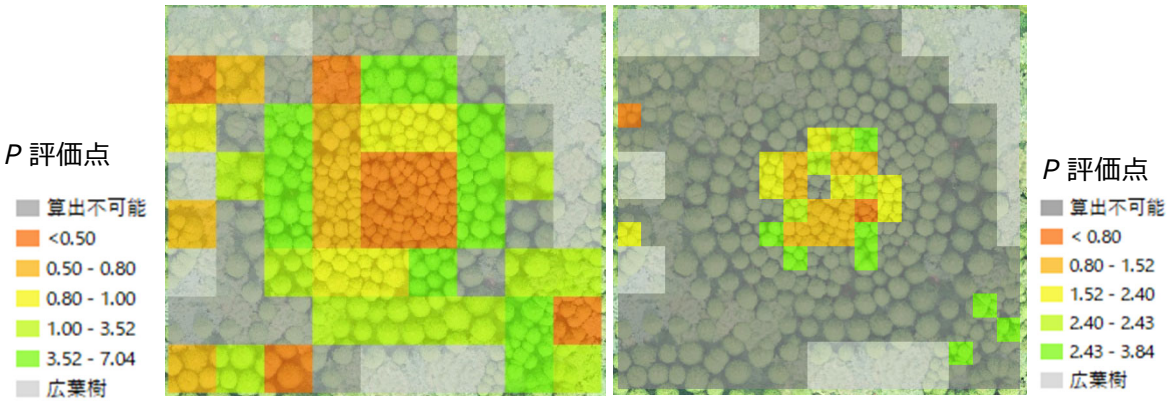


図 2.129　手引き 2016 の P マップ(左:10m グリッド、右:5m グリッド)

手引き 2016 のマップ(図 2.129)のうち、10m グリッドの方では、総合評価点 P は、ネルダー試験地の中央部付近で低く、外側にいくにつれて高くなり、胸高直径が強く反映された結果となった。一方、5m グリッドで作成したものについては、グリッド当たりの立木本数が少なく、ネルダー中央より外側のエリアにおいて、「立木密度 400 本/ha」を下回るグリッドが多くみられた。このような「立木密度 400 本/ha」のグリッドについては、評価因子 *P2* の配点がないことから(配点は「400 本/ha～」)、結果的に「計算不可」のグリッドが大半を占めた。

2) *ΔC* (断面抵抗力)マップ

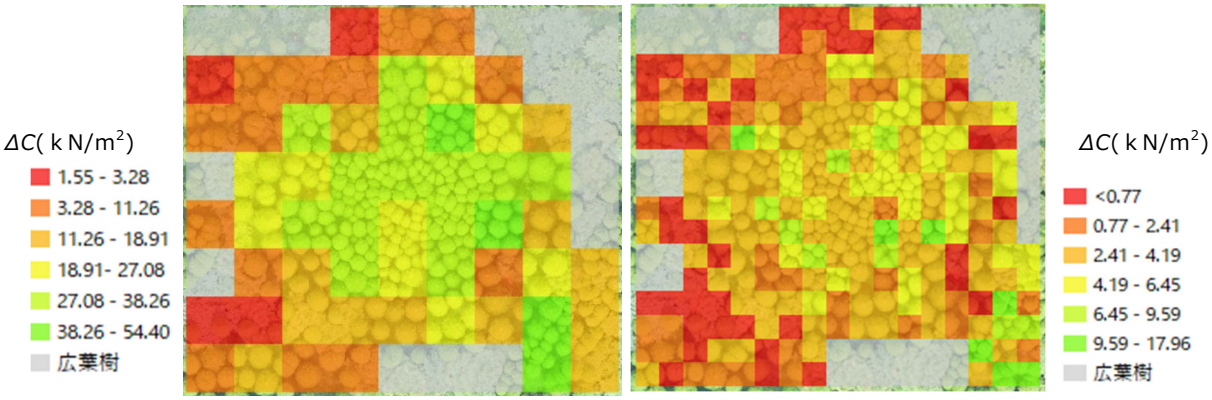


図 2.130　*Δ C* マップ(左:10m グリッド、右:5m グリッド)

Δ C マップでは、10m、5m グリッドともに H 列(1、122 本/ha)、I 列(779 本/ha)の *Δ C* が高い値となり、平均胸高直径の大小の出現度合いおよび植栽密度の高低と近似し、それら因子の影響が大きいことが伺えた。

根系による *Δ C* は一般的に 10kN/m^2 を超過することはごく稀であるといわれているが、作成された 10m グリッドのマップでは、*Δ C* の値がかなり高めとなっている。これは、LP データ解析に基づく平均化された森林情報ではなく、実測ベースのデータを因子の情報として適用しているため、データにばらつきが生じていること、また、本年度の調査地である板谷国有林のスギ林の生育が、標準的なスギ林と比べ極めて良好であり(胸高直径の平均 40cm 程度)、北原の簡易式に当てはめると過剰な *Δ C* となってしまうことが推察された。

③　*Wr*(根重量)マップ

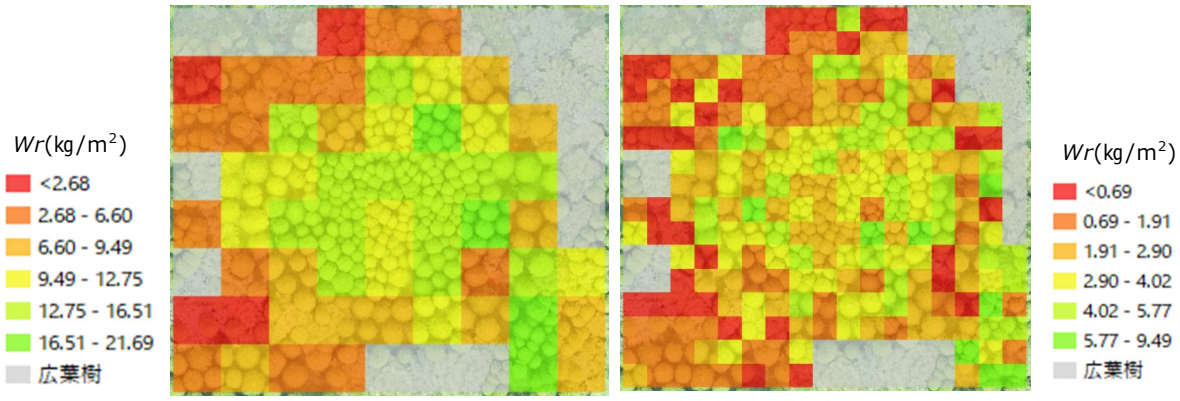


図 2.131　*Wr* マップ(左:10m グリッド、右:5m グリッド)

Wr は、立木本数の多いネルダー試験地の中心付近で高い値となっており、立木密度の影響を大きく受けていることが伺える。

2.4.5. スギ林における*ΔC* と *Wr* の関係

昨年度のヒノキ林を対象とした検証において、*ΔC* と *Wr* は、ほぼ 1 対 1 の関係性にあることが示された(図 2.120)。今回、宮崎県板谷国有林のスギ林についても同様の分析を行ったところ、図 2.132 のとおり、*ΔC* と *Wr* の関係は高い決定係数(0.97)の回帰式で表せることが分かった。

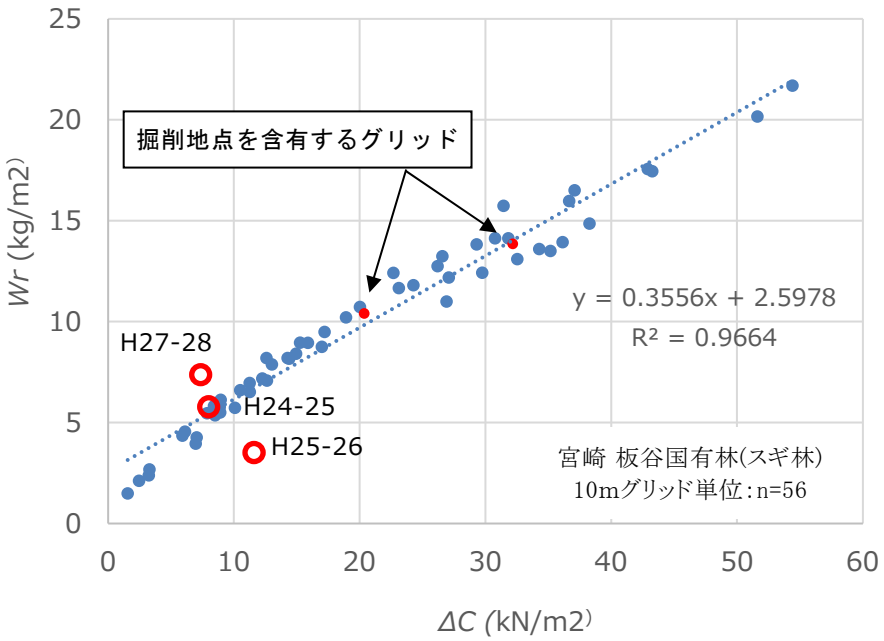


図 2.132　*ΔC* と *Wr* の相関図(10m グリッド単位)

図 2.132 は、宮崎県板谷国有林のスギ林調査地のデータに限られた結果であるが、ヒノキ林と同様、スギ林においても、*ΔC* と *Wr* はほぼ同一の指標とみなせることが示された。

なお、掘削調査を行った 3 箇所の *ΔC* および *Wr*(スギのみ)は H25-H26 間で 12.12kN/m² と 3.94kg/m²、H24-H25 間で 8.09kN/m² と 5.73kg/m²、H27-H28 間の 7.92kN/m² と 7.87kg/m² で、現地調査結果はマップで示されたグリッドの分類値よりも過小に評価された。

2.4.6. 手引き 2016 の P、*ΔC*、*Wr* マップの活用の検討について

(1) 崩壊防止機能区分図に関する検討結果まとめ

昨年度の検討結果も踏まえ、各マップの特徴について、あらためて以下に整理する。

- *ΔC* と *Wr* の両者の定義は異なるが、地上部情報に基づく崩壊防止機能の評価指標として使う限りでは回帰式により相互変換が可能であるため、概ね同じ指標とみなせる。
- 手引き 2016 の *P* は、胸高直径の評価が異なり、*ΔC* と *Wr* とは異なる傾向を示す。

(2) 崩壊防止機能区分図に関する課題

崩壊防止機能区分図を作成する目的について、あらためて考えてみると、一つは「防災機能を優先的に高める必要がある林分の特定」、次に「その立地条件や森林状態に適した施業オプションの提供」に資する検討材料の提供ではないかと思われる。

このことを踏まえると、森林整備を実施する側がまず必要とするのは、「どこが崩れやすいか」、リスクの高いエリアを広域から絞り込むために必要な情報であり、これには、立地因子の考慮が欠かせない。林野庁「平成 27 年度流域山地災害等対策調査(流木災害対策手法検討調査」委託事業」で作成された「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法」の手引書においては、他事業成果である「山腹崩壊危険度判定」の概念が取り入れられ、立地因子として、傾斜、縦断面形、横断面形、土層厚などが考慮された。

また、現行の崩壊防止機能区分図について、手引きの *P* マップでは立木密度が低いところと高いところの評価点が低めに設定されているが、その密度を構成する林分が若齢段階か成熟段階かで機能の程度やリスクは異なる。*P*マップでは、立木密度が 800 本/ha から 1,600 本/ha 付近で最も高い評価となり、これについては成熟段階の林分が想定されているが、実際には過密状態の成熟段階の林分が一定程度存在するため、評価できない状況になっている。

(3) 崩壊防止機能区分図の活用案

森林総研で進められている「樹木根系の分布特性の多様性を考慮した防災林配置技術の開発」(平成 30 年～令和 3 年)プロジェクトの成果について、活用できる知見を取り込む予定である。引き続き、最新動向の確認が必要である。

森林整備と斜面崩壊の因果関係は解明されていない中、地上部の植栽密度が管理されたネルダー試験地において調査を実施した。

当該試験地における地上部の調査では、立木間隔を均等しても隣接木同士は競合し、地上部の成長差は大きくなる。そのため、単木当たりの根量は、隣接木間で大きく異なるが、今回取得した現場計測値としての *ΔC* は、隣接木間の地上部の成長差に影響を受けていないようにみえる。同じ立地において、異なる成長差や立木密度の立木を掘削することにより、その差の有無が明らかになると想定されるが、平均胸高直径や ha 当たりの立木密度で決定される *ΔC* や *Wr* では、正確に崩壊防止機能の区分を評価できるかは不明である。これは、立木配置が不均質な林分で実施してきたため、明確でなかった点である。

地上部の現存量が多いと地下部の現存量も多い傾向がある。しかし、地上部現存量の多い林分が、斜面崩壊防止機能が高いといえる明確な根拠はない。

崩壊防止機能区分図の作成においては、当初 LP データを有効活用して、森林整備が必要な林分を特定し、それぞれの立地において、その機能を補完する、あるいは機能を向上させることを目的としていた。しかし、3 年目の議論では、森林整備による根系発達および多寡の変化や、崩壊防止機能に対するメカニズムを結び付けることができず、4 年目の本事業においても、その考え方の方針や科学的根拠は見いだせていない。

2.5. 研究成果の収集

令和 3 年度 10 月 29 日に森林総合研究所主催によるセミナー[38]が開催され、下記の情報が公開された。なお、成果については、令和 4 年度に公開される予定である。本年度は、関係機関と調整し、公開されている要旨をもとに、研究内容を紹介することとする。

2.5.1. 九州北部豪雨と森林の崩壊防止機能

(1) H29 年 7 月九州北部豪雨で発生した災害の概要

福岡県農林業総合試験場

平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨では、過去に類をみない記録的な豪雨が、多数の斜面崩壊や河川の氾濫等を引き起こし、福岡県朝倉市を中心に甚大な被害が発生した。本災害では斜面崩壊によって流出した流木が被害を甚大化させた要因の一つであったこともあり、樹木根系が持つ崩壊防止機能について注目が集まった。特に、被災地である朝倉市周辺は人工林率が高い地域であったことから、人工林の管理のあり方について多くの議論があった。

セミナーでは、当時の状況を振り返るとともに、H29 年 7 月九州北部豪雨で発生した災害の概要について報告があり、本災害を契機とした樹木根系と防災に関する研究プロジェクトの方向性について示された。

(2) 降雨と地質が崩壊規模へ及ぼす影響(H29 年 7 月九州北部豪雨を事例として)

福岡県農林業総合試験場

平成 29 年 7 月九州北部豪雨で発生した斜面崩壊について、災害前後に取得された航空レーザ測量成果から得た詳細な地形情報をもとに、降雨と地質に着目した解析結果について報告された。

朝倉地域における代表的な地質である花崗閃緑岩と結晶片岩について、崩壊の面積や深さを分析した結果、花崗閃緑岩に比べ結晶片岩の崩壊は、面積および崩壊深が大きかった。また、花崗閃緑岩は雨量の増加に対し崩壊深は頭打ちになる一方、結晶片岩は、雨量の増加に対し、崩壊深の深いものが増加した。これらのことから、崩壊の規模は地質や雨量により異なることが明らかとなった。

セミナーでは、これらの要因について、崩壊前の地形を判読した結果から議論がなされた。

(3) 地史的観点から見た崩壊発生山地の特徴-表層崩壊と深層崩壊の場

森林総合研究所

2017 年の九州北部豪雨で発生した崩壊は表層崩壊が多数を占めたが、中生代の変成岩の分布域では崩壊深が 10m に達するような深層崩壊もみられた。一般に、変成岩や付加体堆積物を主とする中古生層の山地では、表層崩壊よりも深層崩壊や地すべりの場となりやすいことが知られている。

今回のように表層崩壊と深層崩壊が混在する災害が起きた背景として、深層風化殻の影響を指摘できる。今回発生した崩壊の多くは赤褐色を呈しており、その多くは 0 次谷の内部だけでなく尾根付近からも発生していることから、この地域の山地を覆う風化殻が主要な崩壊物質となったと思われる。

従来知られている、西日本の地質構造発達史から考えると、これらの厚い風化殻は中国山地と同様に、新第三紀以前の時代に進行した平準化作用と、温暖な気候下で進行した風化作用の産物と考えられる。

塚本良則氏は、中古生層の高起伏山地では表層崩壊が起こりにくいとことの原因として、基盤岩に発達する多数の割れ目による地下水浸透や樹木根系の下方への発達の促進を指摘しているが、朝倉市や東峰村の山地では、このような中古生層の特性が深層風化殻の発達によって、相当程度失われたことが指摘できる。ただし、風化殻の下には地下水が浸透しやすい変成岩が存在しており、このような二重構造が、表層崩壊と深層崩壊の同時発生につながったと考えられる。

---

[38] 樹木根系と防災に関するオンライン研究会(2017 年九州北部豪雨を契機として) 発表要旨集より

山地の崩壊発生様式を考えるには、山地の形成過程から表層の崩壊予備物質の分布様式を考察することや、表層の地盤や土壌と樹木根系の相互作用を考慮する事が重要であることを示している。

このような山地表層システムの複雑性は、森林防災が直面している難題であると同時に、地圏と生物圏の境界科学による防災研究という新たな魅力的なテーマの存在を示唆している。

(4) データ解析から見た崩壊発生の素因-森林の崩壊防止機能は発揮されたのか？-

森林総合研究所

2017 年 7 月 5 日から 6 日にかけて福岡県および大分県において発生した豪雨(2017 年 7 月九州北部豪雨)により多数の崩壊が発生した。この豪雨にともない、多数の流木が発生し、被害が拡大したことから、崩壊が発生した斜面に成立していた植生の状況(樹種、樹齢構成、施業履歴など)との関連性が新聞等の報道により指摘されている。しかしながら、これまでの報告では、崩壊が発生した斜面の植生状況については明らかとなっておらず、上記の指摘は推測の域を出ていない。

今回の崩壊は多量の雨が崩壊の誘因となったことは事実であるが、素因となる斜面の地形(傾斜、方位、標高など)・地質条件や植生状況などとの関係については不明な点が多い。セミナーでは、崩壊の誘因となる降水量のほかに、素因となる地形(傾斜、方位、標高)条件、地質条件、植生(樹種、樹齢)の条件の違いが崩壊の発生にどの程度影響を与えたのか、特に森林の崩壊防止機能は今回の豪雨でも発揮されたのかについて、データ解析によりこれまでに推定、検討した結果が報告された。

2.5.2. 樹木根系と立地環境の新知見

(1) 樹木根の成長および分解に土壌環境条件が及ぼす影響

森林総合研究所

樹木根の成長および分解の過程は、人工林での植栽と伐採のサイクルにおける根の土層支持力の増加と低下に直接影響する。これまで立地および生態の分野では、森林における炭素動態解明の見地から、炭素の存在量、循環量ともに大きい土壌表層部を対象に根の成長と分解に関する研究が進められてきた。

セミナーでは、根の成長と分解に関する手法を樹木根系と防災の研究に応用する取り組みについて紹介された。根の成長については、掘り取り調査で採取した樹木根の年輪を解析して根の成長履歴を復元し、土壌特性との関係を解析した。また、根の分解については、土壌中に埋設した材試料の時間経過にともなう分解の過程を長期に亘って追跡し、埋設深度や材の特性の影響を解析した。また、従来の分解試験では対象にされなかった深度における分解過程を明らかにするための新たな手法等についても紹介された。

(2) 海岸林研究から見えてきたもの

森林総合研究所

東日本大震災からの海岸林再生では、植栽木が根を地中深く張り、津波に強くなるように、盛土を伴う厚い生育基盤が整備されてきた。その一方、再生が進む中で、重機の踏圧により締め固まった生育基盤による植栽木の根の発達の阻害が懸念される事例も散見された。そこで、森林総合研究所の交付金プロジェクト「根系成長確保による高い津波耐性を特長とする盛土を伴う海岸林造成の技術的指針の策定」(平成 29～令和元年度)において、適正な硬さの生育基盤を整備するために必要なことや、海岸林に植栽される樹種根の発達に対する土壌の硬さの影響に関して調査を行った。

調査結果から、根の地中深くへの発達が見込める適切な生育基盤盛土を造成するためには、「樹木植栽前の基盤の除礫工」や「植栽面に重機を載せない盛土工」等の配慮が重要であること、ある程度の硬さの土壌では樹種に関係なく根を伸ばしにくいこと、適切な硬さの土壌であっても樹種によって深さ方向に根を伸ばすものや水平方向に根を伸ばすものがあることなどが明らかになった。

(3) 地盤の風化度と根の形態および引き抜き抵抗力の関係

岐阜県森林研究所

樹木根系の引き抜き抵抗力は、森林の斜面崩壊防止機能に大きく寄与していると考えられ、これまでにも多くの調査・研究が行われてきた。この樹木根系が生育する森林の地盤は、場所によって風化度が大きく異なり、そこに生育する根系の発達や引き抜き抵抗力にも大きな影響を与えていると考えられる。しかし、地盤の風化度と根系の発達および引き抜き抵抗力の関係は不明な点が多く、森林の防災機能を正しく評価するためには、これらの実態を明らかにすることが重要と考える。そこで、本セミナーでは、地盤の風化度に対応した根系の形態と引き抜き抵抗力を調査し、その関係について検討した結果が示された。

地盤の風化度によって、根系の形態と引き抜き抵抗力には違いがみられ、根系による崩壊防止機能への寄与度も異なることが示唆された。

2.5.3. 森林の崩壊防止機能と災害に強い森林施業の考え方

「山地における根系分布の実態から見えた森林の崩壊防止機能と災害に強い森林施業の考え方」の標題のもと、3 名の発表があった。

(1) 崩壊発生源となる移動体の崩壊発生率と根系の特徴

森林総合研究所

今日の日本の人工林は標準伐期齢を超えた林も多くなり、伐採促進期を迎えつつある。林業を成長産業化の軌道へ乗せるためには、森林資源の循環利用により持続的に安定した林業を行う必要がある。一方で、気候変動の影響により各地で激甚な豪雨災害が発生しており、林業と国土保全の両立が今まで以上に必要な状況にある。本報告では、林業と国土保全の両立を行うために必要な崩壊防止効果の高い「要木」の存在を報告する。すなわち、山地の崩れやすい危険地形の概要と崩壊発生源となる移動体の形成過程について述べる。また、移動体上の立木の曲がりやその根系発達の特徴について報告し、森林の崩壊防止機能はこの「要木」のもつ効果であることを示す。

(2) 移動体の土層構造と根系の特徴

岐阜県森林研究所

樹木根系は崩壊の発生を防止するための重要な存在として期待されているが、崩壊発生源となる移動体と根系の関係は不明な点が多い。セミナーでは、移動体の土層構造と移動体に生育する根系の特徴について調査し、その関係についての検討が報告された。移動体の土層構造を把握するため、変位量が異なる移動体の土層において簡易貫入試験を行い、簡易貫入試験で得られた Nc 値から根の生育のしやすさについて検討した。さらに、移動体に存在する根の特徴を明らかにするため、根の太さと分布範囲を計測した。その結果、変位量の大きな移動体では土層が柔らかいため、他の箇所に比べて根は太くなり、水平方向に広く発達しやすくなることが示唆された。

(3) 移動体上に生育する立木の特徴と根系を考慮した災害に強い森林施業の考え方

鳥取県林業試験場

本プロジェクトによる調査により、山地における崩れやすい地形の特徴、崩壊発生源となる移動体の変位過程や土層構造と根系発達の特徴が明らかにされた。特に移動体上に生育し、高い崩壊防止効果を発揮している「要木」の存在を見いだしたことは、今後、林業と国土保全の両立を目指すうえで非常に重要な知見となる。本報告では、間伐作業等で選木を行う際に「要木」を見分けるため、その地上部分の特徴について報告するとともに、「要木」による根系を考慮した林業と国土保全の両立させる森林施業の考え方について報告がなされた。

2.6. 結果総括

本事業の目的は、広域的情報である LP データを活用し、地上部の森林情報から地下部の根系の発達状況を想定し、それらの根系の状態と表層崩壊の発生の関係性をもとに、表層崩壊発生防止機能を補完するあるいは向上させる森林整備を計画することである。

計画に当たっては、整備をすべき森林の優先順位を決定するとともに、具体的な森林整備方法を提案し、科学的根拠に基づき提案することとしている。

ここで、藤森による一般的な人工林における森林の発達段階と、本事業のポイントを並列的に検討し、人工林における望ましい施業を検討する。

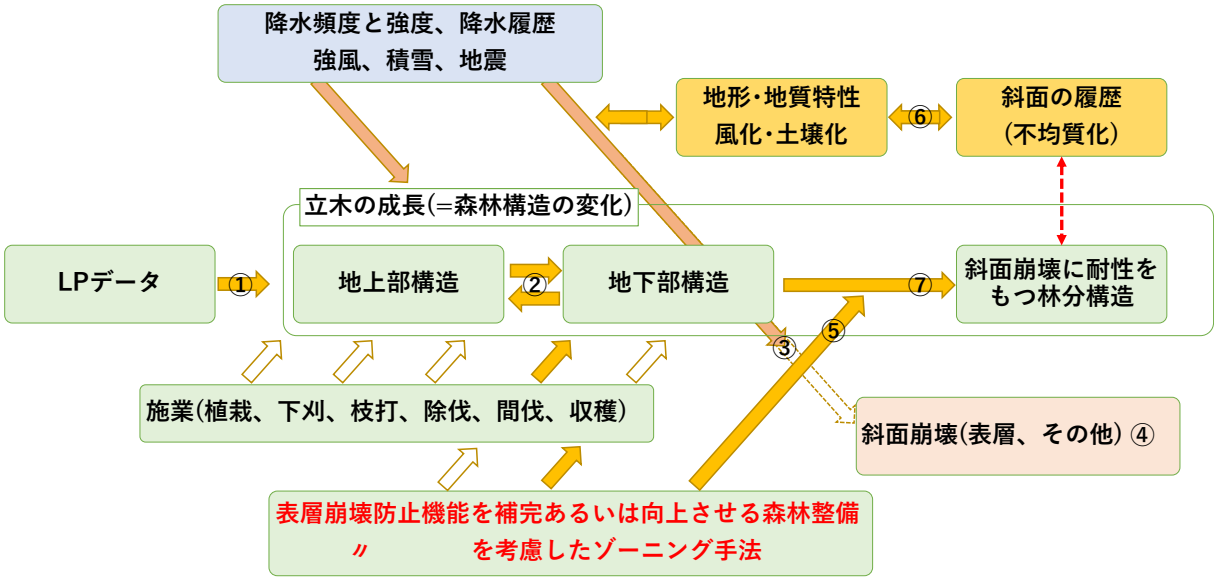


図 2.133　時間とともに成長し変化する森林と斜面崩壊防止機能の見据え方

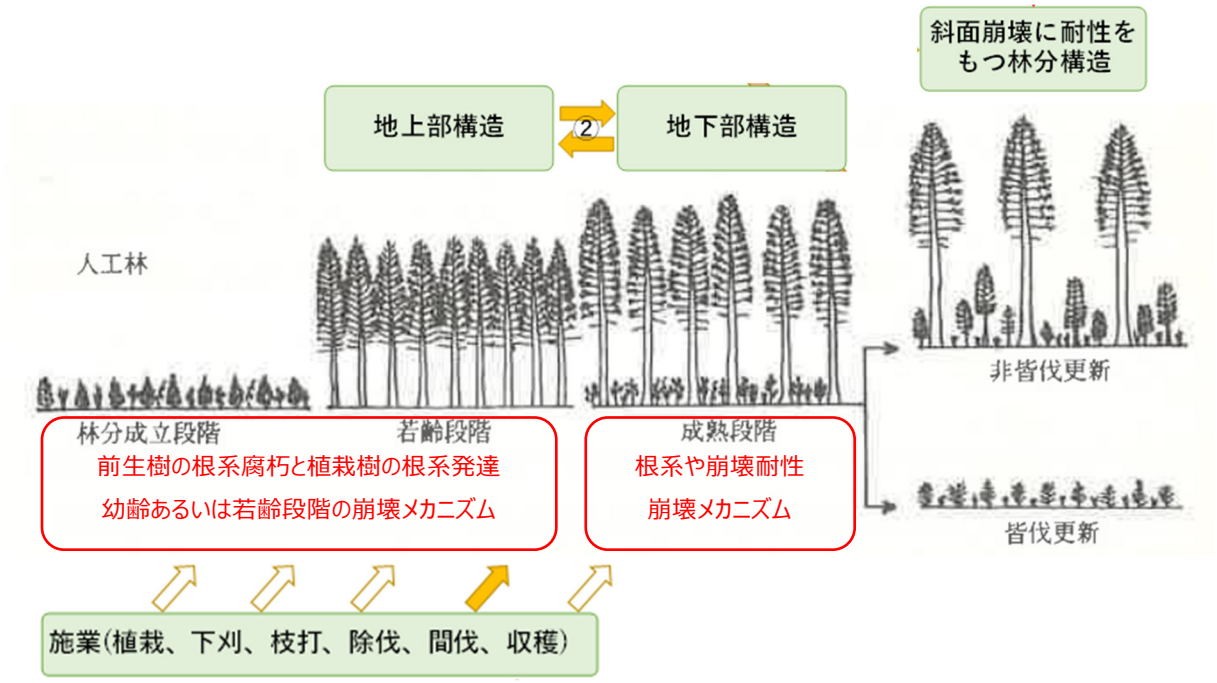


図 2.134 人工林の林分発達段階のモデルと根系の発達[39]

[39] 藤森隆郎(2003)新たな森林管理. 持続可能な社会に向けて. 全国林業改良普及協会. P39

LP データから地上部情報を収集する取組(①)は、データの点密度の高密化により、樹高だけでなく、胸高直径や下層植生の状態まで把握できるようになりつつある。しかし、地下部の構造を LP データから取得することは困難で、従来の地上部の胸高直径との相関において、ΔC や Wr を推定する取組となっている(②)。

Wr の推定について(②)、地上部と地下部の関係は、T/R 率で示している。スギの場合、概ね 3.5 であるが、植栽密度や間伐時期によって根系の発達度が異なる可能性がある。幼齢段階から成熟段階に向け施業を実施する中で、森林の多面的機能を発揮しつつ木材生産を実施する上で、結果として斜面崩壊防止機能を補完、あるいは向上させる施業が実施されてきた。しかし、台風や前線の発達に伴う豪雨、あるいは強風や地震等によって、森林斜面の崩壊事象が生じている(③)。

その際、崩壊現象が発生しないように、斜面崩壊時の事象を観察し、そのメカニズムを解明し(④)、最大限の配慮をもって事前に対応可能な森林整備方法を検討するのが本事業の趣旨である(⑤)。

現在、森林総研のプロジェクトにおいて④の解明とともに、異常降水伴い、均質と思われていた斜面が不均質であることを前提とした考え方のもと、地形地質や風化、土壌化における研究が進められている(⑥)。斜面の不均質化の原因とともに、それらの立地に生育する林分が、長年月にわたって、斜面を安定化させる取組を検討することが重要である(⑦)。

このうち①については、樹高や胸高直径だけでなく、樹幹表面積から、根量を算出する方法等、地上部の構造を、より直接的に地下部情報とつなげる可能性がある。

②については、不明な点が多い。根系調査は多大な労力が必要なうえ、データも調査手法によって分散する傾向がある。立木 1 本 1 本の形質や成長履歴、その成長立地における反応等によって、苅住による現存量式と異なる事象が発生する可能性がある。

また、③については、近年の気候変動に伴う異常降水等、誘因として考慮される降水現象の変動に加え、立木の成長に伴う森林構造の変化によって、斜面崩壊発生のメカニズムが変化する可能性が高い。そのため、斜面崩壊が発生した場合、その事象を観察し、崩壊発生のメカニズムを解明する取組を継続することが必要である。④については、③と同様、森林の発達段階において、構造が異なることにより、多面的機能を発揮する森林の機能も異なるという考え方のもと、発生した斜面崩壊事象に対し、今後も原因究明を継続する必要がある。

また、⑤については、③と④の解明により、科学的根拠をもって整備方針を樹立する必要がある。⑥と⑦については、森林総研のプロジェクト成果に期待し、森林立地斜面が不均質であることを前提とした森林整備を提案していく必要がある。

(1) LP データの利活用

高知県の調査において、LP データを活用した立木密度の推定については、林分の状態によるが、精度は高く、立木の密度推定に活用できるといえる。また、樹高については、高密度の点群データであれば、森林整備に必要十分な樹高データを確保できている。

地下部の推測については、現状では胸高直径を推定し、そこから苅住の現存量式を用いた取組がなされているが、土壌型や植栽密度によって変動するため、樹冠表面積等、地下部の発達に対し、より相関の高い変数を取得することにより、効率よく地下部の状態を推定できる可能性がある。

(2) 根系全量調査

50 年生のスギ(トサアカ)を活用したネルダー試験地における立木密度 1,122 本/ha の立地空間において、試験地の平均的な成長を示す胸高直径 39cm、樹高 23m のスギの根系について、掘り取り調査を実施した。ブロックサンプリングを適用することによって、立木位置あるいは、隣接木との立木間中央位置における根系の分布状況を把握した。

根系は立木位置になる根株付近に集中して分布しており、立木間中央や深さ 80cm 付近までで、根系の分布比率が大きく低下することを把握した。平面的に Wr を確認すると、高い密度の空間と低密度の空間が隣接しており、根株周辺に根系は集中して分布しているものの、その内部には、根の太さ

によって、*Wr* が密な空間と疎な空間があることが判明した。

Wr が密な空間は、太い根が主に分布する、あるいは小根が密に分布する傾向があり、疎な空間については、太い根はなく、第 1 層に限り、細根が密に分布している状態であることを確認した。苅住は、若齢段階の第 I 層において根系分布の競合が始まり、細根の *Wr* として 0.5kg/m^3 が競合結果として安定する値と示唆しており、一つの指標と考えられている。

細根量を増加させるには、細根をより地下部に発達させ、養水分の吸収力を高めることが望ましく、地下部への通気性や透水性を確保するため、細根のターンオーバーを繰り返し、林冠範囲内で部分的に浸透能の高い空間を形成することが、成熟段階の林分の発達段階の特徴として考えられる。

(3) 根系サンプリング調査

ネルダー試験地において、試験設定された立木密度のもと ΔC と *Wr* を算出した。従来の立木密度と ΔC の関係に、今回の調査結果(1,122 本/ha における ΔC、3 データ)を図 2.135 に示す。調査点付近の密度における ΔC が最も高いと想定すると、ネルダー試験地における立木密度と ΔC の関係は、赤破線となることが想定される。また、本調査では、ΔC 調査地点における *Wr* について細根を含め、極力もれなく根量を把握することに努めた。その結果を図 2.136 に示す。H27-28 の *Wr* については、地表面に近い立地において太根が観察され、他の地点と 1.4 倍の差が生じた。この事象について、間伐後の根系の発達形式の一つとして、地表面近くの根系が肥大化し、伐根方向に発達する研究成果[40]があり、隣接木の伐採によって、地表面の根系が太くなった可能性がある。

立木間中央という *Wr* が少ないと想定される場所において、下層植生として広葉樹が生育することは、その周辺の土壌や斜面の安定に貢献しうる可能性がある。なお、広葉樹において、根系形態をもとに樹種区分できたのは、サカキ、アオキ、シキミである。

(4) 掘り取り調査部の地上部調査

苅住の現存量式との関係を把握することによって、樹種特性とともに、立地条件や間伐の有無によって、部分重が変化する可能性が示唆された。細根量は、現存量による計算値に近い結果となったが、葉量については、実測値が 1/2 程度となる傾向がみられた。伐倒木の樹冠形状を見ると、周辺立木と比較して、着葉量が粗である傾向がみられた。

根系の分布について、スギの太根については、伸長方向(水平方向、垂直方向)に傾向はなく、ランダムな長さや太さで、地下部に延伸していることを確認した。

(5) その他調査

SH 型簡易貫入試験機による調査では、7 箇所の調査地点いずれにおいても 2m 以上貫入し、風化土壌が厚く均質に堆積しているとともに、根系の発達が土壌の固結層等によって、抑制されていないことを確認した。また、土壌断面調査では、残積性の適潤性褐色森林土地帯(偏乾亜型)であり、土層は深く、一部浅い所でC層に砂岩の風化石礫を含む層が出現することを確認した。

---

[40] 山瀬敬太郎(2011)スギ人工林の間伐が水平根分布に与える影響. http://hyogo-nourinsuisangc.jp/sinrin/images/yamase2011a.pdf

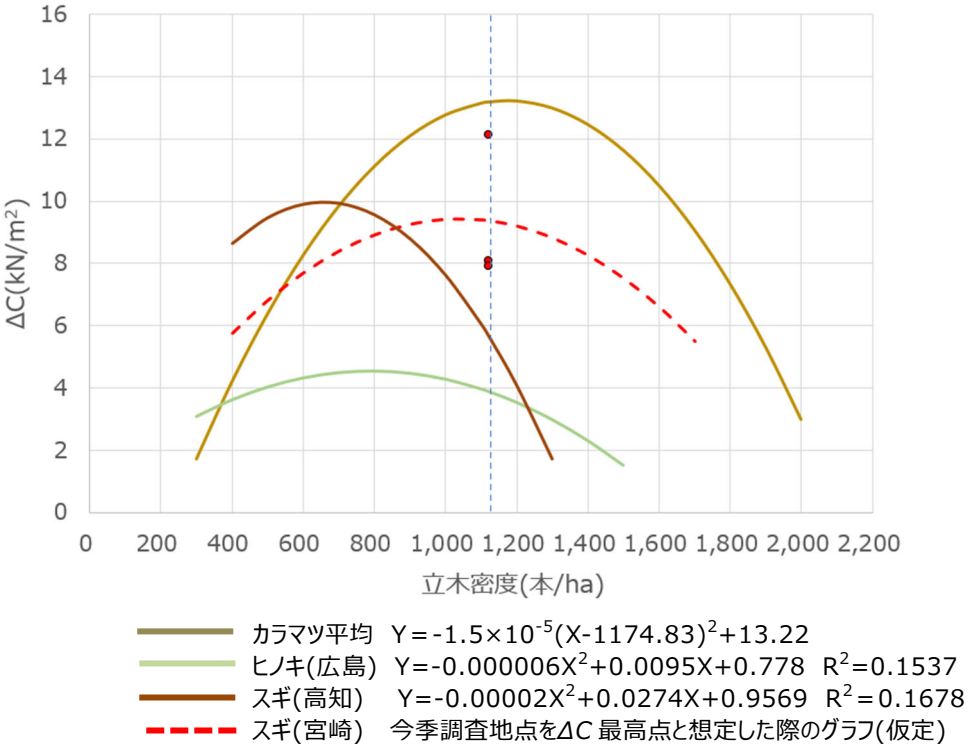


図 2.135　ΔCと立木密度の関係(再掲)

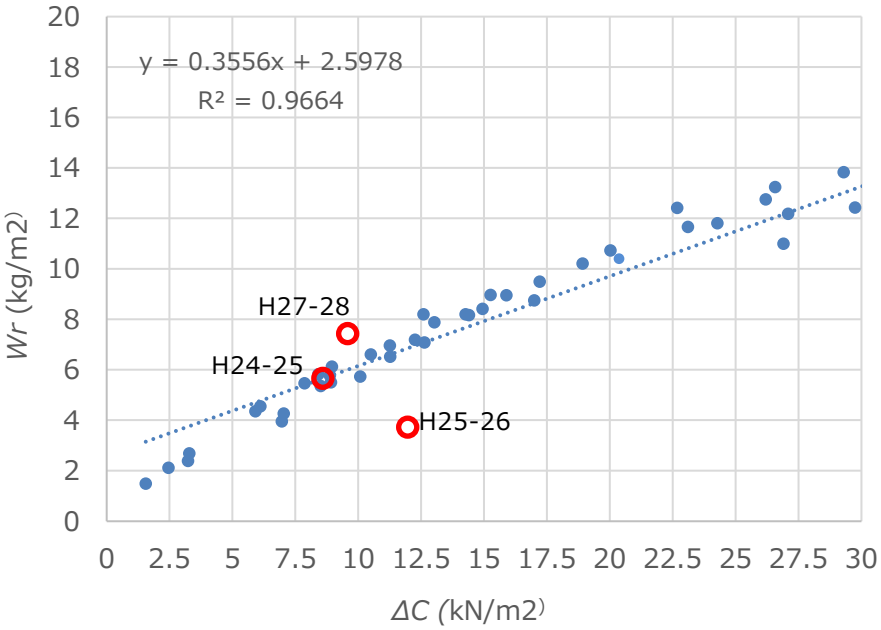


図 2.136　ΔCと Wrの関係(再掲)

(6) 崩壊防止機能区分図の作成

地上部の植栽間隔や履歴、土壌状態が整った林分において、崩壊防止機能区分図を作成し、森林整備が必要な林分を検出できるかどうかを試行した。グリッドの設定に応じて、判定結果の閾値や見え方は異なるが、均質な立木密度条件において、区域表示は、立木密度と平均胸高直径に合わせ

て適切に区分できていることを確認した。

今回試行したネルダー試験地は、単木単位で立木密度が調整されているため、空間スケールが小さく、LP データを活用した取組としては、評価面積が小さく、活用したパラメータの適否判断は難しい。

(7) 研究成果の収集

森林総研のプロジェクトについては、森林立地には多様性があり、立地と植生が相互に関連して空間が形成されていることを前提に、森林整備の方針や、土砂災害の抑止に向けた取組に関する研究が実施されている。プロジェクトが令和 3 年度で終了し、その結果が令和 4 年度以降に公表されるため、その情報を収集し、本事業における森林状況の把握方法と情報を重ね合わせ、崩壊防止機能区分図が適切に役割を発揮できるよう対応する。

2.7. 調査結果の森林整備への活用方法

2.7.1. 斜面崩壊のメカニズムについて

斜面崩壊防止機能の高い森林を形成する上で、その機能を高めるあるいは、補完する森林整備方法が求められている。しかし、本事業の 2 年目と3 年目において、施業履歴と崩壊頻度を調査したが、その結果については、傾向が把握されておらず、施業の規模やタイミングについて 4 年目の段階で、科学的な根拠に基づく森林整備方法を示すことはできていない。

既往文献において、若齢段階の間伐は、残存木の根系を太くさせる効果があり、斜面安定に寄与していることが示唆されている。しかし、実際に発生した近年の斜面崩壊現象の中で、森林整備につながる斜面崩壊メカニズムが解明されていないため、根系を太くするだけで対応が可能か不明である。

令和 3 年度の調査では、斜面崩壊地の発生地点における調査を実施できず、若齢段階から成熟段階にいたる林分の発達段階における斜面崩壊メカニズムに対し、考察を加えることができない。森林総研の北九州北部災害の研究事例を参考に、当該メカニズムについて、幼齢段階～若齢段階の斜面崩壊メカニズムとの違いを含めて明らかにし、そのメカニズムに適した対応策としての森林整備方法を検討する必要がある。

斜面崩壊の誘因や素因を考慮すると、降水による表面侵食の拡大防止や、不飽和間隙水の増加による斜面不安定化を回避するため、表面侵食の発生が起こりにくい浸透能の高い森林を形成することや、降水が速やかに地下に浸透し、斜面の不安定化を招かないようにすることが重要である。その観点に特化した対応として、筋工や柵工の設置や、浸透促進工等の簡易土木構造物による対策が検討される。

しかし、望ましいのは、森林自体が表面侵食の防止機能を担うこと、また、土中間隙水圧の上昇を抑止する状態を維持することであり、その構造形成を支援する森林整備とは、やはり適地適木、かつ適時適費の施業を実施している林分である。

(1) 根系指標の正確な数値把握

本年度は、ネルダー試験地において成熟段階におけるスギ林の 1,000 本/ha 付近の密度における ΔC と Wr の現場データを取得することができた。間伐が実施されていない成熟段階の林分における、根系指標が明確にできると考えられる。

(2) 間伐による残存木の効果

間伐痕跡付近の掘り取り調査からは、間伐根付近に、周辺域から多くの細根が侵入していることを把握した。施業履歴が把握されている林分において、間伐後の年月に応じた、周辺域からの細根の侵入状況や、間伐根の腐朽状態の違いにより、残存木の地上部や地下部の成長に影響を与えるかを把握することが重要であることを示唆することができた。

(3) 単位空間における細根の増加

今回、調査に適用したブロックサンプリングは、細根の量と分布を把握することができた。

細根の発達は、地下部および地上部の成長にとって重要であり、単位面積当たりの細根量を増加させることが、林分を構成する立木の健全性を確保する上では、重要な条件である。

林分の発達段階という長年月の森林の構造の変化の中で、立木の成長に大きく影響する養水分の取得口である細根量が、地表面近くと地下深度の深い所において、その量の変化に特性があることを示唆することができた。これも、林分の発達段階に応じた森林整備を検討する上で、重要な知見となる可能性が高い。

(4) 林分密度試験地の活用

ネルダー試験地は、一般的な造林地と比較して成長量等、異なる条件であることは間違いないが、試験地という、ある一定の条件が整っている環境において、根系の調査を実施することは、分かりにくい地下部の状態を、現実に近い想定にするために必要な条件と考えられる。そのため、今後もネルダー試験地をはじめ、密度試験林における根系調査を実施することによって、立木密度や林分の発達段階別の根系状態を適切に把握し、今後の斜面崩壊に関する対応について、科学的根拠をもって、決定していく必要がある。

2.7.2. 林分の発達段階における根系状況

藤森の提案する林分の発達段階に応じた森林管理を検討する上で、スギ人工林林分の地上部の成長履歴は、収穫予想を主な目的として調査が実施されている。しかし、地下部については、調査の困難さにより、長年月の根系の発達状況を示した文献は稀である。

その中でも苅住は、スギ根系の時系列的な発達状況について、以下のように表現している。[41]

『稚苗時代には主根と側根が明瞭であるが、幼齢木では表層部の水平根の伸長生長が旺盛で、表層部の小・中径根が根系の形態の特徴を示すようになる。20 年生以降では、根株と根株に近い側根の肥大成長が著しくなる。幼齢時代には多くの側根がみられるが、この時代には側根の主なもの 4～5 本が特に肥大生長して根株を支える形となり、稚苗の時代にあった主根は不明瞭となる。40～50 年では側根の特徴が一層明瞭となり、基部の根系の直径は 20～30cm に及ぶ。』

参考としてヒノキは、以下のように表現している。

『当年生の稚苗は主根と側根が明瞭であるが、生長はスギよりも遅い。側根の分岐と生長が大きい。10 年生頃から表層部の水平根の発達が著しくなり、30～40 年生では太い側根と水平に伸びる側根がその形態の特徴を示すようになる。高林齢になるにしたがって根株の側根の基部が肥大する。』

図 2.137 は、苅住による苗木から 40 年生までのスギおよびヒノキの根系形態の変化、また、図 2.138 は同樹種の 30～40 年生段階の各根系区分の *Wr* の垂直変化を示している。

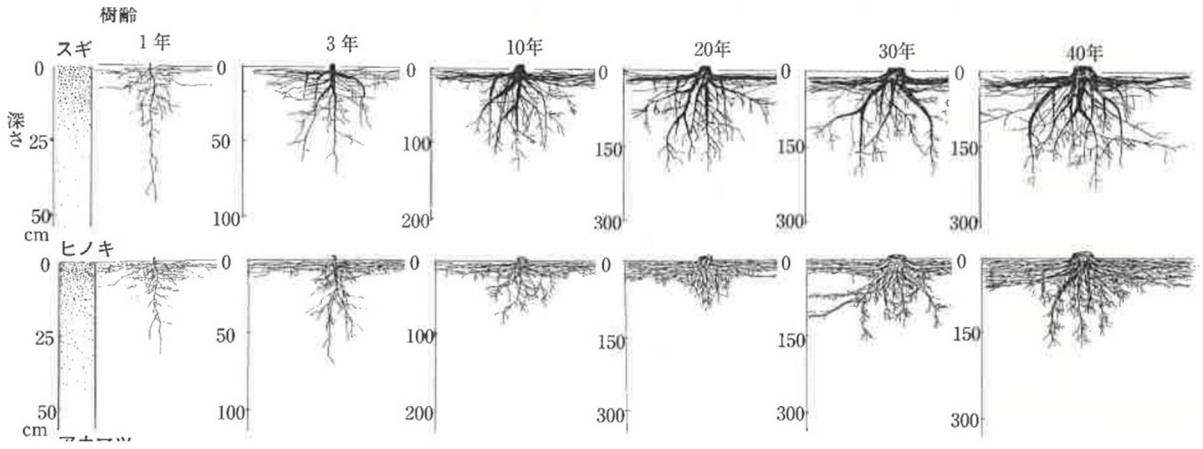


図 2.137　主要造林樹種(スギおよびヒノキ)の生長に伴う根系の形態の変化[42]

[41] 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論. 誠文堂新光社. P351
[42] 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論. 誠文堂新光社. P711

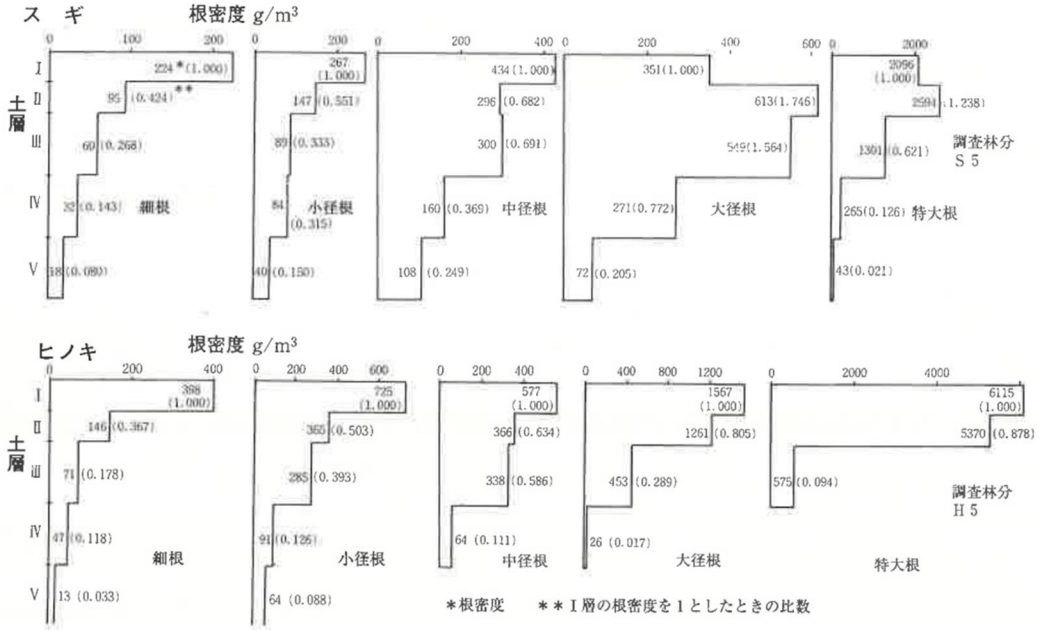


図 2.138　30～40 年生の林分における各根系区分の *Wr* の垂直変化[43]

幼齢段階～若齢段階のスギの根系の発達特性を見る上で、図 2.139 は、苗木を試験的に高密度に植栽した結果を示している。これによると、スギは植栽後、主根と側根が明瞭であり、垂直方向に 1m 以上根系を伸ばし、その後、隣接苗木の空間占有の影響をうけ、水平方向へ根系を展開する傾向が認められる

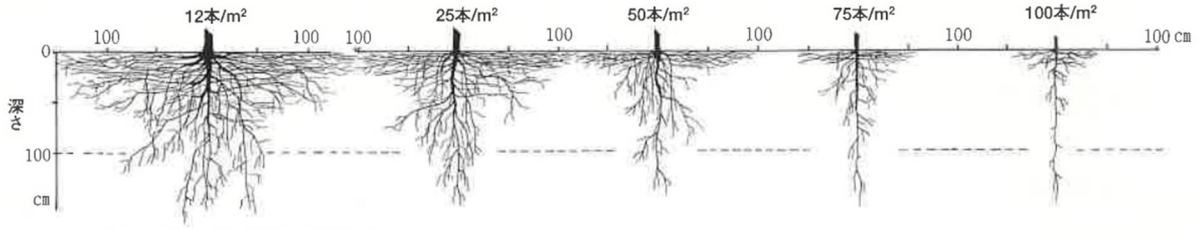


図 2.139　スギの成長に伴う吸収構造の変化[44]

10 年生頃(若齢段階)から表層部の水平根の発達が著しくなり、20 年生以降では、根株と根株に近い側根の肥大成長が著しくなる。多くの側根の中から主なもの 4～5 本が特に肥大生長して根株を鼎状に支える形となり主根は不明瞭となる。この段階で図 2.138 に示すとおり、深部まで大径根が形成されていないと、スギの場合は立地に適した望ましい支持根が形成される可能性が小さくなり、40～50 年以降の根系肥大が発達したとしても、樹体を支持し、かつ斜面を安定させうる健全な根系を形成することは難しいと想定される。

一方、ヒノキは浅根性樹種として、競合しやすい第 1 層に細根とともに太根も発達させることから、より第 1 層の根系競合に配慮して除間伐等を実施する必要があると想定される。

苅住は、樹体の支持だけでなく、養水分の吸収についても言及している。図 2.140 は林齢別の全根系表面積に対する土層別の分布割合とその量を示している。23 年生までは、効率よく養水分を吸収

[43] 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論. 誠文堂新光社. P350
[44] 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論. 誠文堂新光社. P437

可能な第Ⅰ層とともに、側根を地下深くに展開し、第Ⅱ～Ⅴ層(深度 120cm)まで、養水分を吸収可能な根系を展開する傾向がある。一方、34 年生以降では、深い層の吸収根の比率が漸減し、Ⅱ層までの通気性や養水分の多い層で増加する。しかし、当該層は隣接木間で細根を発達させる上で競合する空間であるため、立木は吸収根を発達させる空間を深さ方向へ確保しつつ、細根の更新(ターンオーバー)を繰り返していると想定される。

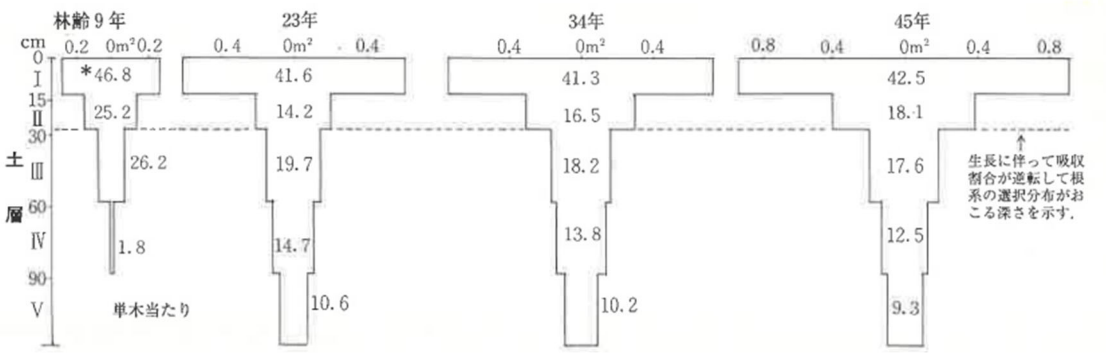


図 2.140　スギの成長に伴う吸収構造の変化[45]

[45] 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論. 誠文堂新光社. P334

2.8. 根系の林地斜面の安定に関わる成果および今後の方向性

根系の林地斜面の安定性および森林の水土保全機能に関わる成果と、今後の本事業における調査の方向性について述べる。

2.8.1. 根系の発達と土壌の関係

(1) 根系の発達が周辺の土壌硬度に与える影響

地上部の成長に伴い増加する自重を支えるため、根系は支持根を発達させ地上部を支えている。その際、土層に荷重がかかるが、今回の調査におけるブロック状の掘削により、幹の直下において土壌が強く固結している状況が確認された(土壌硬度計で 27.5(22-32)mm)。一方、根株の周囲では、不定根から吸収根と思われる細根が多く発生し、細根を取り巻く土壌は空隙に富み、ほぐれやすい状況であった。細根の更新頻度(ターンオーバー)については、調査方法が確立されておらず未だ不明であるが、地上部の落葉落枝よりも早い頻度で更新し、そのたびに土壌中の腐植を増加させ、表層土の孔隙を維持・増大している可能性がある。

(2) 斜面における根系の肥大成長と土層の補強効果

適時の間伐によって、根系の肥大成長が促進させられることが明らかになりつつあり、森林整備は斜面崩壊防止機能を補完、あるいは向上することができる重要な方法であることを示している。

針葉樹の場合、地上部では傾斜した側の地際に圧縮アテ材を肥大成長させ、幹の倒伏を回避することが一般的な認識となっている。

苅住は、板根発達の誘因として、立地適応や重力屈性、通道組織の肥厚、物理的刺激等が挙げており、それぞれの観点で実験された事例もあるが、明確に説明できる状況ではないと示している。アテの形成は結果として、強風害等、気象害発生時の抵抗として発現される可能性があり、適地適木の判断材料であるとともに、アテの発生状況と立地の関係について、本事業において注視しておくべき項目と思われる。

Nicoll and Ray(1996)[46] によると、風雨にさらされた立木は、その外圧に対し抵抗するため、重力だけでなく圧力に応答して肥大成長する可能性があるとしている。また、Stokes and Guitard (1997)[47]は、外力による機械的刺激が、根系の形成層に作用して偏心成長することにより、断面二次モーメントの大きい楕円形状となって効率的にたわみに抵抗し、樹木の安定性を確保していると表現している。

今回の調査においても、掘削した根系に偏心成長が多く確認され、根系に大きな圧力がかかる部分と、そうでない部分とで肥大成長に大きな差が生じていると考えられる。特に、地すべり地や積雪地等においては、表層土や積雪のクリープによって幹の地際に根曲がりを生じ、樹体を直立させることが確認されているが、根系においても、斜面上での樹体の安定性を確保するため偏心成長が生じていると考えられる。緩慢なクリープを伴う表層土において、地上部を安定させるため根系を発達させた樹体は、平地に比べてより多くのバイオマスを地下部に分布させ補強することとなるため、結果的に斜面土層を安定化させる効果を有するといえる。

図 2.141 は、斜めに延びた根の断面(A 断面、B 断面)であり、板根と同様、根系の中心柱から上方に向けて根が肥大成長している例であり、これにより地上部を支持していると考えられる。

一方、図 2.142 は、C 断面の根は、根株から身長した根が、根株方向に伸長してきたものであり、先に成長していた根の存在により上方への肥大が制限され、下方に肥大したと思われ、根にかかる応力が肥大の方向をコントロールしている例といえる。

---

[46] Nicoll、B.C.and Ray、D.(1996) Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions.Tree Physiology16. 891-898.

[47] Stokes、A.、Guitard、D. (1997) Tree Root Response to Mechanical Stress. In: Altman、A.、Waisel、Y. (eds) Biology of Root Formation and Development. Basic Life Sciences、vol 65. Springer、Boston、MA.

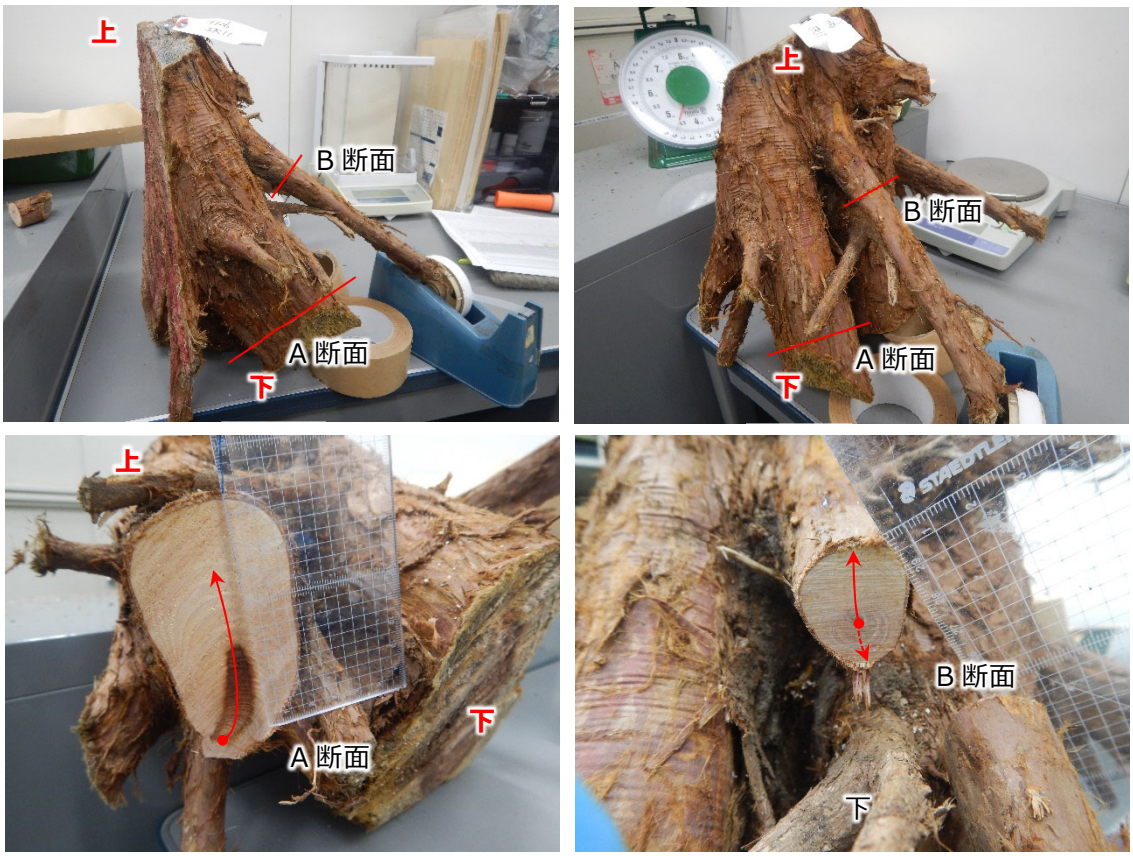


図 2.141 5 列 R1 行 1 層目の根系肥大成長の状況

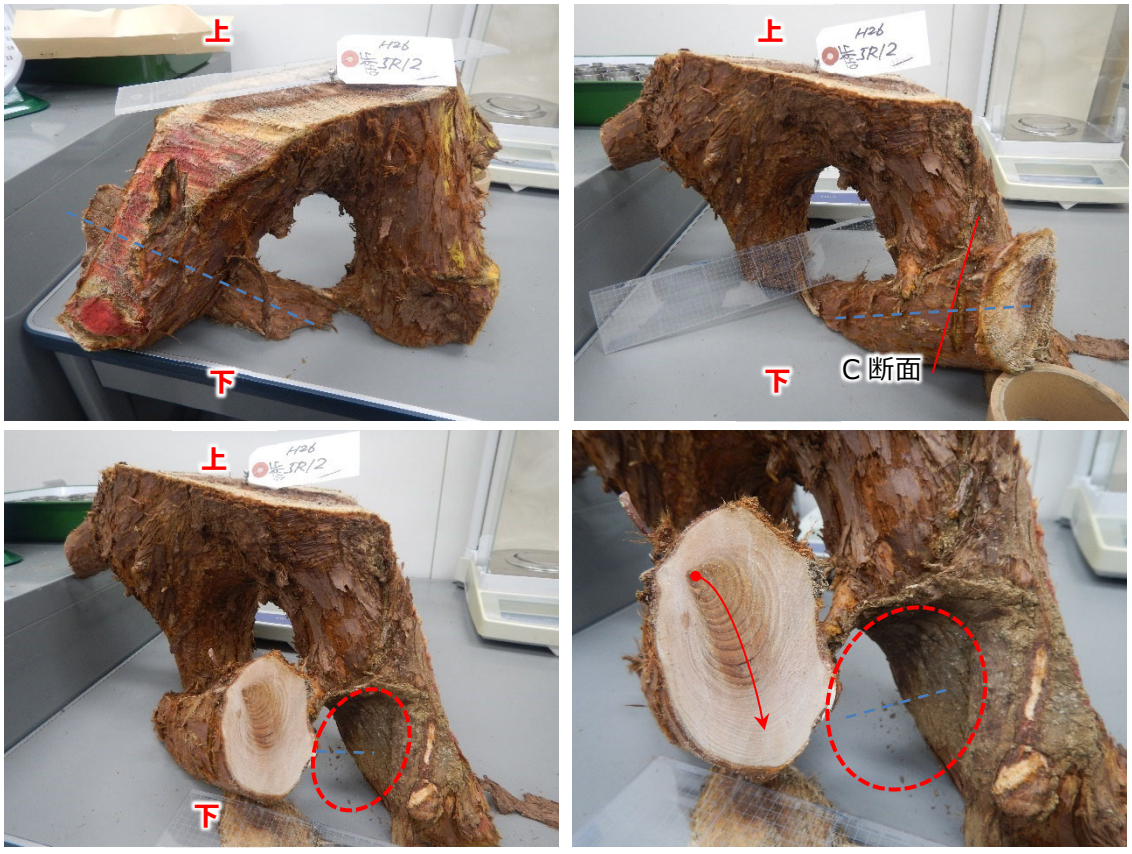


図 2.142 5 列 R1 行目 2 層目の根系肥大成長の状況

(3)樹体による上載荷重による斜面安定性への影響

陳丽华ら(2008)[48]は、根系の土層に対する影響を評価するため、2 次元有限要素法を用いて斜面と根系をそれぞれモデル化し、数値解析によって根系と土層の相互作用について検討を加えた。解析の結果、地上部の立木の重量による局所的な載荷の影響は図 2.143 のとおり、深度 3m 程度にまで及ぶことを示した。

本調査では、土壌と根系のブロックサンプリングを実施した。その際、立木直下の土壌が土壌硬度計で 27mm を超えて強く固結していた。この事実を、立木による上載荷重の結果と考えることは、前述の解析結果と調和的であるといえる。また、立木による載荷は、斜面内の応力分布を不均一化させつつ、その変化が土層の深部に及んで土層強度を大きくし、斜面を安定化させていることを示唆した(図 2.144 参照)。

これまで根系の土層に対する強度補強は、均質なものとして表土層下部のせん断域におけるせん断強度に限定して評価されてきた。しかし、根系による不均質な強度補強の分布は、立木による上載荷重の不均一な分布と併せ、結果的に破壊時のせん断域の位置を、地山の深さ方向に押し下げる効果として働いていると考えられる。従来、地上部の立木の重量は、崩壊の誘因となる方向に評価されていたが、本旨に従うと、立木の点的な上載荷重は、地山内に杭補強効果を与えていることになる。

陳丽华ら(2008)の有限要素法による検討は、2 次元斜面に限定しつつも、斜面に生じる変位の大きさを推定でき、せん断域の大きさを評価可能な手法である。そのため、今後せん断域の推定の可能性も含め、3 次元的な根系の分布も考慮しつつ、根系による土層補強による大変位を伴う破壊現象のメカニズム解明の方向性として示唆的である。

また、谷(2016)[49]は、表層崩壊の発生に関わる土層の発達・崩壊のサイクルと、斜面からの水流出および森林の根系補強の相互作用への理解が、災害対策において重要であることを指摘しており、これら現象のさらなる理解が求められている。

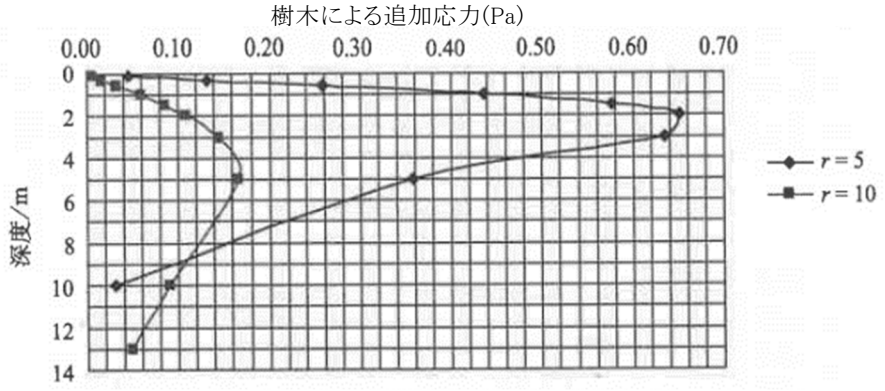


図 2.143　単木負荷の下での様々な土壌深の層における垂直応力分布(r は立木中心からの半径(m))
(樹木から 5m の地点において深度 3m まで垂直応力が負荷される。)

[48] 陈丽华、余新晓、宋维峰、刘秀萍(2008). 林木根系固土力学机制(樹木の根系の土質力学のメカニズム). 科学出版社. P145
[49] 谷誠(2016). 水と土と森の科学. 京都大学出版会. P243

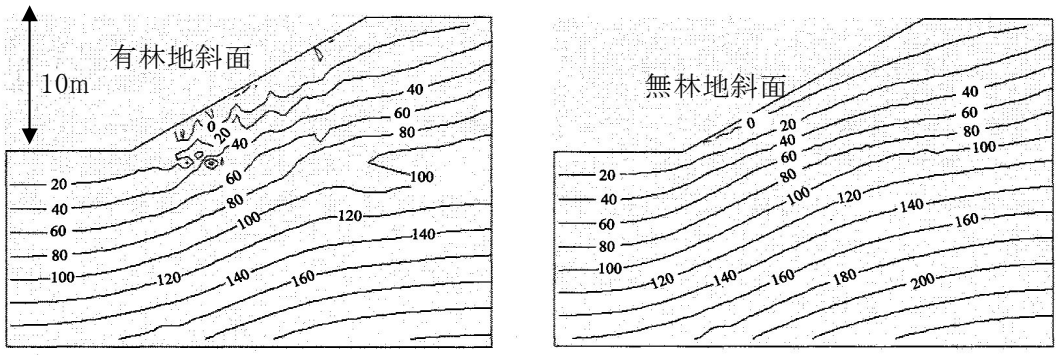


図 2.144　植林の有無による最大主応力の分布の違い
(有林地斜面において樹木の載荷により表土層の初期応力の増加がみられる。)

2.8.2. 根量増加と細根の役割

苅住(2010)は、林分内の根の広がりについて、各単木の根系分布が重複して分布するため、孤立木の周辺とは異なる分布が生じ、立木の樹齢、本数密度や分布位置によって変化するとしている。

第Ⅰ層(0～15cm)に分布する細根のバイオマスは、林齢 20 年程度、胸高断面積 200cm^2 程度までの間で最大となる(図 2.70 参照)。その後、同時的に深さ方向に細根を展開するが、土壌深度部では水分条件とともに、根系の生育に必要な通気性が確保されず、選択的に深度方向の細根を残存させているのではないかと推測している。

根系量の多寡は、外力によって土壌が変形するに当たり、抵抗力を発揮すると考えられる。細根を多く含む表土層は、ほぐれやすいが崩れにくく、立木が自らの成長を促進させるために、土壌条件を保持、改善させていると思われる。

また、細根が多い立木は葉量も多く、地下部とともに地上部も旺盛な成長をしている可能性が高い。植栽木の成長に伴い、地上部が成長するとともに、細根はその存在に適した水分や通気環境に発達し、腐植の形成や団粒構造の発達、粗孔隙率の増加等、細根の存在とともに更新することによって、好ましい環境を維持・発達させていると想定される。(図 2.146 参照)。

適地適木と適切な施業によって根系を発達させることが、土壌の浸透能を確保し、表面侵食防止等をはじめとする水土保全機能、斜面崩壊抑止機能を発揮する点で重要と考えられる(図 2.145 参照)[50]。

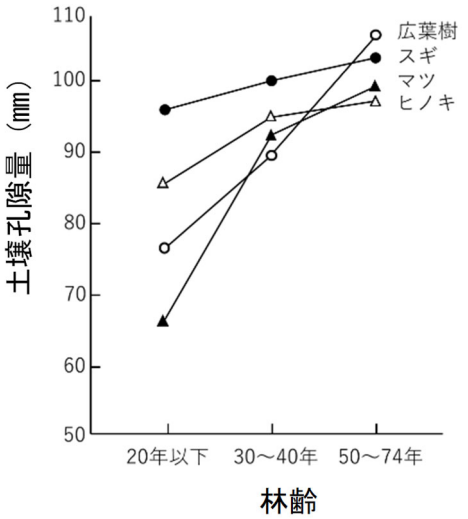


図 2.146 林齢と土壌孔隙量の関係(竹下ら、1977)

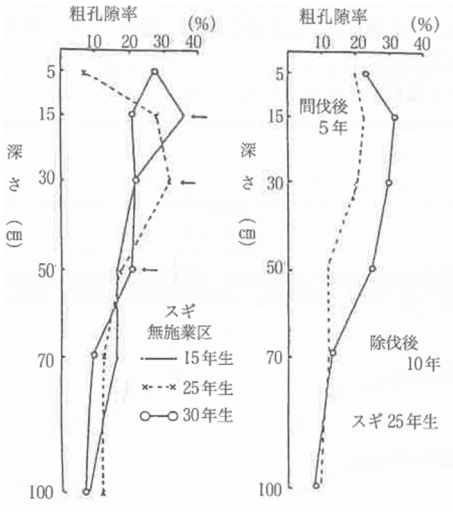


図 2.145　林齢・施業と粗孔隙率

[50] 太田猛彦・服部重昭監修. 財団法人水利科学研究所編(2002)地球環境時代の水と森. 株式会社日本林業調査会. P133

2.8.3. 下層植生(広葉樹)の役割

下層植生の広葉樹は、本事業の根量調査によって、立木密度が低く根際直径が 2～4cm としても、根系を発達させ周辺土壌を固定する能力を発揮している可能性を確認できた。特に、高木層の立木間中心付近は、根系密度が低い。その空間に下層植生の広葉樹が生育することは、単位空間当たりの根量を補完することにつながり、斜面崩壊に対し補強効果を発揮する可能性が高い。

また、低木層の根系については、スギの細根と同程度の強度をもつものが多く、低木ながら、生育立地付近の根系は密度が高く、高木層の根系による斜面表層の安定を支援する役割が大きいと考えられる。深度についても 80cm 近くまで達しているものがある。

なお、宮崎の試験地に多く確認されるアオキはニホンジカの好餌植物であり、その消失は、斜面表層の侵食現象だけでなく、表層土層の安定にも悪影響を与える可能性がある。

上記のように、森林の水土保全機能や斜面崩壊防止機能における下層植生の役割は大きく、下層植生の繁茂を維持・促進させるような森林整備方法の提案等、今後の対応策が必要と考えられる。

3. 表層崩壊防止機能の解説発信業務

「森林の土砂災害防止機能のうち表層崩壊防止機能の解説発信業務」について示す。

3.1. 調査概要

3.1.1. 目的

森林の土砂災害防止機能を理解するための書籍として、「森林の公益的機能シリーズ」の中の「森林の土砂流出防止機能」がある。平易な文書でデータも豊富であり、行政事務上も多数引用されてきている。しかし、出版年度が 1986 年と古く、その内容の中には、正しい知識を普及し理解を促すために新しい知見に置き換えた方が良いと思われるものがみられる。

我が国の森林は現在、成熟期を迎え、かつての幼齢や若齢段階の林相と異なってきており、そのような変化を踏まえた土砂流出防止機能への理解が必要である。加えて、昨今のICTの技術革新、航空レーザの利用や地上レーザ、AI等、調査手法や情報処理技術も発達し、森林の機能評価手法も高度化している。それらを踏まえ、森林の公益的機能に関する既存の知見を新しいものに置き換え、広く一般的に普及していくということが望まれている。

そのため、森林の土砂災害防止機能のうち、表層崩壊防止のメカニズムを解説した情報発信資料を作成することを念頭に、本年度においては項目の柱立てを行うこととする。なお、資料の利用者は、森林の崩壊防止機能について、基礎知識を有しているような自治体の職員等を主なターゲットとして想定する。

本業務のスケジュール案は、図 3.1 のとおりである。

図 3.1　解説発信業務スケジュール案

3.1.2. 項目の柱立て

本解説は 2 つの項目の柱を立てて、作成することとする。

①森林のもつ土砂災害防止機能のうち、表層崩壊防止のメカニズムの解説に有効な事項を整理する「表層崩壊防止機能に係る解説項目の整理」、および②森林の表層崩壊防止機能に広く適切な認知に資する重要かつ最新知見を収集し、主に参考とすべき事項や引用すべき研究成果に関する検討を行う「表層崩壊防止機能に係る既往の研究成果の収集等」の 2 本柱とする。

3.2. 表層崩壊防止機能に係る解説項目の整理

我が国における森林のもつ土砂災害防止機能のうち、表層崩壊防止機能についての解説項目は、表 3.1 のとおりである。

表 3.1 森林のもつ土砂災害防止機能のうち表層崩壊防止機能に関する解説項目(案)

1	**森林の公益的機能の働き**
	① 我が国における森林の働き
	② 降雨の動き(循環)と森林の関係
	③ 森林に到達した降水の動き
2	**森林の表層崩壊防止について**
	① 我が国における土砂災害とは？
	② 森林の土砂災害防止機能とは？
	③ 森林の表層崩壊防止機能とは？
3	**森林における表層崩壊防止のメカニズム**
	① 表層崩壊発生メカニズム(既存の知見)
	② 森林の表層崩壊防止のメカニズム(既存の知見)
	③ 森林の表層崩壊防止機能の解明(新しい知見)
4	**森林状態の変化と表層崩壊防止機能との関係**
	① 森林施業と表層崩壊防止の関係
	② 立木密度(間伐・主伐)の影響(≒短期的影響)
	③ 樹種の影響(≒長期的影響)
	④ 森林の成長(成熟化)による影響(≒長期的影響)
5	**森林の表層崩壊防止機能と近年の豪雨災害の関係について**
	① 気候変動と近年の災害・要因の特徴
	② 必要な観測やモデル化の取組
6	**森林の表層崩壊防止機能を維持・増進するために**
	① 表層崩壊防止機能に係る研究について (必要な観測やモデル化の取組)
	② 表層崩壊防止機能に係る研究成果について (研究により得られた新たな知見)
7	**資料一覧**
	① 文献
	② 論文

3.2.1. 項目の整理における課題と対応方向

第 1 回委員会において、解説書の項目が多く、本事業のみでは対応が難しいのではという意見が出された。そのため、項目の取捨選択や並べ替えを行い、項目建ての整理をして第 2 回検討委員会でご意見を伺った。その結果、概ねこの程度のボリュームで進めることとなった。

同じく第 1 回委員会において、森林の表層崩壊防止機能に限界があるということにも触れておいた方が良いという意見が出された。これに対しては、項目として森林の公益的機能の働きの中で、近年の豪雨にともなう地中のやや深いところで発生する崩壊事象について触れることとし、第 2 回検討委員会でご意見を伺った結果、この方向性で進めることとなった。

また、森林の公益的機能については、エビデンスに基づいて理解を深めることが重要となっていることから、現時点で分かっていること、あるいは分かっていないことを明確にする必要があるという意見が出された。そのため、森林状態の変化と表層崩壊との関係の中で、定量的に評価が十分にされていない部分もあることを示す方向性で進めることとなった。

表 3.2　森林の表層崩壊防止機能に関する解説書(課題)の項目案

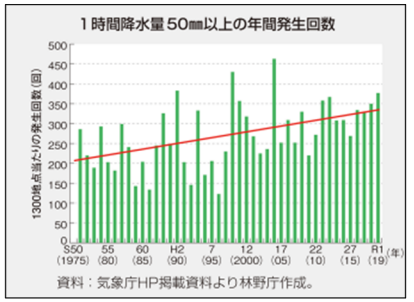
項目案	記載内容のイメージ（太字は伝えたいメッセージ）	キーワード	主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
1　森林の公益的機能の働き				
・我が国における森林の働き ・降雨の動き（循環）と森林の関係 ・森林に到達した降水に動き	**・急峻な地形が多い日本の山地森林では近年、土砂災害が多発化・激甚化する傾向にあり、森林の土砂流出防備機能、土砂崩壊防止機能の維持・向上が必要。** **・我が国の森林は、様々な働きを通じて国民生活の安定向上と国民経済の健全な発展に寄与しており、これらの働きは「森林の有する多面的機能」と呼ばれている。** **・このうち森林は、樹冠により降水を遮断するとともに、表土が下草、低木等の植生や落葉落枝により覆われることで、雨水等による土壌の侵食や流出を防ぐ。また、樹木の根が土砂や岩石等を固定することで、土砂の崩壊を防いでおり、これらを山地災害防止機能、土壌保全機能と呼ばれている。**	土砂流出防備、土砂崩壊防止、森林の有する多面的機能		令和２年度　森林及び林業の動向　林野庁
2　森林の表層崩壊防止について				
・我が国における土砂災害とは？	**・山の斜面が、さまざまな原因でもろくなり、くずれ落ちることを斜面崩壊という。** **・急峻な地形が多い日本の山地森林では近年、土砂災害が多発化・激甚化する傾向にあり、どのような災害が発生しているか紹介する。** **・我が国の国土は、地形が急峻かつ地質が脆ぜい弱であることに加え、前線や台風に伴う豪雨や地震、豪雪等の自然現象が頻発することから、毎年、各地で多くの山地災害が発生している。** **・日本国内で観測される短時間の大雨の発生回数は長期的に増加傾向にあり、毎年のように各地で甚大な山地災害をもたらしている。令和元（2019）年には、令和元年房総半島台風（台風第15号）や令和元年東日本台風（台風第19号）に際して、倒木による森林被害や山腹崩壊等の山地災害が発生したことから、林野庁ではこれらの災害の発生原因や特徴、今後の対策等を検討するため、学識経験者による緊急調査を実施した。** **・同年9月の「令和元年房総半島台風」については、千葉県内の多くの地点で観測史上1位の最大瞬間風速を観測する記録的な暴風となったことから、県内各地で大規模な倒木が発生した。森林被害の状況を調査したところ、人工林や天然林、樹種等にかかわらず風倒被害が発生していることや、比較的平坦な地形に小規模な被害地が広範囲に散在するという被害の特徴を確認した。また、中長期的には、リモートセンシング技術も活用して被害地分布等の状況を広域的に明らかにすること等が必要との結果が示された。** **・また、同年10月の「令和元年東日本台風」については、山腹崩壊等が多発した宮城県及び神奈川県で山地災害の調査を実施したところ、短時間の記録的な豪雨により斜面上部の火山灰土などで地下水位が上昇したことにより、立木の根系の及ぶ範囲より深いところで崩壊が発生したことが推定された。**	急峻な地形、土砂災害の多発化・激甚化		令和元年度　森林及び林業の動向　林野庁  資料：気象庁HP掲載資料より林野庁作成。

表 3.3　森林の表層崩壊防止機能に関する解説書(課題)の項目案

項目案	記載内容のイメージ（太字は伝えたいメッセージ）	キーワード	主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
・森林の土砂災害防止機能とは？	**・土壌侵食、表層崩壊、地すべり、土石流などは、斜面崩壊を「崩壊の仕方」で分けた時の分類であり、これらに対して森林が持つ各土砂災害防止機能を説明する。**			
・森林の表層崩壊防止機能とは？	**・斜面崩壊のうち、山の表面をおおっている土壌の部分だけがくずれ落ちることを表層崩壊という。また、土壌の下の岩盤の部分までいっしょにくずれ落ちることを深層崩壊という。なお、表層崩壊・深層崩壊というのは斜面崩壊を「崩壊の深さ（規模）」で分けたときの分類である。** **・土砂災害防止機能のうち、表層崩壊防止機能について少し詳しく概説する。**			
3　森林における表層崩壊防止のメカニズム				
・表層崩壊発生のメカニズム（既存の知見）	**・土質、地質、傾斜、微地形、林相等の素因と降雨、融雪、地震などの誘因について、各項目のこれまでの傾向を解説し、災害基礎資料の見方のポイント(目安)を示す。**			
【コラム】・浸透・流出プロセス（ホートン地表流、飽和側方浸透流、飽和地表流、パイプ流）	**斜面での雨水流出メカニズムについて説明後、補足という位置づけで、「ホートン地表流」「飽和側方浸透流」「飽和地表流」「パイプ流」等の用語の定義について述べる。**	流出メカニズム（洪水緩和機能）	**起こりうる流出のパターンと用語の定義の説明**	森林科学シリーズ　森林と災害 P51 図1.14など 森林斜面の洪水緩和効果はどのように評価できるか　2017谷
・森林の表層崩壊防止のメカニズム（既存の知見）	**・これまでの森林(=根系)と表層崩壊防止機能に関する知見の時代変遷(歴史)と、そのメカニズムについて解説する。** **・木は地面に根を張るので、木の根が杭のように地面の動きをおさえ、くずれを防ぐ力はある。しかし、根の深さは深いものでも1メートルくらいなので、表層崩壊を防ぐ力はあっても、もっと深いところからくずれる深層崩壊には、ほとんど効果がない。**			長野県災害に強い森林づくり指針（2008）1(7)
・森林の表層崩壊防止機能の解明（新しい知見）	**・森林の効く崩壊・効かない崩壊が少しわかってきた。** **・12時間雨量が500㎜以上のエリアでは限定的である。** **・樹種の違いより、樹木の成長による根系の発達状況の方が重要な因子である。**			極端現象の増加による花崗岩山地の表層崩壊発生リスクの変動予測　大丸裕武（平成２９年度委託プロジェクト研究「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発」）2017

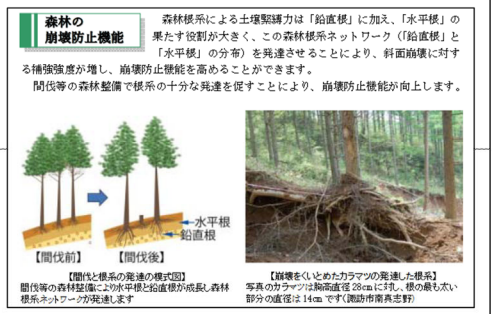


表 3.4　森林の表層崩壊防止機能に関する解説書(課題)の項目案

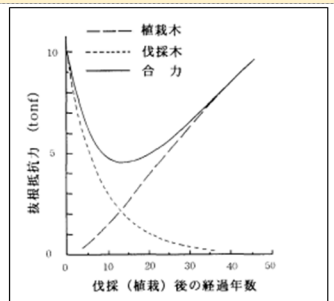
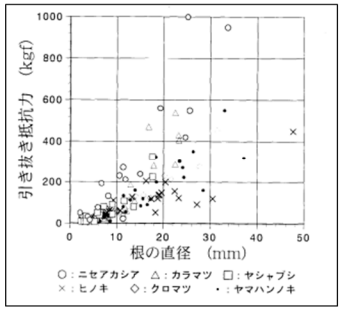
項目案	記載内容のイメージ（太字は伝えたいメッセージ）	キーワード	主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ	
4　森林状態の変化と表層崩壊防止機能との関係					
・森林施業と表層崩壊防止の関係	**・崩壊とそれに引き続く土石流の発生源である森林の土砂災害防止機能を深く究明した例はほとんどなく、その成果から森林管理に結びつけた例は皆無に等しいのが実態。** **・森林を伐採すると根の普及が始まり崩壊防止機能は徐々に低下する。図は、森林伐採後の斜面の相対的安定度を、伐採した後に残される根株を引き抜くときの抵抗力（伐根抵抗力）によって表している。また、根の崩壊防止機能は伐採された木の根と、伐採後に植栽される木の根の両方によってもたらされることから、両者の伐根抵抗力の合計によって、斜面の相対的安定度は求められる。この研究によると伐採後の５~20年くらいの間の安定度は低く、崩壊発生の危険性が高いことを示している。**			長野県災害に強い森林づくり指針（2008）～指針策定にあたって～ 樹木根系の斜面崩壊防止機能 阿部和時（1998.2　森林科学22）	 伐採（植栽）後の経過年数と抜根抵抗力の関係
・立木密度（間伐・主伐）の影響（≒短期的影響）	**・間伐等の森林整備により、森林根系による土壌緊縛力は「鉛直根」に加え、「水平根」の果たす役割が大きく、この森林根系ネットワークを発達させることにより、斜面崩壊に対する「鉛直根」と「水平根」の分布を発達させることにより、斜面崩壊に対する補強強度が増し、崩壊防止機能を高めることができる。** **・長野県の指針は数少ない事例。ただし、森林管理と崩壊の関係性について、定量的に評価が十分にされていない部分もある。**			長野県災害に強い森林づくり指針（2008）指P3	
・樹種の影響（≒長期的影響）	**・樹種の違いだけでなく、広葉樹・針葉樹の違いについても崩壊防止力の違いについては明らかでない。この点を解明するための調査が始められた。　図は、苗畑に生育させたヒノキ・ヤマハンノキ・ヤシャブシ・クロマツカラマツ・ニセアカシアの６樹種の根の引き抜き抵抗力の結果である。すべり面まで伸長する根は太いものが少ないため、一本の根の持つ土の補強強度については樹種間の差がないと考えられる。つまり、現状では、崩壊防止機能に有効な樹種としては、「その土地で幹・枝・haの地上部を最も大きく成長させることのできる樹種」ということができると考える。根の量は地上部の量と直線的な関係にあることが調査されており、一般的には立派な森林を仕立てれば根の量も当然多くなり、崩壊防止機能も高くなることが期待できるとしている。**			樹木根系の斜面崩壊防止機能 阿部和時（1998.2　森林科学22）	

表 3.5　森林の表層崩壊防止機能に関する解説書(課題)の項目案

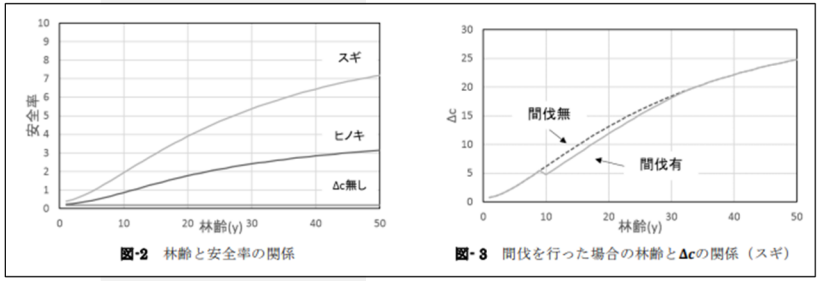
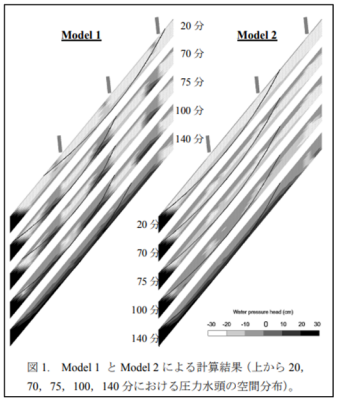
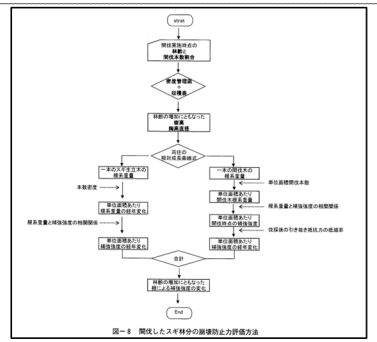
項目案	記載内容のイメージ（太字は伝えたいメッセージ）	キーワード	主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
・森林の成長（成熟化）による影響（≒長期的影響）	**・森林域における表層崩壊には、樹木の根が崩壊防止に大きく影響していると考えられている。一般に、樹木根系による表層崩壊防止力は、土の粘着力増分として捉えられ、根一本当たりの引き抜き抵抗力、表土層に分布する樹根量等の現地調査を経て多数の研究者により見積もられている。樹木根系による表層崩壊防止力は、幼齢林では不十分であり、拡大造林が実施される以前では多くの表層崩壊が発生していたが、ほとんどの森林で間伐遅れが生じる程に壮齢化した現在ではほとんど表層崩壊が発生しないとも言われている。** **・岡村らの斜面安定解析では、斜面崩壊を発生させようとする滑動力と、斜面崩壊を抑えようとする抵抗力の比である安全率を用いて評価している。** **・一般に造林直後の森林では表層崩壊を抑えることができないが、成長した樹木は風化土壌層の崩壊を抑えることができるといわれている。また、スギ、ヒノキでは壮齢林に達する前に十分な崩壊防止力が得られるということが検証された。また間伐を行った場合にはΔcが減少するが、斜面崩壊に与える影響は少ないと考えられた。**			樹根による表層斜面崩壊防止効果の森林成長に伴う変化　岡村友貴・小島利治（水文・水資源学会研究発表会要旨集 31(0)、232、 2018）  **図-2**　林齢と安全率の関係　　**図-3**　間伐を行った場合の林齢と**Δc**の関係（スギ）
5　森林の表層崩壊防止機能と近年の豪雨災害の関係について				
・気候変動と近年の災害・要因の特徴	**・近年の豪雨特性として、80mm/hを超える大きな降雨強度の雨が、数時間継続して局所的に出現する傾向がある。**			・平成29年7月九州北部豪雨への林野庁の取組について（林野庁） ・平成29年7月九州北部豪雨による斜面における表層崩壊の要因分析 図9（浅田、 応用生態工学、 2020） ・平成29年7 月九州北部豪雨における林地被害状況（黒川、 水利科学、 2019）
・必要な観測やモデル化の取組	**・1980年代くらいまでの表層崩壊には森林による抑止力が効いていたが、近年の豪雨特性の下では、朝倉の災害(九州北部災害)のようなやや深いところで発生する崩壊事象も出てきており、森林の崩壊防止機能には限界があ**ることも知っておくことが重要。	森林の表層崩壊防止機能の限界		
6　森林の表層崩壊防止機能を維持・増進するために				
・表層崩壊防止機能に係る研究について				
（必要な観測やモデル化の取組）	**・気候変動を踏まえた森林管理を進めていく上で、必要となる観測方法や評価手法、モデル構築**について説明。			物理則モデルによる表層崩壊危険度評価（黒川・阿部・大丸・松浦）2007
	・メカニズム解明のための新たな取組み（浸透流解析（２D、 3D）及び斜面安定解析（２D、 3D）、樹木根系による粘着力増分（ΔC）と根量（Wr）との関係、地上部森林情報からの根量の推計、及び航空レーザ・地上レーザを用いた微地形把握などを紹介する。			

表 3.6　森林の表層崩壊防止機能に関する解説書(課題)の項目案

項目案	記載内容のイメージ（太字は伝えたいメッセージ）	キーワード	主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
	・森林における樹木の根系発達は、表層崩壊を抑制する効果がある。それは、土層と基岩層の境界面を横切って侵入した根がせん断抵抗力を補強するためであると認識されている。ただし、浅根性樹種や若い人工林では、樹木の根系が基岩まで到達せず、根による働きは浅い表層部に限られると考えられる。 一方、Liang et al. (2007) は、降雨インプットの偏在が斜面水文過程に大いに影響を与え、特に樹幹流が土層内飽和帯の形成に寄与することを明らかにした。土層内飽和帯の形成は、表層崩壊発生の予測において極めて重要な要素である。既往研究で開発された水文モデルの多くは、樹幹流による雨水の集中を無視しているが、土壌水分動態の再現や表層崩壊発生の予測には、樹幹流による降雨インプットの偏在に起因する不均質は飽和帯の形成を考慮する必要があることが示された。			樹幹流浸透が斜面安定に与える影響に関する数値実験（第58回平成21年度砂防学会研究発表会概要集）（梁・小杉・水山）2009  図 1.　Model 1 と Model 2 による計算結果（上から 20, 70, 75, 100, 140 分における圧力水頭の空間分布）。
・表層崩壊防止機能に係る研究成果について				
（研究により得られた新たな知見）	最近取り組まれている関連する研究、事業等を紹介する。			
	近年、日本の人工林では森林・林業を取り巻く情勢が悪化して間伐を実施することができず、細い木が林立した立木本数密度の高い人工林が増えている。 このような林分では根系の発達が悪く、森林が持つ表層崩壊防止機能が劣るのではないかとの懸念が強いため、既往の研究をもとに間伐の影響も加えた森林の崩壊防止機能を評価できる方法を提案することを目的とした。ここではスギの人工林を対象とし、間伐された木の根が徐々に腐朽して崩壊防止機能が減少する過程を根の引き抜き試験によって調査したところ、間伐後約10年で根の引き抜き抵抗力は消失することが明らかになった。また、強い間伐を多く実施した林分の萌芽崩壊防止力が低いことが示され、特に、30～40年生以上の壮齢林における間伐は崩壊防止力の上昇傾向を大きく鈍らせた。しかし、一般的に間伐が15年生頃から行われることを考えると、表層崩壊が多発しやすい20年生以下の幼齢林では間伐の影響が現れることはなかった。これらの結果から、間伐は病虫害や気象害などに強い健全な森林を造成するために実施し、このような健全な森林が形成されることで必然的に崩壊防止機能も発揮されると考えるべきである。			間伐が森林のもつ表層崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発（日本地すべり学会誌　41巻(2004-2005)3号）（阿部・黒川・竹内）2004  図－8　間伐したスギ林分の崩壊防止力評価方法
7　資料一覧				
・文献 ・論文	・本解説に用いた（参考にした）文献、論文を誰でもが平易に確認できるようにリストとして載せる。			

3.2.2. 表層崩壊防止機能に係る既往の研究成果の収集

森林の表層崩壊防止機能について、広く適切な認知に資するため、重要な知見を収集した。また、表層崩壊防止機能に係る解説項目について、整理した各項目について、主に論ずべき事項や引用すべき研究成果を収集した。結果を表 3.7 から表 3.17 に示す。

表 3.7　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B1	樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究	阿部和時	森林総合研究所研究報告	373	1997		この研究は樹木根系の持つ斜面崩壊防止機能の定量的評価方法を根系分布と根の力学的研究をもとに開発することを目的とした。研究対象樹種として主要造林樹種であるスギを用いた。線系分布の研究では、深さ方向の根の体積分布、直径階別本数、平均根系体積に関して規則性が見い出され、それらの結果から根系分布再現モデルが提案された。根の力学的研究では、室内一面せん断試験で根による土のせん断抵抗力補強強度(ΔS)が破壊規準の中で独立した定数項として表現できることが明らかになった。この結果とせん断土層中の根の変形状態を表す式からΔS を表す基本ΔS モデルを提案した。 さらに、このモデルを実際の林地斜面に適用できるように根の引き抜き抵抗力を用いた実用ΔS モデルに変形した。引き抜き抵抗力は比較的容易に測定できるうえ、根の複雑な形状の影響、斜面の土質・土壌の影響も反映しているため、ΔS の推定には最も適している。実用ΔS モデルは室内一面せん断試験と引き抜き試験、さらに原位置大型一面せん断試験と原位置引き抜き試験によって、その有効性を確認した。 最後に、根系分布モデルと実用ΔS モデルによって、スギ林分の斜面崩壊防止機能をシミュレートした。その結果、基岩層に亀裂が多い斜面や基岩層の表面で風化が進んでいる斜面で根系は崩壊防止に重要な役割を果たしていることが示された。また、現場の森林管理担当者が森林の崩壊防止機能を考慮した森林管理に利用できるように、崩壊防止機能を評価する方法を提示した。 https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/351/documents/373-3.pdf
B2	崩壊に強い森林とは	阿辻雅言	長野県林業総合センター技術情報	№148	2014		森林は崩壊防止機能を持つと知られているが、森林の管理と崩壊防止機能の関係はあまり知られていない。表層崩壊の発生防止には樹木の根系が大きく寄与すると考えられているが、具体的にどれほどの抵抗力があるかは不明である。本研究は、地下を掘削することなく、毎木調査による地上の情報から崩壊防止力を推定し二次元分布図を作成した。推定法はヒノキ人工林、広葉樹天然林で有意な結果となったものの、精度の向上は必要である。 崩壊に強い森林とは、崩壊防止力の弱所が存在しない森林である。それは一般的には間伐により肥大成長が促され、立木間隔が離れすぎていない森林である。本研究で開発したΔC マップを用いれば、崩壊防止力の二次元分布が視覚的に示される。また、間伐前後の崩壊防止力時系列変化も予測できるようになった。すなわち、崩壊に強い森林を目指した施業を示すことが可能となる。このことは、崩壊の発生しやすい急斜地や、集水地形であるゼロ次谷の森林において、特に適切な施業指針を作る助けとなると考える。 https://www.pref.nagano.lg.jp/ringyosogo/seika/gijyutsu/documents/jyouhou148.pdf
B3	樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究	今井久	ハザマ研究年報	2008.12	2008		斜面工ではモルタル吹きつけなどに替わり、樹木による緑化が多く適用されている。樹木による緑化は、二酸化炭素吸収による地球温暖化対策など環境的な効果、維持管理コスト節約、土壌侵食防止、斜面崩壊抑止など有益な効果が期待される。本報では、樹木根系の斜面崩壊抑止効果に着目し、既往の文献調査により根系効果の可能性、根系効果の斜面安定への評価方法を整理した。また、仮想斜面における根系の斜面安定効果を試算した。 この調査、試算結果から、樹木根系の斜面崩壊抑止効果のあることを確認し、この効果の信頼性を高めるために必要な研究課題を明らかにした。 https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_9375870_po_06.pdf?contentNo=1&alternativeNo=
B4	間伐が及ぼすヒノキ根系の崩壊防止機能への影響	今井裕太郎・小野裕・北原曜	日本森林学会大会学術講演集	119	2008		森林施業と森林根系の崩壊防止機能の関係は未解明な部分が多い。とりわけ間伐遅れの森林では、崩壊発生率が高いとされているが、間伐等の森林施業の有無と崩壊発生の関係についての力学的解明は不十分である。力学的には、森林根系は、崩壊に対してその引き抜き抵抗力が、土壌のせん断抵抗力における粘着力増強分として効果を発揮しているが、間伐と根系分布の関係については明らかにされていない。 そこで本研究では、根系分布調査を行い、間伐が及ぼす崩壊防止機能への影響を力学的に、時系列で評価することを目的とした。まず、間伐後 10、16 年が経過した林分(ヒノキ)での調査結果では、立木、切り株間においてΔC(単位面積当たり引き抜き抵抗力合計値：kN/m^2)は立木から切り株に近づくにつれ徐々に減少し、切り株の位置で最小となる傾向を示した。これは間伐後 10 年以上経過したことで、間伐された木の根系のほとんどが腐朽消滅したためと考えられる。間伐後 5 年が経過した林分では、前述したような切り株の位置でΔC が最小となる傾向にはならなかった。 調査ポイントによって切り株から伸長する腐朽根の量に大きな差があり、間伐後 5 年では根系の腐朽速度の差がΔC に影響を及ぼした可能性があると考えられる。また、各調査ポイントでの立木、切り株間における最弱ΔC と間伐後経過年数は正の直線式で近似でき、危険率 5%で有意であった。これは間伐をし、年数が経過することにより、間伐された木の根系が占有していた空間に、残された立木の根系が伸長したためと考えられる。このことから、間伐後経過年数が大きくなるほど最弱部ΔC が補強され、斜面の力学的強度は直線的に高まると考えられる。 https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/R1itaku/R1ippan/attach/pdf/index-114.pdf
B5	スギ根系が持つ崩壊防止力の評価方法に関する研究	掛谷亮太・阿部和時・垂水秀樹・大澤光・森千夏・金子凜	第 124 回日本森林学会大会		2013	崩壊防止機能、樹木根系、引き抜き抵抗力、変位量、シミュレーション	スギ根系が持つ崩壊防止力は、根系の引き抜き抵抗力で評価できると考えて研究が行われてきた。しかし、それぞれの根で最大引き抜き抵抗力が現れるまでの変位量が異なること、崩壊時には様々な角度で引き抜かれることが考えられる。このためスギ根系の崩壊防止力を評価する場合は、根の変位量と引き抜き角度も考慮しなくてはならない。そこで本研究ではスギの根に変位計を取り付けた引き抜き試験を 0°、30°、45°、60°、90°、120°の 6 方向で行った。さらに、この結果を用いて変位量と引き抜き角度を考慮した場合と、考慮しなかった場合のシミュレーションを行い、それぞれの崩壊防止力を評価した。 引き抜き試験の結果、直径と最大引き抜き抵抗力の関係は、引き抜き角度の影響を受けないこと、最大変位量は引き抜き角度の影響を受けることが分かった。シミュレーションの結果では、根の引き抜き角度と変位量を考慮した場合の崩壊防止力は、約 6.3kN～約 7.8kN と計算され、考慮しなかった場合の崩壊防止力は約 19kN と計算された。このことから従来の方法では樹木根系の崩壊防止力を過大評価していたことがわかった。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/124/0/124_144/_article/-char/ja
B6	原位置せん断試験による森林の崩壊防止機能の考察	掛谷亮太・荒金達彦・村津匠・阿部和時・岡田康彦	関東森林研究	65-2	2014	根系、原位置せん断試験、せん断域、表層崩壊	表層崩壊が発生する際、土壌層と基岩との境ですべり面となって崩壊が発生する。従来の根系による崩壊防止力は、すべり面に根系が存在する場合に発揮されると考えられてきた。これまでに行われてきたせん断試験ではすべり面(厚さはない)を想定し、せん断面に存在する根系の崩壊防止力を測定していた。しかし、実際にせん断試験を実施すると、すべり面と呼ぶような薄いせん断面は現れず、10～20cm 程度の厚みを持ったせん断域が発生し、この部分を境にしてせん断破壊が起こった。このことから、実際の山地斜面においても厚みを持ったせん断域が発生し、崩壊が起こっていると考えた。そこで、せん断域の厚さによって根系の崩壊防止力に及ぼす影響を明らかにするため、スギ根系を含む土のせん断試験を実施した。 今回の試験ではせん断面積を 1m^2(1m×1m)、せん断域の厚さを 0cm と 50cm の 2 通りに設定し、スギ根系を含む場合と土だけの場合の試験を行った。試験の結果、せん断域を 0cm から 50cm に広げると、根を含んだ土塊のせん断抵抗力のうち、根系による補強効果は 46%から 19%に低下し、せん断域の厚さが根系の崩壊防止機能に強く影響していることが推察できた。 http://www.kantoforest.jp/papers/pdf/65-2-A3.pdf

表 3.8　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B7	ケヤキ人工林の崩壊防止機能	神田誠也・北原曜・小野裕	日本森林学会大会学術講演集	122	2011		森林根系は崩壊防止機能を有しており、近年、森林の崩壊防止機能に関する研究が多くされている。しかし、日本の主要造林樹種を対象とした研究が多く、広葉樹の研究例は少ない。そこで本研究では、ケヤキ根系を対象に調査を行い、根系分布の特徴を明らかにするとともに、崩壊防止力ΔC(kN/m^2)を算出し評価することを目的とした。 根系分布調査の結果、根の出現は地上部から深さ 50cm の間に集中する傾向にあり、深さ 100cm になると根系の出現は稀になる。また、両調査地(諏訪市、松本市)を共分散分析により比較した結果、差があるとは言えないという結果を得た。この結果は、統計的に両調査地を同じように扱っても良いことを示していることから、両調査地を併せ立木間隔と崩壊防止力の関係について示した。立木間隔が広がることによって崩壊防止力は、負のべき乗で減少することが認められた。また、ケヤキ人工林の崩壊防止力を他樹種と比較すると、ケヤキの崩壊防止力は他樹種と比べ、かなり高い値が示された。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/122/0/122_0_220/_pdf/-char/ja
B8	森林根系の崩壊防止機能	北原曜	水利科学	311	2010		林内の最弱部である立木間中央のΔC は、造林木の成長とともに増加するが、うっ閉後、間伐が遅れると頭打ちになると考えられる。これに対してうっ閉前後の適期に間伐すると、間伐木直下のΔC は根系の腐朽により急速に低下するものの、残存木根系の伸長により伐採後 5 年程度で元の状態に戻り、以降さらに増加するものと考えられる。 なお、間伐後十分な年数を経た林分では、間伐により立木間中央の最弱部の箇所数が減ることになり、これも林分全体の機能を高めていることになる(今井 2009)。ただし、大きすぎる間伐率は、間伐木が腐朽した場所への残存木からの根系伸長が遅れること、列状間伐は林内に弱線が連続することなどが推定され、崩壊防止機能を期待する森林の施業方法として好ましくないものと考えられる。 以上のように 3 例とも森林根系の斜面安定効果が高く評価され、また間伐の効果が明確に示された結果となった。残念なことに、ΔC は現在まだ地上部の林相からすぐ推定できる段階にはないが、今後斜面安全率を算出する際は、多少なりとも森林根系のΔC を斜面安定式中に加えることが可能になったと考えられる。 森林根系の斜面安定効果に関する研究は、間伐等、森林整備の効果判定もさることながら、最終的な出口の一つとして斜面のΔC 分布図を立木配置などの地上部の林相から推定することにあり、これによって斜面安定診断に大きく寄与することができる。現在までに得られた知見ではまだ不足であるが、近い将来、得られた知見を活用して林相など地上部から斜面のΔC 分布図を推定することは十分可能な段階に来ている。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/suirikagaku/53/6/53_11/_pdf
B9	水平根に着目した森林の土砂崩壊防止機能の評価について-治山事業は水平根を育て、水平根は土砂崩壊防止機能を強化する-	木下篤彦	治山	55(5)	2010		水平根の崩壊抵抗力ΔC を調査する目的で、現地にて水平根の引き抜き試験・分布調査を行った。次に、現地調査の結果を基に林齢や胸高直径等の指標から崩壊抵抗力ΔC を予測する手法について検討した。最後に本調査で検討した崩壊抵抗力ΔC を予測する方法のもと、土砂崩壊防止機能を高める治山事業手法について検討した。 本調査では、水平根の土砂崩壊防止機能に着目し、崩壊抵抗力ΔC を求める手法を提案するとともに、簡易的に求める手法についても提案した。得られた成果は、1)本調査で提案したモデルを用いれば、林齢や間伐履歴を考慮した崩壊抵抗力ΔC の時間変化を計算できる。特徴として、水平根量率を変えることによって崩壊抵抗力ΔC のばらつきを表現できること、林分の成長とともに水平根の根量が増し崩壊抵抗力ΔC が上昇することや、間伐によるΔC の増分の減少およびその後の回復を表現できる。2)本調査で提案した簡易的に崩壊抵抗力ΔC を計算できる手法を用いれば、間伐前後の崩壊抵抗力ΔC の時間変化を容易に計算できる。
B10	間伐が根系に及ぼす影響-長野県におけるカラマツ林の場合-	伴博史･北原曜･小野裕	日本森林学会大会講演要旨集	120	2009		森林根系の崩壊防止機能に関しては、様々な研究が行われてきたが、森林施業との関係に関しては未解明な部分が多い。崩壊時にすべり面において、土壌はせん断に対する抵抗力が発生する。このせん断抵抗力に対して、根系は粘着力増分として崩壊防止機能を持つ。本研究では、長野県など冷涼な地域の代表的な造林樹種であるカラマツの根系を対象とし、間伐が行われた林分と行われなかった林分を調査することにより、間伐がカラマツ根系に及ぼす影響を力学的に評価することを目的とした。 根系分布については、間伐区、無間伐区に関係なく、カラマツ根系は比較的浅い位置に伸長しており、深さ 50cm までに根系が集中した。斜面位置ごとで見ると、斜面下部への侵入が、斜面上部、中部より少ない傾向にあった。同程度の立木間隔では、総出現根系本数に差はないが、間伐区の方が根断面直径 10mm 以上の大径根が多く出現することが明らかになった。また、立木間隔が広がるに従い、出現する根は大径根、小径根ともに減少していく。すなわち、間伐区、無間伐区問わず、立木間隔が広がるに従いΔC は減少するが、間伐区のほうが大径根の出現が多いため、無間伐区よりΔC は大きな値となる。 これらのことから、間伐を行うと大径根が増えΔC が上がるため、崩壊防止機能は上昇すると考えられる。しかし強度間伐により立木間隔が広がるとΔC は減少するため、崩壊防止機能から考えると間伐は必要であるが、適度な間伐強度に留める必要があると考えられた。今回の調査では、無間伐区の平均立木間隔が 2.5m であったため、無間伐区 2.5m の地点を無間伐区の平均ΔC と考えると、導いた回帰式より、間伐区で無間伐区 2.5m よりΔC が大きくなるポイントは、立木間隔が 4.0m 以下のポイントである。以上より、間伐を行い平均立木間隔 4.0m 程度の立木間隔が望ましいと考えられた。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/120/0/120_0_207/_pdf
B11	間伐がカラマツ人工林の崩壊防止機能に与える影響	伴博史･北原曜･小野裕	日本森林学会大会学術講演集	121	2010		森林根系の崩壊防止機能は、様々な研究が行われ、少しずつ解明されて来ている。しかし、施業との関連については、研究すべきテーマが多く残されている。特に、間伐が根系の崩壊防止機能に与える影響は未解明な部分が多い。伴ほか(2010)では、カラマツ根系は間伐により崩壊防止機能が高まる傾向が指摘された。本報では、これまでの研究に加え、様々な条件のカラマツ林において、間伐が行われた林分と行われなかった林分を調査し、間伐がカラマツ根系に与える影響を詳しく評価することを目的とした。 根系分布調査の結果、カラマツ根系の出現本数は間伐の影響はなく、立木間隔が広がるにつれて、指数関数的に減少することが明らかとなった。地質、地形の違いにより多少の差が出たものの大きな影響はなく、立木間中央部への出現本数は立木間隔に影響されると考えられた。次に、出現根系を 10mm 以上の太い根系に限定すると、間伐を行った方が、太い根系が多く出現した。出現本数に間伐の影響がないことから、間伐により太い根系が増えると考えられる。この結果は、地質がローム質、マサ土に関係なかった。しかし、石礫が多く出現した結晶片岩の調査地では間伐を行っているにもかかわらず、10mm 以上の根系が少ない結果となった。このことから、間伐により、10mm 以上根系は増えるが、石礫が多く出現する場合など、地質、地形により影響を受けることが推察された。しかし、結晶片岩の調査地では立木密度が小さく、立木間隔が広いということも原因として考えられる。次にΔC について、間伐を行った方が太い根系が増えることから、同一立木間隔で比較すると、間伐を行った方がΔC も大きな値となった。ΔC は出現本数や、太い根系の出現の影響を受ける。今回の調査では、ΔC もその影響を受けている。これらのことから、間伐を行った方が崩壊防止機能は上昇する。しかし、地質、地形、立木密度などの要因で受ける影響は異なる可能性が考えられた。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/121/0/121_0_194/_pdf

表 3.9　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B12	根系の引張り強度から推定した斜面安定効果に及ぼす樹木根系の効果(英文)	阿部和時・岩元賢	日林誌	68(12)	1986		山の地すべり面を見ると、そこに壊れた根を見つけることができる。これは、樹木の根が地すべり防止に重要な役割を果たすことを意味している。斜面安定性に及ぼす樹木根の影響は、いくつかの研究報告で土壌せん断強度の増加として説明された。大規模直接剪断装置(阿部・岩元、1985a、b、c、1986)を用いて作ったように、生きている樹木の根を用いた一連の土壌せん断試験によって系統的にこれを証明した。その結果から、土壌中の樹木の根は、根と土の間の摩擦強度、根の引張強さおよびそれらの複合強度などのいくつかの影響を有すると結論付けられた。これらの影響は、土壌凝集力を高める要因とみなすことができる。 根の引張強度に関する報告がある。O'LOUGHLIN(1974)は、伐採後のダグラス・ファー(Psuedotsuga menziesii(MIRB.)FRANCO var. menziesii)およびWestern redcedar(Thuja plicata DONN)の根張力の値を決定した。 BURROUGHS and THOMAS(1977)は、海岸沿いのダグラス・ファーとロッキー山脈のダグラス・ファーの根張力の低下を研究した。 NAKANEら(1983)は、森林火災後の日本アカマツ(Pinus densiflora S. et Z.)の根張力の低下を測定し、根系による土壌保持の引張強さについて議論した。しかし、根の引張強さや根の効果を評価する研究はほとんどないと思われる。したがって、森林斜面の安定性を検討するに当たり、最初に主樹種の根張力を評価する必要がある。私たちは、簡単な装置を設計し、スギの根張力を測定する試験を行った(Cryptomeria japonicaD. DON)。本文では、装置、試験方法、結果および勾配安定性に関するいくつかの議論を記載した。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjfs1953/68/12/68_12_505/_pdf/-char/ja
B13	樹木根系分布シミュレーションモデル-斜面安定解析への適応を考慮したモデル-(英文)	阿部和時・岩元賢	日林誌	72(5)	1990		樹木根系の持つ崩壊防止効果を定量的に評価するためには根系の力学的強度とともに、量的に分布状態を把握する必要がある。このため斜面の安定計算に適応可能な根系分布シミュレーションモデルをつくりスギに適用した。モデルを作るに当たり 5 地域からサンプリングされた 15 本のスギを対象に根系分布の特徴を調べた。モデルの特徴は胸高直径、樹高、最大根系侵入深の情報から根系分布のシミュレーションが行える点と、崩壊すべり面に存在するであろう mm 単位の細い根系の量についても推定可能な点である。モデルは次のように構成されている。①相対成長式等によって対象とする樹木の全根系材積を求める。②表層土を 10cm 間隔に水平方向に分割して 10cm 厚さの土壌層を想定し、各土壌層中の根系材積をワイブル分布で求める。③根系の直径階級別本数分布割合と直径階級ごとの 1 本当たりの根系材積から、各土壌層の直径階級別根系本数を求める。④②と③で求めた材積が等しくなったときの根系本数をモデルによる推定値とする。シミュレーションの結果、地表面から深さ約 20cm の範囲では適合が悪い場合もあったが、全体的に適合度は高く、斜面安定解析に適用しうると考えている。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjfs1953/72/5/72_5_375/_pdf/-char/ja
B14	樹木根系の分布特性と斜面の保護・安定効果	阿部和時	緑化工技術	10(3)	1984		これまでの研究結果は、いずれも根系の各種効果について定性的な評価の事例が多いため、普遍的な森林の土地保全機能の評価は十分でないようである。本文では樹木の根系分布特性からみた落石発生防止効果、斜面崩壊防止効果に関して、これまでの諸先輩の知見のとりまとめと、著者らの調査事例を参考にして、樹木根系の分布による斜面保護と安定に関する効果について報告した。地形、地質、土壌、気象といった立地条件に加え、樹種、林分状態、林齢など種々の要因が複雑に関係する根系の分布状態を適確に把握することは難しい。しかし、林木に落石防止や崩壊防止といった斜面安定効果を期待する場合、どうしても根系の能力を定量的に求めなくてはならず、当然分布状態の把握も必要となる。特に斜面崩壊防止を期待する場合は、基岩と土壌層の境界部での根系分布、落石防止を期待する場合には地表面近くでの根系分布を把握しなければならない。そこで、根系分布に関係する多数の要因から、出来る限り少数の要因を使って、基岩に広範囲な根系分布を把握推察できる方法を確立することが望まれる。例えば、「ある地質で、土壌の厚さが何 cm の場合、何年生のこの樹種なら、この程度の根系分布が予想される。」といった具合のものである。 分布状況が把握できるならば、根系の物理的な力を掛けて、その効果を定量的に評価することが可能になる。根系の力は根系の作用形態によって異なり、その作用ごとの力を求めておく必要がある。著者らの行っている直接セン断試験も根系の力を求めるものであるが、土壌条件や含水条件が異なると作用形態も異なり、ここにも多数の要因が含まれ、複雑な問題がある。根系は目に見えぬ地中に分布しているだけに、このような方法を成立させるためにも大変な仕事量になるであろう。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsrt1973/10/3/10_3_1/_pdf
B15	樹木根系の変位を考慮した土のせん断抵抗力補強の解明	阿部和時	林業土木施設研究所報	12	2009		根系の崩壊防止機能に関する既往の研究では、根の変位を考慮した研究例は極めてまれであった。今回の調査で、根の最大引き抜き抵抗力が表れるまでの変位は、それぞれの根によってばらつきが大きいこと、根の引き抜き方向によってさらにばらつきが大きくなることが示された。これらの結果は、単に 1 本 1 本の根の力の合計によって根の崩壊防止力を評価すると、過大な値が算出されることを意味している。また、今回はスギで実験を行ったが、異なる樹種による実験データ、広葉樹の水平・鉛直根の実験データ等も収集し比較することによって、より詳しく斜面崩壊時の根系の働きを調べたいと考えている。 本年度の実験では十分なデータ数がないので明確な結論を述べることはできないが、根の崩壊防止機能の研究に関して、新たな方向性が見えたと考えている。
B16	スギ引き倒し試験における樹幹の曲げ応力分布	茅島信行・佐々木重行	九州森林研究	64	2011	引き倒し試験、幹折れ、曲げ応力、樹幹形状、たわみ	スギの引き倒し試験を行い、樹幹のたわみを考慮した曲げ応力の分布について調査した。その結果、樹幹の曲げ応力の分布は荷重によって変化することが分かった。また、任意の高さにおける最大曲げ応力計算値の分布は、樹幹形状が円錐の場合は樹高の 1/3 以下ではほぼ一様な応力分布を示すのに対し、樹幹形状が完満な場合は根元付近で最大となる応力分布を示すことが分かった。以上より、樹幹形状が円錐から完満になるにしたがって、幹折れ高さやモメが入る範囲は低く狭くなるが、一方で根返りが発生しやすくなることが示唆された。 http://ffpsc.agr.kyushu-u.ac.jp/kfs/kfr/64/bin110805205914009.pdf
B17	スギ試験林における引き倒し試験	茅島信行・佐々木重行	九州森林研究	63	2010	引き倒し試験、根返り、最大回転モーメント、胸高直径、水平根	福岡県内のスギ試験林において立木の引き倒し試験を行い、胸高直径、樹高、地上部重量などの地上部情報に加え、根株重量、根系形状などの地下部情報と、根元の最大回転モーメントや被害形態との関係を調査した。その結果、根元の最大回転モーメント即ち根系の最大抵抗モーメントは、胸高直径、根元直径などの直径因子や地上部重量、根株重量などの重量因子と高い相関があることが分かった。地上部で測定可能かつ相関の高かった胸高直径、根元直径とは、それぞれ 2.78 乗、3.07 乗に比例した。また、同じ胸高直径、根株重量の個体であっても、根系が浅い水平根型では根系が深い斜出根型と比較して根返りを生じやすいことが示唆された。 http://ffpsc.agr.kyushu-u.ac.jp/jfs-q/cgi-bin/db/kfr_63/bin/bin100501160114009.pdf

表 3.10　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B18	斜面傾斜地における根系分布の偏りが引き倒し試験に与える影響	茅島信行・佐々木重行	森林立地	52(2)	2010	引き倒し試験、斜面傾斜、最大回転モーメント、根系分布、スギ	斜面傾斜の違いが引き倒し試験における根元の最大回転モーメントに与える影響を明らかにするため、傾斜の異なる 4 斜面の 14 年生スギ林において、斜面上方と下方に向けてそれぞれ立木の引き倒し試験を行った。また、根元の最大回転モーメントに影響を与えると考えられる根系分布の指標として、根張り範囲や根系中心から斜面方向 10cm ごとの乾燥重量および根系の断面積合計を測定し、引き倒し試験結果との関係について検討した。 その結果、斜面傾斜が急になるほど斜面上方に引き倒す場合と比較して、斜面下方に引き倒す場合に最大回転モーメントが増加する傾向がみられた。根系調査の結果、斜面傾斜が急になると斜面下方に対して、上方や側方の根張り範囲が広くなることが分かった。また、斜面傾斜が急になると斜面下方よりも斜面上方に分布する根系の重量、断面積合計ともに増加することから、傾斜地では斜面下方と比較して斜面上方により太い根が多く分布する傾向が示された。斜面傾斜地における引き倒し試験結果と根系分布の関係を検討したところ、斜面上方に太い根系が多く分布するほど、斜面上方に引き倒す場合と比較して、斜面下方に引き倒す場合には、根元の最大回転モーメントが増加することが分かった。したがって、スギの引き倒し試験は斜面上における根系分布の影響を受け、斜面傾斜角と引き倒し方向の違いにより試験結果が異なることが示された。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjfe/52/2/52_KJ00007017246/_pdf/-char/ja
B19	表層崩壊と森林	佐藤創	森林科学	47	2006		森林の働きとして流域保全機能が大変注目されるようになってきたが、流域保全機能のうち水源涵養機能と土砂流出防止機能については、水質や流量の観測または土壌侵食量の把握などにより直接機能を測定しやすいのに対し、土砂崩壊防止機能については崩壊現象自体が突発的かつ大規模に起こる、直接観測が難しい現象であるために、その定量的把握にはいろいろな角度からの試みがなされてきた。ここではそれらについて紹介し、これまでわかったこと、そして今後解明しなければならないことなどを解説した。 主に、根系の表層崩壊防止効果に焦点を当てて研究成果を紹介してきたが、各パーツの研究成果はあがりつつあると言えるが、実際の崩壊場面において、根系がどのようなメカニズムでどれだけの力で崩壊を抑制するのか、についてはほとんどわかっていない。各パーツの研究を深めることはもちろん重要である。例えば、樹種によるまた斜面断面の特徴(表層土の厚さ、硬さや基盤岩までの深さ)による根張りの違いや根のせん断面での抵抗力の定量化、などについてはまだ解明しなければならない点が多くある。最も現実に近い形で根系効果をみるには、やはり自然斜面における崩壊実験が必要であろう。労力とコストは多大なものがあるが、樹木のある斜面とない斜面において崩壊メカニズムと根系の効果を把握出来る機器を設置し、大量の水を供給し崩壊を起こすことにより、根系が表層崩壊にどのように関わるのかを明らかにすることが出来るであろう。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsk/47/0/47_KJ00004335229/_pdf
B20	植生が表層崩壊発生に与える影響について	執印康裕	砂防学会誌	55(1)	2002		これまで、植生と表層崩壊の関係および植生による表層崩壊防止機能の主たる要因である根系の土質強度補強効果について述べてきたが、最後に植生が表層崩壊に与える影響の定量的評価に向けての私見を述べる。この定量的評価のためには、これまでに行われてきた実証的な研究の成果を個別事例研究としてではなく、より有効に生かすためにも、一般化あるいはモデル化が必要であると考えるが、そのためのモデル化のためには、大まかに言って、土層構造発達モデル、樹木・根系成長モデル、根系補強モデルの、3 種類のモデル化の統合が必要であろう。無論、各モデルにおいてはそれぞれの分野において研究が進められてきていることには論をまたない。 土層構造発達モデルについては、地形学の分野を中心として研究が進められてきており、表層崩壊の発生周期については土層の発達モデルから多くの検討がなされてきている(例えば飯田(1993))。樹木・根系成長モデルについて言えば、土層内部の根系成長モデルを開発する必要があるが、堤ら(2001)のように斜面内の土壌水分の分布に根系の伸長特性を組み込んでモデル化を行うなどの新たな試みが、なされて来ている。しかしながら、植生が表層崩壊発生に与える影響の定量化のために今後必要とされるのは、各モデルから導かれる関係がどのような相互作用をもって、表層崩壊という現象の構造を決定しているかの検討であろう。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/sabo1973/55/1/55_1_71/_pdf
B21	山地急傾斜地におけるヒノキ単木周囲の崩壊防止力分布	神田誠也・北原曜・小野裕	中部森林学会第 2 回大会発表要旨集		2012		表層崩壊の発生箇所は、樹木根系の持つ崩壊防止力が最低となる点を結んだ弱線で発生する(野々田 1994)。そのため樹木単木の根系分布状況は、表層崩壊発生箇所の予測につながると同時に、防災に必要な措置や間伐など森林施業を行う上で重要な情報であると考えられる。そこで本研究では、主要造林樹種である 2 本のヒノキを対象とし、根系分布調査を行い立木周囲の崩壊防止力分布を明らかにすることを目的とした。調査方法は、立木を中心とし半径 1.5m から 0.25cm 刻みで立木中心に向かって同心円状に掘削した。その結果、同程度の DBH を持つ 2 本の立木の崩壊防止力は同心円状に分布していた。 http://www.chubu-shinrin.jp/02kai2012/2012Abst.pdf
B22	斜面の基盤構造と樹木の斜面安定効果	塚本良則・峰松浩彦・城戸毅・小宮山浩司	緑化工技術	11(1)	1984		裸地では侵食形式として表面侵食が卓越している。植生地ではマスウェステング(崩壊等)が卓越する。植物導入により斜面の表面侵食は防止できるが、崩壊という別の侵食形式に移行することになる。崩壊は一般に回帰間隔が長いので、その発生を無視して考える場合が多い。植物は生物本能として自分の生育環境をより良好にする作用をもち、表土の土壌化を促進し、土を膨軟にする。その結果土の力学的強度の低下が起こる。これを補償する意味で根系により土の強度低下を防止し、自分の生育基盤の不安定化をくい止めている。このバランスが失われたとき表層型崩壊が起こるとの見方が著者等の考え方である。植生が旺盛に繁茂する法面ほど潜在的に上記の側面が強く存在しているとみることもできる。上記のような生物的側面を頭に入れながら法面基盤の構造と植物の斜面安定効果について考察を行ってみる。本論文では主として木本植物の成立した法面を対象として、植物の斜面安定効果を考える上での問題点の指摘を行ってみた。 今回は樹根のうち斜出根の働きが斜面安定に与える影響を中心にして斜面分類を行うことを試みた。分類された A(岩盤・表層土タイプ)、B(岩盤根系伸入タイプ)、C(遷移層タイプ)、D(厚表層土タイプ)の斜面において D から A に向うにつれて水平根の働きが大きくなる。A タイプでは水平根の働きが 100%斜面安定に寄与していることとなる。水平根の働きについてはすでに著者の一人が解析しているが、改めて次回本紙上で整理してみたい。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsrt1973/11/1/11_1_1/_pdf
B23	樹木根系の斜面安定効果-主として水平根の量と働きについて-	塚本良則・峰松浩彦・藤波武史	緑化工技術	12(1)	1986		斜面安定に樹木がどのように寄与しているかを解析するためには、樹木集団としての森林の根系発達をモデル化する必要がある。そのとき、1 本の樹木の根系分布を基本に据えざるを得ないが、個々の樹木は地上部、地下部共に全体として森林構造に支配されながら発達する。しかも同時に地上部と地下部は調和を保って成長するという相互関係が存在することを考慮する必要がある。森林の地上部の全体像が与えられるとそれを構成する 1 本の樹木の地上部の構造が決り、その結果として 1 本の樹木の地下部(根系)の分布構造を決めることができる。 1 本の樹木地下部の構造を合成することにより、森林全体の地下部である根系の分布状態を求めることができるということが著者の考え方である。ここではスギ人工林を例にとって、この考え方により根系分布、特に水平根の分布を解析し、樹木根系が斜面安定に与える効果を評価するため基礎研究を行った。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsrt1973/12/1/12_1_11/_pdf/-char/ja

表 3.11　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B24	樹木の根系による斜面崩壊防止機能	鳥田宏行・佐藤創	光珠内季報	128(3)	2002		森林が斜面の崩壊を防止するのに役立っているということは、昔から信じられているようですが、人によっては「大して役に立ってないんじゃないの？」といささか懐疑的な意見を持っている人もいることでしょう。確かに、森林のある場所でも崩壊が発生しており、大木がなぎ倒されている光景を目にすることがあります。そのような現場では、自然の圧倒的な力を感じさせられるとともに、本当に森林が斜面崩壊防止に役立っているのかどうか、懐疑的にならざるを得ない心境になります。「百聞は一見に如かず」というところでしょうか。だからといって、森林地帯での崩壊現場を見ただけで、簡単に「やっぱり役に立っていない」と結論するのも疑問です。では、「役に立つのか、立たないのか、どっちなんだ」と問われれば、「ある場合には役に立つし、ある場合には役に立たない」というのが本当のところでしょう。そこで、「ある場合」とは、どのような場合かを考えてみたいと思います。 ① 森林の崩壊防止機能と崩壊タイプの関係、② 森林の崩壊防止機能の定量的評価の試み、③ 根系の分布と抵抗力、④ 仮想林分でのシミュレーション https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fri/kanko/kiho/pdf/kiho128-3.pdf
B25	間伐がスギの最大引き倒し抵抗モーメントにもたらす影響	藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・壇浦正子・平野恭弘	日本緑化工学会誌	41(2)	2015	引き倒し試験、根鉢、根返り、根系強度、水平根	近年、台風等による森林災害が増加しており、森林の災害に対する抵抗力を増加させるために森林整備が必要とされている。その一つが間伐である。しかし、樹木の風倒や土石流被害に対する抵抗力と間伐の関係は不明な点が多い。そこで本研究では、間伐後 17 年が経過したスギ間伐区と隣接する対照区において引き倒し試験を行い、間伐が抵抗モーメントに及ぼす影響について確認し、その影響因子について解析した。また地上部パラメータとして胸高直径(DBH)・樹高(H)・樹冠幅を、地下部パラメータとして土壌硬度、根返りの際の回転中心の位置とその深さ、根鉢半径を測定した。 その結果、間伐区と対照区では抵抗モーメントと材積(H×DBH2)の関係式が異なり、間伐によって抵抗モーメントが増加することが明らかになった。また、間伐が抵抗モーメントを増加させる要因としては、樹木の地下部の関与が考えられ、根鉢直径は間伐によって大きくなった。これらのことから、間伐によって根の成長が促進され、抵抗モーメントの増大につながることが示唆された。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsrt/41/2/41_308/_pdf/-char/ja
B26	治山用緑化樹種の根系強度について	陶山正憲・原敏男	緑化工技術	13(2)	1988		緑化のための樹種選定基準は目的によって若干異なるが、一般には生態学的特性、繁殖力、生長速度、成林後の利用価値と共に根張りによる土壌緊縛力、抜根抵抗力、および根系の抗張力などによっても規制される。このうち根系の抗張力は、いわゆる深層崩壊に抵抗する力としてはあまり評価されないが、浅層崩壊の軽減や崩壊斜面の表面侵食防止には、極めて効果的であることが知られている。しかしながら、緑化樹種の根系抗張力による斜面安定機構については、現在まだ十分な解答は得られていない。 本報では、引張荷重下における樹木根系の挙動特性ならびに治山用緑化樹種の根系強度について比較検討を行なった。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsrt1973/13/2/13_2_19/_pdf/-char/ja
B27	樹種の違いによる樹木根系の引張強度特性	福田耕司・大塚泰洋・杉山太宏・赤石勝	土木学会第 57 回年次学術講演会	HII-015	2002		本研究では、樹木を根の張り方で 3 通りに分類し引張抵抗力を測定して、引張強度特性の違いについて検討した。また、根の変わりに凧糸を設置した関東ロームの CU 試験結果から、樹木根系の法面補強効果について考察した。 根系の引張強度特性が根の張り方によって分類可能かどうかを調べたが、今回の 14 樹種では、明確な違いが見出せなかった。根系の強度特性を分類できる他のパラメータの有無については更に調べる必要があるが、引張強度の最低もしくは平均値がわかれば、緊縛力を取り入れた設計法の進展に繋がる。より多くのデータ収集が必要である。 http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2002/57-7/57-7-0015.pdf
B28	多様な森林における根系の崩壊防止力分布	北原曜・小野裕・阿辻雅言	地形	37(4)	2016		周辺樹木の根系の崩壊防止力の分布を明らかにするために、ヒノキの根系の分布調査と引き抜き試験を行った。調査結果と樹種ごとの引き抜き試験抵抗の相対値に基づいて、根系の崩壊防止力の分布について 3 つの要因(樹種・座標・胸高直径)のみからなる推定式を作成した。この式は、さまざまな森林について測定された値と一致した。
B29	森林管理と表層崩壊発生の関係について	執印康裕・鶴見和樹・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明	平成 22 年度砂防学会研究発表会(長野大会)口頭発表	T2-03	2010		樹木根系の土質強度補強効果によって森林植生が表層崩壊防止機能を発揮していることは、古くから認識されており、根系の土質強度補強効果の定量的評価について多くの研究がなされてきている。これまでの研究成果を概観すれば、1)根系の土質強度補強効果は主として土の粘着力の増分として認識され、その大きさは数 kPa のオーダーにあること、2)土質強度補強効果の影響は人工林においては林齢と密接に関連し、壮齢林より若齢林において表層崩壊が発生しやすい傾向にあることが示されている。このように森林植生の土質強度補強効果については、既往の研究成果によって、かなりの所まで研究的視点から明確にされてきているが、実際の人工林の森林管理を行なう場合、数百 ha 程度の空間を対象として林齢－土質強度補強効果の定量的もしくは解析的な評価に基づいた森林植生と表層崩壊発生の関係性について出来る限り簡便な手法を用いて把握する必要があると考える。 以上を背景として、宇都宮大学船生演習林のヒノキ人工林を対象に、林齢－表層崩壊の関係に着目して基本的な検討を試みたので、ここに報告する。モデル計算による表層崩壊面積は約 6ha と実際の崩壊面積と比較した大きめの値を示しているが、逆解析によって得られた林齢－粘着力関係は、ある程度まで実際の林齢－崩壊面積分布を再現していることが確認される。また粘着力の値は 5.3kPa から 7.6kPa の範囲にあり、2.3kPa のわずかな変化が林齢－表層崩壊面積分布に影響を与えていることが確認された。本結果は現場でのセン断試験や根系の引き抜き試験等の結果に基づくものではないが、崩壊発生データを簡便な手法を用いて応答的に解析することで、広域における森林管理に必要な情報の一部を取得することへの可能性を示唆するものであると考える。無論より現実的な情報の取得のためには、森林簿情報に基づいた施業履歴および過去の降雨と崩壊履歴等の検討が必要であるが、それについては今後検討していく予定である。 http://www.jsece.or.jp/event/conf/abstract/2010/pdf/T2-04.pdf
B30	森林植生による表層崩壊防止機能の評価に向けて	執印康裕	(一財)砂防・地すべり技術センター機関誌 sabo	98	2009		森林の表層崩壊防止機能の評価について、① 森林植生の表層崩壊防止機能の要因評価手法について ② 解析的手法(安定解析式)を用いた森林植生の表層崩壊防止機能評価について ③ 今後の森林植生による表層崩壊防止機能の評価に向けて
B31	鉄道防備林におけるケヤキ人工林の崩壊防止機能	神田誠也・北原曜・小野裕	中部森林研究	59	2011		人や物資の運搬に使用される鉄道を保全するために、鉄道防備林が設置されている。しかし、鉄道防備林の崩壊・侵食防止に対する研究例は極めて少ない。そこで、本研究においては、鉄道防備林におけるケヤキ根系の崩壊防止機能を解明することを目的とした。調査方法は、立木間中央部にトレンチを掘削し、根系分布と根直径を測定した。根直径と引き抜き抵抗力の関係式より、断面積当たりの引き抜き拡抗力を算出し、これを崩壊防止力とした。その結果、ケヤキ根系の持つ崩壊防止力は、他の樹種、特にカラマツ等、針葉樹に比べて高いことが判明した。このことから鉄道防備林におけるケヤキ人工林の有用性が確認された。

表 3.12　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B32	カラマツ根系の崩壊防止力と立木密度の関係	伴博史･北原曜･小野裕	中部森林研究	59	2011		根系の崩壊防止力と立木密度の関係は未解明な部分が多く、災害に強い森林づくりを行っていくうえでも崩壊防止力が最大となる立木密度を明らかにする必要がある。今回の報告では、昨年の報告に加え、様々な立木密度のカラマツ人工林において、崩壊防止力が最弱とされる立木間中央部の根系分布調査を行い、崩壊防止力を算出し比較することで、立木密度が根系の崩壊防止力に及ぼす影響を評価した。その結果、崩壊防止力は、立木密度 1,000 本/ha 程度までは間伐の効果で上昇していくが、立木密度が 1,000 本/ha より小さくなると、崩壊防止力は低下する傾向が見られた。この結果から、崩壊に対する最適な立木密度を検討した。
B33	樹種による根系分布と引き抜き抵抗力の違い	久保田遼･北原曜･小野裕	中部森林研究	55	2007		これまで、表層崩壊に対する根系の崩壊防止機能について、樹種による違いという観点から論じた研究はほとんど見られない。そこで本研究では、樹種による根系分布形態の特徴や根の力学的な強度を明らかにした上で、樹種ごとに崩壊防止機能を比較することを目的とし、針葉樹としてアカマツ、広葉樹としてミズナラを対象に調査を行った。その結果、引き抜き抵抗力については、アカマツはカラマツと同程度、ミズナラはスギと同程度となった。引き抜き抵抗力は、根の材質が値に大きく影響しているものと考える。また、ミズナラにおける根系分布では、株立ちのものとそうでないものとで根量に差がみられるなどの特徴が明らかになった。
B34	マダケ林の崩壊防止機能の評価	岩波定裕･北原曜･小野裕	中部森林研究	55	2007		日本では古来、植物資源としてタケ類が利用されてきたが、山地防災の面から見てどのような影響があるのか未解明である。そこで本研究では竹林の崩壊防止機能を評価することを目的とし、斜面に成立したマダケ林を対象として根系分布調査と根系の引き抜き抵抗力の測定をおこなった。根系分析調査結果から、深度毎に根系の断面積合計を算出すると、地表部から深さ 0.4mまでの断面積合計が全体の 90%を占めていた。また引き抜き抵抗力の測定結果から断面直径と引き抜き抵抗力の回帰式が得られた。マダケ林内の土壌断面 1 ㎡当たりの引き抜き抵抗力の合計値を算出すると、同様に算出したカラマツ、ヒノキの値よりも大きな値を示した。
B35	立木周囲の崩壊防止力の分布	神田誠也･北原曜･小野裕	中部森林研究	60	2012		崩壊は、崩壊防止力(以下ΔC)の弱部を結んだ弱線において発生するため、急傾斜地における根系分布は崩壊発生箇所を予測する上で重要である。そこで本研究では、立木周囲のΔC 分布を明らかにすることを目的とした。方法は、2 本のヒノキを対象として、対象木の周囲を同心円状に掘削し、トレンチ断面に出現した根系の位置と根直径を調査した。その結果、負のべき乗でΔC が減少する傾向が見られた。また、立木周囲のΔC 分布は、同心円状であったが、上部は小さく、下部で大きい傾向が見られた。根系は全方位に伸長するが、伸長後肥大生長を行う根系は下部において多い可能性が推察された。
B36	山地急傾斜地におけるヒノキ単木周囲の崩壊防止力	神田誠也･北原曜･小野裕	中部森林研究	61	2013		崩壊は、樹木根系の持つ崩壊防止力が最低となる部分で発生することが知られている。そのため単木の根系分布状況は、表層崩壊発生箇所の予測につながると同時に、防災に必要な措置や間伐など森林施業を行う上で重要な情報であると考えられる。そこで本研究では、ヒノキ 2 本に対して根系分布調査を行い、単木周囲の崩壊防止力分布を明らかにすることを目的とした。その結果、同程度の DBH を持つ 2 本の立木の崩壊防止力は同心円状に分布し、根系の分布範囲は同程度であった。しかし本研究ではこれまでの報告と異なり斜面上方に根系分布が偏る傾向にあった。
B37	樹木根系による崩壊防止機能に及ぼす立木密度の影響	白井隆之･相馬健人･北原曜･小野裕	中部森林研究	54	2006		森林は、根系が土壌のせん断抵抗力を補強することにより、山地斜面の崩壊防止に大きく寄与している。しかし、森林施業、特に立木密度が、根系の崩壊防止機能に及ぼす影響については不明な点が多い。そこで本研究では、立木密度と根系の崩壊防止機能の関係を明らかにするため、2 本のヒノキ立木間を対象として、林齢、立木密度ごとに、森林斜面土壌中の水平根分布と引き抜き抵抗力の合計値の測定を行った。なお、調査対象としたヒノキ立木は、関東･中部地方ヒノキ林分密度管理図を参考に、収量比数が一定となる立木間隔、胸高直径を決定して、選定を行った。その結果、同の林齢の場合、密度が疎になると立木の生育状態が良くなるため、立木間隔が広がるにつれ引き抜き抵抗力の合計値は増加する傾向が現れた。また、林齢が大きくなると立木の成長にともない、引き抜き抵抗力の合計値が増加していく傾向が現れた。
B38	土壌水分状態がヒノキ根系の引き抜き抵抗力に及ぼす影響	相馬健人･北原曜･小野裕	中部森林研究	54	2006		森林の崩壊防止機能の評価法として、引き抜き試験がある。しかし過去の研究では、飽和ではなく風乾した土壌水分状態(以下、自然含水状態とする)で引き抜き試験が行われているものが多く、豪雨等により土壌水分が飽和に近くなった場合を想定した例は非常に少ない。そこで、本研究ではヒノキ林を対象として土壌水分を変化させた上での現地引き抜き試験および自作根系引き抜き実験用箱を用いた引き抜き実験を行い、根系の引き抜き抵抗力と土壌水分状態との関係について検討を行った。 その結果、ヒノキの根系引き抜き抵抗力は、自然含水状態に比較して飽和状態では 7 割になること、また、土壌含水率の増加に伴い、根系引き抜き抵抗力は急激な減少ではなく漸減していくことがわかった。
B39	林分における崩壊防止力二次元分布図の構築	阿辻雅言･北原曜･小野裕	中部森林研究	61	2013		胸高直径が同程度の立木間における崩壊防止力は立木間中央が最小である。しかし、既往の研究では均一な林分における立木間の最弱部の検討を主目的としており、不均一な林分での崩壊防止力分布の検討は不十分であるといえる。そこで本研究では、胸高直径や立木配置が不均一な林分における崩壊防止力ΔC の二次元分布モデルを構築することを目的とし、まず既往文献から胸高直径別に立木からの距離とΔC の関係式を求め、林分内のΔC 二次元分布推定図を作成した。次いで、対象林分内に無作為に 7～8 箇所トレンチを掘削し、根系調査によりΔC を求め、作成したΔC 二次元分布推定図と照合し、その精度を検証した。
B40	間伐後の経過年数による根系の崩壊防止機能の違い	今井裕太郎･北原曜･小野裕	中部森林研究	56	2008		本研究では、間伐が及ぼす根系の崩壊防止機能への影響を力学的に評価することを目的とする。調査方法は、ヒノキ人工林において、立木と過去の間伐による切り株の間にトレンチを掘削し、土壌断面に出現した水平根の分布と直径を測定した。次いで、根系の断面直径と伐採経過年数の関係式より生存根、腐朽根の引き抜き抵抗力を算出し、単位断面積当たりの引き抜き抵抗力の合計値ΔC(kN／㎡)を算出した。 その結果、間伐を行った切り株と立木の間で最小となったΔC と、間伐を行っていない立木間での最小ΔC を比較したところ、伐後 16 年で同じ程度となり、伐後 26 年、36 年では大きい値となった。
B41	若齢ヒノキ林における崩壊防止機能の力学的評価	永田惟人･小野裕･北原曜	中部森林研究	58	2010		根系は崩壊防止機能を有しており、過去に多くの研究がなされてきた。しかし、若齢林段階における林齢と根系の崩壊防止機能との関係を、力学的に解明した研究例は少ない。そこで本研究では、20 年生までのヒノキ人工林の崩壊防止機能を、力学的に時系列で解明することを目的とした。 調査は、林齢が 4 年、9 年、14 年、21 年のヒノキ人工林を対象に、根系の崩壊防止機能が最弱となる立木間中央部にトレンチを掘削し、出現した根系の分布と直径を測定した。そして岩名ら(2009)が導いた根直径と引き抜き抵抗力の関係式を用いて、土壌断面積 1m^2 当たりの引き抜き抵抗力の合計値ΔC(kN/m^2)を算出し、各林齢の崩壊防止機能を評価した。その結果、林齢とΔC には正の相関関係がみられ、林齢が大きくなるほどΔC が高まることがわかった。

表 3.13　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B42	カラマツ根系に及ぼす間伐の影響	伴博史･北原曜･小野裕	中部森林研究	58	2010		根系は崩壊防止機能を有している。また、間伐が根系の崩壊防止機能を高めることは昨今の研究により解明されつつある。そこで、より間伐の効果を明確にするため、様々な条件のカラマツ林調査地において、崩壊防止機能が最弱とされている立木間中央部の根系分布と根直径を調査した。そして根直径と引き抜き抵抗力の関係式(久保田2007)より単位断面積当たりの引き抜き抵抗力合計値ΔC(kN/m^2)を算出し、間伐の影響を考察した。 その結果、カラマツは間伐を行うと出現する根系が全体的に太くなり、崩壊防止機能も上昇する傾向が見られた。この結果はローム質土、マサ土、共に同様の傾向が見られ、地質に関係なく、間伐は根系を太くし、崩壊防止機能を上昇させると考えられた。
B43	立木引き倒し試験による森林の土石流緩衝機能の力学的評価	深見悠矢･北原曜･小野裕	中部森林研究	56	2008		森林の土石流緩衝機能は未解明な点が多く、また、間伐などの森林整備との関係はほとんど調べられていない。そこで、この森林の土石流緩衝機能を解明するため、土石流流下経路近傍に生育していた間伐遅れのカラマツ人工林の立木を対象に引き倒し試験を行い、その最大引き倒し抵抗力と生育状態との関係を調べた。その結果、最大引き倒し抵抗力は、胸高直径とは正の相関、形伏比とは負の相関、そして樹冠体積とは正の相関が認められた。この試験結果から、間伐遅れが立木根系の成長を阻害し、土石流緩衝機能が頭打ちになっている可能性が指摘された。
B44	愛知県伊良湖岬におけるクロマツ引き倒し試験	宮田賢･北原曜･小野裕	中部森林研究	61	2013		クロマツは多くの海岸林に分布しており、防潮林として津波緩衝機能も期待されている。しかし、クロマツの津波緩衝機能は具体的に分かっておらず、津波に対する抵抗力の指標となる最大引き倒し抵抗モーメントを調べた事例は少ない。そこで本研究では、愛知県伊良湖岬においてクロマツの引き倒し試験を行い、クロマツの最大引き倒し抵抗モーメントを明らかにすることを目的とした。試験は、対象木と重機をワイヤーでつなぎ引き倒しを行い、ロードセルを用いて最大引き倒し抵抗力を計測する方法で行った。その結果、クロマツの最大引き倒し抵抗モーメントは胸高直径のべき乗式で表された。また、マツ枯れが最大引き倒し抵抗モーメントに影響しているのではないかと思われた。
B45	アカマツの引き倒し抵抗力と模型実験による根返りメカニズム	高橋悠介･北原曜･小野裕･小野圭	中部森林研究	62	2014		近縁種で、あるアカマツとクロマツの引き倒し抵抗力の違いを明らかにすることを目的とし、昨年に引き続き(6)アカマツの引き倒し試験を行った。その結果、斜面における引き倒し方向と斜面傾斜角による最大抵抗モーメントは統計的に差がないことがわかった。また、秋田におけるクロマツの最大抵抗モーメントと比較した結果、鉛直根の発達量による差があることが示唆された。これを実験的に解明するため、様々な形状の根系を簡易的に再現した模型を使って引き倒し実験を行った結果、実際の樹木の挙動とやや異なる点はあるものの、鉛直根の長さと最大抵抗モーメントの間に正の相関があることがわかった。
B46	模型実験による樹木の根返りメカニズムの解明	高橋悠介･北原曜･小野裕	中部森林研究	63	2015		立木の引き倒し試験Ⅰによって得られる引き倒し抵抗モーメントは、津波や土石流に対する樹木の抵抗性を評価するための指標となるが、樹木根系が抵抗力を発揮するメカニズムを具体的に論じた研究は少ない。そこで、樹木根系を簡易的に再現した模型に対する引き倒し実験により、根返りメカニズムの解明を試みた。その結果、水平根と鉛直根の増大により最大抵抗モーメントは大きくなり、特に水平根に関しては、引き倒し方向と反対側に分布する水平根が抵抗モーメントの大部分を発揮することがわかった。また、水平根の周面摩擦力による抵抗モーメントを計算した結果、引き倒し抵抗モーメントは周面摩擦力以外の力によって発揮されているとわかった。
B47	津波緩衝機能を発揮する海岸林整備計画のためのアカマツ引き倒し試験	高橋悠介･北原曜･小野裕	中部森林研究	61	2013		海岸クロマツ林の津波緩衝機能を評価するためには、津波に対する抵抗力の指標となる引き倒し抵抗力を調査する必要があるが、海岸林は保安林指定されている場所が多く、松枯れの被害も広がっているため、引き倒し試験を実施するのが難しい。そこで本研究では、クロマツの近縁種で、あるアカマツに対し引き倒し試験を実施し、愛知県伊良湖岬におけるクロマツ引き倒し試験の分析結果と比較した。その結果、両樹種の最大引き倒し抵抗モーメントと胸高直径に関する回帰式の間には危険率 5%で有意差が認められ、クロマツがより強い引き倒し抵抗力を持つ可能性が示された。
B48	休耕田跡地に成立するカラマツ人工林における根系分布	小林健之･北原曜･小野裕	中部森林研究	57	2009		過湿地の森林では高い地下水位によって根系伸長が阻害され、風倒木が発生しやすいと考えられる。このような条件下にある風倒木の危険性を検討するため、地下水位の高い休耕田のカラマツ人工林で地下水位の測定、根系分布調査、引き抜き試験を行い、一般林地と比較した。調査結果より、停滞水による根系伸長阻害の影響が少ない休耕田では、降雨時に地下水位が上昇し、土壌水分が増加し、根系の引き抜き抵抗力が減少することが風倒木の発生要因であると考えられる。停滞水による根系伸長阻害の影響が大きい休耕田では、根系の生育範囲が浅いことと、地下水位の上昇による根系の引き抜き抵抗力の減少が風倒木発生の要因である可能性がある。
B49	林床に侵入する広葉樹根系の引き抜き抵抗力と単根引張強度の関係	松下将大･小野裕･北原曜	中部森林研究	57	2009		過去の研究において、主要造林樹種の根系の引き抜き抵抗力は解明されてきた。しかし広葉樹の根系の力学的評価は不十分であり、また人工林に侵入した広葉樹根系の崩壊防止補完機能は未解明である。そこで本研究では、主要な広葉樹であり、林床によく侵入する樹木であるウワミズザクラ、ミズキ、リョウブ、コナラ、カスミザクラ、ウリハダカエデ、ヒトツバカエデの 7 樹種を対象とし、各樹種の断面直径と引き抜き抵抗力の関係を明らかにすることを目的とした。調査方法は立木付近を掘削し、出現した直径 2～20mm 程度の根を専用鋏で引き抜き、その最大抵抗力(kN)を測定した。その結果、樹種別の引き抜き抵抗力の大きさの順位を明らかにすることができた。
B50	飽和条件下におけるヒノキ根系の引き抜き抵抗力	岩名祐･北原曜･小野裕	中部森林研究	57	2009		森林根系の崩壊防止機能の評価法として引き抜き誌験があるが、過去の研究の多くが自然含水状態で引き抜き試験が行われ、土壌水分状態に着目したものは少ない。そのため、豪雨等で崩壊が起きる時の森林根系の崩壊防止機能について未解明な部分が多い。そこで本研究は、ヒノキ林を対象として土壌飽和条件下でのヒノキ根系の引き抜き抵抗力を明らかにすることを目的とした。調査は、トレンチを掘削し、そのトレンチ断面に出現している根系が伸張していると考えられる土壌に放水を行い、人為的に土壌を飽和させ直径階別に引き抜き試験を行った。その結果、飽和条件下でのヒノキ根系の引き抜き抵抗力は自然含水状態と比べ約半分になること等が分かった。
B51	ヒノキ根系の崩壊防止力に及ぼす間伐の影響	今井裕太郎･北原曜･小野裕	中部森林研究	57	2009		本研究ではヒノキ根系の崩壊防止機能に及ぼす間伐の影響を力学的に時系列で評価することを目的とする。調査は、間伐が行われたヒノキ林と、無間伐のヒノキ林において、根系分布調査をし、根系の直径と引き抜き抵抗力との関係式より単位断面積当たりの引き抜き抵抗力の合計値ΔC(kn/㎡)を算出し、崩壊防止力として評価した。その結果、間伐が行われた林分と無間伐の林分では根系の分布状態ΔC に差が見られ、間伐が行われた林分は無間伐の林分に比べ、根系の崩壊防止力が高いことが分かった。
B52	スギ･ヒノキ･カラマツ･コナラ立木の引き倒し抵抗力	深見悠矢･北原曜･小野裕･宮崎隆幸･山内仁人･片倉正行･松澤義明	中部森林研究	57	2009		土石流災害を軽減するうえでの森林による土石流の緩衝機能は不明な点が多い。特に、森林を構成する樹種との関係はほとんど調べられていない。そこで本研究では、同一立地環境に生育するスギ･ヒノキ･カラマツ･コナラの立木引き倒し試験を行い、4 樹種の最大抵抗力と立木形状の関係を比較することを目的とした。対象は 22 年生のスギ･ヒノキ･カラマツ人工林、19 年生のコナラ天然性二次林である。試験方法は、対象木にワイヤーをかけ重機で牽引し、最大抵抗力を測定した。試験の結果、胸高直径 20cm での最大抵抗力は、コナラ＞ヒノキ＞カラマツ＞スギの順に大きく、コナラの最大抵抗力はスギの最大抵抗力の 2 倍以上であった。

表 3.14　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B53	根系断面の顕微鏡画像を用いた引き抜き抵抗力の推定	岡田萌･北原曜･小野裕	中部森林研究	60	2012		根系の引き抜き抵抗力と生根の引張強度は強い相関を示すことが明らかにされている。しかし樹種ごとの引き抜き抵抗力を決定する要因については未解明である。そこで本研究では、針葉樹 3 種、広葉樹 10 種を対象として、根系断面の顕微鏡画像を用いることで樹種ごとの引き抜き抵抗力決定要因を明らかにし、顕微鏡画像を用いた引き抜き抵抗力の推定を行うことを目的とした。測定方法は、直径 5mm 程度の生根の断面のプレパラート標本を作製し、二値化することにより細胞壁率を求めた。その結果、生根の細胞壁率と破断部直径から求めた根系の引き抜き抵抗力との間には相関が認められ、根系の引き抜き抵抗力は細胞壁量に影響されると考えられた。
B54	常緑広葉樹を主とする生根の引張強度試験	若杉祐希･北原曜･小野裕	中部森林研究	60	2012		根系の引き抜き抵抗力は、生根の引張強度と密接な関係があると考えられる。しかし、生根の引張試験は広葉樹根系、特に常緑広葉樹根系では十分に行われていない。そこで本研究では常緑広葉樹を主とする 10 樹種を対象とし生根の引張強度を求めることを目的とした。対象樹種の生根は直径 2.0～20mm、長さ 15 ㎝程度の単根を採取し、室内で試験片中央部の破断部断面を半分ナイフで削り加工した。試験片を引張試験機にかけ引張荷重を計測した。その結果、各樹種の引張強度を明らかにすることができた。また、生物学的分類に分けた際に一部の科において回帰式が併合でき、生物学的分類が引張強度の指標になる可能性があることがわかった。
B55	引き抜き試験時における根の破断位置の推定	奥中大智･北原曜･小野裕	中部森林研究	62	2014		根系の引き抜き抵抗力は、土と根との間に生じる周面摩擦力と根にかかる引張抵抗力により発揮されると考えられる。そこで本研究では、根系の引き抜き抵抗力の評価に用いられる引き抜き試験を対象に、4 樹種の根系を丁寧に掘り取り、引張抵抗力と周面摩擦力の関係から、引き抜き試験時における根系の破断位置を推定することを目的とした。引張抵抗力は、根系断面積に単位表面積当たりの引張強度を乗じて求めた。周面摩擦力は根系の表面積に単位表面積当たりの周面摩擦力を乗じて求めた。その結果、引張抵抗力と周面摩擦力の交点で破断が起きていることが推定できた。
B56	Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles	M.Schwarz、D. Cohen、and D. Or	JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH	115	2010		根は急斜面の強化と安定化に大きな役割を果たしている。斜面安定性に関するほとんどの研究は、静的な個々の根の挙動を全体に広げることによって、見かけの集合体として根による補強を説明している。しかしながら、最近の研究は、根の集合体の進行性の破断を考慮し、斜面安定性のはるかに良い予測ができることを示している。進行性破断の特性は、土壌の変形と根の集合体の幾何学的および機械的特性との相互作用に依存する。ひずみ制御の機械的強制の下で根の集合体の力学的挙動の定量的説明のための詳細なモデルを提示する。根の集合体モデルは、根の大きさの空間分布の典型的な値(根の数と大きさ)、幾何学的因子(直径－長さの割合、ねじれ、分岐特性)、そして機械的特性(引張強度とヤング率)等の説明要因とこれらの相互作用を考慮している。さまざまな土壌条件(土壌の種類、制限圧、土壌水分)で集合体の力学的応答におけるこれらの要因の役割を系統的に分析し、巨視的に根－土壌力学的応答に対する様々な要因の相対的重要性を探る。 小さな変形で小さな根によって与えられる強度の増加と大きな引張り亀裂の成長に対して大きな根によって与えられる弾力性との間を区別し、細い根の最大強化は変位の最初の 5cm 以内で達成されるのに対して、直径 20mm の根は 10cm の変位後で最大の引き抜き力に達することが示唆された。このモデルは、丘陵斜面でよく見られる根系の段階的なひずみと最終的な残留破壊挙動を再現しており、根の分布の影響と変位の関数としての引き抜き力の変動を考慮した場合の張力強化の推定に役立つ。これらの結果は根による補強メカニズムの理解を深め、植生斜面の安定性計算のため、そして重要な根－土壌力学情報を集めるために進めている実験、すなわち根強化モデリングのより現実的な実行を可能にする。
B57	Quantifying the role of vegetation in slope stability:A case study in Tuscany (Italy)	M.Schwarz、F. Preti、F. Giadrossich、P.Lehmann、D. Or	Ecological Engineering	36	2010		植生は、表層崩壊の誘発に関連した斜面の水文学的および機械的特性に大きく影響する。土壌－植物の水文学的相互作用の複雑さを考慮すると、根の機械的補強の定量化は依然として課題となっている。ここで我々は水平根と垂直根による補強の定量化に焦点を当てて、イタリアにおける植生によく特徴付けされた表層崩壊に関連する機械的安定性基準の逆解析を提示する。水平根による補強は、崩壊崖面と根の分布に比例する安定化力を加えることによって、斜面安定性の推定に役立つ。この安定化力は、さまざまな崩壊の形状と寸法に対する無限勾配モデルの力学的平衡方程式に追加することができる。根による強化を定量化するために、我々は Wu モデル(WM)と繊維束モデル(FBM)を使用する。後者のモデルを用いることで、異なる根の分布と機械的特性に対する根の集合体の応力－ひずみ挙動の定量化が可能になる。 これらのモデルの結果を比較して、2 つのアプローチの主な違いを説明する。FBM を用いた計算は、WM を用いた水平根による強化の過大評価と安全性の要因における一般的に観察された過大評価を説明することができる。モデルはまた、植生が生育する斜面における根の補強材としての変位に依存する挙動を定量化することができる。水平根による補強は斜面の安定性に対して一定の範囲(1,000～2,000m^2)まで強く影響することがある。この安定化効果の大きさは、傾斜、土壌の力学的特性、根の分布などの要因によって異なる。
B58	Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands	M.Schwarz、P.Lehmann and D. Or	Earth Surf. Process. Landforms	35	2010		植生が生育する急斜面における根による強化のための現在のモデル化アプローチの評価は、表層崩壊予測のための興味のある様々なスケールでの植物－土壌相互作用を考慮した重大なギャップを明らかにする。単一の根から木の根系、木の林分に及ぶ規模で根による強化の系統的な定量化のための新しい枠組みが提案されている。ほとんどのアプローチで考慮される標準的な基礎補強に加えて、横補強を通して斜面を安定させることにおける根の重要な役割は強調されている。根系の主要な幾何学的および機械的性質と土壌の安定化におけるそれらの機能を評価した。根系の力学的挙動を向上させるための自然な手段を提供する繊維束モデル(FBM)の形式を使用して、根の集合体に対する応力－ひずみ関係を考慮する。根の直径分布、ねじれ、土壌の種類、土壌水分および土壌と根の表面の間の摩擦等の根と土壌の重要な要因を考慮して、FBM の拡張を提案した。単一の木の周りの根の機械的補強の空間分布は、測定が容易な特性に基づいて根の直径と密度の分布から計算される。木の林分に対する根の補強の分布は、斜面上のそれらの位置に関して個々の木の値の空間的および機械的な重ね合わせから得られた。 提案されたアプローチは、ランダムに分布した 1,000 本の木を持つ仮定斜面における空間強度分布の数値実験に応用することができる。解析の結果、表層崩壊の誘発が低い補強値を持つ大きく連続したゾーンで起こると予想される土壌内の弱いゾーンと強いゾーンの空間分布が得られる。そのようなゾーンをマッピングすることは、崩壊感受性マップの品質と保護林における造林対策の最適化を高めるだろう。
B59	Effect of forest clear-cutting on landslide occurrences: Analysis of rainfall thresholds at Mt. Ichifusa、Japan	Hitoshi Saito、Wataru Murakami、Hiromu Daimaru、Takashi Oguchi	Geomorphology	276	2017		植生被覆は降雨による崩壊の重要な要因である。経験的な降雨強度－持続時間(I－D)閾値を用いて、崩壊の開始に対する森林伐採の影響を分析した。花崗岩を特徴とする日本の市房、山岳地帯の北部では 1960 年代後半に森林産業のための大規模な伐採が行われた。この一回の明確な伐採は、降雨によって引き起こされた頻繁な表層崩壊を引き起こした。1969 年、1976 年、1980 年、1985 年、1990 年、1995 年、1999 年、2005 年のオルソ補正空中写真を GIS により解析し、これらの写真に基づいて崩壊をマッピングした。次に、1 時間ごとの雨量計データに基づいて、1952 年から 2011 年(60 年)の暖かい季節(4 月から 10 月)のすべての降雨イベントを分析した。平均降雨強度(I、mm/h)や期間(D、h)などの基本的な降雨量パラメータを使用して、これらの降雨状態の再現期間を推定した。航空写真で示された各期間における崩壊発生の降雨量の閾値を調査し、10mDEM から崩壊発生と地形的特徴との関係を評価した。その結果、1976 年以前に何度も崩壊が発生したが、それらは 1976－1980 年、1980－1985 年、1990－1995 年の間に最も頻繁に発生した。近年では、皆伐域の急斜面と緩斜面で多数の崩壊が発生したが、非皆伐域では崩壊はほとんど発生しなかった。降雨解析では、皆伐後の降雨量の閾値は、非皆伐域の半分にまで減少した。これらの降雨 ID 閾値の再現期間もまた、12 時間以内の短期間では 1 年以内、72 時間では 3 年以内まで皆伐域で減少した。我々の調査結果は、市房山での皆伐と崩壊発生の間の実質的な履歴の効果を説明している。

表 3.15　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B60	Long-term modelling of landslides for different forest management practices	Amod S.Dhakal、Roy C. Sidle	Earth Surface Processes and Landforms	28(8)	2003		崩壊の発生と量に対する様々な森林管理方法の長期的な影響は、物理ベースの斜面安定モデルを使用して分析された。流域ベースのモデルでは、伐採が植生の根の強さおよび樹木の造林費用に関連する最近の伐採に対する累積的な影響を考慮することによって、斜面の安定性に対する複数の伐採項目の影響を計算する。ブリティッシュコロンビア州、バンクーバー島のカーネーションクリークの流域で、放置区の有無にかかわらず、また下層植生の有無にかかわらず、4 つの連続した皆伐と択伐がシミュレートされた。安全係数を計算するために使用された無限勾配と分布水文モデルの組み合わせにより、次の伐採サイクルの前に十分な期間(約 50 年)が経過した場合、模擬崩壊のほとんどが最初の伐採後 5～17 年以内にクラスター化された。部分伐採は崩壊の発生を減らし、崩壊の量を皆伐と比較して 1.4～1.6 分の 1 に減らした。連続した 10 年間隔で 20%の面積を伐採するのと比較して、区域の 100%が最初に伐採された時とほぼ同じ総崩壊量が生じた。部分伐採についても同様の結果が得られた。非伐採区域は、崩壊を 2～3 倍減らすのに効果的であった。旺盛な下層植生を維持することで、崩壊の量も 3.8～4.8 倍に減少した。部分的な伐採、伐期の延長、非伐採区域の提供および生育可能な下層植生の維持という複合管理戦略は、管理林における崩壊の発生を最小限に抑えるための最良の選択肢となる。
B61	Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan	Fumitoshi Imaizumi、Roy C. Sidle、Rieko Kamei	Earth Surface Processes and Landforms	33(6)	2008		森林の伐採に伴う崩壊や土石流は、大量の破壊を引き起こす可能性がある。したがって、水の生態系を保護して防災のための改善された戦略を開発するためには、伐採の時期がこれらの大量破壊プロセスに与える影響を評価する必要がある。1964 年から 2003 年までの 9 つの空中写真を用いて、Sanko 流域(中央日本)における崩壊と土石流の頻度に対する森林伐採の影響を調べた。これらの写真は 1912 年以来のこの地域の管理に起因する異なる林齢のモザイクを示した。Sanko 流域では、地質や斜面勾配がかなり一様に分布しているため、他の要因を複雑にすることなく森林伐採の影響の評価が容易である。新規崩壊と土石流の傾向は、根の強度の減衰と回復によって説明される斜面の安定性の変化に対応する。崩壊の発生に対する皆伐の直接的な影響は、伐採後 1 年～10 年の林分で最大であり、伐採後 25 年まで継続的に影響が小さくなった。伐採後 1～10 年の森林の崩壊による土砂発生量は、未皆伐地の約 10 倍であった。伐採後 0～25 年の林分の総崩壊土砂量は、伐採後 25 年以上の 1.3×$10^3 m^3 km^{-2}$と比較して 5.8×$10^3 m^3 km^{-2}$であり、伐採が斜面安定性に影響を及ぼした期間中に対照区と比較して 4 倍に増加した値を示した。初期の崩壊後も土砂を生産し続けているので、崩壊からの土砂供給は Sanko 流域で 45 年間続けられている。他の地域での皆伐とそれに続く再造林が大量破壊の発生に及ぼす影響を推定するためには、根の腐朽と回復によって引き起こされる根の強さの変化を様々な樹種と環境条件について調べる必要がある。
B62	2014 年 8 月 20 日の広島豪雨災害における雨量を用いた土砂災害危険度評価に関する考察	土田孝、森脇武夫、田中健路、中井真司	地盤工学ジャーナル	11(1)	2016		2014 年 8 月 20 日に発生した広島土砂災害では、107 か所の土石流と 59 か所のがけ崩れが同時多発的に発生し死者 75 名、負傷者 44 名、全壊家屋 133 棟、半壊家屋 122 棟という甚大な被害が発生した。本災害は急激な気象の変化により線状降水帯が形成されて、特定の範囲に時間 80mm を超える猛烈な雨が突然降り出して 2 時間以上継続することにより発生した。本報告は雨量を用いた土砂災害の危険度評価手法が本災害をもたらした雨量についてどのように適用されたかを検討し、今後改善すべき点について考察を行った。
B63	豪雨による斜面表層崩壊と実効雨量－斜面内土層の浸透流からの検討－	林拙郎、山田孝	地盤工学ジャーナル	10(1)	2015		豪雨による表層崩壊と実効雨量の関係を飽和浸透流の関係式から検討した。対象とした斜面は、雨水の浸透し易い草木で覆われた表層土層である。斜面への降雨は土層内へ大部分が降下流入し、基盤上に飽和浸透流を形成する。飽和浸透流の関係式には、土層基盤への雨水降下量と基盤排水量を考慮した連続式を設定した。さらに、設定した式に対してタンクモデルを適用した。この解析より、土層内浸透流の間隙水量を実効雨量 Dとおくことによって、従来の実効雨量式が求められた。実効雨量の係数は、地域に固有な地域雨量に対して直線性を有している。
B64	環境変化と近年の山地災害の特徴	大丸裕武	第 42 回地すべりシンポジウム		2014	表層崩壊、雨量強度、森林被覆、山地荒廃	過去の災害を教訓にして将来起こる災害に備えることは、防災の基本である。しかし、災害の誘因・素因は時代とともに変化するものであり、単純に過去の経験をなぞるだけでは崩壊様式の変化を予測できない。今後、森林植生が充実した斜面に、記録的な強度に達した豪雨が降り注ぐというケースが増えれば、表層崩壊は密な森林によって覆われた山地の一部に残された弱い場所に集中して発生すると予想される。しかし、そのような場所を探し出すには、岩盤地下水の集中や局所的な土壌構造、(教科書的ではないという意味で)リアルな根系の分布を把握する必要があり、従来の崩壊危険地予測よりもはるかに難しい仕事となる。本当の答えは、個々の現場でしかわからない。単純に過去をなぞるだけでは不十分であるが、結局はこれまでの災害を丹念に研究し、その土地の地形、地質、植生だけでなく、歴史的な背景を含めて、なぜその場所が崩れたかとい問い続けることでしか、われわれの“想定”の範囲を広げることは出来ないと考える。 http://www.landslide-niigata.org/pdf/symposium/42symposium.pdf
B65	2009 年に防府地域で発生した表層崩壊の歴史的背景	大丸裕武・村上亘・黒川潮	2014 年度日本地理学会春季学術大会		2014	表層崩壊、はげ山、荒廃、花崗岩、LiDAR	山口市から防府市にかけての花崗岩山地では、2009 年 7 月 21 日の豪雨によって多数の表層崩壊が発生した。本研究では、この地域における崩壊発生と樹木密度や過去の山地荒廃との関係について考察した。 防府地域はかつて著しいハゲ山荒廃が発生しており、1948 年に撮影された米軍写真においても多くのハゲ山がみられる。この写真からハゲ山分布図を作成し、ArcGIS によるバッファ解析を行って、ハゲ山跡地からの距離と崩壊地の面積率との関係を解析した。その結果、ハゲ山跡地から 20～30m 程度離れた場所で崩壊面積率が最大となった。この理由として、ハゲ山跡地では崩壊予備物質となる表層土壌が消失しているか極めて薄いために、崩壊が起こりにくいことが考えられる。一方、ハゲ山近傍の谷頭部では、ハゲ山から流出した土砂が凹地形内に堆積し、周囲と比べて土層深が大きくなったために、今回の豪雨で崩壊が多発したと考えられる。実際にこの地域では谷頭部などの凹地に厚い土層が見られる場所が多く、堆積した土層の中には、近世前期の年代を示す炭片が多く含まれている。以上のことから、近世期以降に進行したハゲ山荒廃は、崩壊予備物質の再配分という形で現在の崩壊分布に大きく影響していると考えられる。
B66	令和 2 年度　森林および林業の動向(森林・林業白書)	林野庁	森林・林業白書		2021		(森林の多面的機能) 我が国の森林は、様々な働きを通じて国民生活の安定向上と国民経済の健全な発展に寄与しており、これらの働きは「森林の有する多面的機能」と呼ばれている。 森林は、樹冠により降水を遮断するとともに、表土が下草、低木等の植生や落葉落枝により覆われることで、雨水等による土壌の侵食や流出を防ぐ。また、樹木の根が土砂や岩石等を固定することで、土砂の崩壊を防いでいる(山地災害防止機能／土壌保全機能)。 https://ww*Wr*inya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/R2hakusyo/attach/pdf/zenbun-88.pdf

表 3.16　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B67	令和元年度　森林および林業の動向(森林・林業白書)	林野庁	森林・林業白書		2020		(令和元(2019)年度の山地災害等に対する学識経験者による緊急調査結果の概要) 日本国内で観測される短時間の大雨の発生回数は長期的に増加傾向にあり、毎年のように各地で甚大な山地災害をもたらしている。令和元(2019)年には、令和元年房総半島台風(台風第 15 号)や令和元年東日本台風(台風第 19 号)に際して、倒木による森林被害や山腹崩壊等の山地災害が発生したことから、林野庁ではこれらの災害の発生原因や特徴、今後の対策等を検討するため、学識経験者による緊急調査をそれぞれ実施した。 同年 9 月の「令和元年房総半島台風」については、千葉県内の多くの地点で観測史上 1 位の最大瞬間風速を観測する記録的な暴風となったことから、県内各地で大規模な倒木が発生した。森林被害の状況を調査したところ、人工林や天然林、樹種等にかかわらず風倒被害が発生していることや、比較的平坦な地形に小規模な被害地が広範囲に散在するという被害の特徴を確認した。また、中長期的には、リモートセンシング技術も活用して被害地分布等の状況を広域的に明らかにすること等が必要との結果が示された。 https://ww*Wr*inya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo/attach/pdf/zenbun-6.pdf
B68	長野県災害に強い森林づくり指針	長野県　林務部(森林の土砂災害防止機能に関する検討委員会編)	長野県災害に強い森林づくり指針		2008		森林は、土砂災害防止機能も含めた多様な機能を有することから、従来から「緑の社会資本」として知られている。長野県林務部では平成 18 年度から「森林の土砂災害防止機能に関する検討委員会」を設置し、森林の持つ土砂災害防止機能を高度に発揮できる森林のあり方を検討し、今後の森林づくりに反映させることとし、『災害に強い森林づくり指針』をまとめた。この指針では、土砂災害防止機能の高い森林を、針葉樹と広葉樹が適度に入り混じった多様な樹種で構成され、下層植生が豊かで、樹幹が太く、森林根系が良く発達した健全な森林としている。こうした森林づくりを目指して、近年の山地災害に見受けられる、水が集まりやすい谷地形や、侵食されやすい土壌等の立地環境に生育し、適正な管理がされていない森林を、「災害に強い森林」に誘導・造成する手法も提言している。 https://www.pref.nagano.lg.jp/shinrin/sangyo/ringyo/hozen/chisan/documents/shishin_8.pdf
B69	極端現象の増加による花崗岩山地の表層崩壊発生リスクの変動予測	大丸裕武	平成 29 年度 委託プロジェクト研究「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発」最終年度報告書		2017		今後の温暖化によって日本列島の降雨分布が大きく変化し、多くの地域で極端な豪雨の頻度が増大する可能性が指摘されている。このため、森林の利用も今後起こりうる気候変動の影響を想定した上で行う必要がある。わが国の山地では森林の状態が山地斜面の崩壊リスクに大きな影響を与えるため、温暖化が山地の災害リスクに与える影響を予測する際には、森林の状態と崩壊リスクとの関係を、降雨を指標として評価できる手法が必要であるが、このような予測手法の開発は進んでいない。近年の森林の崩壊防止機能の評価は、物理モデルを用いて行われているものもあるが、広域に適用できるレベルに達していないため、過去の崩壊事例をもとにし、植生の機能と降雨指標を導入した統計的なモデルを開発する必要がある。本課題では、将来降雨の増大が予測される、阿武隈山地などの花崗岩山地をモデルフィールドとして、花崗岩山地における温暖化時の崩壊リスクの上昇についての予測を行うとともに、森林の状態が崩壊リスクに与える影響についても評価を行う。さらに、特定の地域を対象として森林の影響を考慮した崩壊に対する温暖化影響予測を行った上で、より広域的な温暖化影響予測を行う際の適切な解析方法やデータの整備方法を明らかにする。 https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/pdf/jisseki/2016/seika2016-36.pdf
B70	樹根による表層斜面崩壊防止効果の森林成長に伴う変化	岡村友貴・小島利治	水文・水資源学会研究発表会要旨集	31(0)	2018	気候変動、豪雨災害、土砂災害、成長曲線、無限長斜面	IPCC の最新の報告によると、気候変動による気温上昇の影響が顕在化しており、将来深刻化することが懸念されている。また、今世紀末の気温が産業革命頃より 2℃程度の上昇に抑えられたとしても、ある程度の被害は避けられないとされている。我が国においては、気象の極端化による短時間豪雨の増加が指摘されており、特に山岳地域の多い岐阜県では、豪雨の増加により土砂災害が多発する可能性があると考えられる。森林域における表層崩壊には、樹木の根が崩壊防止に大きく影響していると考えられている。一般に、樹木根系による表層崩壊防止力は、土の粘着力増分として捉えられ、根一本当たりの引き抜き抵抗力、表土層に分布する樹根量等の現地調査を経て多数の研究者により見積もられている。樹木根系による表層崩壊防止力は、幼齢林では不十分であり、拡大増林が実施される以前では多くの表層崩壊が発生していたが、ほとんどの森林で間伐遅れが生じる程に壮齢化した現在ではほとんど表層崩壊が発生しないとも言われている。本研究では森林の成長を考慮した将来の土砂災害発生危険度評価の実施を念頭におき、森林の成長モデルと樹根による崩壊防止力を考慮した斜面安全率の式を用いて、森林の生育段階、間伐等の森林管理が豪雨時の表層崩壊の危険度にどの程度影響しているのかを調査する。 森林の成長は、材木の収穫予想に用いられる林分収穫表に基づいて算出する。ミッチャーリッヒ曲線、収量密度効果の逆数式、林分構成因子の関係式、自然枯死線を用いて、森林の育成段階、森林管理状況における胸高直径を算出する。斜面安定解析は、根系による崩壊防止力ΔC を考慮した無限長斜面安全率の式を用いて斜面崩壊危険度の評価を行う。ΔC の算出には立木密度と胸高直径より水平根による崩壊防止力の式を用いた。斜面の水分状態は豪雨時を想定し、飽和状態を仮定した。一般に植林直後の森林では表層崩壊を抑えることができないが、成長した樹木は風化土壌層の崩壊を抑えることができるといわれている。本研究により、スギ、ヒノキでは壮齢林に達する前に十分な崩壊防止力が得られるということが検証できた。また間伐を行った場合、ΔC が減少するが、斜面崩壊に与える影響は少ないと考える。 https://ci.nii.ac.jp/naid/130007554091/
B71	樹幹流浸透が斜面安定に与える影響に関する数値実験	梁偉立、小杉賢一朗、水山高久	平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集	58、04-01	2009		森林における樹木の根系発達は、表層崩壊を抑制する効果がある。それは、土層と基岩層の境界面を横切って侵入した根がせん断抵抗力を補強するためであると認識されている。ただし、浅根性樹種や若い人工林では、樹木の根系が基岩まで到達せず、根による働きは浅い表層部に限られると考えられる。 一方、Liang et al. (2007)は、降雨インプットの偏在が斜面水文過程に大いに影響を与え、特に樹幹流が土層内飽和帯の形成に寄与することを明らかにした。土層内飽和帯の形成は、表層崩壊発生の予測において極めて重要な要素である。既往研究で開発された水文モデルの多くは、樹幹流による雨水の集中を無視しており、それらを用いた表層崩壊発生の予測には、大きな誤差が含まれる可能性が高い。本研究は、Liang et al.(2009)が提案したモデルと従来型モデルを用いた数値実験により、浅根性樹木の存在が斜面安定に与える影響を解明する。
B72	平成 29 年 7 月九州北部豪雨による斜面における表層崩壊の要因分析	浅田寛喜、皆川朋子、小山彰彦、一柳英隆	応用生態工学	23(1)	2020		平成 29 年 7 月九州北部豪雨による斜面崩壊と流木の発生は下流域に甚大な被害をもたらした。本研究は、生態系に配慮した減災・防災に関する知見を得るため、朝倉市を流れる筑後川支流の 10 河川の流域で発生した表層崩壊を対象に、斜面崩壊の有無に及ぼす植生の状態を含めた斜面崩壊要因の影響について、統計的手法を用いて分析した。1 次谷集水域で発生させた斜面ユニットを解析単位として、斜面崩壊が発生した崩壊地(640 データ)と発生しなかった非斜面崩壊地(52、955 データ)を設定し、応答変数を崩壊の有無、説明変数を標高、傾斜、方角、SPI(Stream Power Index)、TWI(Topographic Wetness Index)、表層地質、植生、1 時間最大雨量とした一般化線形モデル(GLM)とランダムフォレスト(RF)を構築し分析した。 GLM の結果、斜面崩壊に正に寄与する要因として、標高、傾斜、1 時間最大雨量、表層地質の深成岩、スギ幼齢林(林齢 1～10 年)、スギ若齢林(林齢 11～25 年)、ヒノキ若齢林(林齢 11～25 年)、斜面崩壊に負に寄与する要因として TWI、表層地質の未固結堆積物が選択され、植生の各カテゴリーの回帰係数の比較からは、スギ幼齢林は、スギ壮齢林、ヒノキ壮齢林より崩壊しやすいこと等が定量的に示された。また RF の結果から、植生の斜面崩壊の発生に与える重要度は、降雨や地形的条件より小さかったが、最も大きかった降雨の約 4 割程度であり、小さくない値であることが示された。被災地の森林の回復においては斜面崩壊の抑制を考慮した斜面植生のあり方、さらに、本研究では扱っていないが、生物多様性や生態系の保全の観点を踏まえた検討が望まれる。

表 3.17　文献集

No.	文献名	著者名	書誌名	巻号	発行年	キーワード	概要(抄録)
B73	平成 29 年 7 月九州北部豪雨における林地被害状況	黒川潮	水利科学	365、62(6)	2019	平成 29 年 7 月九州北部豪雨、林地被害表層崩壊、流木	平成 29 年(2017 年)7 月九州北部豪雨では、24 時間雨量で 500mm を超える記録的な大雨により福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市を中心に山地斜面の崩壊が多発し、それに伴って大量の流木が発生した。この豪雨による死者は 40 名、行方不明者 2 名となっている(平成 30 年 1 月 17 日現在)。林業関係の被害額は福岡県約 318 億円、大分県約 33 億円となっている(平成 29 年 10 月 2 日現在)。 災害発生直後に上空から調査を行った結果、数百箇所に上る山腹崩壊および流木が確認できた。今回の豪雨による林地被害は、特定の箇所に集中した雨水が要因となり、森林の有する土砂崩壊防止機能や土砂流出防止機能の限界を超え、山腹崩壊等が発生したものと考えられ、雨水および地形・地質による要因が大きいものと推察される。流木は上流域の山腹崩壊に伴い巻き込まれた立木が流下したものと考えられる。

4. 筋工、柵工等が設置された森林における浸透能の把握

「保安林整備(本数調整伐)と併せて筋工、柵工等が設置された森林における土壌保持を通じた浸透能の把握に関する調査」として以下の調査を実施する。

4.1. 調査の概要

4.1.1. 背景および目的

近年の異常な豪雨による山地災害の広域化・同時多発化等を受け、令和 2 年度山地保全調査(近年の豪雨災害を踏まえた治山計画策定方針検討調査)において設置した「豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会」の議論の中で、森林の洪水緩和機能を維持・向上させるための対策の方向性として、森林土壌の保持を通じた浸透能の向上を図ることを目的に筋工や柵工を森林整備と併せて積極的に配置することや、これらの対策をより効果的に実施するため、定量的データを収集する必要性のあることが指摘されている。このことを踏まえ、本業務では森林整備(本数調整伐)と併せて筋工や柵工を設置することによる森林土壌の浸透能に及ぼす効果等を定量評価するための現地検証の方法の確立と検証の試行を行う。

4.1.2. 調査項目および作業フロー

本業務の遂行にあたっては、① 学識経験者の技術的な助言等を受けながら、② 既存調査事例等の収集および調査方法の検討、③ 調査候補地の検討や選定を行い、④ 現地調査により得られた結果の分析により、⑤ 筋工や柵工等の設置が森林土壌の浸透能に及ぼす効果等を定量評価し、とりまとめを行う(図 4.1 参照)。

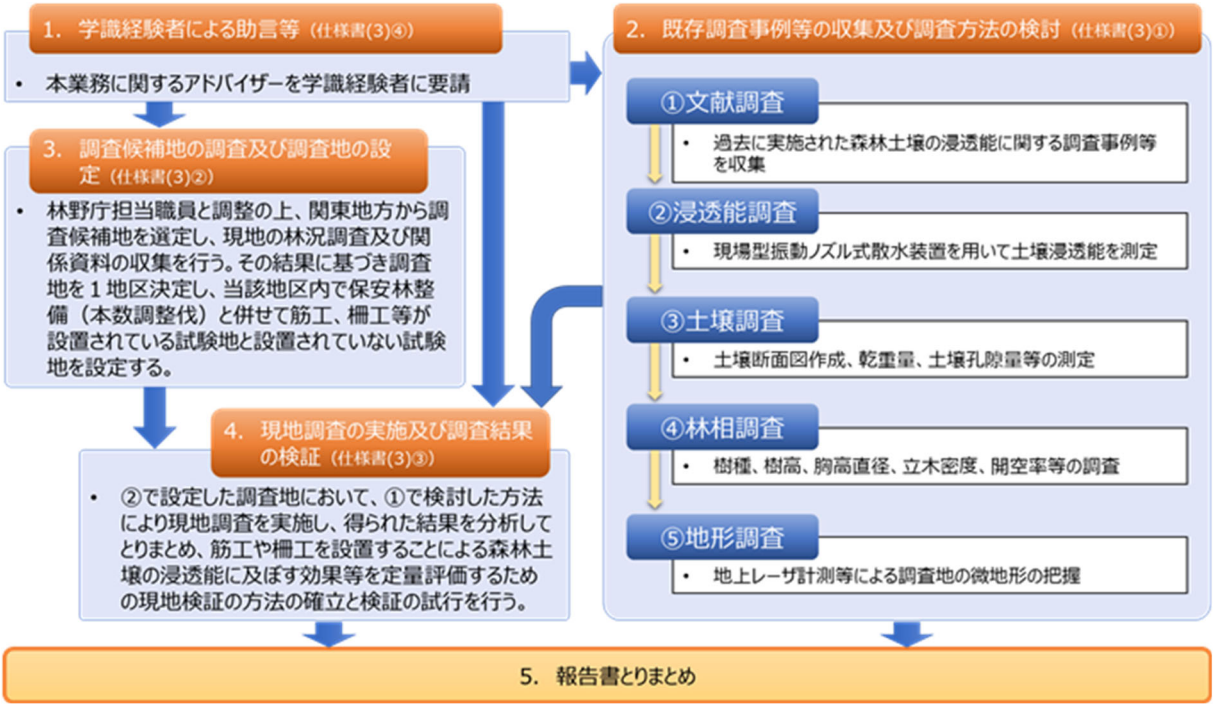


図 4.1 本業務の調査項目および作業フロー

4.2. 既存調査事例等の収集および整理

4.2.1. 森林土壌の浸透能とは

(1) 森林における水の動き

(「平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業」報告書より再掲)

森林に降った雨は、樹冠を経て地表に到達し、地中に浸透若しくは斜面下部に流出する。この地中に浸透する能力が浸透能であり、斜面下部に流出するのが表面流である。 このような森林における水の動きについて、「荒廃現況調査(水土保全機能事業評価指針策定調査) 報告書」[51]から次のとおり抜粋する。

樹冠レベルでは、一時的に樹冠により遮断された降水は、林内雨や樹幹流として地表に向かって行く。ここで、林内雨は、通常の雨粒より大きな粒となり降下していくので、ストレートに地表に落下した場合、雨滴侵食を引き起こす可能性がある。ただし、林内レベルでみたときには、林内に下層植生が繁茂していれば、強い勢いで落ちてきた林内雨でも下層植生に遮断されるので、雨滴侵食を起こすことは少なくなる。

また、地表にリター層(落葉腐植層:A_0 層)が堆積している場合も、林内雨の雨滴をクッション代わりに受け止めるので、雨滴侵食を起こすことが少ない。土層・基岩部レベルでは、リター層(落葉腐植層:A_0 層)の役割は前述したが、その下部には、土壌としての A 層、B 層、C 層、基岩としての R 層があり、地中浸透した水は、それらの層の中を順次地下に向かって浸透していくが、各層(特にR層)は豊かな透水性を持つものではなく、ここで停滞した水分は地中水として溜まり、そこがオーバーフローすると復帰流となり地表に湧出することもある。

林地の地表に達した雨は、表層土壌内を鉛直下方に移動する。そして、透水性の低い基層(水文学的基盤面)まで達すると、飽和地下水面を形成し斜面下方に流下する(側方流出過程)。側方流出過程は、土層内の不均質性が水の移動に大きな影響を及ぼしていて、特にパイプ流(パイプ状の連続した巨大孔隙内の流れ)の存在は、雨水を速やかに排出する要因と考えられている。また、地質によっては、基層(水文学的基盤面)が完全に不透水性でないことも多く、これらのパイプ流や水文学的基盤面内の流れの解明が研究課題となっている。

一方、表層土壌内の鉛直浸透過程は、一般に飽和・不飽和の浸透によって水の移動が表現できると考えられている。この浸透においては、土壌の保水性と透水性が水の移動を特徴づけ、さらに、森林施業に伴う土壌構造の発達や保水性、透水性の変化は、特に表層土壌において顕著であると考えられる。

(2) 水源涵養機能(洪水・渇水緩和機能)の指標としての浸透能の意義

(「平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業」報告書より再掲)

森林の水源涵養機能とは、具体的には、

① 降雨の森林土壌への浸透により河川への到達が遅延することによる流出の平準化

② 深部への浸透による地下水源の涵養

③ 浸透を通じての水質の改善

といったものであり、もっぱら降雨が森林土壌に浸透するという過程を経て、発揮されることとなる。したがって、降雨が森林土壌にどれだけ浸透するかを示す指標である「浸透能」は、水源かん養機能の維持・向上を図っていく上で重要な指標となる。

上記の 3 つの機能は、降雨が浸透した土壌や土層、さらには基岩の厚さや構造といった要因にも左右される(例えば、浸透能が無限大であったとしても、表層直下に不透水層が存在していれば、浸透水は速い流出過程をとる)こととなる。

---

[51] 林野庁が平成 20 年度に実施した調査

したがって、浸透能の維持・向上は、水源涵養機能が十全に発揮されることの十分条件ではないものの、これらの機能は降雨の土壌への浸透がなければ発揮され得ないものであり、加えて、浸透能は、人工的に降雨を再現することによって測定が可能であることからも、水源涵養機能の発揮を図る上での必要条件として有意義な指標となる。さらには、

- 地下に浸透した水の挙動を容易に把握することは困難であること
- 施業による影響が及ぶ範囲はもっぱら地上部および地上付近の植生や土壌に限られること

から、水源涵養機能の発揮の過程において不可欠な存在である森林土壌の保全が、 水源涵養機能の発揮を図る上での重要な課題であり、測定した降雨量と地表流量の差分から求める浸透能は、表面侵食の原因となる地表流の規模を示唆する指標としても有意義である。

また、『調査対象を試験区規模とすれば浸透能や透水性(飽和透水係数)が指標となり、流域規模とすれば流域貯留量や流況曲線上の各種流量が指標となります。』『水源かん養機能の指標として浸透能が数多く用いられており、森林の最終浸透能は 200～300(mm/h)程度とされています。』『水文学的には、浸透能は雨水が表層土壌を通過する単位時間当たりの水量(強度)であり、流域貯留量は通過した雨水が実際に土壌孔隙に貯留される総量です』[52]。

4.2.2. 浸透能に関わる因子について

(1) 森林施業と浸透能との関係

地上部の森林の状態と林地の浸透能の関係について、志水(1998)は、林地植生による地被状態の相違や土壌の堆積様式の相違のうち特に A_0 層の相違が、浸透に大きな影響を与えることを示し、樹種、林層、林齢の違いは林地の浸透能を決定づけるものではないと報告した。一方で、樹種や林齢の違いによって、土壌中の根系の張りや樹冠の閉鎖の状態に依存する下層植生の成長は異なり(杉村ら、2001)、A_0 層などの腐植層の状態の変化により、浸透の度合いにも変化が生じること、また、林齢が高くなるに従って森林土壌内の孔隙量が増加するとの報告(図 4.2 参照)もある。

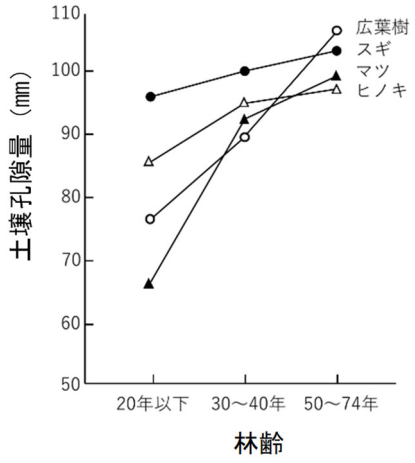


図 4.2 林齢と土壌孔隙量の関係(竹下ら、1977)

2000 年代になると、自然状態で落下する雨滴の状態を模した人工的な降雨を降らせる「振動ノズル式散水装置」を用いた浸透能調査が活発に行われるようになった。例えば、振動ノズル式散水装置で、ヒノキ人工林の林内雨の雨滴エネルギーを再現し、急峻なヒノキ斜面において浸透能を測定した調査では、浸透能は下層植生の乾燥重量と相関が高く、下層植生を繁茂させることで浸透能が上昇することが明らかとなった(図 4.3 参照)。また、荒廃人工林の林床に新たな植生を導入するには、従来の 30%

[52] 藤枝；森林水文研究からみた森林の水源かん養機能、森林総合研究所四国支所 HP より

程度ではなく、50%程度の強度な間伐の実施が必要であるなど、間伐の強度についても示唆を与えるものとなった。

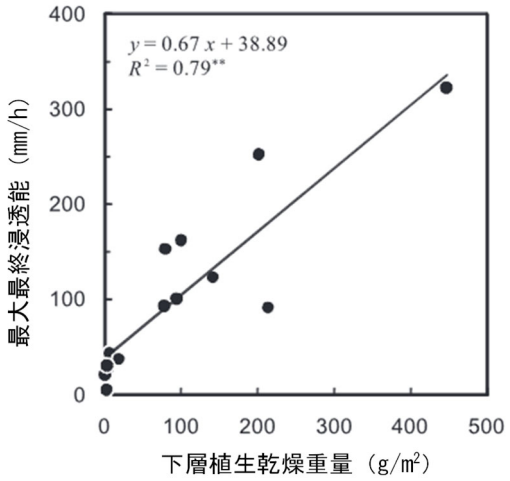


図 4.3 下層植生乾燥重量と最大最終浸透能との関係(平岡ら、2010)

(2) 森林土壌と地形・地質(基岩)との関係

森林域ではほとんど発生することがないといわれる表面流出であるが、近年では、地中に浸透した水の多くは岩盤を通っていることが分かってきている(恩田ら、2001、内田ら、2003、小杉、2008)。

図 4.4 は、長野県伊那谷の中生層付加体(堆積岩)流域と花崗岩(火山岩)流域における降雨時の流量ハイドログラフ)である。花崗岩流域では、流出ピークの発生が連続降雨量にほぼ比例し、岩盤からの流出割合が少なく、降雨の大部分は基盤岩上の土層を通り、流出量の増加をもたらしていると考えられる一方、岩盤の層理やクリープ等によって、花崗岩よりも多くの亀裂があると想定される堆積岩流域では、1993 年 9 月 30 日の 37mm の連続降雨に対する比流量はほとんどなかったものの、続く 1993 年 10 月 4 日の連続降雨 37mm に対しては 200L/秒/km^2、さらに 10 月 8 日の 73.5mm の連続降雨に対しては 1000L/秒/ km^2 の流出ピークが発生しており、降雨が続くことにより、堆積岩流域では岩盤の地下水位が上昇し、流出量の急激な増加が示唆された。

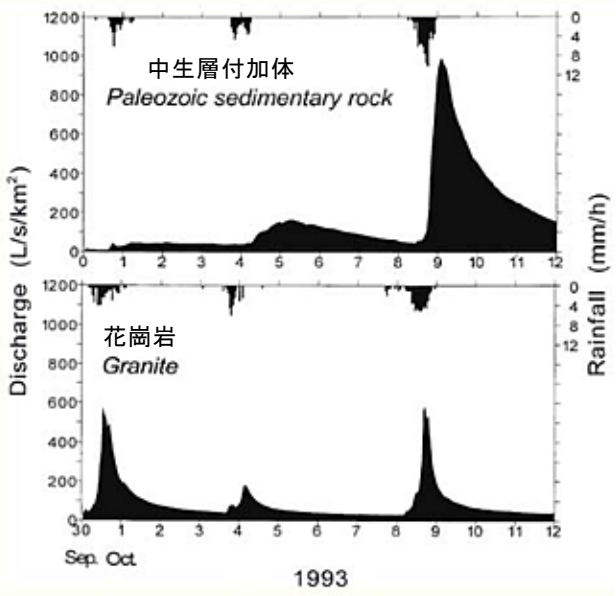


図 4.4 中生層付加体堆積岩流域と花崗岩流域におけるハイドログラフ比較(恩田ら、2001)

4.2.3. 浸透能の測定方法について

(1) 浸透の測定方法

「平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業」報告書によると、森林土壌の浸透能を測る方法には表 4.1 に示すとおり 6 種類ほどある。②と③の方法を除くと、浸透能以外の透水速度又は表面流量や表面侵食量などが測定可能で、それぞれの目的と課題に合わせて、測定方法が選択される。

表 4.1 浸透能測定方法

方 法	概要と課題等
①採土円筒による室内浸透能試験	断面形態や土層ごとの土壌を採土円筒にて採取し、その円筒を室内で透水試験して透水速度を測定して、透水係数等から浸透能を推定する方法である。土壌の孔隙量の試験や断面調査、物理性の測定と合わせて行うことにより、土壌形態や土層別の比較が可能であり、その土壌の保有する貯水容量や浸透能を評価することができ、土壌内の水分動態を検討し、保水容量等を検討するのに適している。 ただし、採土した場所および土壌型、土層別の部分的な評価は行えるが、下層植生や落葉腐植層(リター層)の機能を含めた総合的な評価や、表面流量や表面侵食量の測定はできない。
②冠水型浸透計(塩ビ管等の円筒)による屋外浸透能試験	現場に塩ビ管等の円筒を差し込み、水を注いで浸透能を測定する方法である。現場型なので落葉腐植層(リター層)の機能も含めた評価が可能であり、また、現場作業が容易で、限られた時間内に数多くの試験を行うことができる。 この方法では、表面流量や表面侵食量の測定はできない。そのため、下層植生の機能も含めた総合的な評価ができず課題になっている。ただし、現地観測が容易なので、地形や土壌型、落葉腐植層(リター層)の異なる各所にて、同時期に効率的な測定を行うことが可能である。なお、他の測定方法と組み合わせ補足的に測定することで、総合的な測定が可能となる。
③現場型透水試験を応用した屋外浸透能試験	表層土壌にボーリング孔を開け、水を注入し、その注入水が周辺土壌中に浸透する時間を計測して浸透能を測定する方法である。考え方は、冠水型浸透計に似ているが、冠水型浸透計よりは多少の手間が掛る他、下層植生や落葉腐植層(リター層)の機能を含めた総合的な評価や、表面流量や表面侵食量の測定ができない。また、②の冠水型浸透計と比較して、注水を何度も行うと土壌壁が崩れてしまい、最終浸透能の計測には不向きである。
④ライシメーターによる浸透能試験	ライシメーターとは、金属やコンクリート製の大きな容器に土壌などを充填して実験棟や圃場などに設置し様々な計測を行う装置である。土壌中の水分の動態や浸透能、表面流、中間流、表面侵食量等の観測、蒸発散の推定等を行うための観測手法として用いられている。ライシメーターを現場に施行する場合、工事が大変になり、その経費も他の透水能観測装置より高い。 一般に、現場における現象の部分的動態を再現し、また、ある部分の補足的観測をする際、既往のライシメーターを使用し測定すると効率的に試験できる場合が多い。
⑤表面流・土砂流出(土壌侵食)観測装置による屋外浸透能試験(降水型の浸透能観測装置)	現場に表面流・土砂流出(土壌侵食)観測装置と簡易雨量計とを設置し、降水期間内の浸透能、表面流量、表面侵食土砂量を測定する。下層植生や落葉腐植層(リター層)の状態別の比較ができ、森林整備の有無や相違による機能評価が可能である。しかし、他の浸透能試験に比較すると、豪雨が起きる度に採水・採土観測に行かなければならず、観測期間を通じて人手が掛かる。また、観測期間内に雨量強度の強い雨がない場合、降水量との解析が限られてしまい、観測事例が少なくなる。 ただし、実際の降雨を活用した試験の場合、林外雨と林内雨との関係から、樹冠遮断量の推定が可能となり、間伐による蒸散量の推定などを行う際の基礎資料が得られる。また、トラップした雨水や表面流、表面侵食土砂を分析することにより、水質に対する影響や酸性雨の影響等も検討が可能となる。
⑥人工降雨装置を用いた浸透能観測装置	豪雨時の林内雨の再現が可能である。この人工降雨装置を用いた散水型試験の場合、降水量との各種解析が可能で、雨量強度と浸透能との関係等を求めることも可能となった。ただし、現場まで水を運搬するのが大変で、奥地での観測は困難を伴う。

本調査では、現場型振動ノズル式散水装置を使用して浸透能の測定を行う。現場型ノズル式散水装置を用いた測定方法については 4.6.1 に記載する。

(2) 浸透能の評価方法

浸透能の特性を既往の研究にみると、林野庁の「平成 20 年度荒廃現況調査(水土保全機能事業評価指針策定調査)報告書」においては、以下のように記載している。

『浸透能は、時間内の降水量と表面量(地表流)との差で表わされ、地形・地質や土壌の種類、森林の発達段階、階層構造、下層植生、落葉腐植層(リター層)等の状態によって異なり、降雨当初においては短時間で急激に減少するが、やがて緩慢となり、その後は一定値に近づく。この一定値を最終浸透能といい、単に浸透能という場合、多くはこの最終浸透能を指している(図 4.5 参照)。

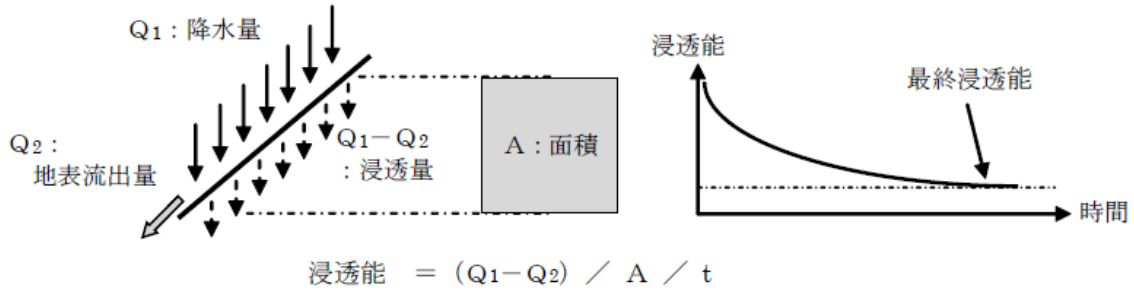


図 4.5 浸透能の算出方法と最終浸透能の概念

この最終浸透能は、降雨強度が大きくなるに従って高くなることが指摘されている(村井・岩崎、1975、Hawkins、1982)。また、時刻 t における浸透能Fは、初期浸透能foと最終浸透能feとの関係で示され、それは Horton の浸透能式と呼ばれる。

Horton の浸透能式

$$F = fe + (fo - fe) \cdot exp(-a \cdot t) \qquad (1)$$

田中・時岡は、村井・岩崎・Hawkins 等の知見を発展させ、振動ノズル式散水装置を用いて、元牧草地、公園グラウンド、公園の自然状態の平地、山地斜面など、異なる土地利用において浸透能測定を行い、降雨強度と浸透強度の関係が以下の双曲線関数で近似できることを示した(田中・時岡、2007)。

$$FIR = FIRmax \ tanh(R / FIRmax) \qquad (2)$$

降雨強度が強くなるにつれて、最終浸透能が増大するという現象の土壌物理学的な解釈を行うために実施した数値シミュレーションから、『斜面における浸透能は、地表面近傍の土層の保水性・透水性だけでなく深部の土層の保水性・透水性にも依存しており、さらに空間的な不均質性の影響も受けている。これらの複雑な場の条件を積分した結果として、浸透強度と降雨強度の関係が導かれる』としている。

4.2.4. 浸透能試験に関する調査事例

今年度の本調査においては、現場型振動ノズル式散水装置を用いた浸透能試験が想定されていることから、ここでは主に、同装置を用いた浸透能調査事例についてレビューを行う。

(3) 林野庁事業における浸透能調査(平成 20～24 年度)

我が国は、地形が急峻且つ多雨な気象条件下にあることや、近年の気候変動による極端な気象の発生頻度が高まっている状況から、そのような国土の約 7 割を覆っている森林地について、より効果的・効率的な治山事業の推進による「災害に強い森林づくり」が求められていた。

そのような背景から、林野庁では、平成 20 年度から 24 年度にかけ、「荒廃森林の水源涵養機能を向上させるための望ましい森林整備のあり方を提言すること」を目的とした、森林土壌の浸透能に関する調査事業を実施した。

各年度の事業名は、次のとおりである。

○ 平成 20 年度:荒廃現況調査(水土保全機能事業評価指針策定調査)事業
○ 平成 21 年度:平成 21 年度荒廃現況調査(水土保全機能事業評価指針策定調査)事業
○ 平成 22 年度:平成 22 年度荒廃現況調査(水土保全機能事業評価指針策定調査)事業
○ 平成 23 年度:平成 23 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業
○ 平成 24 年度:平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業

これらの事業においては、森林の水源涵養機能はもっぱら降雨が森林土壌に浸透するという過程を経て発揮されることから、降雨が森林土壌にどの程度浸透するかを示す指標である「浸透能」が、水源涵養機能の維持・向上を図る上で重要な指標と考えられたことから、散水試験による浸透能の測定や試験区を含む林況等の調査を通じた、水源涵養機能を向上させるための望ましい森林整備のあり方の検討が行われた。

【調査内容】

事業全体期間の調査内容についてとりまとめた「平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業」報告書によると、各年の調査内容および結果は次のとおりであった。

① 第 1 年度(平成 20 年度)

a. 既往の調査・研究の収集および課題の整理
b. 浸透能の測定を行う対象森林の類型の検討
c. 浸透能を測定する手法の検討

第 1 年度(平成 20 年度)は、森林土壌の浸透能について概念整理を行うとともに、浸透能測定の対象とする森林類型の検討、森林土壌の浸透能を測定る手法の検討を行ったほか、既往の調査・研究事例の収集整理を行った。森林土壌の浸透能を測定する手法の検討の結果、「人工降雨装置を用いた浸透能観測装置」を用いることとした。

浸透能測定の対象とする森林類型については、浸透能測定の成果が優先的に求められる、若齢段階のスギ・ヒノキ人工林を主な対象とすることとした。既往の調査・研究からは、森林の水源涵養機能の定量評価に関する調査・研究の文献リストをまとめるとともに、人工林と水・土砂流出の関係に係る研究成果の概要、森林土壌中における雨水浸透流出過程の研究成果の概要を整理した。

② 第 2 年度(平成 21 年度)

平成 21 年度からは試験地を設定し、散水試験を実施した。

a. 課題を克服するための既往成果の活用の検討
b. 浸透能を測定する森林の類型等各種条件の選定
c. 森林類型別の浸透能・流出土砂濃度の測定
d. 試験の所要時間の測定
e. 各試験地の林況・植生・土壌調査の実施
f. 調査結果の分析と課題の検討
g. 平成 22～24 年度の浸透能測定計画の検討

第 2 年度(平成 21 年度)は、第 1 年度の検討結果にしたがって、事業の趣旨に照らし、試験を行う森林類型等の条件を設定し、間伐の実施が確実な林分を対象として検討して調査地を選定した。

その結果、群馬県高山村の間伐が高低 2 種類の間伐率で実施される予定の林分において、スギ林 4 箇所、ヒノキ林 2 箇所の試験地を設定し、散水試験を実施して浸透能・流出土砂濃度を測定した。

その際、試験の所要時間等を記録し、散水試験の功程を把握した。また、測定を行った森林の林況等を調査して、浸透能との関連を検討したほか、次年度以降の調査内容の検討を行った。

③ 第 3 年度(平成 22 年度)

a. スギ・ヒノキ粗悪林分試験地の選定
b. 浸透能・土砂流出濃度の測定
c. 各試験地の林況・植生・土壌調査の実施
d. スギ林の浸透能と浸透強度の関係の近似計算による検討
e. 調査結果の分析と課題の検討
f. 平成 23～24 年度の浸透能測定計画の検討

第 3 年度(平成 22 年度)は、第 2 年度の検討結果を踏まえて、スギ林のデータを得ることを主眼として、また、年降水量の多い地域でも試験を実施する観点から、神奈川県南足柄市の未間伐のスギ林分に 4 箇所、未間伐のヒノキ林分に 2 箇所の試験地を設定し、散水試験を実施して浸透能・流出土砂量の測定を行った。

このうち、スギ林分の 1 箇所では、4 段階の散水強度により試験を実施し、最終浸透能推定曲線を描くに当たって用いるデータの個数を変えて、それぞれの精度を検証した。

また、調査対象森林の林況等に関する各種情報を調査し、これまでの調査結果も加味して浸透能と林況との関連性の検討を行ったほか、次年度以降の調査内容の検討を行った。

④ 第 4 年度(平成 23 年度)

a. スギ・ヒノキ目標林分試験地の選定
b. 浸透能・流出土砂濃度の測定
c. 各試験地の林況・植生・土壌調査の実施
d. 調査結果の分析と課題の検討
e. 平成 24 年度の浸透能測定計画の検討

第 4 年度(平成 23 年度)は、第 3 年度の検討結果を踏まえて、前年度の試験地が、主として荒廃した林分であったことから、森林整備後の目標となるような、適正な森林整備が実施されて下層植生の繁茂した良好な状態のスギ林分およびヒノキ林分に、それぞれ 2 箇所の試験地を設定した。

また、比較のために試験地周辺の未間伐スギ粗悪林分に 3 箇所、ヒノキ林分の表土裸出箇所に 1

箇所の試験地を設定した。

試験地は前年度と同じ気象条件とするために、神奈川県南足柄市とし、設定した各試験地で散水試験を実施して浸透能・流出土砂濃度の測定を行った。

調査対象森林の林況等を調査し、これまでの調査結果も加味して浸透能との関連性の検討を行ったほか、次年度の調査内容の検討を行った。

⑤ 第 5 年度(平成 24 年度)

a. 透能・流出土砂濃度の測定
b. 各試験地の林況・植生・土壌調査の実施
c. 調査結果の分析とまとめ
d. 残された課題の検討

第 5 年度(平成 24 年度)は、平成 21 年度に散水試験を実施した林分で、その後、間伐が実施されたことから、間伐後の林況と浸透能の関係を把握するため、同じ試験地において散水試験を実施して浸透能・流出土砂濃度の測定を行った。

このほかに、調査対象森林の間伐後の林況等を調査し、これまでの調査結果も加味して浸透能と林況との関連性のまとめを行ったほか、今後に残された課題について検討を行った。

【調査結果】

当該事業で得られたデータをもとに、最大浸透能と各因子との相関を検討した結果、スギ林では、開空率、A層厚と傾斜の相関が有意に高いことがわかった。ヒノキ林では、下層植生乾重が有意に非常に強い相関を示し、また、A層厚と被覆物乾重に相関が見られた。以上のように、スギ林、ヒノキ林で浸透能に関与する共通の因子としてはA層厚が考えられるが、A層厚を間伐によって短期的に調整できるものではない。また、傾斜は地形要素であるので、植栽場所を選択するという意味では人為的に調整できるが、既に生立している林分の傾斜を調整することはできない。

これに対して、開空率は間伐等による樹冠量の調整、下層植生量は間伐等による林内の光環境の改善、被覆物量はリターの流亡防止等を図ることで、ある程度人為的に調整できるものと考えられる。これらのことから、浸透能の低下した林分において浸透能を向上させるためには、間伐の実施が有効であり、リター量が少ない林分においてはリターの流亡防止を図ることが有効である。

(4) 他機関における浸透能調査

他機関により浸透能調査が実施された例として、山口県、石川県の事例および大学等、研究機関による調査事例をあげる。

1) 山口県の事例

山口県では、平成 17 年度から、森林環境の保全や向上を図るために「やまぐち森林づくり県民税」を導入して、荒廃した人工林の再生や繁茂した竹林の整備など各種事業に取り組んでいる。実施期間は平成 21 年度までの 5 年間であり、最終年度においては、導入効果を検証し、今後のあり方について見直しを図るため、「やまぐち森林づくり県民税関連事業評価システム検討委員会」を設置して、森林づくり県民税関連事業評価システムに求められる評価項目や評価手法のあり方について検討を行った。

その結果、森林づくり県民税関連事業の実施によって、森林の持つ多面的な機能の回復が図られた場合に想定される水源涵養機能などを「数量的に評価する手法」等に関する評価システムが確立され、「やまぐち森林づくり県民税関連事業評価報告書」にとりまとめられた。

この中で、数量的評価の対象機能の評価手法について、「水源涵養機能、土壌保全機能」は、『人工降雨装置による現地調査の手法を活用した浸透能、土壌侵食などの数値データの把握が可能であり、この手法による水源涵養機能(水資源貯留、水質浄化、洪水緩和)、土壌保全機能(表面侵食防止)の評価を行うことが適当』としている。

これを受けて、『県内各地の事業施行地の中から森林や地形などの特性を踏まえ、公益森林整備事業施行地 16 箇所、竹繁茂防止緊急対策事業 8 箇所において、植生の回復状況に加え、人工降雨装置による現地調査』が実施された。各調査地では、整備区と対照区に試験プロットを設けて、対照区の試験プロットを整備前、整備区の試験プロットを整備後 1 年目～3 年目までに整理して、植生量およびリター量の増加モデル、浸透能変動モデルを検討して、水源涵養機能と土壌保全機能の将来予測を行って、事業の定量的評価が行われた。

現地調査・試験は、県内全域を対象に試験地を設定したため、平成 19 年 10 月 10 日～14 日、平成 20 年 9 月 3 日～12 日の 2 箇年に渡って実施された。浸透能の測定結果等は表 4.2 および図 4.6 のとおりである。

表 4.2 山口県における浸透能測定結果

施工年度	整備区					対照区				
	樹種	林齢	降雨強度	浸透強度	最大浸透能	樹種	林齢	降雨強度	浸透強度	最大浸透能
H17	ヒノキ	41	196.14	113.82	123.82	ヒノキ	33	195.31	14.47	14.47
H17	ヒノキ	36-44	168.83	151.43	284.26	ヒノキ	40	176.67	64.71	65.29
H17	ヒノキ	36-44	178.02	163.26	338.75	ヒノキ	31	184.85	28.73	28.73
H17	ヒノキ	44	185.84	125.36	147.16	ヒノキ	34	178.46	50.9	50.99
H17	ヒノキ	45	202.14	151.02	193.89	ヒノキ	37	202.47	147.87	185.37
H18	ヒノキ	53	186.31	138.79	177.62	ヒノキ	60	201.16	107.44	113.92
H19	ヒノキ	39	187.94	116.42	130.15	ヒノキ	41	186.7	27.34	27.34
H19	ヒノキ	50	198.17	67.61	68.01	ヒノキ	50	183.96	6.72	6.72
H19	ヒノキ	37	164.18	128.3	174.29	ヒノキ	37	173.78	45.74	45.79
H19	ヒノキ	43	167.54	108.62	124.37	ヒノキ	43	181.06	73.54	74.7
H19	ヒノキ	38	209.62	123.46	135.06	ヒノキ	36	180.29	58.85	59.11
H19	ヒノキ	36-44	195.29	110.81	119.61	ヒノキ	36-44	222.57	57.57	57.62
H17	スギ・ヒノキ	42	189.01	145.45	193.5	ヒノキ	50	197.89	83.41	85.01
H18	スギ・ヒノキ	39-43	186.54	158.94	253.99	ヒノキ	29	199.98	28.02	28.02
H18	スギ・ヒノキ	39-43	195.05	154.73	214.91	ヒノキ	36-39	202.64	72.8	73.38
H17	スギ	48	193.19	174.95	341.85	スギ	58	186.79	150.07	212.73

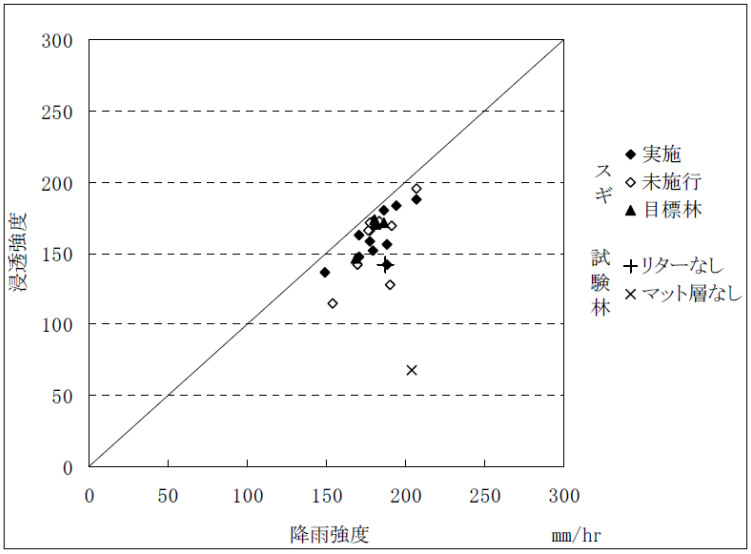


図 4.6 降雨強度と浸透強度の関係(山口県)

2) 石川県の事例

石川県では、平成 19 年度から導入した「いしかわ森林環境税」の導入効果を検証するために、環境モニタリング水土保全機能調査および環境モニタリング生物多様性保全機能調査を実施している。

環境モニタリング水土保全機能調査報告の要旨には、『石川県では平成 19 年度から「いしかわ森林環境税」を導入し、水源地域を中心に手入れ不足人工林の強度間伐を行い、森林の公益的機能の確保に努めている。そこで、強度間伐による森林の水源涵養機能の回復効果について調査を実施した。調査対象林は石川県内のスギ、アテ(ヒノキアスナロ)人工林で、このうち間伐実施前、強度間伐実施後、目標林(下層植生が豊かで健全な森林)の合計 42 箇所で、振動ノズル型散水装置を使用して、地表流量や地表流中の土砂濃度を測定した。調査の結果、間伐実施前の手入れ不足人工林の浸透能は、強度間伐をすることによって高まり、流出水中の土砂濃度も減少することがわかった。』と記載されている。

調査は、石川県内のスギ林 24 箇所(26 試験)、アテ林 16 箇所(16 試験)の合計 40 箇所(42 試験)での環境林整備事業実施前 13 試験、事業実施後 21 試験、目標林 6 試験、その他 2 試験であった。目標林とは強度間伐施行後 5～10 年が経過したと想定される林床植生の多い林分、その他は下層植生を除去しリター層を露出させた箇所と下層植生およびリター層を除去した箇所であり、事業実施後の試験地とは 1～3 年が経過した林分である。

調査方法、調査内容は山口県の事例と同様であり、植生量およびリター量、最大浸透能、流出土砂濃度の将来予測を行って、事業の定量的評価を行っている。

《環境モニタリング水土保全機能調査－振動ノズル式降雨実験装置を用いた浸透能野外試験－；石川県農林総合研究センター林業試験場研究報告№44 より》

現地調査・試験は、平成 22 年 7 月 29 日から 8 月 8 日に実施した。浸透能の測定結果等は表 4.3、図 4.7 のとおりである。

表 4.3 石川県における浸透能測定結果

樹種	実施					未施工				実施			
	年度	齢級	降雨強度	浸透強度	最大浸透能	齢級	降雨強度	浸透強度	最大浸透能	齢級	降雨強度	浸透強度	最大浸透能
スギ	H19	10	170.1	162.1	442.1	8	177.9	171	509.3				
	H19	11	170.8	146.8	240.8	8	169.5	141.4	215.3	11	186.2	171.4	363.2
	H20	10	185.8	179.8	585.3								
	H21	12	179.5	151.9	238.7								
	H19	11	177.8	158.7	292.6	11	190.1	127.8	149.8	18	168.6	146.3	245.5
	H19	6	193.9	183.3	463.7								
	H19	11	206.7	187.4	368.0	12	153.6	114.7	147.2				
	H20	10	188.7	156.0	232.8								
	H21	11	177.2	166.2	396.5								
	H19	12	149.4	136.8	281.6	11	182.9	172.8	434.8	17	180.6	173.7	518.8
	H19	8	179.0	172.7	536.5	10	191.1	168.9	300.2				
						11	176.1	165.8	405.1				
	H19	10	188.0	141.3	182.7	14	206.4	195.7	505.8				
アテ	H21	5	219.5	154.2	186.7								
	H19	11	177.5	165.2	371.9	15	185.0	111.1	122.5				
	H20	11	193.7	153.7	213.6								
	H19	6	179.0	146.1	213.0	6	166.4	127.9	169.9	6	180.1	154.6	252.1
	H19	12	192.1	186.5	633.2	6	193.1	171.2	308.1	8	191.5	187.8	789.2
	H20	10	176.5	150.7	242.2								
	H21	17	183.5	163.0	294.8								
	H19	6	187.3	177.7	462.6	6	178.4	134.5	174.4				
	H19	9	146.4	139.0	365.5	11	179.9	158.9	281.9				
スギ	下層植生なしリターあり					マット層なし				目標林			
		13	187.7	141.3	182.9	13	203.5	67.9	68.2	13	181.2	169.7	399.0

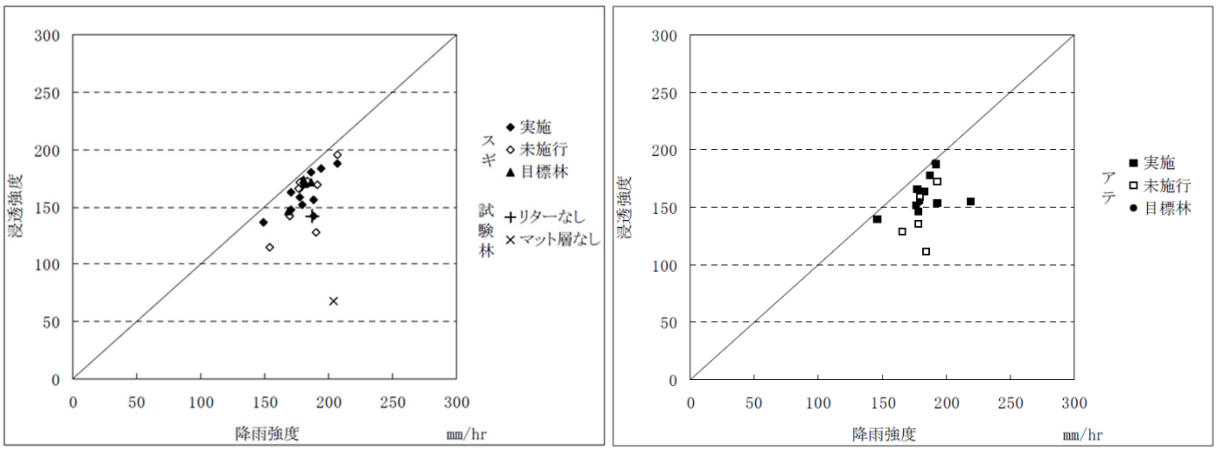


図 4.7 降雨強度と浸透強度の関係(石川県)
(左:スギ林、右:アテ林)

3)大学等、研究機関よる調査事例

森林斜面は、下層植生やリターなどの被覆が存在しているため、自然降雨の最大降雨強度以上の浸透能を有し、ホートン型地表流の発生頻度は低いとされてきた(平田、 1956)。その一方で、林床の裸地化したヒノキ人工林におけるホートン型地表流の発生件数が多数報告されている(辻村ら、 2006; Gomi et al.、 2008; 宮田ら、 2009)。

ヒノキ林におけるホートン型地表流の発生は、裸地化した地表面に林内雨の大きな雨滴衝撃が加わることで土壌が目詰まりを起こし、クラストと呼ばれる堅い薄層が形成されることにより、浸透能が低下するためと考えられている(湯川・恩田、 1995)。恩田ら(2005)は、大型散水試験装置を用いてヒノキ樹冠上から散水を行って浸透能を測定した結果、既報値よりも一桁低い値を得ており、ヒノキ林の浸透能試験における地表面への雨滴衝撃の重要性に言及した。

加藤ら(2008)は、ヒノキ樹冠下で発生する大きな雨滴径と雨滴衝撃力をもった人工降雨を面積が 1 ㎡の散水区画内に均一に発生させる新しい振動ノズル式散水装置を開発した。この装置を用いて、日本各地のヒノキ人工林において浸透能を測定した結果、野外浸透能試験で測定された基準最終浸透能(FIR_{180})の範囲は 39.0～172.8 mm/h で、大きな雨滴衝撃を発生させない従来の浸透計で報告されている浸透能(>200mm/h)よりも低い値となり、恩田ら(2005)の浸透能と同様のオーダーであった。

また、図 4.8 に示すとおり、下層植生乾重量およびリター乾重量と最大浸透能の間に高い相関がみられたことから、この装置を用いて大きな雨滴衝撃力を発生させることにより、荒廃ヒノキ人工林における林内雨下の地表面における浸透能低下プロセスを正確に評価することが可能となった。

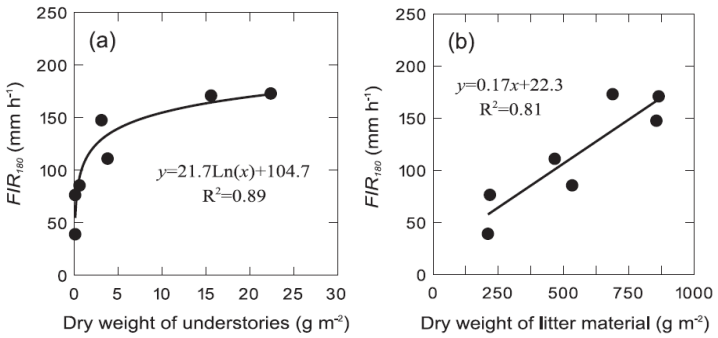


図 4.8 下層植生乾重量およびリター乾重量と基準最終浸透能の関係

また、平岡ら(2010)によって、植被率が 50%を下回ると最大最終浸透能が低下し、自然降雨下におけるホートン地表流の発生する可能性が高くなることや、植被率をブラウン-ブランケの被度指標で読

み替えた場合においても、被度 3 以下で最大最終浸透能が急激に低下することが示され、下層植生を指標とした水土保全機能の評価に基づく施業計画の策定につながることが期待された。

林野庁の 5 ヵ年に渡る浸透能調査結果データに、他機関(①、②)で実施されたデータも含めて、最大浸透能と各因子との相関を検討した結果は表 4.4 のとおりとなった(平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業報告書の表-71 を再掲)。相関係数は一般的には 0.4 以上で「相関がある」と判断されるが、これに従うと、スギ林ではリター被覆率、ヒノキ林では下層植生乾重、被覆物乾重、リター被覆率および傾斜、スギ・ヒノキ林ではL層厚、リター乾重、被覆物乾重およびリター被覆率の各項目が「相関がある」と判断できる。

ここに挙げられた項目は、ヒノキ林の傾斜を除いて、地表の被覆に関係する因子であり、林野庁事業の調査地だけではなく、大学等の研究機関による調査事例においても同様の結果が得られており、浸透能を維持・向上するためには地表の被覆が重要であることがわかる。したがって、浸透能の低下した林分で浸透能を向上させるためには、間伐を適切に実施することが重要であると考えられる。

表 4.4 他機関データも含めた樹種別の最大浸透能との相関

樹種	項目	立木密度	相対照度	L層厚	リター乾重	下層植生乾重	被覆物乾重※	リター被覆率	傾斜
スギ	相関係数	0.19589	-0.218	0.11861	0.35594	-0.1674	0.34732	0.47222	-0.1197
	標本数	40	15	15	40	40	40	40	40
ヒノキ	相関係数	-0.3596	0.24613	0.37196	-0.3596	0.52322	0.51353	0.61504	-0.411
	標本数	36	36	36	36	36	36	36	36
スギ・ヒノキ	相関係数	-0.1045	-0.1013	0.74463	0.47169	0.10318	0.48841	0.63981	-0.3087
	標本数	76	51	51	76	76	76	76	76

※被覆物乾重とは下層植生、リター(枝葉)の合計

※相関がある(0.4以上)因子をハイライト

4.3. 調査地の選定

4.3.1. 調査候補地の選定

本事業のおける調査候補地は、関東地方から複数箇所を選定し、現地における林況調査および関係資料等のレビューに基づき、1 地区決定することとし、当該地区内で保安林整備(本数調整伐)と併せて筋工、柵工等が設置されている箇所と設置されていない箇所にそれぞれプロット設けて調査を行うこととした。

今回は、上記の条件を満たす神奈川県足柄上郡玄倉(以下「玄倉」という)および愛甲郡清川村煤ケ谷(以下「清川村」という)の 2 地区を候補地とし(図 4.9 参照)、現地の林況調査および関係資料の収集を行った。調査候補地の概要は表 4.5 のとおりである。

図 4.9 調査候補地位置図

表 4.5 調査候補地の概要

所在地	足柄上郡玄倉	愛甲郡清川村煤ケ谷
県有林名	26 林班ろ小班三	17 林班と小班十
保安林種	水源かん養林 土砂災害防止林	水源かん養林 土砂災害防止林
樹種	ヒノキ	スギ・ヒノキ
植栽年	T9	S36・H9
施業施行	H22	H30
施業区分	保安林整備(本数調整伐 23%)	造林業務(間伐 35%)
筋工・柵工の種類	丸太筋工(三段、鋼管杭) 丸太筋工(三段・木杭)	現採丸太筋工 (三段、玉切り・整理を併用)

4.3.2. 現地踏査および調査地の決定

神奈川県内 2 箇所(玄倉・清川村)で実施した候補地の現地踏査結果は表 4.6 のとおりである。

表 4.6 候補地 2 箇所の現地踏査結果

候補地	概要
足柄上郡玄倉	 • 保安林整備による本数調整伐および丸太筋工の設置がなされている。 • 補足された土砂、堆積したリターなど、筋工の上下流側における土壌構造の違いを容易に判別できる。 • 現場までのルートの一部で、道幅が狭く崖のようになっているところがあり、滑落等の危険性があるため、十分な安全対策を講じる必要がある。 • 加工丸太＋鋼管杭による筋工であり、高コストだが高機能が期待できる。
愛甲郡清川村煤ケ谷	 • 造林業務による間伐および丸太筋工の設置である(保安林整備ではない)。 • 現採丸太を用いた従来型の筋工であり、低コストだが、機能のバラつきが大きい可能性がある。 • 急傾斜ではあるが、滑落等の危険性は低く、都内からのアクセスもよい。 • 2019 年台風の影響か、落下・堆積した枝葉が全体的に多く、純粋な浸透能を図れない可能性がある。

玄倉候補地は、保安林整備による本数調整伐と併せて加工丸太と鋼管杭を使用した高品質な丸太筋工が設置されたヒノキ林分で、筋工が複数の段に設置されていることから、各筋工における土砂やリターの補捉状況や土壌構造の違いを明確に把握できるメリットがある。また、沢沿いであることから、散水装置に供給する水の調達も比較的容易とみられた。一方、現場までのルートには道が崩壊し、細くなっている箇所もあり、給水タンクなど大型の機材を運搬するには滑落などの危険性が高く、十分な安全対策が必要と思われた。

清川村候補地は保安林整備ではなく、造林事業による間伐を行った箇所ではあるものの、現採丸太を使用した従来型の丸太筋工が設置されたスギとヒノキの混交林である。急傾斜ではあるがアクセスは良好で、滑落等の危険性は少ない。

今年度は試行ということもあり、プロットの設置が比較的容易と思われた清川村の現場を調査地として選定した。なお、清川村の現場は、常時水のある沢に隣接していなかったため、散水用の水は近隣の大洞沢からエンジンポンプでタンクに汲み上げ、トラックで運搬することとした。

4.4. 調査地の概況

4.4.1. 位置

調査地として選定した神奈川県愛甲郡清川村煤ケ谷地内の現場は、図 4.10 および図 4.11 に示すとおり大洞トンネル付近に位置している。

図 4.10 調査地位置図(1)

図 4.11 調査地位置図(2)

4.4.2. 道路状況

調査地へのアクセス路となる県道 70 号は令和元年の台風 19 号により被災し、一部の区間においては、天候によって通行止めとなっていたことから、調査回毎に管轄である神奈川県厚木土木事務所に通行状況を確認し、通行許可を得る必要があった。

4.4.3. 気象

最寄りの気象庁の気象観測所である海老名観測所(アメダス:四要素観測、設置場所:海老名市中新田、標高 18m)と相模湖観測所(アメダス:降水量のみ観測、設置場所:相模原市緑区相模湖町与瀬、標高 188m)における過去 10 年間(2010～2020 年)のデータを表 4.7 に整理した。平均年降水量は海老名観測所 1,822mm、相模湖観測所 1,780mm、海老名観測所の年平均気温は 15.8℃である。

2010～2020 年における月別平均気温と月間合計降水量を図 4.12 に示し、2010～2020 年における年間合計降水量を図 4.13 に示す。

表 4.7 2010～2020 年における気象データまとめ

観測所		雨量(mm)		気温(°C)			風速(m/s)		日照時間(hr)
		平均(年)	最大(日)	平均(日)	最高	最低	平均(日)	最大	日合計の平均
海老名	観測値	1,822	240	15.83	36.6	-5.6	2.2	16.3	5.5
	観測日	2010-2020	2019/10/12	2010-2020	2011/8/18	2018/1/27	2010-2020	2011/9/21	2010-2020
相模湖	観測値	1,780	595	-	-	-	-	-	-
	観測日	2010-2020	2019/10/12	-	-	-	-	-	-

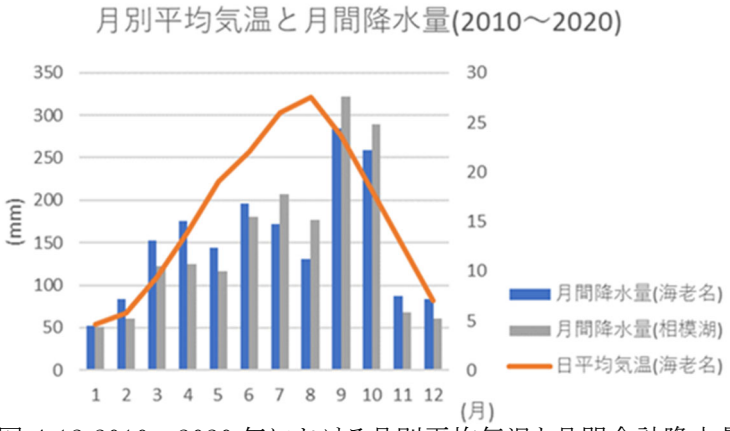


図 4.12 2010～2020 年における月別平均気温と月間合計降水量

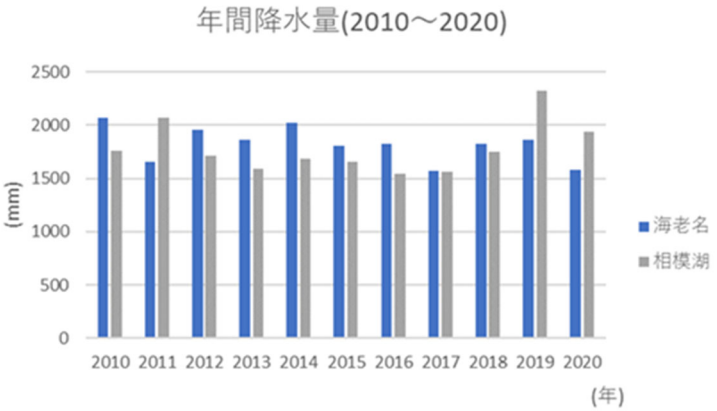


図 4.13 2010～2020 年における年間合計降水量

4.4.4. 地形・地質・土壌

調査地は、丹沢層群がほぼ全域に分布する丹沢山地東部に位置する。丹沢層群の地層は、主に緑色凝灰岩(固結堆積物に分類)や火山角礫岩(火山性岩石に分類)で構成され、およそ 1,700 万年前(新生代新第三紀)以降に海底で活発に活動していた海底火山の溶岩や火山噴出物が厚く堆積・固結してできた地層とされている(図 4.14 参照)。地質ナビによれば、調査地の地質は玄武岩、土壌は普通固結岩屑土となっている(図 4.15 参照)。

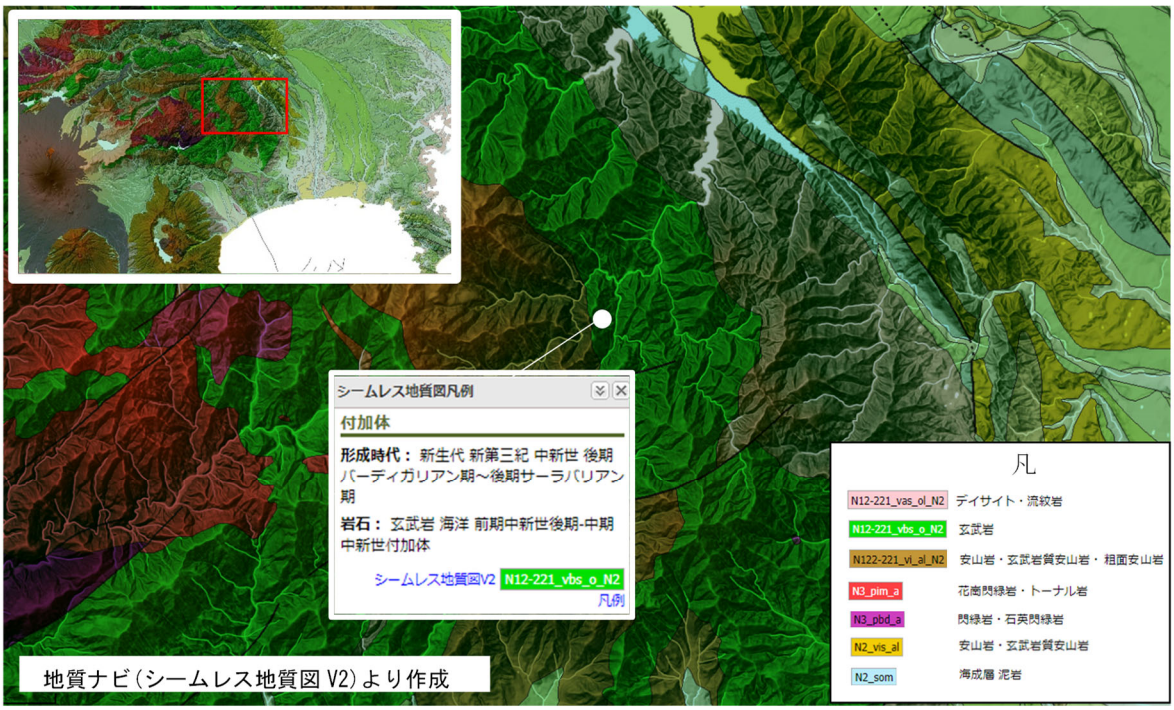


図 4.14 表層地質図

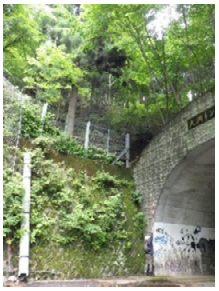
図 4.15 土壌図

4.4.5. 林況および施業履歴

(1) 林分の状況

調査地は、丹沢県有林「17 林班・と小班十」に該当する林分である。昭和 59 年度に保安林に指定されたスギ・ヒノキの混交林であり、工事台帳によると、昭和 36 年と平成 9 年に植栽が行われている。

図 4.16 の写真(2)や(3)にみられるように、調査地全体に渡り落枝が多く、2019 年(令和元年)台風第 19 号の影響と思われた。また、写真(3) に示すとおり、過去にシカ食害対策の植生保護工(金網柵)が設置され、その一部が残存している。図 4.17 には、UAV より上空から撮影した調査地の様子を示す。



(1)大洞沢トンネル南側からみた調査地の様子。

(2)調査地上流側からみた下流側の様子。林内は明るく、下層植生や落枝が豊富。

(3)対策の金網柵が設置されている。

図 4.16 清川村の現場の様子

図 4.17 上空からみた清川村調査地の様子(UAV で撮影)

(2) 施業履歴

工事台帳によると、17 林班内で平成 30 年度に間伐(と小班十は 35%)および現採丸太筋工(三段積み玉切り・整理を併用、延長 180m分)が施工されている。現地で確認した筋工の一部を図 4.18 に示す。一番左の写真の箇所が、実際に浸透能調査の「筋工あり」プロットとして設置した箇所である。

図 4.18 清川村の現場でみられた筋工(一部)

4.5. 浸透能試験プロットの設定

散水試験を実施するプロットは、大洞トンネルの西側斜面に「筋工あり」と「筋工なし」の 2 プロットを設け、それぞれをプロット 1、プロット 2 とした(図 4.19 参照)。また、各プロットの近景を図 4.20 に示す。

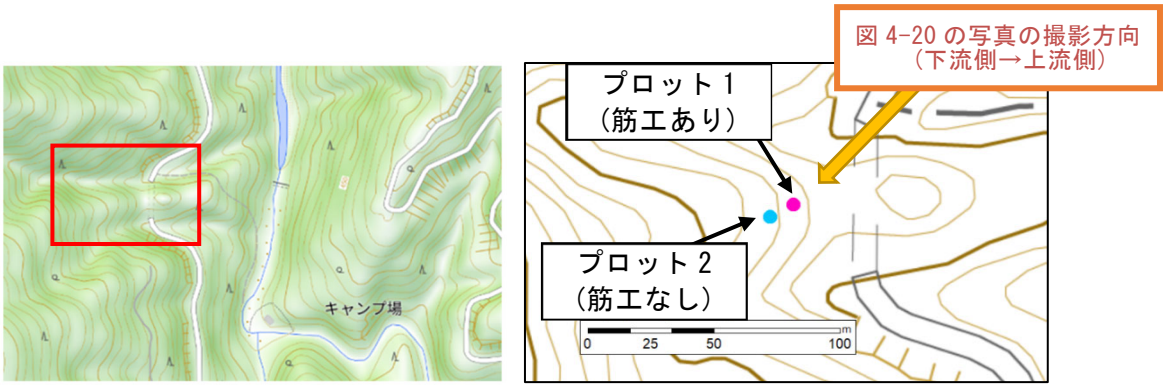


図 4.19 調査位置図とプロット設置箇所

相互位置関係	プロット 1 近景	プロット 2 近景

図 4.20 プロットの位置関係と近景

各プロットの諸元は表 4.8 のとおりである。なお、プロット諸元のうち、植生や土壌に関する情報は、林相調査や土壌調査の結果に基づくものであり、それらの調査方法の詳細については「4.8 林相調査」や「4.9 土壌調査」に記す。

表 4.8 プロット諸元

プロット番号	標高	斜面方位	斜面傾斜	土壌タイプ	優占樹種	表面被覆率	リター被覆厚	下層植生乾重	リター乾重	プロット投影面積	プロット傾斜
1	485m	東	36°	褐色森林土	スギ	70%	5.5cm	15.4 g/cm^2	761.2 g/cm^2	0.89m^2	36°
2	493m	東	36°	褐色森林土	スギ	59%	2.6cm	1.3 g/cm^2	561.3 g/cm^2	1.0m^2	36°

4.6. 浸透能試験

4.6.1. 現場型振動ノズル式散水装置を用いた測定方法

(1) 構成

図 4.21 に示すとおり「現場型振動ノズル式散水装置」は①送水部、②散水部、③集水部で構成され、①送水部には給水タンクや送水機器、②には振動ノズル式散水装置、③には集水プロットが設置される。①では給水タンクから散水装置への送水量、②では散水対象範囲への散水量、③では散水対象範囲からの流出量をそれぞれ測定する。

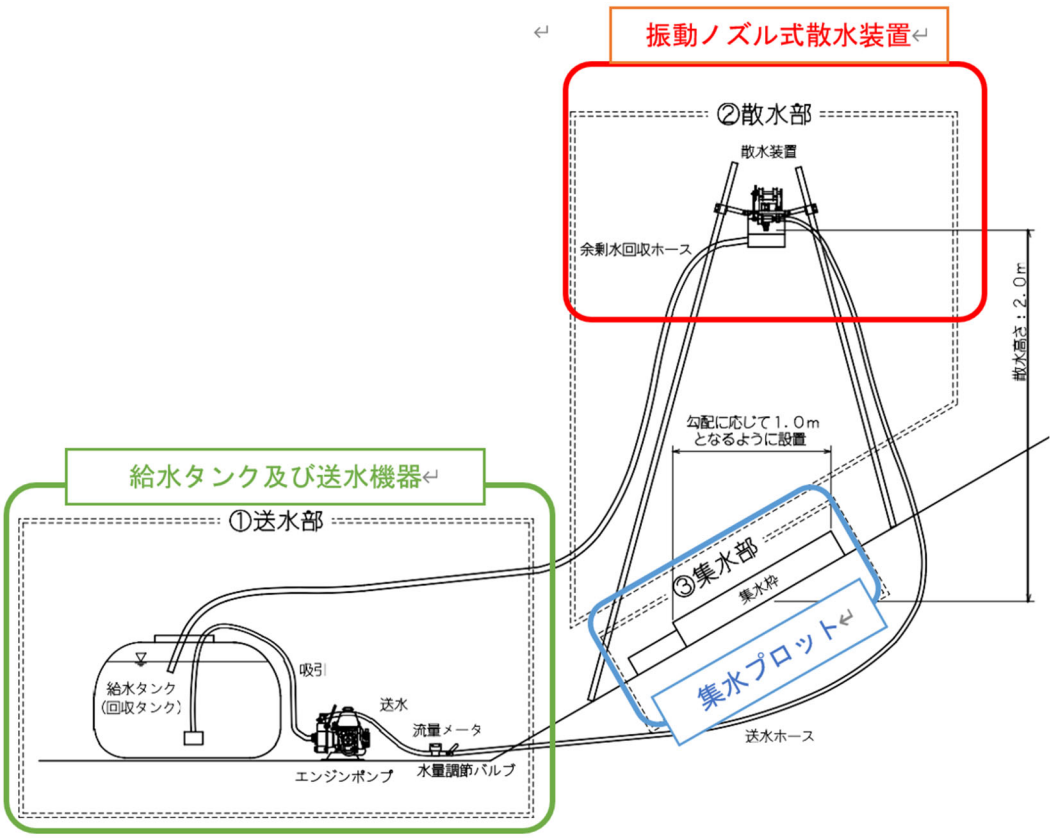


図 4.21 散水装置全体図
(出典:平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)報告書　図 2 に追記)

集水枠の上辺は等高線と平行方向に設置し、左右の側辺は勾配に応じて水平延長が 1m となるように長さを調整した。集水部は波板による集水枠と集水シュートで構成され、集水枠は鉛直投影面積(散水面積)が 1m×1m＝1m^2 となるように設置した。ただし、筋工ありプロットでは、図 4.22 のイラスト(上)のとおり、筋工の下部ではなく、直上に集水用の軒樋(幅 100cm×径 10cm)を設置したことから、散水投影面積は 1.0m2 ではなく、0.89m^2 となる。

給水タンクは、滑落防止のために単管パイプなどを用いて、現地の地形に合わせた補強を行った(図 4.23 参照)。

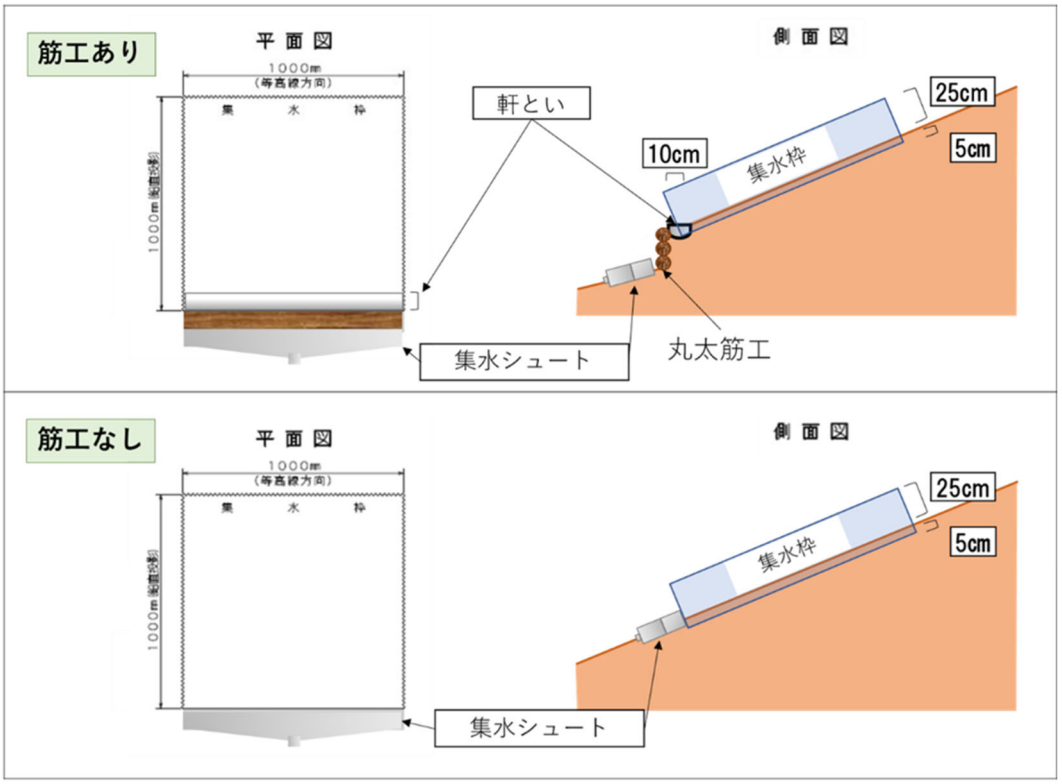


図 4.22 集水プロットの設置イメージ

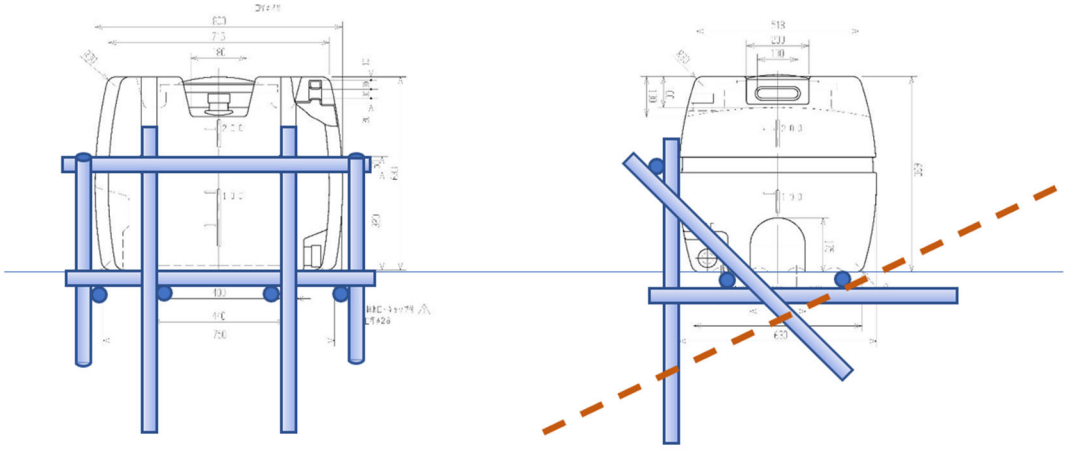


図 4.23 給水タンク設置イメージ

設置した散水装置、給水タンク、各プロットの様子は図 4.24 のとおりである。

図 4.24 設置した散水装置、集水プロット
(左上:散水装置、左下:給水タンク、右上:集水プロット(筋工あり)、右下:集水プロット(筋工なし))

(2) 測定手順

振動ノズル式散水装置を用いた一般的な浸透能の測定手順について以下に記す。なお、今回の調査では、現地条件等を踏まえ、下線部で示すような工夫を行った。

【設置】

- 集水枠の設置、集水シュートの取り付け、散水装置および各ホースの設置を行い、各機器の調整を行う。集水枠を構成する波板の幅は 2cm、散水対象面外への浸透水の回り込みを防止するため地中に 5cm 程度差し込む。
- 集水シュートは A_0 層と A 層の境界に差し込み、スムーズに集水されるように勾配をつけ、散水した水がシュート内に直接入らないように蓋をして設置。
- 流出水は、シュートの末端部から回収。

※今回は、筋工ありのプロット 1 では、筋工の真上に設置した軒樋からも流出水を回収できるようにした。

- 集水枠の四隅から×印となるよう標識テープを張り、テープの交差地点を集水枠中心として、その地点の地表面から約 2m の高さに散水装置のノズルが設置されるように、下げ振りや散水装置に取り付けてある水準器で、装置が水平となるよう調整する。

【送水量の調整】

- 200mm/h 以上の降雨強度が得られるよう、まずは流量メーターでエンジンポンプからの送水量が 15 ℓ/sec 程度となるようにバルブで散水量を調節。
- 送水量を調節した後、散水装置のノズルの振動幅と周期を所定の散水量になるように調整。

【測定】

- 散水時間は、流出水量が定常化するまでにかかる時間を考慮して、20 分間を目安とし、流出水量は 20 秒毎にメスシリンダーで採水して計測。

※今回は、プロット 1 では筋工の直上に設置した軒樋から流出する水を 20 秒毎に 10 分間採水し計測した。なお、筋工の直下にも集水シュートを設置したが、、10 分間では筋工の直下からの流出水は確認できなかった。プロット 2 ではプロット下部に設置した集水シュートから流出する水を 20 秒毎に 5 分間、その後、1 分毎に 12 分間(計 17 分間)採水計測した。

- 流出水量が定常化したと判断された時点で散水を停止し、その後、流出水量が 10mm/min 以下となった時点で計測を終了。
- 採水流出水は、後で流出土砂量を計測するため、試験開始から 15 分間の流出水をポリタンクに保存した。

※今回は上記のとおり採水した流出水を、プロット 1 では試験開始から約 10 分間分、プロット 2 では 17 分間分、容器に入れて保存した。

- 最終降雨強度、最終浸透強度ともに、流出水量が定常化したとして散水を終了するまでの 5 分間の 1 分目、2 分目、3 分目、4 分目、5 分目のそれぞれの値の平均値とする。

※今回は、流出水量が定常化せずに散水時間を通して変動がみられたため、最終降雨強度、最終浸透強度ともに、平均値をとる時間間隔については、後述する「4.6.2 の浸透能試験結果および考察」の中で検討した。

(3) キャリブレーション

1) 趣旨

散水実験では集水枠内と集水枠外の水分量をほぼ同一にするため、集水枠外へも同時に散水を行っており、送水量をそのまま集水枠内の降雨強度に換算することはできない。このため、集水枠内の散水量を把握し、散水量のキャリブレーション(校正)を行う必要がある。

集水枠の内外で水分量を同一にしようとする理由は、散水を集水枠内だけに限定すると、集水枠内の浸透水が周辺の乾燥した土壌へ流れ込む可能性があることから、図 4.25 に示すとおり集水枠外へも散水し、集水枠外の土壌もほぼ同一の水分量として、実際の降雨時の浸透現象に近い状況を作るためである。

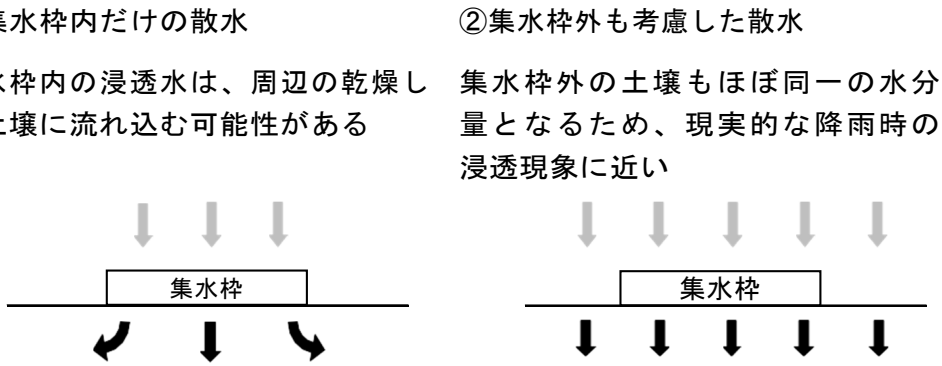


図 4.25 散水の考え方

2) 方法

キャリブレーションの方法は、次に示すとおりである。

① 計測終了後、集水枠をビニールシートで覆って散水(図 4.26 参照)。
② シュートで集水された水量(流出量)を、集水枠内への散水量として把握。
③ 散水量と流量メーターで計測した送水量との関係から係数を算出し、ある送水量に対応する降雨強度へ換算。

図 4.26 散水装置の校正(キャリブレーション)の様子

3) 手順

キャリブレーションの手順は、次に示すとおりである。

① 測定開始時の流量と 1 分ごとの流量と流出量を計測して各量の平均値を算出。

② この流出量の平均値(mℓ/min)を面積当たりの水高に換算(1,000 で割る、1,000mℓ/m^2＝mm/m^2)。

③ 1 時間当たりに換算するため 60 を乗じ、散水面積 (今回の調査では筋工ありプロット:0.89m^2、筋工なしプロット:1.0m^2)で割り、得られた値を降雨強度(mm/hr)とする。

なお、流量は測定した時点の通過流量であるため、1 分毎の流量は、前後の流量の測定値を平均して求めた。また、キャリブレーションのための散水時間は、流出量が比較的安定している場合には 3 分間、やや不安定な場合には状況に応じて 4～5 分間とするなど適宜調整を行う。

4) 換算

降雨強度の平均値を算出するに当たっては、枠内の貯留現象等による流出の遅滞を考慮して、4 分以上キャリブレーションを行った場合には最初の 1 分間の降雨強度を除外して、残りの 3 分間(5 分以上キャリブレーションを行った場合には 4 分間)の平均値を各試験の降雨強度の基準値とすることが標準的である。

5) キャリブレーションの例

キャリブレーションの例として、今年度調査におけるプロット 2 のキャリブレーション計算結果の例を表 4.9 に示した。

表 4.9 プロット 2 におけるキャリブレーションの例

No.	測定間隔 sec	送水量 L/s	流出量 ml	降雨強度 mm/h
1	20	14.7	1,200	216.0
2	20	14.6	-	-
3	20	14.7	1,400	252.0
4	20	14.8	1,100	198.0
5	20	14.9	1,380	248.4
6	20	14.9	1,100	198.0
	平均	14.8	1,245.0	224.1

今回の調査では、散水用の水を多く確保することが困難であったため、プロット 2 でのキャリブレーションの実施時間は、通常よりも短めの 2 分間(120 秒)であり、最初の 40 秒間(2 計測分)は安定した流出量が得られなかったことから、残りの 80 秒(4 計測分)の降雨強度の平均値を基準値とした。

ちなみに、プロット 1 では 1 分間(20 秒×3 計測)のキャリブレーションであったことから、計測した降雨強度すべての平均値を基準値とした。

この結果から流量が 14.8ℓ/min の時の降雨強度が 224.1mm/hr に相当するものと判断され、流量を x、降雨強度を y とすると試験中に測定された流量 x に対する降雨強度 y は、以下式で計算される。

$$y = 224.1x / 14.8 \qquad (3)$$

この式により散水試験時に測定した 1 分間ごとの流量に対する降雨強度を得ることができる。

4.6.2. 浸透能試験結果および考察

【降雨強度と浸透強度】

今年度は、間伐と併せて、筋工が設定されている箇所(プロット 1)と、設置されていない箇所(プロット 2)の計 2 プロットにおいて散水試験を行った。散水試験より得られたプロット 1、プロット 2 の流出水の計測結果および降雨強度、浸透強度の計算結果を表 4.10 に、降雨強度、浸透強度の経時変化を図 4.28 に示す。

表 4.10 流出水の計測結果および降雨強度、浸透強度の計算結果(左:プロット 1、右:プロット 2)

No.	測定間隔	累積時間	送水量	降雨強度	流出量	流出高	浸透強度
	sec	min	L/s	mm/h	ml	mm/h	mm/h
1	20	0.3	14.7	228.8	10	1.8	227.0
2	20	0.7	14.7	228.8	40	7.2	221.6
3	20	1.0	14.7	228.8	40	7.2	221.6
4	20	1.3	14.8	230.3	100	18.0	212.3
5	20	1.7	14.9	231.9	50	9.0	222.9
6	20	2.0	15.1	235.0	110	19.8	215.2
7	20	2.3	14.9	231.9	180	32.4	199.5
8	20	2.7	15.1	235.0	140	25.2	209.8
9	20	3.0	14.9	231.9	200	36.0	195.9
10	20	3.3	14.9	231.9	200	36.0	195.9
11	20	3.7	15.1	235.0	280	50.4	184.6
12	20	4.0	15.1	235.0	270	48.6	186.4
13	20	4.3	14.9	231.9	310	55.8	176.1
14	20	4.7	14.9	231.9	300	54.0	177.9
15	20	5.0	15.1	235.0	380	68.4	166.6
16	20	5.3	14.9	231.9	310	55.8	176.1
17	20	5.7	15.1	235.0	340	61.2	173.8
18	20	6.0	14.9	231.9	210	37.8	194.1
19	20	6.3	15.1	235.0	270	48.6	186.4
20	20	6.7	14.8	230.3	340	61.2	169.1
21	20	7.0	14.8	230.3	210	37.8	192.5
22	20	7.3	14.9	231.9	200	36.0	195.9
23	20	7.7	14.9	231.9	150	27.0	204.9
24	20	8.0	14.9	231.9	100	18.0	213.9
25	20	8.3	14.9	231.9	160	28.8	203.1
26	20	8.7	14.9	231.9	100	18.0	213.9
27	20	9.0	14.8	230.3	150	27.0	203.3
28	20	9.3			100	18.0	(18.0)
29	20	9.7			10	1.8	(1.8)
30	20	10.0					
平均				232.1			197.8

No.	測定間隔	累積時間	送水量	降雨強度	流出量	流出高	浸透強度
	sec	min	L/s	mm/h	ml	mm/h	mm/h
1	20	0.3	14.8	224.1	30	5.4	218.7
2	20	0.7	14.6	221.1	180	32.4	188.7
3	20	1.0	14.6	221.1	350	63.0	158.1
4	20	1.3	14.7	222.6	未計測		
5	20	1.7	14.7	222.6	510	91.8	130.8
6	20	2.0	14.7	222.6	540	97.2	125.4
7	20	2.3	14.7	222.6	660	118.8	103.8
8	20	2.7	14.8	224.1	590	106.2	117.9
9	20	3.0	14.8	224.1	670	120.6	103.5
10	20	3.3	14.7	222.6	680	122.4	100.2
11	20	3.7	14.8	224.1	670	120.6	103.5
12	20	4.0	14.8	224.1	630	113.4	110.7
13	20	4.3	14.8	224.1	660	118.8	105.3
14	20	4.7	14.7	222.6	650	117.0	105.6
15	20	5.0	14.5	219.6	700	126.0	93.6
16	60	6.0	未計測		2060	123.6	
17	60	7.0	14.8	224.1	700	42.0	182.1
18	60	8.0	14.9	225.6	1800	108.0	117.6
19	60	9.0	14.8	224.1	2010	120.6	103.5
20	60	10.0	14.8	224.1	1850	111.0	113.1
21	60	11.0	14.8	224.1	2030	121.8	102.3
22	60	12.0	14.8	224.1	1930	115.8	108.3
23	60	13.0	14.4	218.0	1660	99.6	118.4
24	60	14.0			600	36.0	(36.0)
25	60	15.0			170	10.2	(10.2)
26	60	16.0			60	3.6	(3.6)
27	60	17.0			20	1.2	(1.2)
28							
29							
30							
平均				223.0			124.3

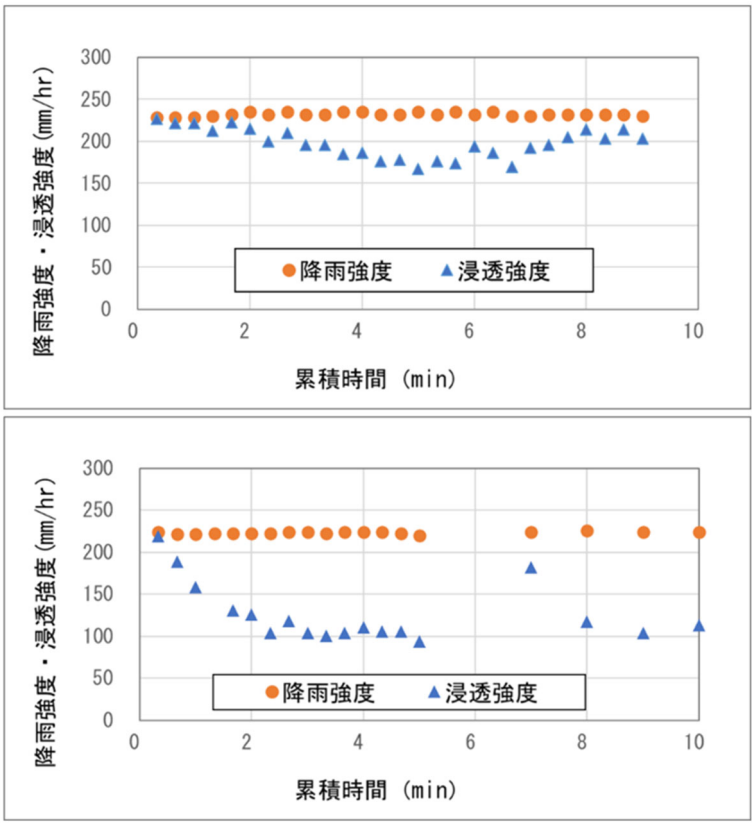


図 4.27 降雨強度と浸透強度の経時変化(上:プロット 1、下:プロット 2)

プロット 2 において、開始 6 分後周辺の降雨強度、浸透強度の値が欠損し、7 分後に高い値が出ているのは、計測中に散水装置に接続しているホースが外れ、送水がストップしたとともに、復旧後に不安定な量の水が送水されたためである。

各プロットにおける平均的な浸透強度は、通常、実験終了直前の数分間の浸透強度を平均することで算出することができる。しかしながら、今年度の浸透能試験においては、測定時間がプロット 1 で 10 分、筋工なしプロットで 17 分と、プロット毎に異なり、全体を通して浸透強度にもばらつきがみられ、定常化したとは言い難いことから、以下の 2 つの方法で浸透強度を図ることとした。

【方法 1】

一つ目は浸透強度、降雨強度ともに測定した値すべてを平均化したものを各プロットの浸透強度とする方法である。この場合、表 4.11 に示すとおり、浸透強度はプロット 1 で 197.8mm/hr、プロット 2 で 124.3mm/hr となった。

表 4.11 全測定値の平均化による浸透能試験結果(清川村)

箇所		降雨強度 mm/hr	浸透強度 mm/hr
清川村	プロット1(筋工あり)	232.1	197.8
	プロット2(筋工なし)	223.0	124.3

【方法 2】

二つ目は、浸透強度がやや定常化したと思われる時間帯の測定値のみ平均する方法である。図 4.28 から、プロット 1 では開始 4 分から 6 分、プロット 2 では開始 3 分から 5 分の測定値がやや定常化しているとみられることから、それぞれその 2 分間の測定値を平均したものを浸透強度とした。その結果、浸透強度はプロット 1 で 177.4mm/hr、プロット 2 で 103.1mm/hr となった(表 4.12)。

表 4.12 定常状態にある測定値の平均化による浸透能試験結果(清川村)

箇所		降雨強度 mm/hr	浸透強度 mm/hr
清川村	プロット1(筋工あり)	232.9	177.4
	プロット2(筋工なし)	222.8	103.1

いずれの結果も、筋工が設置されているプロット 1 の浸透強度はプロット 2 の浸透強度に比べて高く、方法 1 では 1.59 倍、方法 2 では 1.72 倍となった。これにより、筋工の設置が斜面の土壌保水力の向上に寄与している可能性が示唆された。

ただし、今回の結果は各プロットで 1 回のみの実験結果に基づくものであることから、データの信頼性を高めるためには、複数回の試験を通した分析を行うことが望ましく、次年度以降、留意すべき点としたい。

以下、最大浸透能の計算は、上記の「方法 2」により算出した浸透強度、降雨強度をベースとする。

【最大浸透能】

降雨強度と浸透強度の関係は、下記の双曲線関数で近似できる(田中・時岡、2007)。

$$FIR = FIRmax \tanh(R / FIRmax) \quad (4)$$

FIR：実験で得られた浸透強度(mm/hr)

FIR max：降雨強度が十分高い時の最大浸透能(mm/hr)

R：実験の降雨強度(mm/hr)

最大浸透能　：降雨強度が十分に高いと全ての地表面で降雨余剰(＝地表流)が発生するため浸透能が一定値になり、この一定となった時の浸透能を最大浸透能と定義している。

(4)式を使って、最大浸透能(*FIRmax*)を計算することが可能であるが、この式から直接、最大浸透能を計算することはできないため、以下のように逆算して求める。

a. 上式の *FIRmax* の初期値(想定最大浸透能　α)として「計測された浸透強度－10」を与え、α を漸増させて浸透強度を計算する。

b. 算出した浸透強度と計測された浸透強度との誤差を計算し、誤差が 0 に最も近い時の浸透強度を次の α とする。

c. この α を初期値としてa、bと同様に浸透強度、誤差を計算して次の α を求める。

d. 以下、順に小数点以下の桁数を下げて繰り返し計算し、計算した誤差が設定した誤差以下となるまで逐次計算する。

このようにして求めた最大浸透能を (4)式にあてはめれば、試験を行った地点の降雨強度に対する浸透能が推定でき、浸透能推定曲線を描くことができる。

表 4.13 には、上記 a から d によって求めた今年度の清川村調査地における最大浸透能を記載するほか、平成 24 年度に林野庁調査事業で実施した群馬県吾妻郡高山村の浸透能調査の結果も、比較参照用として追加した。当該年度の調査では、降雨強度はスギ林で 200mm/hr 程度と 300mm/hr 程度、ヒノキ林で 200mm/hr 程度で調整されていた。

結果として、今年度の清川村調査地における最大浸透能は、プロット 1 では 233.0mm/hr、プロット 2 では 106.3mm/hr となった。これらの値は、北山 1 および 2 のスギ調査地において、降雨強度 200mm/h で試験をした際の最大浸透能と比べるとやや低めであった。

表 4.13 浸透能試験結果(H24 年度の浸透能試験結果を含む)

調査年度	箇所		降雨強度 mm/hr	浸透強度 mm/hr	最大浸透能 mm/hr
R3年度試験	清川村	プロット1(筋工あり)	232.9	177.4	233.0
		プロット2(筋工なし)	222.8	103.1	106.3
H24年度試験（参考）	北山 1	(H24)スギ北200	162.2	145.4	272.8
		(H24)スギ南200	166.3	151.8	308.2
		(H24)ヒノキ	182.3	117.5	134.0
		(H24)スギ北300	244.9	208.4	331.7
		(H24)スギ南300	247.6	216.6	372.0
	北山 2	(H24)スギ東200	162.0	148.5	307.3
		(H24)スギ西200	159.6	150.9	381.5
		(H24)ヒノキ	157.4	34.0	34.1
		(H24)スギ東300	249.4	229.1	479.7
		(H24)スギ西300	241.7	227.6	557.3

表 4.13 に示す、降雨強度と浸透強度の関係をグラフ化すると図 4.28 のようになる。

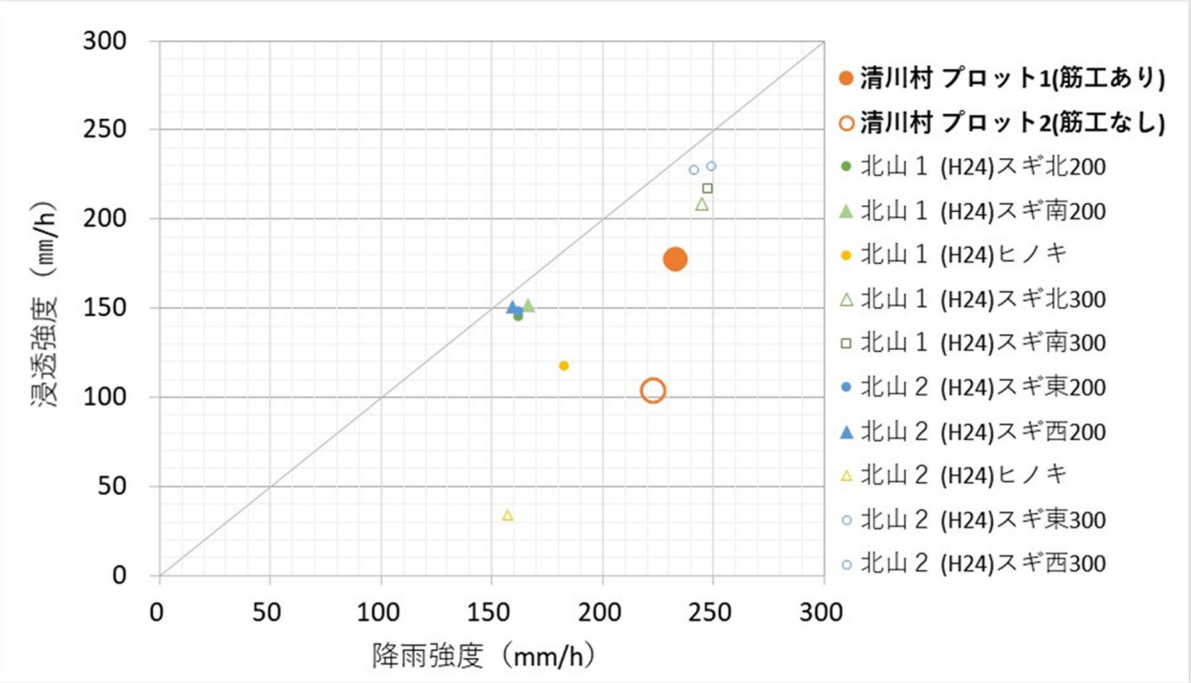


図 4.28 降雨強度と浸透強度の関係(H24 年度の浸透能試験結果を含む)

さらに、これらの最大浸透能を、上述の (4)式に当てはめ、各試験プロットの降雨強度の変化に対する浸透能の変化を算出し、浸透能推定曲線を描くと図 4.29 のようになった。

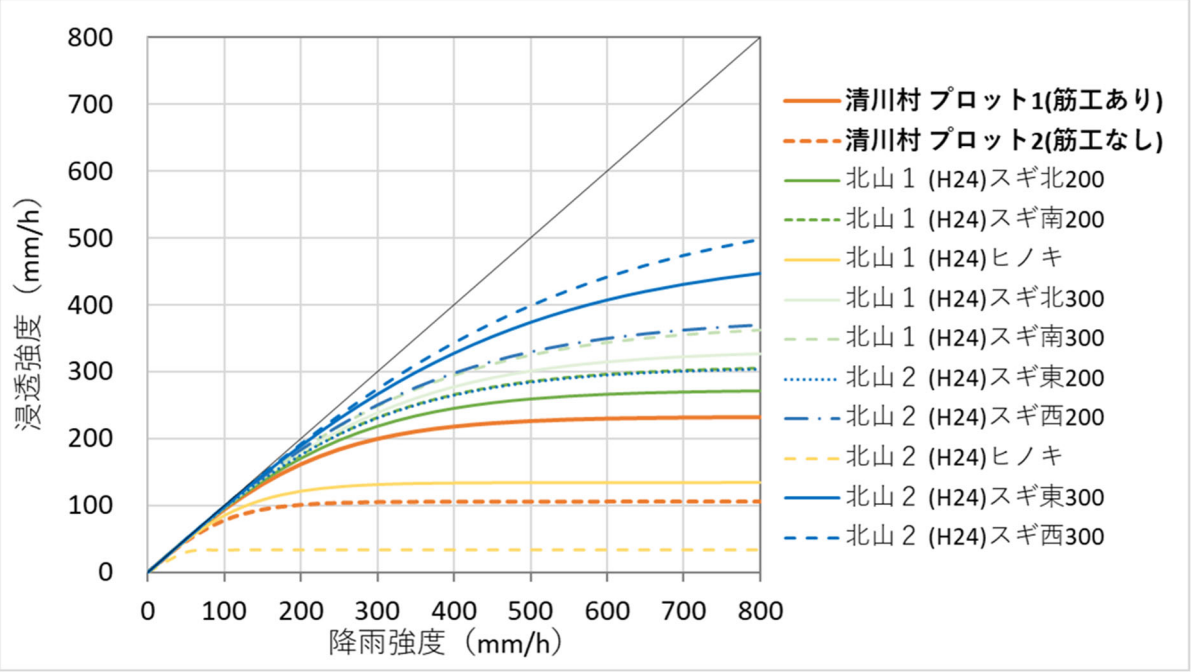


図 4.29 箇所別浸透能推定曲線(H24 年度の浸透能試験結果を含む)

オレンジ色の実線で記した清川村プロット 1 の浸透能推定曲線は、降雨強度が 200mm/hr で調整された北山スギ調査地のそれと近似するものの、やや低めの曲線となった。

オレンジ色の点線で記した清川村プロット 2 の浸透能推定曲線は、スギとしては低めで、北山調査地のヒノキの浸透能曲線に近いものとなった。先述のとおり、今回の結果は各プロットで 1 度きりの実験結果に基づくものであることから、この原因を推測するにあたってはデータがやや不十分であると言わざるを得ない。今後、複数回の試験を通した検証・分析により、データの質、信頼性を高めていくことが重要である。

図 4.29 の北山調査地のデータも併せてみると、降雨強度が 100mm/hr 程度以上から浸透強度にばらつきが出てくることがみてとれ、これは、降雨が 100mm/hr までは同程度に浸透するが、それを超えると林相や土壌特性の違いにより差が生じる、すなわち森林や林床、表層土壌の管理状態によって、浸透・流出をある程度制御できるということが分かる。

参考情報として図 4.28 および図 4.29 に示す平成 24 年度調査地点を含む各プロットの林況・植生・土壌等の調査結果総括表を表 4.14 に示す。なお、この表における清川村の林況・植生・土壌等に関する情報は、今年度の林相調査や土壌調査の結果に基づくものであり、それらの調査方法の詳細については、「4.8 林相調査」や「4.9 土壌調査」に記す。

表 4.14 林況・植生、土壌などの調査結果総括表

年度				H24						R3	
項目＼箇所				北山 1			北山 2			清川村	
				スギ北	スギ南	ヒノキ	スギ東	スギ西	ヒノキ	筋工あり	筋工なし
林況・植生	林種			スギ人工林	スギ人工林	ヒノキ人工林	スギ人工林	スギ人工林	ヒノキ人工林	スギ・ヒノキ混交林	スギ・ヒノキ混交林
	立木密度		本/ha	875	875	975	650	650	1,225	900	675
	平均樹高		m	21.2	21.2	19.4	15.5	15.5	12.4	15.5	15
	平均胸高直径		cm	26.2	26.2	20.9	22.2	22.2	16.5	23.7	23.5
	平均枝下高		m	8.6	8.6	8.1	7.8	7.8	6.5	5.8	5.7
	収量比数			0.71	0.71	0.79	0.46	0.46	0.6	0.62	0.55
	林齢		年	39	39	41	36	36	36	60	60
	間伐後経過年数		年	2	2	2	2	2	2	3	3
	相対照度	実測値	%	8.2	9.8	8.9	11.8	19	9.4	-	-
		計算値	%	18.4	19.2	19.9	19.4	19.7	18.8	-	-
	開空率		%	13.7	14.1	15.4	13.7	14.1	14.2	34.5	30.5
	開空部面積率		%	41.5	41.5	43.2	44.1	44.1	43.3	-	-
	下層植生出現種数	標準地内		29	29	19	35	35	29	-	-
		試験プロット内		8	6	6	8	8	8	-	-
土壌	土層厚	L層	cm	6	3.7	2.5	5	5.2	2.5	-	-
		F・H層	cm	2	1.8	2	1.8	2.5	3.8	-	-
		A_0層	cm	8	5.5	4.5	6.8	7.7	6.3	-	-
		A層	cm	20.3	28.2	15.5	20	18.5	18.5	20	10
		B層	cm	20.3	28.2	15.5	20	18.5	18.5	35	40
	土壌硬度	F・H層	mm	0.5	0.5	1.3	2.4	0.9	2.2	-	-
		A層	mm	12.2	8.8	10.4	12.3	13.2	11.3	-	-
		B層	mm	13.5	12.7	16.8	15.8	17.7	19.1	-	-
	地表被覆物乾重	下層植生	g	70.5	32	40	118.5	88	37	15.4	1.3
		リター 枝	g	280	783	184.7	284	226	93.6	-	-
		リター 葉	g	385.5	1072	358.8	709.1	815.5	309.4	-	-
		リター 小計	g	665.5	1855	543.5	993.1	1041.5	403	761.2	561.3
		合計	g	736	1887	583.5	1111.6	1129.5	440	776.6	562.6
	地表被覆率	リター	%	93	97	97	100	100	97	70	59
		植生	%	52	19	51	74	66	29		

4.7. 流出土砂の測定

4.7.1. 流出土砂濃度

(1) 測定方法

浸透試験時に集水プロットから流出する水(表面流)に含まれる流出土砂濃度として、ここでは、SS(Suspended Solids)濃度と VSS(Volatile suspended solid)濃度の測定を行った。SS とは、浮遊土砂に相当する、水中に懸濁している不溶解性物質のことで、2mm のフルイを通過し、1μm のろ過材上に残留する物質のことをいう。SS 濃度は、散水中に集水プロット下部で補足し、計測した流出水を 100ml 容器に移し、後日、105℃に設定した乾燥機で試料中の水分を蒸発させ、残渣となった土砂乾重(g)から 1 リットル当たりの SS 量(mg/ℓ)に換算することで算出した。VSS とは、上記の SS をさらに 500℃に設定した小型電気炉(マッフル炉)で 2 時間程度加熱(強熱)した後に揮散する物質質量(強熱減量)のことで、試料中の有機物量の目安となるものである。

(2) 結果および考察

プロット 1 とプロット 2 における表面流出量と SS、VSS 濃度の経時変化を図 4.30 に示す。

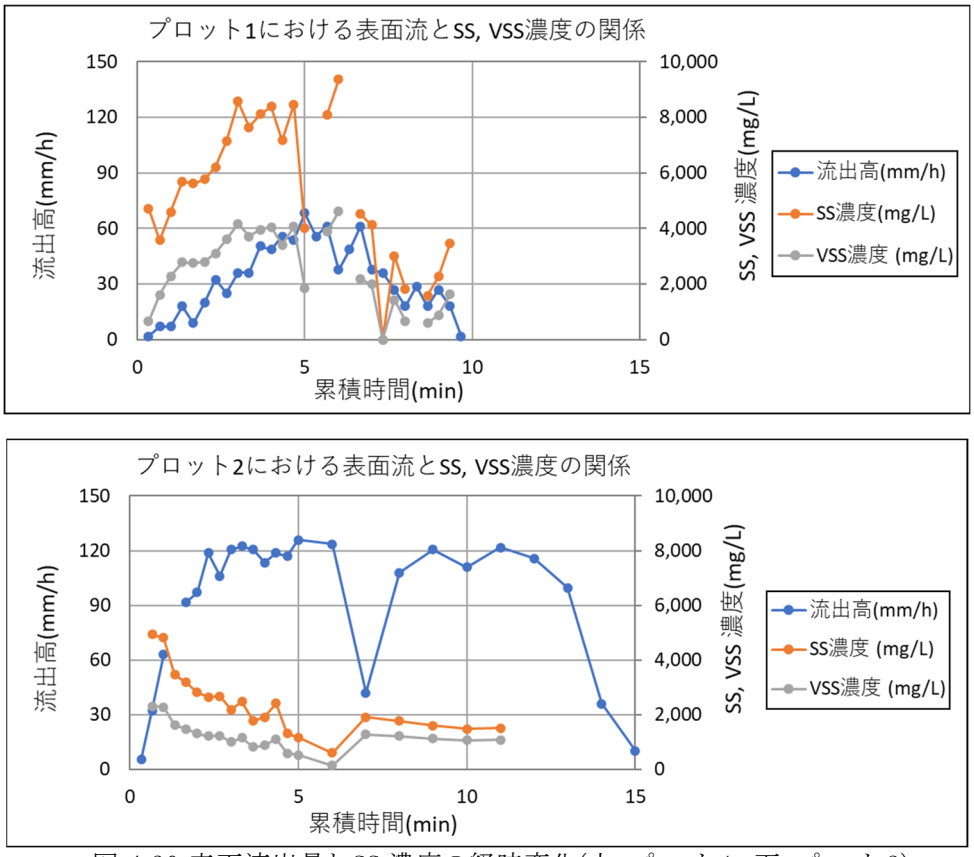


図 4.30 表面流出量と SS 濃度の経時変化(上:プロット 1、下:プロット 2)

図 4.30 において、プロット 1(筋工あり)からの流出量が、降雨開始後ゆっくり増加し、最大流量に達するのに約 5 分間要しているのに対し、図 32 のプロット 2(筋工なし)では、2 分程度と短く増加傾向が大きくなっており、筋工の構造と堆積土砂によってできた平坦部の存在による表面流の滞留と浸透が流出を遅延させたと考えられる。

筋工なしの状態での表面流の浮遊土砂濃度 SS が初期に高く次第に低下するのは、一般の表面侵食発生時において見られる現象であり、動き易い状態で降雨前の地表に堆積していた風成土や風化土由来の土砂が、最初の表面流で急激に流出したために初期濃度が高くなったと考えられる。一方、

筋工有りの場合は部分的な緩勾配部分において表面流の流速が低下し、また筋工の丸太等の構造周辺で、滞留することによって流出が抑制された結果と推察できる。

SS と同様、VSS も、プロット 1 では表面流出のゆっくりとした増加にともない増加し、減少もまた、同じ傾向で減少していくのに対し、表面流出が急激に増加したプロット 2 では初期の VSS が最も高く、徐々に減っていく傾向であった。

なお、プロット 2 よりもプロット 1 の方で、全体的に SS 濃度、VSS 濃度が高いのは、プロット 1 で筋工の直上に集水用に設置した軒といの中に、軒といと接している斜面で発生した土壌侵食に由来する土砂が直接的に流入したためと考えられ、集水装置の設置場所、設置方法に課題があったと考えられる。

VSS 濃度については、全体的にプロット 1 の方が高く、筋工ありプロットの地表における有機物量の多さがうかがえた。

4.7.2. 流出土砂量

(1) 測定方法

上記の SS 濃度は、流出水の単位容量当たりの土砂量であったが、流出水に含まれる土砂量そのものの質量についても時間的変化を把握するため、4.7.1 で測定した SS 濃度(mg/ℓ)に流出水量(mℓ)を乗じて、単位時間(毎分)当たりの土砂流出量(mg/min)を算出した。

(2) 結果および考察

プロット 1 とプロット 2 における表面流出量と流出土砂量の経時変化を図 4.31 に示す。

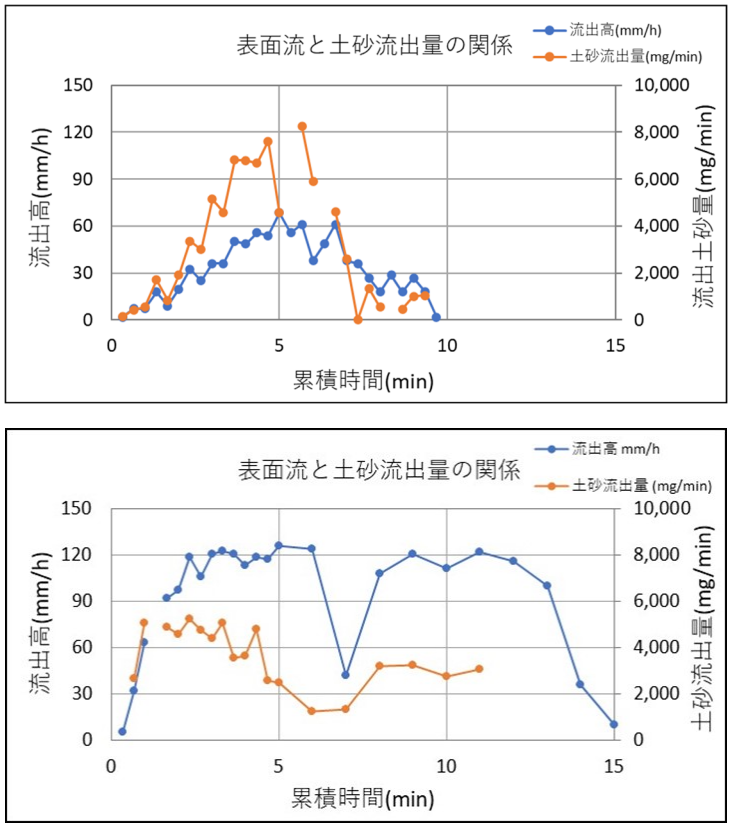


図 4.31 表面流出量と土砂流出量の経時変化(上:プロット 1、下:プロット 2)

降雨開始後の表面流出量の増加が、プロット 1(筋工あり)ではゆっくり、プロット 2(筋工なし)では急な上昇となる傾向は、「4.7.1 流出土砂濃度」で述べたとおり、筋工の構造と堆積土砂によってできた平坦部の存在が、表面流の滞留と浸透を促し、流出遅延を発生させたことに因るものと考えられる。

また、SS 濃度、VSS 濃度と同様、プロット 1 の方がプロット 2 よりも流出土砂量の初期上昇や低減が緩やかであるのは、筋工の緩勾配化による流速低減効果、筋工部分の土壌･リターの保水効果が発揮されたと解釈できる。

なお、プロット 1 の方がプロット 2 よりも流出土砂量が全体的に多いのは、SS 濃度や VSS 濃度と同様、プロット 1 の集水装置(軒樋)の設置場所や設置方法に課題があったことが考えられる。

4.8. 林相調査

4.8.1. 標準地調査

(1) 調査方法

林相調査は、プロット 1 と、プロット 2 を設置した箇所を中心として、計 2 箇所の標準地を設けて実施した。標準地のサイズは、平面投影面積が 400m^2 となるよう、水平距離で 20m×20m とし、標準地内の人工林の本数、樹種、胸高直径、樹高、胸高直径、枝下高を計測し、プロット毎に立木密度、プロット毎の樹種別に平均樹高、平均胸高直径、平均枝下高を計算した。また、平均胸高直径、平均枝下高を使って、収量比数、形状比、樹冠長率を算出した。収量比数については、神奈川県の収量比数判定表(スギ、ヒノキ)を用いて算出した。

(2) 結果および考察

標準地調査の結果は、表 4.15 のとおりである。

表 4.15 標準地集計表

標準地プロット	樹種	標準地面積(m^2)	樹種別本数(本)	立木密度(本/ha) ※1	平均樹高(m)	平均胸高直径(cm)	平均枝下高(m)	収量比数 ※2	形状比	樹冠長率(%)
プロット 1	スギ	400	16	900	14.4	20.5	5.3	0.60	75.2	63.1
	ヒノキ		22		16.4	26.3	6.2	0.65	69.2	62.2
	全体		36		15.5	23.7	5.8	0.62	71.8	62.6
プロット 2	スギ	400	14	675	13.7	20.2	5.5	0.50	72.2	60.2
	ヒノキ		13		16.8	28.3	6.3	0.59	65.4	62.9
	全体		27		15.0	23.5	5.7	0.55	69.7	61.6

※1:立木密度はスギ・ヒノキの本数を合わせて算出。

※2:収量比数の算定には神奈川県のスギ、ヒノキの収量比数判定表をそれぞれ適用。プロット全体の収量比数はスギ・ヒノキ、それぞれの収量比数の平均とした。

立木密度は、プロット 1、プロット 2 の標準地でそれぞれ 900 本/ha、675 本/ha であり、収量比数からもみてとれるとおり、プロット 2 の立木密度の方が若干低めであった。立木密度、形状比、樹冠長率は標準的な範囲にあり、森林の管理状態としては概ね良好な林分といえる。

4.8.2. 開空率

(1) 調査方法

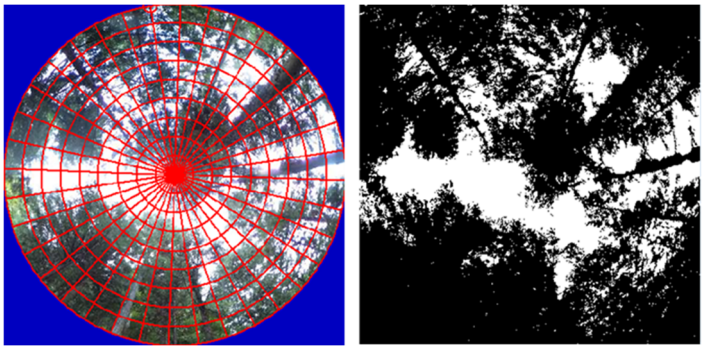
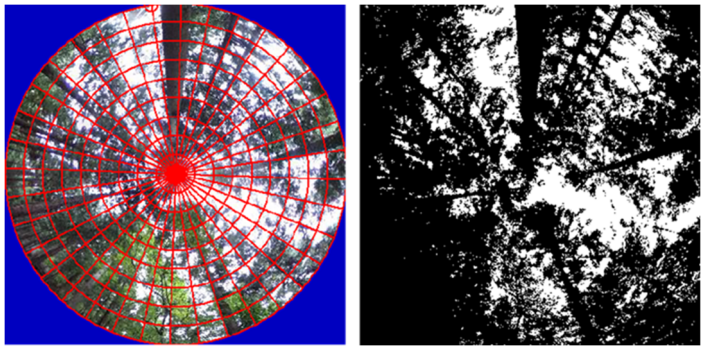
RICHO 製 Theta(シータ)を用いて全天空写真を撮影し、画像解析ソフト「Gap Light Analyzer」を用いてプロット地点の開空率を算出した。

(2) 結果および考察

開空率の算出結果を表 4.16 に示す。標準地の開空率は、プロット 1 とプロット 2 でそれぞれ、34.5%、30.5%となった。立木密度の高いプロット 1 の開空率の方が高い結果となったが、これは、浸透能試験プロット地点から撮影した全天空写真 1 枚のみで解析を行ったため、その地点の開空率がたまたまプロット 2 の開空率よりも高めであったためと考えらえる。

林分の開空度をより的確に捉えるには、標準地内の複数地点で撮影を行い、値を平均化する等の処理を行うことが望ましく、次年度以降に留意すべき点としたい。

表 4.16 GapLightAnalyzer による開空率の算出結果

	GapLightAnalyzer 解析画面	開空率
プロット 1		34.5%
プロット 2		30.5%

標準地の開空率は、プロット 1 とプロット 2 でそれぞれ、34.5%、30.5%となった。

立木密度の高いプロット 1 の開空率の方が高い結果となったが、これは、浸透能試験プロット地点から撮影した全天空写真 1 枚のみで解析を行ったため、その地点の開空率がたまたまプロット 2 の開空率よりも高めであったためと考えらえる。

林分の開空度をより的確に捉えるには、標準地内の複数地点で撮影を行い、値を平均化する等の処理を行うことが望ましく、次年度以降に留意すべき点としたい。

4.8.3. 立木位置

(1) 調査方法

株式会社アドイン研究所が開発・販売している森林 3 次元計測システム「OWL」を用いて、各標準地を含む、試験地周辺の地上レーザ計測を行った。

当該システムは、現地調査時に野帳に記入しきれない、下層木や林床被覆の空間的な分布状態等を 3D 点群データとして記録しておくことで、現地調査後に林相内の物理状態を客観的に把握したり、現地で収集した胸高直径や立木密度などの計測値の精度検証に活用したりすることが可能である。

(2) 結果および考察

本調査においても図 4.32 に示すとおり、OWL データを用いて立木位置の確認および立木密度の精度検証を行った。また、確認・検証できた結果は、「表 4.15 標準地集計表」の立木本数や立木密度に反映した。

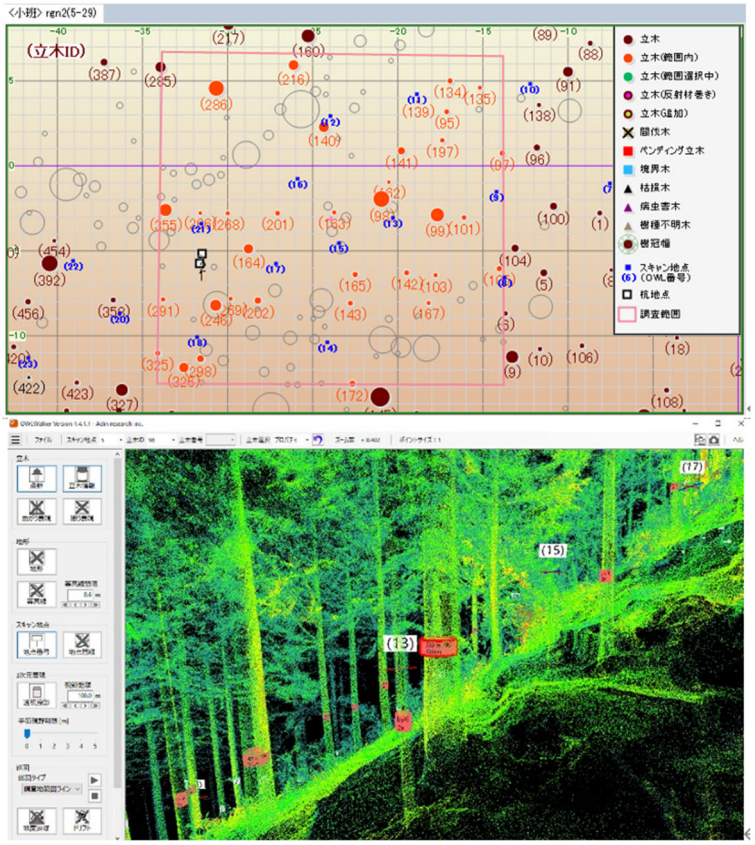


図 4.32 OWL 解析ソフトを用いた立木位置の把握

（上：立木位置等を確認できるビューア、下：点群データを確認できるウォークスルー画面）

4.9. 土壌調査

4.9.1. 表層被覆状況(表面被覆率、リター被覆厚、リター乾重、植生乾重)

(1) 調査方法

表面被覆率は、各プロットを上から撮影した写真の画像解析により求めた。リター被覆厚は、各プロットの四隅および中央の計 5 箇所で計測し、その平均値とした。リター乾重と植生乾重は、散水試験後の集水プロット内の試料を採取して持ち帰り、乾重を測定した。

(2) 結果および考察

表層被覆状況の調査結果を表 4.17 に示す。試料採取面積がプロット 1(0.89m^2)とプロット 2(1.0m^2)で異なるため、リター乾重と植生乾重は単位面積当たりの乾重量(g/m^2)に変換した。

被覆率、リター被覆厚、リター乾重、植生乾重は、プロット 1 の方がすべて大きい値であった。プロットの中心付近で計測した斜面傾斜は、両プロットとも 36° と違いはみられなかったものの、実際には筋工設置の効果により、プロット 1 の斜面下部は傾斜が緩やかで、土砂やリターが溜まりやすく、且つ下層植生も生育しやすい斜面となっていた可能性がある。

表 4.17 林地表面の被覆状況

	プロット 1 (筋工あり)	プロット 2 (筋工なし)
表面被覆率	70	59
リター被覆厚	5.5	2.6
リター乾重(g/m^2)	761.2	516.3
植生乾重(g/m^2)	15.4	1.3
写真		

4.9.2. 土壌断面調査

(1) 調査方法

筋工あり、筋工なしプロットの土壌特性をそれぞれ把握するため、各プロットの斜面中心付近を、C 層が確認できる深さまで掘削して土壌断面を作成し、層位区分、土色、土性、団粒構造、堅密度等の目視観測を行った。

土壌断面調査の実施に当たり、図 4.33 に示す「森林土壌インベントリ方法書第 3 期改訂版(1)野外調査法」に記載の調査道具や調査手順を参考にした。

図 4.33 森林土壌インベントリ方法書および準備した主な調査道具

(2) 結果および考察

プロット 1 とプロット 2 の土壌断面写真を図 4.34 および図 4.35 に示す。

図 4.34 プロット 1 の土壌断面

図 4.35 プロット 2 の土壌断面

土壌は、2 箇所とも B_D(d):適潤性森林褐色土(偏乾亜型)に分類される。B_D(d)型土壌とは、比較的深い A 層が形成される標準的な適潤性森林褐色土に比べ、やや乾燥の影響を受けた土壌のことで、当該土壌の特徴が、乾燥土壌に比べ土色の黒味が強いこと、土壌構造に堅果状構造が発達していること、凸形の斜面に立地していること等から、ここでは B_D(d)型と判定した。土壌断面の観察により、A 層から C 層の各層厚を測定した。結果は表 4.18 のとおりである。

表 4.18 土層厚の計測結果

			プロット 1 （筋工あり）		プロット2 （筋工なし）
土層厚 (cm)	(A0層)		散水試験実施後、計量のため除去		
	A層	A1	20	10	10
		A2		10	
	B層	B1	35	20	40
		B2		15	

プロット 1 とプロット 2 は同じ尾根斜面に位置しており、それぞれ 10m も離れていない距離にあることから、土層厚にも大きな違いはみられなかったが、プロット 1 の A 層の方がやや厚みがあることが確認された。B 層の厚さはプロット 1 で 35cm、プロット 2 で 40cm と同程度であった。

プロット 1 とプロット 2 のその他の土壌特性について表 4.19 および表 4.20 にそれぞれ示す。

表 4.19 プロット 1 の土壌断面調査の結果

		土色	土性	構造	粒径	堅密度	水質状態	有機物
(A0層)		散水試験実施後、計量のため除去						
A層	A1	黒褐色(7.5YR2/2)で腐植は頗る富む。	やや砂の混じる壌土	団粒状～堅果状	石礫は0.5mm以下の半角礫があり。	軟	潤	木本の細・中根が多い。
	A2	黒褐色(7.5YR3/2)で腐植に富む。	微砂質壌土	堅果状	石礫は0.5mm以下の半角礫を含む。	堅	潤	木本の細・中根があり。
B層	B1	黒褐色(7.5YR3/2)で腐植に富む。	微砂質壌土	堅果状	石礫は0.5mm以下の半角礫を含む。	堅	潤	細根あり
	B2	褐色(7.5YR4/3)で腐植を含む。	埴質壌土	堅果状	石礫は0.6mm以下の半角礫を含む。	堅	潤	細根まれ
C		褐色(7.5YR4/4)で腐植に乏しい。			石礫は3~5cmの半角礫に富む。	堅	潤	

表 4.20 プロット 2 の土壌断面調査の結果

	土色	土性	構造	粒径	堅密度	水質状態	有機物
(A0層)	散水試験実施後、計量のため除去						
A層	黒褐色(7.5YR2/2)で腐植は頗る富む。	やや砂の混じる壌土	団粒状～堅果状	石礫は0.5mm以下の半角礫を含む。	軟～堅	潤	木本の細・中根が多い。
B層	褐色(7.5YR4/3)で腐植を含む。	埴質壌土	堅果状	石礫は0.5mm以下の半角礫を含む。	堅	潤	細根あり
C	褐色(7.5YR4/4~4/6)で腐植に乏しい。			石礫は0.6mm以下の半角礫を含む。	堅	潤	

土色は、A 層は黒褐色で腐植に富み、B 層は褐色で腐植を含む状態にある。土壌構造は、A 層に団粒状構造と堅果状構造が見られ、B 層は堅果状構造が発達している。堅密度は、A 層は断面を指で押すと深い指痕ができる「軟」と、わずかに指痕が残る「堅」の箇所があり、B 層はほぼ「堅」である。水湿状態は A 層、B 層とも有効な水分が少しある「潤」の状態であった。

以上から、今回、浸透能試験の対象としたプロット 2 箇所の土壌タイプは共に「適潤性褐色森林土（偏乾亜型） B_D(d)」であり、特徴、条件はほぼ同じであるといえる。

4.9.3. 土壌物理性調査(土壌重量･密度、強熱減量、土壌粒径分布)

(1) 調査方法

1) 土壌重量･密度

100ml の採土円筒により、A 層、B 層の土壌サンプルを採取し、湿潤･乾燥重量、湿潤･乾燥密度、強熱減量、粒径分布などの土壌物理性の分析を行った。

湿潤重量は採取した状態のまま、乾燥重量は 105℃の乾燥機で水分を蒸発させた状態で量った重量(g/100ml)で、湿潤･乾燥密度は、これを g/cm^3 に換算することで求めた。

2) 強熱減量

表面流の VSS 測定と同様、採取した土砂サンプルを 500℃に設定した小型電気炉(マッフル炉)で 2 時間程度加熱(強熱)し、揮散した物質質量(強熱減量)を量ったものを強熱減量といい、試料中の有機物量の目安となる。

3) 土壌粒径分布

土壌の種類は、図 4.36 に示すとおり粒径別の名称によって区分され、粒径 0.005mm 以下の粒子を「粘土」、粒径 0.005～0.075mm の粒子を「シルト」、粒径 0.074～2mm の粒子を「砂」、粒径 2mm 以上の粒子を「礫(レキ)」と呼ぶ。

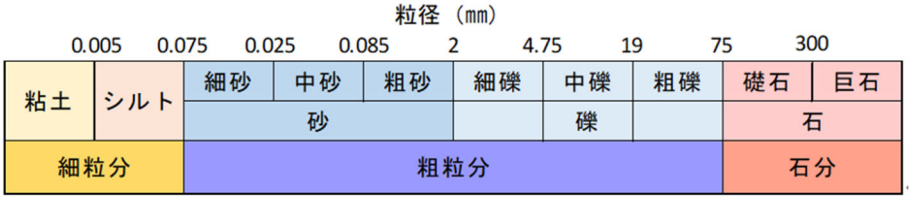


図 4.36 土粒子の粒径区分と呼び名

粒度によって、土壌の良し悪しが表現されることもあり、含まれる土粒子の粒径範囲が広い土は、大きな粒子がつくる間隙にさらに小さな粒子が入り、密で安定な構造をつくりやすいため、“粒度が良い”土壌といえる。一方で、土粒子の粒径範囲が狭い土は、密実につまりにくく不安定な状態にあることから、“粒度が悪い”といえる。

現実の土壌は、粘土分･シルト分･砂分･レキ分などが様々な割合で混じっており、この混じり具合は、土壌の粒度試験に基づく粒径加積曲線によって表すことができる。

ここでは、プロット 1 とプロット 2 の土壌試料について、ふるい分け試験方法により粒度分析行った。この方法は、ふるいの目開きの大きなものから順に、一定時間一定振幅で振動を与えてふるい分け、それぞれのふるい上に残った試料を秤量する方法である。

(2) 結果および考察

1) 土壌重量･密度

プロット 1 とプロット 2 の土壌重量および密度を表 4.21 に示す。

表 4.21 土壌重量および密度の測定結果

		プロット 1 （筋工あり）		プロット2（筋工なし）	
		湿潤重量	乾燥重量	湿潤重量	乾燥重量
土壌重量 (400ml)	A層	430.43	225.22	378.36	227.96
	B層	375.02	248.38	432.32	259.7
		湿潤密度	乾燥密度	湿潤密度	乾燥密度
土壌密度 (g/cm^3)	A層	1.08	0.56	0.95	0.57
	B層	0.94	0.62	1.08	0.65

A 層、B 層の乾燥密度は、プロット 1 で 0.56、0.62g/cm^3、プロット 2 で 0.57、0.65 g/cm^3と、両プロットの乾燥密度に大きな違いはみられなかった。
10.2.4.で述べた石川県の浸透能試験では、深度 0～5 cmの土壌乾燥密度は、スギ林で 0.38～0.86 g/cm^3、アテ(ヒノキアスナロ)林で 0.37 ～ 0.72 g/cm^3、深度 5～10cm のスギ林で 0.49 ～ 0.995 g/cm^3、アテ林で 0.45 ～ 0.91 g/cm^3、スギ林の平均は 0.67 g/cm^3、アテ林の平均は 0.51 g/cm^3 であったと報告されている(小松ら、 2014)。本事業の土壌乾燥密度もこれらの範囲に収まる程度であり、深度方向でみたときに A 層よりも B 層の土壌乾燥密度の方が大きくなる傾向も一緒である。

2) 強熱減量

プロット 1 とプロット 2 で採取した土壌の強熱減量を表 4.22 に示す。

表 4.22 強熱減量の測定結果

			プロット 1 （筋工あり）	プロット2（筋工なし）
強熱減量 （有機物量） (%)	F・H層		0.180	0.232
	A層	1	0.141	0.253
		2		0.055
	B層		0.119	0.466
	C層			0.492

有機物量の目安となる強熱減量は、プロット 1 よりもプロット 2 の方がやや高い値となった。特にプロット 2 の B･C 層の値は高く、細根などの有機物が局所的に多く含まれていた可能性がある。

3) 土壌粒径分布

プロット 1 とプロット 2 の土壌の粒径加積曲線を図 4.37 に示す。

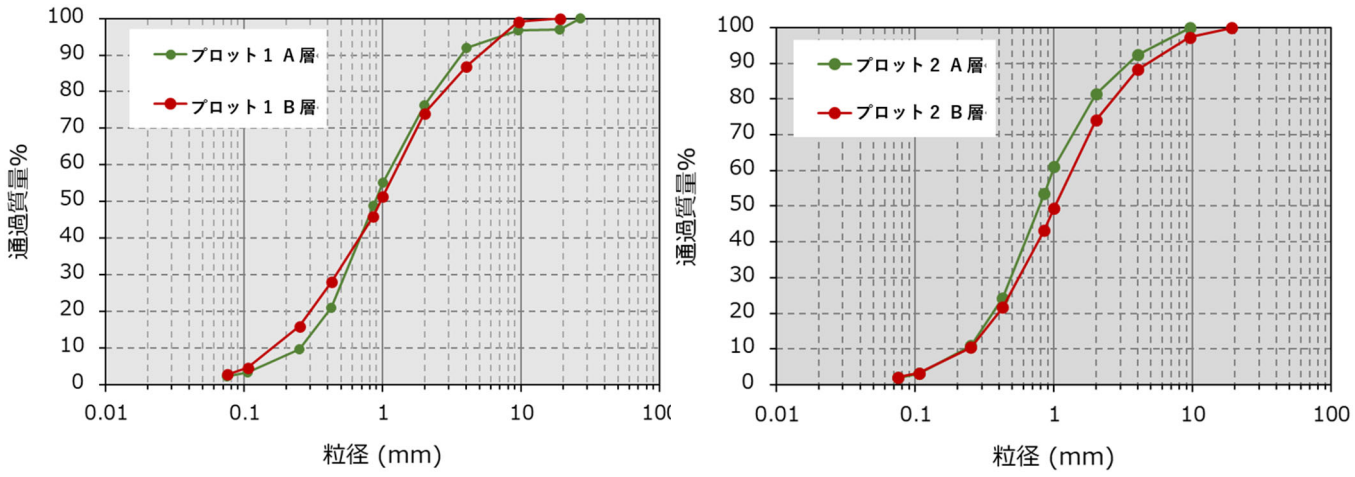


図 4.37 土壌粒径加積曲線(左:プロット 1、右:プロット 2)

プロット 1、プロット 2 ともに、粒径は 0.07～20mm 程度の幅広い範囲にわたって分布しており、調査地の土壌は、粒度分布のよい土壌であることが分かった。特に、プロット 1 の A 層はプロット 2 のそれと比べて粒径分布の幅がより広く、孔隙に富む安定した土壌構造であることがうかがえる。

4.9.4. 土質試験(透水性)

(1) 調査方法

土壌調査に際して掘削した土壌断面から不攪乱状態で採取した試料(100cc)について、図 4.38 に示すとおり、土壌透水性測定器(大起理化製 DIK-4012)を用いて飽和透水係数を測定した。なお、対象とする土壌の空隙が比較的多い砂質土であるため、透水性が高い場合に用いられることの多い定水位法による測定とした。なお、飽和透水係数kは以下の式による。

$$k = \frac{Q}{At} \cdot \frac{l}{h} \quad (\mathrm{cm/s})$$

ここで、k：飽和透水係数(cm/s)、Q：排水量(cm^3)、A：試料断面積(cm^2)、l:試料長、h：湛水面と排水面の高低差(cm)、t：時間(sec)である。

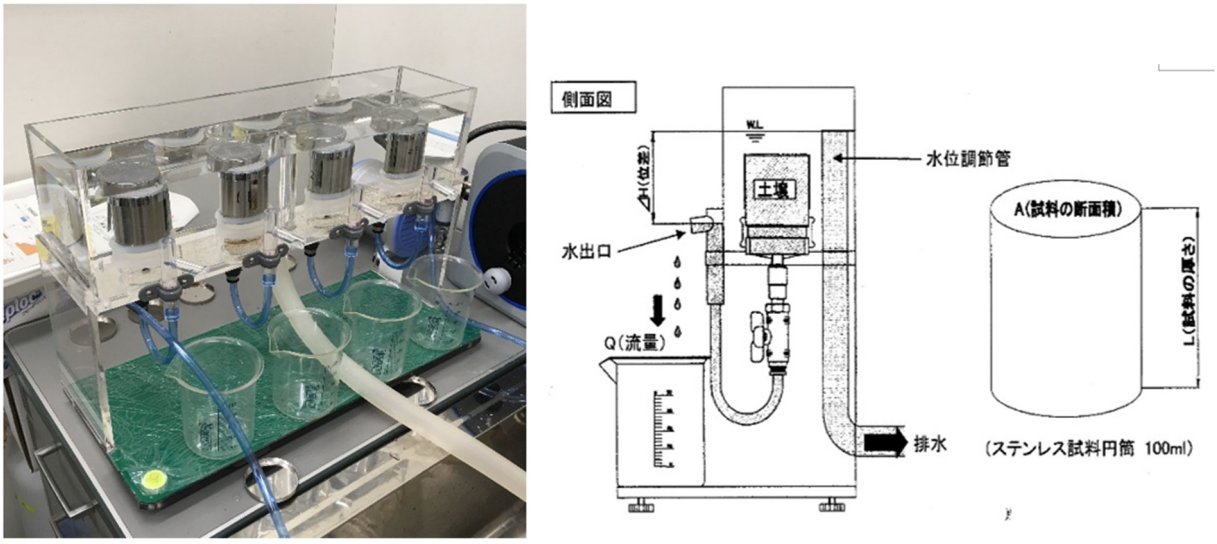


図 4.38 定水位透水性試験の状況

(2) 結果および考察

透水性測定器を用いた室内透水試験の結果、何れの試料についても 10^{-1}(cm/sec)のオーダーであり、飽和状態においては、表 4.23 に示すとおり、砂質土相当の値で深さ等による顕著な違いは無かった。

表 4.23 定水位透水性試験の結果

試料 No.	流量 Q (ml)	時間 t (sec)	飽和透水係数 K(cm/sec)
プロット 1-A	189.5	33.52	0.216
	192.0	34.92	0.210
	188.0	35.50	0.203
プロット 1-B	151.8	50.89	0.114
	145.8	50.22	0.111
	145.0	51.47	0.108
プロット 2-A	153.9	52.96	0.111
	141.9	50.16	0.108
	141.8	51.63	0.105
プロット 2-B	147.0	45.33	0.124
	169.0	54.15	0.119
	162.2	53.67	0.116

今回計測した飽和透水係数は A 層から C 層まで 10^{-1} (cm/sec)のオーダーであり、これは降雨量に換算すると 3,600mm/h に相当するため、土が飽和状態であれば表面流は発生しない。

一方、自然状態の地表付近の土壌は通常不飽和状態であるので、不飽和透水係数は飽和時より小さいため表面流が発生する可能性がある。また実際に、今回の人工降雨による浸透試験では約 230mm/h の降雨時にも表面流が発生しており、これは不飽和だけでなく、その他の斜面傾斜、降雨の不均一性等自然斜面に特有の要因が組み合わされてた結果と考えるべきである。

4.10. 地形調査

4.10.1. 航空レーザの活用

(1) データ準備

清川村調査地については、神奈川県の「令和 2 年度水源林林況等基礎調査業務委託」の成果である航空レーザ測量のデータ(中央地域および湘南地域の水源保全地域(相模原市の一部を除く))が活用可能であったため、神奈川県より入手し、成果データの一つである赤色立体図[53]をマップ化し、現地の微地形把握や、現地踏査時の調査図面として活用した。

(2) 結果および考察

微地形図である赤色立体図は図 4.39 に示すとおり 0.5m と高解像度であり、沢の位置や林内の作業道も確認することができる。これにより、浸透能試験に必要な水の入手先や、運搬路の検討を事前に大まかに行うことができ、調査の計画立案に有効であった。

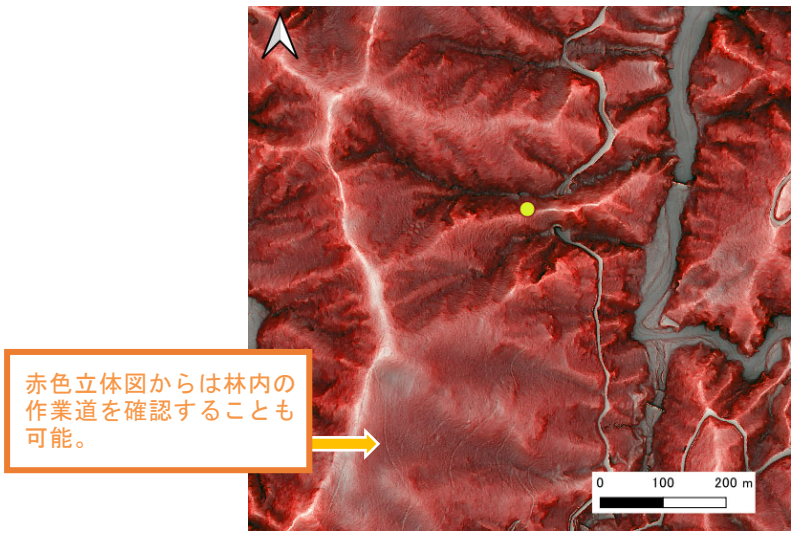


図 4.39 赤色立体図でみる現地周辺の微地形の様子

4.10.2. 地上レーザ(OWL)を用いた地形解析

(3) 調査方法

「4.8.3 立木位置」にも記載のとおり、株式会社アドイン研究所が開発・販売している森林 3 次元計測システム「OWL」を用いて、試験地周辺の地上レーザ計測を行った。航空レーザでは取得しきれない、林内・地表の物理的な状態を 3D 点群データとして記録することができる。点群データは専用の解析ソフトを用いて、50cm 間隔の等高線を出力するなど、詳細な微地形を把握すること可能である。ただし、低木層や下層植生が多い林分では、それらによってレーザの照射が遮られ、必ずしも地形(地面)のデータが正確に取得できるわけではないことに留意が必要である。

---

[53] 航空レーザ測量により得られる DEM データを用いて、傾斜と尾根谷度のデータを重ね合わせて作成される微地形図。アジア航測株式会社開発。赤色の彩度は傾斜、明度は尾根谷度により決定される

(4) 結果および考察

OWL 解析ソフトを用いて、調査地の大地形やプロット周辺の微地形を確認した画面を図 4.40 に示す。

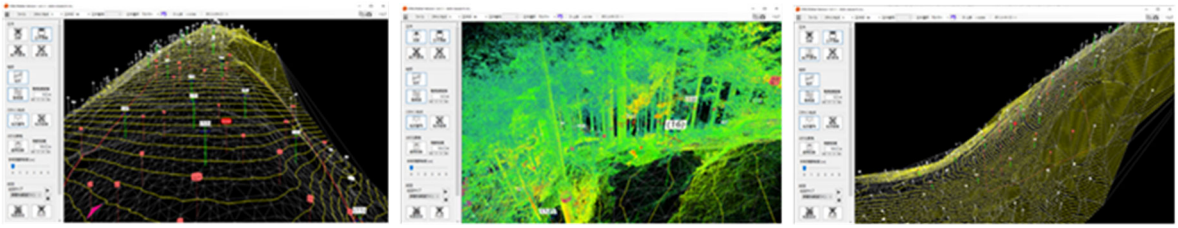


図 4.40 地上レーザ(OWL)で取得したデータをもとに解析ソフトにより微地形を把握

集水プロット周辺の微地形の様子を図 4.41 に示す(※プロット 2 の写真(右)には人影があることに注意)。

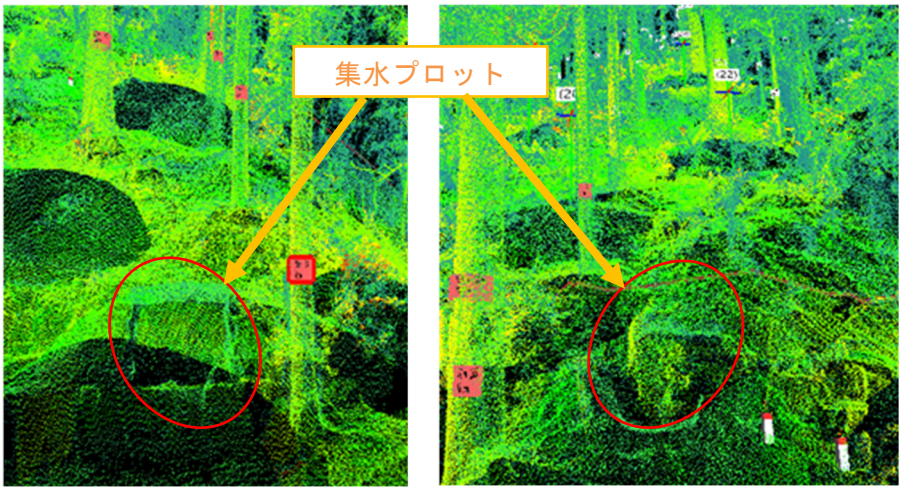


図 4.41 集水プロット周辺の微地形(左:プロット 1、右:プロット 2)

4.11. 今年度調査の結果まとめ

林野庁が平成 20 年度から 24 年度までに実施した調査においては、最大浸透能と各因子との関係を検討した結果、最大浸透能は、スギ林では開空率、A 層厚、傾斜と相関が高く、ヒノキ林では A 層厚、下層植生乾重量、リター乾重量と相関があり、特に下層植生乾重量との相関が極めて高いことが示された。また、他機関による調査(加藤ら、2008、平岡ら、2010)においても、最大浸透能は、下層植生乾重量やリター乾重量と相関が高いという結果が得られている。このことから、最大浸透能に対しては、A 層厚、下層植生乾重量、リター乾重量が特に寄与度の高い因子であることが伺えた。

そこで、今年度の調査で得られた下層植生乾重量およびリター乾重量(表 4.17)と最終浸透能(表 4.13)の関係を、加藤らのグラフ(図 4.8 参照、降雨強度 180 ㎜/h)上にプロットしてみると、図 4.42 のようになり、下層植生やリター乾重量の高いプロット 1(筋工あり)の方が、プロット 2(筋工なし)よりも高い浸透能を保持していることが示され、既往の研究結果に沿う形となった。

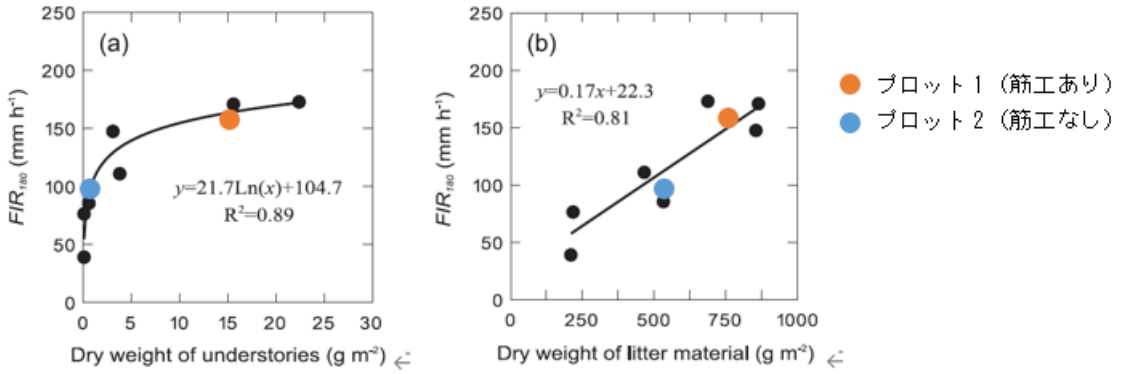


図 4.42 下層植生乾重量(左図横軸)およびリター乾重量(右軸横軸)と基準最終浸透能(縦軸)の関係グラフ(加藤ら、2008)に本調査の結果をプロット

これまでの浸透能試験の結果を踏まえ、検討されてきた森林整備方針・見解には以下のようなものがある。

- A 層厚は間伐によって短期的にコントロールできるものではない。
- 傾斜のような地形要素は、(植栽場所を選択するという意味では人為的にコントロールすることができるが)既に生立している林分においてはコントロールすることはできない。
- 開空率は間伐等による樹冠量のコントロール、下層植生量は間伐等による林内の光環境の改善、被覆物量はリターの流亡防止等を図ることである程度人為的にコントロールできる。
- このことから、浸透能の低下した林分において浸透能を向上させるためには間伐の実施、リター量が少ない林分においてはリターの流亡防止を図ることが有効である。

このうち、上記 2 つ目のポイント「地形は人為的にコントロールできない要素」については、今年度の調査を踏まえて若干見直すことができる可能性がある。

今年度の調査においては、筋工ありプロットの方で、より高い植生・リター乾重量が確認されたが、その要因として、筋工の直上で捕捉された土砂やリターが堆積することで、部分的に傾斜が緩やかになり、下層植生が繁茂しやすく、リターもより堆積しやすくなったことが考えられる。その結果として、表面流の流速が低下、あるいは筋工周辺で滞留することによって流出が抑制され、浸透量が高まったと考えられる。

地形を人為的にコントロールすることは困難であるが、上記のように、筋工等の設置により傾斜を部分的にでも緩やかにすること、いわゆる微地形を操作することは可能であり、これにより、間伐施業等

がもたらす従来の浸透能維持・向上効果に、さらにプラスの効果を与えられる可能性が示唆されたといえる。

しかしながら、今年度の調査結果は、筋工が設置された調査地一箇所の結果のみに基づくものであることから、今後、森林土壌の浸透能、ひいては森林の洪水緩和機能の維持・向上を目的として筋工・柵工等の設置を広く推進していくためには、さらなる定量的なデータの積み上げが必要となってくると考えられる。

4.12. 学識経験者による助言等

今年度の調査に当たり、下記の学識経験者をアドバイザーとして招聘し、技術的な助言を受けた。

表 4.24 技術アドバイザー

氏　名	所　属
石川 芳治	東京農工大学 名誉教授
五味 高志	東京農工大学 農学研究院 国際環境農学部門 教授

4.13. 課題および今後の調査計画(案)

表面流による土壌侵食が頻繁に見られる農耕地では一般に斜面途中に平坦地を設けるテラス工法が有効であると考えられているが、これは筋工・柵工を等高線方向に長く延長したものといえるので、筋工・柵工の効果はこれに類するものであると考えることが妥当である。

しかしながら、テラス工法のような複雑な地形条件が表面流の挙動に与える影響に関する定量的評価の事例はこれまでほとんど確認されておらず(岩元ら、1985)、筋工・柵工についても同様のことがいえる。

今後、筋工・柵工のような構造が降雨浸透に与える影響を評価するに当たり、構造物周辺の影響を慎重に把握することが必要である。すなわち、表面流量の観測だけでなく、特に降雨初期の不飽和条件での浸透を含めて現象を把握することが必要であると考える。構造物を含む縦断面の複数深度での土壌水分の経時観測により、特に降雨初期に問題となる不飽和浸透を含めた表面流の発生および浸透現象の把握が必要である。

一方で、構造物あるいは工法そのものの違いが与える影響についても検討がなされることが望ましい。筋工・柵工設置の代わりに、伐り捨て間伐された伐倒木を等高線方向に残置させたり、利用間伐の場合は枝条等を林内に残置させたりといった簡易な施工も、リターや表土の流亡を一定程度防止し、洪水緩和に寄与すると考えられる。

次年度以降の調査計画において、留意するべき点を以下にまとめる。

① 構造物を含む縦断面の複数深度での土壌水分の経時観測により、特に降雨初期に問題となる不飽和浸透を含めた表面流の発生および浸透現象の把握が必要である。

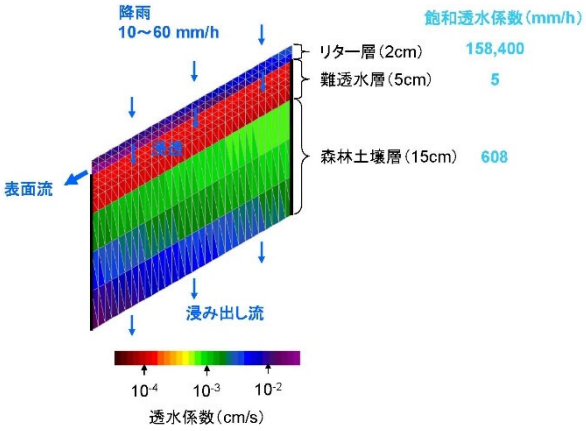
② 土壌の実際の浸透能を考慮すると、少なくとも数時間の観測を行い、十分な浸透を得ることが現象の全体像把握に必要である。

③ 治山による柵工・筋工が設置されることの多い奥地での観測を考慮した実験条件の設定が必要であり、特に人工降雨に用いる水量を少なくすることが重要である。

④ 今回用いた人工降雨装置は再現する降雨強度が 200mm/h を超えているため実験時間への制約が大きいため多量の水を必要とすることから、現在の撒水ノズルの吐出量を 100mm/h 相当の小さいものに変更することを検討すべきと考える。また、簡略化のため、降雨面積を小さくする、あるいは小型水路を用いた人工表面流による浸透能の検証であれば水路幅を小さくすることにより必要水量を低減することが可能である。

⑤ 降雨装置用の水の確保と複数回の繰り返し観測が可能な柵工・筋工の設置箇所の選定が必須である。

⑥　「平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業」報告書において、京都大学･小杉賢一郎教授は、林地斜面において不飽和浸透過程を考慮した解析により森林土壌の浸透強度と降雨強度との関係について、それまでの森林土壌層の透水性と保水性に関する Kosugi et al.(2001)と Kosugi(1997)の結果をもとに検討を加えている。本手法は、現地試験における限られた条件下での実験結果の評価に際して、様々な斜面勾配や地形等の条件を与えた場合の降雨浸透を再現可能であるため、柵工･筋工周辺における降雨時の不飽和状態を含む降雨浸透過程の土壌水分観測等と併せて検討することが有効であると考えられる。



「平成 24 年度山地保全調査(水源森林保全調査)事業報告書、林野庁」より

⑦　今年度は、スギ・ヒノキ混交林におけるプロット 2 箇所(筋工あり・筋工なし)のみで浸透能試験を実施したが、データの信頼度をより高めるため、林況や地形が異なる別の地域、複数箇所など、バリエーションを増やして試験・分析を行うことが望ましい。

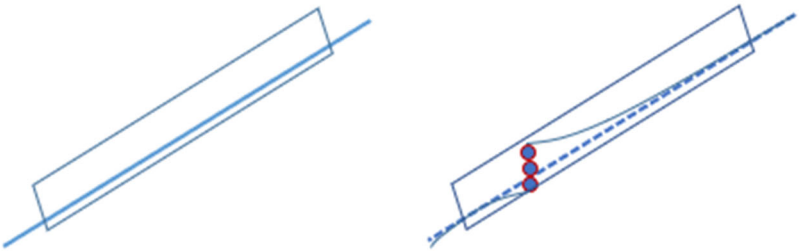
⑧　間伐された伐倒木の等高線方向への残置など、簡易な工法についての評価もあると、現場における施工オプションが増える。

なお、技術アドバイザーである石川 芳治 東京農工大学名誉教授からは、以下のようなのコメントも寄せられた。

【石川 芳治名誉教授からのコメント】

①　比較対象プロットの考え方

比較対象プロットの採り方によりその結果は異なる。端的に言えば、異なる条件、同じ条件をどのように考えるのかという点である。



a.筋工なし　　b. 筋工あり

- 筋工設置前の斜面勾配を同一とする。
- 筋工の効果((i)リターの捕捉効果と同時に(ii)斜面勾配を局所的に緩くする効果)を考えると、筋工を含んで、筋工の下部で流出量を計測する。

② 今後の調査計画(案)について

筋工、柵工に期待される主な効果としは次の 3 つがあると考えられる。

(i) 浸透能を高めて、地表流量を減少させる。
(ii) 斜面勾配(局所的ではあるが)を緩め、リターの堆積等により地表流の流速を減少させる。
(iii) 土壌浸食量を減少させる。

「浸透能」については、現地で浸透能試験を行うことも重要だが、個々のプロットにおける土壌、下層植生、リター堆積、勾配等が異なるので、バラツキも大きく、多数のデータを集める必要がある。一方で、「リター乾重量」や「A 層厚」が大きくなると浸透能も大きくなる傾向があるのは既往の多くの研究から広く認められている。「リター乾重量」や「A 層厚」は浸透能試験に比べたら、現地での調査が行い易いので、今後は、「柵工・筋工なし」と「柵工・筋工あり」について、同じ森林で「リター乾重量」、「下層植生乾重」、「合計被覆率(下層植生被覆率、リター被覆率)」、「A 層厚」、「斜面勾配」等を調査する方法も効率的で有効と考えられる。なお、リターの堆積(および下層植生)は上記の 3 項目の全てについて効果があると考えられるので「リター乾重量」、「下層植生乾重量」、「合計被覆率(下層植生被覆率、リター被覆率)」だけを多数の地点で調査することは非常に有効と考えられる。

さらに、「地表面流速緩和効果」については、今回の方法では正確に測定することはできないので、もう少し斜面長が長いプロット(例えば 10 ～30m 程度)を作成して自然降雨で地表面流速を測定するか、水路等に柵工・筋工の模型を設置して地表面流速を測定する方法も有効と考えられる。

【文献】

岩元　賢、阿部和時、秋谷孝一(1985) 山腹テラス工法による林地崩壊防止技術に関する現地試験(I)－無施工状態での基礎観測－、昭和 60 年度砂防学会研究発表会概要集、p56-59

Kosugi、K. (1997) A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore radius distribution、Journal of Forest Research、2、p1-8.

Kosugi、K. et al. (2001) An inverse modeling approach for the characterization of unsaturated water flow in an organic forest floor、Journal of Hydrology、246、p96-108.

5. 関連資料

5.1. 第1回検討委員会議事概要

令和 3 年度山地保全調査
(森林整備が表層崩壊防止機能等に及ぼす効果等に関する検討調査)委託事業
第 1 回検討委員会

開催日:令和 3 年 7 月 15 日(木)
場　所:日本森林技術協会　5 階中会議室 および Web

(1) 背景と目的

1) 崩壊深(スライド 2)

(委員)
林齢が 50 年生以上になると崩壊深が大きくなる説明について、意味合いとして森林は浅い崩壊を防ぐことができており、大規模災害の時しか土砂発生しなくなっていることを伝えておく方が良い。

2) 表層崩壊の定義(スライド 2、3)

(委員)
表層崩壊の定義を明確にしておかないと、うまく森林の崩壊防止機能を評価することができなくなる。島根災害の事例では伐採跡地で崩壊が多数発生している。樹木の根が腐って表層土が崩れるのが一つの表層崩壊のイメージである。九州北部災害の事例では、根系が生育する深さよりもやや深いところの未固結地盤から崩れるような崩壊である。九州北部災害では、50 年生ぐらいの樹木が生育しており、たくさん根があり安定した状態のため、表層土は崩れにくく土壌層の下から崩れる崩壊が多い。50～60 年生の林分でも崩れる事実があることから、崩壊の種類を表層崩壊と区分しておかないと、森林の崩壊防止機能を議論した場合、50 年生以上でも崩れてしまう理由が説明できなくなる。

3) とりまとめの方向性(スライド 4～6)

(委員)
近年の林野庁の動向を踏まえるような形でとりまとめを行う予定なのか。
(事務局)
現段階では 5 年目のアウトプットを決めかねている状況である。動向の方向性が的確であれば、本議論のアウトプットも展開できると考えている。
(委員)
基本的に今までやってきたことを踏襲しつつ、その出口として動向 2 や 3 に結びつけると考えてよいか。
(事務局)
そのとおり。ΔCと Wrの考え方で LP データをもとに精査の上、事業展開する。

(2) 議論の進め方

1) 森林整備の内容(スライド 7)

(委員)
森林整備によって機能を高めるのが目的の一つだと思うが、崩壊の危険性がある森林を抽出後、どのような整備方法を考えているのか。
(事務局)
構造物を計画するならば、小規模ながら表面侵食を抑止し浸透能を高める柵工や筋工を考えてい

る。森林整備は間伐を考えている。

(委員)

崩壊に関する地形の要因を地上部から推定するに当たり、立木密度とΔCの関係はどのように反映するのか。

(事務局)

ΔCの値によって崩壊のしやすさを表現できる林分や立地があるかもしれないが、崩れるという現象に対し別のメカニズムがある。それを根系の重量や体積で検討する。表層崩壊とやや深い表層崩壊について、崩れ方のメカニズムが異なるとの指摘がある。現段階はΔCや Wrの考え方を踏襲するが、違う考え方もあるという発想をもって調査を進める。

ΔCや Wr値が高いと崩壊防止機能に効果的となったとき、森林整備の方法は、健全な森林を目指す方針を変えないようにしたい。一つの機能を高めるだけでなく、多面的な機能を発揮させる値の見極めとなる指標があると考えて検討したい。

(3) 過去の経緯と仕様確認

特になし

(4) 山腹崩壊発生地と森林状態等との関係に関する調査

1) 崩壊指標と崩壊深(スライド 20～25)

(委員)

崩壊をごく浅い表層型の土壌層が崩れるような崩壊と、やや深めの崩壊と分けて考えた場合、これまでのΔC や Wrといった指標はごく浅い崩壊に対応しているが、やや深めの崩壊に対しては評価できない。最近の崩壊はやや深めの崩壊が多く、そういった崩壊に対する森林機能の評価は、今の段階では科学的根拠に乏しい。

クリープの下斜面のスギ根系が土砂を支えている調査事例もあるが、まだ研究が始まったばかりでこれから検証が必要。今起こっている崩壊はやや深目の崩壊が多いので、壮齢の 50～60 年生ぐらいの森林の根が深めの崩壊に対しどう影響しているかを明らかにするのも、この事業の 1 つの出口として考えて良いと思う。

深めの崩壊が多いという統計的なデータは実際にはないのではないか。深めの崩壊とか浅めの崩壊といっているが定量的に表現できない。スライド 6 のグラフは林齢と崩壊の深さの関係を示しているがこの深さを測るのが難しい。今はレーザを使って精度良く測定できるので、この事業でも九州北部とか西日本豪雨などの事例で、どんな林齢どんな崩壊が起こっているか把握するのも、方針が変わるかもしれないが、今後の森林の取扱いを考えるとき重要なデータになると思う。

2) 現地検討(スライド 20～25)

(委員)

侵食は現在進行形と思うので、侵食インパクトに対する根系形成までタイムラグがあると思う。特に侵食域の部分は時間的にどれくらいの頃から侵食を受けたのか確認しないと、単に侵食域という形でまとめると結果が見えにくくなる。

(事務局)

宮崎では立木密度は同心円接線方向では一緒だが、1 列中に入る、外に出ると立木密度が違うため、その影響がどうなるか、単に立木密度という考え方で整理できるか、整理しておく必要がある。

(委員)

この事業はあくまでも(面的で)均質な施業を想定しているので、それに適合していくしかない。ただ、地形の影響は確かにあるので侵食域、非侵食域の話が出たが、無理のない形で今後の課題として添える形でも良いと思う。

四国の候補地では微地形で成長の良し悪しが出るかもしれないが、全体を見ながら対応して欲しい。もし低密度試験地の方がデータとしてよりよいものであるならば、柔軟にロジックを考えていくしかない。

ある程度均質な森林を想定した、極端現象ではなく数十年の一度程度の豪雨で崩壊することをできるだけ少なくしようという趣旨を、最初にピン止めしておくのが良いと思う。

(委員)

現場調査は前年度から引き継ぎ、前年度はヒノキ、今年度はスギ。前年度の調査結果は、現地で 50cm 幅の立木間を掘って根量を測定している。実は放射方向の根の分布は、太い水平根があればたくさん増える一方、水平根のないところは少なく細い根ばかりになる。スギの水平根はそんなになく 1 本のスギで 4～5 本太いのが四方にあり、それ以外はない。掘った場所によってデータがばらばらになる。

私がスギを掘るときは 1 本丸々掘って調べる。そういう掘り方をすれば良いが、実際事業では難しく、過年度のデータは ΔC もばらばら。現場であのような掘り方をすれば、樹種を変えても出てくるデータは同じ。地盤の影響を受けるので、掘ったところでどんなデータが出てくるか分からない感じになる。もしやるなら、棚倉とか日南とか密度試験をしているような、はっきりした地上条件のもとでしたほうが一般的なデータが出てきて良い。せっかく苦労をするなら、ちゃんとしたデータが取れそうなところでやったほうが良い。

3) 根系の広がり把握(スライド 20～25)

(委員)

周囲 1mを見て当たりをつけてから掘っていくという考えを、今回はするのか。

(事務局)

今回のスギ林でも同じように半径 1mを除去し、根の張りようを想定してサンプリング場所を決める。しかし、他の委員の指摘どおり、ヒノキと違ってスギは斜めに入って見えなくなる可能性がある。半径 1mを掘って平均的なところを狙ってデータが取れるか自信がなく、サンプリング方法やデータの取得方法自体も、過年度の結果や経緯を基に検討したい。

現場条件も、高知県や提案している宮崎県の日南市や福島県の棚倉町に関し、まず許可が得られるか、得られたら地上部の状態を把握し、第 2 回委員会までにデータを取得し、地上部の状況を説明できる状態とし、できればもう一度各委員から意見を伺いたい。根系調査の経験がないので、本当に適切かどうかわからない。取組があれば視察したい。

4) 交付金プロジェクト(スライド 28)

(委員)

交付金プロジェクトのシンポジウムは 10 月 29 日、発表の成果は、「水利科学」の特集号に持ち込む予定であるが、正式引用できるものは来年度になると想定される。その前に関西支所のほうでまとめる企画があると聞いている。さきほどの議論にもあったように、固まった内容でなくこれから新たな視点を提案するところで、コラム的というか、今後はこういうことも検討しなければいけないという感じになる。

5) 森林整備手法(スライド 27)

(委員)

樹木根系で効果があるところを、さらに強くするようなイメージという説明があった。そう考えたときに、森林整備では防災的に強いという観点で選木し周辺木を間伐するイメージと、構造物では筋工や柵工の話があった。スギやヒノキ以外の樹種が、間伐によって侵入し効いているかどうかといった点も含め提案しても良いと思う。

(事務局)

単層人工林育成に至って、整備は密度管理しかないと思う。自然侵入した広葉樹やその他樹種の根系も土壌流亡抑止も含め機能があると認識している。委員の方の中にはアセビやミツマタで低木層

の根系強度を計測されている。少なくとも下層植生の根系も、斜面安定に寄与しているのではないかと認識し注意したい。その点で治山事業における受光伐は、下層植生を繁茂させる取組みとして表層崩壊の抑止に貢献していると考えている。

(委員)

ミツマタとかの話は単木レベルの比較になっているので、面的な話として指摘すると良いと思う。最終的には崩壊抑制の観点なので、低木に細かく入り過ぎ全体が見えなくならないよう注意してほしい。

(5) 森林の土砂災害防止機能のうち表層崩壊防止機能の解説発信業務

1) 取り扱う情報量(スライド 33)

(委員)

項目をみると、治山全般のことが入り、かなりぎっちりした本になる気がする。川口氏の書籍のような、分かりやすく一般向けのものであればすぐにできるかもしれないが、この内容であるならば今の委員だけで対応できるか懸念される。

(事務局)

取捨選択が必要と考えている。今は表層崩壊に限らず治山全般を含んでいる。別業務で水源涵養をテーマにした解説書も並行して動いている。そちらも構成は似ている。検討委員の専門分野も様々であり、項目全部を網羅するならほかの先生も必要となる。検討委員会の中で編さんを進める上で、項目の取捨選択や並べ替えなどの意見が欲しい。ただすべてを執筆していただく考えではない。

2) 気候変動項目(スライド 33)

(委員)

1980 年代の森林が効いている崩壊がそうでなくなった朝倉の災害(九州北部災害)のようなやや深いところからの崩壊事象が出てきたときに今後どうするか、といった点を触れたほうが良い。崩壊防止機能といっても限界があることを示すべきである。

3) 崩壊防止機能の限界(スライド 33)

(委員)

大きな教科書になりそうな内容と思う。私も今までの延長にない森林の崩壊防止機能の限界をきちんと理解してもらえる内容が重要。全体のリスクを低減するということを分かってもらいたい。

4) 環境譲与税(スライド 33)

(委員)

事務局作成案を見て可能な範囲で協力する。森林環境譲与税の項目、導入では、関係県内市町を見ても、環境譲与税の活用方法が見えない。今の状況を全国的に見て、環境譲与税を土砂災害に活用する方針があるか。

(事務局)

この解説本を作るに当たり、森林環境譲与税の使い道を誘導しようという発想から出たのではなく、純粋に森林機能を理解してもらう、あるいは科学的根拠に基づいているということを説明する材料として考えている。森林環境譲与税が活用される中で、例えばこういう立地ではこんな施業をしたほうが表層崩壊防止につながる、というような解説情報があれば、資金を使って森林整備する取組が出てくる可能性があるが、そこを目指して始めたわけではない。

5) 発信書籍の役割(スライド 29)

(委員)

森林機能のエビデンスに基づいた理解を広めるということが一番重要と思う。特に根系は分かっていない部分が多いが、最近欧米での研究成果に関する情報を十分反映し、分かっていることと分かっ

ていないことを明確にしていくという方向性で作っていくことが、現時点では重要と考える。

(委員)

森林の崩壊防止機能には限界があるということ。朝倉市の災害における崩壊などを見ていると、本当に立派な森林がどんどん崩れていることも発信しても良い。そういう事実や限界があるというのは、一般にも知っていただいたほうがいいと思う。朝倉のデータも、しっかりしたデータはあまりない。どのようなところでどんな崩壊が発生したか調査項目もあると良い。

(6) 全体を通しての意見・質問

1) 気候変動対応

(委員)

この業務は森林整備のときに気候変動絡みの考えと違うのか。森林が効く崩壊に対してやるもので、先の気候変動で外力が強くなったときの対応ではないという理解で良いか。流れ的に林野庁がどのようなスタンスで発注しているか確認したい。

(林野庁)

気候変動を組み込んだものではない。この調査は、表題や中身にあるとおり、根系による崩壊防止機能の調査である。気候変動に対応した森林整備は難しく、この調査で結果を出せるものではない。

2) 過去と最近の崩壊現象の違い(スライド 33)

(委員)

最近の崩壊の起こり方の違いが大事なポイントだと思うので、解説書に何か過去の崩壊事例の解説を入れるとか、報告書の中でもいいが、どこかでそれが今発生している事象と違うことがわかる情報も必要と感じた。そうすると、この事業の解釈の仕方が整理されて良いと感じた。

3) 現地選定(スライド 20～25)

(委員)

今回のスギの調査候補地の選定は悩ましい。宮崎は間伐、無間伐も想定している。その辺りの考え方も整理が必要。間伐立地は抜根が残存。抜根に向かった根の動きはまた違った影響を考慮した解釈が必要。あらかじめ掘った場合どんな結果が出そうか想定した上で進めたほうが良い。今ある知見を最大限に生かしながら、やり方を考えたほうが良い。

4) 若齢期の施業、低密度植栽について

(委員)

崩壊防止を考慮した施業が大きなテーマ。昔発生していた薄い表層崩壊に対し、森林の効果がない時期というのは若齢期で表層崩壊が発生するが、その間の施業は限られる。その時期にいかに地上部を大きくして根の量を増やすかが大切。試算では収穫表のような 5 年ごとの大きさに樹木を育てると、地上部量を大きくするシミュレーションができる。報告書の低密度植栽について、一本一本が早く成長すると、地上部がたくさん葉をつける樹形となり、地上部に対応し地下部も大きくなると思う。再造林が難しい時期に、低密度植栽技術が普及するならば、その根量も検討が必要。なお、やや深めの崩壊では、いろんな施業を試みてもあまり樹木の力は及ばない。

(委員)

兵庫県でも低コストの話があり低密度植栽話が出る。そこに根の強さや防災的にも強いという話が加われば、そちらに進む可能性もある。一方で現実的に特に標高の低い所の低密度植栽を考えたときの病虫害などもある。低密度植栽が防災的にはメリットがあるが、それ以外の面で見たときのメリット・デメリットも合わせまとめたほうが良い。

5) 崩壊深と LP データの取り扱い

(委員)

やや深い崩壊という話があるが、正式には深さではなく根系層と土壌層の間に水が集中し、立木そのものが一緒に洗い流される形の崩壊と思う。それが深ければ確かに深いが、浅いのも結構ある。データ立証するのは困難である。崩壊前の LP データ標高は地面に届いていないことが多く、0.5mぐらい過大な可能性がある。表層崩壊の厚さで 0.5mは致命的。深さで整理できればよいができない可能性も考慮し、写真などを使い今までと違うことが起きていることを言えば良い。

(事務局)

過年度報告で国土防災様が当時、広島県において、崩壊した立地としていない立地で類似箇所を比較する取組みがなされていたと思う。そのときは崩壊の深さや崩壊特性に関し議論されたと考えている。本事業の 4 年目に改めてそういう取組が必要か、協議の変更と仕様書の変更等について対応できればと思う。LP データ比較で把握できる部分と、現場で把握できる部分(根系が効いている崩壊かどうか)、それぞれについて着目するポイントが欲しい。

(委員)

広島については応用地質様の報告書の中で『溶け出し型』とか、明らかに通常の表層崩壊とは違うということも記載されているので、そういう引用も良い。

(事務局)

花崗岩風化地帯における崩壊現象に関しては、何とかその対応が取れそう。平成 30 年に報告書を作成された応用地質様にお願いをすればデータが出てくるかもしれない。

(了)

5.2. 第2回検討委員会議事概要

令和 3 年度山地保全調査
(森林整備が表層崩壊防止機能等に及ぼす効果等に関する検討調査)委託事業
第 2 回検討委員会

開催日:令和 3 年 11 月 22 日(月)
場　所:日本森林技術協会　5 階中会議室 および Web

(1) 樹木根系による表層崩壊防止機能に関する知見の整理と調査

1) 表層崩壊の定義

(委員)

近年は、50 年生ぐらいの樹木が生育し、たくさん根があり安定した状態のため、表層土は崩れにくく、土壌層の下から崩れる崩壊が多い。50～60 年生の林分でも崩れる事実があることから、崩壊の種類を表層崩壊と区分しておくべき。第 2 回検討において、発言にあった『やや深い崩壊という話があるが、正式には深さではなく、根系層と土壌層の間に水が集中し、立木そのものが一緒に洗い流される形の崩壊と思う。』は、非常に適切な表現と思う。

(事務局)

区分する上で林齢や崩壊深による表現区分が困難なため、林分の発達段階による区分を検討したが、林分の発達に伴い立木は自らの環境に適した空間を自律的に形成していると思われる。通気性が良く保水性のよい団粒構造の形成等、立木の生育にとって望ましい環境が、異常気象の際、過剰な水が集中透水によって、悪影響を与える可能性があるかもしれない。

2) 崩壊指標と崩壊事例

(委員)

崩壊をごく浅い表層型の土壌層が崩れるような崩壊と、やや深めの崩壊と分けて考えた場合、今までやってきた ΔC とか Wr という指標はごく浅い崩壊に対応している。やや深めの崩壊に対して評価できない。最近の崩壊はやや深めの崩壊が多く、そういう崩壊に対する森林機能の評価は、今の段階では科学的根拠に乏しい。壮齢の 50～60 年生ぐらいの森林の根が、深めの崩壊に対しどう影響しているか明らかにするのも、この事業の 1 つの出口。

(事務局)

成熟段階の根系が斜面崩壊にどのような影響を与えているか、未解明な部分が多く、その解明のために本事業でどう対応できるか検討。→成熟段階の林分における崩壊地の情報収集。→宮崎県における 50 年生のスギの掘り取りの際、成熟段階の林分の根系やその周辺土壌・土層が、幼齢・若齢段階の林分とどのように異なるかを観点に調査を実施。

3) 崩壊と森林機能に関する新しい考え方

(委員)

森林総研等のグループによって、クリープの下斜面のスギ根系が土砂を支えている調査事例もあるが、まだ研究が始まったばかりでこれから検証が必要。今回の調査とは、視点が全く異なるため、実際の現地では移動体が明瞭に認められる場合、立木の伐採により危険度が高まることを補足的に述べておくことで、本事業の位置づけにしておきたい。

(事務局)

根系は地盤の影響を受ける。特に侵食域において、根系は変化・変形していることは体感しているが、本事業の趣旨に合わせ、広域的な観点で LP データ(樹冠面積、立木密度、樹高)を活用して、表層崩壊に強い森林施業を目指すこととする。引き続き、LP データから直接的に取得できる情報をもとに整理できないか検討する。

(2) 崩壊防止機能を考慮した森林施業

1) 林分の発達段階による地上部の区分

(委員)

幼齢・若齢段階と成熟段階に分けた区分は良い。地上部の区分であるが、地下部の違いに仮説はあるか。

(事務局)

立木同士が競合している段階を幼齢・若齢段階と考え、競争が緩和され、下層植生の侵入が見られる段階を成熟段階と考えている。

2) 成熟段階の施業

(委員)

やや深めの崩壊は、いろんな施業を試みてもあまり樹木の力は及ばない。

(事務局)

木材生産林や環境林等、目標林型は異なるが『健全な森林を目指すこと』は同じであり、健全な森林育成と、崩壊防止機能を考慮した森林施業が同じ方向性にある前提で、森林施業を検討。

3) 下層植生の役割

(委員)

スギやヒノキ以外の樹種が、間伐によって侵入し効いているかといった点も提案しても良いと思う。ミツマタ等の話題は単木レベルの比較になっているので、少し面的な話として指摘すると良い。一方、最終的には崩壊抑制の観点なので、低木に細かく入り過ぎ、全体が見えなくならないよう注意してほしい。

(事務局)

人工林施業では、主な整備は密度管理と考えているが、自然侵入した樹種の根系も、土壌流亡抑止も含め機能があると思う。アセビやミツマタで低木層の根系強度を計測している。下層植生の根系も、斜面安定に寄与していると認識し、調査計画を検討したい。

(3) 調査方法の検討

1) 現地調査方法

(委員)

過年度のデータは ΔC もばらばら。過年度のような掘り方をすれば、樹種を変えても出てくるデータは同じで意味がない。根系は地盤の影響を受けるので、掘ったところでどんなデータが出てくるか分からない。もしやるなら、棚倉とか日南とか密度試験をしているような、はっきりした地上条件のもとでしたほうが、一般的なデータが出てきて良い。せっかく苦労をするなら、ちゃんとしたデータが取れそうなところでやったほうが良い。

(事務局)

ヒノキ以上にスギの根系はランダム分布しているため、過年度の調査方法では適切なデータは取得できない。どのような調査方法を適用するか。丸々掘って調べる方法と同様の結果を効率的に取得する調査方法を検討する。

2) 調査方針

(委員)

日本の林業を考えた場合、平均的な森林施業が行われているような条件のところでデータを得た方がよい。今まで調査が行われていないため、非常に貴重なデータとなる。地形地質の特性が大きい立地では、その変数によって密度差や間伐の有無等の施業の影響が表れにくくなる可能性がある。間

伐は地上部の成長促進には効果的であるが、地下部で評価した事例は少ない。その確認は重要。
(事務局)
　宮崎県の調査地は、傾斜が 20°程度で、風化砂岩を母材とする残積土地帯。非侵食地帯に相当し、地形地質による影響が根系に表れにくい立地条件にある。

3) 調査対象木の選定

(委員)
　優勢木と劣勢木→間伐の効果は評価できるかもしれないが、当然のこととして受け入れられる可能性がある。間伐時期の違い→過年度の間伐効果は確認できるが、今の間伐効果は今後。対象木の根系とその他の根系は区分できるか。宮崎の調査地にはどのような樹種が下層植生にあるのか。
(事務局)
　初めての試みのため、立地において標準的な成長を示す立木を調査対象とする。対象木と周辺木の区分は、掘削方向と立木方向がわかるよう 3 色のラッカースプレーにてブロック面をマーキングし、根の細りを区分する。下層植生は、アオキが優占しサカキ、シキミ等が生育している。

4) 調査結果の想定

(委員)
　今回のスギの調査候補地の選定は難しい。宮崎は間伐、無間伐も想定している。その辺りの考え方も整理が必要。間伐立地は抜根が残存。伐根方向に向かう根の動きはまた違った影響を考慮した解釈が必要。
(事務局)
　ネルダー試験地の地上部情報を吟味し、目的や結果を想定して掘取り対象木を選定する。

5) 森林機能のエビデンスに基づく理解

(委員)
　森林機能のエビデンスに基づいた理解を広めるということが一番重要。特に、根系は分かっていない部分が多いが、最近欧米での研究成果に関する情報を得ているため十分反映し、分かっていることと分かっていないことを明確にしていくという方向性で進めることが、現時点では重要。
(事務局)
　分かっていることと分かっていないことを明確にすることは、調査結果の前提条件の整理を含め、理解に高いスキルが必要。課題の解決に向け努力する必要があることを認識。

（了）

5.3. 第3回検討委員会議事概要

令和 3 年度山地保全調査
(森林整備が表層崩壊防止機能等に及ぼす効果等に関する検討調査)委託事業
第 3 回検討委員会

開催日:令和 4 年 2 月 28 日(月)
場　所:日本森林技術協会　3 階大会議室 および Web

(1) 山腹崩壊発生地と森林状態等との関係に関する調査報告

1) 林分の発達段階による地上部の区分(スライド 5)

(委員)
成熟段階は立木が自ら立地環境を整えて生育する段階と考えるということについて、具体的に考えたときにイメージしづらい部分がある。立木という話なので単木レベルの話だと思うが、一方でこの委員会は、表層崩壊という面的な話だと思う。その単木の話と面の話にどう置き換えていこうとしているのか、どう考えておられるのかという辺りが本日の委員会で話ができたら良い。

2) 表層崩壊のとらえ方(スライド 7)

(委員)
幼齢～若齢林齢は従来のものでよいが、壮齢林になってくると、「ΔC では説明できない等の未解明の部分が多いことから、新たなデータや考え方の整理が必要」という意味がよく分からなかったがどういった意味か。新たな考え方も入るのか。
(事務局)
この文章が多面的にきちんと確認できていない。決して「新たな」というところに着目しているわけではなく、また森林総研のセミナーの結果をそのまま反映することもない。ただ、従来の若齢林の島根県の災害や、丹沢も含め「表層崩壊」のイメージに合うものを、従来の斜面応力で整理したところ、50 年生以上になると合わないという実態を踏まえ、何故合わないのか見いださなければならない。
今回いきなり新しいことにチャレンジすることはなく、あくまで従来の ΔC、Wr を出し、今年で 4 年目だが、過年度の手法を取り入れつつ、現場で気づきがあれば 5 年目、来年度継続して説明できない部分に関し少しでも科学的根拠を積み上げていくことができればと考えている。
(委員)
50 年生以上については ΔC が効いていない。つまり、森林の ΔC の限界を超えているところ、防災機能の限界を超えているところで起きる崩壊である。逆に言うと、表層崩壊も、崩れてしまったら限界を超えて起きている。そうなると、壮齢林の ΔC を掘ったとしても、その ΔC 以上の効かない深いところで起きているのだから、そういった整理をされたほうが良いと思う。
(委員)
50 年生以上の林分での崩壊と若齢な林分での崩壊とを分けるということを言い出したのは、私かと思う。若齢で発生する崩壊は、皆伐によって根が腐朽してしまい崩壊防止機能が非常に落ちてしまうような状況で発生する崩壊をイメージしており、それらは ΔC や Wr という指標で評価することができるのではないかと思っている。また、やや深めの崩壊、言葉として深層崩壊というのはスライド 4 に記載されているとおり「やや深い崩壊という話があるが、正式には深さではなく、根系層と土壌層の間に水が集中し、立木そのものが一緒に洗い流される形の崩壊」というイメージの崩壊である。こういう崩壊に対しては樹木の根系の崩壊防止機能がゼロではないが非常に弱くなるように考えられる。
ゼロでないということはこの間の森林総研の研究セミナー等での発表にもあったが、そういうやや深めの崩壊の下のほうに生育している樹木は、落ちてくる土塊を支えているのではないかという話もあった。その辺はまだ研究段階であり、この委託事業の中でそれをやるのは難しいので、そういうこともある

ということを頭の片隅に置いて、今回は非常に浅い根が生育している深さの一番上の土壌層、根系層が崩れる、そういう表層崩壊をイメージして仕事を進めてもらえればいいのではないかと思っている。

3) 地上部、地下部の関連付け(スライド 7～8)

(委員)

地上部の情報を地下部と関連付けるということはよいが、かなり細かい調査をされており、それをどう面的に広げていくのかイメージがつかみにくい。関連づけられることを前提に、どこまでの情報が有効なのか。あまり細かくしたら、その細かいところまで地上部情報は反映していないのではないか。そういった切り分けが必要と思う。

4) 健全な森林(スライド 7)

(委員)

「健全な森林」という言葉が出てきているが、漠然としていて意味が分からない。施業をしている人工林の中で健全な森林とは何かと考えると、施業の目的は一義的には木材生産のためである。サステイナブルに生産を回していくためには施業が絶対必要でそういった施業を行う、そうすると、生産に適したということが重要であり、表層崩壊防止機能が上がる、下がるということとは関係ない。

逆に言うと、表層崩壊の防止機能といった災害防止機能は、むちゃな施業をすると大きく下がる。そういったことがないやり方は何かといったことを整理されたほうがよい。説明を受け、施業によって人工林の防止機能が向上するように聞こえるが、まずいのではないか。施業をすること、生産をすることで、森林の持っている機能は少し落ちるけれども、それを落とさないような方法はどうするべきか。その方法を見つけるためいろいろな調査をするべきである。

(委員)

確かにいろいろな森林にいろいろな機能があって、トータルで見た答えを出していかなければならないが、それを最初から気にし過ぎると予定調和になる可能性がある。この調査はこの調査で崩壊防止機能にまず特化して行い、総合評価については、また別のところでやるべきなので、最初の段階では「健全な森林」といった若干定義が不明瞭な議論はあまりしないほうががいいと私も思う。

(委員)

「健全な森林」というのは私が言い出したことだと思うが、少し説明させていただくと、施業をしていく段階で間伐遅れの林がかなり広まっていたようなときがあって、それを積極的に間伐してきた。木材生産のために施業を行うということが主なところになろうかとは思うが、間伐をせずに、樹冠が上のほうに少しだけ付いているような林になっていってしまえば、当然、少し強い風が吹けば倒れてしまう、雪をかぶれば折れてしまう、病虫害の被害を受けやすいといった不健全な状況になっては非常にまずい。

そういう状況になれば森林の崩壊防止機能も当然なくなるし、いろいろな森林の機能が消失してしまうわけなので、そういう状況にならないように、森林としていろいろな気象災害、病虫害などに強い、そういう健全な森林が必要だということで、そのような言い方をしたが、言われてみると非常に抽象的で、どれが健全なのかということになろうかと思う。

(委員)

気象害のリスクに対して考慮しなければいけないというのはもっともであり、トータルで評価するときに適切にそれは考えなければいけないが、各チャプターのところでやると若干議論が混乱するので気をつけてほしいということである。

(委員)

表層崩壊に関しては、手入れが遅れているから表層崩壊が発生したというのは、エビデンスがあるかどうかというのもまだ難しいところである。

(委員)

エビデンスはないと思う。間伐することによって、先ほど言ったような気象害などに弱い森林ではなくて、そういうものに強い森林ができるという点ではプラスだと思うが、表層崩壊そのものに対して効果が

あるかどうかというのは、まだ分からないところが多いと思う。
(委員)
間伐が表層崩壊そのものに効果があるエビデンスがないのかもしれないが、倒れにくさという点でいくと、以前行った試験の中で、間伐の有無で実際に引き倒す試験をやったときに、間伐したほうが倒れにくいというデータも得ている。ただし、それが表層崩壊にどうつながっていくのかは整理が必要である。

5) 1.3.2 現地調査結果-宮崎県(スライド 14～34)

(委員)
今後、これまでの調査結果をどのようにとりまとめていくか見えないが、どのように考えているのか。これだけ貴重な詳細なデータをどの生かしていくのか。あるいはもともと作業をする前に、ある程度の仮説があるのか。かなり詳細に調査を行っているので、そこのバランスが気になった。
(事務局)
この立地において調査するに当たって、調査方法の決定は困難であった。事前に座長や林野庁とも相談し、どういう方針で調査するのか、どの木を伐れば効率的かなど作業性も含めて検討した。
このような調査は初の試みであり、密度管理試験地で 1 本掘り取るだけでも一つの成果であることと、科学的根拠をもとに政策を進めるという去年 3 月に治山課が出された基本方針を基に、まずは適切に基本となるデータを取り、そこから展開できる情報は何かを考えた。
本来の事業趣旨である航空レーザとの関係で取得しやすいのは樹冠形状と思っている。今まで取りにくかったものが取れるということで、そこで見えるものは何か。それを基本方針として、LP データで直接取得できる指標を押さえたいと思ったときに、間伐で根がどう変化していくか。20 年前の間伐が今どうなっているか、今伐ったものが将来どうなるかを押さえることができれば、施業と根系との関係がはっきりすると考えている。短期的に成果を収めつつ、次の世代に期待したい。ネルダー試験地も 50 年たってやっと成果が見えてきた。そういう調査のサイクルに見合った観点で調査するのも良いと思い、いろいろな仮説を抜きにしてやってみた。
明らかにしたいのは何かというと、伐根と被圧木と標準木との違いで、根の違いがどのように出てくるか。サンプルとしては 3 つしかないが、その中で違いが予測どおり、優勢木の近くの根が多くて、被圧木が少なくて、伐根はたくさん枯れた根が出てくるという非常にシンプルな考え方で実施してみたら、そうではなかったということである。
あまり予測を基に実行すると、見込み違いであらぬ方向に行ってしまうというご指摘があって、客観的にデータを見なければならないと思っている。まず基本的なところからチャレンジしたというのが前回の 2 回目の委員会以降検討し、今に至っている。
(委員)
実際に掘ってみたら、伐根も 20 年たっても枯れていないということが見えたということは分かった。もう一つ気になった点は、確かにこれは初めての試みで、それだけでも非常に意義があることではあるが、50 年後ネルダーでまた掘って、そこですごいことが分かるということを期待していると聞こえてしまう。今掘った時点で何かということが求められている。
(委員)
H28 が 2002 年伐採で、約 20 年前に伐採したが、株はまだ残っているということと思うが、一方で、少し離れていくと、先のほうは枯れている状況と思う。枯死した根か、そうでないかがなかなか見分けられない、ないしは、方向性が捉えづらいという点について、例えば 32 ページのH27 とH28 の間の写真が左上にある。これは ΔC の断面で今回確認したと思うが、そこに出ている根がH27 からなのかH28 からなのかが判別できれば、もう少し話が展開できるかと思う。
(事務局)
根の出る方向性が重要と思うので、掘ってすぐに対象木かどうか見定めることができれば良かった

が、現場では次々とブロックが出てくるため、一旦それを別の場所に運搬し作業の合間を縫って仕分けをすると、方向性が分からなくなる。もちろん掘った方向を認識しブロックを置いていたが、縦横無尽に根が張っていて、正確に追跡できないと判断した。地表面は根が多く、どこを掘っても基本的には均質で 10～20 個掘削すれば面的な根の分布が分かるというぐらいの Wr は事前に分かっていたので、地表面において方向性を示すことは無理と判断した。深く掘れば、細りが分かるということで掘ろうと思ったが、そこで根切りチェンソーの切削能力が低下し断念した。対象木と隣接木の根の区分は、今回は諦めざるを得ず大きな情報を落としている現状である。

(委員)

今回のデータをどう生かしていくかはなかなか難しいところだと思う。今までこの崩壊防止機能の話の中で、ΔC や Wr という比較的簡易な形で評価するという方法を提案されていたが、両方とも非常にざっくりした話で、崩壊防止機能の本当の物理的なメカニズムまで突っ込んだようなところまでいっていない評価方法と思う。

これまでの根系分布調査においては、1 本の木の全体的な根の量がどうかという話が多かったと思う。その根がどう分布しているかという、今回得られたような形のデータはほぼ見たらないと言っていいと思う。今回のこの事業の中では無理かもしれないが、崩壊防止機能を考えていく上では、どうしても根系が土壌の中でどう分布していて、その根が崩壊をどう抑止しているかというところまで話をつなげていく必要があると思う。それにはこのデータが絶対必要で、どれくらいの量が立木からどれぐらいの位置にあるか、平面的に見ると、樹幹からどういう具合で根の量が少なくなっていくか、深さ方向にどれぐらい根の量が少なくなっていくのか 3 次元的な根の分布が必要になってくる。

今回調査したところは、立木密度がはっきりしていて、施業の経歴も分かっている。いろいろ土壌的にも特殊でなく、土壌層も比較的厚く、健全な発達をしているところでこういうデータが得られたので、根の量的な情報として非常に価値が高いと思う。

もし今回やっているLPデータなどから、そういう根の分布まで推察できるようなものができれば一番いいなと思う。まだまだこれからの話だが、そのデータの分布を基に崩壊防止機能を物理的に解明できるようなものができてくればよいと思っている。

当面は ΔC や Wr で対応していくということになろうかと思うが、もっと先のことを見据えれば、林野の行政の科学的な面を支えるということで非常に貴重なデータではないかと思う。

(委員)

非常に貴重なデータが取れていると思う。特定のところに非常に太い根があり、そもそも異方性のようなものがあるのではないかと思えるような現象も見える。もちろんこの事業の最終的な成果として、樹幹からの距離の関数のようなものにしたときのパラメータは求めなければいけないが、現場で率直に観察され、生物としては投資に対して回収が良くなるほうに成長するはずなので、根の成熟もそうなっている可能性もあり得るのではないか。こういう特定のところに太い根が出るというのは、現場でよく目にするが、なかなかパラメータ化しにくいと思う。調査現場ではそういう現象をたくさん見られてきたと思うので、きちんと記録してコメントしておけば、非常に重要な成果になるのではないかという印象を持った。

6) 1.3.2 現地調査結果-宮崎県(スライド 35～48)

(委員)

スライド 38～40 で出している ΔC の出し方について確認したい。まずデータ的にはスライド 39 は H27-28 ではなくて、H25-26 ということでよろしいか。となると、劣勢木に対して、一方が優勢木の H24、一方が標準木のH26 だということだとは思うが、劣勢木に対してということであれば、意味合い的には似ているのではないかと思っているが、H24-25 の ΔC と、H25-26 の ΔC が 1 桁違う値になっていると思う。まず出し方を教えていただき、かつ、その出し方の上でここまで違ってきた理由として何か考えられることがあったら教えてほしい。

(事務局)

根の断面、先端を出し、断面を重複して撮影し、肉眼立体視と、断面をフラッシュ撮影し、平滑に撮影し根の直径と本数を確認している。爪鍬で根がちぎれていない限り、基本的には細根も取得できている。ただし、この ΔC に関しては、よく似た土層の断面の中でこれだけ違うということを説明できるような情報がないことから、精度が適切に確保されているか不安を感じている。改めて見て確かに違うのは、40～80cm の層で上の H24 から H25 のほうが途中で根が出ているという特徴があり、それが影響しているのかもしれない。また、今の段階では、深部に 6mm ぐらいの根があり、H25-26 のほうは地表面に 3cm ぐらいの広葉樹(サカキだと思われる)の根株がある。そういうものが効いていると思うが、結果をもう少し精査する。

(委員)

ΔC はそこでの全体で出しているのか、それとも、想定する潜在的なすべり面にある根を中心に測ったのか。つまり、全体で測ったのか、面を想定して測ったのか。

(事務局)

本年度仕様書に示された幅 2.1m×高さ 0.8m の面にある根断面積合計である。

(委員)

仕様書のとおりというのはそれでよいのだが、そもそも表層崩壊というのは 0.8mより上、例えば 0.1mで起きるはずがないだろうと思うが、その辺りはどのように考えるか。

(事務局)

もともと ΔC という考え方が、諏訪湖の近くのカラマツ崩壊に対し、垂直根よりも水平根のほうが評価しやすいということで調べられた経緯があると認識している。表層の水平根の特に細かい根系が、どのように崩壊現象に影響を与えているか。ΔC をどう評価するかといったときに、地表面の応力変化に対し与圧というか、外からの圧力に対して何らかの抵抗力を細根も持っていると思っている。表層崩壊というのはすべり面をもって崩れるか、それとも上から押されたり、下から引っ張られたりしてひずみながら崩れるのか。そのような与圧に対する抵抗を細根が機能している観点で調査した。

(委員)

側根の影響も 3 次元的に見るということで理解した。

(委員)

ΔC の出し方は根の直径から ΔC を出したという単純なやり方であり、次の御説明の中に ΔC マップの話がスライド 49 で出てくるが、これでやったわけではないということで理解した。先ほどの話にもあったとおり、1 か所だけ 1 桁違うようなすごく大きい値が出ている点が気になった。太い根が 1～2 本あると、多分このようになってしまうという気はするが確認してほしい。

7) ネルダー試験地の崩壊防止機能区分図(スライド 51、52)

(委員)

必ずしもネルダーの実際の分布をベースに計算しなくても、ネルダーそのものがある種の標準化を狙っているのだとすれば、ネルダーの材積調査、地上部のライダーや UAV の調査から、中心部からの関数でモデルを作ってしまって、それに対して仮想的なものを計算してもよいのではないか。

ネルダーの考え方そのものがそういうところを狙っているので、必ずしもリアルネルダーの分布に合わせなくてもいいのではないか、そのほうが絵的にはきれいなものが出てくるのではないかと思う。

(事務局)

今回はまずは現地で取ったデータをベースに作成してみて、大体密度を反映したような図がそれぞれ出てきてはいるが、データも少しランダムな部分もあるため、これを基に標準的なマップを作ってみるというのも確かにあるかと思う。

8) 1.5 樹木根系による崩壊防止メカニズムと森林整備(スライド 53～57)

(委員)

最後のところについて、実用的というよりも今後の科学的な目的、要するに 3 次元的なもの、サイエ

ンティフィックな意味合いがかなり強い内容と感じた。スライド 55 のメカニズムのところで、せっかく全量ブロックで掘っているので、これを裏づけるデータが取れると思うので、その辺のところが鍵と思う。また、間伐をしたときの下層間伐が有効であるという話をしていたが、それはおそらく雰囲気である。予定調和的な雰囲気なので、あまりそれを書いてしまうのはどうかと思う。林野庁的にはそれでよいのかもしれないが、科学的にそれが果たして正しいかどうか、まさしくエビデンスがないので、慎重にすべきと思う。
(委員)

下層間伐について、前回は支持する意見も述べたかと思うが、今日の時点では、下層間伐を支持するようなエビデンスが出てきておらず、伐採して腐った根、腐朽した根がどのように腐っていくのか、ないしは何年ぐらいでどのようにという話が見えてこないと、この話にはつながっていかないと思った。

ただし、ある時点でのデータにしかすぎないのかもしれないが、伐根の近くや劣勢木の近くに根が多いデータも取れているようにも見える。実際の根の腐朽の状態も含め話ができてくれば、もう少し説得力のあるデータにはなると思う。しかし、今の時点では言い切るのはなかなか難しいと考える。
(委員)

根系のアテというのは通常どのように成長するものなのか。外部から圧力が加わっていない状況で成長する場合の写真はどれか。
(事務局)

今回初めてこういう偏厚した根の断面を見て、特性を認識したが、苅住先生の本に記述があり納得した次第である。典型的な例として海外の板根の例があり、関連するページに苅住先生もいろいろな誘因があると示されているが、どれも明確に説明できるような状況ではないと表現している。ただし、ひだの多い、板根らしきものが発達しているようなスギを切ったときに、どこに中心柱があるかというと、割と内側にあって、外に年輪が伸びている形になっている。それが普通となると、53 ページのほうが、中心に近いところに枝分かれしている根が、手前側に中心柱があって、外側に広がろうとしているのが普通と考えている。
(委員)

この間の森林総研のセミナーでも、根が変形というか、アテができたり、融合したりという話があったが、おそらく、根が長時間、強い力を受けていて融合したり、偏心したりということが起こってくるのだと思うが、そういうのが起こることを崩壊と関連して考えると、まだ不確実なところではあるが、それは地盤が動いている状況があるのかもしれない。

最初の話に戻り、森林を皆伐してたくさん起こった崩壊を考えると、このアテの話を考えなくてもいいのではないか。話を整理するためにアテの話を持ち出してくると、地盤がゆっくり動くような崩壊も考えておかないと、なかなか整理ができなくなってしまう気がする。そして、ΔC や Wr などの図ができているが、おそらく、地盤が変動する崩壊ではなくて、森林を伐採したときに起こる崩壊を考えてつくられた指標と思う。その辺を整理して話をつくられたほうがよいと思う。

また、科学的エントリーという話があったが、施業と結びつけるために今回の事業の結果を生かすというのは、なかなかすぐにはできるような問題ではない。ΔC も非常に大雑把な手法であり、Wr もただ根の量だけの話で力とは結びついていない。その辺のところを結びつけられれば、施業とも関連した話ができるという気はするが、それも不確実でよく分からない。今回得られたデータは非常に貴重なので、こういう森林の崩壊防止機能を正しく評価し、行政に生かせるようにするために非常に貴重と思う。引き続き来年度も立木密度の違うような林分でこの調査を行えば、土壌中での根系の分布状態など、さらにデータが積み重なっていって、それを生かすような研究に発展していければよいと思う。
(林野庁)

スライド 43 の辺りで根系の細かい数字のデータがあり、各層、各列にどのぐらい根量があるかということを調査されているが、根も上の枝葉と同じように広がりを持って立体的に広がっているから意味を持つものではないかと個人的には想像している。その観点からすると、グラフ化されるかと思うが、それこそ枝のように、どのように根系が広がっているのかというところが見えてくると、もう少し考察が加えら

れるのではないか。こういう数字ではなくて、立方体のブロックが大きく広がっていくようなイメージを持っている。

(事務局)

「森の根の生態学」という本の中に根系を 3D モデル化している絵があり、どこまで掘れば精度が高まるかというのが分かるので良いと思っていた。GIS の内挿法という方法を用いて 3～4 点の平均的な値を補完しながら絵を描く技術があるので、3D モデルのようなものができると思う。

(林野庁)

葉量との関係や ΔC を出しているので、地上と地下部の相関のようなものを綿密に取れば、今のデータでも何か分かることがあるのではないかと想像している。

(事務局)

地上部と地下部の関係は、基本的には脈々と胸高直径でつなげていたが、せっかくの LP データなので、その情報と地下情報が直接的な関係性でつながる指標があると思い、引き続き現場で得られる情報とともに、LP データの特性も把握して、今回は立木の精度と LP データ情報が地下部と連動するかアプローチしていきたいと思う。

(林野庁)

いろいろな指標や根量などが取れたとしても、それが本当に表層崩壊防止機能に効いているのかというところ。根が長いというのはどういう長さなのか、広がり方かもしれないし、太い細いもかなり影響していると思うので、その辺りを今後どうとらえていくか。

まずは科学的に詰めていって政策に反映していく流れと思うが、その科学的な部分も、実際に表層崩壊を起こす実験ができるわけでもなくて、その辺りの関連性が調査してもなかなか見つからないと思っている。

(事務局)

表層崩壊と根の関係に関しては、治山の調査測量設計をやってきた中、崩壊地の復旧に当たり、根が効いていると思うのは「かぶり」の部分であった。崩壊地が拡大するときに、かぶり周辺の根系が効いていて、従来はその根を「法切り」という作業で切除して侵食の拡大を抑制し、張工や筋工を施工して復旧することが多かった。かぶり部分の根の出方を思い出す時、かぶりの根を有効活用しつつ崩壊拡大を抑制する対策が望ましかったと考えている。

今は非侵食地という安定箇所の根の特性を理解しようとしている。ただし、渓流域では渓岸崩壊地等でも根系が露出しているので、その露出状況を見ながら、どのような施業、作業が崩壊現象を止める根の働きとして機能していくのかということを考えたいと思う。

森林総研のセミナーでも話があったが、現状としては、崩壊面では短い根が少ししか残っておらず、太い根がアンカーのように先端が分岐して硬い面に侵入する。その部分がちぎれて、崩壊面となっているため細かい根しか残っていないという表現をされていた。そういった根系の変形の成果が崩壊面に出ていて、その役割が表層崩壊の直接的な抑止につながっていると思っている。ただし、それが全部なのか、もしくは我々が事業としてやっている方向性に向いているかは不明である。

(2) 森林の土砂災害防止機能のうち表層崩壊防止機能の解説発信業務報告

1) 森林総研シンポジウム

(委員)

森林総研のシンポジウムに関しては、論文化まで行っていないので、まだ引用していただける状態にはない。

2) 執筆者について

(委員)

本業務のような仕事をしている民間のエンジニアは、研究者が見ていない現場も見ていろいろな知

見を深められていると思うので、もしエンジニアの方がきちんととりまとめられるのであれば、それはそれで立派なものだと思う。大学の先生も国研の研究者も、専門家という意味ではエンジニアと同じなので、区別しなくていいのではないか。これだけここまで材料を作って原案ができていて、この方向性でいかれるのであれば、この業務に当たられた方がその名前で公表するのが正しい姿と思う。

近年、研究者業界もギフトオーサーシップなど非常に厳しくなっており、少し助言しただけなのに著者になったりすることは非常に大きな倫理的な違反になるため、ここまで構想を固められているのであれば、それを執筆されてまとめられるのが健全な姿かと思う。

(委員)

同感である。ここまでやられた方が主体となってまとめられるのが一番いいのではないか。

(委員)

同感である。項目毎に具体的にイメージされていているので、全体を考えられた方が書くというのが良いかと思う。先述のように、委員の方々も名前貸しという形で書くことはできない。例えば、この部分だけは誰か書けないかという話があれば、それは個別に委員の方々に打診していただくという形になっていくのではないかとは思う。

（了）