

森林が持つ表層崩壊防止機能を高めるための

森林施業の計画に関するガイドライン（案）

第Ⅰ編 表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系

1. 崩壊の発生と森林
2. 樹木根系に関する研究
3. 森林の崩壊防止機能区分図

第Ⅱ編 森林整備計画と崩壊防止機能

1. 事例検証：スギ・ヒノキ林の状態と災害発生地の関係
2. 崩壊防止機能の将来予測
3. 崩壊防止機能を向上させるための施業の計画

令和5年3月

林野庁森林整備部治山課

はじめに

山地で発生する表層崩壊と森林との関係については、森林が存在することで崩壊箇所数や発生頻度が減少することが、研究者らの調査によって統計的に示されている。一方で、具体的に森林がどのようにして表層崩壊の発生を減少させるのか、そして特に森林整備の質によってその減少幅はどう影響を受けるのかといった視点からの研究事例は少なく、森林が持つ崩壊防止機能を高めるための森林整備手法は確立されているとはいえない。

森林の表層崩壊防止機能は主にその根系が発揮すると認識されており、本数調整伐等の森林整備が樹木根系に及ぼす影響については、伐採された樹木の根の腐朽や本数調整伐による開空度向上に伴う残存木の根系成長量の増加といった一定の研究成果が蓄積され、その定量評価方法も確立されてきているが、研究は発展途上であり、まだ不明なことも多い。

一方、昨今の社会状況を鑑みるに流木による災害が全国で発生する傾向にあり、特に平成29年に九州北部で発生した豪雨災害では人工林で大きな被害が発生した。

流木被害を軽減するためには、0次谷や山地災害危険地区等、崩壊の発生するおそれの高い箇所において、表層崩壊防止機能や土砂流出防止機能等の高い森林を積極的に整備していくことが求められている。

本ガイドラインでは、樹木根系による表層崩壊防止機能に関するこれまでの調査研究の内容を整理・提示するとともに、エリートツリー等の活用など最新の造林技術の導入も視野に入れ、表層崩壊防止機能に着目した森林整備手法について、現時点の知見をとりまとめた。表層崩壊防止機能の発揮が求められる森林の取り扱いを検討する際の参考として活用していただければ幸いである。

林野庁森林整備部治山課

第 I 編

表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系

目次

1. 崩壊の発生と森林.....	1
1.1 崩壊の種類とその発生メカニズム.....	1
1.1.1 崩壊の種類（表層崩壊と深層崩壊）.....	1
1.1.2 崩壊の発生メカニズムと樹木根系.....	3
1.2 根系が発揮する表層崩壊防止機能.....	6
1.2.1 垂直根による杭効果と水平根によるネット効果.....	6
1.2.2 針葉樹と広葉樹.....	8
1.2.3 森林の表層崩壊防止機能の限界.....	8
1.3 根系調査事例の紹介.....	11
2. 樹木根系に関する研究.....	21
2.1 根系の発達・成長.....	21
2.2 これまでの根系と崩壊に関わる研究.....	23
2.2.1 塚本良則（1984～1987）.....	26
2.2.2 阿部和時（1997）.....	27
2.2.3 北原曜（2006～2015）.....	29
2.3 比較的最近の新しい知見.....	33
2.3.1 ルートバンドルモデル（根系が発揮する抵抗力の評価式）.....	33
2.3.2 新しい崩壊抵抗力評価の考え方—根量への着目.....	34
2.3.3 エリートツリーの根量.....	38
2.4 これまでの研究で明らかとなった課題.....	45
2.4.1 根系が発揮する断面抵抗力 ΔC の課題.....	45
2.4.2 間伐と根系補強力を論じる上での課題.....	47
2.4.3 下層植生（広葉樹）の役割.....	50
2.5 森林の崩壊防止機能について知っておくべきこと.....	52
3. 森林の崩壊防止機能区分図.....	53

3.1 森林の崩壊防止機能区分図とは.....	53
3.2 林野庁手引きによる崩壊防止機能区分図.....	54
3.3 ΔC 及び根量 (W_r) に基づく崩壊防止機能区分図.....	56
3.4 3種類の崩壊防止機能区分図の比較.....	58
3.5 ΔC と W_r の関係.....	63
3.5.1 ΔC と W_r : それぞれの定義.....	63
3.5.2 現地調査結果で見る ΔC と W_r	64
3.5.3 ΔC と W_r の相関関係.....	66
3.6 林野庁手引き、 ΔC 、 W_r の使い分け.....	68
第I編 まとめー表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系	70

1. 崩壊の発生と森林

はじめに山地で発生する崩壊の種類と、崩壊の発生・非発生と森林がどのような関係にあるかを整理する。

1.1 崩壊の種類とその発生メカニズム

1.1.1 崩壊の種類（表層崩壊と深層崩壊）

崩壊の分類には、崩壊土砂量の規模や形態、移動速度、誘因（降雨/地震など）、地質・水文条件などさまざまな切り口があり多様である。その中でも森林との関わりを論じる上で最も重要なのが、崩壊の深さである。森林の根系が影響を及ぼすのは浅い崩壊だからである。

崩壊の深さ及びその規模に応じた分類として「表層崩壊」「深層崩壊」という定義がある。これまでの研究で森林が影響を与えるのは「表層崩壊」で、「深層崩壊」には影響しない、とされている。

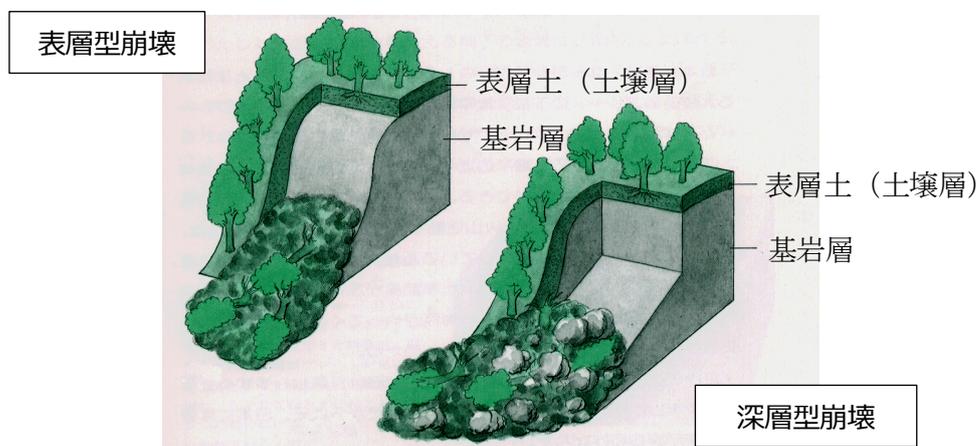


図 1.1 表層崩壊と深層崩壊（太田 1996¹に加筆）

表 1.1 表層崩壊と深層崩壊の特徴比較（砂防学会 2012²）

	表層崩壊	深層崩壊
①地質	関連が少ない	地質、地質構造(層理、褶曲、断層等)との関連が大きい。
②兆候 (地形、地下水)	ほとんどない	有る場合がある。非火山地域では、クリーブ、多重山陵、クラック、末端小崩壊、はらみだし、地下水位変動など
③深さ	浅い	深い
④土質	表層土	基盤
⑤植生の影響	有り	無し
⑥規模	小規模(比高小)	大規模(比高大)

¹ 太田猛彦著、松井光瑠(編纂)：森からみる地球の未来 4—君たちに伝えておきたい！水と土をはぐくむ森、文研出版、55pp.、1996.

² (社) 砂防学会：深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会報告・提言、平成 24 (2012) 年 3 月、JSECE Publication No.65

治山技術基準³及び砂防用語集⁴から「表層崩壊」「深層崩壊」の定義を各々引用する。

表層崩壊：

(治山技術基準)

樹木の根系の影響を受けている表土が崩落する現象である。表層崩壊の崩壊深は、一般に 1～2m 程度までであるが、谷部に表土が集積した場合はこれよりも深くなることもある。(後略)

(砂防用語集)

山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、厚さ 0.5～2.0m 程度の表層土が、表層土と基盤層の境界に沿って滑落する比較的規模の小さな崩壊現象のこと。(後略)

深層崩壊：

(治山技術基準)

深層崩壊は、表土層の下層に存在する風化岩等から崩壊する現象で、樹木の根系の影響は直接的には受けない。(後略)

(砂防用語集)

山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、すべり面が表層崩壊よりも深部で発生し、表土層だけでなく深層の地盤までもが崩壊土塊となる比較的規模の大きな崩壊現象のこと。(後略)

表層崩壊と深層崩壊は、崩壊規模と深さを基に区分され、治山技術基準では「樹木の根系の影響を受ける/受けない」という違いにも言及されている。

一般に、深い崩壊である深層崩壊では森林のうち、特に樹木根系による崩壊発生防止の機能は発揮されない。表 1.1 は砂防学会が整理した表層崩壊と深層崩壊の特徴だが、表層崩壊に対し植生の影響「あり」とされ、深層崩壊に対しては「なし」とされている。樹木根系の発達には表層土部分、深くても 2m 程度で岩盤層の中にまで崩壊防止に寄与する根系伸長が期待できないためである。治山技術基準では、その点を意図しはっきりさせるためにあえて樹木根系との関わりが指摘されている。

なお、森林が持つ水源涵養機能の一つに、降雨出水の平準化機能がある。これは、地下水挙動に影響を及ぼすことから、深層崩壊と森林に関連は全くないことはないが、根系は深層崩壊の防止に直接寄与するものではない、というのが現時点での評価である。

森林が影響を及ぼす崩壊種別は **表層崩壊** に限定されることから、本ガイドラインにおいて取り上げる崩壊種別は基本的に **表層崩壊** とする。以降、ガイドラインの中で**表層**の記述がなく単に**崩壊**と記されている場合でも、**表層崩壊**に限定した記述と理解されたい。

³ (社)日本治山治水協会(2009):治山技術基準解説 総則・山地治山編、p.89.

⁴ 砂防学会編(2004):改訂 砂防用語集、山海堂、432pp.

1. 1. 2 崩壊の発生メカニズムと樹木根系

崩壊（以降全て表層崩壊を意図しての記述）の発生メカニズムを物理的、根源的に表現すると、山腹斜面上の土が、重力ですべろうとする力とそれに抵抗する力のつり合いが崩れて発生する土砂の移動現象である。

実務においては、これを数式（フェレニウス式等の安定解析式）で表現した上で斜面安定解析等の定量評価がなされる。

崩壊の発生には素因と誘因があり、主に以下項目が挙げられる。

素因（斜面が持つ固有の性質）：

地質、地形、土壌、植生（森林）

誘因（崩壊発生の引き金）：

降雨、地震

以下、素因と誘因別に詳細を見てみる。

(1) 素因（斜面が持つ固有の性質）

崩壊発生に関与する主な素因は以下である。

地形・地質

傾斜

土壌

植生（森林）

この中で人間が主体的に制御できる素因が植生（森林）であり、地形や土壌の改変は不可能ではないが現実的な対処法となることが少ない。皆伐施業のように直接的な森林の取扱いが崩壊の発生/非発生を決定づける場合もあり、その意味で森林（が持つ崩壊防止機能）をどう管理するかという視点は崩壊防止を考える上で重要となる。

治山技術基準及び新砂防工学⁵の中で記されている、森林（根系）が持つ崩壊防止機能を以下に抜粋する。

⁵ 塚本良則・小橋澄治編（1991）：新砂防工学、朝倉書店、193pp.

森林の崩壊防止機能

(治山技術基準³より引用)

森林は、樹木の根系が土の力学的強度を補強していることから、表層崩壊に対する安定性を向上させている。過去の調査によると、森林においても崩壊地は発生しているが、崩壊地の数・面積ともに無林地の1/2程度である(難波 1959)。

また、根系の腐朽により崩壊を起こしやすくなることが知られており、根系の緊縛力との関係からは、伐採後、10年程度を経過した時点で、表層崩壊に対する安定性が最も低下する。

(新砂防工学⁵より引用)

植生は特にその根系の作用を通して表層崩壊の発生に大きく関係する。根系の機能は主に、根系の物理的絡みと下層への伸長による土の強度補強(c増強)作用と、根系部による土層支持・アーチ作用からなる。森林が伐採され根系が枯死すると、これらの機能は消失し、表層崩壊に対する斜面の抵抗力は大きく低下する。その結果、伐採後表層崩壊が多発し、発生頻度は伐採前の数倍になることもある。

治山技術基準、新砂防工学ともに、根系が土の力学的強度を補強し、崩壊発生を防止する機能を発揮することを明言している。その一方で、伐採後は根が枯死することから、その機能が失われ防止機能が低下することも併記されている。

図 1.2 は長野県が作成した樹木の根系が発揮する断面抵抗力をイメージで表した図である。根による効果はつなぎ止め(緊縛)効果と杭効果に分類される。この詳細については、次の 1.2.1 で詳しく説明する。

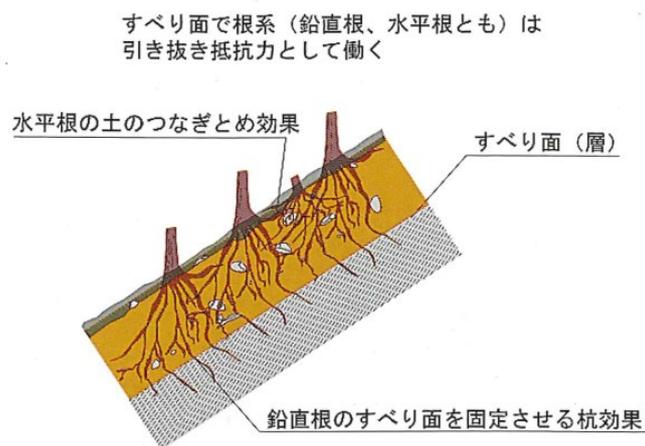


図 1.2 樹木の根系が発揮する断面抵抗力(長野県 2008⁶)

⁶ 長野県林務部森林づくり推進課(2008):災害に強い森林づくり指針、2008年1月

(2) 誘因（崩壊発生の引き金）

崩壊発生の引き金となるのは、**降雨**と**地震**である。

降雨と地震がそれぞれどのような影響を及ぼすのか文献から引用する。

崩壊発生の誘因となる降雨と地震（新砂防工学⁵より引用）

降雨：降雨は地中に浸透することによって、表層土中の間隙水圧 u を高める一方、 c^{*1} 、 ϕ^{*2} を低下させ、表層崩壊を誘発する。崩壊に結びつくような間隙水圧 u が発生するためには、強度の強い雨が長く継続することが必要である。崩壊に関係する要因のうち間隙水圧 u は最も大きく変動する要因であり、崩壊発生が近づくと急激に上昇する。

地震：地震動は斜面内の応力条件に変化を与えたり、斜面のゆるみを促すことによって、表層土の c 、 ϕ を低下させる。地震時の表層崩壊は地震波の加速度（または震度）や震央に対する斜面の向きなどに関係する。崩壊発生のための加速度の下限値はおおよそ 200gal（震度 v に相当）といわれている。

※1：粘着力（土の強さを表す定数の一つ）、※2：内部摩擦角（土の強さを表す定数の一つ）

降雨により地中内に形成される間隙水圧 u が、崩壊発生の直接の引き金となる。この場合、なんらかの手段で間隙水圧を地中内で発生させないようにするのが対策の一つで、抑制工と呼ばれる地下水排除工などはこの考えに基づく。

地震はその加速度により地盤を揺すり、斜面のゆるみを促すことにより崩壊の発生を引き起こす。降雨とは仕組みが異なることから、地下水排除工は主だった対策とはならない。抑止工と呼ばれるアンカーやロックボルト、法枠など物理的な山腹の抑止力を向上させる工法が求められる。地震規模の予測が難しく、また、地震に脆弱な箇所の特定制も困難であることから、斜面对策において地震を念頭に置いた対策設計がなされる機会は、実務においてはそう多くない。

また、降雨と地震では発生頻度が異なり、崩壊に結びつくレベルの誘因としては地震より降雨が頻回する。近年の気候変動の影響により線状降水帯の形成など、リスクの高い雨の降り方が増えている。

1.2 根系が発揮する表層崩壊防止機能

森林が発揮する表層崩壊防止機能は、主に根系が担うものと理解されている。ここでは、根系が発揮する表層崩壊防止機能についてこれまでの研究成果を要約して記す。

なお、以降の1.2.1～1.2.3の項目立てと、表1.2～表1.4に掲げる文献リストは、森林・自然環境技術教育研究センターが作成した報告書⁷の構成をそのまま使わせていただいた。

1.2.1 垂直根による杭効果と水平根によるネット効果

塚本ら（1984）が根を水平方向と垂下方向に伸長したものに分類し、それぞれの根が発揮する補強効果を定量評価する研究を発表した。塚本以降、垂直根（鉛直根、垂下根という場合もある）と水平根、それぞれに分けて検討する方向に研究が細分化していった。

それまでは垂直根による斜面安定効果が論じられることが多かったが、塚本以降は水平根の働きに着目した研究が増える。白井ら（2006）や今井ら（2008）、木下ら（2013）が水平根の分布を調査し、水平根が斜面安定へ寄与している事が報告されている。

一般に垂直根は不動層と移動層に挟まれたすべり面（せん断域）で『杭効果』を発揮するといわれ、そのメカニズムは図1.3に示すとおりである。根がすべり面（せん断域）で抵抗体として作用し、根が伸長する接線方向の摩擦力とそれに直交する法線方向の締付力増加による摩擦抵抗増加の2種類の補強力となる。

水平根のネット効果については根同士が互いに絡み合い、土塊の動きを抑制する効果といった、やや漠然としたイメージで捉えられていたが、塚本ら（1984）がこれを定量評価するためのアプローチを提案した。その概略を2.2.1で紹介している。

表 1.2 垂直根と水平根に関する研究成果
(文献番号は2章の表2.1記載の番号に対応)

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
81	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)	1-7	1984
160	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	187-190	2006
163	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	269-272	2008
99	スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力の検討	木下篤彦・坂井佑介・大野亮一・田畑三郎・川島正照・山崎孝成	砂防学会誌VOL65-5	11-20	2013
170	模型実験による樹木の根回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	123-126	2015
120	樹木の根の引き抜き抵抗力による表層崩壊防止機能の評価方法に関する研究	掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時	砂防学会誌VOL71-3	3-11	2018

⁷ (公社)森林・自然環境技術教育研究センター、公益的機能発揮のための森林整備のあり方に関する調査研究、令和2年度報告書、令和3年6月、URL: <http://www.jafee.or.jp/plan/files/2021-12-01-koeki-kino-haki-no-shinrin-seibi.pdf>

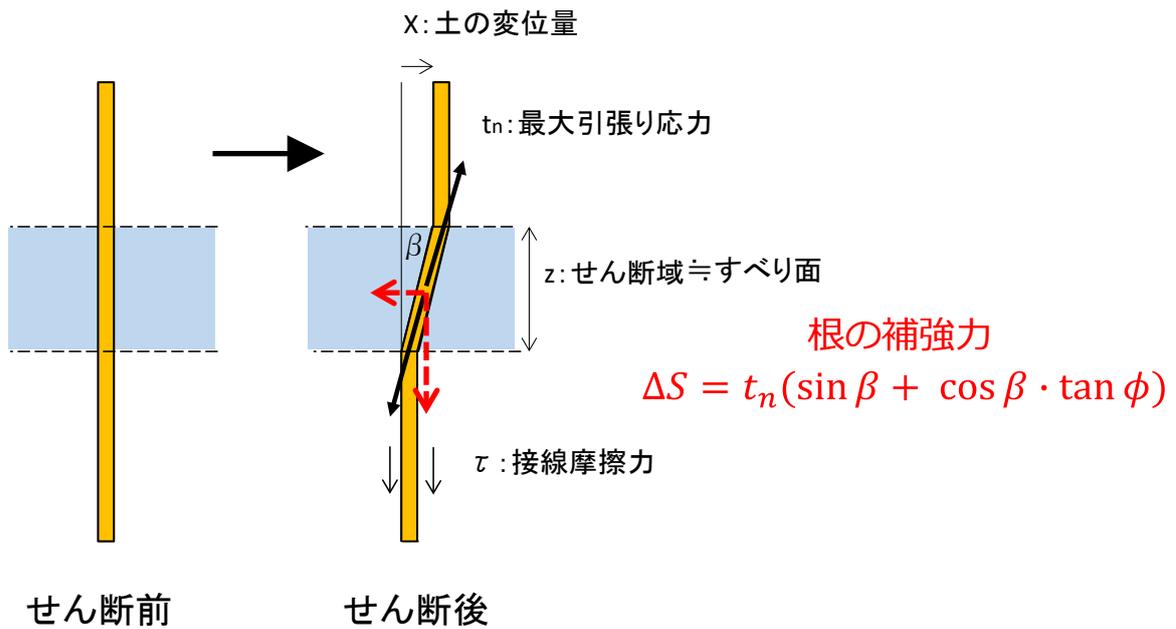


図 1.3 杭効果による根系の補強メカニズム (阿部 2019) ⁸

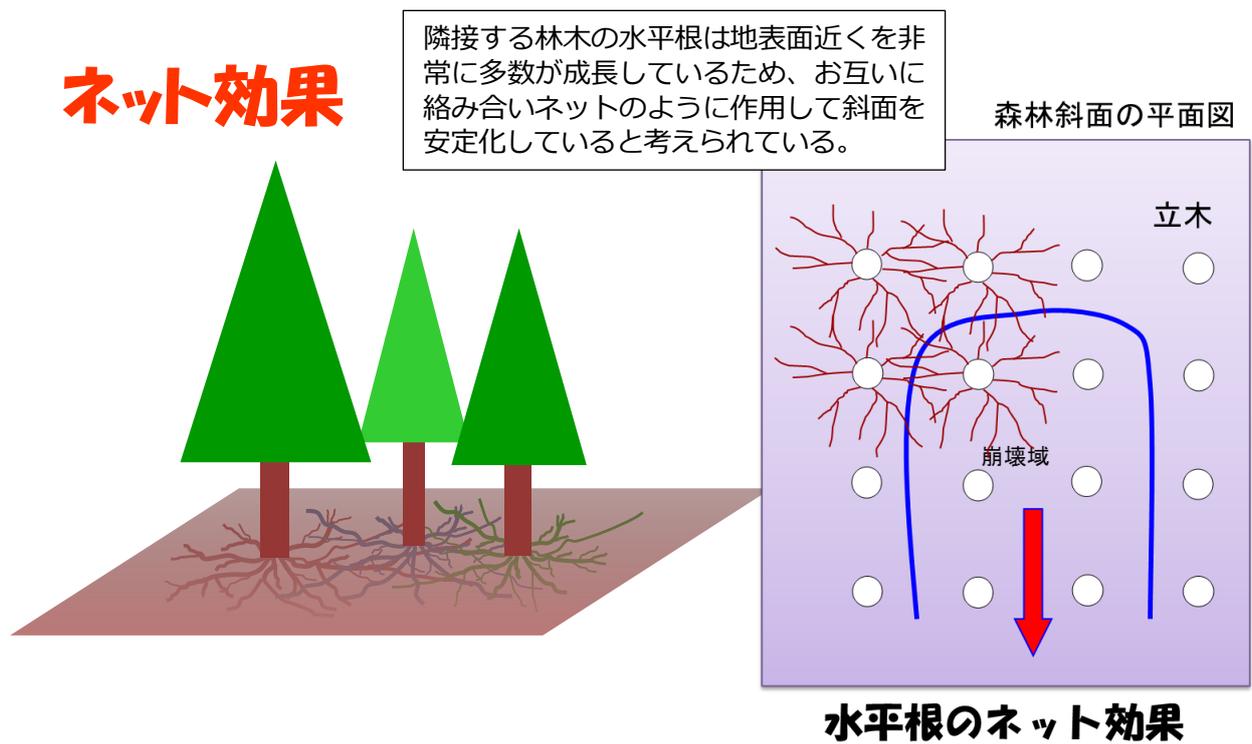


図 1.4 水平根が発揮するネット効果のイメージ (阿部 2019) ⁸

⁸ 阿部和時「豪雨災害でみられる森林が持つ表層崩壊防止機能とそのメカニズムに関する研究動向」GT フレーム工法技術講習会 (2019.6.24) 発表資料

1.2.2 針葉樹と広葉樹

主要造林樹種であるスギ、ヒノキの根系が発揮する抵抗力に関してはこれまでに多くの研究が実施されてきた。一方で広葉樹根系の力学的評価は十分な研究が蓄積されているとはいえない。特に、人工林に広葉樹が侵入し針広混交となった場合の広葉樹根系は考慮されない場合がほとんどで、現時点でその補強効果は未解明といってよい。

広葉樹の根系自体の強さに関する調査は、信州大学の北原研究室が精力的に取り組み、松下ら（2009）がウワミズザクラ、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樹種を対象に断面直径と引き抜き抵抗力の関係を明らかにした。同様に矢下ら（2011）はミズナラ、コナラを、神田ら（2011）はケヤキを対象に調査し、ケヤキは他樹種と比較してかなり高い崩壊防止力が得られることを示した。

また、北海道立林業試験場の佐藤ら（2009）は寒冷地の天然落葉広葉樹林（イタヤカエデ、ミズナラ、シナノキなど）を対象に、せん断面上での根の引き抜き抵抗を推定し、ヤンプ法を用いて斜面の安全率を算出している。

広葉樹に関する崩壊防止力の研究はいまだ調査事例が十分とはいえず、特に混交林での評価をどうするかは課題である。今後、下層林としての広葉樹根系の補強効果をどう評価するのか、特に複層林での崩壊防止力を評価するという視点から重要となってくる。

表 1.3 広葉樹に関する研究成果
(文献番号は2章の表 2.1、表 2.2、表 2.3 記載の番号に対応)

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
56	冷温帯落葉広葉樹林の根系が斜面安定に及ぼす影響	佐藤創・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	砂防学会誌VOL62-4	29-37	2009
173	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	183-186	2009
14	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巻		2011
31	ミズナラ、コナラ天然広葉樹林における崩壊防止機能の評価	矢下誠人・北原曜・小野裕	中部森林研究59	203-206	2011

1.2.3 森林の表層崩壊防止機能の限界

森林の表層崩壊防止機能の有効性は多くの研究により明らかにされているが、当然ながらその機能には限界があり、全ての崩壊に対応できるものではない。

表 1.4 森林の限界に関する研究成果
(文献番号は2章の表 2.1、表 2.2、表 2.3 記載の番号に対応)

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
15	森林根系の崩壊防止機能	北原曜	水利科学No.311	11-37	2010

北原（2010）は、森林根系の崩壊防止機能を明らかにすることは、とりもなおさず限界を知ることであり、この機能には限界があることは崩壊が現に起きていることから予想がつくが、では果たして限界の値はいったいどのくらいかという点は明らかにされていないと言及している。

p I-2 ページで紹介した治山技術基準においては、「深層崩壊に対して樹木根系の影響は直接的にはない」、と明記されている。深層崩壊と根系についてのこうした理解は一般にも浸透している。一方で、深さが1～2m程度の崩壊は深層崩壊ではなく、表層崩壊に分類される。表層崩壊全てに根系が有効かといえば、平成25年の伊豆大島で発生した崩壊を見ると、そうもいえないことが分かる。伊豆大島の表層崩壊に関する報告⁹を以下に引用するが、伊豆大島の場合は、根系が基盤内に侵入し土層の引き留め効果を発揮できたかという点、非常に厳しい条件であったといわざるをえない。

■平成25年伊豆大島で発生した崩壊の概要（曾根ら2015⁹より引用）

- ・深度1m程度の表層崩壊で、レス層上面をすべり面とする。
- ・植生はハチジョウイヌツゲ、ヒサカキなどの常緑樹やオオバヤシャブシなどの落葉樹が優占
- ・樹木根系は火山砂層中のみには伸長しているものがほとんどで、レス層にまでは伸長していない。
- ・そのため、今回の表層崩壊に対しては緊縛効果がほとんど発揮されなかった。
- ・防災機能を高める群落を形成するには、直根を伸ばす方法、適正な樹種選定、生育基盤の確保が重要



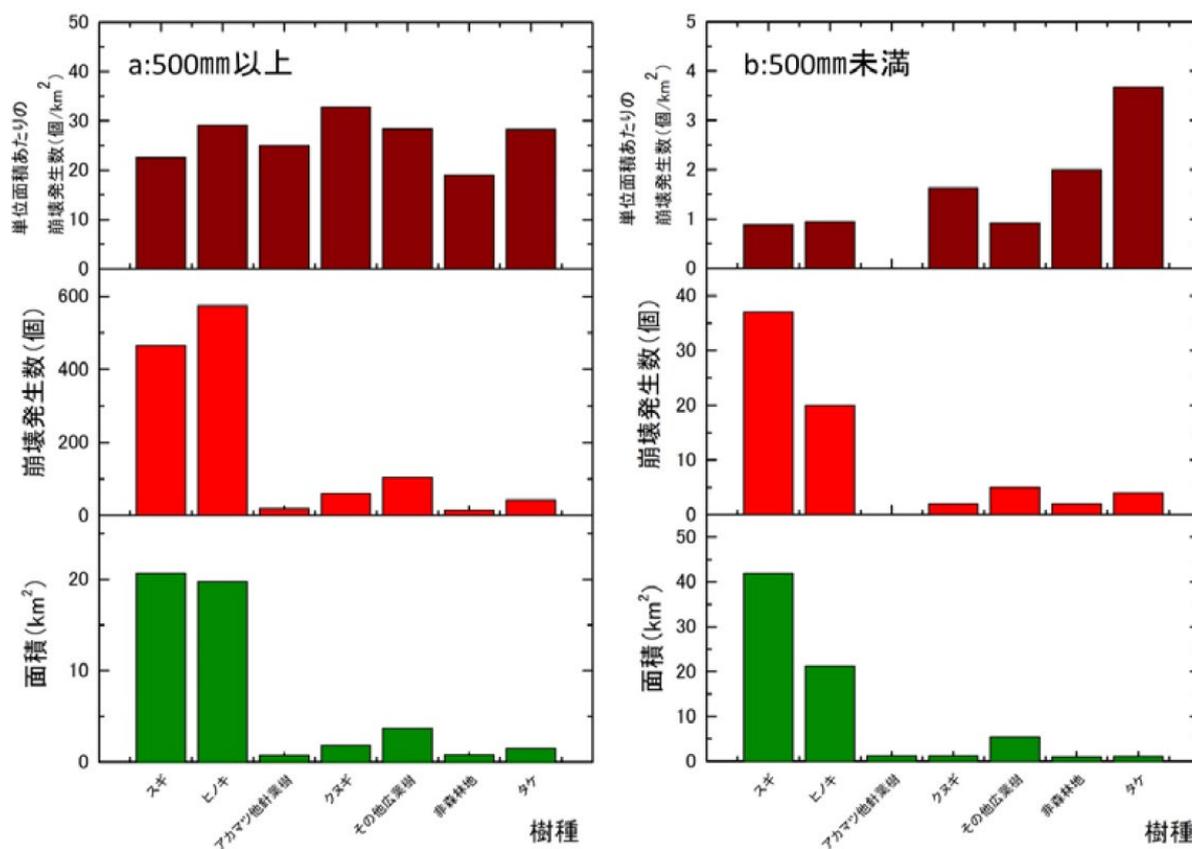
写真：伊豆大島の斜面崩壊地と、それに隣接する森林

⁹ 曾根好徳・飛田健二・寺田悠祐・上野将司・浅見和弘・野並賢・沖津二郎・矢部満（2015）：平成25年台風第26号による伊豆大島火山山麓における表層崩壊の発生機構、応用地質技術年報、34、p.1-22.

また、平成 29 年九州北部豪雨、平成 30 年 7 月豪雨では、森林が存在する多くの斜面で崩壊が発生し、一定規模以上の豪雨時には森林による崩壊防止機能では崩壊を抑止できないことが分かった。

図 1.5 は、村上 2018¹⁰ が平成 29 年九州北部豪雨の雨量データと崩壊面積率を解析したもので、雨量が 500mm 未満と 500mm 以上の地域を比較している。植生の種別等に関係なく、雨量が 500mm を超えた地域では崩壊が多数発生していて、村上は「500mm 以上の降雨のエリアでは森林、非森林地に関係なく、崩壊が発生したことが示された」と推定している。この事例では森林による表層崩壊防止機能の限界は雨量 500mm 付近がしきい値であったとすることができる。

森林の限界となる雨量は、地域や環境によって変化すると考えられ、雨慣れしている地域はより高く、そうでない地域はより小さい雨量になると推測される。いずれ、森林による表層崩壊防止機能を議論するときは、必ず限界があるという点に留意しておかねばならない。



a : レーダー解析降水量の 12 時間積算値が 500 mm 以上のエリア

b : レーダー解析降水量の 12 時間積算値が 500 mm 未満のエリア

図 1.5 樹種ごとの存在面積と崩壊発生数および単位面積当たりの崩壊発生数 (村上 2018)¹⁰

¹⁰ 村上亘・鶴崎幸・安田幸生・大丸裕武 (2018) : 2017 年 7 月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布および植生状況との関係について、防災科学技術研究所研究資料第 418 号、2018 年 3 月、p.131-134.

1.3 根系調査事例の紹介

根系調査はこれまでに多くの箇所を実施・報告されているが、地味で手間のかかる調査である。実際の根系調査はどのように行い、こういったデータが得られるのか、最近の事例から一つ紹介する。

(1) 調査箇所

平成 30 年 12 月 11 日～12 日にかけて日本放送協会が千葉県富津市において大規模な山腹崩壊実験を実施した。また、実験後の崩壊面に破断した根系が残存している可能性があり、新しい地質地帯（第四紀更新世）ではこれまで根系等の調査が行われた事例もほとんどないことから、貴重な根系データの事例を収集し、表層崩壊と根系の関係を検討する材料とすることを目的として、実験後の根系等データを収集・整理する調査を行った。

- 崩壊実験：平成 30 年 12 月 11 日～12 日
- 崩壊実験の実施者：日本放送協会
- 根系調査の実施者：林野庁治山課
- 箇所：千葉県富津市小久保地内（図 1.6）
- 地形：標高 30～40m 付近、傾斜 40° 程度、小起伏
- 地質：第四紀更新世泥岩
- 植生：カシ・ナラ等広葉樹疎林、シノダケ密生



図 1.6 現地崩壊実験（千葉県富津市）位置図



写真 1.1 崩壊前後の状況



写真 1.2 崩壊地の崩壊面と滑落崖（千葉県富津市）

(2) 根系調査

(i) 崩壊面における根系調査

崩壊後、崩壊面に多数の根系が残存していたため、時間が余り経過しない早い時期に根系調査を実施した。崩壊面に 1m 四方の調査ブロックを設置し（写真 1.3）、縦に 10 個のブロックを連続させてラインを設定した。このラインを崩壊面内に 2 列設定した（図 1.7）。すなわち、1m 四方の調査ブロックを全部で 20 個設置して各ブロック内に出現している根系を計測した。

計測項目は、ブロック内の根の位置、根の長さ、根の径とした。ブロック内の位置は、各ブロックの左下角を原点として XY 座標値をコンベックスで測定して cm 単位で求めた。根の長さは、崩壊面に露出している根の地際から先端までの長さをコンベックスにより cm 単位で測定した。根の径は、崩壊面に露出している根の地際及び先端の直径をノギスにより mm 単位で求めた（写真 1.4）。

計測の結果、出現していた根の総数は 87 本、平均 4.35 本/m²、長さは平均 37 cm/本、直径は平均 3.2 mm/本であった。20 個の調査ブロック内の根の分布状況は図 1.8 のとおりである。

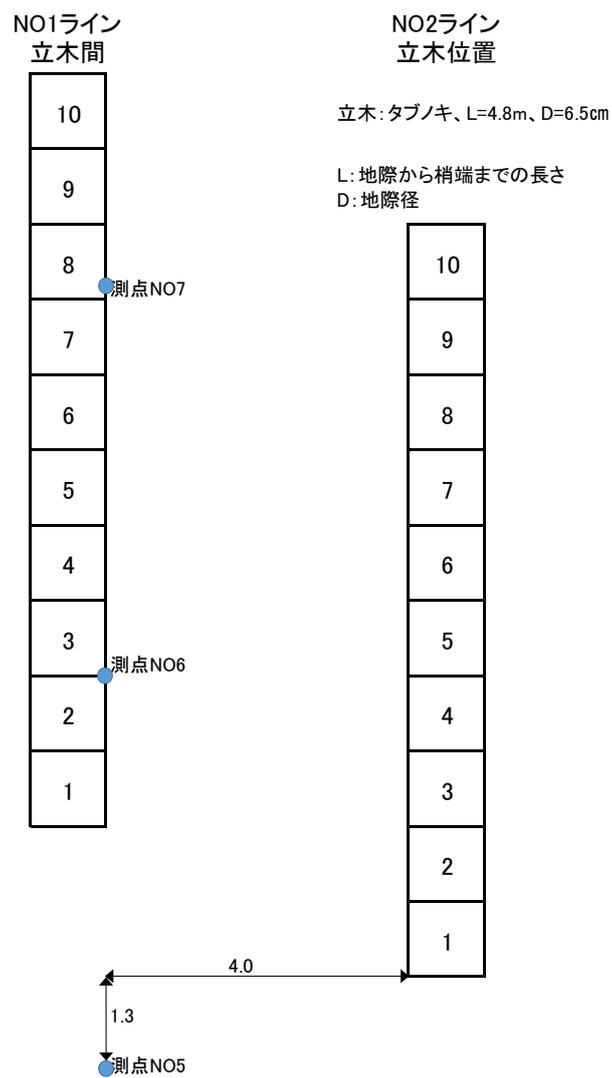


図 1.7 調査ブロックの配置



写真 1.3 崩壊面の調査ブロック



写真 1.4 根の径の計測

(ii) 滑落崖における根系調査

現地での根系重量を把握するため、根系を土壌ごと乱さない状態で採取した。採取箇所は滑落崖の立木位置と立木間中央の2か所とし、サンプルの大きさ $0.5 \times 0.4 \times$ 崩壊深 (m) とした。なお、立木は長さ 4.8m、根元径 6.5 cm のタブノキであった。採取したサンプルは木箱に収納し、移送後室内で計測した。



写真 1.5 滑落崖での採取



写真 1.7 滑落崖で採取したサンプル



写真 1.6 木箱への収納



写真 1.8 木箱の保管

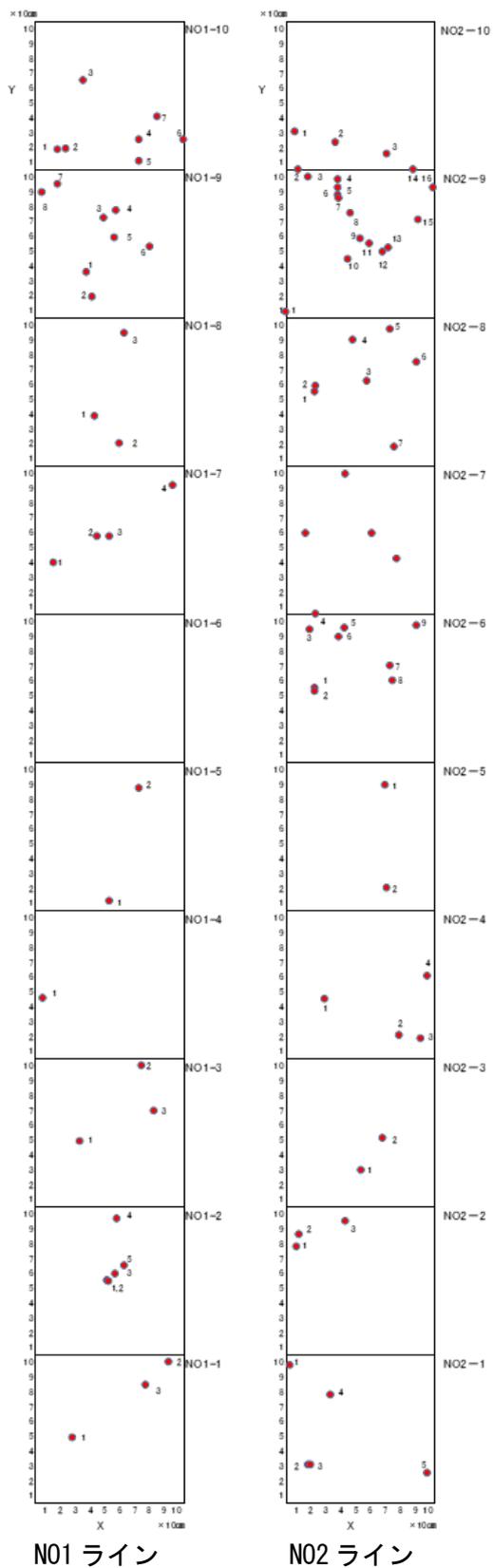
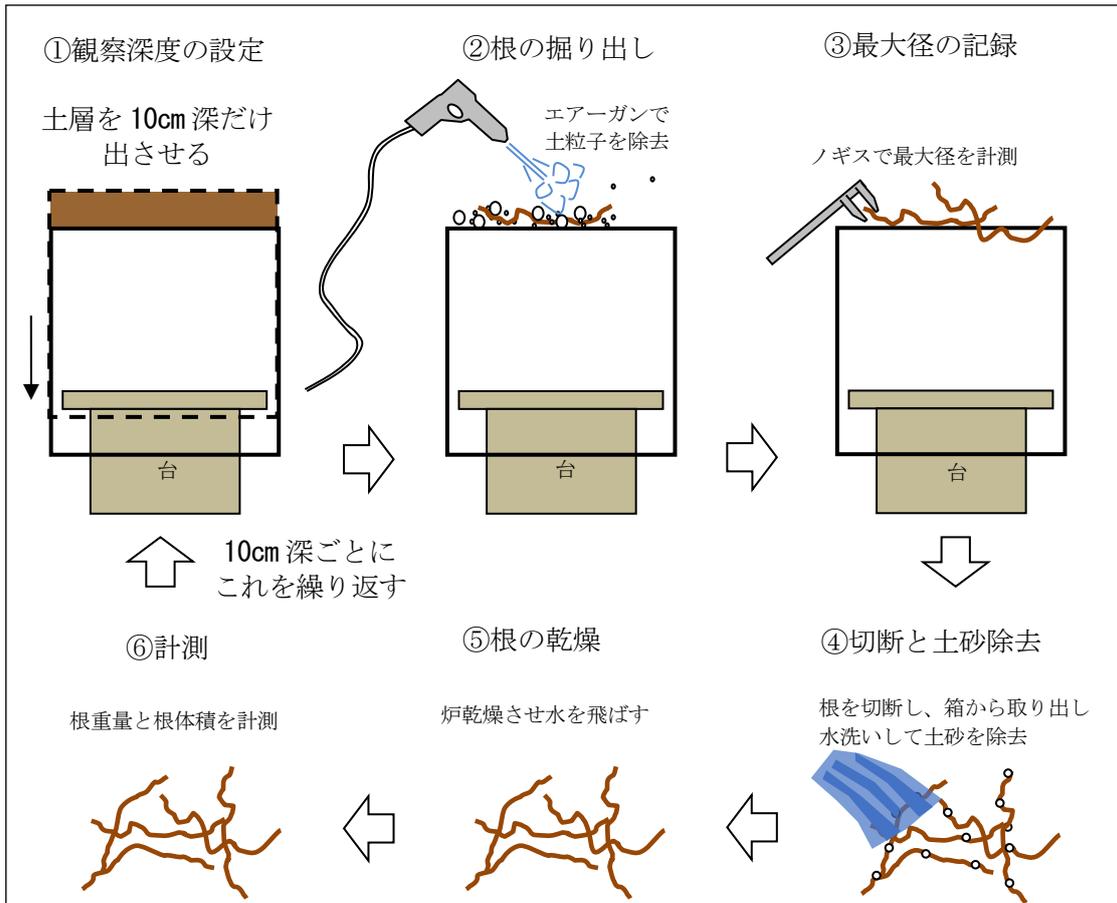


図 1.8 根の分布状況

(3) 根量の計測

採取された土壌サンプルを移送し、室内作業にて深度別の根系量を計測した。



最大直径の測定



10cm層から採取された根



根体積の測定



乾燥前の前処理



炉乾燥



根乾燥重量の測定

図 1.9 根量計測のながれ

(4) 調査結果

立木位置（樹種タブノキ）と立木間中央で採取された2つの土壌サンプルについて、10cm 深度ごとに根本数、根体積、根重量、根径最大値を計測した。供試箱が幅 0.5m、奥行 0.4m、10cm 深度計測のため、 $0.5\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.1\text{m} = 0.02\text{m}^3$ 単位での計測値となる。結果を図 1.10 にまとめた。

図 1.10 から、根の本数は立木位置及び立木間中央で大きくは変わらない（深深度になると立木間中央が少なくなる傾向となる）が、根体積と根重量、根径最大値を見ると、立木間中央の計測値は著しく小さい。根体積及び根重量では、立木間中央は立木位置に比べ 1/10～1/30であり、これまでの研究において指摘された結果と重なる。ただし、今回の計測では立木位置ではタブノキ 1 本の根株がそのまま箱内に収まっており、この根体積、根重量が計測されている影響を考慮する必要がある。

なお、既往研究で深度方向に根の分布を計測した結果（図 1.12.a～図 1.12.d）と比較する。おおむね今回取得されたデータと深度方向の分布形状は似ている。図 1.12.a 掛谷の根系材積データ（浅深度で $10,000 \sim 12,000 \text{ cm}^3$ ）と比較すると、今回のデータは 1 オーダー小さい（ $1,000\text{cm}^3$ 程度）が、 $0.5\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.1\text{m}$ の方形範囲に対し、掛谷の計測値は単木まるごとが対象であり、絶対量の比較はすべきではなく、分布の傾向を参考とする。

深度方向に根の分布を調査した既往の研究事例はいずれも単木での体積計測例が多い。2008 年から 2012 年頃にかけて信州大学の北原研究室が、立木間中央断面で根系分布調査を実施し、中部森林研究に多数発表している（例えば図 1.12.b）。ただし、信州大学の調査は立木間中央断面における鉛直面 1m^2 当たりの根本数又は、根断面積合計で、根体積（材積）の計測ではなく、これも直接比較できるデータではない。図 1.12.b の分布性状を比べて見ると、信州大学の根本数鉛直分布と今回取得されたデータはやはり似た傾向を示している。根の分布は、深深度ほど少なく、立木間中央ほど少ない。すなわち樹幹位置から遠ざかるほど根量は少なくなる、という結果が得られている。

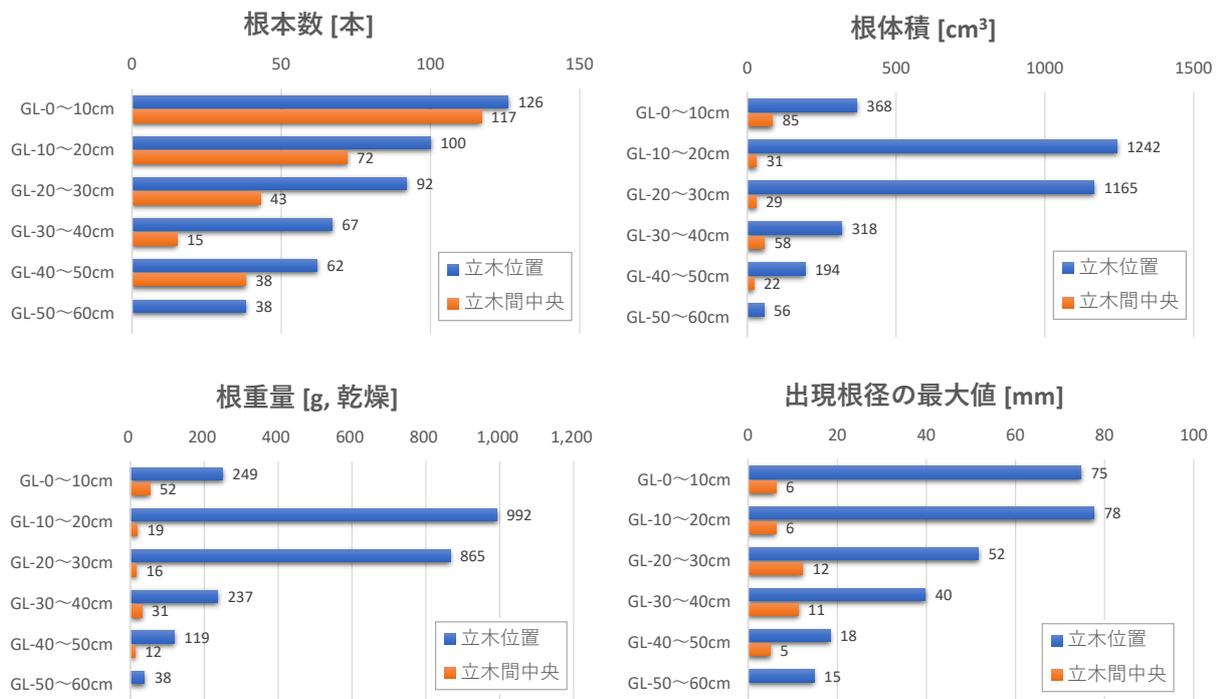


図 1.10 10cm 深度別の根量計測結果（土壌 $0.5\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.1\text{m} = 0.02\text{m}^3$ 当たりの根）

GL-0~10cm (立木位置)



GL-0~10cm (立木間中央)



GL-10~20cm (立木位置)



GL-10~20cm (立木間中央)



GL-20~30cm (立木位置)



GL-20~30cm (立木間中央)



GL-30~40cm (立木位置)



GL-30~40cm (立木間中央)



GL-40~50cm (立木位置)



GL-40~50cm (立木間中央)



写真 1.9 立木位置 (左) と立木間中央 (右) で採取された根 (10cm 深度ごと)

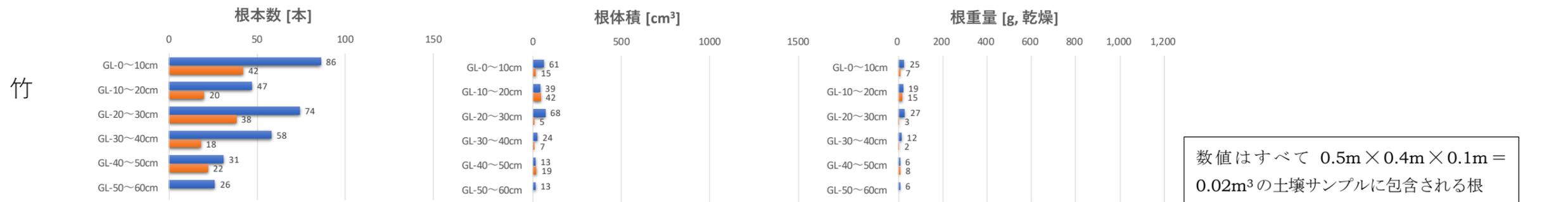
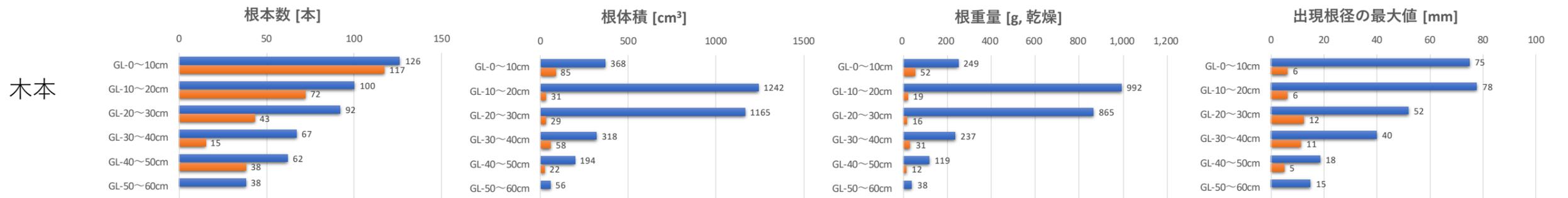
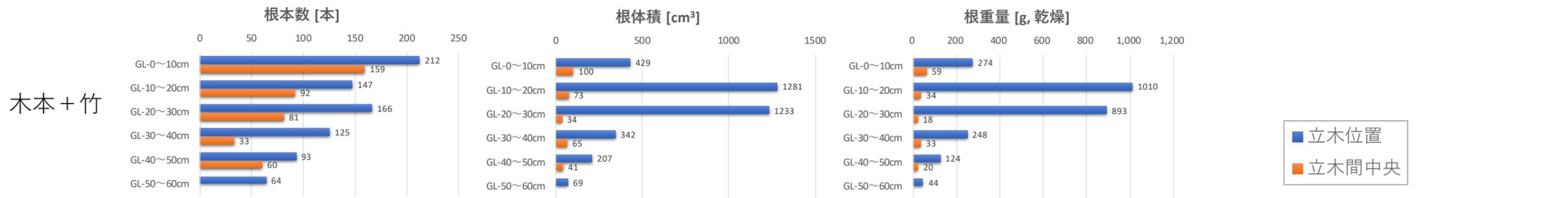
立木位置での計測結果

No.	分類	土壌深度 (cm)	根数量 (本)	内訳		根体積 (ml)	内訳		根絶乾重量 (g)	内訳	
				竹	木		竹	木		竹	木
2	立木位置	GL-10~20cm	147	47	100	1281	39	1242	1010	18.5	991.8
3	立木位置	GL-20~30cm	166	74	92	1233	68	1165	893	27.3	865.4
4	立木位置	GL-30~40cm	125	58	67	342	24	318	248	11.7	236.5
5	立木位置	GL-40~50cm	93	31	62	207	13	194	124	5.7	118.7
6	立木位置	GL-50~60cm	64	26	38	69	13	56	44	6.2	38.2

立木樹種：タブノキ

立木間中央での計測結果

No.	分類	土壌深度 (cm)	根数量 (本)	内訳		根体積 (ml)	内訳		根絶乾重量 (g)	内訳	
				竹	木		竹	木		竹	木
2	立木間中央	GL-10~20cm	92	20	72	73	42	31	33.9	15.2	18.7
3	立木間中央	GL-20~30cm	81	38	43	34	5	29	18.3	2.7	15.6
4	立木間中央	GL-30~40cm	33	18	15	65	7	58	33.0	2.2	30.8
5	立木間中央	GL-40~50cm	60	22	38	41	19	22	20.2	7.8	12.4



数値はすべて 0.5m × 0.4m × 0.1m = 0.02m³の土壌サンプルに包含される根

図 1.11 10cm 深度別の根量計測結果

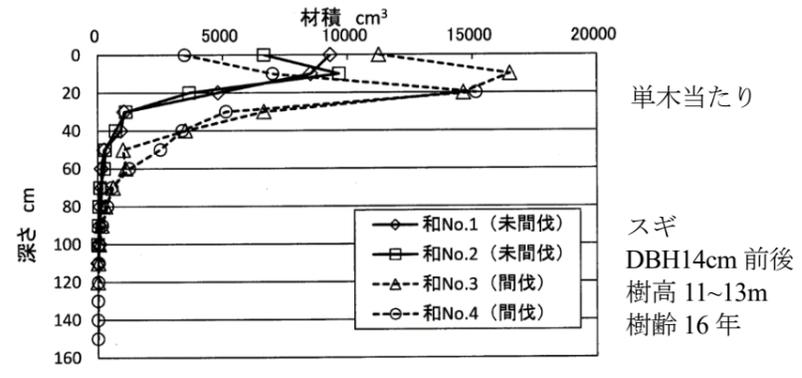


図 1.12.a 深さ方向への根系材積分布 (和歌山) (掛谷ら 2016、表 2.1 の 13)

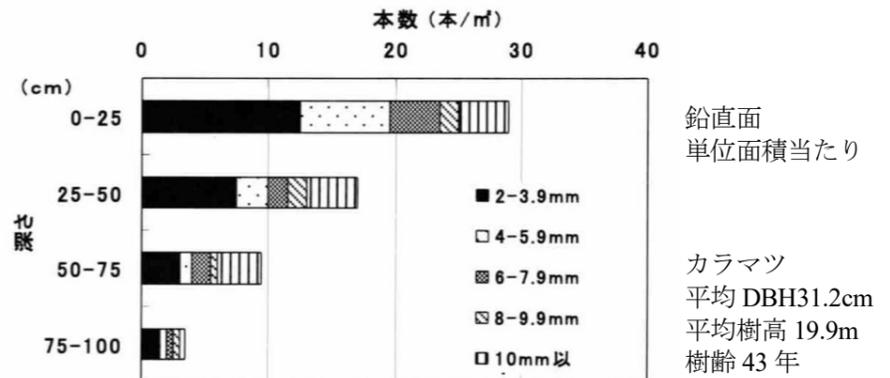
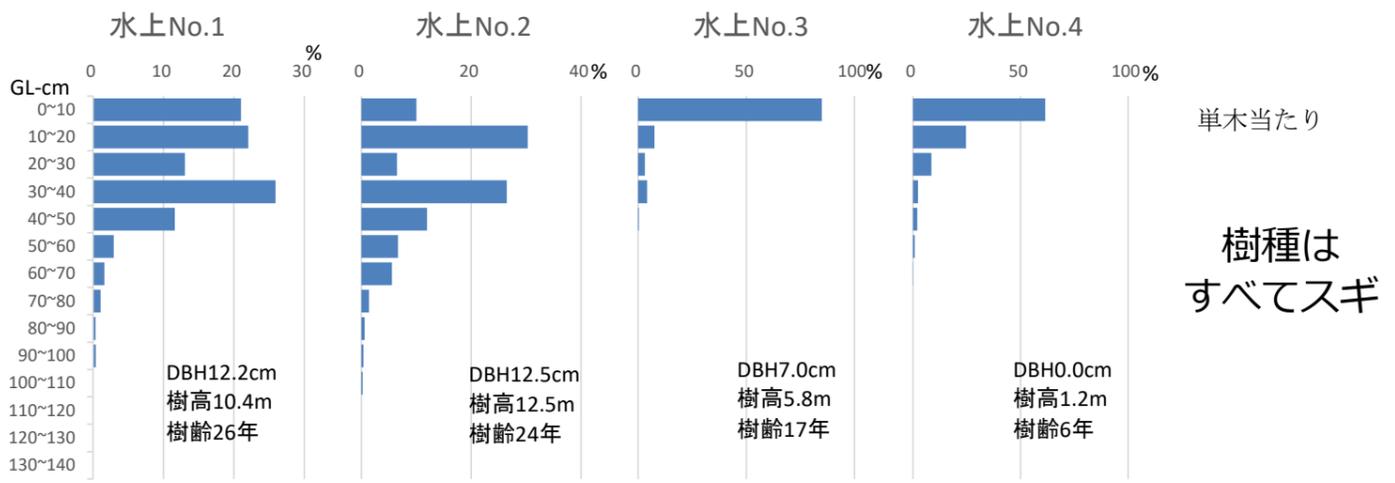


図 1.12.b 立木間中央断面で計測した根本数の深度方向分布 (伴ら 2009、表 2.1 の 164)

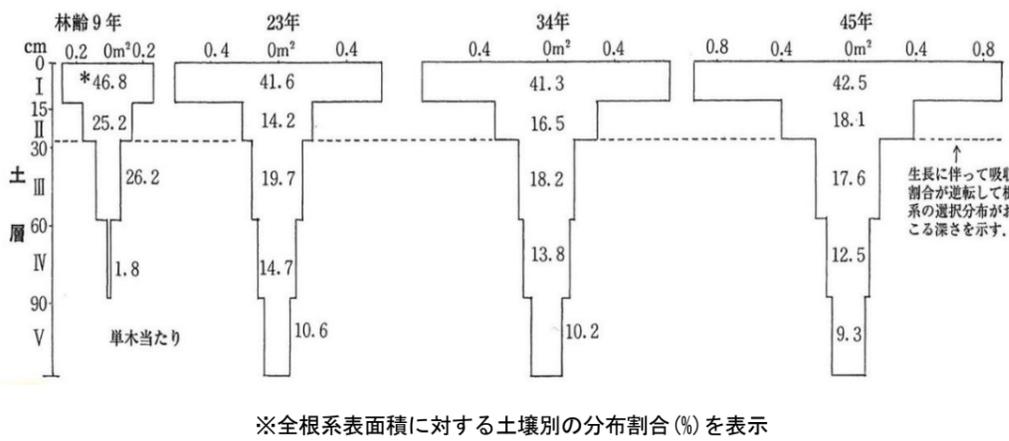
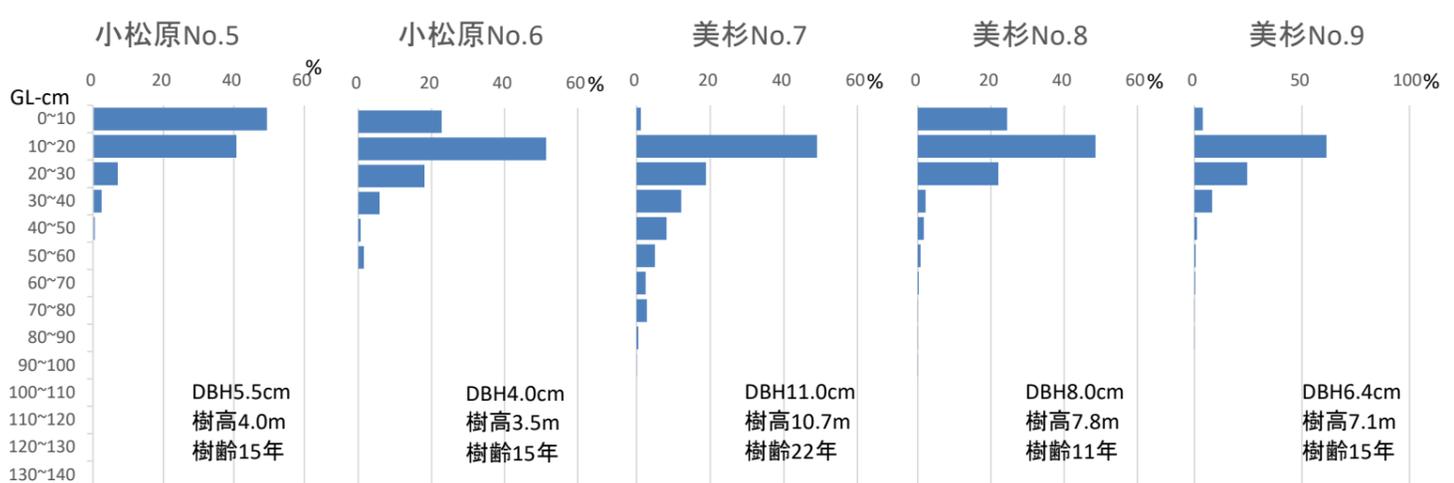


図 1.12.c スギの生長に伴う吸収構造の変化 (8本の調査木の平均値、苅住昇 1979)

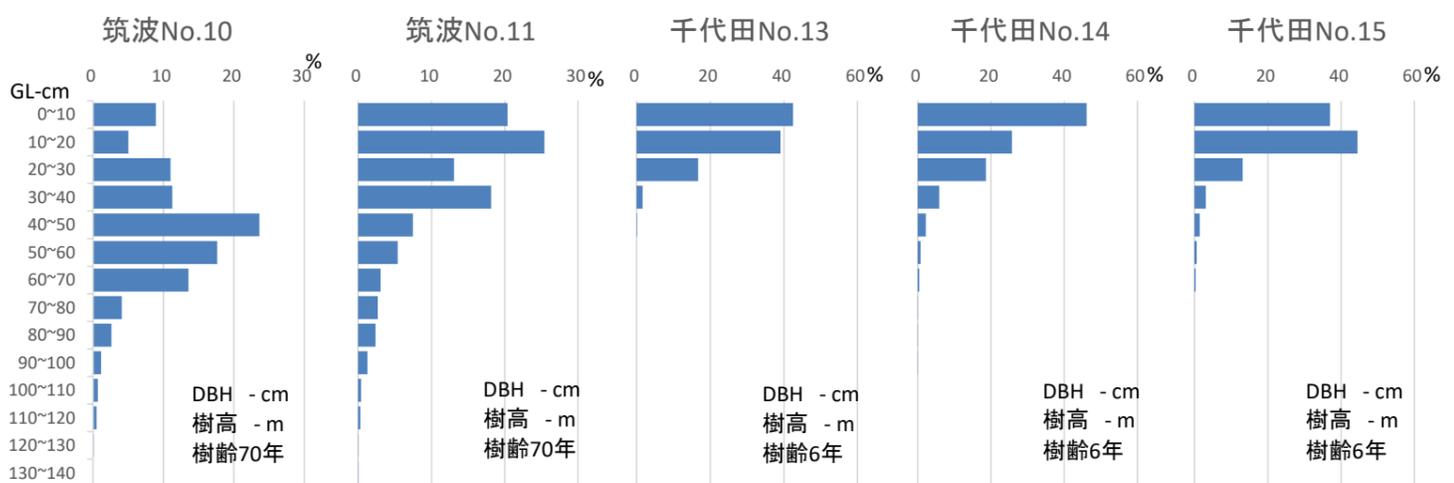


図 1.12.d 10cm厚土層ごとに測定した単木の根の体積率 (阿部 1997 (表 2.1 の 1) のデータを基に作図)

2. 樹木根系に関する研究

2.1 根系の発達・成長

根系の発達・成長に伴う変化について、既往の研究を紹介する。

(1) 根系の時系列成長

根系調査に関しては苧住¹が顕著な業績を残している。

図 2.1、図 2.2 に苧住の調査結果を引用する。

苧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。

『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見られるが、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。』

同じく苧住は、ヒノキについて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。』

(2) 幼齢段階～若齢段階の発達特性

図 2.3 は、スギ苗木を高密度に植栽した結果である。

幼齢期のスギ苗木は植栽後、主根と側根の発達が明瞭であり、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受け、水平方向へ根系を展開する傾向が認められる。

(3) 斜面安定に寄与する根系の形成

(1)(2)で見られるように、スギは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たる4～5本が肥大生長し、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 2.2 に示したとおり、深部まで大径根が形成されていないと、スギの場合、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、根系が肥大しても、樹体を支持し斜面を安定させうる健全な根系を形成することが難しくなる可能性がある。

一方、ヒノキはもともと浅根性樹種であり、第1層に細根とともに太根も発達させる傾向にある。

¹ 苧住昇(2010)最新樹木根系図説総論.誠文堂新光社.P351

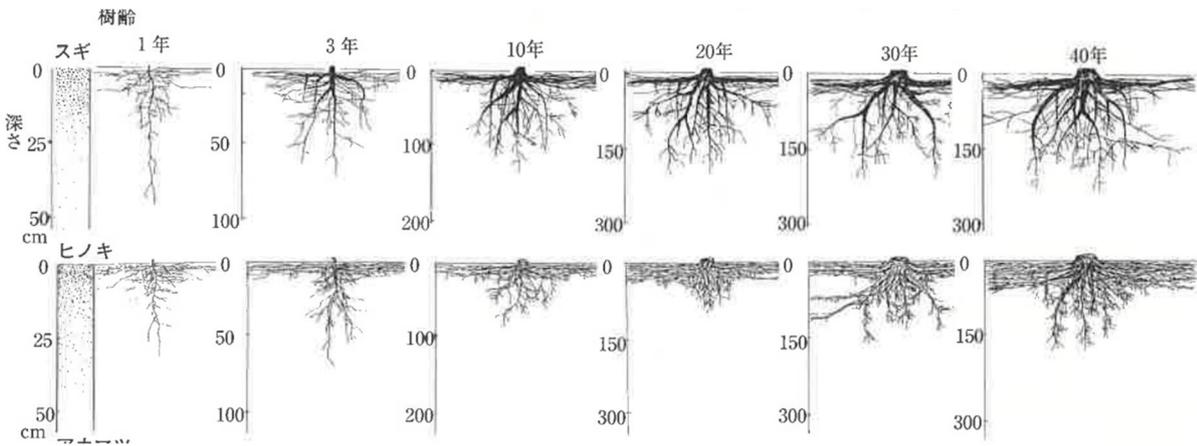


図 2.1 主要造林樹種（スギ及びヒノキ）の生長に伴う根系の形態の変化²

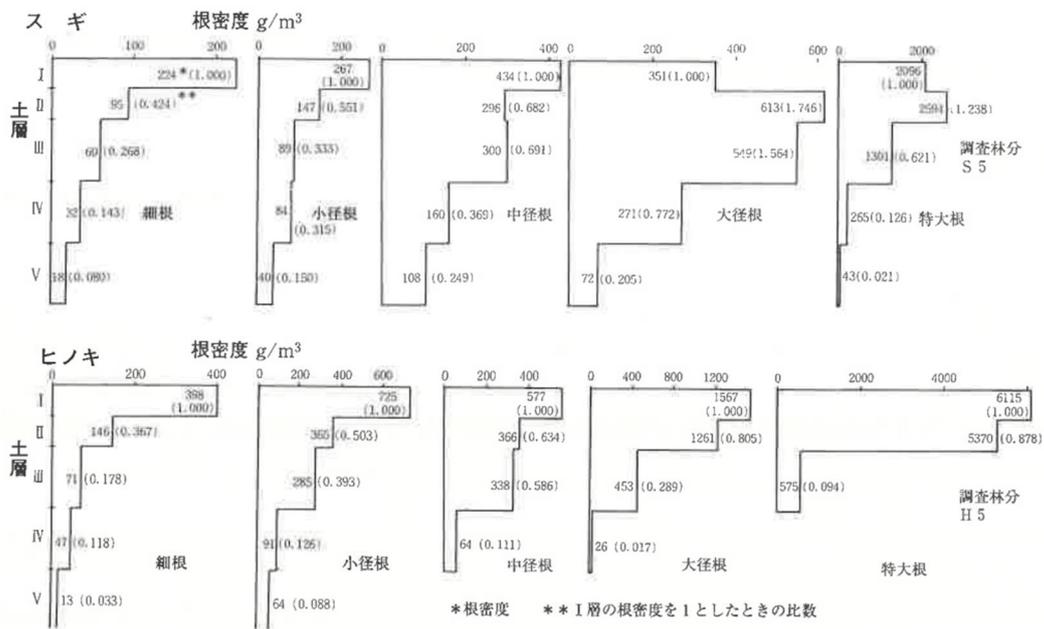


図 2.2 30～40 年生の林分における各根系区分の根密度 (g/m^3) の垂直変化³

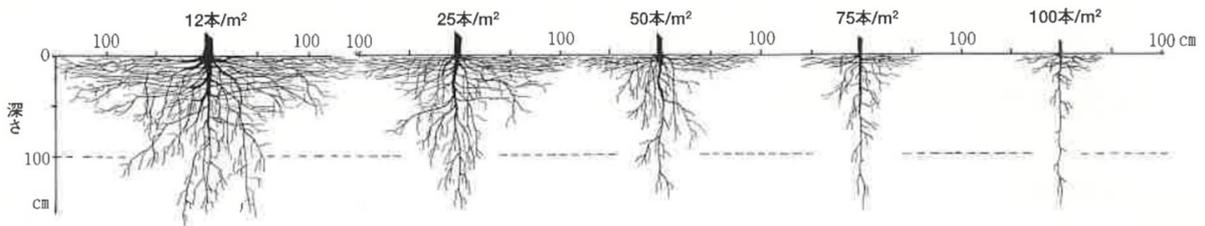


図 2.3 スギの成長に伴う吸収構造の変化⁴

² 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論.誠文堂新光社.P711
³ 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論.誠文堂新光社.P350
⁴ 苅住昇(2010)最新樹木根系図説総論.誠文堂新光社.P437

2.2 これまでの根系と崩壊に関わる研究

1990年以降に国内外で発表された崩壊と樹木根系に関する研究を収集した。

収集リストを表 2.1、表 2.2に示す。

樹木根系と崩壊に関する研究は収集リストのように数多い。

その中でも全体の研究の流がれを作ったキーとなる研究がある。ここでは、キーとなった研究者として次の3人を挙げる。

3人の研究は互いの時期が重なることなく、それまでの根系と崩壊に関する研究の流れを引き継ぎながら、先人が手をつけていなかった部分を深掘りする形で研究が深化されていった。個々の研究内容について概略を以下に説明する。

日本における根系と崩壊に関する研究の流れを作った代表的な3人の研究者

塚本良則	文献番号 81, 83	1984～1987
阿部和時	文献番号 1～4	1997～2006
北原曜	文献番号 151～179	2006～2015

表 2.1 収集文献 (根系と崩壊の関係：国内文献)

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載ページ	発行年
1	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第373号	105-181	1997
2	樹木根系の斜面崩壊防止機能	阿部和時	森林科学22	23-29	1998
3	間伐が森林の持つ表層崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発	阿部和時・黒川潮・竹内美次	日本地すべり学会誌41巻3号	225-235	2004
4	森林の持つ斜面崩壊防止機能	阿部和時	日本緑化学会誌31(3)	330-337	2006
5	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	6-11	2014
6	樹木根系の斜面崩壊抑制効果に関する調査研究	今井久	ハザマ研究年報	34-52	2008
7	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巻		2008
11	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・森田	第124回日本森林学会大会発表データペ		2013
12	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	関東森林研究65-2		2014
13	スギ林分の間伐が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響	掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣	日本緑化学会誌42(2)	299-307	2016
14	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巻		2011
15	森林根系の崩壊防止機能	北原曜	水利科学No.311	11-37	2010
16	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	木下篤彦	治山55巻5号	28-35	2010
18	分布型表層崩壊モデルによる樹木根系の崩壊防止機能の定量的評価につ	執印康裕・鶴見和樹・松英惠吾・有賀一広・田	日本緑化学会誌35(1)	9-14	2009
27	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巻		2009
29	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巻		2010
3	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(3	阿部和時・岩元賢	日誌誌67(12)	505-510	1986
35	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	阿部和時・岩元賢	日誌誌72(5)	375-387	1990
36	原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究	阿部和時	日本緑化学会誌22(2)	95-108	1996
38	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)	1-9	1984
39	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	2-21	2009
44	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No.64	98-101	2011
45	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No.63	25-28	2010
46	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)	49-55	2010
50	樹木の斜面安定効果	駒村富士弥・渡辺武夫	日誌誌59(9)	338-340	1977
55	原位置一面剪断試験による樹木根系の崩壊抵抗力と引き抜き抵抗力の比	佐藤創一・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	砂防学会誌VOL66-4	15-20	2013
56	冷温帯落葉広葉樹林の根系が斜面安定に及ぼす影響	佐藤創一・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	砂防学会誌VOL62-4	29-37	2009
58	表層崩壊と森林	佐藤創一	森林科学47	22-27	2006
60	異なる土壌環境下における根系構造と引き抜き抵抗力の関係	山瀬敬太郎・谷川東子・池野英利・藤堂千景	日本緑化学会誌41(2)	301-307	2015
61	低木樹種2種の根系による崩壊防止力の検討	山瀬敬太郎・藤堂千景・平野泰弘	日本緑化学会誌41(1)	15-20	2015
62	土壌水分変化が斜面崩壊防止における根系の土質強度補強効果に与える影	執印康裕・加藤尚子・鈴木雅一・太田猛彦	砂防学会誌VOL51-1	23-30	1998
64	植生が表層崩壊に与える影響について	執印康裕	砂防学会誌VOL55-1	71-78	2002
69	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
72	樹木根系の根張り抵抗力の理論的算定法	正野光範・中村浩之・池田浩子	砂防学会誌VOL50-5	3-11	1998
73	河口凹谷における水分環境・林相と災害発生との関係について	清水靖久・向山繁幸・戸田肇一郎	砂防学会誌VOL61-6	43-53	2009
81	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)	1-7	1984
83	樹木の根系の斜面安定効果-主として水平根の量と動きについて-	塚本良則・峰松浩彦・藤波武史	緑化工技術 12-(1)	11-20	1986
87	樹木根系による斜面崩壊防止機能	鳥田宏行・佐藤創一	道総研季報128	1-3	2009
88	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	日本緑化学会誌41(2)	308-314	2015
89	治山用緑化樹種の根系強度について	陶山正憲・原敬男	緑化工技術 13-(2)	19-23	1988
91	樹種の違いによる樹木根系の引張り強度特性	福田耕司・大塚泰洋・杉山太宏・赤石勝	土木学会第57回学術講演会	29-30	2002
92	樹木根系の存在が森林土壌中の水分移動に与える影響	平松晋也・鹿沢至朗	砂防学会誌VOL55-4	12-22	2002
99	スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力の検討	木下篤彦・坂井佑介・大野亮一・田畑三郎・川	砂防学会誌VOL65-5	11-20	2013
100	樹木根系の水平根が発揮する断面抵抗力の計算モデル	木下篤彦・坂井佑介・大野亮一・田畑三郎・川	砂防学会誌VOL65-5	35-40	2013
101	樹幹引き倒しによる根張りの発生機構	野々田篤郎・林地郎・川邊洋・本多潔・小藪一	日誌誌78(4)	390-397	1996
102	根系の引張り強度と曲げ強度から推定した樹木根系の斜面安定効果	野々田篤郎・林地郎・川邊洋	日誌誌75(5)	456-461	1994
113	災害に強い森林整備	北沢沢司			
120	樹木の根の引き抜き抵抗力による表層崩壊防止機能の評価方法に関する	掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣	砂防学会誌VOL71-3	3-11	2018
135	根系の引き抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定	阿部和時	日本緑化学会誌16(4)	37-45	1991
144	2010年広島県庄原市豪雨災害で発生した斜面崩壊と地形・森林の関係(第	黒川潮・岡田康彦	砂防学会誌VOL67-3	14-21	2014
145	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)	455-463	2016
147	森林管理と表層崩壊発生との関係について	執印康裕・鶴見和樹・松英惠吾・有賀一広・田坂	SABO Vol.98	2-7	2009
148	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			
151	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	199-202	2011
152	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	195-198	2011
153	ミズナラ・コナラ天然広葉樹林における崩壊防止機能の評価	矢下誠人・北原曜・小野裕	中部森林研究59	203-206	2011
154	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	123-126	2007
155	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	127-130	2007
156	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	117-120	2012
157	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	9-12	2013
158	広葉樹天然林における根系による崩壊防止力分布	阿辻雅言・北原曜・小野裕	中部森林研究62	99-102	2014
159	表層崩壊に及ぼすカラマツ根系の引き抜き抵抗力に関する力学的評価	久保田遼・北原曜・小野裕	中部森林研究54	191-193	2006
160	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	187-190	2006
161	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	183-186	2006
162	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	13-16	2013
163	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	269-272	2008
164	間伐がカラマツ根系の崩壊防止機能に及ぼす影響	伴博史・北原曜・小野裕	中部森林研究57	179-182	2009
165	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	183-186	2010
166	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	179-182	2010
167	立木引き倒し試験による森林の土砂崩壊防止機能の力学的評価	深見悠矢・北原曜・小野裕	中部森林研究56	283-285	2008
168	愛知県伊良湖岬におけるカラマツ引き倒し試験	宮田賢・北原曜・小野裕	中部森林研究61	1-4	2013
169	アカマツの引き倒し抵抗力と模型実験による根張りメカニズム	高橋悠介・北原曜・小野裕・小野圭	中部森林研究62	91-93	2014
170	模型実験による樹木の根張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	123-126	2015
171	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	5-8	2013
172	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	191-194	2009
173	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り強度の関係	松下翔太・小野裕・北原曜	中部森林研究57	183-186	2009
174	飽和条件下におけるヒノキ根系の引き抜き抵抗力	岩本祐・北原曜・小野裕	中部森林研究57	187-190	2009
175	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	175-178	2009
176	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	中部森林研究57	195-198	2009
177	根系断面の顕微鏡画像を用いた引き抜き抵抗力の推定	岡田希・北原曜・小野裕	中部森林研究60	125-128	2012
178	常緑広葉樹を主とする生根の引張り強度試験	若杉祐希・北原曜・小野裕	中部森林研究60	129-132	2012
179	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	87-90	2014

凡例

- 引き抜き抵抗力と崩壊防止機能
- 引き倒し抵抗力と土砂緩衝機能
- 研究成果の整理・まとめ・解説等

表 2.2 収集文献（根系と崩壊の関係：海外文献）

番号	論文名	著者名	ひらがな	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
3001	Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles	M. Schwarz, D. Cohen, and D. Or		JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115	1-19	2010
3002	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	285-291	2010
3003	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	354-367	2010
3004	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 Volume 276	1-7	2017
3005	Long-term modelling of landslides for different forest management practices	Amod S. Dhakal, Roy C. Sidle		Earth Surface Processes and Landforms / Volume 28, Issue 8	853-868	2003
3006	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 / Volume 33, Issue 6	827-840	2008

2.2.1 塚本良則（1984～1987）

塚本は根系と崩壊に関する既往の研究報告をまとめ、共通する結果と特徴を以下にまとめた。

- I. 林齢 20 年生前後を境にして、幼齢林と壮齢林では崩壊率が大きく異なり、幼齢林が 3～6 倍高い。
- II. 報告のほとんどが花崗岩地域と新第三紀層の山地を対象にしており、中生層では崩壊多発による災害がほとんどなく、花崗岩・新第三紀層と中生層斜面の基盤地質条件の違いが、森林の崩壊防止機能の問題に強く関わっている。

現在では「幼齢林で崩壊率が高い。特に林齢 20 年生前後」という認識が広く共有されている。また、広葉樹林と針葉樹林で崩壊防止効果に差があるかは各種研究がなされているが、十分な結論には至っていない。

塚本はそれまでの根系に関する力学的なアプローチをとりまとめ、斜面の安定度に樹木根系がどれほど寄与しているかを安全率で評価した。そのために、崩壊底面で抵抗する鉛直根と崩壊側壁で抵抗する水平根という形で、根系を鉛直根と水平根の 2 種類に分ける、というアプローチを提示した。

塚本の研究は、土中内に存在する根を鉛直根割合と水平根割合で分配した上で、根の伸長距離を数式モデルで評価し、根直径と根本数の空間分布を導くというものだった。これよりしばらく、根の空間分布を論じる研究が多くでてくるようになる。

塚本の根系研究による方向付け

- 根を鉛直根と水平根に分けて考える。
- 根の空間分布（直径と本数）を数式モデルで評価する。

塚本のご概念は斜面安定解析に根の抵抗力を取り込む上では避けて通れないものだが、樹木が鉛直根と水平根に、それぞれどれぐらいの割合で根を割り振っているかを明らかにする必要があるが生じる。根の割り振りは本質的に難しい課題であり、根系を考慮した安定検討に当たって鉛直根と水平根に分け定量評価する方法は、近年取り組まれることが少ない。

2.2.2 阿部和時 (1997)

阿部 (表 2.1 文献番号 1) は、樹木根系が持つ表層崩壊防止機能を力学的に評価するために、崩壊すべり面に生育する根の分布量を推定する研究と、崩壊すべり面で根が発揮する土のせん断抵抗力を求める研究を行った。

(1) 阿部の根分布モデル

塚本の根分布モデルはパイプ理論を用い根本数と平均直径を算定していたが、阿部はこれを拡張して、ワイブル関数を使った根分布モデルとした。阿部モデルは鉛直方向の根分布を算定する。

特徴として、胸高直径、樹高、根の最大伸長深さを与えれば根の分布が算定でき、崩壊すべり面に存在するであろう mm 単位の細い根の直径階級別本数が推定可能である。

(2) 根の引き抜き抵抗力による土の強度補強

1960年代からせん断試験や原位置せん断試験を用いて、根系が発揮する抵抗力を計測する調査が多くなされた。なかには小橋 (1983) のように、「根の効果は内部摩擦角に表れる」とする研究もあったが、多くの研究で根の抵抗は土の粘着力増加 (c 成分、つまり土の拘束圧に依存しない力) をもたらす、と結論付けられている。

根系が発揮する抵抗力は、Wu, 1979⁵により根の最大引張り力で評価する流れが作られ、多くの根の引抜き試験が実施された。根の直径別に計測された最大引張り抵抗力は、図 2.5 に示す 2 軸散布図にプロットされ、直径に応じた最大引張り力の回帰線が樹種別に整理されている。

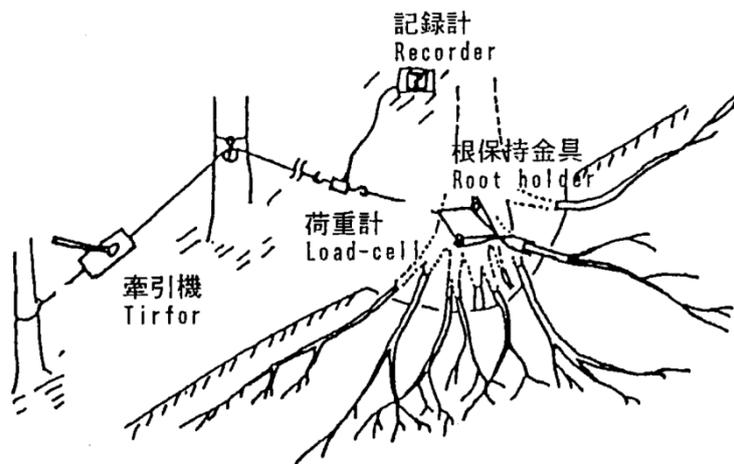


図 2.4 原位置引抜き試験模式図 (阿部 1997、表 2.1 文献番号 1)

⁵ Wu TH, McKinnell WP, Swanston DN. (1979) : Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska Canadian Geotechnolgy Journal 16: 19-33.

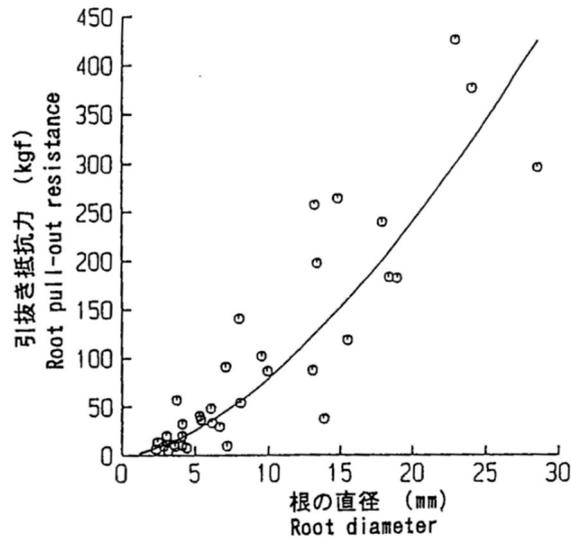


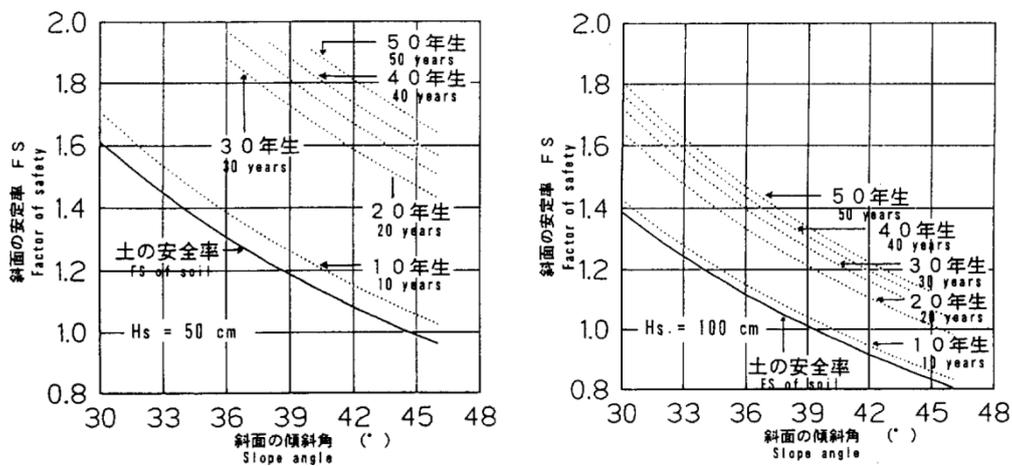
図 2.5 根の直径と引抜き抵抗の関係 (阿部 1997、表 2.1 文献番号 1)

(3) スギ林分の崩壊防止機能の評価例

茨城県地方スギ林分地位 2 を対象に、すべり面における根系量を阿部の根系分布シミュレーションモデルで算定し、根による崩壊防止機能を評価した。阿部の方法は胸高直径と樹高情報があれば根量予測ができ、林分収穫表があれば間伐等の森林整備に伴った林地斜面の安定度評価が可能である。

阿部の根系研究による方向付け

- ・鉛直根の空間分布 (直径と本数) をモデルで精度よく評価。
- ・間伐等、森林整備に伴う林地斜面の安定度の変化を評価。



(左: 斜面の土層圧 50cm、右: 斜面の土層圧 100cm の場合)

図 2.6 斜面傾斜角の違いと林齢の増加に伴う斜面安全率の変化 (阿部 1997、表 2.1 文献番号 1)

2.2.3 北原曜 (2006~2015)

(1) 水平根への着目

北原は崩壊すべり面が根系範囲 (1~1.5m) より深い場合、根系の崩壊防止機能は発揮されないのではなく、崩壊の側壁に位置する水平根が崩壊防止機能を発揮する、と考え 2006 年から 2015 年まで水平根の研究を精力的に行った。

崩壊を三次元で捉えれば、崩壊周囲の側壁面に存在する水平根が滑動時に切断され必ず抵抗力を発揮する、ということで崩壊側壁となる可能性の高い地中の鉛直面 (北原は立木間中央断面と呼んだ) に存在する根の直径と本数を徹底して調査した。

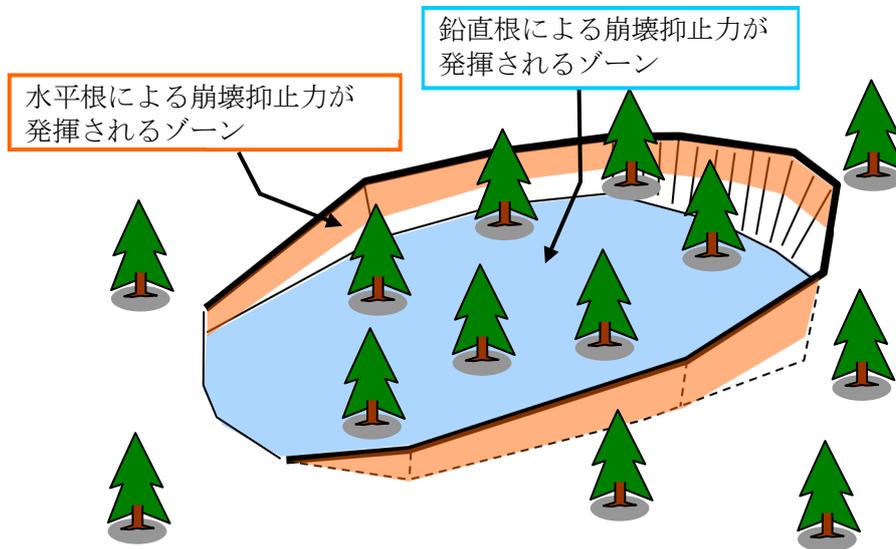


図 2.7 水平根・鉛直根の崩壊防止機能



図 2.8 立木間中央断面での根の分布調査と引き抜き抵抗力試験

(2) 根の引き抜き抵抗力の回帰係数

p.I-27 の阿部と同様に、北原も多くの樹種について根の引き抜き抵抗力を調査し、表 2.4 に示すとおり回帰係数を提示している。根の引き抜き抵抗力は次のべき乗式で表される。

$$T = aD^b \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 T ：引き抜き抵抗力 (N 又は kN)、 D ：根系断面直径 (mm)、 a と b ：回帰係数。
 b が 2 であると断面積に比例することになるが、実際は 2 よりも小さい場合が多い。

表 2.4 引き抜き抵抗力の回帰係数 a、b 値

(北原曜 2010、表 2.1 文献番号 15)

	a	b	直径10mm の引き 抜き抵抗力(N)	引用文献
スギ	31.6	1.34	688	森岡ほか 1989
スギ	42.2	1.48	1274	石垣ほか 1989
スギ	126.8	1.08	1524	同 (資料数少ない?)
スギ	19.4	1.60	772	阿部ほか 1996
ヒノキ	12.3	1.80	776	野毛ほか 2002*
ヒノキ	23.0	1.68	1101	相馬ほか 2004*
ヒノキ	29.4	1.44	810	岩名ほか 2009*
トドマツ	8.58	1.71	440	神原ほか 2002(垂直根のみ)
アカマツ	10.7	1.70	536	北原ほか 2002*
アカマツ	11.7	1.59	455	久保田ほか 2006*
カラマツ	12.3	1.46	357	久保田ほか 2005*
スギ, 広葉樹	27.4	1.45	772	塚本 1987(樹種で差がない)
広葉樹	11.1	1.74	610	北原ほか 2002*
コナラ	39.3	1.41	1010	石垣ほか 1989
コナラ	28.4	1.56	1031	松下ほか 2009*
ミズナラ	20.7	1.56	752	久保田ほか 2006*
クヌギ	14.5	1.72	761	松下ほか 2009*
クリ	21.1	1.49	652	松下ほか 2009*
ケヤキ	34.3	1.87	2543	松下ほか 2009*
ミズキ	25.3	1.54	877	松下ほか 2009*
リョウブ	18.5	1.51	599	松下ほか 2009*
ウワミズザクラ	20.4	1.51	660	松下ほか 2009*
カスミザクラ	14.9	1.47	440	松下ほか 2009*
ウリハダカエデ	17.5	1.49	541	松下ほか 2009*
ヒトツバカエデ	23.7	1.53	804	松下ほか 2009*
ケヤマハンノキ	9.73	1.74	535	加藤ほか 2008*
ヤシャブシ	17.0	1.54	589	加藤ほか 2008*
ニセアカシア	7.28	1.94	634	加藤ほか 2008*
ヤマハギ	9.67	1.68	463	加藤ほか 2008*
マダケ(ひげ根)	13.5	1.73	—	岩波ほか 2006*

(マダケのひげ根は 5 mm まで。地下茎は断面直径と関係なく 1 本あたり平均 6.25kN)

*信大での研究例

(3) 立木間中央断面で発揮される根系が発揮する断面抵抗力 ΔC

北原は立木間の中央断面が最も根密度が低く、この断面での根本数と根直径を調べ、1本1本の根の引き抜き抵抗力 T を(1)式で算定し、断面に存在する根の数だけ T を足し合わせた値を ΔC として、森林による崩壊防止機能の指標とした。

$$\Delta C = \sum T_i \dots\dots\dots (2)$$

ΔC は単位断面積当りの根系が発揮する断面抵抗力 (例えば kN/m^2) であり、断面掘削調査より得られる。これをさまざまな林分で調査し、北原は図 2.9、図 2.10、図 2.11 の結果を得ている。

北原の調査結果では、間伐によって根系の崩壊防止機能が增大している (図 2.10、図 2.11)。

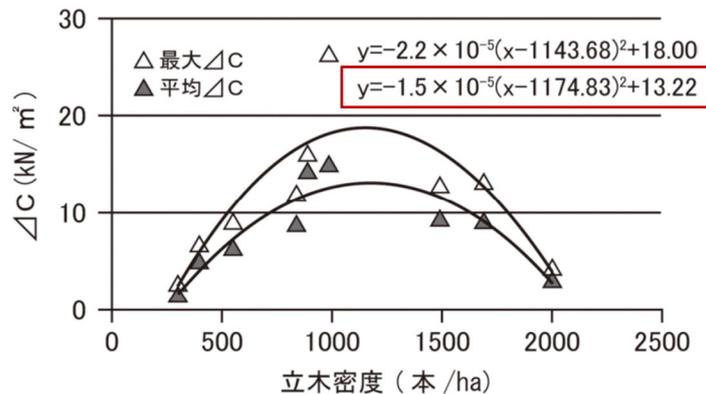
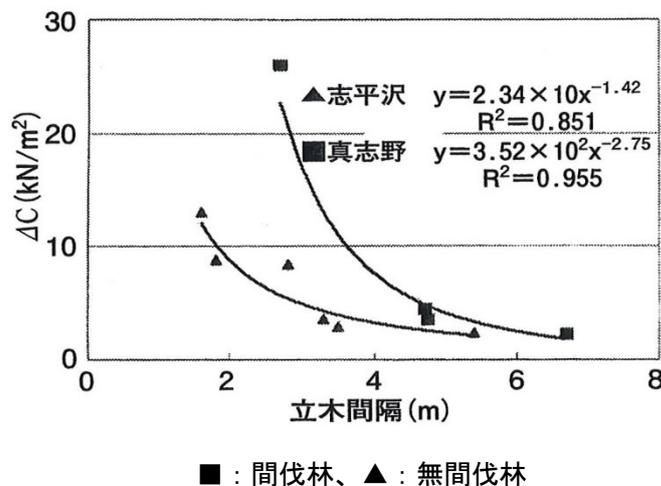
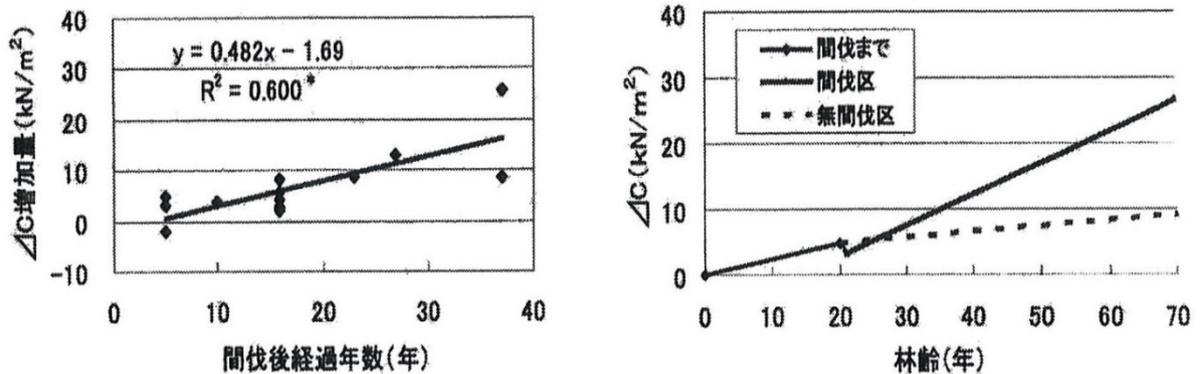


図 2.9 カラマツ林の平均、最大 ΔC と立木密度の関係 (伴・北原ら 2011、文献番号 152)



■ : 間伐林、▲ : 無間伐林

図 2.10 カラマツ林での立木間隔と ΔC の関係 (伴・北原ら 2009、文献番号 164)



(ヒノキ人工林、今井・北原ら 2009、文献番号 175)

図 2.11 間伐後の経過年数に伴う ΔC 増加量(左図)と ΔC の経年変化モデル(右図)

北原はさまざまな林分で調べた ΔC データを基に、胸高直径 D [cm]と断面が位置する立木からの距離 X [m]から簡単に算定できる以下の式を提示した。

根系が発揮する断面抵抗力 ΔC の簡易算定式

針葉樹(ヒノキ): $\Delta C = (0.0033 D^{2.77}) X^{2.8}$ (3) 阿辻・北原ら 2013、文献番号 162

2.77→2.8 丸め $\Delta C = 0.00330 (D/X)^{2.8}$ (3)'

広葉樹(全般): $\Delta C = 0.00198 (D/X)^{2.8}$ (4) 阿辻・北原ら 2014、文献番号 158

(3)式のべき係数 2.77 を丸めて 2.8 とすると(3)'式となる。(3)'及び(4)式は次の変形を施すことができる。

すなわち、 $\Delta C = \alpha'(\Sigma A)^{1.4}$ となり、胸高断面積合計 ΣA の 1.4 乗に比例する。

$$\Delta C = \alpha(D/X)^{2.8} = \alpha(2D/d)^{2.8} = \alpha \left(2D \frac{\sqrt{N}}{100} \right)^{2.8} = \left(\frac{2}{100} \right)^{2.8} \alpha (D^2 N)^{1.4} = \alpha'(\Sigma A)^{1.4}$$

ただし、樹種別係数 α : ヒノキ0.00330, スギ0.00393, 広葉樹0.00198

樹種別係数 $\alpha' = 9.767 \times \alpha$

胸高直径 D [cm]、断面の立木からの距離 X [m]、樹間距離 $d = 2X$ [m]、

立木密度 $N = (100/d)^2$ [本/ha]、胸高断面積合計 ΣA [m²/ha]

北原の根系研究による方向付け

- 水平根の空間分布(直径と本数)を掘削調査で幅広く評価。
- 断面での根系が発揮する断面抵抗力 ΔC を胸高直径から簡易に推定できる式を提案し、実務での利用に道をひらいた。

2.3 比較的最近の新しい知見

2.3.1 ルートバンドルモデル（根系が発揮する抵抗力の評価式）

塚本から阿部、北原による根系が発揮する抵抗力の評価は、1本1本の根の存在とその直径に基づいた抵抗力の定量評価がベースである。これらの研究は Waldron (1977⁶) に始まったせん断面（断面）で根が発揮する抵抗補強メカニズムの考え方に基づく。

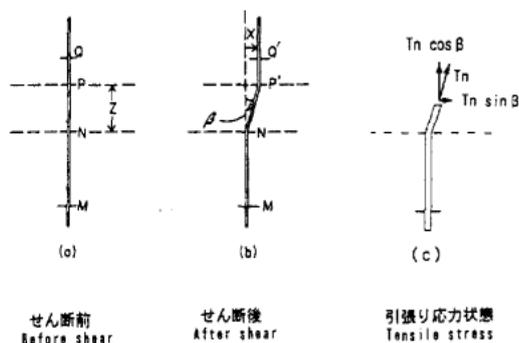


図 2.12 根による土のせん断抵抗力補強モデル (Waldron, 1977)

p.I-30 の(1)式で根1本が発揮する抵抗力 T を算定し、p.I-31 の(2)式で T を積算し、断面が発揮する抵抗力 ΔC を算定する。この考え方は一見妥当だがその後の研究で実際の土のせん断過程をうまく再現できない、とされている。土のせん断過程で1本1本の根は抵抗力を発揮するが、全ての根が一斉同時に抵抗力を発揮するわけではなく、個別の根は異なるタイミングで抵抗する。つまり、p.I-31 の(2)式はせん断時に根系が発揮する断面抵抗力を全て足し合わせている（全ての根が一斉同時に抵抗する）が、それは適切でない、というのが現在の通説である。

全て足し合わせることは適切でない、という指摘に対し Schwarz, 2010 (表 2.1 文献番号 3003) はせん断変位の進行に伴い、根の抜け出しを考慮し、根がそれぞれのタイミングで抵抗力を発揮する、という物理的な抵抗モデル Root Bundle Model (RBM) を提唱した。

2010年に発表されたモデルで、現在はこれが樹木根系の発揮する抵抗力を評価する妥当なモデルに位置付けられている。

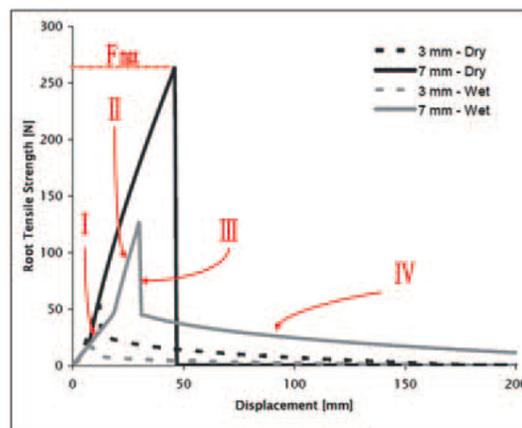


図 2.13 Schwarz が計算した根1本が発揮するせん断進行に伴う抵抗力の変化 (Schwarz, 2010, 表 2.1 文献番号 3003)

⁶ Waldron, L. J. (1977) : The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil, Soil Science Society of American Journal, 41, 843-849

2.3.2 新しい崩壊抵抗評価の考え方—根量への着目

(1) 根量 W_r という考え方

根系による崩壊抵抗として、1本1本の根の存在とその直径に基づく抵抗を定量化するのではなく、新たな考え方を掛谷ら（2014, 2020、表 2.1 文献番号 12, 13）が提案している。

掛谷らが提唱する表層崩壊の発生機構は、一定の厚みを持ったせん断面で変位が進行する、と考えるのではなく、移動土塊全体が徐々にたわんで歪み亀裂が増えていき、最終的に崩れる、という発生機構である。

この考え方を端的に表した図を図 2.14 に示す。

これまでの根系が発揮する断面抵抗力の研究は、図 2.14 の①又は②のせん断モードを想定している。①②ではなくせん断域の厚みがある③のモードで崩壊が発生している場合、せん断域に存在する根の体積（ボリューム）を崩壊抵抗力の指標とみなす、という考え方である。

この考え方を実際の斜面で表したのが図 2.15 である。薄いせん断域（断面）に存在する根の本数と直径に基づくのではなく、斜面全体に存在する根量で根系による崩壊抵抗力を評価する、という新たな概念である。

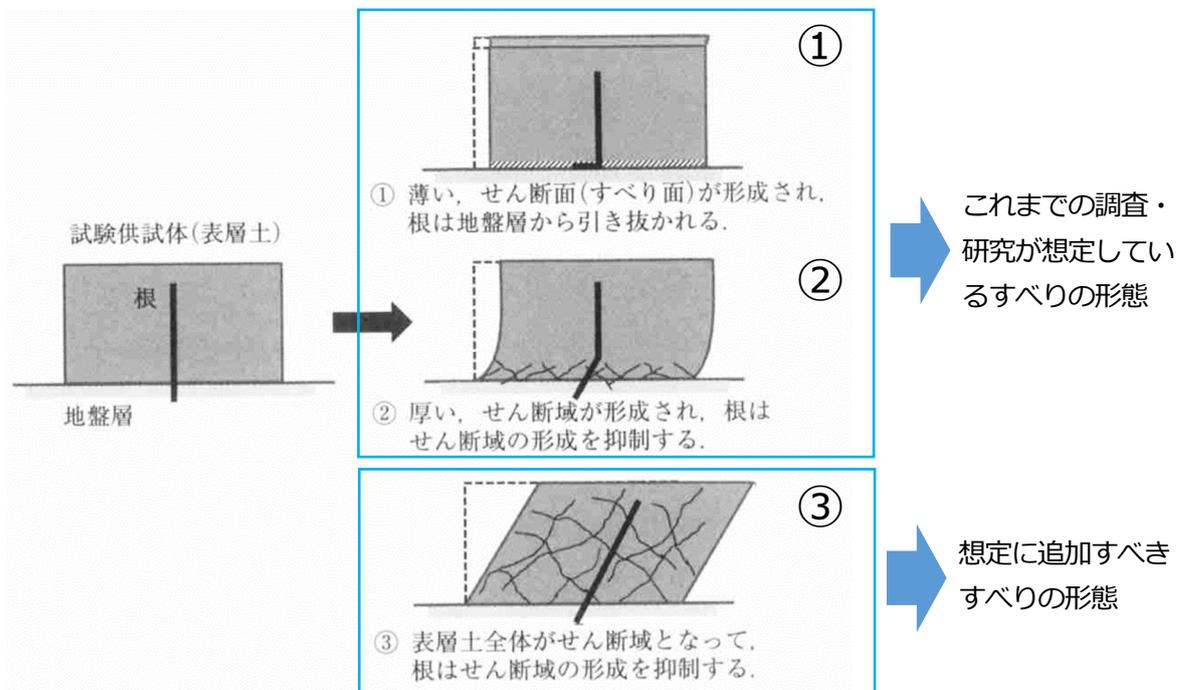


図 2.14 せん断モードの違いと根の効果（掛谷ら 2014 に一部加筆、表 2.1 文献番号 12）

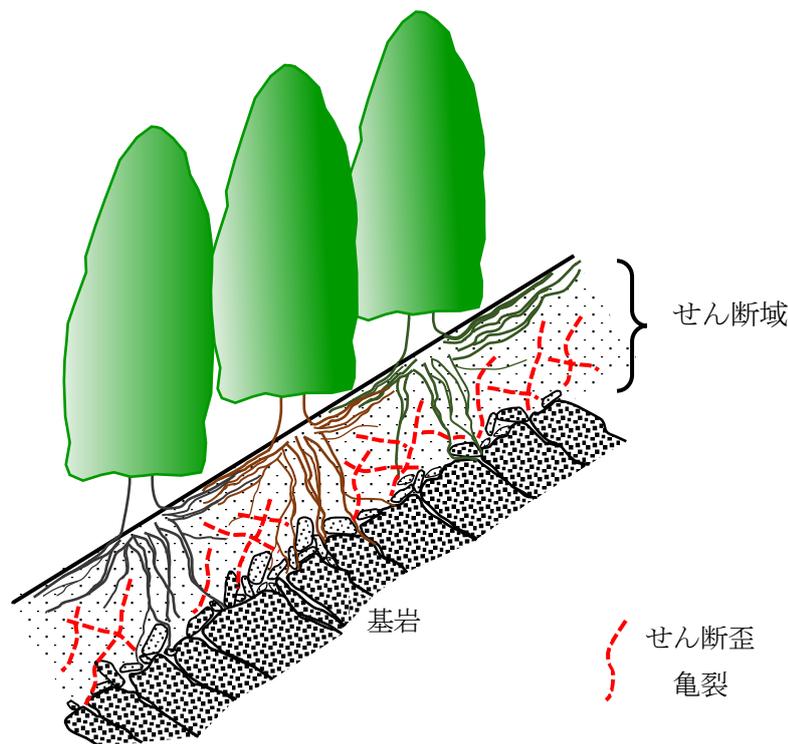


図 2.15 表層土のせん断歪みと根系の関係イメージ (阿部 2019) ⁷

掛谷らが図 2.15 のような崩壊発生機構を提案するに至った経緯として、現位置で実施した根系を含むせん断試験がある (図 2.16)。この試験では、せん断域の厚さを意図的に変えて厚いせん断域で破壊させた場合にせん断強度が変化した。せん断域が厚いと根系が発揮する抵抗力はせん断域が薄い場合に比べ相対的に低下したが、ゼロとはならない。このことは、土層中に分布する根系は例え基岩との境にちょうど根が位置していなくとも、土中に存在する根が土層の変形を抑制すること自体が崩壊に対する抵抗力になる、と考えることで説明がつく。

この土層の変形を抑制する効果は、土層中に存在する根量に依存し、結局のところこの効果はすべり面の位置を深さ方向下方に追い込む、すなわちすべり面の押し下げ効果となる。

掛谷らが想定する崩壊発生機構も実際に存在すると思われるが、全ての崩壊がそのような発生機構で生じているともいえないであろう。1.2.3 で挙げた伊豆大島崩壊のように根量の多寡がほぼ関係ない崩壊事例もあることから、どのような場合に掛谷らが提案する発生機構が優先するか、といった発生条件の検証が必要である。このような視点からの研究成果は少なく、新たな検証作業を積み上げていくほかない。また実務的な解析を行うには、せん断域の厚

⁷ 阿部和時 (2019) : 豪雨災害でみられる森林が持つ表層崩壊防止機能とそのメカニズムに関する研究動向、GT フレーム工法 技術講習会発表資料、2019 年 6 月 24 日

さすべりの形成過程をどう特定するのか、といった課題があり、今後さらなる検討が待たれる。

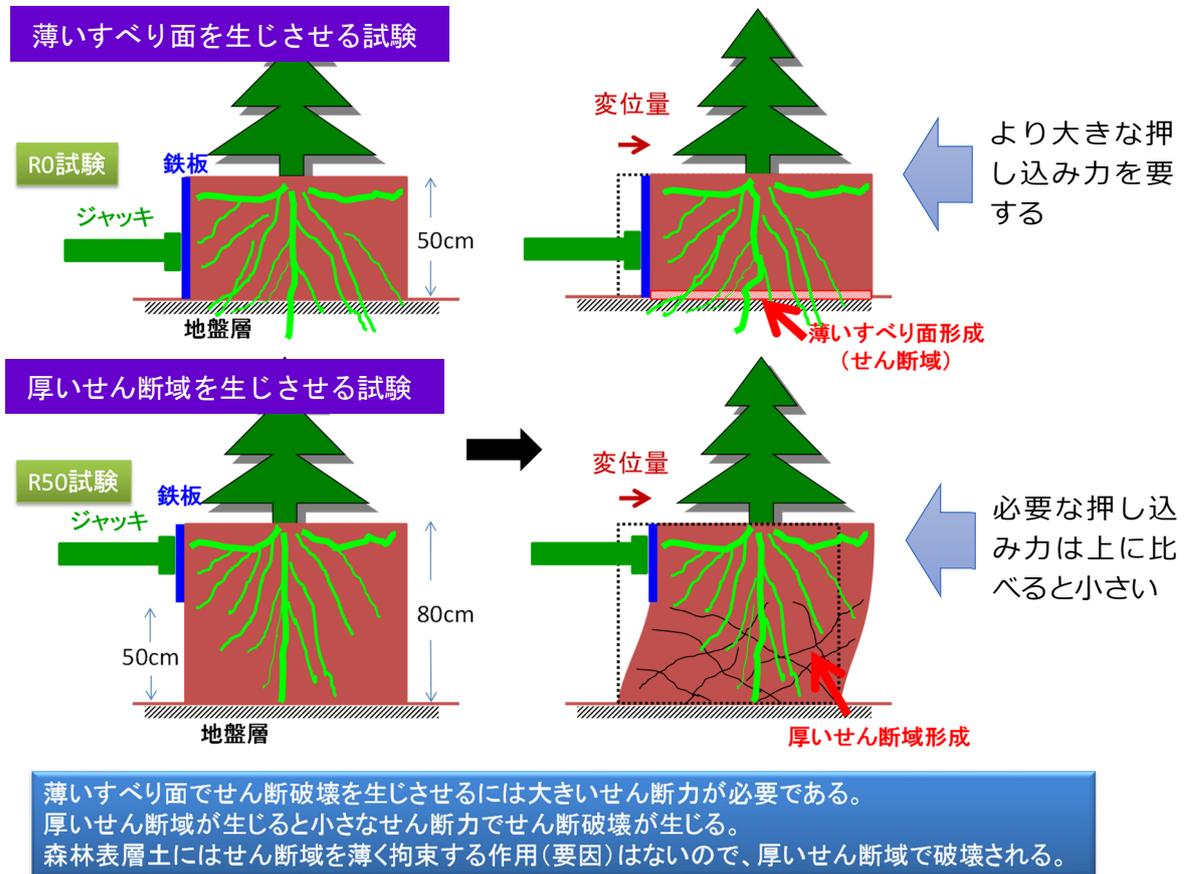
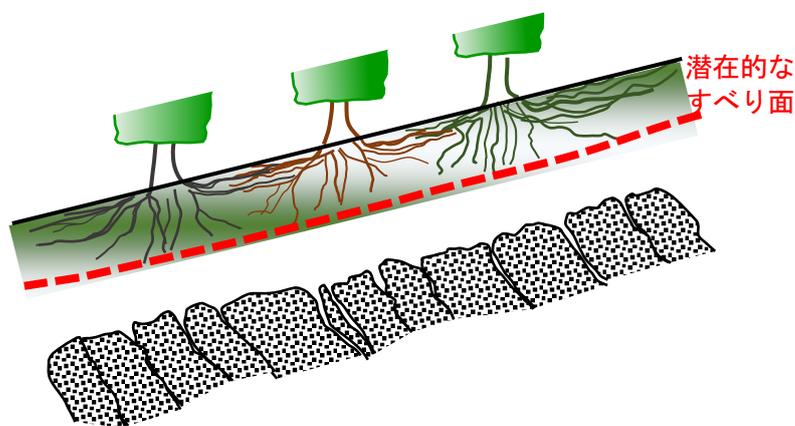


図 2.16 せん断層厚を変えた現位置せん断試験のイメージ (阿部 2019) 7

(2) 崩壊防止機能の指標としての W_r

掛谷らが提案する根量 W_r を崩壊防止機能の指標とみなす概念では、せん断域の厚みという考え (図 2.16) が重要である。せん断域が厚い場合、小さな滑動力であっても崩壊が発生しやすいが、根系の存在がその厚い領域のせん断破壊を抑制している、という考え方だからである。いわば根系が土塊を一体化 (緊縛) することで、すべりを薄いすべり面に限定する (すべり面を下方に押し込める) 働きをなす (図 2.17)。

根系が発揮する崩壊防止機能として、土塊を一体化し、図 2.17 に示す「すべり面を下方へ追い込む効果」を発揮すると、すべりは基岩との境界付近に限定される。すべりが深くなることで相対的に大きな滑動力が求められることから、小～中規模降雨での崩壊はより発生しにくくなる。そうであっても、大規模降雨時に基盤との境をすべり面とするに十分な滑動力が発生した場合には、崩壊が生じてしまう。すべり面を下方へと追い込む効果は、小規模なすべりを抑制する反面、大規模なすべりにつながる可能性もある点には留意が必要である。

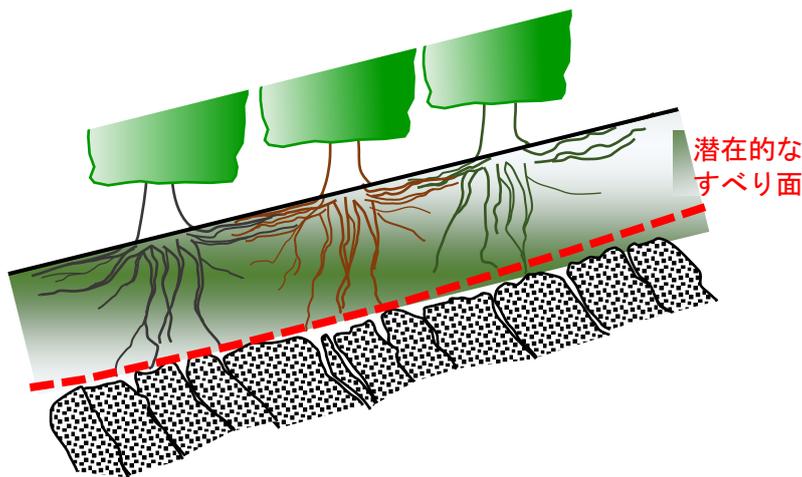


根系が存在する深度まで土壌は緊縛化される。すべりは根系底面と基岩の間で発生する。

→浅いすべりは小さい滑動力で崩壊する可能性(小～中規模降雨で崩れる)



森林が生長することで根系が深部に達し、潜在的なすべり面を下方へと追い込む効果を発揮する



根系が基岩まで到達し、土層全体を緊縛化する。すべり面は基岩との境界付近に限定される。

→深いすべりなので相対的に大きな滑動力が必要とされる。小～中規模降雨では滑動力不足で崩れない。

図 2.17 根系の伸長がすべり面を下方へと追い込む効果

2.3.3 エリートツリーの根量

森林の崩壊防止機能を早期に発揮させるためには、成長の早い樹木を導入し、早期に根系成長を促すことが効果的といえる。また、伐採直後の根は抵抗力を保持していても5～10年経過すると根が腐朽し、抵抗力が低下するといわれている。その観点からもエリートツリーといった成長の早い樹種の導入は大いに推奨される。

エリートツリーを推奨するのは、地上部だけでなく地下部つまり根系成長も地上部同様に早いことを期待しているからである。しかしながら、エリートツリーの地上部成長が早いことはこれまでに数多くの研究で立証済みだが、地下部の成長も早いか(いいか)えれば地下部も地上部と同様に成長し、地上部重量 T と地下部重量 R の比率である T/R 率が大きくなるか) どうかに関する定量的な研究は見当たらない。

以上を踏まえ、エリートツリーの地下部成長を実際に調査した結果を示す。

(1) エリートツリーの調査方法

(i) 地上部重量の測定

調査木を伐倒後、枝下高から先端までの葉重量と枝重量を測定した。葉は、緑部分(幹先端の緑部分を除く)全てとする。枝は、幹から分枝し、葉を除く部分とした。幹重量は先端までの部分を計測した。

(ii) 地下部重量の測定

地下部の重量は、隣接する立木間中央までと直根の伸びる深さまでを掘り取り後、1cm程度以上の太い根と1cm程度未満の細い根に分けて重量を測定し、根の重量とする。

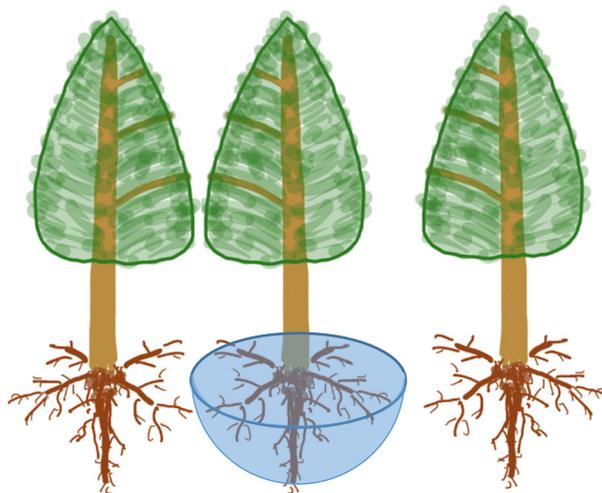
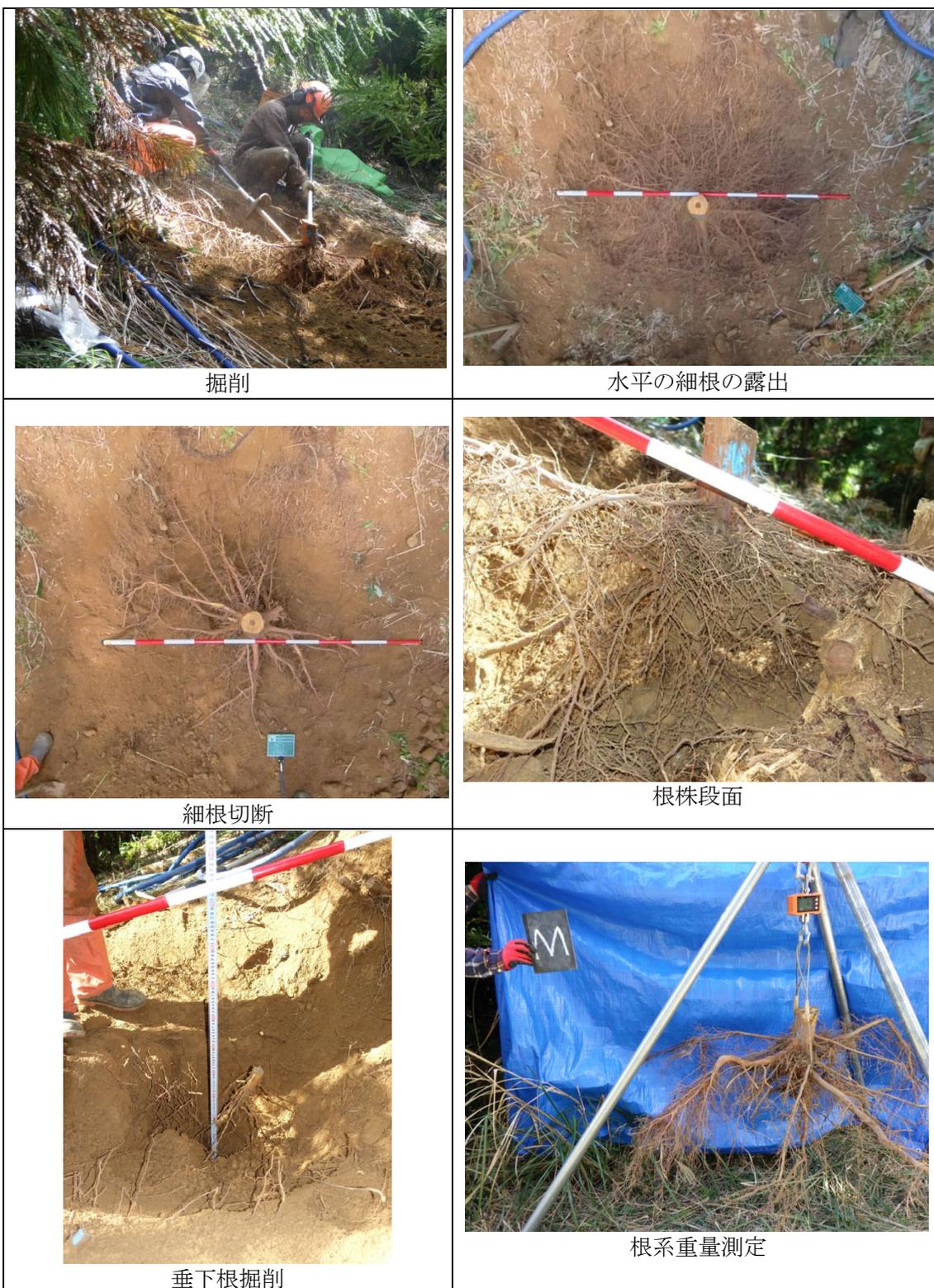


図 2.18 地下部重量の測定範囲

(iii) 重量測定 (乾重)

地上部及び地下部ともに、105度の恒温器にて乾燥後、重量を計測した。



写 2.1 根系部作業状況

(2) 調査箇所、調査木

(i) 調査箇所

調査箇所は九州森林管理局管内で、林齢を考慮して若齢の宮崎と 20 年弱の熊本の 2 か所の検定林とした (表 2.5)。

表 2.5 エリートツリー検定林

検定林名	所在地	森林管理署	林班	植栽年、月
九熊本 162 号	宮崎県えびの市	宮崎森林管理署 都城支署	黒原国有林 3017 ほ	2012.3 植栽
九熊本 147 号	熊本県玉名市	熊本森林管理署	熊野岳国有林 159 と 1	2004.3 植栽



図 2.19 九熊本 147 号検定林内の様子

(ii) 調査木

調査木は表 2.6 に示す 8 本である。

胸高直径は 7~20.5cm、試験当時 (2020 年、2022 年) の林齢は 9~19 年と若齢である。エリートツリーは 19 年より林齢の高い木はほぼなく、調査対象は若齢木に限られる。

表 2.6 調査木諸元

区分	ID	DBH[cm]	樹高[m]	枝下高[m]	樹冠長率	材積量[m3]
熊本 19年生 (2022 試験時)	I	20.5	14.19	8.3	42%	0.232
	II	18.0	13.27	8.8	34%	0.171
	III	16.0	12.9	7.1	45%	0.134
熊本 17年生 (2020 試験時)	A	16.0	11.30	6.9	39%	0.116
	D	13.0	10.65	5.0	53%	0.074
宮崎 9年生 (2020 試験時)	O	11.5	6.32	0.5	92%	0.033
	J	10.0	7.44	0.5	93%	0.031
	M	7.0	5.20	0.3	94%	0.011

*材積量は、立木幹材積表（西日本編）に拠った。

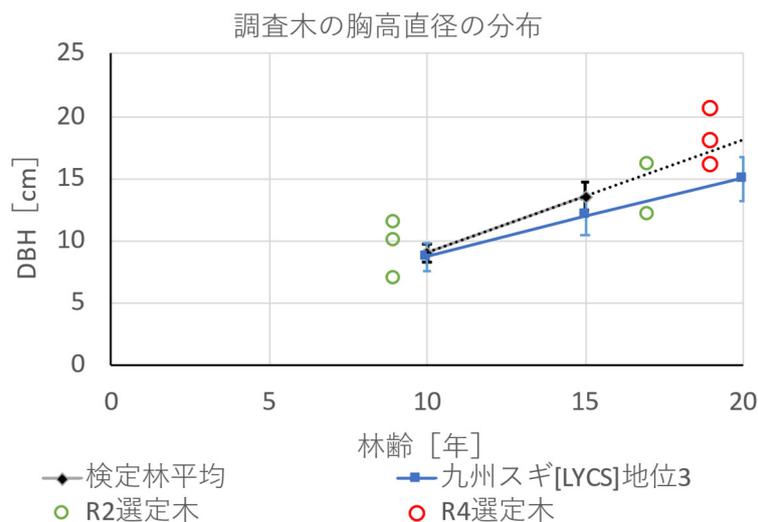


図 2.20 調査木の胸高直径の分布

(3) 調査結果

調査で得られた地上部及び地下部の乾燥重量から、T/R 率を算定した。測定結果を表 2.7 に示す。

R4 熊本 19 年生の調査結果は、T/R 率 3.87~3.95 の値を示し、同一林分を調査した R2 熊本 17 年生 2.87~2.99 よりも高い（→地下部現存量が少ない）傾向となった。R2 宮崎 9 年生は 3.70~3.82 であり、R4 熊本 19 年生と近い値となった。

表 2.7 調査結果

区分	ID	DBH [cm]	樹高 [m]	乾燥重量 [kg]					T/R 率
				葉	枝	幹	地上部	地下部	
R4 熊本 19 年 (2022 試験時)	I	20.5	14.19	31.52	11.04	60.26	102.82	26.10	3.94
	II	18.0	13.27	15.43	5.74	44.84	66.02	16.73	3.95
	III	16.0	12.9	12.56	4.61	36.32	53.50	13.82	3.87
R2 熊本 17 年 (2020 試験時)	A	16.0	11.3	8.53	1.76	34.13	44.41	15.47	2.87
	D	13.0	10.65	9.28	1.94	22.09	33.30	11.13	2.99
R2 宮崎 9 年 (2020 試験時)	O	11.5	6.32	14.25	3.01	11.76	29.01	7.79	3.73
	J	10.0	7.44	10.73	2.27	10.92	23.92	6.46	3.70
	M	7.0	5.2	5.92	1.25	4.86	12.03	3.15	3.82

各部位の重量比を図 2.21 に示す。R2 宮崎 9 年生は樹冠がうっ閉する前で枯れ上がっておらず、葉の割合が多い。R2 熊本 17 年生は R4 熊本 19 年生と同一林分内で選定したもの（試験の実施時期が 2 年ずれているだけ）ではあるが、胸高直径が R4 より細く（図 2.20）、葉重量割合が低い傾向（図 2.21）がある。R4 年 19 年生は、胸高直径が林分の平均より太く葉重量割合も高い。

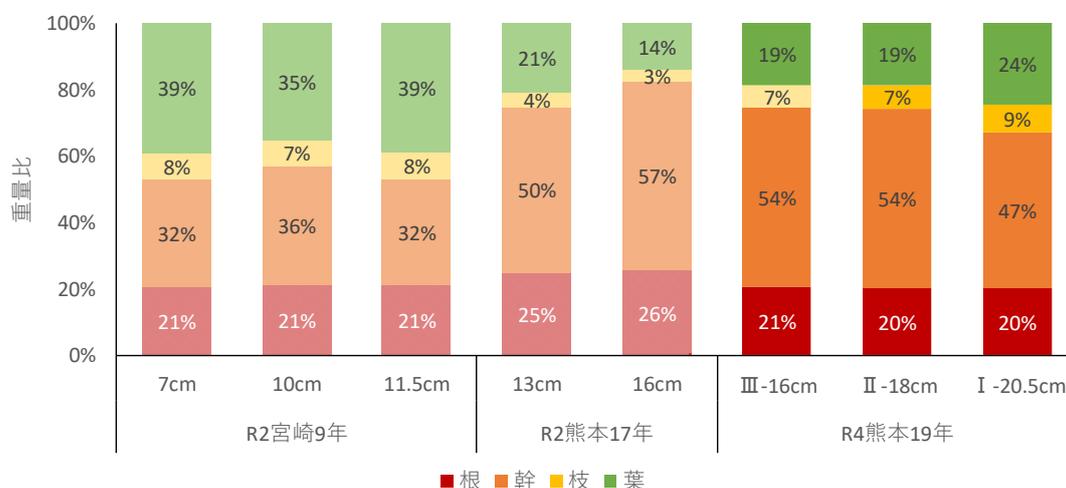


図 2.21 各部位の重量比

図 2.22 には W_r 算出にも使用している胸高直径から地上部重量及び地下部重量を推定する苜住の式⁸より算出した T/R 率を併せて記載した。R4 熊本 19 年生の 3 本はいずれもこの T/R 率よりも高い値を示す。

⁸ 苜住昇(2015) 森林の根系特性と構造, 鹿島出版会, 446pp.

地上部推定式 $y_4=83.9143x^{2.3673}$ (1)

地下部推定式 $y_{11}=29.0955x^{2.3015}$ (2)

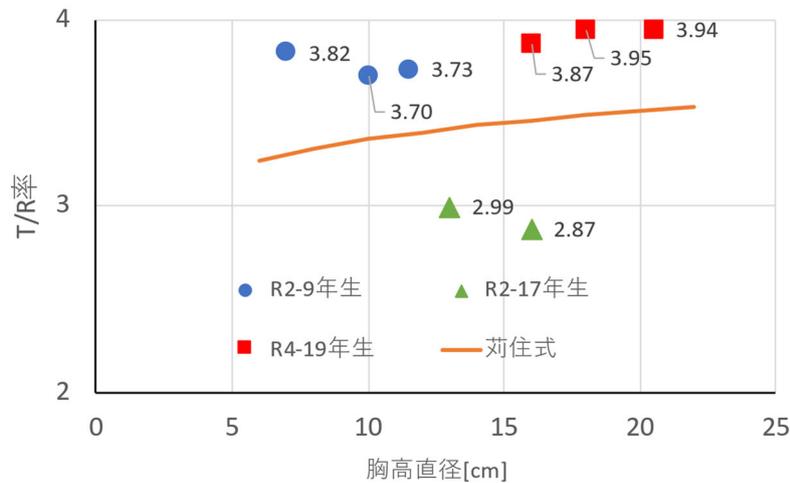


図 2.22 胸高直径と T/R 率の関係

菫住⁸は(1)、(2)式の元となったオリジナルデータを書籍付属の CD-R で提供している。スギ 180 本分の菫住のオリジナルデータを使い、図 2.23 を作成した。

菫住のオリジナルデータに基づき T/R 率を計算し、胸高直径との関係を整理すると図 2.24 になる。胸高直径と地上部重量/地下部重量の散布図は図 2.23 のように高い相関を持つが、胸高直径と T/R 率は図 2.24 のように相関が低い。

菫住のデータは調査地が 5 県に分布するため、県別表記(図 2.24 の右図)で見ると千葉の T/R 率がやや高く、宮崎や秋田が低い傾向にも見えるがそれほど差はない。図 2.25 は T/R 率と林齢の関係だが、林齢と T/R 率も相関は低い結果となっている。

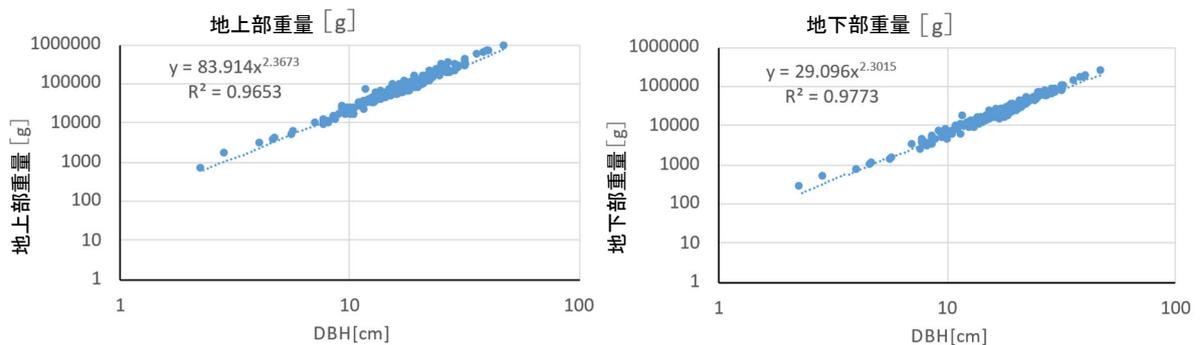


図 2.23 菫住のデータによるスギ胸高直径と地上部重量・地下部重量の関係

菫住のデータに今回計測したエリートツリーの T/R 率を加えた(図 2.26)。T/R 率は個体によるばらつきが大きいですが、エリートツリーの T/R 率は菫住のスギデータの上側にプロット

された個体が6本、下側にプロットされた個体が2本という結果である。ややT/R率が大きい（地下部重量が少ない）個体が多いが、地下部重量が多い個体も存在することから、エリートツリーの根量は非エリートに比べて多いとも少ないともいえない結果である。

図 2.27 は林齢別に地下部重量の値を比較したもので、これを見るとエリートツリーの根量は非エリートとおおむね同等の根量である、ということができる。

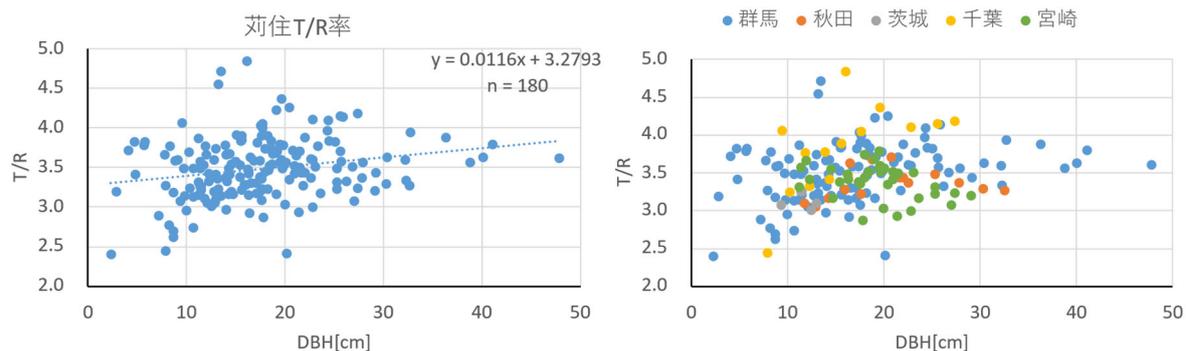


図 2.24 苧住のデータによる T/R 率と胸高直径（右：調査地別で着色）

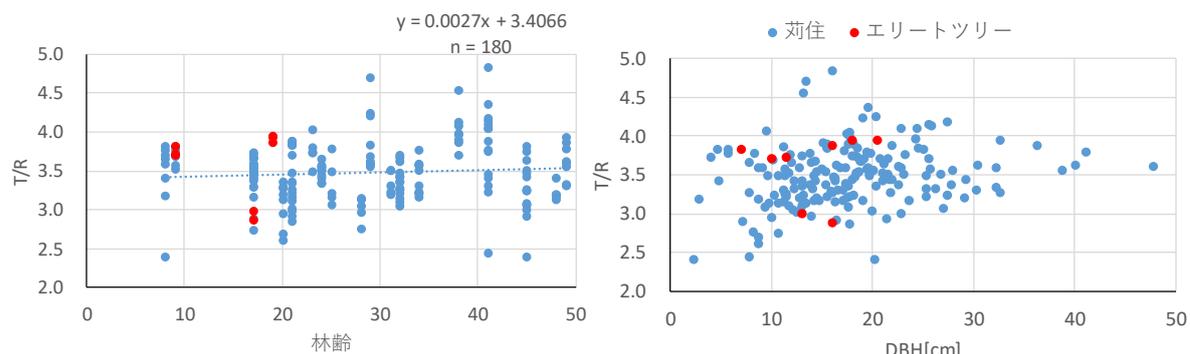


図 2.25 林齢と T/R 率の関係

図 2.26 苧住のデータとエリートツリー

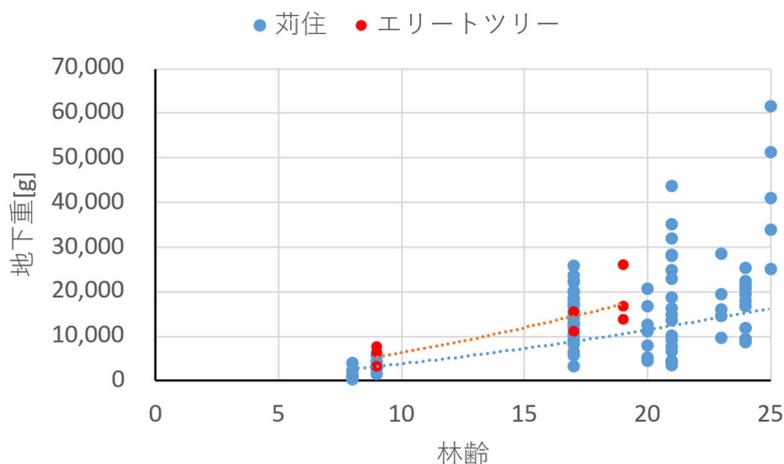


図 2.27 林齢別にみた地下部重量（苧住のデータとエリートツリーの比較）

2.4 これまでの研究で明らかとなった課題

2.4.1 根系が発揮する断面抵抗力 ΔC の課題

北原は ΔC の簡易推定式を作成し、実務等での利用を促進した。例えば、林野庁が平成27年度に作成した「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書(案)」⁹(以下、「林野庁手引き」という。)では、流木の発生危険個所を特定するために、森林の土砂崩壊防止機能を評価するための手順が記載されている。林野庁手引きの中で用いる崩壊防止機能の評価では、北原が提唱する ΔC に基づく評価法を採用している。

一方で、その後の研究成果によれば北原が提唱した根系が発揮する断面抵抗力 ΔC には以下に指摘する課題がある。

(1) ΔC の課題その1：最大値の積算、 ΔC が実際よりも過大

これは2.3.1で紹介したルートバンドルモデルの裏返しである。

ΔC はp.I-30~31の(1), (2)式で算定されるが、これは1本1本の根が発揮する引き抜き抵抗力をそのまま積算したものである。2.3.1で説明したように土がせん断される過程で、全ての根が一斉同時に抵抗力を発揮するわけではないことから、単純に抵抗力を積算すると過大評価となる。

この課題に対しては既に Schwartz, 2010 (表 2.1 文献番号 3003) がせん断変位の進行に伴う根の抜け出しを考慮した抵抗力モデル Root Bundle Model (RBM) を提唱していて、研究の進展に伴い解決されている。ただ、北原が ΔC の研究に取り組んでいたのは Schwartz の論文が国内で注目される以前であったため、北原の ΔC 関連論文では単純積算による抵抗値が採用されている。

ΔC の値が過大となる例として、図 2.28 では ΔC の値が 30 [kN/m²]以上となるプロットが4点存在する事例を挙げる。他の研究者による現地調査や安定解析による逆算では、林分で発揮される ΔC は 10 [kN/m²]未満であることが多く、この図の ΔC はその3倍程度の大きさとなっている。

⁹ 林野庁治山課：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）委託事業成果品

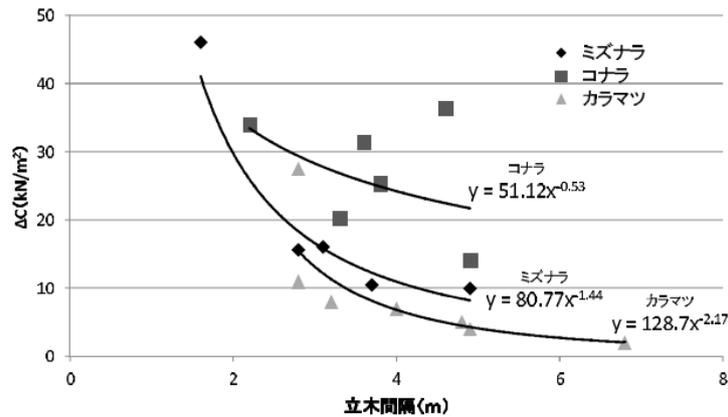


図 2.28 立木間隔と根系が発揮する断面抵抗力 ΔC の関係（矢下・北原ら 2011、文献番号 153）

(2) ΔC の課題その 2 : 増減傾向が図によって異なる

北原が示す p.I-31 の図 2.9 と図 2.10 は横軸が立木密度と立木間隔であり、逆数関係ではあるが両者は基本的に同様の傾向を有する軸である。しかしながら、図 2.9 が上に凸傾向を示し、密度の最適値（ピーク）が存在するのに対し、図 2.10 は単調減少でピークは存在しない。本来 2 つの図は同じ傾向を示すべきである。 ΔC の図は現地調査データをプロットして作成しているため、異なるデータから作られた図は異なる増減傾向が得られてしまう。

どちらの図も現地で労多くして取得されたデータではあるが、異なる解釈をもたらす場合は、その背景やデータの過不足の吟味が必要であり、現時点ではどちらの図が本来であるかは判断ができない。

(3) ΔC の課題その 3 : 密度と根系が発揮する断面抵抗力の増減関係が逆になる

p.I-31 の図 2.10 は立木間隔に対して ΔC が単調減少傾向であり、立木密度が疎になると ΔC は減少する。同様の傾向は図 2.9 の疎な範囲 1000 本/ha 未満でもみられる。この傾向（疎密度で ΔC が減少）は従来いわれている林齢と崩壊面積率の関係（一般に単調減少傾向とされる。例えば図 2.29 を参照）と合致しない。

このようなことが生じる理由として、 ΔC は立木間中央断面のみに着目していることが一因と考えられる。疎密度になれば立木間中央断面では根の本数が減少し、 ΔC が小さくなるのは道理である。しかし、実際には図 2.29 のように疎密度（高林齢）で崩壊発生率が低下していることから、崩壊防止力の指標として立木間中央断面の ΔC のみで評価すると、林齢の大きな林分の崩壊防止力を過小評価したり、又は間伐施業による効果を適切に評価できない可能性がでてくる。

2.3.2 で紹介した掛谷らの考え方、根量による根系が発揮する断面抵抗力の評価という発想は、この ΔC の課題その 3 に対し、別のアプローチによる評価を試みたもの、ということも

できる。

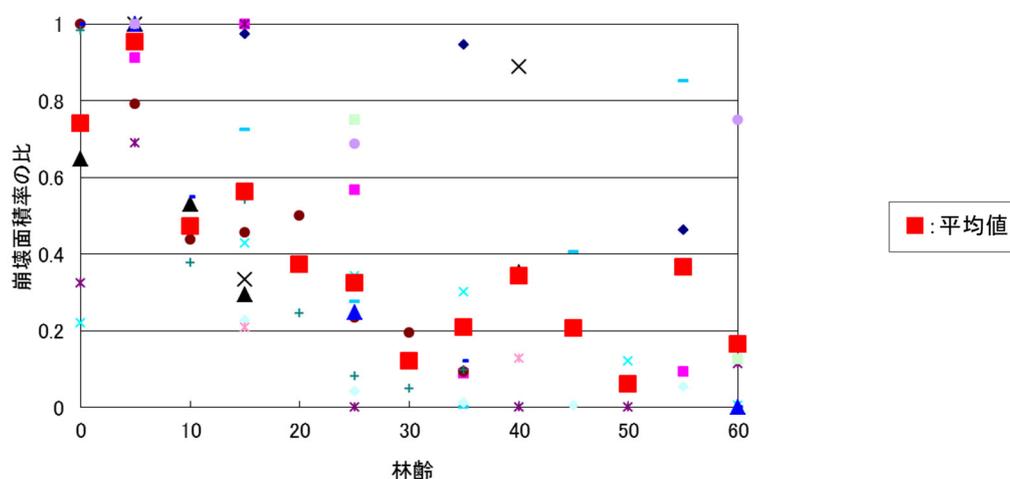


図 2.29 林齢と崩壊面積率の関係 (阿部、2019、文献番号 1)

2.4.2 間伐と根系補強力を論じる上での課題

間伐施業が森林の崩壊防止力に及ぼす影響については、これまでの研究で、間伐による効果があるとする研究と効果が見られなかったとする研究の両方がある。これは、間伐により変化する部分をどこで評価していたか、による部分もあると思われる。

(1) 立木間断面と間伐効果

立木間の断面のみに着目すると、間伐の効果は見えづらい。

図 2.30 と図 2.31 は、長野県が作成した「災害に強い森林づくり指針」の中で間伐による根の補強強度の変化を示した図である。間伐により伐採された樹木位置で根株は腐朽し、数年～5年後には該当箇所での根系補強力はほとんど期待できなくなる。この図で立木間中央だけに着目すると、その箇所が従前より強くなるかどうかの判断は実際には難しい。もともと根株が存在していた位置で伐採後に水平根が侵出してきても、以前あった根株以上の強度を発揮するとは限らない。1つの場所を定点観察している限りは、その場所が伐採前より強くなるかは分からない。伐採前の立木間中央と、伐採後の立木間中央（両者は基本的に異なる場所となる）を比較したときに、伐採後の立木間中央がより強まる可能性がある、というのが北原による研究成果であり、強まる場所は変わってしまうことになる。

立木間中央が弱線となり崩壊が発生するためには、弱線が連続している必要がある。間伐により立木間中央（弱線）が変わったからといって、そのままそこが弱線となるわけではない。このように、間伐後に立木間中央での根量に着目し続けていても、森林の崩壊防止機能を適切には評価できない可能性がある。

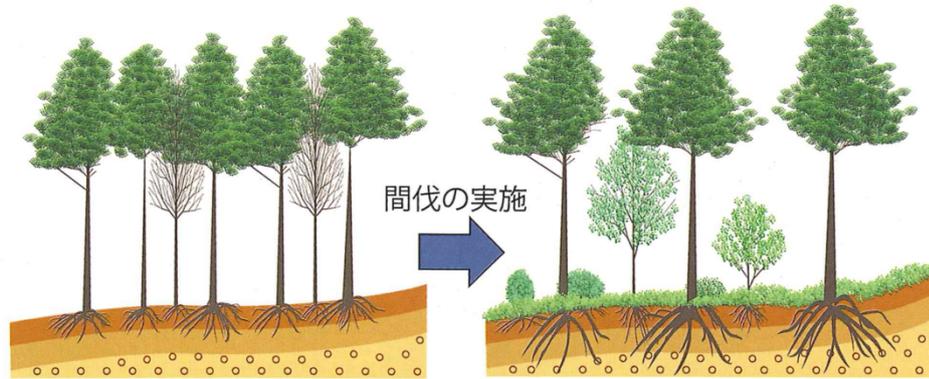
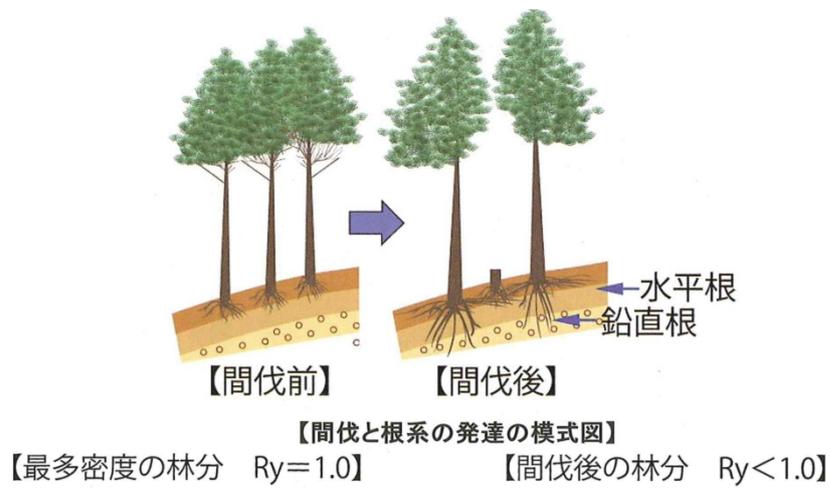


図 2.30 間伐の効果（根系に与える影響と日照・下層植生への影響）（長野県 2008¹⁰）

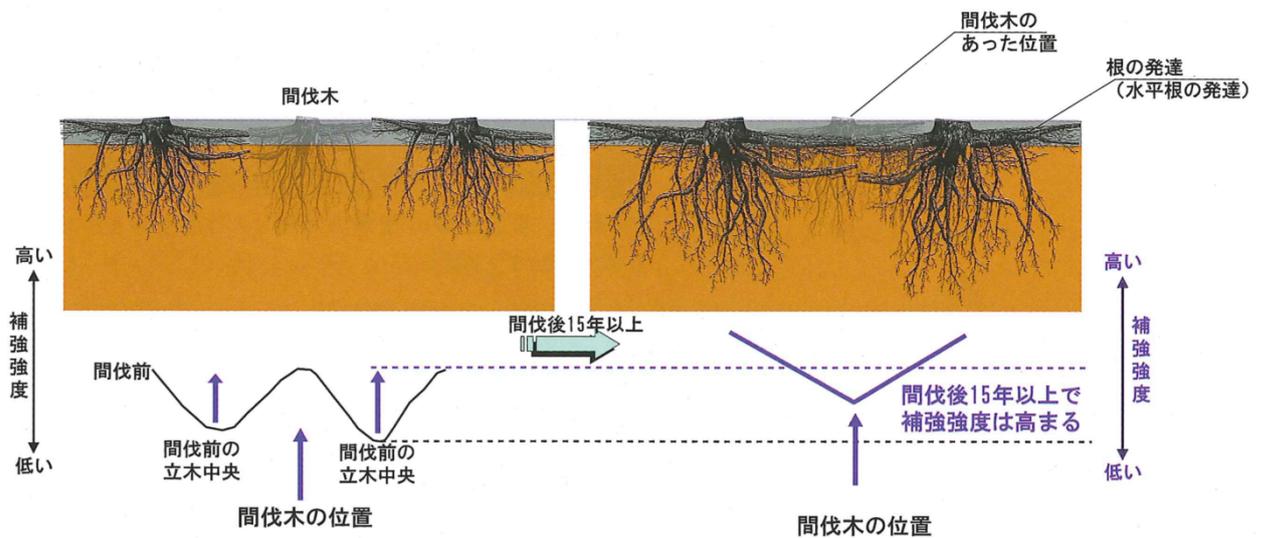


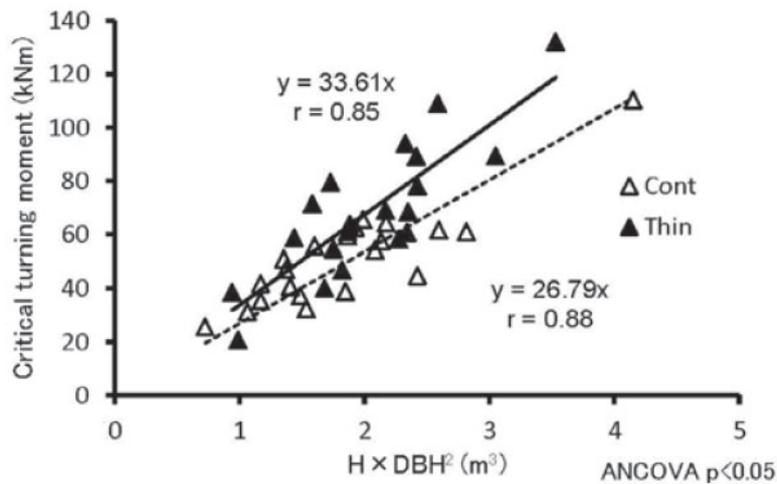
図 2.31 間伐の効果（根密度の増加と補強強度）（長野県 2008¹⁰）

¹⁰ 長野県林務部（2008）：災害に強い森林づくり指針、森林の土砂災害防止機能に関する検討委員会編、2008年1月

(2) 地上部は同様に地下部だけに違いが現れる

図 2.32 は藤堂・山瀬ら (2015、文献番号 88) が、スギの最大引き倒し抵抗モーメントを調査して、間伐の影響を検証した結果である。

間伐履歴があるスギは間伐されてないスギと比べ、引き倒し抵抗モーメントが有意に大きい傾向が得られた。この結果は間伐履歴があるスギの根張りがそうでないスギに比べ、より広いことを示す。このデータは間伐により強い根系が成長したことを示すもので、間伐施業による恩恵を示す証左である。



(藤堂・山瀬ら 2015、文献番号 88)

図 2.32 間伐区と対照区における樹木の引倒し抵抗モーメントと $H \times DBH^2$ の関係

しかしながら、同じ胸高直径、立木密度でも施業履歴 (間伐) による違いが地下部で顕現するという事は、地上部情報だけを見ていては、間伐による効果を把握できないことを意味する。間伐を施し、地下部でよい根張りが生じてもそれは掘り起こさない限り分からなければ、その確認は非常に難しいものとなる。森林の崩壊防止力と間伐施業の関係を議論する上で、留意すべき点となろう。

2.4.3 下層植生（広葉樹）の役割

下層植生、特に広葉樹は根際直径が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、ともいわれる。特に、高木同士の立木間中央付近では、高木に由来する根密度が低くなるが、下層植生や広葉樹が生育することで根量が補完され、根系による崩壊抵抗力を高め水土保持機能や崩壊防止機能において果たす役割は決して小さくはない。

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場合もある。図 2.33 はスギ（高木）とアセビ（低木）、ミツマタ（低木）の3種について、根の引き抜き抵抗力を比較したのだが、アセビの根の引き抜き抵抗力は、同じ低木種のミツマタと比較して4倍大きく、スギの8割強ほどである。このことは同じ低木でも樹種の選定が重要であり、比較的大きな引き抜き抵抗力が発揮される低木種であれば、高木根系が疎でその抵抗力を期待できない箇所において、崩壊防止力を発揮し補完することができる。

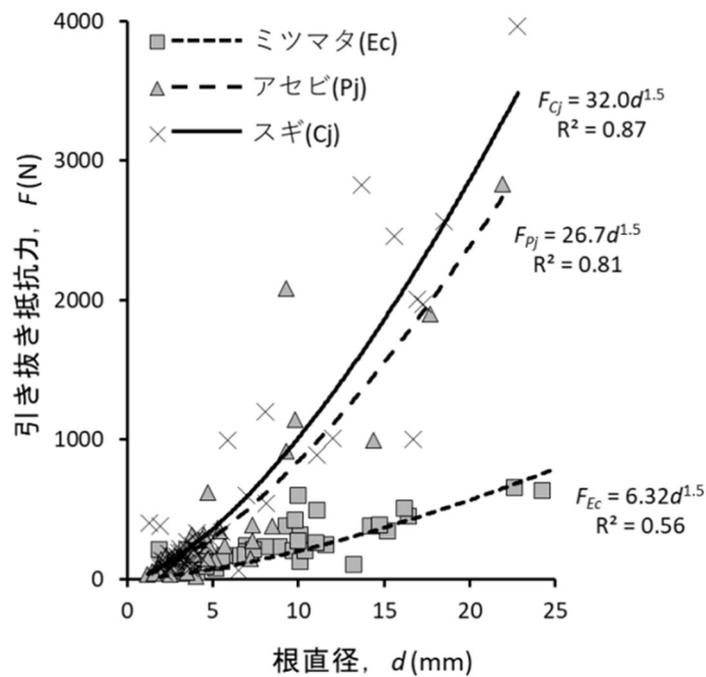


図 2.33 スギ及び低木種 2 種の引き抜き抵抗力の比較（山瀬ら 2022¹¹）

下部に民家等の保全対象がある場合など、林木の大径化が望ましくない斜面では低木種のみへと誘導する、というアプローチも今後の森林管理の選択肢の一つとなるかもしれない。

針広混交林のように根系分布の様式が異なる樹種間では、土壌中の空間が有効に活用され地下部根系の競争が緩和される。混交林の細根量は単純林よりも大きい傾向にある（Ma and

¹¹ 山瀬敬太郎・藤堂千景・鳥居宣之・谷川東子・山本智究・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘（2022）：里山林伐採後の樹木根による土壌補強強度の変化、水利科学、No.387、p.1-17

Chen, 2017¹²⁾ とされる一方で、同種間や根系分布の似た樹種では地下部での根系競争が激しくなるとされる (佐藤 1995¹³⁾)。

山瀬ら¹⁴⁾によればコナラなど萌芽再生する樹種は、伐採後の地上部で萌芽再生が進んでいても、地下部の根系補強力は (枯死木よりは強い程度ではあるが) 活性が低下する傾向が見られた。施業対象が混交林等の場合、こうした広葉樹の特性を把握した上で伐採、更新計画を立てていくことが望ましい。



図 2.34 間伐から 14 年経過後の林分の様子¹⁵⁾

¹²⁾ Ma, Z., Chen, H. Y. H. (2017) Effects of species diversity on fine root productivity increase with stand development and associated mechanisms in a boreal forest. *Jour. Ecology*. 105, 237-245.

¹³⁾ 佐藤孝夫 (1995) 樹木の根系の成長に関する基礎的研究. 北海道林業試験場研究報告 32, 1-54.

¹⁴⁾ 山瀬敬太郎・藤堂千景・鳥居宣之・谷川東子・山本智究・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘 (2022) : 里山林伐採後の樹木根による土壌補強強度の変化、*水利科学*, No.387、p.1-17

¹⁵⁾ 森林総合研究所：生物多様性に配慮した森林管理テキスト事例集 (関東・中部版) 2018 年 11 月

2.5 森林の崩壊防止機能について知っておくべきこと

これまで見てきたように、既往の研究成果によれば、森林が発揮する表層崩壊防止機能は、ある程度の期待はできるが、万能ではなく限界があることが分かる。伐採に伴い一時的に機能が低下することなどは明らかな留意点であり、森林の崩壊防止機能について知っておくべきことを、以下にまとめて指摘しておく。

- 森林は浅い崩壊を防ぐことができるが、大規模な深い崩壊に対しその崩壊防止機能は発揮されない。
- 一定レベル以上の豪雨時崩壊に対し、森林はほとんど影響を及ぼさない。数十年に一度程度の豪雨における浅い崩壊の発生頻度を低下させる、それが森林の表層崩壊防止機能。
- 伐採をすることで、森林の持つ崩壊防止機能は一時的に低下する。
- 伐採後は崩壊防止機能が一時的に低下するが、その後、適切な施業を行い林木の成長を促進させることで崩壊防止機能が高まり、ときに伐採前よりも高まることもある。
- 図 2.35 における（新植木）のラインを左に数年スライドさせ、早期に根系補強力を発現させるオプションとして、エリートツリーという成長の早い樹木が存在する。
- 森林根系による崩壊防止機能の一時的な低下期間を短くし、根系が発揮する断面抵抗力が高まる時期を早期に発現させることが、森林の崩壊防止機能を有効に活用するための方策である。

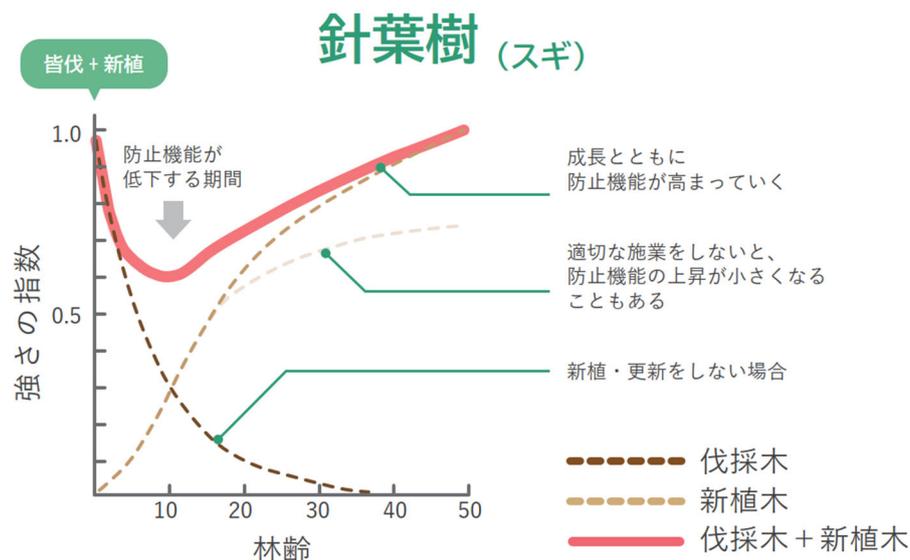


図 2.35 森林伐採後の崩壊防止機能の経年変化（北村ら¹⁶1981 を元に加筆作成）

¹⁶ 北村嘉一・難波宣士（1981）：抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能、林業試験場研究報告、No.313、p.175-208。

3. 森林の崩壊防止機能区分図

3.1 森林の崩壊防止機能区分図とは

(1) 崩壊に関する区分図

崩壊に関する区分図というと、代表的なものとして「山地災害危険地区調査要領（平成 28 年 7 月）林野庁」に基づくものがあり、調査により山腹崩壊危険地区、地すべり危険地区、崩壊土砂流出危険地区を抽出し、地図・GIS 上でその位置を特定、可視化する。主に地形、斜面勾配や集水地形といった情報を基に潜在的に崩壊の発生確率が高い箇所を特定する。このような山腹斜面のどこが崩壊危険度が高いか特定する方法は、これまでに様々な研究（例えば沖村ら¹、平松ら²、Wu and Sidle³）がなされ、地下水の移動形態を考慮する、など多様な方法がすでに存在する。

これに対し、森林の崩壊防止機能区分図は文字通り森林が持つ「崩壊防止機能」の区分図であり、崩壊発生箇所を特定する区分図とはその性質が全く異なる。森林が持つ場所ごとの崩壊防止機能の大小を可視化するものであり、本質的に地形は関係がない（実際には立木の成長に斜面勾配が影響し、間接的な影響はある）。森林の崩壊防止機能区分図は、これまであまり取り組まれてこなかったテーマであり、区分図の作成実績は豊富とはいえない。

(2) 鉄道分野では

鉄道林施業標準解説（昭和 61 年 8 月）では、鉄道沿線の林分に求める密度として、胸高断面面積合計 25m²/ha 以上を求めている。過去の崩壊発生状況等を踏まえ、25m²/ha 未満の密度では鉄道林が発揮する崩壊防止機能が十分ではないとの判断に基づく。施業標準では区分図の作成といった複雑なことまでは求めていないが、森林が持つ崩壊防止機能を維持する観点から、胸高断面面積合計という簡便な管理指標を導入している。

(3) 林野庁による崩壊防止機能区分図

林野庁手引き⁴では、流木の発生危険箇所を特定する、すなわち被災しやすい森林箇所を特定するために、森林の土砂崩壊防止機能を算定する評価手順を確立した。

樹種、立木密度、胸高直径の 3 種について面的な分布情報を整え、GIS 上で崩壊防止機能区分図（分布図）を作成することを意図した手順書である。研究成果に基づいた系統的な森林の崩壊防止機能区分図の作成方法が提唱されたのは、おそらくこれが初めてと思われる。

次節 3.2 では、林野庁手引きによる崩壊防止機能区分図の詳細を説明する。

¹ 沖村孝・市川龍平・藤井郁也（1985）：表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法，新砂防，Vol.37，No.5，4-13.

² 平松晋也・水山高久・石川芳治（1990）：雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究，新砂防，Vol.43，No.1，5-15.

³ Wu, W. and Sidle, R. C.(1995) : A distributed slope stability model for steep forested basins, Water Resources Research, 31(8), 2097-2110.

⁴ 林野庁治山課：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）委託事業成果品

3.2 林野庁手引きによる崩壊防止機能区分図

林野庁手引きにおいては、土砂崩壊防止機能が高い森林を以下の条件で捉え、これら①～③が当てはまらない森林を抽出する手順を構築している。

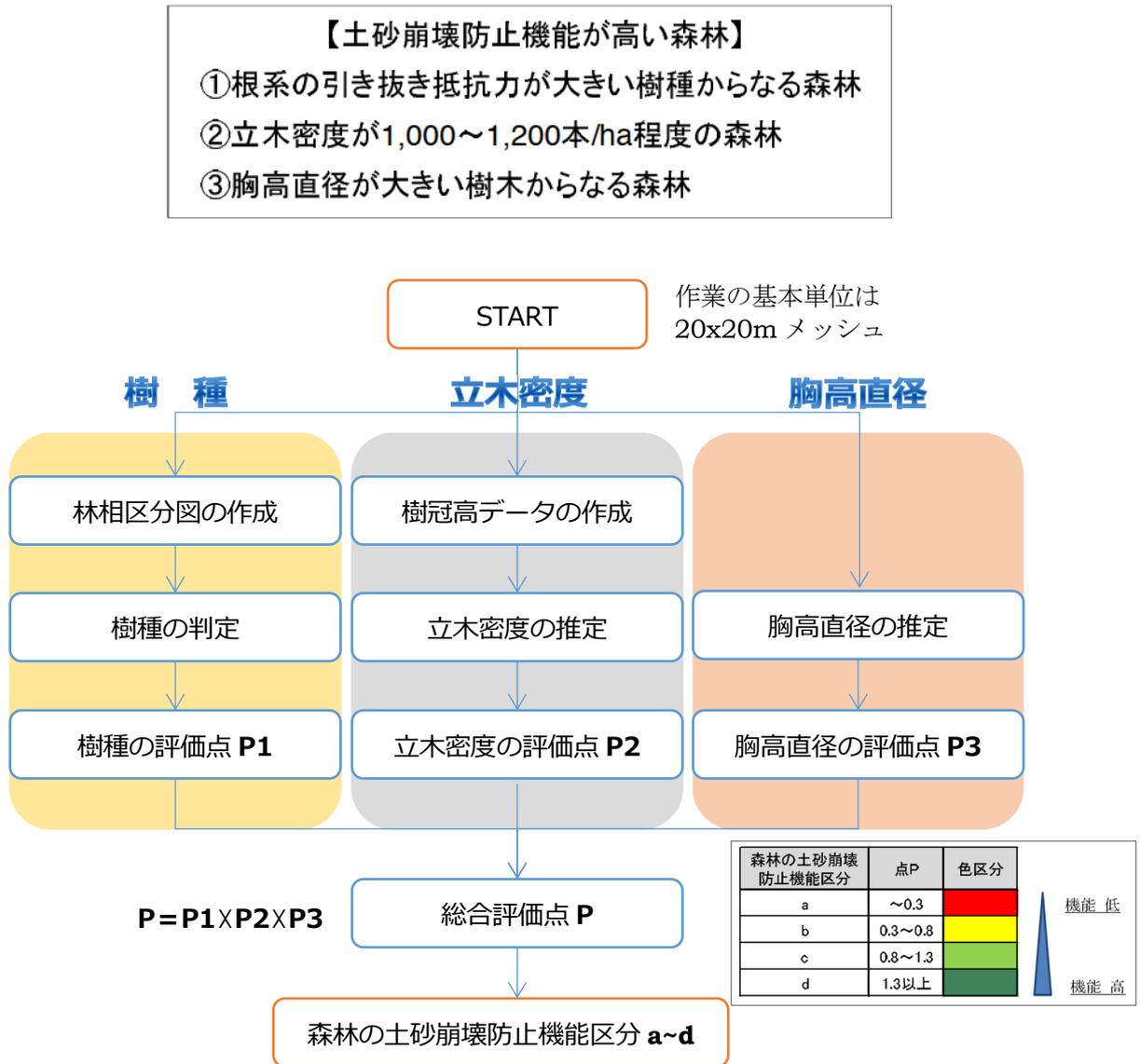


図 3.1 森林の土砂崩壊防止機能区分の判定フロー（林野庁手引きに基づく）

林野庁手引きにより設定される「森林の土砂崩壊防止機能区分」は a, b, c, d の4段階で、赤い **a** が低機能、緑の **d** が高機能となっている。

区分設定に必要となる情報は『樹種』『立木密度』『胸高直径』の3つである。情報の取得方

法は現地調査でもよいが、基本的に 20m メッシュで対象範囲全体の情報が必要となることから、航空レーザ測量等の広範囲情報をベースに作業することが多い。

表 3.1 に示す基準で樹種、立木密度、胸高直径それぞれに、評価点 P1、P2、P3 を算定し、掛け合わせて総合評価点 $P=P1 \times P2 \times P3$ が算出される。算出された総合評価点 P より表 3.2 に基づき森林の土砂崩壊防止機能区分が決定される。

樹種： 評価点 P1
 立木密度： 評価点 P2
 胸高直径： 評価点 P3

→ 総合評価点 $P=P1 \times P2 \times P3$

表 3.1 評価点 P1, P2, P3 の配点 (林野庁手引きより引用)

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 3.2 総合評価点 P による森林の土砂崩壊防止機能区分の判定表 (林野庁手引きより引用)

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



機能 低

機能 高

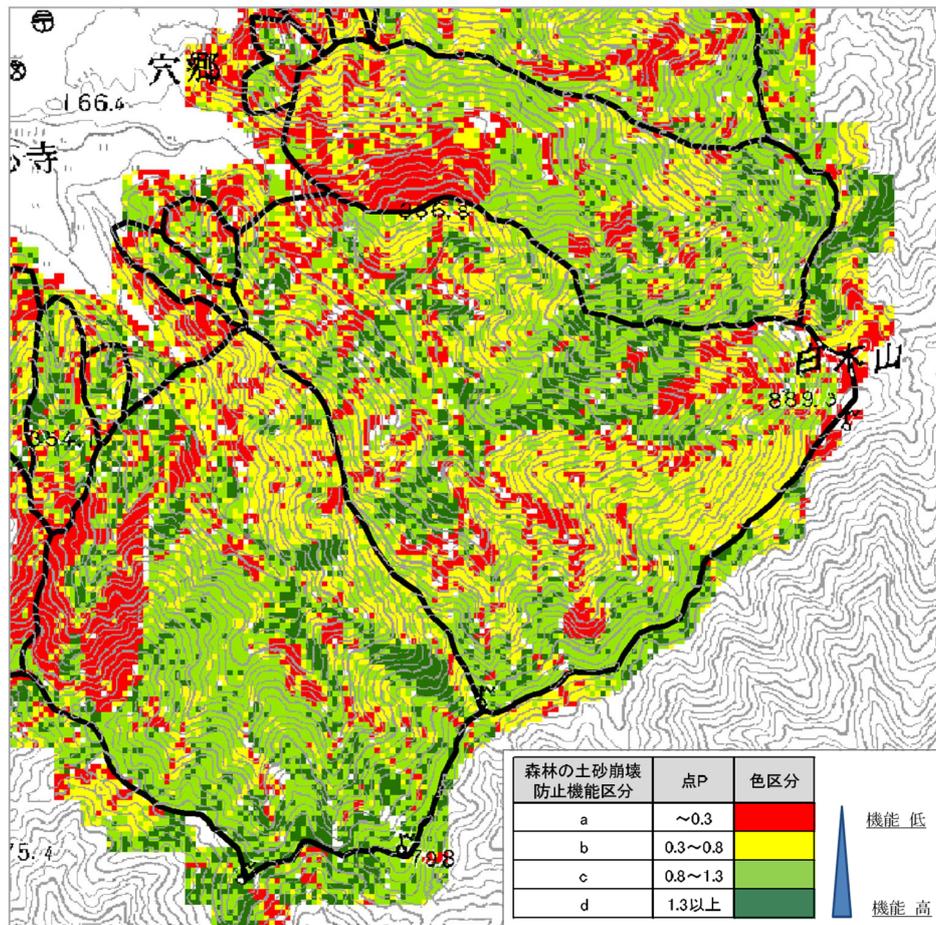


図 3.2 森林の土砂崩壊防止機能区分図の例（林野庁手引きより引用）

3.3 ΔC 及び根量（ W_r ）に基づく崩壊防止機能区分図

林野庁手引きとは異なる方法で崩壊防止機能をはかる指標として、根系が発揮する断面抵抗 ΔC と根量 W_r の2種類を取り上げる。崩壊防止機能区分図（マップと呼ぶ）の作成では、以下の手順を踏む。

基礎作業

1. 検討単位は20~100m程度のグリッド、又は林班/小班単位とする。
LPデータ等から推定された樹種、樹高と立木密度を検討単位ごとに整理する。
2. 樹種、樹高と立木密度から胸高直径を推定する。
樹高~胸高直径の関係は現地データがあれば回帰式、なければ当該地域の密度管理図を用いる。
3. 下記4~6の手順をそれぞれ実施し、 ΔC マップと W_r マップを作成する。

ΔC マップ（根系が発揮する断面抵抗力）の作成過程

4. 検討単位ごとに立木密度と胸高直径を整理し、胸高断面積合計ΣA [m²/ha]を算定する
5. 北原の簡易式を使い、ΔCを算定する。

$$\Delta C = 9.767 \times \alpha (\Sigma A)^{1.4}$$
 ただし、樹種別係数α：ヒノキ0.00330, スギ0.00393, 広葉樹0.00198
 ΔC [kN/m²]、ΣA [m²/ha]
6. ΔC マップとして、森林の崩壊防止機能区分図を作成する。

Wr マップ（根重量）の作成過程

4. 胸高直径を基に荻住の単木の根量(地下部重量)式を用いて、単木の根重量(乾重[kg/本])を算定する。スギとヒノキの例を図 3.3 に示す。
5. 根重量[kg/本]に立木密度を乗じて、単位面積当たり根重量 Wr [kg/m²]を検討単位ごとに算定する。
6. Wr マップとして、森林の崩壊防止機能区分図を作成する。

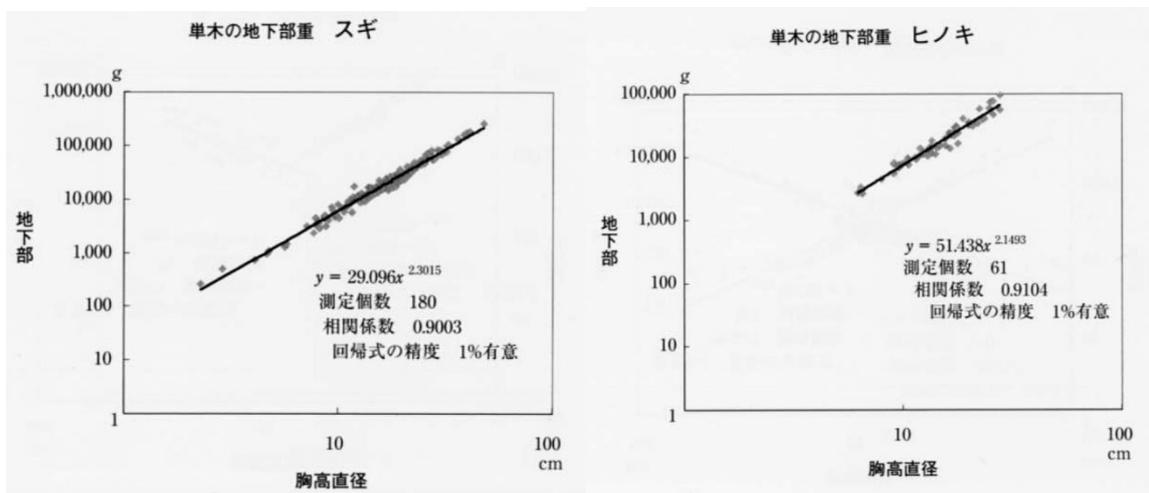


図 3.3 単木の胸高直径と地下部重の関係（荻住昇 2010⁵）

ΔC及びWrを使った崩壊防止機能区分図は、次の3.4にて例示する。

⁵ 荻住昇(2010)：最新樹木根系図説 8章森林の生産と根、誠文堂新光社、2066pp.

3.4 3種類の崩壊防止機能区分図の比較

広島県の国有林を対象として、林野庁手引き、 ΔC 、 W_r の3種指標による崩壊防止機能区分図を作成・比較した。対象地は以下の条件である。

- ・広島県に位置する国有林、面積は2.1km²、解析グリッドサイズは10m
- ・樹種はヒノキを中心にアカマツ及び針広混交林が分布
- ・本数密度は一部で2,000本/haを超えるが、おおむね800~1,600本/ha

なお、この例では10mグリッドで検討を行ったが、結果的に10mは作業手間が増大するに比して得られる恩恵が少なく、グリッドサイズは20m以上とすることを推奨する。

1. 林野庁手引きによる区分図

- ・解析範囲の中央やや左に若齢ヒノキ林（10~20年生）が存在し、林野庁手引きとその他の指標（ ΔC 、 W_r ）を比べるとこのヒノキ林の評価について大きく異なる結果が得られた。
- ・林野庁手引きの指標P値では若齢ヒノキ林のほとんどが赤く、崩壊防止機能が低い判定。
- ・若齢ヒノキ林は立木密度が1,800~2,000本/ha区分に該当する。林野庁手引きの基準（表3.1参照）では800~1,600本/haが最も強い密度区分（得点P2=1.0）であるのに対し、1,800~2,000本/ha区分は得点P2=0.4であり、40%の強さとなる。

2. 根系が発揮する断面抵抗力 ΔC による区分図

- ・簡易式 $\Delta C = 9.767 \times \alpha(\Sigma A)^{1.4}$ を用いて算定。
- ・中央やや左の若齢ヒノキ林は一部が赤くなったが、3種類の指標の中では最も赤い範囲が少ない。 ΔC は胸高断面積合計 ΣA に応じて単調増加となるため、立木密度1,800~2,000本/haであっても林野庁手引きのように弱い評価とはならない。
- ・全体に根重量 W_r による区分図の分布とよく似る。

3. 根重量 W_r による区分図

- ・荻住の単木の根量（現存量）式を用いて算定。
- ・中央やや左の若齢ヒノキ林は一部が赤く、 ΔC よりも赤い範囲は若干増える。
- ・全体に ΔC による区分図の分布とよく似る。

■ 3種の指標（林野庁手引き、 ΔC 、 W_r ）で共通する点

- 樹種、立木密度、胸高直径の情報のみを利用する。
- 樹種別ではスギが最も強く、次いでヒノキ。アカマツ（マツ類）は最も弱い。
- 胸高直径が大きくなると崩壊防止機能が高まる。その度合は線形比例よりも強い。

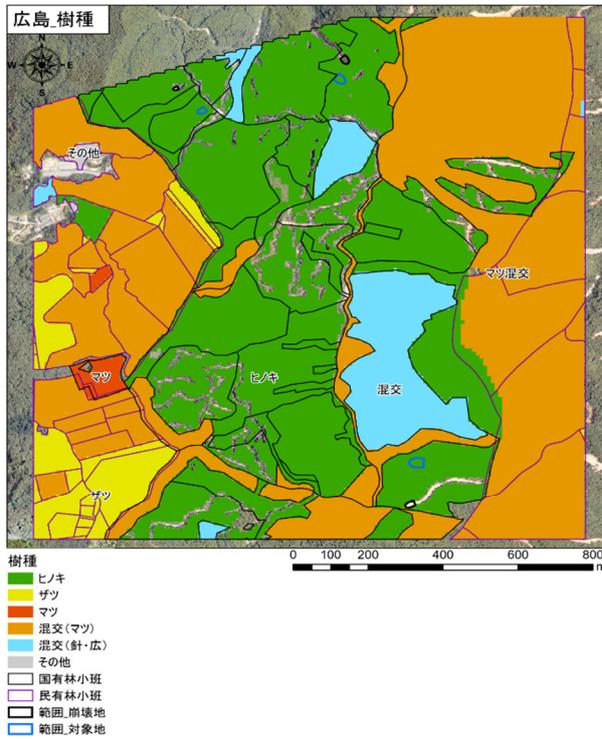
■ 3種の指標（林野庁手引き、 ΔC 、 W_r ）で相違する点

- 考え方の根本（拠り所とする概念）が異なる。
 - ・ 林野庁手引きの区分図は、北原の ΔC に関する調査データや図（例：立木密度は p.I-31 の図 2.9）に基づいて設定された得点表による。
 - ・ ΔC 区分図は、断面で評価される根系が発揮する断面抵抗力に基づく。簡易式で推定すると胸高断面積合計に対して単調増加となる。
 - ・ W_r 区分図は、領域内に存在する根量に基づく。
- 根拠文献が異なる。
 - ・ 林野庁手引きと ΔC は主に北原が調査した研究成果に基づく。
 - ・ W_r 区分図の考えは掛谷・阿部の研究成果に基づく。なお今回の検討では根量の算定に苧住のデータ（単木の根量（地下部重量）式）を利用。
- 立木密度の影響が異なる。
 - ・ 林野庁手引きの区分図は、800~1,600 本/ha が最も強く、それより密でも疎でも弱くなる（表 3.1、図 2.9）。
 - ・ ΔC と W_r による区分図は基本的には立木密度が高いほど根系が発揮する抵抗力が増加する。ただ、立木密度が高いほど胸高直径は細く、1 本当たりの ΔC や根重量[kg/本]が小さくなるため、常に立木密度が高ければ崩壊防止機能が高い状態であるかは場合による。
- 樹種の影響が異なる。
 - ・ 林野庁手引きの基準では最も強い A 種（スギ、針・広天然生林）が 1.6、最も弱い C 種（マツ類）が 0.8 で、スギはマツ類の 2 倍強い（表 3.1）。
 - ・ ΔC 区分では、同じ胸高断面積合計に対する樹種別係数は、
樹種別係数 α ：ヒノキ0.00330， スギ0.00393， 広葉樹0.00198
であり、広葉樹を100とすると、ヒノキ167、スギ198の強さである。
 - ・ W_r マップをスギとアカマツで比較すると、壮齡樹でスギはアカマツの 1.4 倍ほど強い。林野庁手引きの 2 倍ほどではないが、いずれもマツは弱い評価となっている。

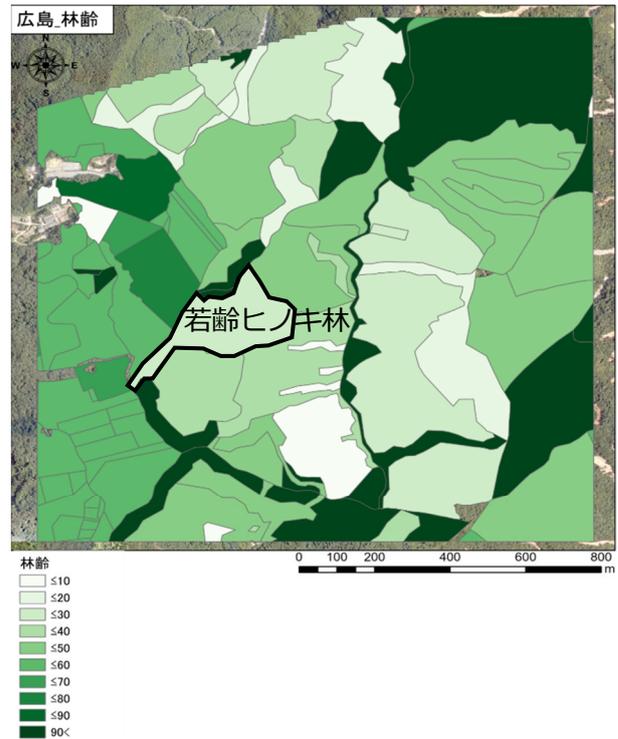
全く同じ林分情報に基づき、林野庁手引き、 ΔC 、 W_r の 3 種で作成される区分図を比較すると、林野庁手引きが他の 2 種とは異なる傾向となることが分かった。林野庁手引きは樹種別にはスギをより強く評価し、また針葉樹に関しては立木密度の適正範囲が存在し、密度が高すぎても崩壊防止機能は低下する。それぞれの指標がどこをより強く評価するか、という部分で違いがある。

一方で、 ΔC と W_r は同じ林分情報を与えたときは、比較的そのアウトプットは似通ったものになることも判明した。したがって、 ΔC と W_r はどちらか 1 つに絞り込むことを想定し、両者について次節でさらに詳細に検証する。

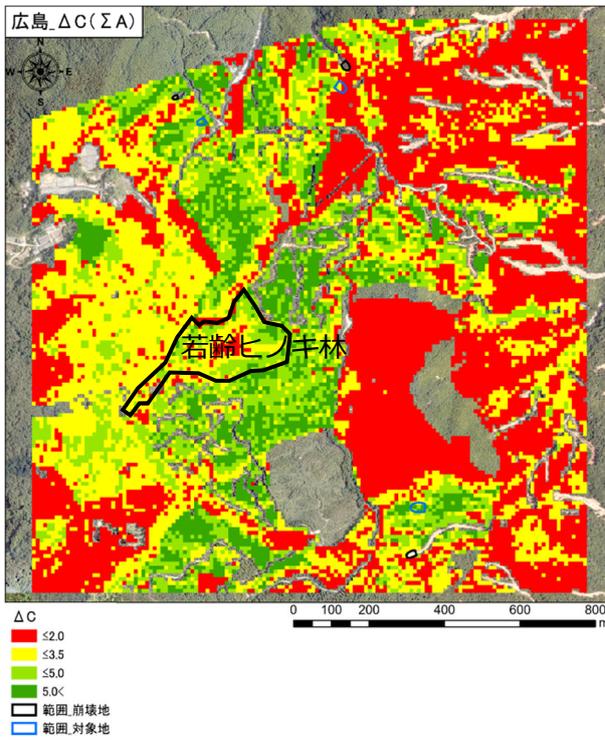
樹種区分図



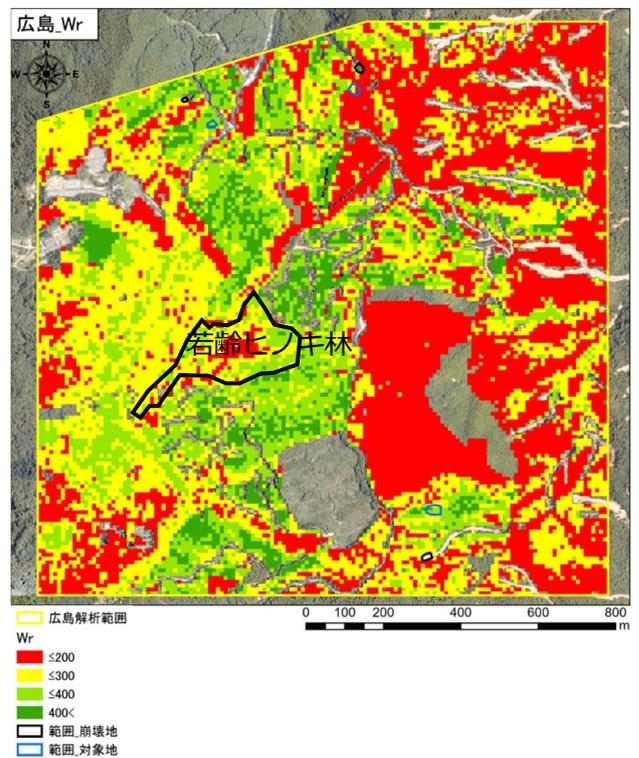
林齢区分図



断面抵抗力 ΔC による区分図



根重量 W_r による区分図

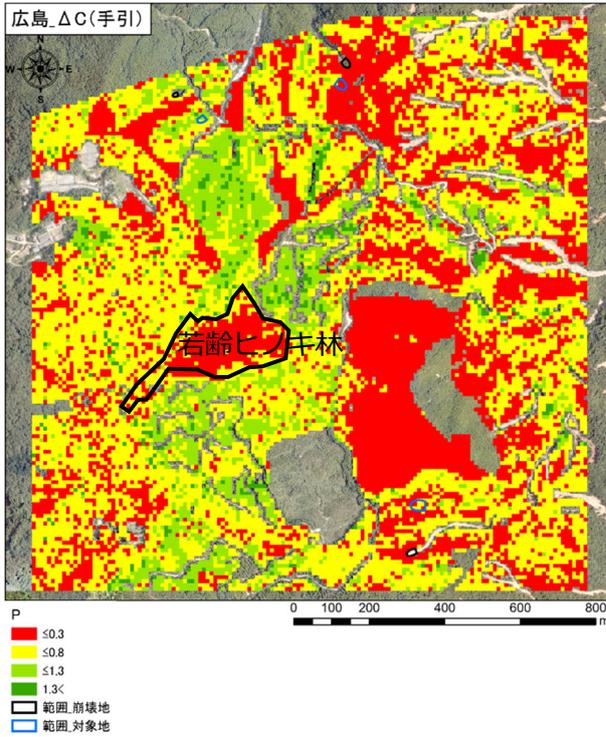


単位：kN/m²

単位：地下部重量 W_r [kg/10m グリッド]

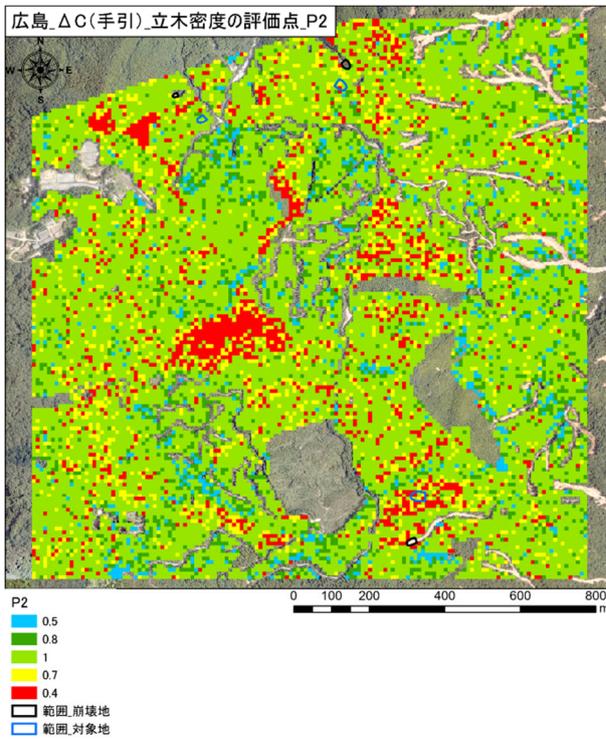
無地部分は森林外又は低樹高のためグリッド解析が困難な範囲

林野庁手引きによる区分図 P=P1 x p2 x p3

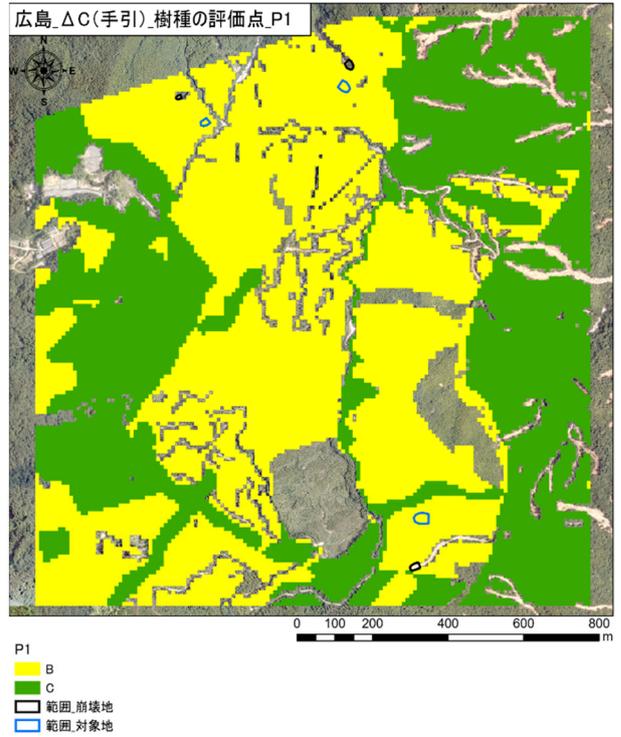


単位：評価点 P [無次元]

林野庁手引き・立木密度の評価点 P2

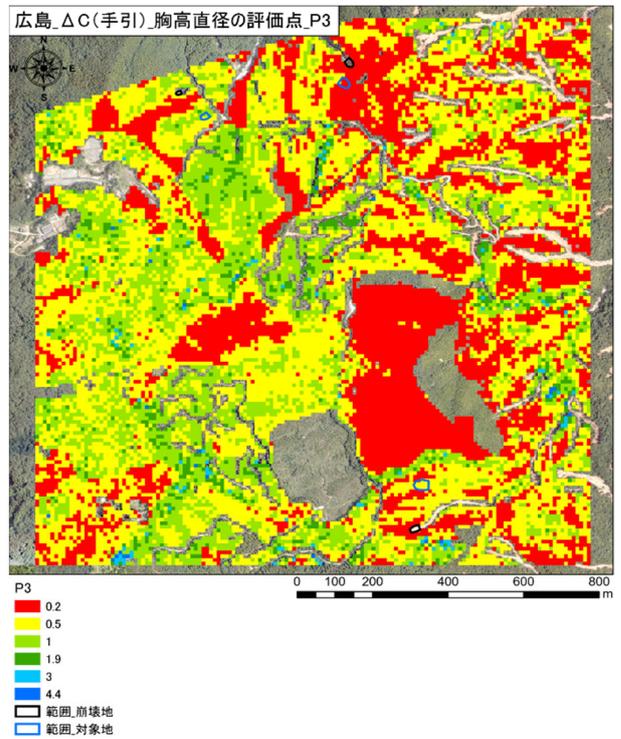


林野庁手引き・樹種の評価点 P1



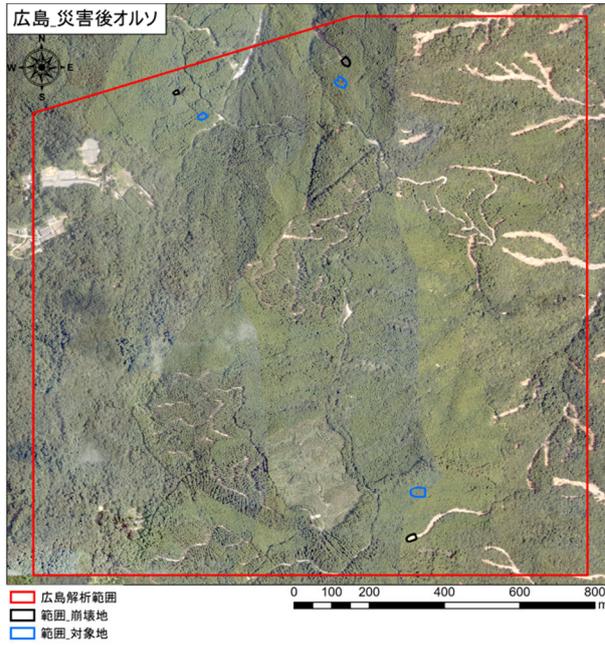
単位：評価点 P1, P2, P3 [無次元]

林野庁手引き・胸高直径の評価点 P3

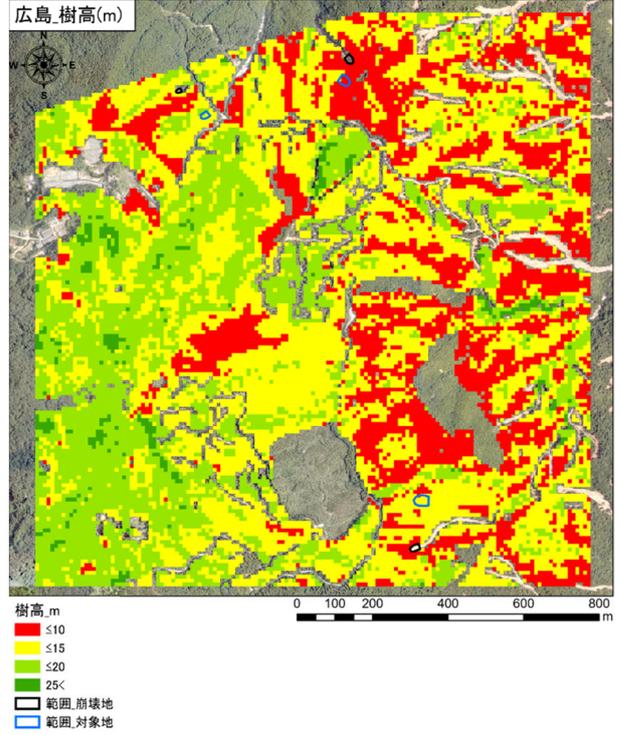


無地部分は森林外又は低樹高のためグリッド解析が困難な範囲

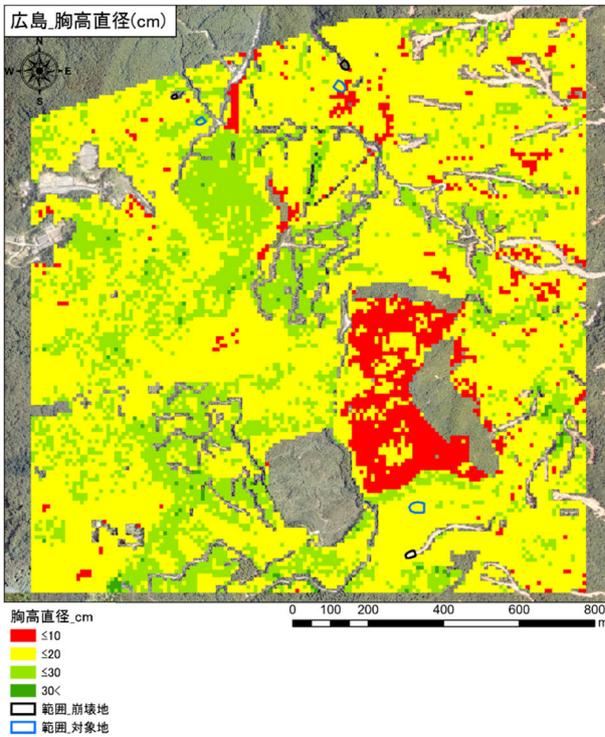
オルソ写真



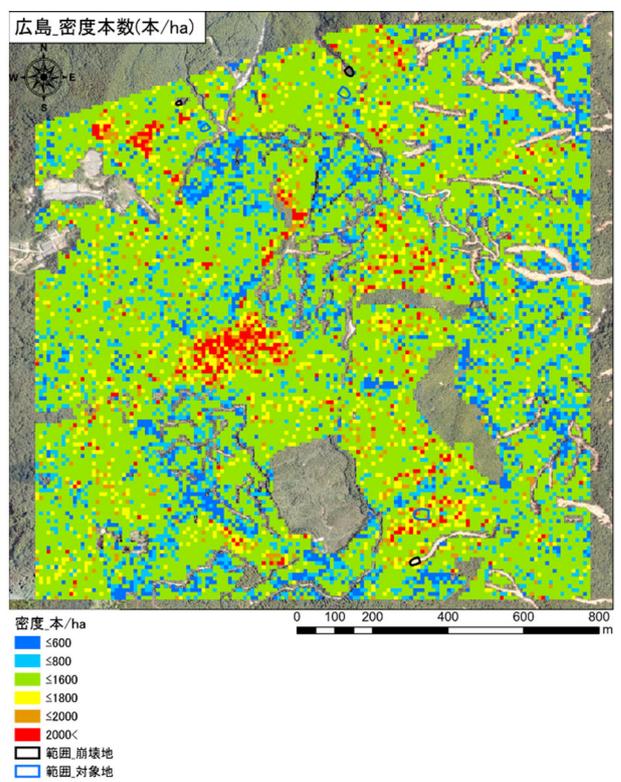
樹高分布図



胸高直径分布図



立木密度分布図



無地部分は森林外又は低樹高のためグリッド解析が困難な範囲

3.5 ΔC と W_r の関係

ΔC と W_r 、それぞれの特徴を整理・比較し、どちらかの指標を持って一方を代表させることを検討する。

3.5.1 ΔC と W_r ：それぞれの定義

ΔC と W_r はその定義が異なる。

- ・ ΔC は地中の鉛直断面で評価される根系が発揮する断面抵抗力である。単位例： kN/m^2
- ・ W_r は土塊領域内に存在する根量である。単位例： kg/m^2 , $\text{kg}/10\text{m}$ グリッド

以下に両者の定義を説明する。

(1) 根系が発揮する断面抵抗力 ΔC

ΔC は単位断面積当たりの根系が発揮する断面抵抗力（例えば kN/m^2 ）で、断面掘削調査により得られる。

(2) 根量 W_r

掛谷・阿部は根系が発揮する崩壊防止機能は、表層土中の根量 W_r (Weigt of root：根の重量) に依存すると考えている。掛谷・阿部が想定する表層崩壊の発生機構は以下のようである。

- ①崩壊地底面・側面に形成されるすべり面（移動土層と不動土層の境界）で根の効果が発揮される、という従来の考え方とは異なる崩壊機構が存在する。
- ②すなわち、崩れ落ちる表層土は地表面より下層に向かって徐々に孔隙が減少し、土質強度も地表面より下層に向かって徐々に強くなり、基岩層や基盤層に到達する。このため、表層土内に薄く平滑なすべり面が形成される土質条件は整っておらず、すべり面を貫いて生育する根が崩壊防止機能を発揮するという考え方は適切ではない。
- ③豪雨などにより多量の雨水が表層土中に浸透すると、表層土の自重が増え、表層土を斜面下方に崩壊させるせん断荷重が徐々に増える。この場合、薄いすべり面は発生せず、表層土全体が斜面下方に向かって徐々に変形を起こし、崩壊に至るのではないかと推察できる。
- ④表層土全体に分布する根は鉄筋コンクリート内の鉄筋のように表層土の変形を抑制して崩壊防止機能を発揮すると考えられる。

さらに詳細な内容は先の 2.3.2 を参照されたい。

3.5.2 現地調査結果で見る ΔC と W_r

広島の新ノキの国有林において、現地調査（5か所）で得られた ΔC と W_r のデータ散布図を図 3.4 に示す。

現地掘削により取得された ΔC のうち、赤いハッチング範囲に含まれる ΔC が 10kN/m^2 未満、青いハッチング範囲に含まれる ΔC が 10kN/m^2 以上のデータである。p.I-45 に記したように根系が発揮する断面抵抗 ΔC が 10kN/m^2 を超過することはごく稀であり、青い範囲にプロットされたデータは過大な ΔC が得られている、といえる。

現地調査で取得された ΔC が過大となる理由としては、調査断面が幅 1m ×深さ 0.5m の掘削範囲であり、狭い範囲のデータ計測であることから、根の存在量のばらつきの影響が挙げられる。

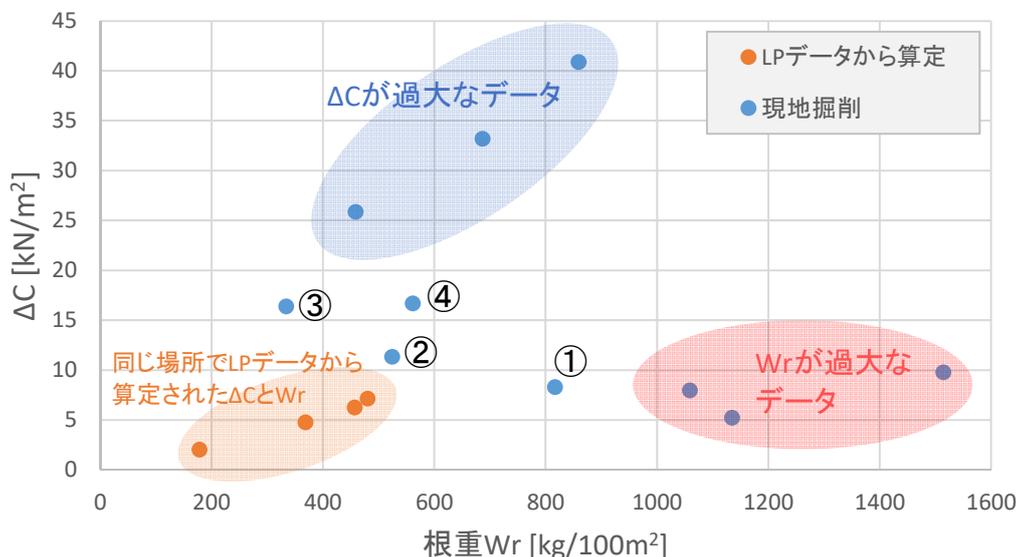


図 3.4 現地調査で得られた ΔC と根重 W_r の関係

図 3.4 には、掘削調査を実施した箇所について、LP データ解析から得られた ΔC と W_r を併せてプロットしている。

LP 解析では比較的広い範囲（10m グリッド）に存在する立木情報が平均化される。そのため、具体的な 2 立木の間を調査する現地掘削データと比べると、ばらつきが抑制され平均的な評価をしていて、図中の左下に集中してプロットされている。

現地掘削データで ΔC と W_r のいずれかが過大となったデータを除く図 3.4 の①～④の 4 データについて、根系を露出させたときの写真を図 3.5 に示す。

根系の伸長状況を視認するレベルにおいては、 ΔC 又は W_r が過大となった掘削箇所と、①～④のように比較的平均的なデータが取得された箇所の違いは判然としない。大きな水平根が存在すると過大値がしやすいかと思われたが、③④のように大きな水平根が存在しても過大とならない場合もある。

① 540は2・36年生ヒノキ



根重量 [g] (土付き、乾燥前)

		ブロック	4	3	2	1		
		立木距離	125	94	63	31		
階層	深度	割合	100%	75%	50%	25%	合計	
1	20	25%	180	340	1,282	4,202	6,004	
2	40	50%	94	184	199	2,051	2,527	
3	60	75%	103	478	562	626	1,769	
4	80	100%	石	石	93	256	349	
		合計	377	1,002	2,135	7,135	10,648	

② 540は1・37年生ヒノキ



根重量 [g] (土付き、乾燥前)

		ブロック	1	2	3	4		
		立木距離	39	78	116	155		
階層	深度	割合	25%	50%	75%	100%	合計	
1	20	33%	2,415	560	49	295	3,318	
2	40	67%	953	157	308	538	1,956	
3	60	100%	273	318	502	421	1,513	
		合計	3,641	1,035	859	1,253	6,786	

③ 540た・24年生ヒノキ



根重量 [g] (土付き、乾燥前)

		ブロック	3	2	1		
		立木距離	105	70	35		
階層	深度	割合	100%	67%	33%	合計	
1	20	50%	482	1,070	2,510	4,061	
2	40	100%	74	50	57	180	
		合計	555	1,120	2,566	4,241	

④ 540た・24年生ヒノキ



根重量 [g] (土付き、乾燥前)

		ブロック	1	2	3		
		立木距離	31.6667	63.3333	95		
階層	深度	割合	33%	67%	100%	合計	
1	20	50%	4,429	1,850	277	6,555	
2	40	100%	200	225	192	616	
		合計	4,628	2,075	468	7,171	

図 3.5 ①～④の実際の根系分布と根重量データ

3.5.3 ΔC と W_r の相関関係

図 3.6 は、上段図が広島の高木の国有林、下段図は高知の杉の国有林について ΔC と W_r をプロットした図である。樹種、胸高直径、立木密度の林分情報は LP データに基づいて解析したもので、 ΔC と W_r とも同じ林分情報に基づきそれぞれ小班単位で算定した。

高木、杉とも ΔC と W_r の間には強い正の相関がみられる。

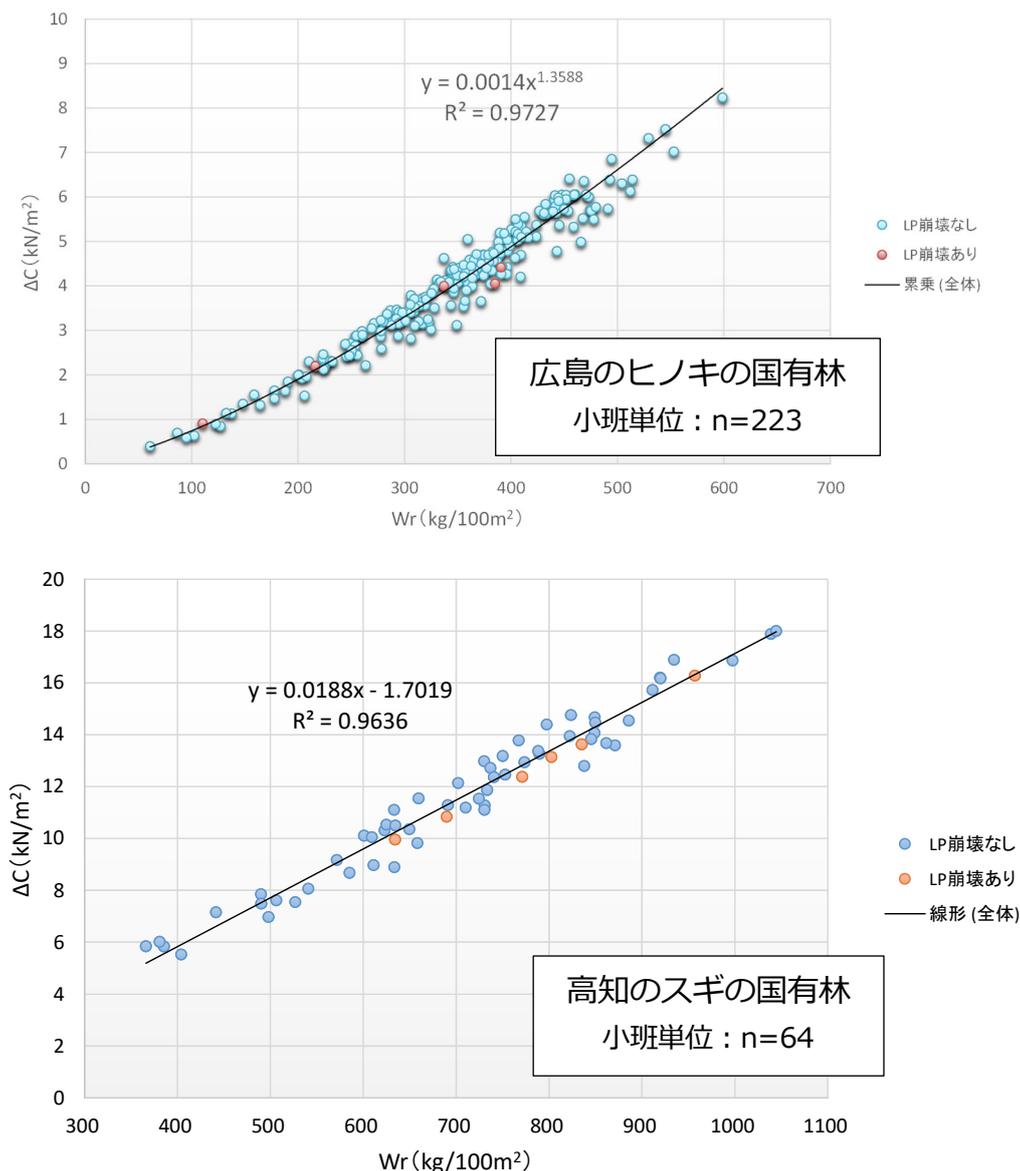


図 3.6 LP データ解析による ΔC と W_r の相関図 (小班単位：高木、杉別)

高木、杉の散布図に今回実施した現地調査による ΔC と W_r のデータをプロットしたのが図 3.7 である。図 3.7 では高木と杉、両者を同じ図の中にプロットした。

ヒノキとスギでは ΔC と Wr がプロットされる範囲に違いがあり、ヒノキよりもスギが大きい ΔC 及び Wr となる。これは林野庁手引きを始め、3種の指標いずれにおいてもスギが最も強い樹種に位置付けられていることに対応している。

図中には広島ヒノキの累乗回帰線 ($\Delta C = 0.0014 Wr^{1.3588}$) を描画した。回帰線はヒノキのデータを対象としたものだが、スギのデータもおおむね回帰線上に位置し、両者はほぼ共通とみなしてよい結果である。

図 3.7 にプロットされた現地で取得された掘削調査データのばらつきは大きく、先述のように一部のデータは過大な ΔC 、 Wr 値となっていることが分かる。一方で、ばらつく範囲のちょうど中間付近をヒノキ回帰線が通過していることから、この回帰式を持って ΔC と Wr 、両者の関係を評価することは問題なさそうである。

以上より、 ΔC と Wr の間に正の相関関係を推定することは妥当と判断され、その回帰関係はスギ、ヒノキ共通で次式により算定される。

■根系が発揮する断面抵抗 ΔC と根重量 Wr の関係式 (対象樹種：スギとヒノキ)

$$\Delta C = 0.0014 Wr^{1.3588}$$

ただし、 Wr : $\text{kg}/100\text{m}^2$ 、 ΔC : kN/m^2

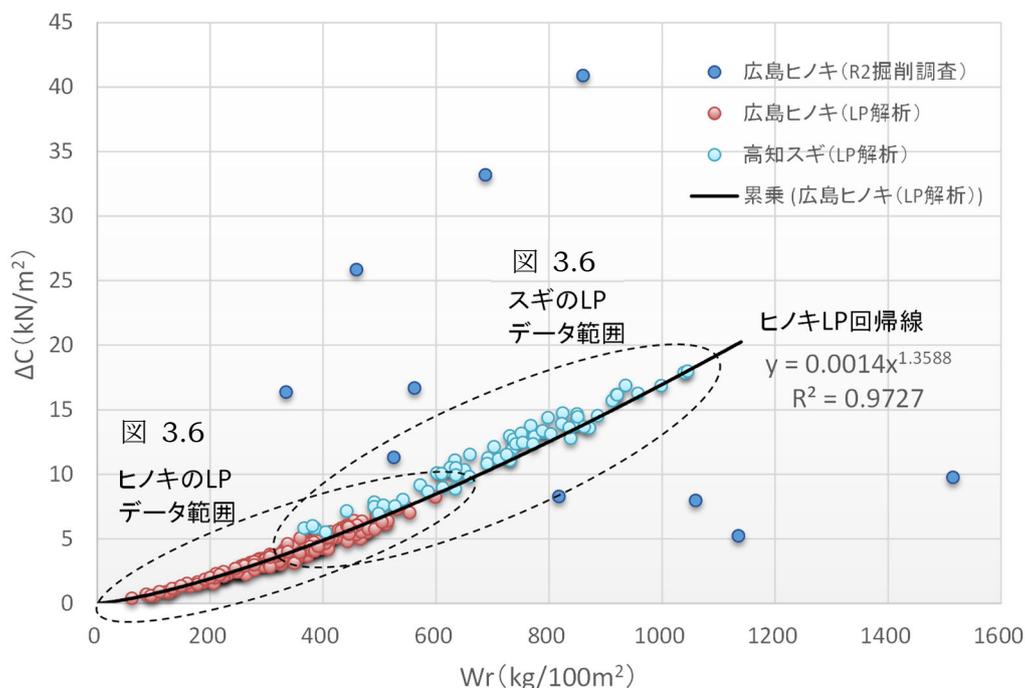


図 3.7 ΔC と Wr の相関図

3.6 林野庁手引き、 ΔC 、 Wr の使い分け

図 3.8 は先の図 3.7 のデータ存在範囲（現地調査で得られた ΔC と Wr ）にハッチングを追記したものである。現地調査のデータはばらつき、存在範囲が広い。

図 3.9 は、同じ広島の新ノキの国有林で林野庁手引きの方法で算定された評価点 P を縦軸とし、 $P \sim Wr$ 散布図としたものである。 $P \sim Wr$ 関係もばらつきが大きく、回帰線の決定係数は 0.284 と小さい。一方で、図 3.8 の $\Delta C \sim Wr$ 関係は両者の相関は非常に高く、回帰線の決定係数は 0.973 と非常に高い。なお、これらの図の数値（林野庁手引き、 ΔC 、 Wr ）は全て、同じ林分情報（樹種、胸高直径、立木密度）に基づき算定されたものである。

図 3.9 にデータ存在範囲をハッチングで追記したが、図 3.8 と図 3.9 のハッチング範囲、つまりばらつき加減はよく似ている。

森林の崩壊防止機能を評価する 3 種の指標、林野庁手引き、 ΔC 、 Wr を比較すると、 ΔC と Wr は同じ林分情報に基づく限り、単一の回帰線で両者を変換できる程度に同一の指標とみなせる一方で、林野庁手引きの P は他の 2 つの指標と異なる傾向が見られた。

林野庁の評価点 P の考え方は、北原の ΔC 研究データに基づいたものだが、胸高直径の取扱いや樹種評価において、他 2 つの指標とは異なる要因が加味されていて、 P は異なる性質を呈する。林野庁では、胸高直径が大きい場合に高評価を与え、立木密度が高い場合を低評価とする。これに対し、根量 Wr は立木密度が高ければ、単位面積当たりの樹木本数が増え、根量は増加する。ただし、高密度では小径木となり 1 本当たりの根量が少ないペナルティが発生する。立木密度が高いときに小径木となるトレードオフ関係を表現するのが実質的に胸高断面積合計 ΣA であり、簡易推定式による ΔC ($\equiv \Sigma A$) と Wr がほぼ同一の指標とみなせるのはそのためと思われる。

現在、森林の崩壊防止機能を評価する指標として、林野庁手引きの P 、 ΔC 、 Wr という 3 種類が存在するが、このうち ΔC と Wr はおおむね同一の指標として解釈できそうだ、ということが分かった。一方で、林野庁手引きの P は ΔC や Wr と比較すると傾向が異なり、図 3.9 に示すように P と Wr の散布図のばらつきは大きく、現地調査で取得された散布図である図 3.8 と同程度のばらつき具合である。

ΔC と Wr の関係を見ると、両者は同質な指標で現地に見られるようなばらつきはない。したがって、 ΔC 又は Wr に林野庁手引きの P を加えることで、図 3.9 に見られるように幅広く根系が発揮する断面抵抗力を評価できるようになる。林野庁手引きの P と ΔC 、又は林野庁手引きの P と Wr というようにいずれか 2 つの指標を組み合わせ、森林の崩壊防止機能を評価することが望ましいといえる。

P と ΔC 、又は P と Wr のどちらの組合せを使うのがよいかは、 ΔC と Wr の両者間に大きな違いが見られず、どちらでもよい。 ΔC には簡易算定式が存在し、作業手間が若干軽微であることから、本ガイドラインの第 II 編では ΔC を使っているが、 P 以外の第 2 の指標として Wr を使うことも何ら問題はない。

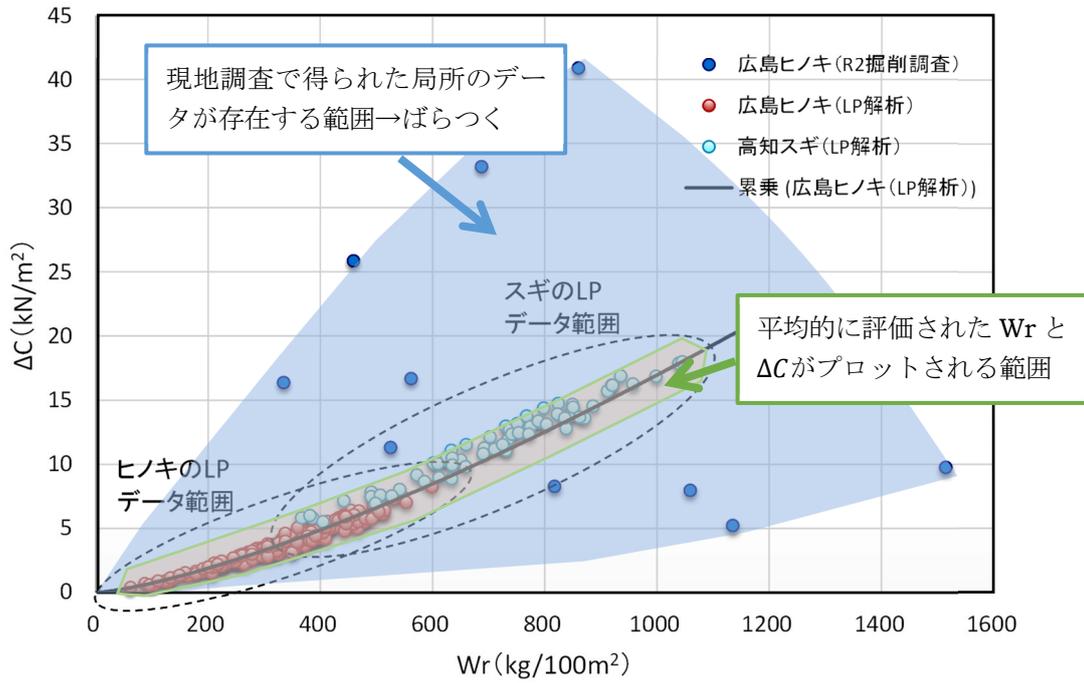


図 3.8 現地調査による $\Delta C \sim W_r$ 散布図のばらつく範囲 (図 3.7 にハッチングを追記)

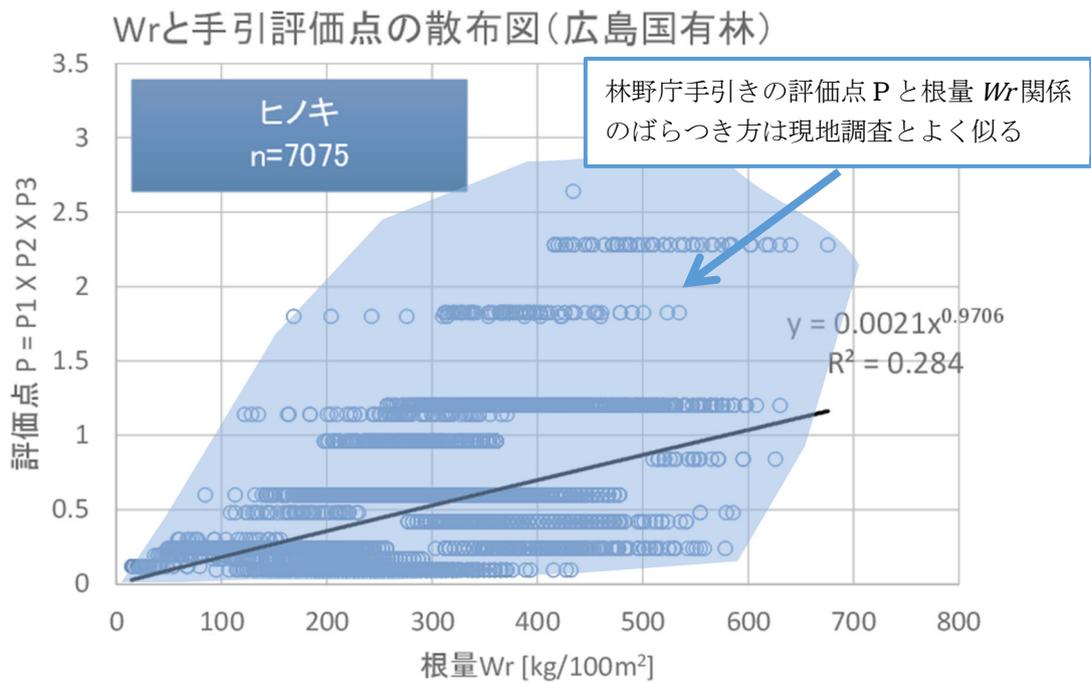


図 3.9 林野庁手引き評価点P $\sim W_r$ 散布図

第 I 編 まとめ—表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系

これまでの研究により、若齢段階の間伐は、残存木の根系を太くさせ、斜面安定に寄与すること、密度を管理することで根系が発揮する断面抵抗力 ΔC を増加させられること、また、林分状態に応じた ΔC の簡易な推定方法も提示されている。立木密度の変化や胸高直径の増大といった林分状況の変化に対応して根系が発揮する断面抵抗力が増えるのか、減るかを判断する手法は既に確立されている。

一方で、具体的な施業データと崩壊発生データとを突き合せ分析した研究成果では、特定の施業が森林の崩壊防止力を向上させる、といった明瞭な傾向を見出すことはできず、間伐により強くなる場合と逆に弱くなる場合の両者が混在している。これは伐採後のどの時期に根系の強さを計測したのか、どの場所の抵抗力又は根量なのか、といった時間軸や計測する場所の問題をはらむものと推測される。

森林整備による林分の時間変化（立木密度や胸高直径の変化）については、従来より林業分野で確立された知見が既にある。したがって、施業に伴う林分状況の時間変化と根系が発揮する断面抵抗力の時間変化、これらをつないで検証することで、時間軸の問題については対処が可能である。すなわち、森林整備とそれを受けての根系が発揮する断面抵抗力の時間変化を追いかけて検討することができる。

第 II 編では、森林整備と根系による断面抵抗力の双方を両立させるためにどのような方法で定量化し、具体的に評価するのか、その方法論と考え方を見ていく。

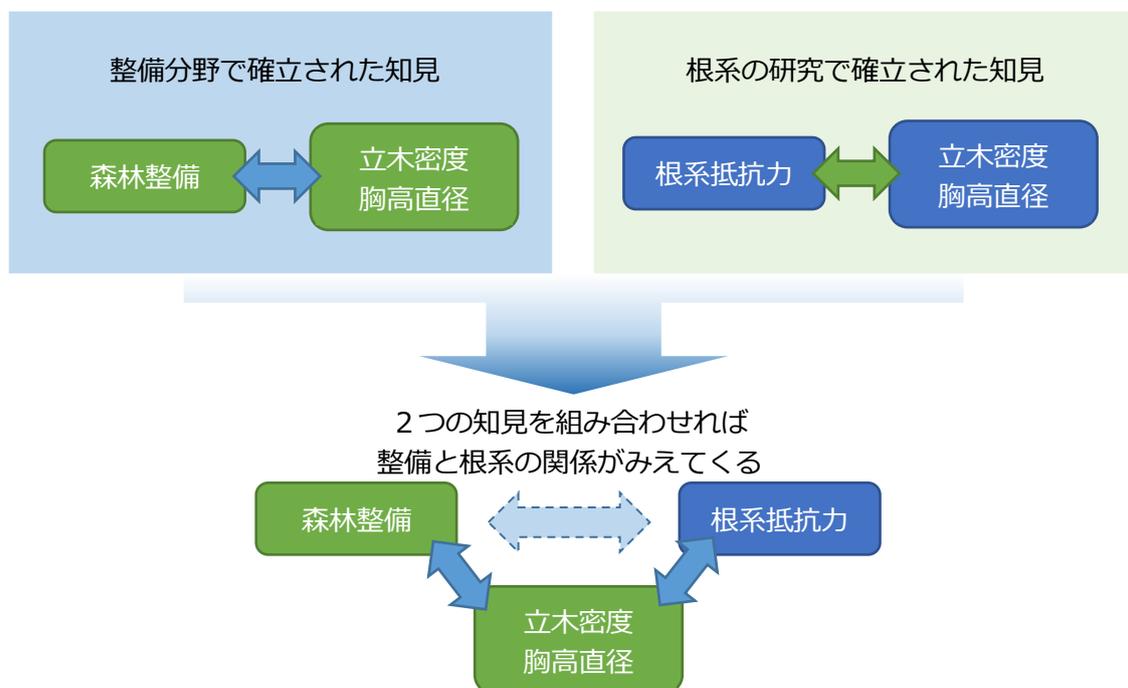


図 3.10 森林整備の知見と根系に関する知見の連携