

目 次

第4部 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

第1章 事業の概要	1
第1節 課題名	1
第2節 調査目的	1
第3節 研究開発計画	1
第4節 実施期間及び年次計画	1
第5節 調査体制	2
第6節 調査内容	2
第1項 調査方針の検討・決定	2
第2項 既存文献調査	2
第3項 原位置せん断試験	3
第4項 現地実態調査及び現地検討会	3
第5項 検討委員会及び作業部会の開催	3
第6項 調査結果の取りまとめ	3
第2章 調査内容	5
第1節 事業計画	5
第2節 既存文献調査	7
第1項 根系の表層崩壊防止機能や森林整備との関係に関する研究成果等の収集	7
第2項 論文名、著者名、出典、研究成果の概要等が記載された目録の整理	8
第3項 森林整備手法を検討するにあたっての課題等の整理	12
第4項 これまでの根系研究の流れと課題	18
第3節 根系による土の補強効果の工学的評価方法の検討	20
第1項 原位置せん断試験に係るこれまでの経緯	20
第2項 原位置せん断試験の方法	21
第3項 原位置せん断試験の結果	24
第4項 考察	27
第5項 まとめ	31
第6項 引用文献	31
第4節 3次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価方法の検討	33
第1項 3次元的评价の必要性	33
第2項 数値モデルによる定量的評価	33
第3項 モデル斜面における2次元および3次元安定解析の比較	34
第4項 引用文献	38
第5節 現地実態調査	39
第1項 調査箇所の概要	39
第2項 地形測量	39
第3項 簡易貫入試験	41
第4項 根系調査	44
第5項 地形モデル構築	48
第6節 公益的機能発揮のための森林整備の在り方の検討	51
第7節 3カ年間の調査結果の取りまとめ	51

巻末資料 1	検討委員会議事録	53
巻末資料 2	既存文献リスト	75
巻末資料 3	現地実態調査データ	117

第4部 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

第1章 事業の概要

第1節 課題名

「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」

第2節 調査目的

2006年（平成18年）7月の豪雨により、長野県岡谷市の湖南山地で発生した土石砂災害における未間伐林の被害をふまえ、長野県では「災害に強い森林づくり」を目指し、レーザー測量による崩壊発生源としてのゼロ次谷地形の抽出などの先進的な技術を適用するとともに、森林の公益的機能の理論的な支柱となる樹木根系の土砂崩壊防止機能の定量的評価に取り組んだ経緯がある。特に、樹木根系の強度については、引き倒し試験や根系の引き抜き試験等を数多く行い、樹木の水平根の働きが注目されるきっかけとなった。

2017年（平成29年）7月の九州北部豪雨では、谷頭を起源とする表層崩壊と同時に発生した流木が下流に流出し、平野部に大きな被害を及ぼしたことにより、これまでの森林整備の考え方を見直し、流木の発生源となる谷頭から谷の出口までの溪畔域を一貫してとらえようとする機運が高まっている。そこで、この間の公益的機能に関する調査・研究成果を整理するとともに、今後の森林の成熟化に伴い求められる災害に強くかつ流木災害を未然に防止するための森林整備の実現に資することを目的とした調査研究に取り組む。

第3節 研究開発計画

- 1) 災害防止と森林整備に関する既往文献調査
- 2) 根系の崩壊防止機能の新たな手法による評価
- 3) 溪畔林等が災害防止機能に及ぼす影響等に係る実態調査
- 4) 水土保持機能評価手法と機能強化のための森林整備のあり方の検討

第4節 実施期間及び年次計画

- 1) 実施期間：3年間（平成30年度～令和2年度）
- 2) 年次計画

表 1.1 3ヶ年計画工程表

事業内容	H30年度	R元年度	R2年度
公益的機能発揮のための森林整備のあり方			
・調査方針の検討・決定			
・既往文献調査			
・原位置せん断試験			
・現地実態調査			
・調査結果の取りまとめ			
・委員会の開催			
・現地検討会			

3) 計画の概要

- ① 各年度に検討委員会を1回、作業部会を2回程度開催するとともに、令和元年度には現地検討会を1回開催し、調査方針及びとりまとめ方法等について検討する。
- ② 既存の研究成果を収集し、森林の公益的機能に対応した森林整備のあり方について整理する。
- ③ 根系を含む土のせん断試験を実施する。
- ④ モデル流域の現地踏査により、流木の発生源となる谷頭から谷の出口までの溪畔域の実態を把握する。
- ⑤ 各年度の調査結果を取りまとめる。
- ⑥ 3カ年の調査結果を取りまとめる。

第5節 調査体制

森林整備技術部会においては、学識経験者及び専門技術者等により構成された検討委員会方式で調査研究を行う。なお、検討委員会を構成する検討委員等は、以下のとおりとする。

また、森林・自然環境技術教育研究センターが委託した「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」の受注者である(株)森林土木施設研究所及び(株)森林テクニクスと連携・分担して調査を実施する。

① 検討委員会（五十音順）

委員長	阿部和時	日本大学教授
委員	埋橋一樹	(株)森林土木施設研究所
委員・主査	落合博貴	元森林総合研究所企画部長
委員	五味高志	東京農工大学教授
委員	志水俊夫	元森林総合研究所企画部長
委員	鈴木貴浩	(株)森林テクニクス
委員・副主査	渡邊悦夫	(株)森林テクニクス

② 作業部会（五十音順）

委員	埋橋一樹	(株)森林土木施設研究所
委員・主査	落合博貴	元森林総合研究所企画部長
委員	鈴木貴浩	(株)森林テクニクス
委員・副主査	渡邊悦夫	(株)森林テクニクス

第6節 調査内容

第1項 調査方針の検討・決定

本調査に係る3カ年の調査内容、調査時期、調査体制等の基本方針について、検討委員会での意見を踏まえて検討する。

第2項 既存文献調査

樹木根系の土砂崩壊防止機能の定量的評価、樹木根系の強度に係る引き倒し試験や根系の引き抜き試験、及び溪畔域における森林整備等に関する内外の既存の研究成果を収集し、森林の公益的機能に対応した森林整備のあり方について整理する。

第3項 原位置せん断試験

従来、根系の崩壊防止機能は一面せん断試験により評価されてきたが、実際には厚みを持ったせん断域が発生して崩壊が起こっていると考えられる。したがって、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、根系を含む土のせん断試験を実施する。

第4項 現地実態調査及び現地検討会

現地実態調査は、モデル流域の現地踏査により、流木の発生源となる谷頭から谷の出口までの溪畔域の実態を把握する。特に、溪床・溪岸の荒廃状況（崩壊地、荒廃溪流）、流木や倒伏木の発生状況、周辺林相等に着目し、荒廃状況と森林整備状況の関係を確認する。

現地検討会は、2年目（令和元年度）に行うこととし、現地実態調査箇所の視察を行う。

第5項 検討委員会及び作業部会の開催

検討委員会は、委員による本研究の方針及びとりまとめ内容等の討議を通じて、よりよい成果の作成を目指すために行う。

また、作業部会は事務局が主体となり、検討委員会及び現地実態調査を効率的に行うために行うもので、作業部会の内容に応じて委員の招集を行い、適切な時期及び回数実施する。

下記に委員会及び現地検討会の予定を示す。なお、本研究の年度は7月から翌年の6月までである。ただし、令和元年度は新型コロナウイルスの影響により9月まで延長された。

表 1.2 検討委員会の計画案

年次	現地検討会	検討委員会
平成30年度 (2018年度)	なし	1回 調査基本方針の検討（11月19日）
令和元年度 (2019年度)	1回 現地実態調査地 視察（11月11日）	1回 平成31年度調査結果のとりまとめ等 （令和2年8月4日）
令和2年度 (2020年度)	なし	1回 調査結果のとりまとめ等（4月～6月頃）

第6項 調査結果の取りまとめ

既往文献調査、原位置せん断試験及び現地実態調査の結果を総括し、森林の公益的機能に対応した森林整備のあり方について提言する。

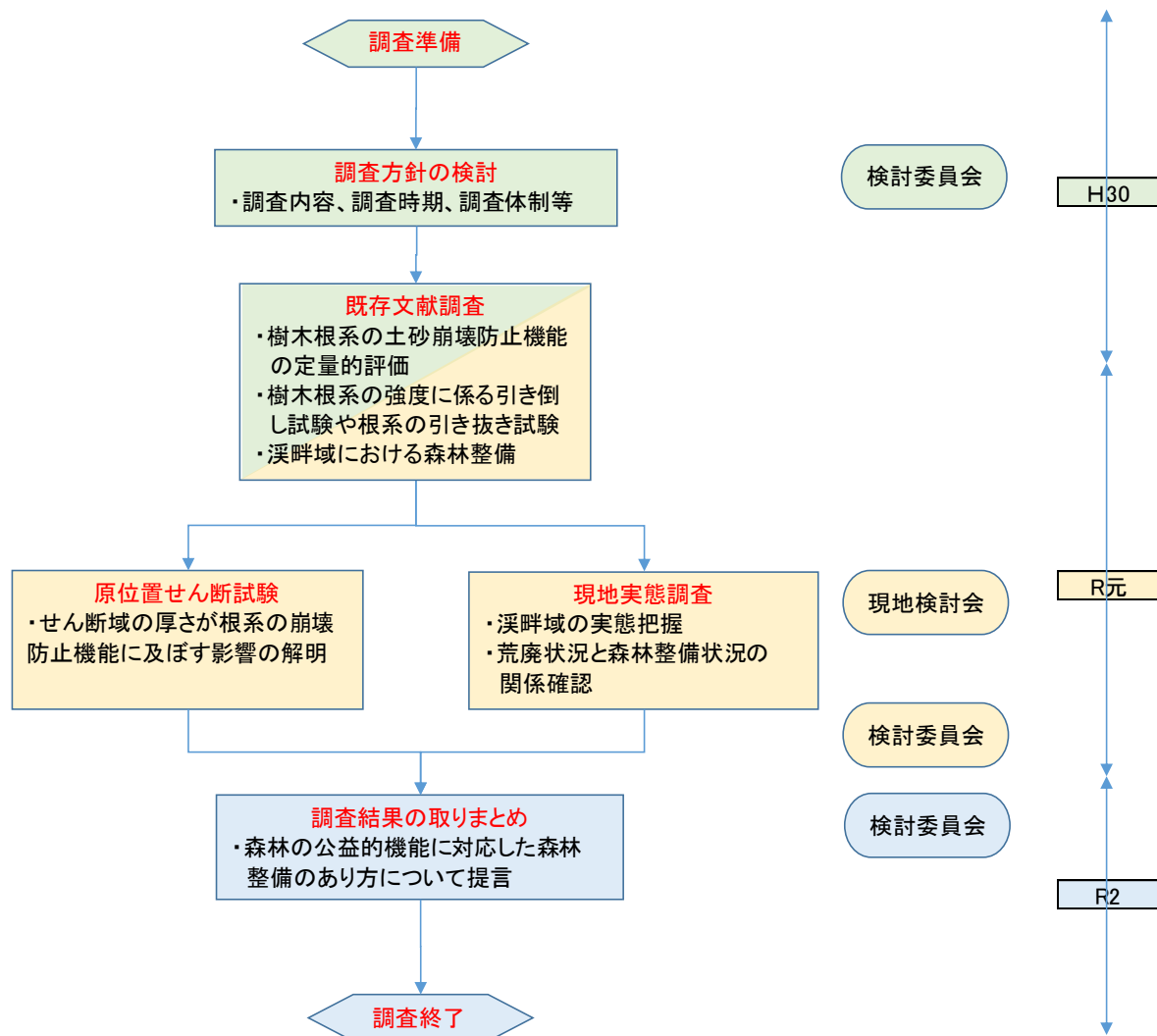


図 1.1 調査の流れ

第2章 調査内容

第1節 事業計画

以下の調査を実施した。

- ア．検討委員会、現地検討会及び作業部会を開催し、調査内容について検討した。
- イ．根系の表層崩壊防止機能や森林整備との関係に関する既存文献を整理・分析した。
- ウ．根系を含む土の原位置せん断試験のデータを整理・分析した。
- エ．根系による土の補強効果の工学的評価方法を検討した。
- オ．3次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価の方法を検討した。
- カ．崩壊実験現場跡地の現地踏査により、表層崩壊の実態を把握した。
- キ．公益的機能発揮のための森林整備の在り方を検討した。

表 2.1 年度別事業計画表

平成 30 年度

事業内容	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
公益的機能発揮のための森林整備のあり方												
・事前準備												
・調査方針の検討・決定												
・既存研究成果の収集												
・作業部会の開催												
・検討委員会の開催												
・当年度報告書の取りまとめ												

令和元年度

事業内容	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
公益的機能発揮のための森林整備のあり方												
・事前準備												
・既往文献調査												
・原位置せん断試験データの整理・分析												
・現地実態調査												
・検討委員会の開催												
・現地検討会の開催												
・作業部会の開催												
・当年度報告書の取りまとめ												

令和2年度

事業内容	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
公益的機能発揮のための森林整備のあり方									
・事前準備									
・既往文献の整理・分析									
・根系による土の補強効果の工学的評価方法の検討									
・3次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価方法の検討									
・公益的機能発揮のための森林整備の在り方の検討									
・検討委員会の開催									
・作業部会の開催									
・当年度報告書の取りまとめ									

第2節 既存文献調査

根系の表層崩壊防止機能や森林整備との関係に関する研究成果等については昨年度収集したが、本年度さらに追加して論文名、著者名、出典、研究成果の概要等が記載された目録を整理するとともに、森林整備手法を検討するにあたっての課題等を整理・分析した。

第1項 根系の表層崩壊防止機能や森林整備との関係に関する研究成果等の収集

樹木根系の土砂崩壊防止機能の定量的評価、樹木根系の強度に係る引き倒し試験や根系の引き抜き試験、山腹斜面における森林整備、早生樹や挿し木苗、及び降雨と崩壊の関係等に関する内外の既存の研究成果等を収集した。収集した成果の総数は128件で、その内訳は表2.2のとおりである。

表2.2 収集した研究成果の件数

内容	件数
根系と崩壊の関係	90
降雨と崩壊の関係	6
早生樹の関係	12
挿し木の関係	11
小計	118
指針等	9
合計	128

研究成果等の収集にはウェブサイトを活用した。特に、文献検索サイトとしては以下のものなどを用いて目的とする研究成果の収集に努めた。

【文献検索サイト】

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所：林業・林産関係国内文献データベース，<http://www2.ffpri.affrc.go.jp/folis21/folis-hp-j.html>

国立研究開発法人科学技術振興機構：J-STAGE，<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/char/ja>

国立情報学研究所：CiNii，<https://ci.nii.ac.jp/>

農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター：AGROPEDIA，
<https://www.agropedia.affrc.go.jp/>

国立研究開発法人科学技術振興機構：J-GLOBAL，<https://jglobal.jst.go.jp/?d=0>

第2項 論文名、著者名、出典、研究成果の概要等が記載された目録の整理

収集した研究成果の論文名、著者名、出典、発行年、掲載ページ等のほか、研究成果の概要（抄録）を作成し、具体的な目録は、「巻末資料1 既存文献リスト」のとおり整理した。

以前から本調査の主題である根系と崩壊の関係に関する研究は進められていたが、過去35年程度の研究成果を年別、研究機関（研究グループ）別に整理すると表2.4のとおりである。

表2.4では、研究の内容を「引き抜き抵抗力和崩壊防止機能」、「引き倒し抵抗力和土砂緩衝機能」、及び「研究成果の整理・まとめ・解説等」に大別した。「引き抜き抵抗力和崩壊防止機能」に関する研究は過去35年間継続的に行われ、多くの研究成果がまとめられている。一方、「引き倒し抵抗力和土砂緩衝機能」に関する研究は、平成20年（2008年）頃から北原らのグループを中心に行われ始めてきた。間伐等の森林整備を崩壊防止機能の観点から評価する研究は、平成16年（2004年）頃から阿部らのグループや北原らのグループ等により進められているほか、近年阿部らのグループはせん断域における根の変位や引き抜き角度を考慮した崩壊防止力を評価する研究に取り組んでいる。根系は地下に分布し、研究の対象としては取り扱いにくい面があり、過去数年では阿部ら、北原ら、山瀬ら等のグループが研究成果を発表しているに留まっている。

なお、表2.4で示した各研究機関（研究グループ）の主な構成員は表2.3のとおりである。

表2.3 各研究機関（研究グループ）の構成

研究機関	構成体	構成員
阿部ら	日本大学	阿部、掛谷、岩元、黒川、荒金、瀧澤ら
北原ら	信州大学	白井、今井、高橋、松下、神田、矢下、伴、阿辻、北沢、岩名、岩波、岡田、奥中、久保田、小林、相馬、永田、深見、宮田、若杉ら
山瀬ら	兵庫県	山瀬、藤堂、谷川ら
木下ら	林野庁治山課	木下、坂井ら
佐藤ら	北海道	佐藤、大谷ら
茅島ら	福岡県	茅島、佐々木ら
執印ら	宇都宮大学	執印、加藤、鶴見ら
野々田ら	三重県	野々田、林ら
塚本ら	東京農工大学	塚本、峰松ら

表 2.4 研究機関別の根系と崩壊の関係に関する研究内容 (1)

研究機関									
発行年	阿部ら	北原ら	山瀬ら	木下ら	佐藤ら	茅島ら	執印ら	野々田ら	塚本ら
1984	根系分布把握方法の確立により根系の物理性の定量的評価が可能(直接せん断試験の実施)								引拔抵抗力による斜出根と水平根の評価(水平根の動きが大きい)
1986	根系引張強度が斜面安定に与える影響の評価								地上部による特に水平根系分布再現と斜面安定効果
1990	根系分布シミュレーションモデル								
1991	引拔抵抗力でせん断補強強度を推定できるモデル								
1994								表層崩壊面の残存根の引張試験による林地斜面の安定解析	
1996	原位置一面せん断試験によるスギ根系のせん断補強強度の算出							樹幹引き倒しによる根返りの発生機構	
1997	根系分布モデルと実用ΔSモデルによるスギ林分の斜面崩壊防止機能のシミュレート								
1998	(研究成果の解説)多くの樹種の根の量のデータ収集が必要						土壌水分変化が根系の土質強度補強効果に与える影響(模擬根系を用いた一面せん断試験)		

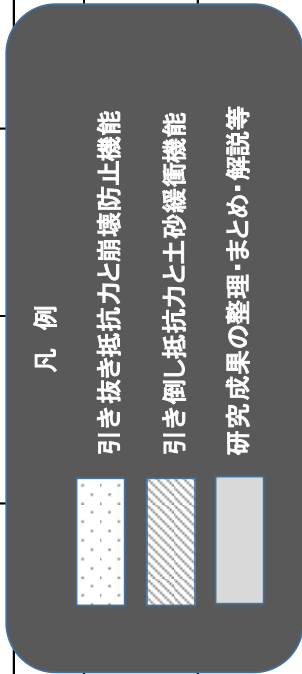


表 2.4 研究機関別の根系と崩壊の関係に関する研究内容 (2)

発行年	研究機関								
	阿部ら	北原ら	山瀬ら	木下ら	佐藤ら	茅島ら	執印ら	野々田ら	塚本ら
2002							(既往研究成果の整理)土層構造発達モデル、樹木・根系成長モデル、根系補強モデルの統合が必要		
2004	間伐・非間伐林分における崩壊防止力の変化を引抜抵抗により評価								
2006	(研究成果の概要を取り纏め)	カラマツ根系の引抜抵抗(立木間中央部)、立木密度及び土壌水分と引抜抵抗力の関係、			(研究成果の解説)				
2007		アカマツ、ミズナラ、マダケの引抜抵抗							
2008		間伐後経過年数と最弱部ΔCの関係 引き倒し試験による土石流緩衝機能の力学的评价							
2009	根の変位を考慮した引抜抵抗	間伐強度とΔCの関係、土壌水分と引抜抵抗、広葉樹の引抜抵抗			落葉広葉樹林の根系分布測定と引抜抵抗力の測定による斜面安全率の算出		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		
2010		地上部によるΔC分布図の推定、間伐や林齢とΔCの関係		林齢、胸高直径等による水平根ΔCの予測手法		引き倒し試験による最大抵抗モーメントと胸高直径、斜面傾斜角等との関係			

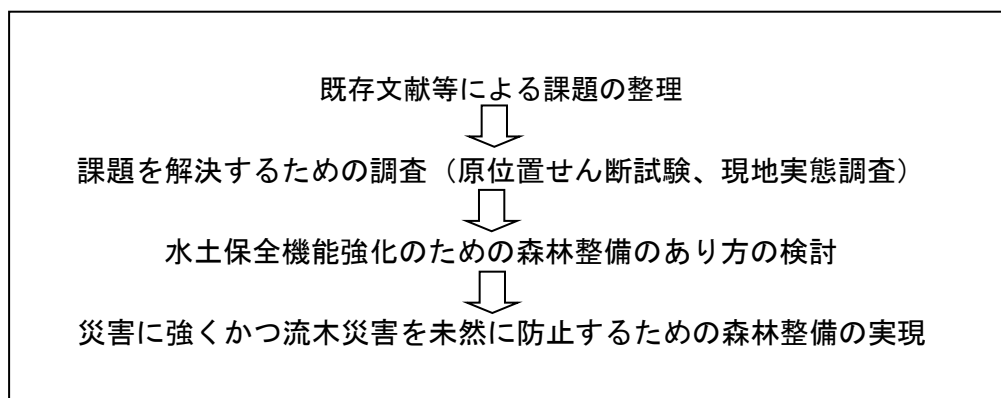
表 2.4 研究機関別の根系と崩壊の関係に関する研究内容 (3)

発行年	研究機関								
	阿部ら	北原ら	山瀬ら	木下ら	佐藤ら	茅島ら 引き倒し試験と樹 幹形状	執印ら	野々田ら	塚本ら
2011		立木密度と△Cの 関係、ケヤキ・ミズ ナラ・コナラの崩壊 防止力							
2012		△C二次元分布推 定図の作成、引抜 抵抗と細胞壁 量・生根							
2013	変位量と引抜角度 を考慮した崩壊防 止力	△C二次元分布推 定図の作成 海岸林での引き倒 し試験		水平根が発揮する 断面抵抗力の計算 モデル	原位置一面剪断試 験による根のせん 断強度推定				
2014	せん断域の厚さが 根系の崩壊防止機 能に強く影響(原 位置せん断試験)	△C二次元分布図 の作成(ヒノキ、広 葉樹)、引抜試験 時における根系の 破断位置 アカマツとクロマツ の引き倒し抵抗力							
2015		引き倒し抵抗モー メントと周面摩擦カ	根系構造と引抜抵 抗力、低木樹種根 系による崩壊防止 力 間伐と最大引き倒 し抵抗モーメント						
2016	間伐が根系生長と 表層崩壊防止機能 に与える影響	樹種・座標・胸高 直径からなる根系 の崩壊防止力推定 式							
2018	根の引抜角度及び 変位量を考慮した 引抜抵抗力による 表層崩壊防止機能 の評価方法								
2020	せん断域が厚い場 合は根系の崩壊防 止機能が弱い(原 位置せん断試験)								

第3項 森林整備手法を検討するにあたっての課題等の整理

表層崩壊防止機能を高める森林整備手法を検討するにあたり、既存文献から判断される技術的課題について整理した。

課題等の整理にあたっては、本調査の最終的な目的である「災害に強くかつ流木災害を未然に防止するための森林整備の実現に資する」ために、既往の研究成果で判明していることを把握し、本調査で明らかにすべき内容を明確にする必要がある。また、森林整備に関する指針として、長野県、三重県、奈良県等では「災害に強い森林づくり」指針（ガイドライン）が発行され、森林の防災機能に主眼を置いた森林整備の方向性が示されており、これらのガイドラインも参考にしながら森林整備手法を検討するにあたっての課題等を整理することとした。



根系の崩壊防止機能と森林整備との関係についての研究には、間伐が根系に及ぼす影響等に関する研究成果がある。特に最近の局地的豪雨による土石流災害に際し、「流木」が被害を拡大させているとの指摘に対して、表層崩壊に伴う「流木」の発生源でもある谷頭凹地（0次谷）を含めた溪畔域における森林整備によって流木による災害を軽減する必要性が検討されはじめた。また、表層崩壊の発生に関しては、谷頭凹地（0次谷）における土層の発達と崩壊の繰り返しの関係についても、樹木根系の発達と併せた研究の進展がそのメカニズムの一端を解明しつつある。

こうした状況を踏まえ、現時点までの研究成果を再整理し、課題等を抽出・整理した上で、あらためて水土保持機能強化に着目した森林整備手法について検討することが治山事業の大きな課題であると言える。

課題の整理にあたっては、①根系の表層崩壊防止機能と②森林整備との関係に分け、それぞれ次の点に留意した。

① 根系の表層崩壊防止機能

現時点で考えられる課題は次のとおりである。

- ・ 垂直根による杭効果と水平根によるネット効果
- ・ 針葉樹と広葉樹、針葉樹人工林と針葉樹天然林
- ・ 一面せん断とせん断域
- ・ 森林の表層崩壊防止機能の限界

② 森林整備との関係

現時点で考えられる課題は次のとおりである。

- ・ 根系による土層の補強効果等が及ばない立木間の「すき間」と崩壊発生形態
- ・ 若齢林から壮齢林への成長過程における間伐率と間伐時期
- ・ 早生樹の活用、挿し木苗の根系分布等

上記①及び②で挙げた7点の既存文献等による課題について、具体的な内容を示すと以下のとおりである。

1) 垂直根と水平根

塚本ら（1984）は樹木の斜面安定効果について考察するにあたって、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）という斜面分類を行い、D から A に向うにつれて水平根の働きが大きくなり、A タイプでは水平根の働きが100%斜面安定に寄与するとし、従来考えられていたすべり面における鉛直根の斜面安定効果とは別に水平根の働きについて着目した。白井ら（2006）や今井ら（2008）が崩壊防止機能に及ぼす立木密度（間伐）の影響を調査する際に水平根の斜面安定効果を考慮している。木下ら（2013）も立木間中央における水平根の分布を調査し、水平根の増加が斜面の安定に寄与していることを示した。高橋ら（2015）は立木の引き倒し試験において、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として機能を発揮していることを示した。このように水平根の効果を示した研究成果が多い中で、掛谷ら（2018）は、根の変位量と引き抜き角度が崩壊防止力に影響するとし、変位量と引き抜き角度を考慮しない従来の評価方法と比較すると最大崩壊防止力は29～58%となり、従来の方法は崩壊防止力を過大に評価していると指摘している。しかし、引き抜き角度を90°以上に設定していない点や引き抜いた根の直径の中に10mmを上回る太い値が少ないことなど、さらなるデータ収集及び検討の必要性を課題として挙げている。

表 2.5 垂直根と水平根に関する研究成果

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	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

2) 針葉樹と広葉樹

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。そこで松下ら（2009）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した。同様に矢下ら（2011）はミズナラ、コナラを対象とし、神田ら（2011）はケヤキを対象として調査

を行った結果、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、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、セン断面上に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た。このように近年広葉樹の崩壊防止力に関する研究も進んでいるが、調査事例が少なくデータのばらつきが大きいため、広葉樹林内の調査を今後も推進するとともに、立木からの距離に応じた崩壊防止力の減衰率についてさらなる検討を要するとしている。

表 2.6 広葉樹に関する研究成果

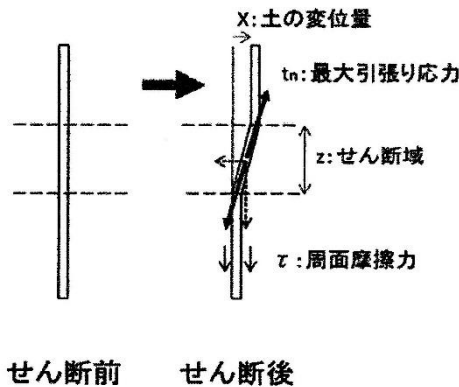
番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
56	冷温帯落葉広葉樹林の根系が斜面安定に及ぼす影響	佐藤創・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	砂防学会誌VOL62-4	29-37	2009
173	林床に侵入する広葉樹根系の引き抜き抵抗力と単根引張強度の関係	松下将大・小野裕・北原曜	中部森林研究57	183-186	2009
14	ケヤキ人工林の崩壊防止機能	神田誠也・北原曜・小野裕	日本森林学会大会学術講演集122巻		2011
31	ミズナラ、コナラ天然広葉樹林における崩壊防止機能の評価	矢下誠人・北原曜・小野裕	中部森林研究59	203-206	2011

3) 一面せん断とせん断域の考え方

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、掛谷ら（2014）（2020）は、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とを示した（図 2.1）。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、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。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としている。その結果、せん断域が厚い場合（50cm）の方が土塊は容易に破壊され、根系の崩壊防止機能が弱いことが示された。これに対し、薄いすべり面の場合（0cm）は根系の機能が非常に強くなることが示された。

表 2.7 せん断域に関する研究成果

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
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・岡田康彦	関東森林研究65-2		2014
181	森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察	掛谷亮太・小坂泉・瀧澤英紀・阿部和時・岡田康彦	関東森林研究71-1	129-132	2020



掛谷、荒金、村津、阿部、岡田（2014）「原位置せん断試験による森林の崩壊防止機能の考察」関森研 65-2

図 2.1 せん断域の模式図

4) 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、その限界がどこにあるのかと考えた場合には、森林の状態やその立地環境により様々なタイプの表層崩壊が起きることから、森林の表層崩壊防止機能の限界を一概には示せないのが現状である。その限界は、本項で挙げた種々の課題が整理されて初めて明らかになってくるものであり、今回収集した研究成果のほかに今後の研究に待つところが多い。

北原（2010）は、森林の崩壊防止機能とその限界についての研究は、統計的には、戦後の拡大造林期に発生した多数の崩壊資料をもとに崩壊防止機能は証明されているが、力学的な検討は甚だ不十分で、調査研究事例が非常に少なく科学的な説明ができないのが現状であるとしている。また、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、では果たして力学的に見た崩壊防止機能とはどういうものなのか、限界の値はいったいどのくらいなのであるかという点は明らかにされていないと言及している。

表 2.8 森林の限界に関する研究成果

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

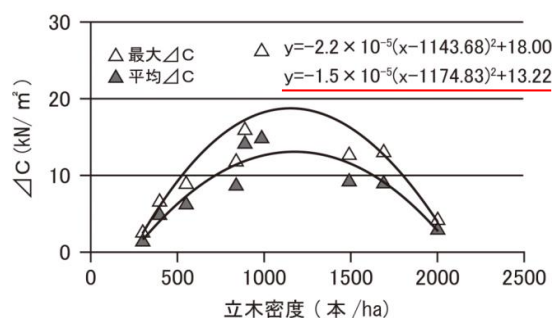
5) 立木間の「すき間」と崩壊発生形態

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。白井ら（2006）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。その結果、同林齢の場合、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ことを示した。一方、伴ら（2011）によると、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 1000 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 1000 本/ha より小さくなると低下する傾向が見られたと報告している（図 2.2）。さらに、阿辻ら（2012）は、林分全体の崩壊防止力を把握するために、胸高直径や立木配置が不均一なヒノキ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、林分調査を行い、林分内の ΔC 二次元分布推定図を作成した（図 2.3）。今後さらにヒノキ以外の樹種も対象として精度の向上を図る必要がある。

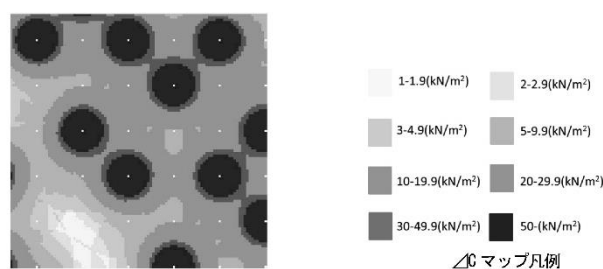
表 2.9 立木間のすき間に関する研究成果

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
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
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
70	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	中部森林学会第2回大会発表要旨集		2012



伴、北原、小野(2011)「カラマツ根系の崩壊防止力と立木密度の関係」
中森研No.59【論文】2011

図 2.2 立木密度と崩壊防止力の関係



図—16 間伐効果シミュレーション
80年生, 800本/ha, DBH26.3cm

阿辻雅言(2014)「崩壊に強い森林とは」, 長野
県林業総合センター技術情報 148, 6~11

図 2.3 水平根に着目した間伐効果のシミュレーション

6) 壮齡林への成長過程における間伐の効果

阿部ら(2004)は、立木密度 1400 本/ha のスギ間伐林分と 3400 本/ha のスギ非間伐林分における根系分布状態を比較調査し、間伐・非間伐林分における崩壊防止力の変化を評価できる

手法を完成させた。この手法を用いところ、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。また、20年生以上の林分で一般的な強度の間伐が行われても、斜面安全率が1.0を下回らないことが示された。今井ら（2009）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/m²)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ことを報告している。一方、伴ら（2010）は、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、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とを示した。北原（2010）は、崩壊に強い森林づくりへの提言として、間伐など森林整備により崩壊防止効果を高めることは十分可能であり、特に適期の間伐は太い根系を多くし崩壊防止力を高めることに有効であるとしながらも、森林根系の崩壊防止機能には未解明な課題がまだまだ数多くあり、今後も地道な調査研究により、その効果が発揮増進される森林管理方法の確立の必要性を謳っている。

表 2.10 間伐の効果に関する研究成果

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
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
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
98	森林根系の崩壊防止機能	北原曜	水利科学No.311	11-37	2010
28	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

7) 早生樹の活用、挿し木苗の根系分布

早生樹に関しては、九州各地で植栽が行われているセンダンを対象とし、大阪府、京都府、兵庫県等の関西地区で植栽試験が行われているが、シカ等の食害や積雪による幹折れ等の被害が確認され、生育良好木の割合を高めることが課題となっている（池本、2018；糟谷ら、2018）。

スギとヒノキは日本の主要な造林樹種であり、現在も山出しされている苗の多くはスギやヒノキである（林野庁、2007）。九州地域のスギは福岡・佐賀・大分の一部と長崎県において実生造林地がみられるが、その他の地域では挿し木で増殖するのが一般的である（宮島、1989）。また、ヒノキは一般に実生で増殖されるが、九州地域では挿し木品種であるナンゴウヒ（南郷桧）の植栽も行われている。これまでの研究から、一般的に実生は挿し木に比べて成長形質や材質にばらつきが生じること、曲がりが大きいこと、初期成長で優れること等が指摘されている（有井、1986；藤澤、1998；宮島、1989；大山ら、1985；津島ら、2008；松永ら）。しかしながら、いずれの研究成果もスギやヒノキの地上部の成長量や形質等に注目して実生苗と挿し木苗の差異を評価しており、それぞれの根系分布状況を調査した上で森林の表層崩壊防止機能に言及した研究成果は見当たらないのが現状である。

表 2.11 早生樹・挿し木苗に関する研究成果

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
1001	センダン植栽木への施肥 が成長に及ぼす影響	池本省吾	第129回日 本森林学会 大会発表	—	2018
1005	本州西部地域での早生 樹センダンの造林成績	糟谷信彦, 宮藤久士, 村 田功二, 中村彰男, 横尾 謙一郎	第129回日 本森林学会 大会発表	—	2018
2007	スギおよびヒノキにおける 実生とさし木の初期成長 形質の比較	松永孝治, 倉本哲嗣, 下村 治雄, 江藤幸二	日林九支研 論61	124-127	2008
2011	スギ及びヒノキの系統別 の挿し木苗と実生苗によ る成長比較試験	九州森林管理局 森林技 術・支援センター	—	—	2014

第4項 これまでの根系研究の流れと課題

ア. 垂直根・鉛直根に分類した根系抵抗力の評価(塚本良則)

塚本良則(1998) は、崩壊抑止における水平根と鉛直根の役割について、上界定理を用いた計算により安全率に与える根系の効果の比率が 1/4～1/3 程度とし、

- ①水平根ネットのからみ合いがつくる引抜き抵抗による表土の保持効果
- ②鉛直根によるすべり面の押し下げ効果(遷移層タイプ)
- ③風化基岩亀裂に伸長した根の効果(亀裂岩タイプ)

であるとして、樹木根系の効果をも水平根と鉛直根に分けて論じることが示した。

その後、阿部和時による鉛直根の効果をも現位置せん断試験等により、土の粘着力 C の補強効果 $\angle C$ として表す考え方と、北原曜により樹木の引き倒し試験と根系の引抜き試験の結果から断面での根系の抵抗力 $\angle C$ を推定しようとする考え方につながる系譜である。

イ. すべり面における鉛直根のせん断抵抗力(阿部和時)

阿部和時は、地すべり面における根系量を根の分布を算定するための根系分布再現モデルを構築し、根系の持つ表層崩壊防止機能を力学的に評価した。

ウ. 鉛直断面(立木間中央断面)における根系抵抗力の評価(北原 曜)

北原曜は、2006 年の諏訪岡谷土石流災害の後、広葉樹を含む多くの樹種について、表層土断面での試験を行い、その成果として長野県の「災害に強い森林づくり指針解説」とともに、2016 年に林野庁がまとめた「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書(案)」において、「森林の土砂崩壊防止機能区分図」を作成することにつながった。しかしながら、その後の検討により、実際の根系を含む土のせん断においては、せん断の進行と同時に根の土からの抜けだしを考慮するモデルが必要であり、実際より過大な抵抗力を与えることがわかっている。また、根系による補強では、間伐の効果を上手く説明できないことも指摘されている。

エ. せん断層の根量による崩壊抵抗力の評価(掛谷、阿部ら)

掛谷ら(2014, 2020) は、現位置せん断試験において、せん断の様式の違いによって生じるせん断域の厚さ、すなわち、せん断枠で強制的に薄いせん断面を生じさせて破壊する場合と、厚いせん断域で破壊した場合にせん断強度が異なることに着目し、根系を含む表層崩壊の発生機構

について新たな考え方を提唱し、土層中に分布した根系の存在によって、土層が大変形を許容することが崩壊に対する抵抗力となるとした。この働きは、土層中に存在する根量によるとして、この効果は最終的に生じるすべり面を深さ方向下方に追い込む効果であるとし、塚本が指摘した①番目の保持(緊縛)効果と②番目のすべり面の押し下げ効果をあわせて再定義することにつながっている。しかしながら、安定解析等の実務的な解析に乗せるためには、せん断域の厚さを制御している因子を明らかにすることが必要であり、破壊域の進行とすべり面の形成との関係についての検討が待たれる。

オ. 地盤工学的なメカニズムの応用(地盤工学会)

一方、地盤工学会では、拘束圧が小さく密度も小さい地表付近の土を効果的に補強する工法として「補強土工法」の開発に取り組んでおり、特に、切り土斜面のような小規模な表層に近い部分の地山斜面の崩壊に対して補強土の適用性を検討し、地山補強土工法の考え方を示した。地山補強のメカニズムに関して、引っ張り強度を有する材料を用いた引っ張り補強は、地山の一定の変形に伴って補強材に引張応力が生じることにより効果が働き始め、受動的に補強材が発揮する抵抗力であることが水平根方向の根系の働きに類似している。この引っ張り補強のメカニズムは、水平根の補強効果を単純化したモデルとしては有効であるものの、自然の根系の分布とその方向は一様ではないため、その適用性には自ずと限界がある。

カ. 物理的に妥当な抵抗モデル Root Bundle Model (Schwartz)

Schwartz(2010) は、上記「ウ。」で「 $\angle C$ が最大値の積算となっていることによる過大評価」という矛盾に対し、せん断変位の進行と根の抜け出しなどを考慮した物理的に妥当な抵抗モデル Root Bundle Model(RBM)を提唱した。斜面安定化への評価については今後の課題である。

表 2.12 新たな根系に関する研究成果

論文名(書名)	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載 ページ	発行年
森林・水・土の保全 湿潤 変動帯の水文地形学	塚本良則	朝倉書店	139	1998
原位置せん断試験による森 林の崩壊防止機能の考察	掛谷亮太他	関東森林研究 65-2	173-176	2014
森林が持つ表層崩壊防止 機能に関する一考察	掛谷亮太他	関東森林研究 71-1	129-132	2020
地山補強土工法設計・施工 マニュアル	地盤工学会	地盤工学会	171	2011
Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands	M. Schwarz, P. Lehmann and D. Or	Earth Surface Process and Landforms	354-367	2010

第3節 根系による土の補強効果の工学的評価方法の検討

第1項 原位置せん断試験に係るこれまでの経緯

表層崩壊が発生する際崩壊地底面と側面となる部分にすべり面が形成される。このとき、すべり面と交わるように樹木の根が存在すれば森林が崩壊防止力を発揮すると考えられている。Waldron (1977) はせん断面を直交する鉛直根が表層土の変位によって引っ張られて変形し、これに伴って生じる根の引張応力の、せん断面と平行な成分は土の粘着力の増加分、せん断面と直交する成分は垂直応力の増加分として働くとするモデルを示した。阿部 (1991) は根の引張応力が根と土の間の接線摩擦応力によってもたらされ、根系による土のせん断補強強度は引き抜き抵抗力的によって評価できることを示した。また、水平根は崩壊地側面となる部分にも交わるように生育しており、崩壊する土塊と残存する部分をつなぎとめるように働いていると考えられている。北原 (2010) は水平根も鉛直根・斜出根と同様に根の引き抜き抵抗力的によってその崩壊防止力を評価している。

掛谷ら (2016) は林齢の異なる4か所のスギ林分で11本のスギを対象に根系分布状態を計測し、表層崩壊を抑止する根系の働きについて考察した。①深さ80cm以深の根系量は林齢の増加に伴って増大する傾向はない。②立木と立木の間の根系量は林齢の増加に伴って減少していた。③崩壊面積率と林齢の関係を見ると樹齢30年までは林齢の増加とともに崩壊面積率が減少するが、それ以上の林齢になると横ばいの傾向にある。以上の3点から、林齢の増加とともに潜在崩壊すべり面で根系量が増加して崩壊防止力が増加するとの考えは適切でないまとめている。

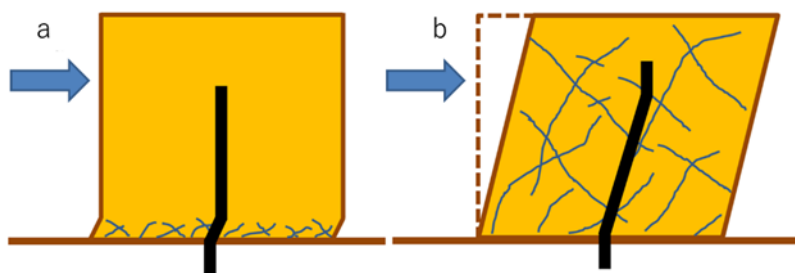
このことから、表層崩壊の発生機構は以下のようにになると推察している。降雨が発生し、表層土に水が浸透すると土壌の重量が増加することで斜面下方へ変形しようとする力が働き、表層土がゆがみ次々と亀裂が発生する。さらに降雨が続いて土壌中に溜まった水によって表層土の自重が増大すると、斜面下方へ変形する力が大きくなっていき、亀裂が大きく発達して表層土全体が破壊されて斜面を崩れ落ちる。このような表層土の動きに対して根系が生育することで表層土の歪みや亀裂の発生を抑止していると考えられる。

阿部 (1996) が行った原位置せん断試験ではせん断面と呼ばれるようなせん断は発生せず、ある程度の厚みを持ったせん断域が発生することが代表的であった。この時のせん断域では激しく破壊が起こっており、詳細には測定されていないがせん断域の厚さは10~20cm程度であった。実際の斜面において表層崩壊が発生する際、基岩の凹凸や亀裂、礫の存在や根系の発達状況、土質の差などの違いによって形成されるせん断面やせん断域の厚さが様々あると考えられるが、斜面の条件に応じた厚さのせん断域が形成されることが考えられる。しかし、これまでに行われたせん断試験では(遠藤・鶴田、1968: 阿部、1996: 佐藤ら、2013 など)せん断域の厚さは測定されていないため、せん断域の厚さが及ぼす根系の崩壊防止力への影響を調べた事例はない。また、根系の引き抜き試験(北原、2010: 木下ら、2013: 掛谷ら、2018 など)による評価方法は、すべり面での根によるせん断補強強度を根の引き抜き抵抗力的に置き換えて推定する手法で、この場合のせん断域の厚さは0cmに極めて近い厚さを仮定している。

ここで、せん断試験を行った際の根と土塊の状況を表した模式図を図-1に示した。図2-4はせん断域の厚さが異なる場合のせん断試験中の土塊の変形とそれに伴う根の変形状態を表し、図中の根はそれぞれ最大引張応力に達した状態を示している。根による崩壊防止力は根に張力が働く場合に発揮され、最大引張状態で最も強く抵抗力的を発揮する。図-1aからbのようにせん断域が厚くなると、根系が最大引張応力に達するまでに必要な表層土の変位量が多くなると考えられる。この場合、根が最大引張応力に達する前に土塊が大きく変形して土塊自体が先に破壊されてしまう場合も考えられる。

以上のように、せん断域の厚さは根の崩壊防止機能に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、せん断域の厚さが根系の崩壊防止力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、日本大

学と森林総合研究所は、せん断域の厚さを 0 cm と 50cm の 2 通りに設定してスギ根系を含む土の原位置せん断試験を行った。



a はせん断域が薄い場合、b はせん断域が厚い場合を表している

図 2.4 せん断域の厚さの違いと根の変形状態の違いを表した模式図

第 2 項 原位置せん断試験の方法

試験は森林総合研究所内の実験用苗畑で実施された。この試験では、せん断域の厚さを 0 cm と 50cm の 2 通りに設定した。供試土塊底面の面積はどちらも縦横 1 m×1 m の 1 m² とした。図 2.5 にせん断試験の模式図、実際の様子を写真 2.1 示した。写真 2.1 はせん断域 0 cm の場合を示したが、せん断域 50cm の場合でも測定機器などの配置は同様である。写真 2.2 と 2.3 は土塊の高さとせん断域の厚さの関係を示した。写真 2.1 のように試験土塊の前側に厚さ 1cm の前板を設置し、油圧ジャッキで前板を押すことで土塊に荷重を与えた。土塊の変位量は前板上部と前板下部に変位計のワイヤーを設置して測定した。本報告書では前板下部で測定したせん断域上端の変位量を解析に用いた。

せん断域を 0 cm に設定した場合は土塊の高さを 50cm とし、図 2.5 上及び写真 2.2 のように土塊の前面と同じ大きさの前板を当て、土塊全体にせん断荷重を与えて土塊底面の薄い層をせん断破壊する試験を行った（以下、せん断域 0 cm と呼ぶ）。この条件の試験は厚さが 0 cm に近いすべり面が生じてすべり面を境として土塊が移動する場合を想定している。しかし、実際には試験土塊底部には厚さ 20cm 程度の範囲の土塊が細かく破碎されたせん断域が形成されてしまう。このため、本研究では厚さ 20cm 程度のせん断域は表層崩壊が発生する際に形成されるすべり面に相当するとみなすこととしている。

せん断域を 50cm に設定した場合は土塊の高さを 80cm とし、図 2.5 下及び写真 2.3 のように高さ 30cm の前板を土塊の前面に当て、土塊の上部 30cm 部分にせん断荷重を与えて試験土塊底部から高さ 50cm までの厚さ 50cm 部分をせん断破壊する試験を行った（以下、せん断域 50cm と呼ぶ）。この試験では表層土全体が歪み、表層土全体がせん断破壊されて崩壊する場合を想定している。

試験はそれぞれのせん断厚さで根を含む場合と土のみの場合の 2 通り実施した。根を含む場合はスギを試験土塊の中央に位置するように試験土塊を作成した。土のみの場合はスギ植栽地に隣接する無立木地で試験を実施した。なお、根入り試験と土のみ試験は、同一区画内の平坦な苗畑の隣接地点で実施しており、土質状態はほぼ同一とみなしている。

せん断荷重は 20 分間隔で 1 kN/m² ずつ増加させたが、6 kN/m² まではほとんどせん断変位が生じないので 20 分間隔で 2 kN/m² ずつ荷重を増やした。せん断域 50cm の根入り試験は荷重を載荷した直後から変位が生じたので初めから 20 分間隔で 1 kN/m² の荷重を与えている。

測定したせん断変位はせん断ひずみに変換した。せん断域 0 cm 試験も実際には厚さ 20m のせん断域が発生していたので、変位量をひずみに変換した。せん断ひずみは図 2.6 に示したように変形

前の高さ L に対して変形して移動した長さ ΔL の割合である。

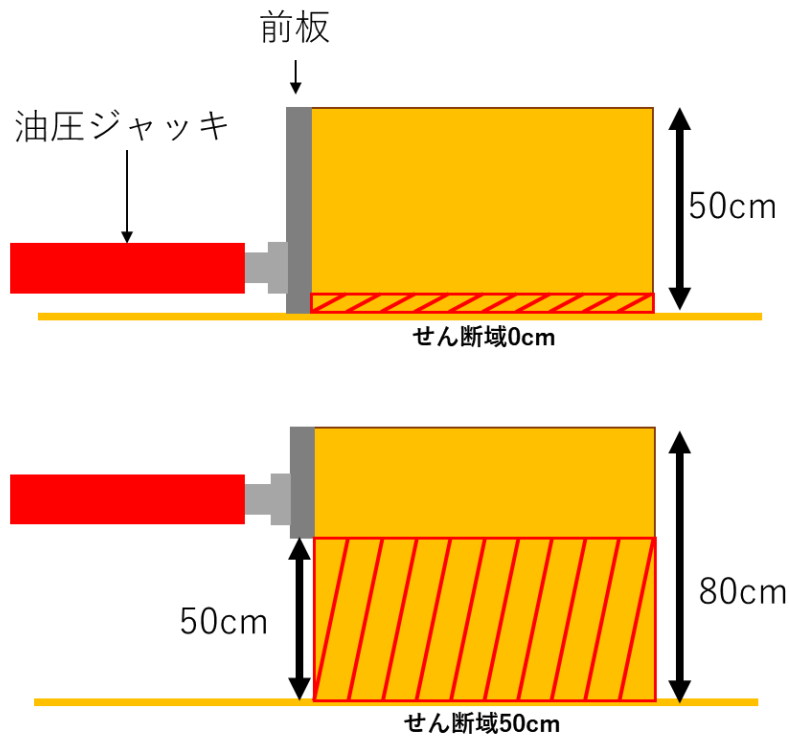


図 2.5 原位置せん断試験の模式図

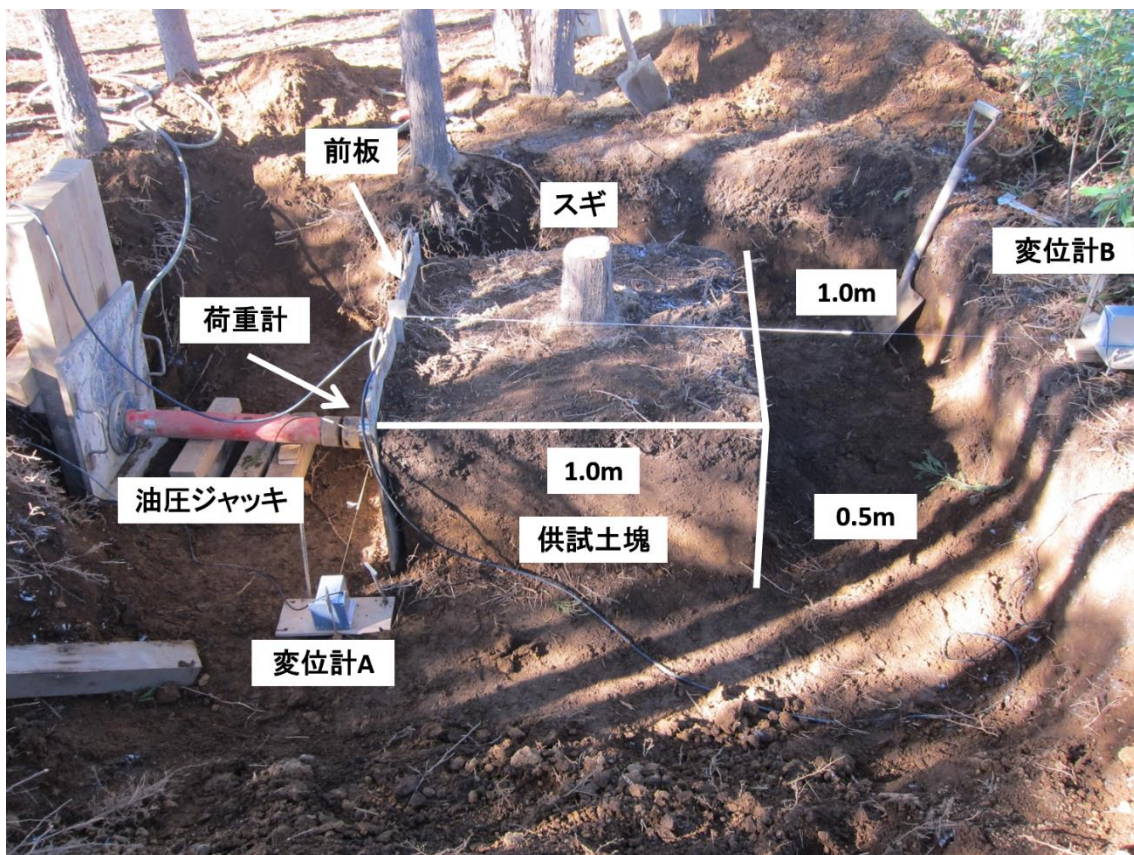


写真 2.1 実際のせん断試験の様子

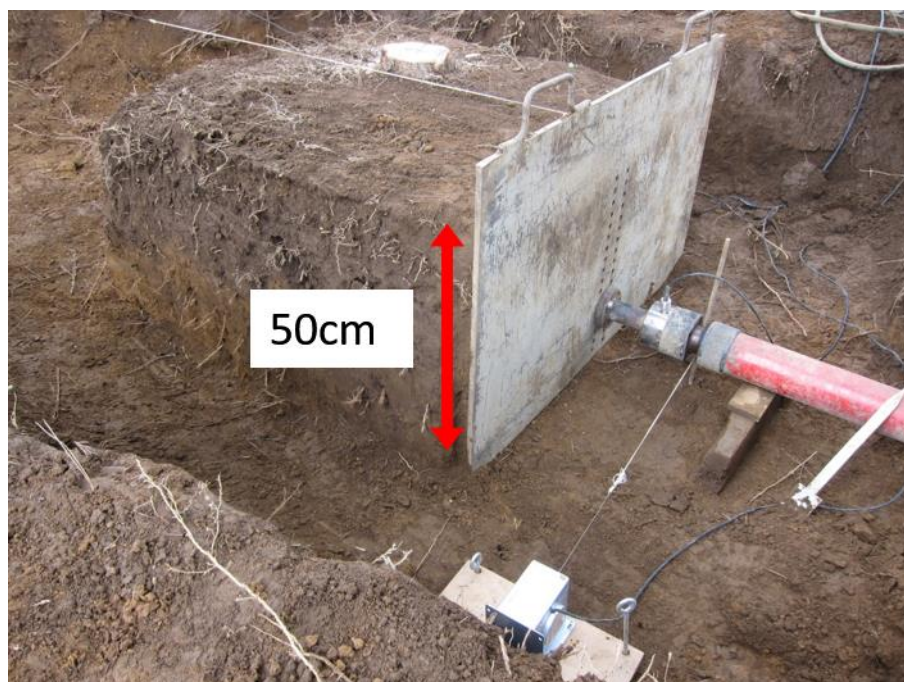


写真 2.2 セン断域 0 cm の土塊の高さとセン断域の厚さの関係

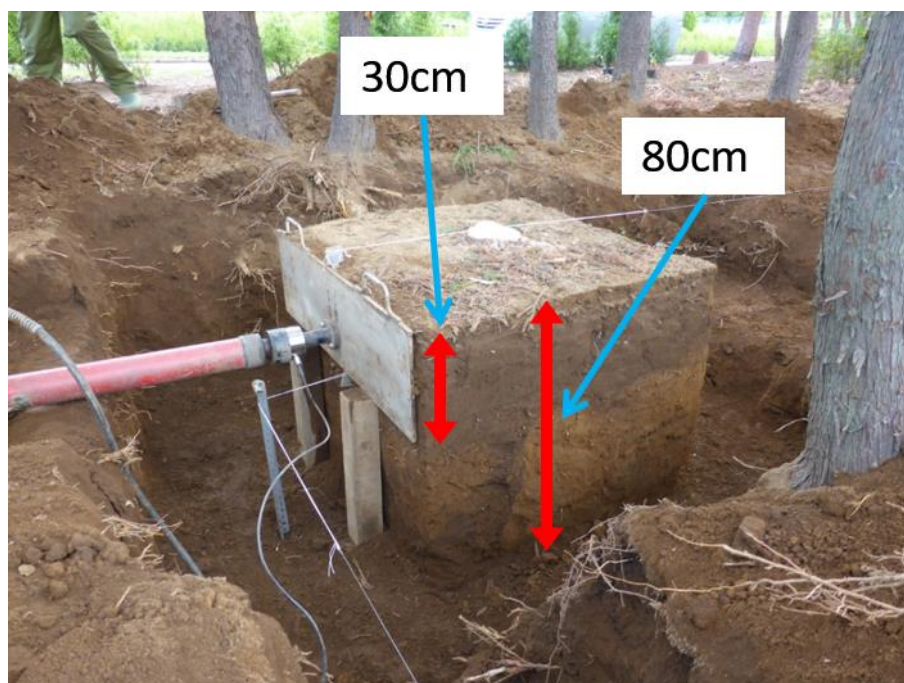


写真 2.3 セン断域 50cm の土塊の高さとセン断域の厚さの関係

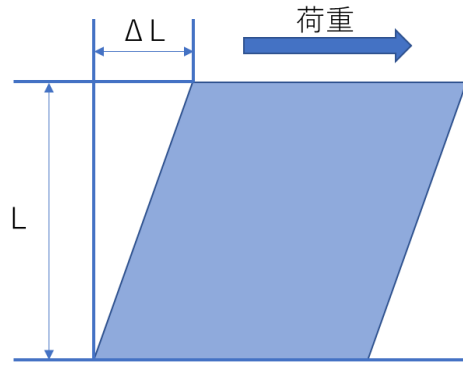


図 2.6 せん断変形によるひずみの説明

第 3 項 原位置せん断試験の結果

前項で述べた日本大学及び森林総合研究所による試験について、その結果を分析すると以下のとおりである。

(1) スケッチから見る土塊の破壊の進行状況

せん断域 50cm の根入りと土のみの試験土塊側面における亀裂の発生とその成長状況を表したスケッチを試験中に撮影した写真とメモをもとに作成して図 2.7 と図 2.8 にそれぞれ示した。図中の線は亀裂、色抜き部分は土の破片が剥落した様子を表している。

亀裂の発達については土塊の側面に発生した目視できるものを観察した結果である。亀裂の発生状況から明らかに内部にも亀裂が及んでいることが推察できたが、掘り出しの段階で亀裂がつぶれてしまうので内部の亀裂を直接観察できた例はない。

第一段階：試験開始後しばらく荷重を載荷し続けると土塊がひずみはじめ、長さ数 cm、幅 1～2mm 程度の小さな亀裂が発生し始める。目視で観察した限りでは亀裂の発生タイミングも土のみの試験と根入り試験で大きな差はみられなかった。

第二段階：小さな亀裂がさらに発生する。発生する亀裂は第一段階のものよりもやや長い傾向にあった。土塊の前板側から後部へ向かうほどせん断域上部から下部の地際に近い部分へ向かって亀裂が発生する傾向にある。この段階から時間当たり（加わるせん断荷重に対して）の亀裂の発生数が根入り試験と土のみの試験、及びせん断域の厚さによって異なってくる。土のみの試験と根入りの試験を比較すると根が入る場合の方が時間当たりの亀裂発生数が少なくなる。

第三段階：小さな亀裂が 1 つにつながり始め、主な亀裂は土塊前部から後部にかけて弧を描くようにつながっていく。主な亀裂以外にも大小いくつもの亀裂が見られ、土塊自体の歪が目視で確認できるようになる。この段階で発達した亀裂から数センチ程度の土の破片が土塊表面から剥離する場合がみられた。土のみの試験ではこの段階で破壊が起きて試験が終了する。根入りの試験中に聞こえた破断音（1 つの試験で数回程度）から判断すると、一部の根は最大引張状態にあり引き抜かれているか破断が起きていると考えられる。また、根入りの試験では土のみ試験では見られなかった土塊上部の根系が多数存在する部分、土塊後方上部などにまで亀裂が入っていることが観察され、根が入ることで供試土塊に加わった荷重が分散されていることがわかった。

最終段階：土塊の側面に弧を描いていた主な亀裂とそれ以外の亀裂とがつながり、土塊の側面から土の破片が次々と剥離した。土塊が破壊に至るとせん断変形が大きくなり、土塊がさらに大きく歪む。この状態に至ると根と土の繋がりは小さくなり、根の補強強度が非常に弱くなる。試験終了後の根の掘り出し調査の結果から、ほとんどの根は引き抜けや破断をしていないことが分かった。このことから、本試験では根が最大補強強度を発揮する前に土塊が破壊されていたことがわかった。

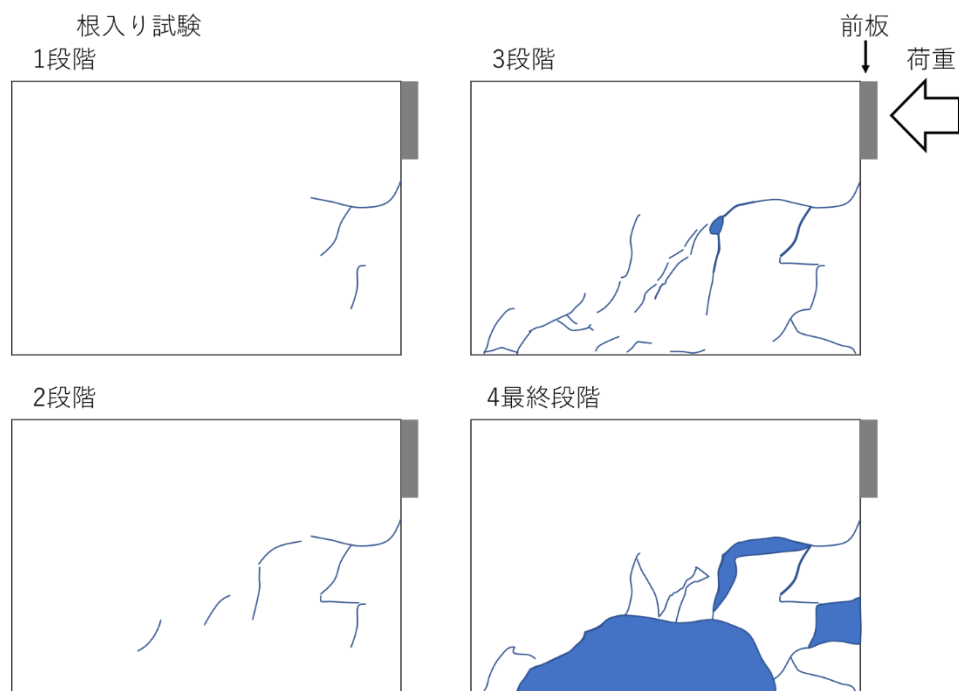


図 2.7 セン断域 50cm 根入り試験の破壊段階を示したスケッチ

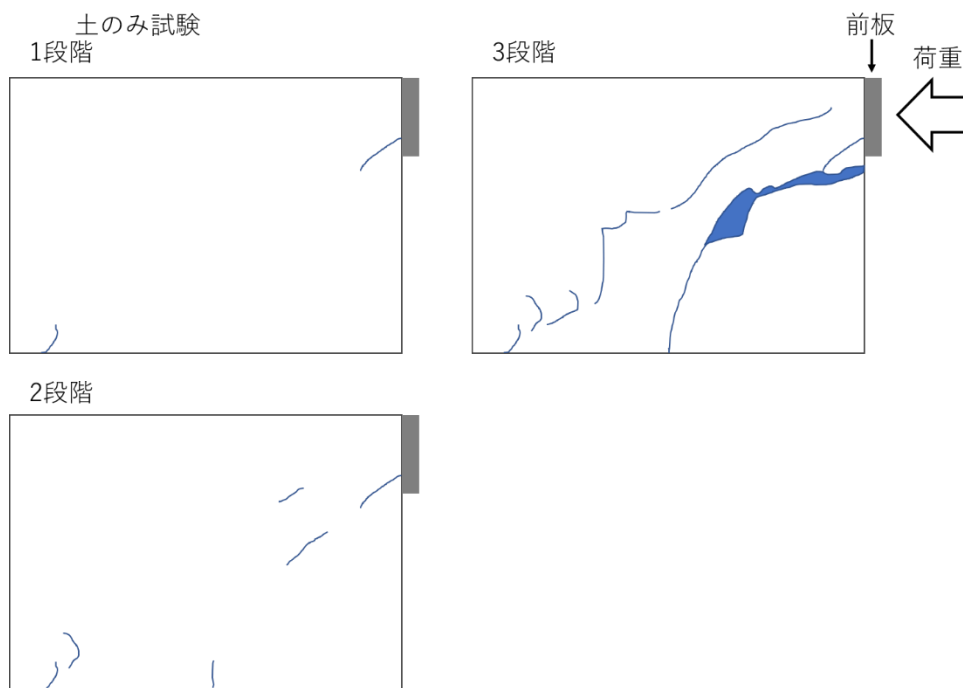


図 2.8 セン断域 50cm 土のみ試験の破壊段階を示したスケッチ

(2) セン断域の厚さ 0 cm 試験におけるせん断応力とせん断ひずみの表れ方

図 2.9、2.10 にせん断域を 0 cm に設定した土のみ試験と根を含む試験のせん断応力とせん断ひずみの関係をそれぞれ示した。図 2.9 に示した土のみの試験ではせん断荷重が 9 kN/m^2 を超えてからひずみが増大し、せん断荷重が 15 kN/m^2 に達した時点でせん断ひずみが 102 となり、土塊が破

壊に至った。図 2.10 に示した根入りの試験ではせん断荷重が 7 kN/m^2 を超えてからひずみが増大し、せん断荷重が 28 kN/m^2 に達した時点でせん断ひずみが 627 となり、土塊が破壊に至った。せん断荷重を 1 kN/m^2 増やしたときのひずみの増加量は土のみの試験と比較して小さく、根が土塊のひずみを抑止していると考えられた。土のみの破壊時のせん断荷重である 15 kN/m^2 を超えた辺りから、せん断荷重を 1 kN/m^2 増やしたときのせん断ひずみの増加量は徐々に大きくなり、せん断ひずみとせん断応力で描かれる曲線は徐々に緩やかな勾配になった。土のみの試験と根を含む試験を比較すると破壊荷重は 13 kN/m^2 、せん断ひずみは 525 増加して、根の効果が顕著に表れた。

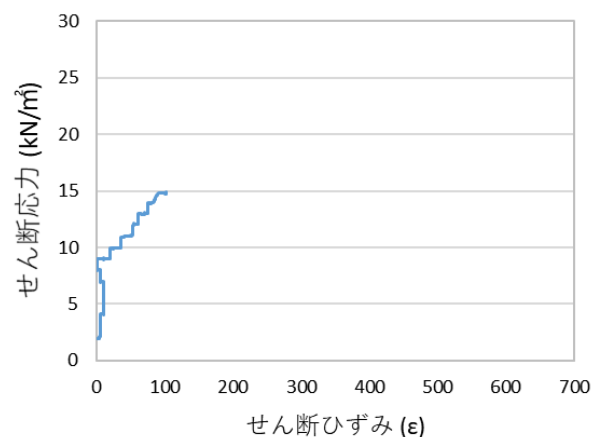


図 2.9 せん断域 0 cm 土のみ試験におけるせん断ひずみとせん断応力の関係

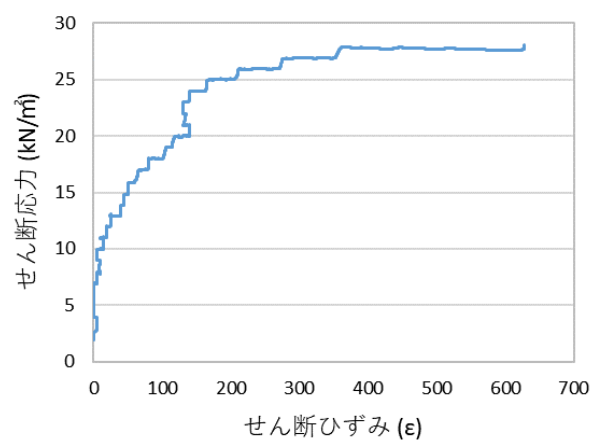


図 2.10 せん断域 0 cm 根入り試験におけるせん断ひずみとせん断応力の関係

(3) せん断域 50cm の場合のせん断応力とせん断ひずみの表れ方

図 2.11、2.12 にはせん断域を 50cm に設定した土のみ試験と根を含む試験のせん断応力とせん断ひずみの関係をそれぞれ示した。図 2.11 に示した土のみ試験ではせん断荷重が 5 kN/m^2 を超えてからひずみが増大し、せん断荷重が 8 kN/m^2 に達した時点でせん断ひずみが 16 となり、土塊が破壊に至った。

図 2.12 に示した根入りの試験ではせん断荷重が 2 kN/m^2 を超えてからひずみが増大し、せん断荷重が 10 kN/m^2 に達した時点でせん断ひずみが 109 となり、土塊が破壊に至った。土のみの試験と根を含む試験を比較すると破壊荷重は 2 kN/m^2 、せん断ひずみは 93 増加した。せん断荷重を 1 kN/m^2 増やしたときのせん断応力の増加量は土のみの試験の時よりも根入りの場合の方が大きい

が、変形を生じて土塊を支え、破壊を抑止するように作用している。

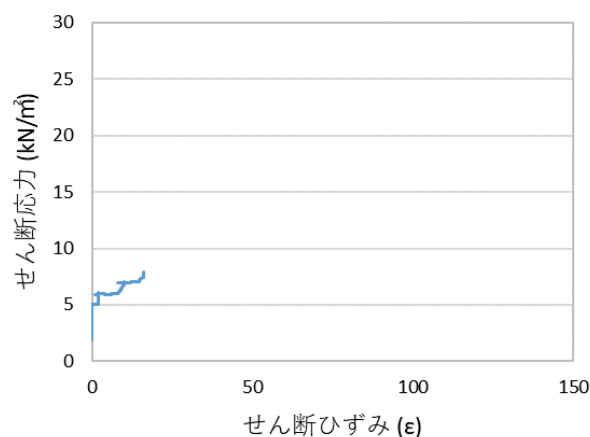


図 2.11 せん断域 50cm 土のみ試験におけるせん断ひずみとせん断応力の関係

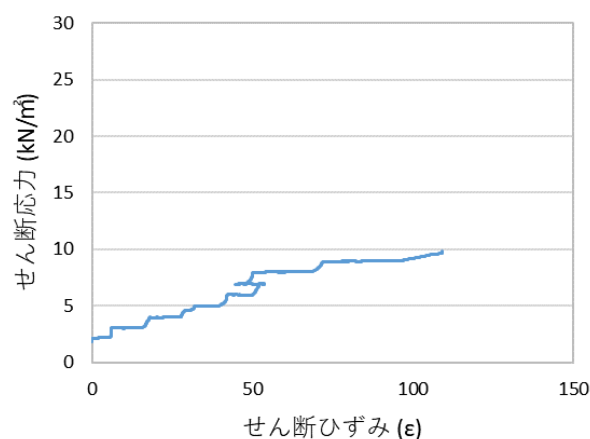


図 2.12 せん断域 50cm 根入り試験におけるせん断ひずみとせん断応力の関係

第 4 項 考察

(1) 土塊の破壊状況と根の補強効果

本試験からは、既往の研究でせん断面と呼ばれている部分が厚さを持ったせん断域を生じている場合を想定し、最終的にせん断面となる（土塊の地際）部分だけでなく、せん断域中での根系が補強効果を持ち土塊全体の破壊を遅らせていることが推察される。これは根入りの試験と土のみ試験を比較して、根が入ることで亀裂が広範囲に広がったこと、破壊の進行が緩やかになったこと（亀裂の成長の遅延）、最大せん断応力が増大したことから考えられる。

これらのことと、試験中の土塊の観察結果から、根系によるせん断域中での崩壊防止につながる 2 つの効果を以下のように推察した。1 つ目は既往の研究と同様に根がせん断域中を貫いてせん断面以深まで達してせん断域内で変形し（図 2.4a）、それによって生じる応力が根による土のせん断補強強度としてせん断面で土塊の変位を抑止する効果である。さらに、木質化した太い主根がせん断面を貫通している場合、主根に対する水平方向の力は主根の曲げ強さと土の反力が抵抗力となり、土塊の水平方向の移動を強く制限すると考えている。2 つ目はせん断変形による亀裂の発生と成長を抑止する効果である。土塊に発生した亀裂に対する根の補強効果の模式図を図 2.13 に示した。図 2.13a に示したように土が引っ張られて亀裂が発生する場合、この亀裂の中に

根があればブロックが離れようとする過程で根が引っ張られ、2つのブロックをつなぎとめて亀裂の成長を抑止する効果が考えられる。また、図 2.13b に示したようにせん断変形が起きて歪が生じた場合、歪が生じた部分の根が引っ張られることで変形を抑止する効果も考えられる。これらの効果は観察によれば小さな亀裂の発生と成長に対して細根によって発揮されるものであったが、土塊中に細根は無数に存在し、亀裂も多数発生していることから、細根の効果が積み重なることで土塊自体の補強効果としては非常に大きな割合を占めていると考えている。また、せん断域に生育する根はフレキシブルに変形する細根だけでなく硬く木質化した主根が含まれおり、これが土塊の骨組みとなって変形も抑止するという効果も考えられる。試験中盤である程度変形が進んで亀裂が一つにつながり始めるころには土塊内で主根が大きな亀裂に対して同様の効果を発揮しているとも考えている。

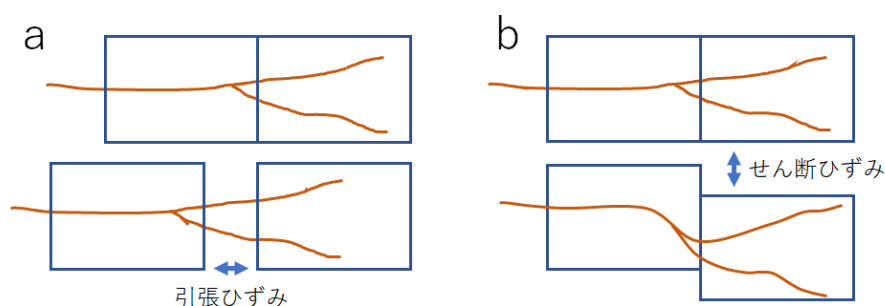


図 2.13 土の小ブロック同士の亀裂に対する細根の補強効果

(2) せん断域の厚さの違いによる根系の崩壊防止力の表れ方の差

せん断域を 0 cm から 50cm に広げると、土のみ試験の場合は破壊時のせん断荷重が 7 kN/m^2 、せん断ひずみは 86 減少し、根入り試験の場合は破壊時のせん断荷重が 18 kN/m^2 、せん断ひずみが 518 減少した。せん断域を厚くすると根の補強効果が減少するが、せん断域が厚くても根による破壊荷重とせん断ひずみは補強されることが示された。

スギ根系が含まれる試験においてもせん断域 50cm の試験よりもせん断域 0 cm の試験で破壊荷重が強かった。根系量の違いが破壊荷重に影響を与えることが考えられるが、今回実施された試験では、スギ根系を含む試験では実験苗畑に植栽された同じ樹齢のスギを試験木として選定しているため試験土塊中の根系量の違いがわずかであると考えられること、土のみの場合でもせん断域 0 cm の場合で破壊荷重が強いことから、破壊荷重 18 kN/m^2 の違いは根系量によるものではなく、せん断域の厚さの違いが要因となっていると推察している。

このことから、森林斜面に豪雨があり、表層土の水分が徐々に増えて斜面下方へ表層土を崩す力が徐々に大きくなると、せん断域が厚い場合の方が、崩壊すべり面（せん断域の厚さが 0 cm に近い場合）で破壊される場合より弱い力で破壊されるので、より早く表層土が崩れる崩壊現象が起こると考えている。

(3) せん断域の厚さが根の変形状態に与える影響

根によるせん断応力の補強強度は根が引っ張られて変形することで増大し、根が変形しきったとき、すなわち最大引張状態となったときに最大となる。せん断域 0 cm の場合ではせん断域 50cm の場合と比較して、せん断域が狭いので小さな変形で根が強い引張応力を発揮できること、土塊のせん断ひずみ自体も大きかったので根が大きく変形することができたことから、強い補強強度が発揮できたと考えている。

ここで、試験終了後に掘り出した根を写真 2.4 に示した。写真 2.4 はせん断試験終了後に試験土

塊の上部 50cm を掘りだして土塊中に含まれていた根系の状態を撮影したものである。写真 2.4 を詳しく見てみると、根は通直ではなく大小さまざまな曲がりや凹凸が無数に存在し、複雑に分岐を繰り返している。このため、せん断試験によって根が引き伸ばされて引張応力を生じるには、材料としての伸びのほかに根の曲がりや凹凸が真つすぐになるような変形が起きていることになる。せん断域が厚くなるとせん断域に含まれる根の長さが増えるため、素材の伸びに加えて根の凹凸や曲がりの解消による伸びの量も増加し、最大引張状態となるまでにより大きな変形が必要となる。以上のことから、せん断域の厚さの違いが根の変形状況に影響を及ぼし、根によるせん断補強効果が変化することが推察できる。



写真 2.4 せん断域内に生育していた根系

（４）表層土の歪みに根系分布が与える影響

スギ根系の深さ方向への根系材積分布をみると地表面から深さ 50cm までの表層部に全根系材積の 93.7～98.1%が生育し、また、根系分布量を平面的にみると根株の中心から半径方向に 1.5m の範囲内に多く集中していると掛谷ら（2016）は報告している。このように表層部の根株の周辺部には非常に多くの根が生育していることを考えると、この部分には歪・亀裂は発達しにくく、その下部の基岩層までの間の表層土には根が比較的少ないため歪・亀裂が発達しやすいと推察できる。また、立木本数密度が小さい場合には樹幹間隔が広くなり、立木間にも亀裂が発生しやすい状況ができて考えている。したがって、根系分布量の少ない表層土の下部にまで多くの鉛直根や斜出根が発達するような状況になれば、表層崩壊防止機能はより強く発揮されると思われる。

（５）根系による崩壊防止機能の評価方法

表層崩壊が厚いせん断域をもって発生する場合には、この原位置せん断試験で示すように根が破断したり、引き抜けたりする前に土塊の方が先に破壊されてしまうことが確認できた。これまでの研究例では根の引き抜き抵抗力、根の引張破断強度（Burroughs and Thomas, 1977 ほか）を用いた事例がみられたが、根が引き抜かれたり、破断するより前に土塊は破壊されてしまうので、引き抜き抵抗力や引張破断強度を用いることは根による崩壊防止力を過大評価する場合があると考えられる。

また、山地斜面で表層崩壊が発生する際、一様に薄いせん断面が発生すると考えるよりも、地形や土質、基岩の状態、水文的な条件、礫などの存在、根系の発達状況などの要因から、同じ斜面内でも様々な厚みを持ったせん断域が発生すると考えた方が自然である。これまでに行われて

きた根系の引き抜き試験や原位置せん断試験による根系の崩壊防止力は薄いせん断域が発生する場合を考えて評価してきた。しかし、今回の試験ではせん断域が厚い場合ではせん断域が薄い場合よりも根系の力が低く評価されることが分かったため、これまでのようにせん断域が薄い場合のみを評価するのでは根系の崩壊防止力を過大評価していた可能性が考えられる。今後はせん断域が薄い場合だけでなく、山地斜面におけるせん断域の発生状況に適したせん断域の厚さを見極めて根系の崩壊防止力を評価する必要があると考えている。

(6) Wu・Watson による研究結果

Wu と Watson は、せん断変形が薄いゾーンに拘束されていない場合のせん断強度への根の寄与を研究するため、根を含む土壌ブロックで現場せん断試験を実施し、土壌・根系のせん断抵抗、選択した根の引張力、および土壌ブロックの変形を測定した。試験後に根を露出させ、それらの位置を決定し、初期位置を推定した。土壌・根系の根力とせん断抵抗は、従来の解法で推定し、測定された根の抵抗力とせん断抵抗と比較した。せん断帯を通過した根は、最大変位 40cm の張力でも破断せず、根の抵抗は、破壊面が弱い土と固い土台の間の境界に制限され、薄いせん断域でせん断された場合に見られるものよりもはるかに小さくなった。そこで、厚いせん断帯の場合に根の抵抗力を推定するための手順を提案した。

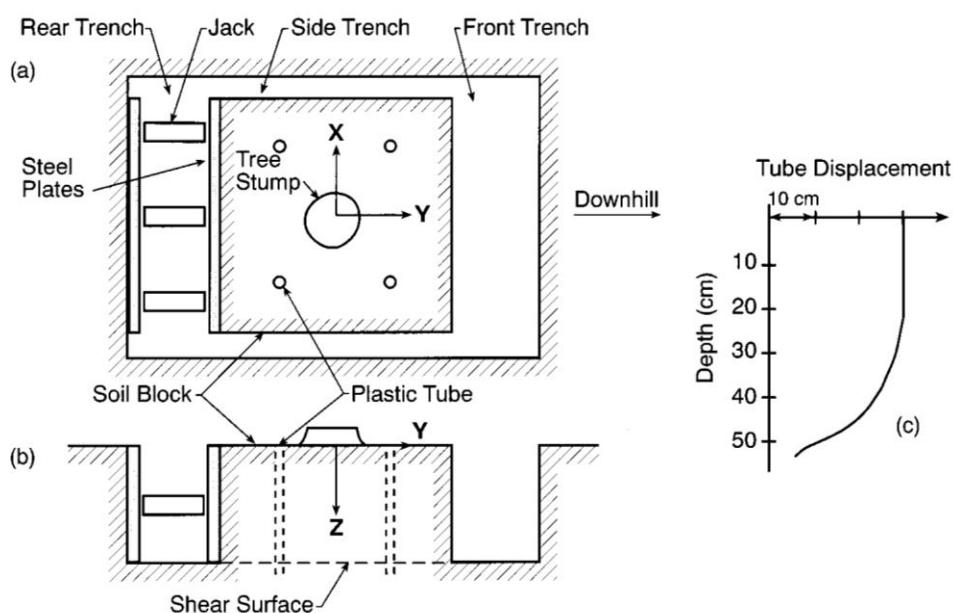


図 2.14 Wu・Watson(1998)による根系を含む原位置せん断試験

彼らの試験対象は 6～8 歳のラジアータパインでせん断域の直径 5cm 以下の根系を含む土壌ブロックではあるものの、土層の拘束が小さくせん断域が大きな条件下で推定された根系を含む抵抗力は、測定された力の $\pm 30\%$ 以内に収まることを示した。せん断帯を通過した根は、最大変位 40cm の張力でも破断しなかった。最終的に推定された根の抵抗力は、平均して根系の引張強度の約 3 分の 1 であったとしている。彼らの論文がわが国で注目されたのは最近であるが、その結果は掛谷・阿部らの最近の報告と同様の結果を示しており、また同時に Shwartz ら(2010)の全ての根系が同時に抵抗力を発揮しないとする Root bundle model のメカニズムとも調和的である。

林地斜面のような表層土中に根系の存在する斜面の安定性については、特に根系による補強の土層のせん断強度の補強効果についての定量的な検討が試みられてきたが、根系自身の強度・分布の不均質性を反映して明確な結論に至っておらず、安定解析のような工学的な検討はいまだ困難であると言わざるを得ない。人工斜面を用いた崩壊実験が試みられ計測技術の進歩によって崩

壊発生に至る斜面内の変動や水分量・間隙水圧の変化を記録することが可能となり、崩壊メカニズムの解明が進んでいる。しかしながら、根系を斜面土層内に再現させることは困難であり再現性も乏しいことから実験的な検討は進んでいない。一方、樹木の存在する自然斜面での崩壊実験は避けられる傾向にあったが、2018年12月、千葉県富津市内の木本を含む植生に被覆された砂質土斜面において人工降雨による崩壊実験が実施された（Ochiai et al., 2021）。本実験においては、崩壊後にすべり面上で破断・引き抜かれた根系および上部滑落崖から採取された不攪乱土塊の調査行われ、土層の深さ毎の根量についての計測が行われた（林野庁, 2018）。最終的な崩壊発生にいたるまでに大きな土層の地表変位量が計測されており、土層中の根系の存在により大きな変形に耐えたと推定された。

第5項 まとめ

原位置せん断試験は、表層崩壊が表層土全体に歪・亀裂が発達して崩れ落ちる現象で、根系は表層土の歪や亀裂の発達を抑止することで崩壊防止機能を発揮しているとの推察のもと、実施されている。研究は開始したばかりで、この推察の証明には程遠いが、今後も、表層崩壊における根系の働きを明らかにするため、現地調査や原位置せん断試験などの実験的手法で根系の表層崩壊防止機能を解明する必要があると考えている。

第6項 引用文献

- Burroughs, E.R. and Thomas, B.R. (1977): Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability, USDA Forest Service Research Paper INT-190, 28p
- Waldron, L.J. (1977) : The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil, Soil Science Society of American Journal, Vol.41, pp.843-84
- Wu, T. H. and Watson, A. (1998): In situ shear tests of soil blocks with roots, Can. Geotech. J. 35: pp.579-590
- Schwarz, M. et al. (2010): Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands, Earth Surface Process and Landforms, pp.354-367
- Ochiai, H., Sasahara, K., and Koyama, Y. (2021): Landslide Field Experiment on a Natural Slope in Futtsu City, Chiba Prefecture, Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk Vol. 6, pp.169-175, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60713-5>
- 阿部和時（1991）：根系の引き抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定、日本緑化工学会誌、Vol.16、No.4、pp.37-45
- 阿部和時（1996）：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、日本緑化工学会誌、Vol.22、No.2、pp.95-108
- 遠藤泰造・鶴田武雄（1968）：樹木の根が土のせん断強さにあたえる作用（第1報）、林業試験場北海道支場年報、pp.167-182
- 掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時（2016）：スギ林分の間伐が根系成長と表層崩壊防止機能に与える影響、日本緑化工学会誌、Vol.42、No.2、pp.299-307

掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時（2018）：樹木の引き抜き抵抗による表層崩壊防止機能の評価方法に関する研究、砂防学会誌、Vol.71、No.3、pp.3-11

北原曜（2010）：根系の崩壊防止機能、水利科学、Vol.53、No.6、pp.11-37

木下篤彦・坂井祐介・大野亮一・田畑三郎・川島正照・山崎孝成（2013）：スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力の検討、砂防学会誌、Vol.65、No.5、pp.11-20、

佐藤創・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行（2013）：原位置一面せん断試験による樹木根系の崩壊抵抗と引き抜き抵抗力の比較、砂防学会誌、Vol.66、No.4、pp.15-20

林野庁（2018）：「令和元年度森林整備が表層崩壊防止機能に及ぼす効果等に関する検討調査委託事業報告書」、委託調査成果物一覧表（令和元年度（平成 31 年度）一般会計）
https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/R1itaku/R1ippan/index.html#212

第4節 3次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価方法の検討

第1項 3次元的评价の必要性

根系の崩壊防止効果を評価する際の最大の課題は、水平根による崩壊抑止力が発揮されるゾーンである滑落崖及び側方崖部分と、鉛直根による抑止力が発揮されるゾーンであるすべり面部分とをあわせて評価する合理的かつ実用的な手法が現時点で確立されていないことである。

すべり形状が複雑化することによって斜面崩壊時の安全率が上昇することは、一般的に1次元の安定解析である無限長斜面の安定解析と、2次元の安定解析とを比較した場合に、移動土塊の上下端の効果によって2次元の方が安全率は大きくなる傾向がある。同様に3次元の解析について、崩壊地辺縁部に働く抵抗力の効果が働くため、安全率が上昇することが知られており、Fredlundらは、同一斜面を2次元と3次元で解析した場合の安全率の上昇が1.3~1.5倍であるとしている。水平根の効果はまさにこの辺縁部に働く効果であるため、2次元の解析ではその効果の一部しか評価することができないという点が根系機能の定量的評価が進まない一因となっていると考える。

その一方、3次元解析を採用する際の短所は、解析モデル作成のための作業量が大きく、解析コストが2次元解析に比べてかなり大きくなるため、解析の適用性と精度の長所がある反面、現状では解析適用例が限られていることである。

第2項 数値モデルによる定量的評価

豪雨時の谷頭凹地(0次谷)における表層崩壊発生の最大の要因は、表土層の不透水境界上面に生じる飽和域であり、表層土の透水性が一定と仮定すると表土層の深さが最小の場所に発生する。

一般に谷頭凹地(0次谷)に表層崩壊が発生しやすいと考えられているが、谷誠(2016)は、森林斜面の0次谷における土壌層の発達機構と、雨水の集中が表層崩壊発生の基本的なメカニズムであるとしており、実際に林内で発生した表層崩壊のメカニズムを数値的に検討することによって、根系の崩壊防止機能を定量的に評価することにつながると考えられる。また、三森利昭(1994)は、軸対称準3次元解析を用いて、集水地形による飽和側方流の集中が、より早い安全率の低下を招くことを数値実験により示しており、3次元解析の有効性を示している。

そこで、航空機LP・地上レーザー及びドローン画像からのSfM手法による現地地形モデルと、樹木の位置と大きさ、現地根系調査・貫入試験等から3次元数値モデルを構築し、0次谷の集水地形における豪雨時の飽和域の発生を推定し、その際の斜面の最小安全率を示す球体または回転楕円体の位置を繰り返し安定解析によって探索し、不均質に分布する樹木根系が発揮する崩壊防止効果の影響を明らかにすることが可能であると考える。

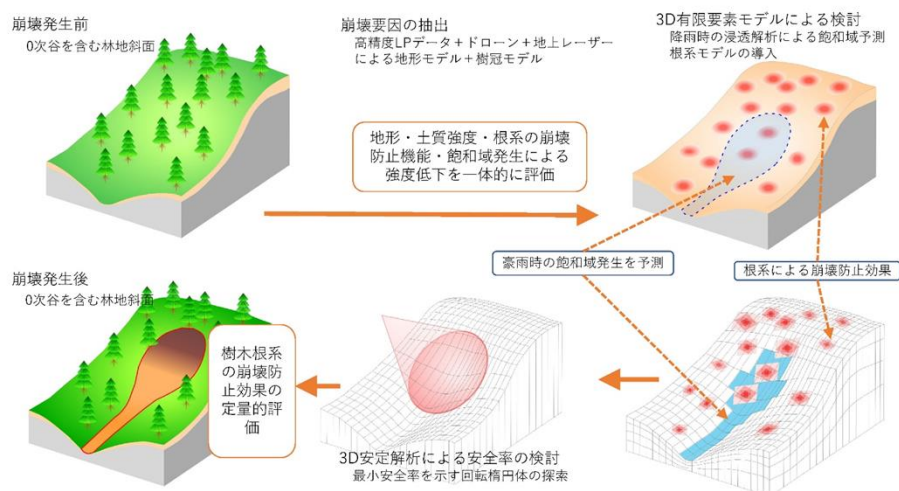


図 2.15 3次元解析の手順のイメージ

第3項 モデル斜面における2次元および3次元安定解析の比較

ここでは実際に行われた人工斜面を用いた降雨による崩壊実験の結果について数値モデルを用いた安定解析により検討する。解析に用いた実験は、ベトナム交通科学技術研究所（ITST）に設置した全長 9m、最大傾斜 34 度、幅 1m の土槽に 0.6m の深さに花崗岩の風化したマサ土を詰め、時間雨量 50mm/h の人工降雨を与えて崩壊を発生させた（図 2.16）。



Table 1 – Soil properties and initial conditions

Soil material	Hai Van sand (weather granite)
Density of soil particles (ρ_s)	2.7 (g/cm ³)
Unit weight (γ)	1.5 (g/cm ³)
Dry unit weight (γ_d)	1.3 (g/cm ³)
Void ratio (e)	1.0
Porosity (n)	0.5
Permeability (k)	9.0×10^{-3} (cm/s)
Initial water content (w)	10.2 (%)
Rainfall intensity (constant)	50 (mm/h)
Failure time after start of sprinkling	137.5 (minute)
Sliding time	~7 (second)

図 2.16 SATREPS によるベトナム交通省交通科学技術研究所での崩壊実験（2016. 11. 13）

本実験で用いた人工斜面を 2 次元でモデル化し、表層に根系による補強の有無による安全率の相違を確認する数値実験を行った（図 2.17）。ここでは簡単のため、0.6m の深さの土層を 0.2m 毎に

3 等分し、崩壊発生時を想定して最下層の 0.2m が飽和した状態の安全率と、最表層に根系補強による粘着力の増を、通常考えられている粘着力の増分 $\Delta C=10\text{kPa}$ に対し、実際に発揮される 30% を想定して $\Delta C=3\text{kPa}$ を付与した場合の安全率とを比較した。

安全率の計算は Fredlund による一般化極限平衡法である GLE 法を用い、円弧すべりを想定してすべり円弧の中心と円弧の半径を変えて最小安全率を示す円弧を決定した。なお、GLE 法は従来多くもちいられてきた Morgenstern Price 法や Spencer 法と同様の結果を示すことが確かめられている。2 次元のモデルでの解析結果を図 2.17 に示す。根系による補強の無い場合の最小安全率 $F=1.030$ であり、崩壊発生時を想定するとほぼ妥当な値となった。ここで最表層の 0.2m に根系による土層の補強を $\Delta C=3\text{kPa}$ 付与し、再度安定解析を行った (図 2.18)。その結果、補強の効果により最小安全率は $F=1.213$ に増加した。この場合、安定解析においてすべり円弧が斜面の上下端で補強された部分を通して影響が安全率に反映された物と考えられる。

これらの 2 次元による安定解析を 3 次元に拡張させるため、用いた 2 次元モデルを奥行き方向に拡大したものを図 2.19 に示した。安全率の計算は 2 次元と同様に GLE 法を用い、すべり面には球面を用いた。根系による表層の補強の無い場合の解析結果を図 2.20 に示した。安全率 $F=1.211$ と図 2.17 の 2 次元の結果に比べて約 20% 大きい値を示し、側壁の効果が発揮されたと考えられる。さらに最表層に根系による補強効果として $\Delta C=3\text{kPa}$ 付与した場合の結果を図 2.21 に示した。この場合、安全率は $F=1.691$ となり補強された表層をより広いすべり面が通過したため、最小安全率が増加したと考えられ、2 次元解析による結果にくらべ表層の補強効果がより大きい結果を示した。なお、ここで用いた安定解析は、Soilvision 社 (現 Bentley 社) のソフトウェアである SVSLOPE を用いている。

これまで、森林根系の効果が崩壊すべり面において発揮されるいわゆる「杭効果」を主体として検討されてきたことを反映し、また安定解析においても無限長斜面を用いた検討が主流であったため、表層に多く分布する根系の斜面補強効果が過小評価されてきたと考えられる。しかしながら、3 次元安定解析の 2 次元解析に対する有利性についてはすでに多くの検討 (塚田剛, 2004) がなされており、すでにこれまで 3 次元解析の問題とされてきたモデル作成の煩雑さ等についてはある程度解決されているため、今後現実斜面のより正確な安定性の評価手法として利用がさらに進むことが期待される。

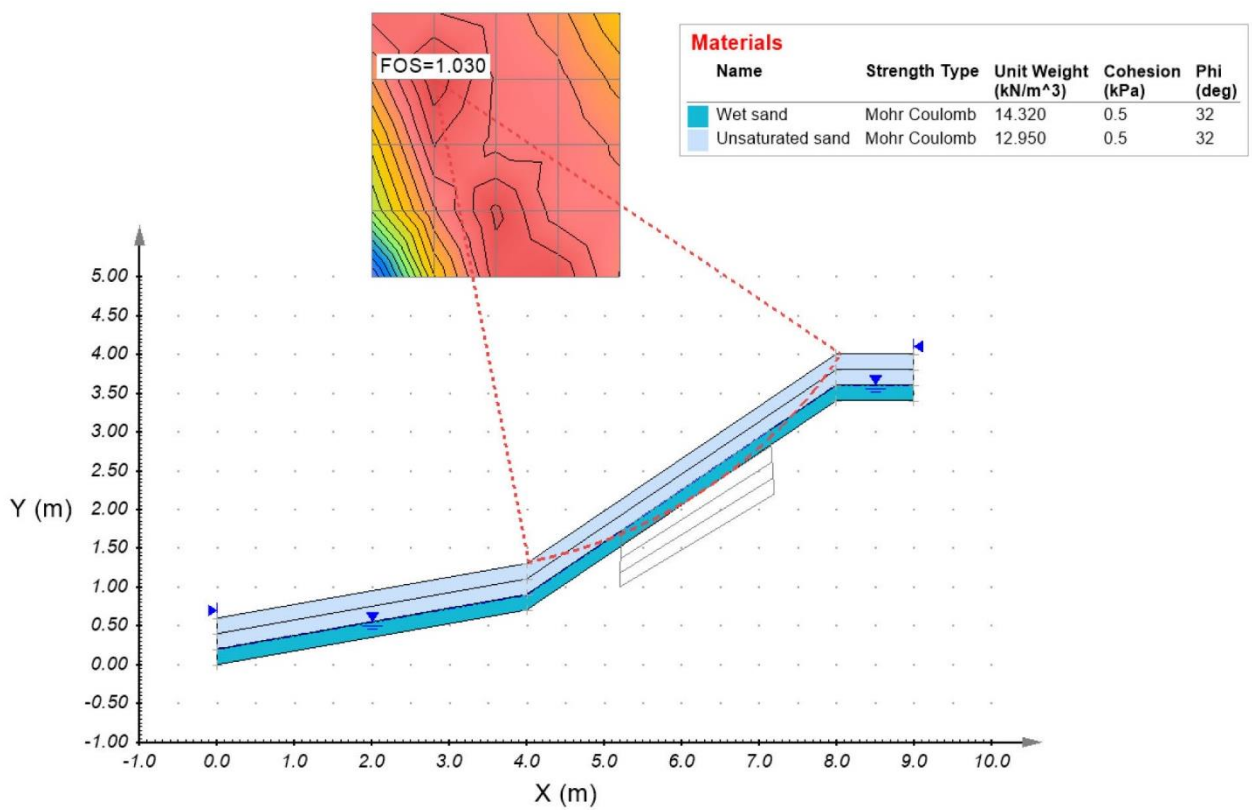


図 2.17 崩壊発生を想定したマサ土斜面の最小安全率

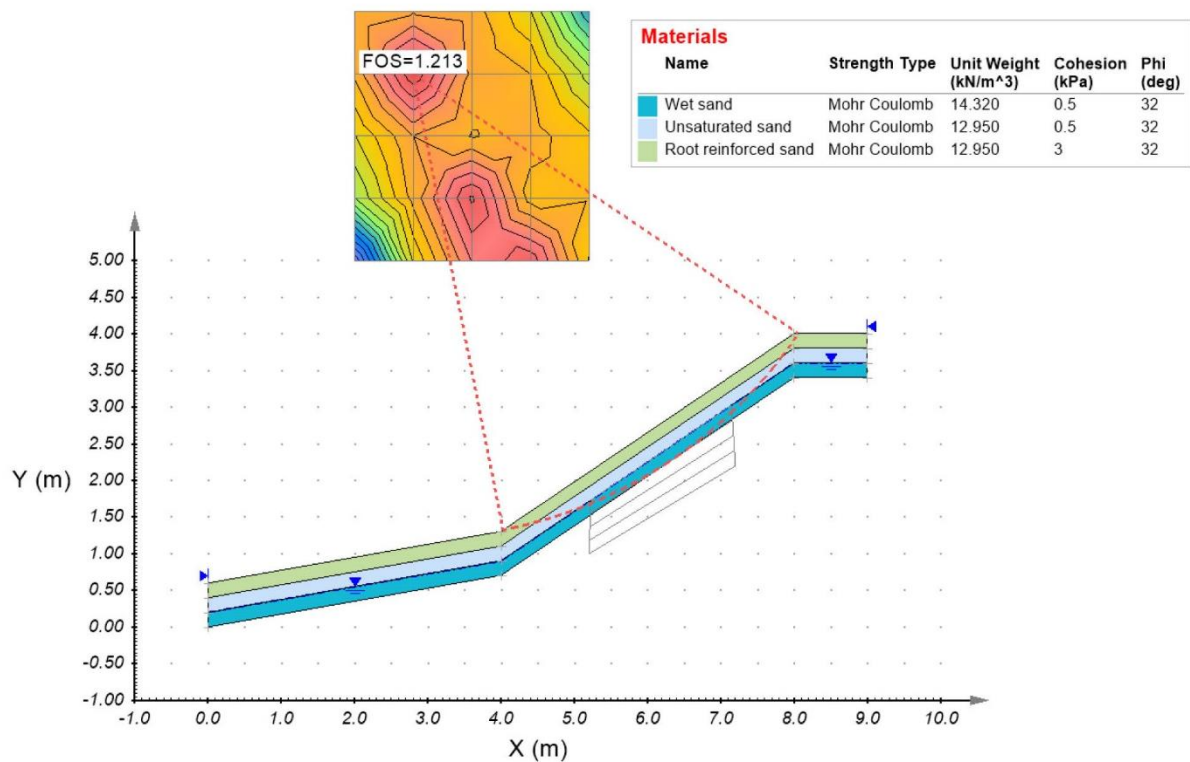


図 2.18 崩壊発生を想定したマサ土斜面の 2 次元最小安全率（表層に根系による補強）

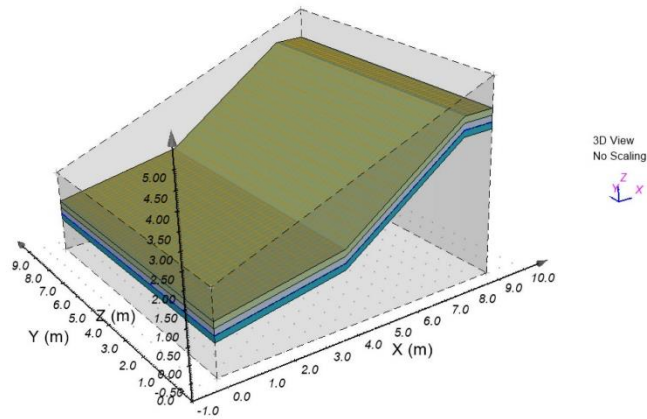


図 2.19 3次元安定解析モデル

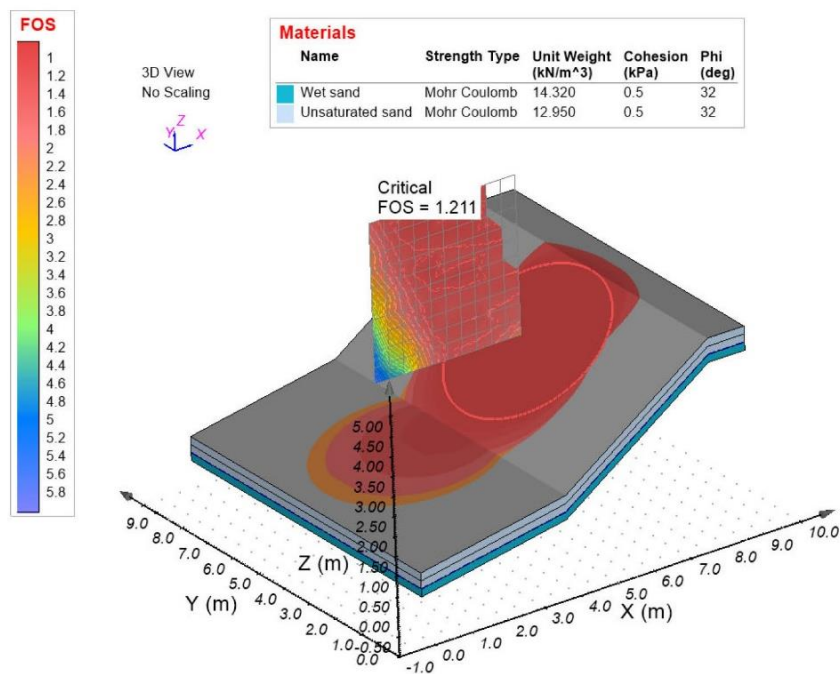


図 2.20 崩壊発生を想定したマサ土斜面の3次元最小安全率

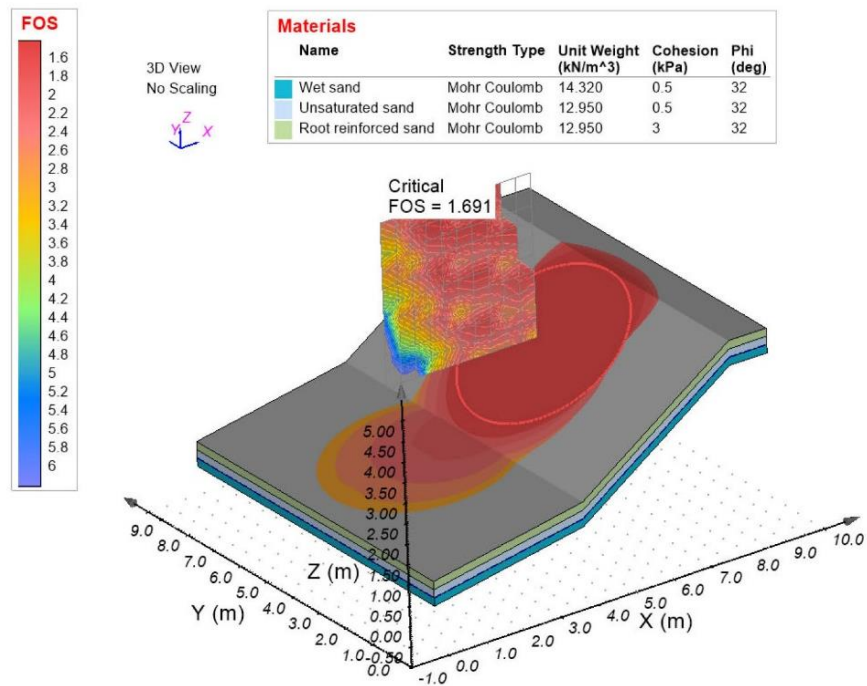


図 2.21 崩壊発生を想定したマサ土斜面の 3 次元最小安全率（表層に根系による補強）

第 4 項 引用文献

谷 誠（2016）：水と土と森の科学, 京都大学学術出版会, 243pp

三森利昭（1994）：軸対称座標系を用いた準 3 次元崩壊解析法の研究, 新砂防 48(2), pp.4-11

塚田 剛（2004）：三次元斜面安定問題に対する新しい解析法の提案, 法政大学大学院修士論文, 86p

第5節 現地実態調査

日本放送協会は平成30年12月11日～12日にかけて千葉県富津市において大規模な山腹崩壊実験が行った。本実験は、これまであまり行われていない貴重な実験であり、崩壊面に破断した根系が明瞭に残存している現地状況が変わる前に現地調査を行えば、表層崩壊に関する貴重なデータが得られる。日本放送協会に確認したところ現地調査が可能であったため、実験後の根系等のデータを収集・整理することは表層崩壊と根系の関係を検討する上で必要との判断から、現地調査を実施したものである。

第1項 調査箇所の概要

- 調査箇所：千葉県富津市小久保地内（図2.22）
- 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 2.22 現地実態調査箇所位置図

第2項 地形測量

崩壊実験の前後で調査箇所周辺の地形をトータルステーションで測量した（図2.23、写真2.5）。

実験前は、下部を通過する国道465号線を起点として当該斜面の頭部を終点とする縦断測量を実施するとともに（図2.24）、当該斜面内の縦断線の両側にそれぞれ2列3段の地点の地盤高を測定した。列間距離は約2.5m、段間距離は約5mとし、縦断線を含めた5列3段の交点（15点）を簡易貫入試験箇所とした（図2.25）。

実験後は、崩壊により地盤高が低下した簡易貫入試験箇所（崩壊しなかった最上段を除く）を再度測定した。また、崩壊地の周囲測量を実施した。

測量の結果、崩壊面は面積0.02ha、水平延長12.5mであった。また、崩壊しなかった最上段を除いた簡易貫入試験箇所の崩壊深は0.49～1.29m（表2.13）、平均で0.87mであった。なお、測量の座標リスト及び成果簿を「巻末資料3 現地実態調査データ」に示す。

表 2.13 崩壊実験現場での崩壊深

単位:m

測点	NO.8-1	NO.8-2	NO.8	NO.8-3	NO.8-4
崩壊前	41.07	41.08	41.19	40.82	40.37
崩壊後	41.07	41.08	41.19	40.82	40.37
差分	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
測点	NO.7-1	NO.7-2	NO.7	NO.7-3	NO.7-4
崩壊前	36.78	37.51	37.74	37.50	37.01
崩壊後	36.29	36.71	36.90	36.77	36.48
差分	-0.49	-0.81	-0.84	-0.73	-0.53
測点	NO.6-1	NO.6-2	NO.6	NO.6-3	NO.6-4
崩壊前	34.35	34.96	34.96	34.73	34.71
崩壊後	33.25	33.67	33.83	33.78	33.90
差分	-1.10	-1.29	-1.13	-0.95	-0.81



図 2.23 現地実態調査箇所平面図

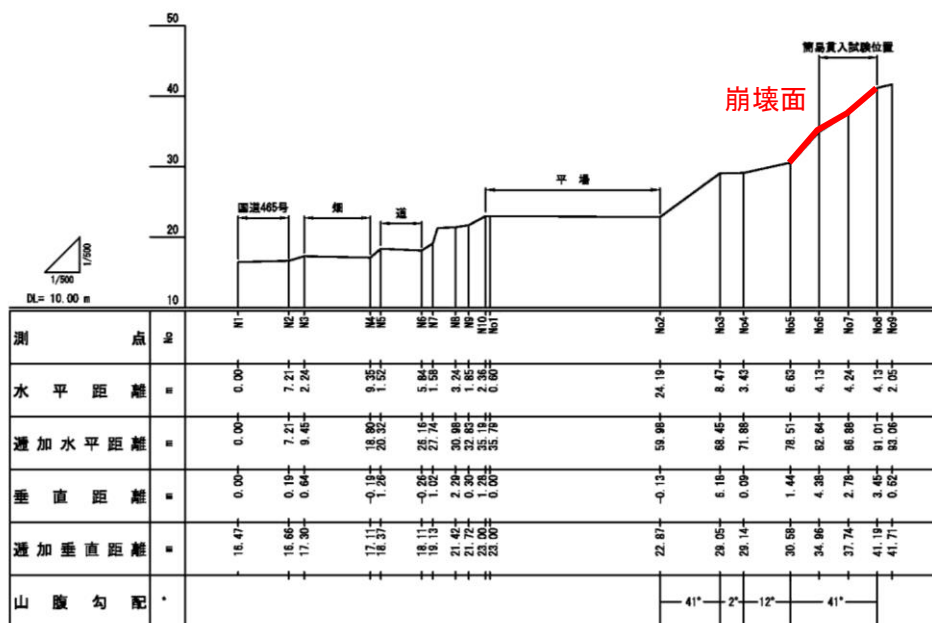


図 2.24 現地実態調査箇所縦断面図

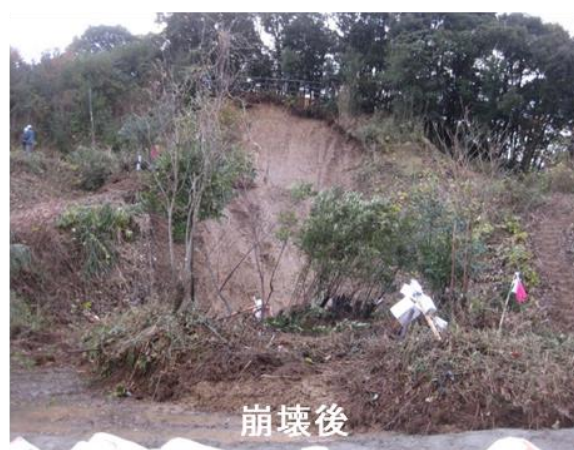


写真 2.5 崩壊前後の状況

第3項 簡易貫入試験

土層深を把握するため、崩壊前に簡易貫入試験を実施した。試験箇所は前述のように、5列3段の15地点とした（図 2.25）。

試験結果は図 2.26～図 2.28 のとおりで、上段では深さ 150～200 cm で Nd 値 50 の硬い地盤に達している。また、中段では 90～190 cm、下段では 170～200 cm にそれぞれ硬い地盤が出現している。ただし、地盤の硬さと崩壊面の位置には関連性が認められなかった。

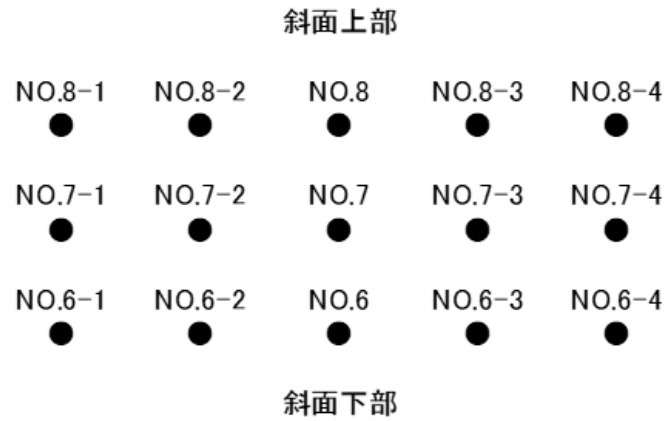


図 2.25 簡易貫入試験箇所

測点	NO.8-1	NO.8-2	NO.8	NO.8-3	NO.8-4
自沈量cm	18	25	22	2	10
深さcm	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数
～10	0	0	0	2	0
～20	1	0	0	3	3
～30	3	1	2	6	2
～40	4	1	7	6	5
～50	7	3	7	6	5
～60	9	3	7	7	8
～70	11	3	8	9	2
～80	9	4	8	11	6
～90	11	4	9	12	9
～100	12	7	10	10	16
～110	16	9	11	10	17
～120	22	13	20	21	24
～130	30	23	28	20	18
～140	39	33	26	36	16
～150	50	35	32	29	19
～160	－	39	42	26	32
～170	－	34	50	26	35
～180	－	50	－	30	38
～190	－	－	－	46	28
～200	－	－	－	50	26
落下回数 50到達深 cm	149	177	170	196	－
崩壊深cm	0	0	0	0	0

図 2.26 簡易貫入試験結果（上段）

測点	NO.7-1	NO.7-2	NO.7	NO.7-3	NO.7-4
自沈量cm	17	10	15	10	8
深さcm	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数
～10	0	0	0	0	1
～20	1	4	1	2	1
～30	2	5	2	3	4
～40	5	6	2	2	2
～50	★ 6	6	3	3	★ 4
～60	5	11	8	5	★ 6
～70	8	7	6	★ 6	15
～80	35	★ 17	★ 6	★ 7	9
～90	50	★ 34	★ 8	7	10
～100	—	28	8	9	12
～110	—	29	18	15	14
～120	—	43	39	17	17
～130	—	50	50	27	30
～140	—	—	—	35	30
～150	—	—	—	50	34
～160	—	—	—	—	33
～170	—	—	—	—	23
～180	—	—	—	—	25
～190	—	—	—	—	50
～200	—	—	—	—	—
落下回数 50到達深 cm	90	129	129	150	189
崩壊深cm	49	81	84	73	53

図 2.27 簡易貫入試験結果（中段）

★：崩壊面の位置

測点	NO.6-1	NO.6-2	NO.6	NO.6-3	NO.6-4
自沈量cm	17	15	5	6	10
深さcm	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数
～10	0	0	1	1	0
～20	1	1	2	2	5
～30	3	3	2	3	4
～40	3	2	5	2	4
～50	3	3	6	4	5
～60	4	2	6	7	7
～70	4	4	7	10	10
～80	6	4	7	11	★ 10
～90	5	5	7	9	★ 10
～100	4	5	11	★ 9	19
～110	★ 3	4	★ 17	8	24
～120	★ 3	9	★ 23	8	30
～130	5	★ 12	21	28	33
～140	14	11	23	30	35
～150	30	11	29	33	44
～160	39	33	34	33	48
～170	48	39	50	29	50
～180	50	50	—	33	—
～190	—	—	—	39	—
～200	—	—	—	50	—
落下回数 50到達深 cm	178	180	169	198	170
崩壊深cm	110	129	113	95	81

図 2.28 簡易貫入試験結果（下段）

★：崩壊面の位置

第4項 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2.6）、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2.29）。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X Y座標値をコンベックスで測定してセンチメートル単位で求めた。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センチメートル単位で測定した。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ミリメートル単位で求めた（写真2.7）。

計測の結果、出現していた根の総数は91本、平均4.55本/m²、長さは平均37cm/本、直径の平均は地際が3.4mm/本、先端が3.1mm/本であった。20個の調査ブロック内の根の分布状況は図2.30のとおりである。なお、根の位置、根の長さ、根の径に係る詳細データを「巻末資料3 現地実態調査データ」に示す。

表層土の移動に抵抗した、すべり面における根系（垂直根）の径別の分布状態を分析すると表2.14及び図2.31のとおりで、直径1～4mmの根が全体の85%程度を占めており、10mmを超えるものは3本、構成比率1%程度と極端に少なかった。

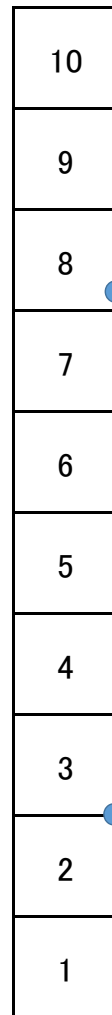


写真 2.6 崩壊面の調査ブロック



写真 2.7 根の径の計測

NO1ライン
立木間



測点NO7

測点NO6

NO2ライン
立木位置

立木: タブノキ、L=4.8m、D=6.5cm

L: 地際から梢端までの長さ

D: 地際径

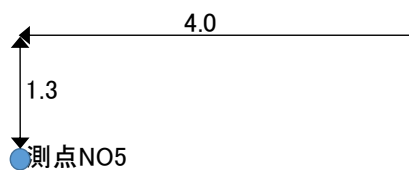
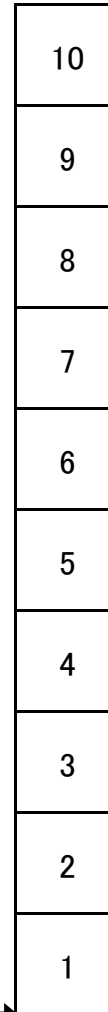


図 2.29 調査ブロックの配置

N01 ライン

N02 ライン

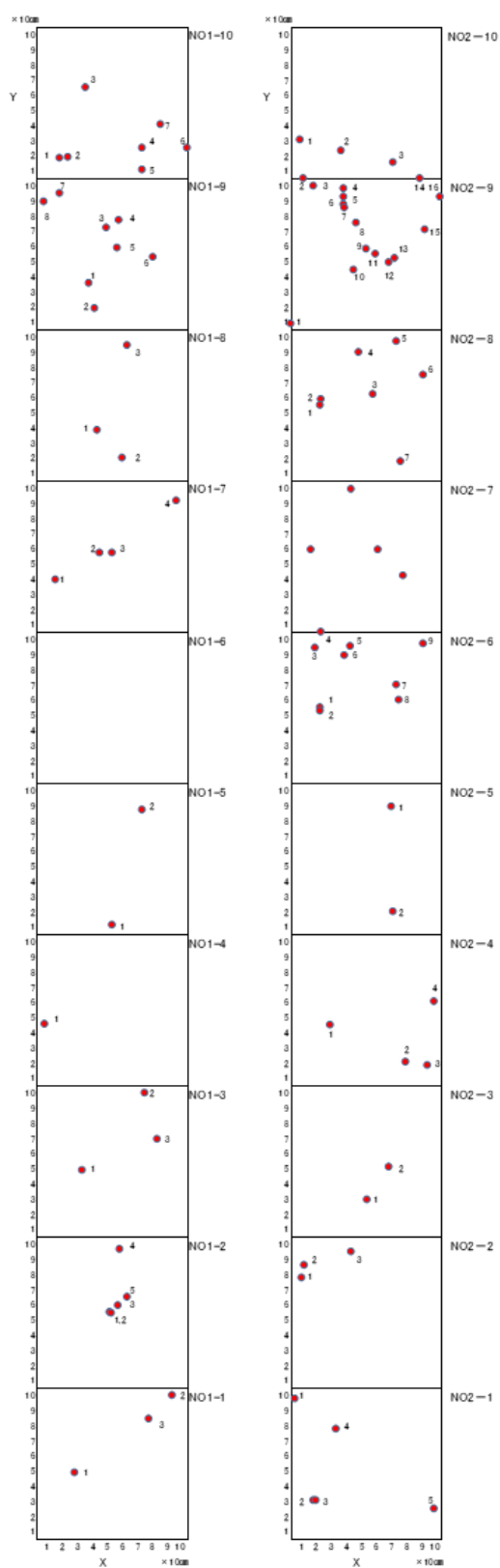


図 2.30 根の分布状況

表 2.14 直径別の根の分布状況

直径	本数		累積本数		累積比率%	
	地際径	先端径	地際径	先端径	地際径	先端径
~1			0	0	0	0
~2	16	32	16	32	18	35
~3	40	30	56	62	62	68
~4	19	16	75	78	82	86
~5	3	2	78	80	86	88
~6	4	3	82	83	90	91
~7	2	2	84	85	92	93
~8	1	2	85	87	93	96
~9	3		88	87	97	96
~10	1	3	89	90	98	99
~11	1		90	90	99	99
~12			90	90	99	99
~13			90	90	99	99
~14			90	90	99	99
~15	1		91	90	100	99
~16			91	90	100	99
~17			91	90	100	99
~18			91	90	100	99
~19		1	91	91	100	100

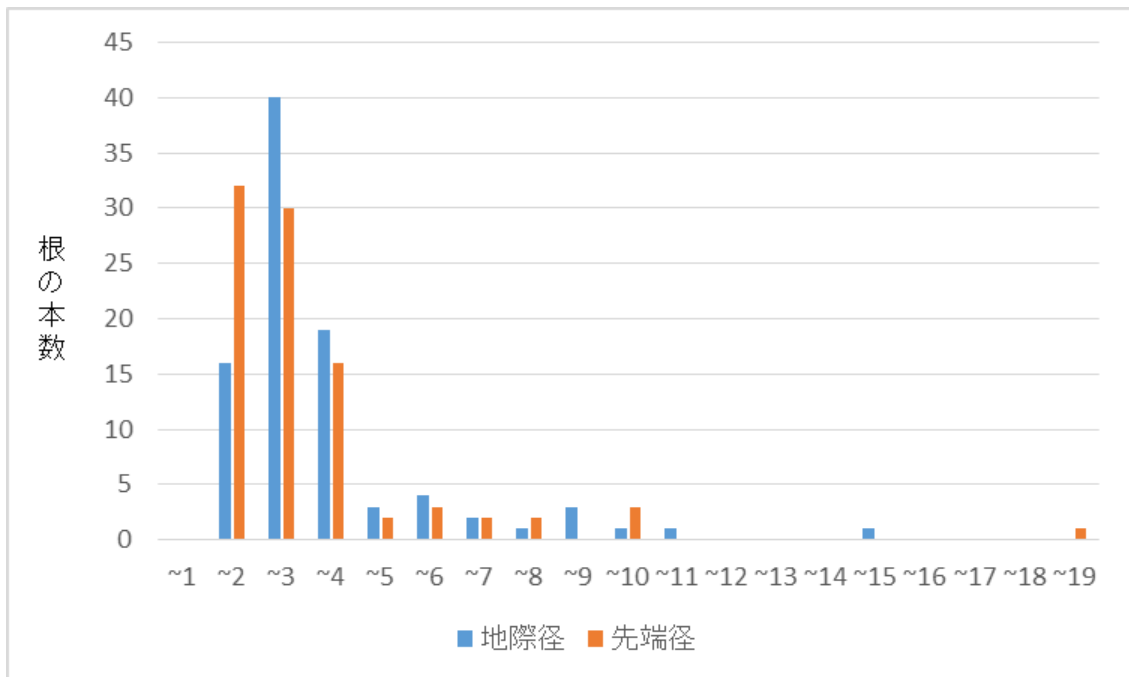


図 2.31 直径別の根の分布状況

第5項 地形モデル構築

現地において実施されたドローンによる現地斜面の計測結果から SfM 法によって求められた等高線データから Goldensoftware 社製の Surfer16 を用いて 3 次元モデルを作成した。

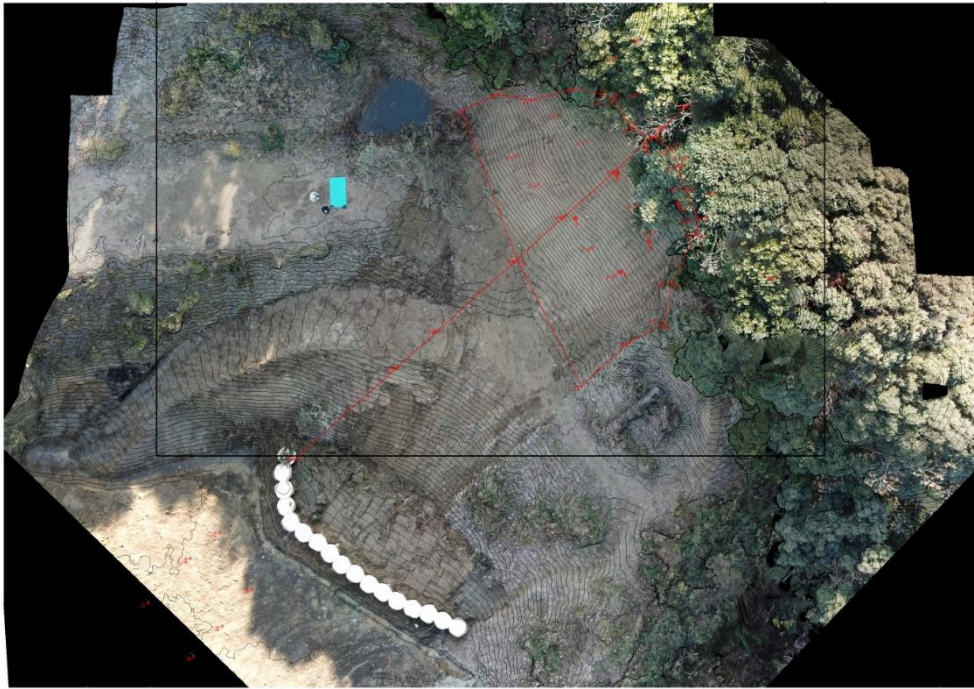


図 2.32 ドローン撮影による崩壊実験後の斜面のオルソ画像

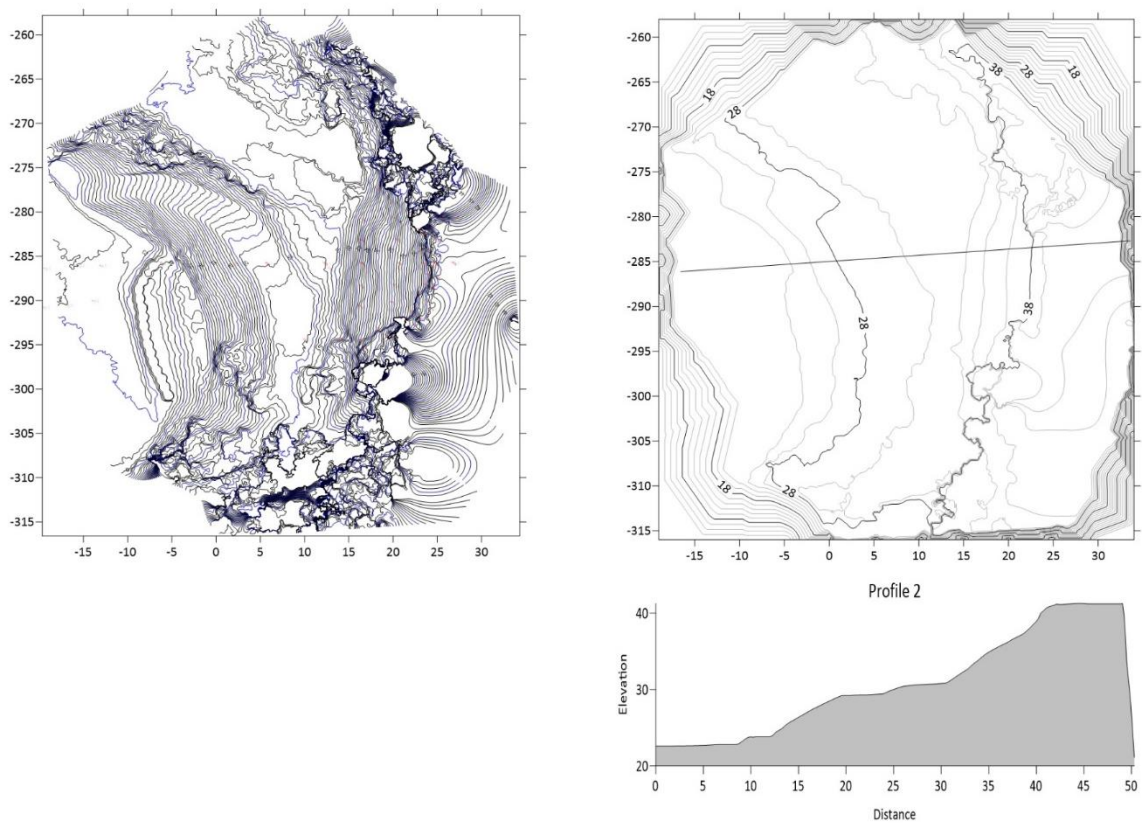
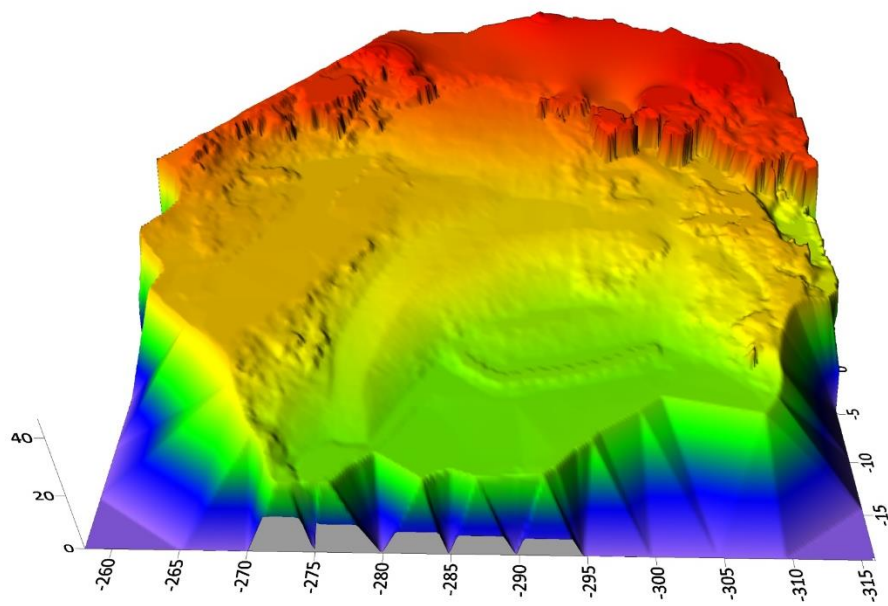
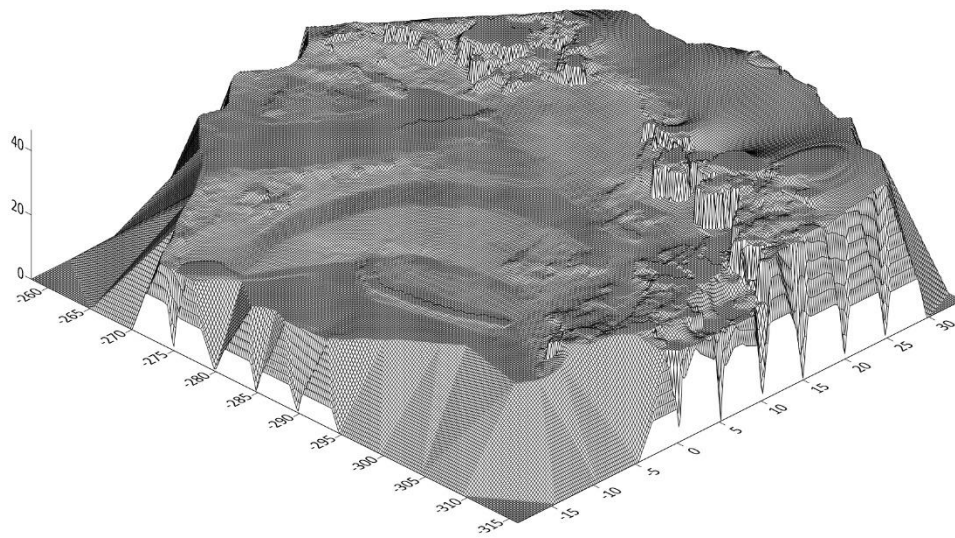


図 2.33 ドローン測量結果から作成した等高線および縦断面図



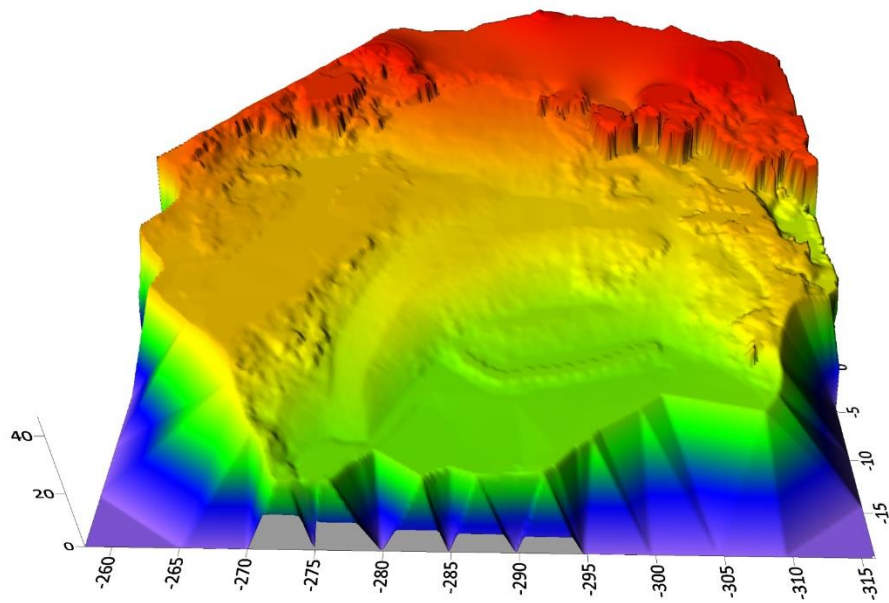


図 2.34 ドローン測量結果から作成した 3 次元モデル

第6節 公益的機能発揮のための森林整備の在り方の検討

これまでに実施してきた「既往文献調査」、「原位置せん断試験データの整理・分析」及び「現地実態調査」に加え、「根系による土の補強効果の工学的評価方法の検討」及び「3次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価方法の検討」を総合的に勘案し、公益的機能発揮のための森林整備の在り方を検討した。

林野庁は、近年、線状降水帯で特徴づけられる局地的大雨の増加にともなう豪雨時の流木災害に対応するため、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、航空レーザー測量の結果さら作成した20mメッシュの地形図を元に流木の発生源となる表層崩壊の発生しやすい斜面の抽出方法を検討した。その検討の中で、識者から流木災害の発生しやすい流域においては、流木の発生源となる0次谷の整備を検討すること、および結果的に流木化した際に注目されやすい溪畔域のスギ・ヒノキ等人工林を広葉樹林化することが提案された。治山ダム等の構造物を渓流域に多数設置することによって、災害を低減・防止することは技術的には可能であるとしても、限られた資源を有効に活用する観点からも、谷頭凹地を含む溪畔域における整備の限界とあるべき方向性を注意深く見極めることが重要であるといえる。

一般に地形学分野においては侵食の前線である遷急線、特に谷頭凹地（0次谷）においては表層崩壊が発生しやすいと考えられてきたが、豪雨時の谷頭凹地（0次谷）における表層崩壊発生の最大の要因は表土層の不透水境界上面に生じる飽和域であり、表層土の透水性が一定と仮定すると表土層の深さが最小の場所に発生することが表層崩壊の基本的なメカニズムであると考えられている。

谷誠（2016）は、山地斜面の0次谷における土壌層の発達機構と雨水の集中が表層崩壊発生の基本的なメカニズムであるとし、災害対策においては土壌層の発達・崩壊のサイクルにおける森林生態系との相互作用を前提にする必要があり、森林を生物資源として活用しながら、土壌層が崩壊しないよう維持する戦略が重要であるとしている。こうしたサイクルを見極めることによって初めて相互作用の実態を把握することが可能になると考える。また、生態系の利用と保全のバランスの維持が人間生活にとって最重要であるのに、自然災害に対する防災対策が切り離され独立して行われがちであると警告していることも注目すべき指摘であろう。

2017年の九州北部豪雨においても、大規模な線状降水帯により深さ2～3mにおよぶ根系より深い場所からの崩壊が多発し、森林の表層崩壊防止機能の限界ではないかという意見が多数示された。しかしながら、実際に発生した流木の量は流出土砂量の2%程度であり、これまでの定説と大きく外れてはならず、比較的深い層からの崩壊に対しても森林の崩壊防止機能は効果を発揮していたと考えられる。これに関しては、今後前述したような3次元である実際の現象に、より忠実な評価・検討手法の導入により次第に明らかになっていくものと期待される。

治山事業において実施されてきた本数調整伐の効果について、これまで必ずしも明確な効果が定量的に示されてきていないが、言うまでも無く今後とも重要な課題として引き続き検討を継続する必要がある。

樹木根系の効果の検証には多大な労力を必要とすることから、その研究の進捗には多くの困難が伴う。しかしながら、近年の日欧における成果に注目しつつ、森林機能の工学的な評価に耐えうるものとしていくことが治山技術に関わるものとして依然最重要な課題であると考えられる。

第7節 3カ年間の調査結果の取りまとめ

平成30年度及び令和元年度の報告書の内容に本年度の検討結果を加え、「公益的機能発揮のための森林整備の在り方に関する調査研究」の報告書として取りまとめた。

卷末資料 1 検討委員会議事録

森林保全・管理技術研究開発委員会 森林整備技術部会
「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」
平成 30 年度検討委員会 議事録

1. 日 時：平成 30 年 11 月 19 日（月） 15:00～17:00
2. 場 所：林友ビル 6 階中会議室（東京都文京区後楽 1-7-12）
3. 議 事：1）森林保全・管理技術研究開発事業について
2）水土保全部会の事業概要について
3）平成 30 年度事業計画案について
4）その他
4. 出席者：委 員 北原 曜、阿部和時、五味高志、志水俊夫
事務局 落合博貴、渡邊悦夫、鈴木貴浩、埋橋一樹
5. 配付資料：資料 1 森林保全・管理技術研究所の概要
資料 2 水土保全部会の事業概要
資料 3 平成 30 年度事業概要
参考資料 1 開発委員会における当部会への意見と対応
参考資料 2 平成 30 年度森林整備が表層崩壊防止機能に及ぼす効果に関する検討
調査委託事業仕様書
参考資料 3 既往研究成果リスト

【討議内容】

渡邊：ただいまから森林保全・管理技術研究所 水土保全部会 課題名「公益的機能発揮のための森林整備のあり方」の平成 30 年度検討委員会を開催します。本日の司会・進行を務めさせていただきます森林テクニクスの渡邊です。よろしくお願いします。はじめに、当部会主査である落合さんからご挨拶をお願いします。

落合：落合です。本日はお忙しいところお集まり頂きありがとうございます。今回の課題の趣旨としては、根系に関する調査研究はかなり厳しい状況にあります。社会的要請としては九州や西日本の豪雨災害を受けて、森林や樹木の崩壊防止機能の定量的評価が求められています。このような課題に対して、この委員会の検討期間 3 年間で今後どうしていくか、この委員会で何をなすべきかご検討し忌憚のないご意見をお願いしたいと思います。

渡邊：はじめての委員会ですので、各委員をご紹介します。

（配付資料確認・・・資料 1～3、参考資料 1～3、既往成果の概要集、北原先生、阿部先生の発表論文の写し 4 編）

議事に移りますが、議事の座長は北原先生をお願いします。

北原：北原です。よろしくお願いします。昨年の北九州、今年の広島等、かなりの災害が続いているが、北九州では崩壊地から土石流が流下しており、森林根系の効果があるか否かの議論が続いている。その意味でも、今回の委員会は時宜を得たものと思います。少しでも森林による災害防止に寄与できる方向性が示されればと思っています。よろしくお願いします。

それでは議事に入ります。森林保全・管理技術研究開発事業について説明願います。

鈴木：（資料 1 及び参考資料 1 について説明）

・開発委員会での意見を踏まえて、この部会の名称を「水土保全部会」とした

北原：続けて、水土保全部会の事業概要について説明願います。

鈴木：（資料 2 について説明）

北原：研究開発課題では「公益的機能発揮のための森林整備のあり方」となっているが、参考資料 1 では「根系の崩壊防止機能の新たな手法による評価」となっている。これらの関係はどうなっているか。

志水：資料１の P5、(3) に平成 30 年度活動予定がある。この中の 1) と 2) が継続事業で、3) と 4) が新規の事業。このうち、4) が当委員会に関連するテーマである。しかし、開発委員会の議論を踏まえて、参考資料 1 に示したテーマに変更した。根系や水土保持に絞った議論をしたらどうかというのがこの間の流れである。

渡邊：資料 2 の 3 研究開発計画の (4) 「水土保持機能評価手法と機能強化のための森林整備のあり方」が当部会の担当となったが、テーマが大きすぎるため、具体的な内容として「根系」に絞った内容とする方向で開発委員会での承認を得た。

北原：課題として公益的機能があり、これを崩壊防止機能も含むと理解していいか。

落合：これまでの調査は既往文献調査が主体で、併せて現地調査も行ってきたが、もっとポイントを絞ったテーマがいいのではないかと検討して、根系に重点を置いた調査タイトルとした。

五味：公益的機能の中で根系にポイントを絞ったということでもいいか。

北原：現地せん断試験と現地実態調査ということであるが、現地せん断試験は大がかりな設備が必要になる。

落合：阿部先生がやってこられた方法をちょっと変えて、これを支援する方向で考えている。

北原：現地実態調査は具体的な場所を想定しているか。

落合：災害に強い森づくり発祥の地とも言える岡谷か、あるいはこれ以外の適地を検討している。

北原：では次に、本年度調査について。

渡邊：(資料 3 について説明。これまでに集められた資料は参考資料 3 のとおり。)

色分けは、黄色が北原先生中心の信州大学関連の資料、緑は阿部先生と日大関連資料、オレンジは執印先生等、青は各県で取りまとめた資料と区分した。これらのリストの中から、論文の概要や取りまとめ部分を引用させて頂いたものを付属資料として添付している。今年度はこのような形での整理を進めたいが、最終的な成果としてどのようなものでもいいか。開発委員会では長野県の指針を補完する形態のものができないかといった意見もあったが、このような方向でいいか。さらには、次年度の調査内容についても議論をお願いしたい。

研究所テーマの年度が 7 月から 6 月の期間のため、今回のテーマも来年 6 月までに取りまとめる予定となっている。

この調査を進めるに当たり、計画書では「林野庁、森林総研、都道府県等と連携を図る」と記載しているが、林野庁から参考資料 2 に示す調査事業が発注された。我々がテーマを検討し、調査に着手した後で林野庁の委託業務が公告になった。内容や調査の流れが我々の調査とほぼ同じ内容のため、森林テクニクスが競争に参加して受注することができた。委員会としては委員長に阿部先生、委員には執印先生、森林総研の大丸さん、兵庫県の山瀬さんをお願いしている。

さらに、森林総研でも根系と崩壊の関係についての調査が進められているが、こちらは根系の生育モデルを明らかにする方向で、立地や防災が中心で進んでいるとのことである。

北原：北九州での災害以降、マスコミ等で森林と崩壊の関係が問題視されたが、林野庁としても適切なデータが不足している状態である。

全体としてご意見等ありますか？

資料一覧で信州大学のデータが抜けているようなので、後ほど資料を提供します。

最終的な出口としては森林整備手法となるのか？

落合：九州災害以降、石川先生が溪畔域の森林整備について検討しているが、治山としても発生源対策も含めた対策が必要なことから、災害防止の観点からも積極的な整備を行う方向にある。今回のテーマもこの点を意識している。

志水：森林整備に関連して、溪畔林に関するデータはあるか？

落合：2006 年に長野県が調査したのが初めてで、整備した林分と未整備の林分の違いを引き倒し

試験等で調査した。最近兵庫県でも調査検討を行っているが、全国的には少ない。

北原：兵庫県では「災害に強い森づくり検証委員会」を設け、これまでに第1期と第2期検証委員会報告書が出ている。現在第3回検証委員会を行っている。森林技術センターが引き抜きや引き倒し試験を行っている。この報告は一読を勧める。

兵庫県では溪畔域での土石流緩衝林の造成の方法とか、崩壊防止機能向上の方策等を検討している。

最後の出口としては森林整備につなげる必要があると思うが、関連する調査資料があるので、これで説明する。

＜樹木根の崩壊防止機能調査のPPT＞

- ・ 樹種と胸高直径と距離がわかれば ΔC がわかる。
- ・ 樹種と胸高直径と立木配置距離がわかれば崩壊防止力分布図ができる。
- ・ 空中写真から立木配置、樹幹投影面積から換算した胸高直径、樹種がわかれば、崩壊防止力分布図ができる。
- ・ これに経年変化を加えることもできる。
- ・ 間伐すれば根が腐るが、まわりの根は太くなる（密度管理図から予測）。
- ・ 色分けした図で色が薄い箇所を減らす対策として広葉樹を植えるとか、治山対策として補強を行えば、崩壊防止機能が高い森林造成が可能となる。
- ・ 密度管理図と組み合わせることで、崩壊防止力の経年変化も表すことができる。
- ・ 普遍的な式を作ってみたので、これを森林整備の予測に活用したらどうかと思い紹介した。

落合：森林の根系の補強強度が及んでいない場所で、どのようなかたちで実際の崩壊現象が起きるか？

北原：弱い部分がどのような状況かは実証できない。しかし、空中写真があれば、比較することで弱い部分が確認でき、実証は可能になる。

落合：三次元的な強度変化がある所で、どこで崩壊が起きやすいかをどのように評価するか？従来は二次元評価を行っていたが、水平根を入れると三次元的評価が必要となる。

北原：広島災害の調査によると、花崗岩の堅い基岩のため根がほとんど残っていない。簡単な試算を試みたところ、鉛直根の効果は5%程度しかない。これならば水平根の確認が必要ということで調査を行った。

水平根の効果は三次元で考える必要があるが、崩壊土量に対する根の周囲長は、大きい崩壊地ほど周囲長の効果が減ってくる。大きい崩壊地では根の効果は減るが、通常降雨に対しては普通にある崩壊地では水平根の効果がある。鉛直根の効果は期待できない。

落合：水平根の効果をうまく評価しないと森林の存在意義がなくなる。三次元的な評価をしたい。そのために今回の調査を計画した。調査内容についてはどのような内容が望ましいか検討頂きたいし、この委員会は林野庁調査に対するネタだしという立場であることも考えている。林野庁が対外的な説明をする際の、科学的な根拠のある評価手法を確立したい。

北原：林野庁調査も最終的には森林整備が絡んでくると思うから、今回紹介した手法を活用されたい。

阿部： m^2 当たり 50 kN といった強い値が崩壊地の側面で確認されているが、そうすると崩れなくなってしまうので、おかしいと思い研究成果リスト No.13、No.120 の試験を最近行った。根の強度自体は強いが、角度を付けて引っ張るとまわりの土を壊しながら抜けてくる。さらに、引く抜き抵抗力のピークになるまでに根が伸びて来る実態もある。これらを考慮すると、引き抜きの実効強度は3割程度下がったものとなることも考慮する必要がある。

北原：道立林試の試験によると、引っ張ってから破断するまでの音を聞いていると時間差があるとのこと。7掛くらいが妥当との意見もある。

阿部：表層崩壊のすべり面を考えたとき、地すべりのようなきれいなすべり面が考えられるか疑

間を感じている。表層崩壊が発生する場所はそのような地盤構造ではないところが多い。

No.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」では、根系の分布が表層崩壊に及ぼす影響を調査した。鉛直方向約 1m 以深にほとんど根がない。水平根はたくさんあるけど、樹幹から離れると急激に強度が落ちる。林齢が増すと徐々に強くなるが、伐採して 20 年ぐらいまでは弱くなり、その後は比較的安定してくる。だとすると林齢とともに根が徐々に増えていかないと実際の現象は説明できない。40 年生ぐらいの林分では垂直根も水平根も若い林分より増えてこなければおかしい。底面でも林齢の高いスギの方が、根系量が多いかという点で決してそうではない。立木間中央の根量も間伐すると減ってきてしまう。すべり面で評価すると崩壊防止機能をうまく説明できない。林齢とともに崩壊防止機能は変わらないと私は考えている。北原先生の説明とは側面の根の評価が少し違う。崩壊防止機能はすべり面ではなくて、表層土の中にある根が間伐しても林齢とともに徐々に増えてくるのが影響してくる。表層土全体が雨の時に水を含んで重量を増して下方向に動く力が徐々に大きくなっていく。そうすると歪んで亀裂が入ってくる。そういう歪みや亀裂を表層土の中に入っている根が抑止して崩壊を防ぐ方向に働いていると考えた方がいいと今は思っている。すべり面で考えるよりは理屈を立てやすい。間伐をすると根の量は減るが、林齢で見ると 20 ～ 30 年生までは崩壊面積率が大きいけど、30 年以上になると崩壊面積率はほぼ変わらなくなる。表層土中の根の量もこれに対応したような、若いときに急に出てきて年をとったら変わらないという傾向にある。

北原：樹木は地上部が大きいと根も大きい。地上部がなぜ大きくなるか、樹幹投影面積が増えるから。間伐をすると樹幹投影面積が増える。したがって、根も増える。間伐したところに向かって根が伸びていく。

落合：生理学的な根の到達範囲と強度としての範囲に違いは無いのか。伊豆大島の調査では、樹幹直下は強いけど、離れると強度が低下している。

北原：先ほど示した式では、距離が増えれば強度は減る計算式となっている。距離の 3 乗分の 1 で強度が減衰していく。

落合：安定解析も 3 次元でやる必要がある。

北原：3 次元でやらないと話にならない。無限長斜面だったら鉛直根しか評価できない。

落合：森林学会等では根の議論はなされていない。

五味：科研では根や流木のテーマも見られるので、そのうち成果は出ると思っている。森林学会としてまとまってやることはない。

落合：根系と崩壊の関係は、具体的に取り組むのにはコストパフォーマンスが悪く成果が上げにくいので学会の中で実施していくのは厳しい。

北原：鉛直根が重要との論を述べている学者がいるけど、それはおかしい。緑化木として植えてから数年後のデータしかない。実生のものと植えたものが 20 年後、30 年後にどうなったか、比較データが無い。

五味：最近はポット苗や従来手法の植栽等行われているけど、根系に関する評価がなされていない。このことに関しても、研究の必要性をこの調査の出口として提案できないか？根の物理的な要素、林相・林分の違い、森林管理（密度、林令、樹種）等の関連と、根の問題について整理してはどうか。文献整理する場合もポイントを把握しやすくなると思う。施業や密度と崩壊の関連は整理されているけど、間伐遅れの林分を如何に管理していくかが課題となっている。

北原：今年度は文献を調査して、問題点をクリアにすることになるのではないかと。課題や考え方あるいは提言等があれば、概ね一週間程度の間でメールで事務局に連絡下さい。これらを事務局で整理するようお願いいたします。

渡邊：本日は貴重なご意見等ありがとうございました。文献収集をさらに進め、問題点や課題を整理したいと思います。この調査とりまとめは来年 6 月までですが、報告書提出前にご意見

を伺うことになると思いますのでその節はよろしくお願いします。本日はありがとうございました。

森林保全・管理技術研究開発委員会 森林整備技術部会
「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」
令和元年度検討委員会 議事録

1. 日 時：令和 2 年 8 月 4 日（火）10:30～12:00
2. 場 所：日林協会館 5 階会議室（東京都千代田区六番町 7 番地）
3. 議 事：1）本年度の調査結果
2）今後の予定
4. 出席者：委 員 阿部和時、五味高志、志水俊夫
事務局 落合博貴（主査）、埋橋一樹、渡邊悦夫（副主査）、鈴木貴浩
5. 配付資料：資料 1 令和元年度第 2 回検討委員会 議事次第
資料 2 平成 30～令和 2 年度 森林整備部会事業概要
資料 3 原位置せん断試験による森林の崩壊防止機能の考察、関東森林研究 65-2(2014)
資料 4 森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察、関東森林研究 71-1(2020)
資料 5 原位置せん断試験による根系が持つ崩壊防止機能の考察（未発表資料）

【討議内容】

渡邊：本日はご多忙の中お集まり頂きありがとうございました。事務局を代表して落合主査からご挨拶をお願いします。

落合：暑い中、また、コロナ騒動の中お集まりいただきありがとうございました。「公益的機能発揮のための森林整備のあり方」の第 2 回委員会になります。第 1 回委員会は昨年富津で行いました。

配付した資料は、本日の議事次第（資料 1）、当調査の概要（資料 2）、関東森林研究で掛谷さんほかの 2014 年と 2020 年に発表した 2 編の資料（資料 3、4）、原位置せん断試験が持つ崩壊防止機能（資料 5）の考察の 5 種類です。

資料 4 は、資料 5 の中で使われているデータの一部を論文形式に取りまとめたものです。最終報告の取りまとめに向けて、この資料をどのように扱うかについて、後ほどご検討をお願いします。

最初に「森林整備部会 事業概要」について確認しておきます。事業目的については、最近大雨による災害が頻発しており、森林の崩壊防止機能、とりわけ樹木根系の問題が注目されている。流木も注目されているが、谷頭を起源とする崩壊で根系がどのような働きをしているかを明らかにする必要があります。0 次谷で、森林が関わる崩壊が繰り返し発生している状況から、根系の問題を取り上げる必要があると考えている。

阿部先生を中心とするグループが、根系の表層崩壊防止機能を評価するために、根系の原位置せん断試験を行った結果から新たな提案をしている。今回の調査は、この提案を中心に事業内容を組み立てていけたらと考えている。根系の強度の考え方も含めて、表層崩壊のメカニズムにどのような関わっているかを検討したい。2018 年に富津で行った NHK の崩壊実験でも、崩壊に対して根系がかなり効いていることを実感している。

開発計画の 4 番目に「森林の公益的機能評価手法と機能強化のための森林整備あり方検討」という大きなタイトルが示されているが、何とか報告書の形にまとめたい。

この調査の 3 カ年計画工程表によると、現在は 2 年目の最後の段階です。中心的課題としたせん断試験の結果取りまとめも順次できているので、これらをどのように扱うか検討したい。その前に、阿部先生に今回のとりまとめの中心的な考え方についてご説明いただき、共通認識を持って議論を進めたい。

阿部：原位置せん断試験は、私の研究室を卒業した掛谷さんが行っているが、これの取りまとめ

結果（資料 5）を中心に説明する。

- ・森林の表層崩壊防止効果には、杭効果とネット効果がいわれている。
- ・杭効果は、表層土のすべり面より深く根が伸びることにより効果が発揮される。
- ・ネット効果は、根が絡み合ってネット状になり、崩壊面がネットを横切って生じることを防止する、崩壊側面で発揮される効果である。
- ・杭効果はすべり面防止、ネット効果は水平根による横方向の補強効果である。
- ・崩壊地底面にどの程度の根があるか、杭効果が期待できるかを確認するため、根系分布調査を行った。
- ・根系発達と間伐の関連も確認するため、スギ林の未間伐木 5 本、間伐木 6 本の根系分布を調査した。林齢は 16 年生から 58 年生までである。
- ・この調査結果によると、間伐・未間伐や林齢に関係なく、根の量（材積）はバラバラの分布となっている。
- ・側面効果を確認するために、立木の間接点の 1 m²あたりの根の断面積を調べた結果では、間伐林・未間伐林ともに林齢が増すほど根の量は少なくなる傾向にある。
- ・古いデータではあるが、災害が発生した崩壊地 14 箇所の林齢と崩壊地面積の関係について、秋谷氏の解析によると、林齢と崩壊面積の関係は、30 年生以上の林分では崩壊が少なくなる。
- ・根の量を比べると、若齢林ほど根の量が多いというデータもあり、杭効果、ネット効果で崩壊防止機能を論ずるのは適切ではないと考える。
- ・表層崩壊はすべり面で発生することにはならない。表層土全体にひずみが生じ、これが亀裂になり、表層崩壊へと発展すると考えるのが妥当ではないか。
- ・以上の考えから原位置せん断試験を行った。原位置せん断試験は、土のみの土塊ブロックと根が混じった土塊ブロックについて、せん断域が 0 cm、30 cm、50 cm の 3 通りを設定した。
- ・せん断域が 0 cm の場合の応力とひずみをみると、応力 15kN/m² でひずみが生じるが、せん断域が 50 cm の場合には応力 6~8kN/m² でひずみが生じる。
- ・根が入った場合は土の場合と比べると、せん断応力が大きくなり、ひずみが大きくても破壊は小さい。
- ・50 cm のせん断域でも根の効果はあるといえる。
- ・土のみの場合、せん断域が厚くなるにしたがって最大せん断応力とせん断ひずみの値が減少する傾向にある。
- ・根が混じった土塊の場合は、せん断域が 0 cm の場合には発生時の応力が増加してひずみの発生を遅らせる傾向にあった。
- ・せん断域が 0 cm の場合、根の効果が大きい。応力が増してひずみが大きくなっても破壊されにくいことを示している。
- ・せん断域が広いと、応力が小さく崩れやすい。
- ・根が加わることにより、根にも荷重が伝わり、荷重が分散するのではないか。
- ・根が増えることは、引き抜き効果も増すのではないか。
- ・表土層の 50 cm 程度までの範囲に根の体積の 95% が分布している。
- ・根の水平分布は樹幹から 1.5m までの範囲にあり、これより先はほとんどなくなる。
- ・樹木の間隔を 3m とすると本数は 1,200 本/ha となる。この場合、ネット効果はなくなる。
- ・表層崩壊を考える場合、地表面の柔らかい土層では「すべり面」は形成されず、根系を含む表層土全体を「せん断域」と考えるのが妥当ではないか。
- ・表土層全体に根が張る→亀裂防止→崩壊防止効果を発揮。
- ・表土層全体がせん断域になっても、根があれば崩壊防止機能が発揮される。

<討議>

志水；すべり面を想定するのではなく、表土層全体の動きを検討するとの理解でいいか。

阿部；そのとおりです。

落合；樹木本数が 1,200 本/ha になると根系がないエリアができることになる。別件であるが、林野庁では保安林での植栽コストを縮減するために ha 当たり 3,000 本の植栽本数を減らせないかという議論が出ている。そもそも 3,000 本/ha は諸説あり、本多静六さんが言い出したともいわれているが、定量的な確たる根拠がない。

志水；植えた後間伐することを考えれば、最初から少なく植えることは管理面でも有利になると思う。

落合；国有林の保安林が 90～95%あることを考えると、少ない本数でいいのか疑問。定量的に何が正しいのか明らかにしておくべきではないか。

渡邊；1,200 本がベストということか。もっと間隔を狭くすれば根量も増えると思うが。

阿部；1,200 本だと立木間中央部にまだ根が存在しているが、これ以上広がると根が極端に少なくなる恐れがある。間隔が 4～5m 位になれば広葉樹や下層植生が入り、主林木の効果を補完することはあると思う。

500～600 本/ha とした場合に、枝葉がいっぱい付いた樹木でいいのか。どのような樹木を育てるかということも考える必要がある。

志水；保全と施業の関係から話ができるのではないか。

落合；間伐しても根系は発達しないと言われているが。

阿部；間伐すれば根が枯れるので、根の量は少なくなる。間伐直後は少なくなるが、長い目で見れば 10～20 年先には防災上も適切な林になる。

落合；根量と森林の崩壊防止機能とを結びつけられるか？

阿部；植栽本数が 1,200 本か 3,000 本かでは生長が異なる。本数が少ない方が 1 本当たりの根の張り方がよくなり、崩壊防止機能が向上するのではないか。それぞれの実態を比較して議論する必要がある。

これまでの、通直で枝葉や節が少ない樹木を育てるということできているが、そのあたりは考慮しなくていいのか。

落合；低コストの話は置くとして、そうはいつでも樹木根系の強度の話は中心的な役割としたい。きちんとしたデータを残しておかないと根系の研究をする研究者が減っていく。ただでさえ業績を上げにくい分野である。

五味；やり方を工夫すればできると思う。北原先生の引っ張りの手法や、阿部先生の今回のやり方等いろいろな方法が提示されている。根の研究は、生態学の方面では多数のデータがある。これらのデータを集めて、立木密度と根系量のグラフを作ってみると、立木密度が高くなると根系量が下がる傾向がある。このようなデータと今回のデータは、植栽本数を変えた場合の参考になるのではないか。広い目でデータを集める必要がある。

志水；この部会としては、杭効果とネット効果ではなく、根量効果を出すのか。

阿部；林野庁の別の委員会では、防災的な施業をどうするかについて、評価方法として引っ張りでやるか根量で評価するか検討している。この中で、引っ張りに関するデータから樹種、林齢等の三つの要素を点数化して林分を評価し、マップもできる手法が示されている。引き抜きで評価するのは、崩壊メカニズムにおける根の評価とは違うと思っているのと、今後どのように説明していくかという点で難しい面もあるので、両者並行して検討を行っている。

落合；昨年度の上記委員会報告書は両論併記となっているが、根量評価の手法はGIS上の話になった時にうまくいかない。引っ張り手法はGIS上での処理が可能なため、引っ張り手法に行きそうな雰囲気である。

五味；この部会の取りまとめに関して、根系量が重要であるということと、林業的観点からの収量比数等との親和性は高いと思う。収量比数を 0.8 とか 0.9 から間伐で 0.7 にする場合に、根

量と合わせて議論するといったつながりはあると思う。

落合；表層崩壊の考え方として、いつ崩れるかといった時に、安定解析に根系の補強強度をのせたい。これをしないと、他分野で崩壊研究をしている人の話に対して根系が乗ってこない。

阿部先生の論文に、「根系強度が粘着力として効く」という報告がある。このことは安定解析にのせやすい。これが正しければいいが、「粘着力+ α 」ということにはならない。

阿部；土の中の根の重量がわかれば、補強強度ということで土の粘着力と同じ位置づけになる。

根が入ったせん断力と、土だけのせん断力の差がはっきりすれば粘着力として使える。

落合；安定解析はせん断域が0の世界。せん断域が0とせん断域が厚い場合の読み替えができないといけない。これまでの粘着力はせん断域が0の場合なので過大な数値となる。実際はせん断域が厚くなると強度が下がる。どの程度下がるかを論理的に説明できれば正しいかどうかは別として読み替えができることになる。

強制的にある厚さを持ってせん断を行っている。実際に起きている崩壊で、せん断の厚さを何がコントロールしているか。コントロールされているか？

阿部；現在の解析手法は、すべり面でやっている。

落合；これまでの崩壊実験をやっているのは、すべり面はない。崩壊後の形を考えてせん断強度を当てはめるとたまたま合う。これで説明できるので、この手法でやってきた。

渡邊；すべり面はないとしても崩壊面があるのではないか。崩壊面はせん断域のどこに該当するのか？

落合；我々は最終結果を見ている。それをすべり面とと思っている。崩れ落ちる間にはある幅を持っている。

渡邊；ひずんで崩壊面ができる。この部分に厚さはない。

落合；崩れ落ちた後には、せん断域はない。

渡邊；安定解析では、せん断の一番深いところをすべり面と仮定してはいかがか。

落合；そこに土の強度を仮定して計算すると丁度よいという結果が得られる。それでいいのかという疑問がある。

阿部；せん断域が0の場合の強度は 15kN/m^2 であるが、せん断域が厚くなる強度は半分位になる。安定解析では過大な評価となる。

落合；実際の崩壊では、崩壊地の底面に根系が残っていない。杭効果として見える根系は非常に少ない。だから、上物から底面の根量を見たときに合わない。そこで出てくるのが側面の効果である。

志水；表層崩壊が起きて基岩との間の部分が見える。実際は、根が生えている途中でせん断が起こったときに下まで持って行かれるという解釈か。

阿部；今ここで話をしているような崩壊事例は少ない。壮齡林が多くなり、表層だけが崩れるのは少ない。九州北部や広島での事例では、根のある部分は崩れにくく。根の下がガサガサであったり、花崗岩の強風化が進んだ部分から崩れている。深さはそれほど深くなく 2m程度であるが、これも表層崩壊としている。

森林の効果はあるけれども崩れている。伐採した後に起きる崩壊が森林の崩壊防止機能を表しているのではないか。

五味；現在の崩壊地を見ると、深さ 2~2.5m程度の崩壊が多い。根の深さの倍位の所から崩れている。現在の安定解析の考え方が定着したのは 1970~1980 年代の研究成果であり、比較的若い山や、花崗岩地帯で表土層があまり発達していないような崩壊を中心に考えている。30 年前の研究の位置づけが違うのではないか。

地震でも崩壊が発生しているが、根よりも深い場所から崩れている。深さ方向では植生の影響はない。胆振や熊本での調査によると、一崩壊当たりの面積を見ると林地よりも草地の方が大面積で崩れている。この状況から、鉛直方向より水平方向の根の効果が効いているの

ではないかと考える。根の水平方向の効果は、一崩壊当たりの面積規模に影響があるのではないかと考える。

落合；崩壊底面での強度はなくても「縁の効果」を考えると、崩壊規模に影響を及ぼすことは考えられる。このことは、崩壊規模は立木同士の間隔に影響されるという阿部先生の報告とも一致する。

では、これをどう評価するか。側壁せん断を考えると、せん断時の厚さは置いておき、側壁効果を安定解析に乗せようとする、三次元解析をしなければならない。

三次元解析はコストが掛かるので、不可能ではないがやられていない。ただ、これをやらないと安全率評価ができないので、今日の議論を踏まえて、もし必要なら三次元解析をしようと思っている。

三次元解析のツールは持っているが、面倒なのでやっていない。いかがでしょうか？

五味；すべり面評価なら、三次元でなくても擬似二次元的に分布させることはできる。

落合；どのような円弧が安全率を小さくするかということで解析しており、これに近い崩壊が起きているが、これを三次元解析しようと思っている。

五味；三次元的な意味では、すべり面はゼロではないということとで、この部分を考慮するモデルが必要ではないか。落合さんが言われる手法の外に、水の動きとせん断域を一緒に考えるといったモデルが必要ではないか。

今起きている山地崩壊を考えると、すべり面が合っていたいという話と、2 m前後の深さで崩壊している現状を考慮するためには、何らかのモデルが必要ではないか。来年云々ということではないが・・・。

落合；土だけの強度の部分、根系の強度の部分、降雨時の地下水の部分の三つを同時に解いてやることになるか。

五味；国土防災ですすめているのも、その辺をコンセプトとしているか。

落合；国土防災では、GISでマップを作る方向で検討を進めている。この委員会では、林野庁と話をしているわけではないので、逆方向での検討でもいいのではないか。

渡邊；最終的には森林整備のあり方にむけてのとりまとめとなる。本年度は、根系の評価手法として阿部先生の手法があるということで取りまとめてよろしいか。

落合；今日、阿部先生にプレゼンしていただいた内容をわかりやすくまとめていただけたらいいか。

森林の公益機能として根系がどのように働いているか検討することが重要で、施業についてはその先でいいと思っている。森林整備のあり方を考える時に根系を如何に考えるかについてまとめる（森林整備を考える時に根系は如何にあるべきか）。

「このような森林整備がいいです」ということは、我々の検討の中では結論を出すことが難しい。

志水；「こういう森林の形が望ましい」ということは言える。それに向けて仕立て方を考えていこうという所までしか言えない。

落合；「樹木の間隔・密度は表層崩壊の規模に対してこのような影響を与えている」ということが少しでも言えればいいと思う。表層崩壊の発生機構として水平根の分布を考えた時に、起きうる崩壊規模と根系密度との間にこのような関係がありそうだと考えればいいのではないか。ha 当たり何本の植栽がいいかは言えない。

阿部；根の量の話であれば、地上部から根の量を推定する論文がある。間伐をした場合としなかった場合について、根の量がどのように変わるか、間伐をするとどのように変わりどのように増えるかといった内容。これと先ほどの議論とどうつながるか。

五味；立木と根系量について、各種のデータベースや文献から拾ったデータを解析した事例を示す（PPTで）。

このほかにも

- ・間伐したら根系量がどう変わるかというデータ
- ・胸高断面積と根系量のデータ
- ・林齢が高くなるにつれての根系量の変化

このようないろいろなデータを集めれば、施業までいかなくでもどのような対応が可能かといった議論ができるのではないかな。

落合；根系外力の話になれば、補強強度とつながる。その時は何分の1にすればいいのかな。

五味；阿部先生がスライドの最後でまとめていたところでストーリーができるのではないかな。

阿部；どこに提出する報告書かな？

渡邊；森林・自然環境技術教育研究センターを通じて、最終的には国土緑化推進機構になる。

志水；今年は2年目なので中間報告的な意味合い。

落合；最終報告は、来年6月までに3年分のとりまとめを行う。

これまでに根系に関する資料収集を行っている。林野庁宛の報告書とかぶる部分は調整が必要。昨年行った現地検討の状況報告、必要であれば三次元解析、林齢と根量に関する資料整理等が報告書内容となる。

報告書の提出先は「行政」ではないので、現時点でわかっていること、考えられることをまとめればよいと思う。

阿部；今日話したことを報告書に使ってもらっていい。

落合；18回分の実験でデータをまとめていただき発表できることは喜ばしいこと。

2020年の論文は18回のうちの4回分ですが、残りをどう処理するか。

阿部；関東森林研究で発表している論文は報告書に使っていただいてよろしいが、今日説明した分については、掛谷君と相談する。いずれ学会に投稿することになるので、その後は使ってもらっていい。

落合；本年度の報告書は外に出るか。

志水；本年度分は国土緑推宛のみ。来年に3年分をまとめたものが報告書として公表、配布される。

落合；本年度の報告書のまとめ方については後ほど事務局で相談し、これまでの材料を元にして8月末までに取りまとめる。

渡邊；ご検討ありがとうございました。

これで第2回委員会を終了といたします。

森林保全・管理技術研究開発委員会 森林整備技術部会
「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 年度検討委員会 議事録

1. 日 時：令和 3 年 5 月 24 日（月）14:00～16:00
2. 場 所：日林協会館 5 階会議室（東京都千代田区六番町 7 番地）
3. 議 事：1）本年度の調査結果
2）今後の予定
4. 出席者：委 員 阿部和時、五味高志、志水俊夫
事務局 落合博貴（主査）、渡邊悦夫（副主査）、埋橋一樹、鈴木貴浩
5. 配付資料：
 - 資料 1 令和元年度森林整備部会事業報告書（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）
 - 資料 2 令和 2 年度森林整備部会事業計画書（令和 3 年 1 月 29 日研究開発委員会にて了承済）
 - 資料 3 3 次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価の方法の検討
 - 資料 4 Tien H. Wu and Alex Watson(1998) In situ shear tests of soil blocks with roots, Can. Geotech. J. 35: 579–590
 - 資料 5 Murray D. Fredlund et al.(2017) How Do We Move To A 3D Stability Analysis?

【討議内容】

渡邊：本日はご足労いただきありがとうございました。これより令和 2 年度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の検討委員会を開催します。事務局を代表して落合主査からご挨拶をお願いします。

落合：暑い中お集まりいただきありがとうございました。この検討会が最終年度の最後の検討会であり、6 月には報告書を提出することになっています。コロナ等がある思うように検討会等が開けず、不手際があり申し訳ありません。林野庁でも森林整備に関する検討が進められていますが、今回の調査は森林整備のために特に根系に重点を置いて検討してきました。

本日の資料として、令和元年度の報告書抜粋をお配りしております。資料 2 が今年度の報告書のとりまとめ計画です。中身については議論の余地がありますが、森林整備をどのように書き込んでいくかが本日の主な検討課題となります。忌憚のないご意見をよろしくお願い申し上げます。

渡邊：順番が逆になりましたが配付資料の確認をさせていただきます。資料 1 が令和元年度報告書の抜粋、資料 2 が令和 2 年度の事業計画書、資料 3 が 3 次元モデル解析の結果概要、資料 4 と 5 が海外の根系試験研究の論文です。

それでは議事に入ります。座長を阿部先生にお願いします。

阿部：それでは、調査取りまとめについて事務局から説明願います。

落合：資料について説明します。資料 1 は昨年 6 月に提出した報告書で、本年 6 月までに中身を充実させていきたいと考えています。資料 2 は 1 月 29 日の開発委員会に提示した今年度事業計画書で、p.4 に今年度の活動予定を記載してあります。

②既往文献調査はとりまとめを行っております。③根系による土の補強効果の工学的評価方法については、掛谷さんにまとめていただいております。④ 3 次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価方法の検討については、2018 年に富津で行った実験を踏まえて 3 次元モデル化による安定解析等を行っております。これについては後ほど説明します。

⑤公益的機能発揮のための森林整備に関しては、当初は溪畔域整備が言われていましたが、昨今、「流域治水」が話題になり、林野庁としても上流域にある森林の評価が求め

- ① 検討委員会、作業部会を開催し、当年度の調査内容について検討する。
- ② 収集した既往文献の整理・分析を行う。
- ③ 根系による土の補強効果の工学的評価方法を検討する。
- ④ 3次元モデル解析による根系の補強効果の定量的評価の方法を検討する。
- ⑤ 公益的機能発揮のための森林整備の在り方を検討する。

られています。昨年、林野庁から「豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会（取りまとめ）」が発表されましたが、この中の考え方が今後の治山に関する森林整備についてのベースになると思います。これらを含めて取りまとめられればと思っています。

最近の災害を踏まえて、各地でハード、ソフトの取組がなされていますが、これらもとりの参考になるのではないかと考えています。

また、林野庁では平成30年度から根系と表層崩壊防止に関する調査を実施していますが、この調査の検討委員会の委員にもヒアリングをさせていただいており、これらの考え方も取り入れていければと考えています。

これまでの調査結果ですが、根系に関する文献については資料1のp.11からp.18までに示しております。これまでの根系研究の流れと課題についてはp.17からp.18に、地盤工学会やSchwartzの新しい根系モデルも示しております。林野庁では、これらの成果を取り込んで調査を進めていますが、林野庁の方向は北原先生の粘着力 ΔC と土層中の根量 W_r を指標にして解析を進めていると伺っています。

新しい考え方としてp.19からp.29にかけて掛谷さんがまとめたデータを掲載しています。これは、森林総研の苗畑での実験結果ですが、p.20の図に示したようにせん断域が薄い場合と厚い場合で強度が違うことから、せん断域の厚さを変えた試験を行っています。p.21からp.22が試験の写真、試験結果をp.23からp.28に掲載しています。結果的にはこれだという結論に達していませんが、これまで考えていたような薄いせん断域での表層に近いところでの考え方とは違う状況が起きているのではないかと考えられます。このことを今後考えていくことになるのではと思っています。

資料4は、1998年に発表されたカナダ・サスカチュワン大学のWu先生の論文で、強固なベースがあって、そこでせん断が起きた場合は薄いせん断層になる。それに比べてせん断層が厚くなると抵抗力が小さくなるということが書かれており、論文に示されている試験のやり方は阿部先生の手法とほぼ同じになっています。

Wu先生の試験では試験ブロックに中の4本のプラスチックチューブを入れ、これを根系に見立てていますが、かなりの大変位が生じています。変位の状況を見ると、20～50cmの厚いせん断域が生じていることがわかります。上から押さえられていないので、せん断域が厚くなることを許していると思います。この論文結果を見ても、薄いせん断域に比べても強度が30%位になると言えると思います。薄いせん断面で評価した根系の杭のせん断破壊に比べて1/3程度の抵抗力にしかならないとなっています。このことは、阿部先生、掛谷さんの研究成果と近い内容になっていると言えます。強度評価をどのようにやっていくかが課題だと思います。

次に、現地調査ということで、千葉県富津で2018年12月12日に行った実験について、資料1のp33～p38に結果を掲載しています。また、崩壊面にプロットを設定し、現れた根系をp37に示しています。このほかに、滑落崖の2箇所から土のサンプルを取り出し、国土防災技

術さんの調査報告書の中で上から 10 cmごとにスライスし、それぞれのスライスごとに含まれている根系の分布、太さ、種類を計測しています。深さ 60 cmまでの 10 cmごとの数値が出ているので、地表付近の根系の評価ができると考えています。

資料 3 の p.9～p.10 は 3 次元モデル解析の定量的評価ですが、p.10 の図のような考え方で解析したらどうかと考えています。

パワーポイントで富津での崩壊実験の様子と解析結果等を示します。

【パワーポイントで説明】

○富津における実験結果

○ベトナムにおける斜面崩壊実験結果から 2 次元と 3 次元解析結果

- ・ベトナム交通省では、全長 9m、下方が 10°、上部 34° の人工斜面に厚さ 60 cm のマサ土を詰めて、90 mm の雨を降らせた崩壊実験を行っている。60 cm の土層を 3 つに区分し、下層は飽和状態として二次元解析を行うと、安全率は 0.966 となっている。
- ・根系を想定して、表層部分を強度の強い土層として上層部だけ 10kPa の強度を与えると、安全率は 1.549 となる。2 次元断面で側壁の効果は評価されていないので、すべり円弧の斜面末端部と頭の部分の効果で安全率が上昇している。すべり面全長の 10% 程度の部分の強度が安全率向上に寄与している。
- ・根系を考えないで 3 次元解析を行うと、安全率は 1.519 となる。2 次元に比べると安全率が大きくなる。
- ・2 次元解析と同様に、上層部分に根系を想定して粘着力 10kPa を与えて解析すると安全率は 3.046 となる。ここでは楕円体の深さを変えて解析しており、側壁に当たる部分の 3 次元効果が大きいと言える。
- ・水平根により地表付近の強度が高まっているとすれば、3 次元解析の方が安全率が高くなるという結果が得られるといえる。
- ・昨年 of 林野庁の報告書でも、単純形状の崩壊地に樹木があると、樹木をよけて崩壊が発生する。樹木があるとすべり面形状が複雑になって、安全率が向上することが紹介されている。
- ・これも前述の状況から上記のことから説明できるのではないか。
- ・資料 5 の論文でも、3 次元解析によると安全率が 2 次元解析より 3 ～ 5 割上昇するということを述べている。
- ・これらの成果をベースにして、最終報告としては治山対策のあり方検討会の考え方も取り入れて、森林整備のあり方をまとめていきたい。
- ・とりあえず考えているのは、「治山が担当すべき危ない所」「将来崩壊発生の危険性が高い所」と、「通常の森林整備でいい所」を分けて考えるべきと考える。
- ・流木が問題になっているが、渓流域を中心とした溪畔域に人工林を整備した結果発生している現象と捉えることができる。
- ・九州北部豪雨の時に大量の流木が発生したが、溪畔域の整備に関して林野庁の検討委員会で、石川先生が渓流域では人工林でなく、人の手が加わっていない天然林の方がいいとの見解を述べている。これは、同じ林齢の時に材積が少ないこと、流木化したときの流れる量が少ないこと等で、国民からの受け止め方が違うといった面もある。
- ・最近の大雨で崩壊深が深くなっているが、この点についても考え方を示すべきとの声もある。
- ・林野庁では 0 次谷問題に関連して、治山が担当する森林整備区域と通常の森林整備区域を分けて考えていく方向もあるようなので、このあたりも報告書に取り入れたい。
- ・これまでは根系を取り上げているが、トータルとしての森林を考えた場合、樹冠による降雨遮断が 10 ～ 30% 生じているということも含めて、治山としての森林整備も考えたい。
- ・すなわち降雨が 10 ～ 30% 少なくなると言うことは、斜面安定にも影響してくる。

以上、最終報告書の考え方を示しましたが、ご意見、ご指摘をお願いします。

阿部：ありがとうございました。多くの課題をご紹介いただきましたが、ご意見等ありますか。

落合：根系の評価についてご意見をいただければと思います。

阿部：資料2のp.4に活動予定の概要が示されています。①と②は整理されていると思います。

③についてはせん断試験に関してのことがメインになると思いますが、森林崩壊防止機能がどのように発揮されているか理解していただきたい。すべり面の存在があって崩壊防止機能が発揮されたという考え方は違うと言っています。

Wu先生の現地試験結果でも、薄いすべり面では強くなり、厚いせん断域を持った崩壊がおき、小さい強度しか得られない。私と同じ考え方です。このあたりを理解していただかないと森林の崩壊防止機能が強いという認識から抜けられない。

森林の効果が発揮される表層崩壊は、ごく浅い範囲で、根が生育している範囲の土が崩れることを言います。深い崩壊ではありません。

根系の層が上にあって、その下に基岩でない風化土層があると、根系より深い面ですべり面は発生する。このような崩壊は根の効果が大きいように見えますが、根系の生育層より深いところで発生した九州北部災害が西日本豪雨災害のような深めの崩壊も、これが本当なら森林の崩壊防止機能があると言えます。

しかし、私が考えているのは、浅い崩壊に対して森林は有効である。それを③の実験で確かめている。最近林齢が高い森林が多くなったので、昔、森林を伐採して生じたような表層崩壊はほとんど見られなくなっています。崩壊の仕方と防止機能を考えるときは、崩壊タイプ別に考えないと森林の崩壊防止機能を評価できません。もしこれが正解ならやや深めの崩壊も森林の機能が働くことになります。このことに私は認識がなかった。深い崩壊には森林の崩壊防止機能は発揮されないと思っています。

落合さんのシミュレーションは新しい考え方なので、今後の研究対象に取り上げられるのではないかと思います。

報告書としては、③は薄い崩壊を扱っている、④はやや深い崩壊防止機能の考え方になる。これらの話を⑤に結びつけるには難しいと思います。事務局にお任せしていいですか。

落合：工学的な評価の仕方としては、薄いすべり面を想定した安定解析の簡単なやり方として現在の手法しかありません。例えば、Wu先生の手法のように30%とすると、与える強度を1/3にしないと、薄い強度の高いせん断を想定することになる。落としてやると根系の有無での大きな差がなくなります。

3次元についても同じことが言えますが、3次元の方が側壁の効果が効いてくるので、3次元解析の方が安全率が上がる。このあたりの見極めが話がややこしくなります。

2次元で評価している限り、水平根の評価ができないのは確かだと思います。斜面末端部と頭部の部分の根系による強度の上昇、さらに側壁部分についても正当に評価する方法が必要だと言いたい。その上で実際の所どうかというと、林野庁の検討委員会の中で広島の災害の所のデータが公開されるような話があります。このため、0次谷で崩壊が発生したところの崩壊前の立木状態を想定して根系データを与えて解析したらどうなるかを試行してみたいと思っています。

阿部：円弧すべりを想定しているが、円柱状か角柱状の柱を想定して計算しているのですか。

落合：球面状の面を想定してグリッドに分割し、平面と角柱の力学的な釣り合いを計算しています。どこの段階で安全率が全体として動き出すかを評価している。計算方法は2次元解析と同じです。これを3次元でやっています。自由な面でやると大きさを変えて計算していく探索に時間が掛かるため円弧を想定しています。

これまでの多くの崩壊実験では、きれいなすべり面を見たことがありません。ただし、最

終形を見て安定解析をやると答えが一致していることが経験的に言えると思います。

阿部：富津の実験では薄い崩壊であるが、あちこちで動きがあります。根系強度がバラバラのせいでと思いますが、このような状況を取り込めるか検討したいと思います。

落合：300 mmの降雨でも崩れないことについては、排水が起きている。これにより水位が上がらない。このことをどのように評価するかがわかりません。あの場面で根系による側壁効果を見込んだら崩壊しないのではという気がします。

不飽和の影響もあります。斜面上部は不飽和の強度と考えられます。資料4の論文でも飽和と不飽和の関係に言及しています。不飽和だと強く効いてくる。プラス側因子とマイナス側因子があり、合わせてどうかという答えが出せない状況にあります。

林野庁での調査に戻りますが、立木の量がこれだけあるからこれだけの効果があるということ簡単に言えない状況です。解析では地形の要素は反映されておらず、上物の分布から根系強度を推定し、これをGIS上で絵を描いている。地形の勾配や凹凸の状況が言われていますが、いまのところ0次谷等の状況は検討の中に入っていません。

阿部：地形とか土質とか降雨とか言い出すとまとまりがつかなくなります。

落合：森林だけでこれだけの効果あるというお絵かきで終わるのはちょっと危ない。プラス側の話しかしていません。

阿部：③と④について、植栽の状況を考慮すればいいのでは。

落合：ここではそうしようと思います。

国交省の解析では、森林は出てきません。確実に存在するのに無視されているようです。

五味：国交省の資料では森林は出てこないが、新聞社説では森林の話が出ています。世間の動きと国交省の考え、国交省は踏み込まず林野に投げているかもしれないが、流域治水という世間受けの考え方にずれがあります。

落合：流出に関連して、日林協で有明海域での森林の影響ということでシミュレーションの調査を行っています。その業務の担当班長のところに九州大学工学部の先生から、ヨーロッパでは洪水緩和機能が混交林で3～5割増加する効果があるという論文がでていたという説明があって、班長からこれは何かと聞かれました。この先生が参加している地元の発表会をユーチューブで見ると、ドイツ、ベルリン自由大学の環境関係の研究者が、17世紀のヨーロッパの針広混交林（どのような森林か、どのようなデータがあるのか疑問ですが）と現在の森林を比較したら、現在の森林に比べて17世紀の針広混交林の方が洪水緩和機能が3～5割大きいという論文を出していました。これを九大の先生が引用して地元で話していました。

森林は人工林よりも針広混交林の方が洪水緩和機能が大きいという話ですが、森林の効果として日本でそこまで言っているのか。九大の先生は、上流域の森林は役に立つという認識なのかと思って聞いていました。

地元の人は森林の洪水防止機能があると思うだろうし、それに対してどのように答えていくか、流域治水がらみで考えさせられました。

五味：どのように解釈するかだと思います。

落合：ここではそこまでの議論はしませんが、少なくとも溪畔域に人工林は作らない方がいいと思っています。朝倉の災害では流木が下流まで来たが、ため池が決壊した影響が大きい。しかし、林野庁としてはため池については言えません。崩れる恐れがある所にはスギ、ヒノキはない方がいいと思っています。

阿部：③に関して、森林があると表層崩壊が起きにくいことは確かで、昔の災害跡地調査で林齢と崩壊面積の関係をみると壮齢林の方が崩壊地が少ないデータがあります。森林の崩壊防止機能は確かにあるが、50年生以上森林で密度を落としたときにどうなるか。

落合：間伐すると根が伸びていく（復活していく）という話は本当ですか。

阿部：その辺りはよくわかっていません。

落合：伸びていくという前提で間伐・本数調整伐が行われているような気がします。

阿部：茨城の国有林で 90 年生の間伐地でユンボで掘って根を確認しましたが、水平根はあまり伸びていません。幹の近くは根が増えるが、長く伸びる水平根は数本程度です。

立木密度と根系の関係データはありません。苅住さんのデータにもそのようなもの出てきません。

落合：林野庁の調査仕様書では、「根系の偏り、傾斜地に生えている樹木の根系は同心円状には伸びない。これは表層土が下へクリープしている影響もあるが、斜面上方に多くの制約があることによる」といったデータが示されているようで、調査仕様書にはこれらの成果の取り込み方も整理せよということが書いてあるようです。

これまでの効果を発揮していますよ、という方向とは違い、地形の因子を入れると根が偏ってくるから、林野庁は地形の要因を入れろと言っているのかなと思っています。そうなるとうますますわからなくなります。斜面上で根系の分布をどこまで調べられるか。

国土防災技術の報告書ではある程度やられていますが、急な場所ではやっていません。急な場所でもやった方がいいかという話もあります。

阿部：急斜面ではできないですね。

落合：そのような状況をどのように取り込めばいいのか。宿題であり、これ自体が委員会の検討事項になるのではと思っています。

志水：厚みを持ったせん断域が防止機能を高めるという話でしたが、下から押す、上からの重さが掛かり下の盤が沈む、その方が抵抗力が大きいということですか？

ジャッキで 50 cm 全体を押した場合と、下 50 cm あけて上だけ押した場合では、前者の方が抵抗力が大きくなっています。厚みを持ったせん断域とはどこのことですか。

落合：図 2.5 の赤くハッチを施した部分をいいます。ハッチ部分が広い方が「厚みを持ったせん断域」で、小さい力で動きます。

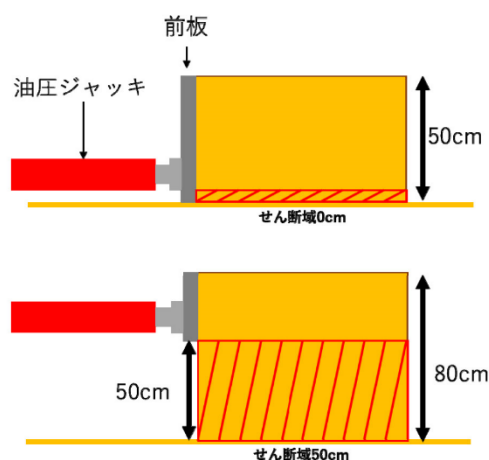


図 2.5 原位置せん断試験の模式図

志水：ということは、せん断域が広い方が抵抗力が「弱い」ということですね。

阿部：根がある場合に、薄いせん断域であれば根に大きな力が掛かるが、厚いと掛かる力は小さい。つまり根による補強はせん断域が厚い方が弱いということになります。

志水：ということは、厚みをもったせん断域の方が崩れやすいのですか。根はどちらに効果を発揮するのですか。

阿部：せん断域が薄い方が根の効果が発揮されます。

志水：落合さんの 3 次元解析で、上部 20 cm 部分をかぶせましたが、ここに根がある厚いせん断層であれば強度が増すという理解でいいですか。

落合：先ほどの説明は、せん断面を大きく稼げるかということ。せん断面が広いとそこで頑張れる。だから、水平根がその部分で効いてきます。

志水：表土層に根が多くなる施業が望ましいということですか。

阿部：今までは図 2.5 の上の状態で崩壊が発生すると考え方でやってきており、根があると土層の動きを抑える効果があるという考えでやってきました。しかし、実際はせん断域が広い図 2.5 の下の状態で崩壊が発生しています。表層崩壊ではせん断域を薄く制限する上からの荷重がないから、せん断域が広がります。

せん断域の下まで根が入っていないなくても、せん断域内に根があれば崩壊防止機能が発揮されます。

志水：その部分の根を増やすことが有利となりますか。

落合：それが根量を稼いだ効果になります。

阿部：薄いせん断域でせん断試験した場合と、厚いせん断域でせん断試験した場合とでは、厚い方が根のせん断抵抗力が 30%程度しかありません。

根の量が多ければ、深くなくても崩壊防止効果があるので、適切な樹木密度が望まれます。この報告書では「幼齢級では根が少ないが、20 年生程度になれば根の量が増えてくるので、本数密度を少なくすると危険」といった内容が示されればと思います。

志水：落合さんの 3 次元解析で、土層厚を 20 cm 毎で設定していますが、例えば上の層に根を想定して 30 cm とするような解析は可能ですか。

落合：5 cm ごとでも可能です。根の深さ方向で強度を変えることもできます。

志水：そうすると、モデル上で根が発達した良好な状況とそうでない場合に比較もできますか。

落合：2 次元解析では、根は少ししか評価ができませんが、3 次元では根の効果を側壁効果として計算できます。極端なことを言えば、底面の強度、垂直根による杭の効果はゼロでも崩れないということが起こり得ます。側壁だけで持つことになります。

阿部先生とともに行った伊豆大島での調査で、垂直根は確認できたが崩れていない部分の根はごくわずかしかなかった。これで崩壊防止機能は発揮できるのか、という現場がありました。側壁で持っていると言えるのではないかと思います。

阿部：側壁で持っているという考え方ではなく、根が広がって相互に絡み合っているという状況だと思います。

落合：解析上は、側壁部分でもせん断が生じているとせざるを得ません。

阿部：土層がひずんで崩れるという形態であることから、強度を小さく見込んだ方がいいと思います。

落合：側壁強度を 30% と見込んで解析している。3 割という数字は日本とカナダで共通しています。

五味：土層が厚くない所で崩れる場合の鉛直根、水平根の効果を考える場合と、最近各所で発生している、根が届いていない深い所からの崩れを分けて考える必要があると思います。

今、うちの研究室で行っている実験では、鉛直根と水平根のうち、根系効果として水平根を評価しようとしています。

層としての根の効果を確認する位置づけとして実験を行っています。室内実験ですが、長さ 120 cm、幅 80 cm、傾斜 35°、底面は全部アクリル板で中央 30 cm はツルツルの状態、両側と側面にネットを張って抵抗を確保しています。中央部を滑らせるというイメージです。斜面変形を計測するための計器も設置しています。根の効果を見るために「豆苗」の種を蒔いていますが、豆苗の種を蒔いてから 2 週間後に実験を行っています。水平根の厚さは 3 cm 程度ですが、垂直根もけっこう伸びています。豆苗の密度は 3 cm 間隔ですが、1/70 スケールとして ha 当たり 1,500 本の植栽密度を想定しています。

【パワーポイントと動画で降水実験の状況説明】

植生なしの場合は降雨が 60 mm/hr の強度で 30 分後に崩れが発生しました。植生ありの場合は 60 mm/hr では変化がないため、55 分後に降雨強度を 90 mm に上げたところ崩れました。

【実験結果の詳細を説明】

- ・崩れた後の形状は両者似ているが、変形や亀裂のでき方に差がある。
- ・植生の有無で落ちる距離と大きさが変わってくる。
- ・根の横方向のつながりが見て取れる。

豆の根なのでスギ林同じというわけにはいかないが、密度効果は確認出来ると思います。以前にも話しましたが、スギ、ヒノキの根のデータベースを集め、立木密度と根系材積の関係等のデータがあるので、実験による密度効果と根系バイオマスの関係等を整理できれば、施業に繋がっていくのかなと思います。今回の報告には間に合わないと思いますが、このような実験を行う目的は、根の効果を整理すると共に土層との相対的な関係も明らかにしたいという思いでやっています。これまでは「根があって土」という整理の仕方だったと思いますが、「土壌があって根」という考え方が必要ではないでしょうか。

1m未満の土層厚の場所での根の議論と、土層厚が厚い場所での考え方を整理し、根の量と土壌の関係を相対化することが重要と考えます。これが③、④でできれば意味があると思います。

落合：先ほどの動画で、根がある方が変形に耐える。せん断域が厚くなるほど大きな変形に耐える、ということですか。

＜実験経過を踏まえた議論＞

阿部：ぼつぼつ時間となります。

先ほどのシミュレーション結果を踏まえて③、④を整理して報告書作成をお願いします。

落合：先ほどの主張も考慮して整理したいと思います。

渡邊：③、④について、わかった範囲で整理していくことにしたいと思います。詳細については落合主査と事務局にお任せ願いたいと思います。

この報告書ができあがった後、講習会を開催する予定が入っております。先生方にはまたご協力をお願いすることになりますが、よろしくお願い申し上げます。

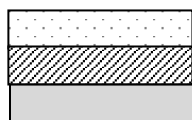
鈴木：講習会につきましては、早くても今年の年末、遅くとも来年6月頃までには開催したいと考えています。報告書ができあがりましたら、改めて開催日時等調整させていただきます。先生方には講師をお願いすることになりますがよろしくお願い申し上げます。

渡邊：これを持ちまして令和2年度検討委員会を閉会とさせていただきます。ありがとうございました。

巻末資料 2 既存文献リスト

(※順不同)

「根系と崩壊の関係」に係る目録と概要の論文名欄の着色は次を意味し、「表 2.4 研究機関別の根系と崩壊の関係に関する研究内容」の着色と整合している。



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

既存文献の目録（根系と崩壊の関係（1））

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	日本緑化工学会誌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止効果に関する調査研究	今井久	ハザード研究年報	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・森王第124回日本森林学会大会発表データペー			2013
12	間伐による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	日本緑化工学会誌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いて	執印康裕・鶴見和樹・松英恵吾・有賀一広・田	日本緑化工学会誌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
34	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(治山)	阿部和時・岩元賢	日誌67(12)	505-510	1986
35	樹木根系分布シミュレーションモデル-斜面安定解析への応用を考慮した-	阿部和時・岩元賢	日誌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	日本緑化工学会誌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の補強の解明	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和引き抜き抵抗力の比較	佐藤創・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	砂防学会誌VOL.66-4	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・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	砂防学会誌VOL.62-4	29-37	2009
58	表層崩壊と森林	佐藤創	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	日本緑化工学会誌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・平野恭弘	日本緑化工学会誌41(1)	15-20	2015
62	土壌水分変化が斜面表層土における根系の土質強度補強効果に与える影響	執印康裕・加藤尚子・鈴木雅一・太田猛彦	砂防学会誌VOL.51-1	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VOL.55-1	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VOL.50-5	3-11	1998
73	セロ次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・戸田堅一郎	砂防学会誌VOL.61-6	47-53	2009
81	斜面の基礎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	樹木の根系による斜面崩壊防止機能	鳥田宏行・佐藤創	道総研季報128	1-3	
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	日本緑化工学会誌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・原敏男	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

既存文献の目録（根系と崩壊の関係（2））

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載ページ	発行年
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・龍沢至朗	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返りの発生機構	野々田穂郎・林拙郎・川邊洋・本多潔・小藪一	日林誌78(4)	390-397	1996
102	根系の引張強度と曲げ強度から推定した樹木根系の斜面安定効果	野々田穂郎・林拙郎・川邊洋	日林誌75(5)	456-461	1994
113	災害に強い森林整備	北沢秋司			
120	樹木の根の引き抜き抵抗能力による表層崩壊防止機能の評価方法に関する調査	掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・國原和夏・石垣	砂防学会誌VOL71-3	3-11	2018
135	根系の引き抜き抵抗能力によるセン断補強強度の推定	阿部和時	日本緑化工学会誌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	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防止機能の関係について	執印康裕・鶴見和樹・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明			
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	SABO Vol98	2-7	2009
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・コナラ突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能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能力に及ぼす影響	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	283-285	2008
168	愛知県伊良湖町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	1-4	2013
169	アカマツの引き倒し抵抗能力と倒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	91-93	2014
170	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	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能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
174	飽和条件下におけるヒノキ根系の引き抜き抵抗能力	岩名祐・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能力	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	岡田萌・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
181	森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察	掛谷亮太・小坂泉・瀧澤英紀・阿部和時・岡田	関東森林研究71-1	129-132	2020

既存文献の目録（根系と崩壊の関係（3））

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

既存文献の目録（根系と崩壊の関係（4））

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
3007	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 Vol.11, No.1	53-68	2016
3008	2014年8月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害	松村和樹, 長谷川祐治, 藤本将光, 中谷加奈, 西川友章, 笠原拓造, 柳崎剛, 鏡原聖史, 加藤智久, 岡野和行, 鈴木崇, 平岡伸隆		砂防学会誌, Vol. 68, No. 1	60-67	2015
3009	2016年9月7日台風13号による柿平沢土砂災害	石川芳治, 執印康裕, 柏原佳明, 宮田直樹, 大野亮一, 飛岡啓之, 梶原誠, 沼宮内信		砂防学会誌, Vol. 69, No. 4	37-43	2016
3010	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－	林地郎, 山田孝		地盤工学ジャーナル Vol.10, No.1	157-162	2015
3011	実効雨量の概念を用いた分布型崩壊概念モデルによる降雨指標と表層崩壊の関係について－東京都伊豆大島を事例として－	執印康裕, 堀田紀文		砂防学会誌, Vol. 69, No. 6	3-14	2017
3012	斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法	小杉賢一朗		砂防学会誌, Vol. 67, No. 5	12-23	2015

既存文献の目録（早生樹の関係）

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載ページ	発行年
1001	センダン植栽木への施肥が成長に及ぼす影響	池本省吾	第129回日本森林学会大会発表データベ	—	2018
1002	施肥がセンダン苗木の成長に及ぼす影響	池本省吾	第128回日本森林学会大会発表データベ	—	2017
1003	京都府立大学大野演習林での早生樹センダンの植栽試験	糟谷信彦, 上田菜津美, 堀田耀介, 藤田夏子	第127回日本森林学会大会発表データベ	—	2016
1004	本州西部地域での早生樹センダンの植栽試験	糟谷信彦, 宮藤久士, 村田功二, 中村彰男, 榎第129回日本森林学会大会発表データベ	—	2017	
1005	本州西部地域での早生樹センダンの造林成績	糟谷信彦, 宮藤久士, 村田功二, 中村彰男, 榎第129回日本森林学会大会発表データベ	—	2018	
1006	センダン植栽木の初期成長と立地環境	高山勉, 山田範彦, 山瀬敏太郎	第129回日本森林学会大会発表データベ	—	2018
1007	関西地区における国産早生樹センダンの試験植林	村田功二, 内海真弓, 宮藤久士, 横尾謙一郎	第126回日本森林学会大会発表データベ	—	2015
1008	コウヨウザンの簡易収穫予想表の試作	山田浩雄, 近藤禎二, 大塚次郎, 磯田圭哉, 生第129回日本森林学会大会発表データベ	—	2018	
1009	コウヨウザンの所在地データベースの作成	山田浩雄, 安部波夫, 塙栄一, 大塚次郎, 磯田第127回日本森林学会大会発表データベ	—	2016	
1010	成長曲線を用いたコウヨウザンの材種成長過程の解析	山田浩雄, 近藤禎二, 磯田圭哉, 大塚次郎, 生第128回日本森林学会大会発表データベ	—	2017	
1011	平成29年度早生樹利用による森林整備手法検討調査委託事業報告書	林野庁	—	—	2017
1012	コウヨウザン林における土砂流出量の変化	渡辺靖崇, 鈴木保志, 涌嶋智, 坂田勉, 東敏生第129回日本森林学会大会発表データベ	—	—	2018

既存文献の目録（挿し木の関係）

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載ページ	発行年
2001	スギ挿し木コンテナ大苗の活着と初期成長	重永英年, 山川博美, 野宮治人, 荒木眞岳	第126回日本森林学会大会発表データベ	—	2015
2002	夏季植栽されたスギ挿し木苗の生残規定要因—苗種か物質分配か？—	新保優美, 平田令子, 今岡成紹, 伊藤哲	第128回日本森林学会大会発表データベ	—	2017
2003	福岡県におけるスギ挿し木コンテナ苗と裸苗の成長—植栽年の異なる5つの比較—	鶴崎幸, 佐々木重行, 宮原文彦	第127回日本森林学会大会発表データベ	—	2016
2004	東北地方におけるスギコンテナ苗と裸苗の成長	榎間岳, 八木橋勉, 松尾亨, 中原健一, 那須野東北森林科学会誌20巻1号	16-18	2015	
2005	スギコンテナ苗および裸苗の根系形態	平田令子, 大塚温子, 伊藤哲	第124回日本森林学会大会発表データベ	—	2013
2006	スギ挿し木コンテナ苗と裸苗の植栽後2年間の地上部成長と根系発達	平田令子, 大塚温子, 伊藤哲, 高木正博	日本森林学会誌96巻1号	1-5	2014
2007	スギおよびヒノキにおける実生とさし木の初期成長形態の比較	松永孝治, 倉本哲嗣, 下村治雄, 江藤幸二	日林九, 支研論61	124-127	2008
2008	多雪地帯に植栽されたスギ挿し木苗と実生苗の幼齢期における成育特性の比較	宮下智弘	日本森林学会誌89巻6号	369-373	2007
2009	スギにおける光質とさし木発根性との関係	吉村知也, 栗田学, 田村美帆, 酒本大, 大田宗	第129回日本森林学会大会発表データベ	—	2018
2010	アカマツ・アイグロマツ挿し木苗の発根指数と吸水量および植栽後の針葉発	米道学, 軽込勉, 久本洋子, 後藤晋	日本緑化工学会誌43巻4号	611-613	2018
2011	スギ及びヒノキの系統別の挿し木苗と実生苗による成長比較試験	九州森林管理局 森林技術・支援センター	—	—	2014

既存文献の目録（指針等）

番号	論文名	著者名	出典 (雑誌巻号)	掲載ページ	発行年
9	21世紀のおかやまの新しい森育成指針-災害に強い森林づくり-	岡山県農林水産部林政課	-	-	2005
25	災害に強い森林づくり奈良県ガイドライン	奈良県農林部	-	-	2016
105	土砂流出防止機能の高い森林づくり指針	林野庁森林整備部整備課	-	-	2015
108	平成21年7月21日豪雨山地災害対策検討委員会報告書	山口県	-	65-72	2009
112	「災害に強い森林づくり」の評価のためのガイドライン	三重県農林水産部	-	-	2016
114	災害に強い森林づくり指針(本編)	長野県林務部	-	-	2008
149	森林の整備及び保全に関する指針	宮崎県	-	-	2007
150	次世代の大分森林づくりビジョン H29改訂版	大分県農林水産部	-	-	2018
180	災害に強い森林づくり事業検証報告書2015	兵庫県	-	-	2015

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（1））

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
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	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、平均根系体積に關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)が破壊規程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。
2	樹木根系の崩壊防止機能	阿部和時	1998	斜面表層崩壊を防止する根の力学的機能を定量的に評価する手法は確立されるには至っていないが、ここでは現在までの研究の一部を紹介することで山崩れと根の働きとの関係を解説する。なお、日本では戦後の拡大造林政策によってスギが大面積にわたって造林されたため、スギ林における表層崩壊がめだつようになり、スギを対象とした研究が多く進められてきたので、スギの研究例を中心に話を進めることになる。しかし、近年は樹種間における根の表層崩壊防止機能に差があることを指摘する推測が強いので、この研究にも取り組み始めたところなので、その結果も簡単に述べる。 これまでの話の中でも何度か述べたように、この研究での一番の問題点は崩壊すべり面における根の量を的確に評価する方法がないことである。また、崩壊すべり面は土壌層と基岩層の境界面がなりやすいことを述べたが、実際の斜面の構造は単純ではなく、地質や過去の地殻変動の影響、気象など立地条件の違いによって様々な構造の斜面が作られると考えられる。このように、すべり面が発生する深さも、すべり面での根の量も画一的に考えることはできないこと等が、森林の崩壊防止機能の定量的評価を難しいものになっている。今後は、斜面構造を類型化し、各斜面タイプごとに崩壊すべり面の深さと、そのすべり面における根の量を関連づけたデータの収集、できれば多くの樹種の根の量のデータの収集が必要と思う。山腹斜面の土層中からこれらのデータを拾い出すことは容易ではないが、根の崩壊防止機能の評価方法を確立するためには欠くことのできないことである。
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	2004	間伐は健全な人工林を成立させ、良質な木材を生産するために欠くことのできない重要な施策である。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懸念が強い。このため、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。ここでは日本の主要造林樹種であるスギの人工林を対象とした。本手法を提案するに当たり、立木密度1400本/haの間伐林分と3400本/haの非間伐林分における根系分布状態を比較調査した結果、根の全体積や深さ方向への体積分布、最大分布深さ等について両者の間に明瞭な違いがなかったため、根の分布量推定には同じ方法を用いることにした。また、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。これらの調査結果を加え、間伐・非間伐林分における崩壊防止力の変化を評価できる手法を完成した。この手法を用いてシミュレーションしたところ、強い間伐を多く実施した林分の方が崩壊防止力は低いことが示された。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と。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。また、20年生以上の林分で一般的な強度の間伐が行われても、斜面安全率が1.0を下回らないことが示された。この結果から、間伐は病中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ことがあることを指摘した。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（2））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
4	森林の持つ斜面崩壊防止機能	阿部和時	2006	斜面上での根の分布をみると、大部分は土壌層中に発達しているが、垂下根・斜出根の一部は基岩表面の亀裂や、基岩表面が風化作用で軟らかくなった層（遷移層）にも侵入している。土壌層と基岩層の境界面より深くまで発達した根は、境界面における土の崩壊に対する抵抗力（せん断抵抗力）を補強するので、土壌層の崩壊を防ぐ動きをする。この根の動きが森林の崩壊防止機能と考えられる。 本論は、森林の崩壊防止機能に関して得られているこれまでの研究成果の概要を取り纏めたものである。 ①根による土の強度補強の考え方、②根による土のせん断抵抗力補強の測定とモデル化、③根系の分布状態の推定、④実際の林地斜面における森林の崩壊防止機能の評価方法、⑤現場における引き抜き抵抗力の測定方法と結果、⑥森林の崩壊防止機能のシミュレーション例、⑦実験による根の崩壊防止力の測定
5	崩壊に強い森林とは	阿辻雅言	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。 そこで本研究では、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。推定方法はヒノキ人工林、広葉樹天然林で有意な結果となったものの、精度の向上には必要である。 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でない森林である。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面や、集水地形であるゼロ次谷の森林においては特に、適切な施業指針を作る助けとなると考えられる。
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	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、斜面崩壊抑制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制効果に着目し、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制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。
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	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との力学関係についての力学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年を経過した林分（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/m²）は立木から切り株に近づくと徐々に減少し、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年を経過した林分では、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、斜面の力学強度は直線的に高まると考えられる。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（3））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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・森千夏・金子凜	2013	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表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なかった。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。
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・岡田康彦	2014	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つて崩壊が発生する。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(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。
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・石垣逸朗・阿部和時	2016	スギ間伐林分と未間伐林分において11本のスギを対象に根系分布調査を行った。間伐、未間伐林分のスギともに根系材積は樹幹指数と良好な相関性を持つこと、間伐の実施如何にかかわらず立木本数密度と高い相関性があることが示された。また、根系分布調査結果から崩壊地底面と側面のすべり面に生育する根の量を算出したところ、間伐林分では林齢の増加に伴って根の量が増加しないことが示された。このことは、森林の崩壊防止機能がすべり面に生育する根によって発揮されることの既往の考えと整合性が取れないことになる。このため、表層型崩壊が発生するような急斜面の表層土は、土質的に明瞭なすべり面が形成され難いことを考えて、崩壊発生時には表層土全体が歪み、亀裂が発生して崩壊に至ること、また表層土中で大量に生育している根系が歪や亀裂の発生を抑制することで崩壊防止機能を発揮していると仮定した。この仮定に基づいて表層土中の根系量を算出したところ、間伐林分では表層崩壊が多く発生しやすい10～30年生にかけて根系量が未間伐林分よりも多いこと、また既往の研究成果と同じく林齢の増加に伴って崩壊防止機能が強くなることを裏付ける結果が得られた。
14	ケヤキ人工林の崩壊防止機能	神田誠也・北原曜・小野裕	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 $\Delta C(kN/m^2)$ 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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（4））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
15	森林根系の崩壊防止機能	北原曜	2010	以上の結果から若干の推定も含めて考察すると、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くことになる（今井2009）。ただし、大さ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であり、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。
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—治山事業は水平根を育て—	木下篤彦	2010	本調査では、まず、水平根の崩壊抵抗力ΔCを調査する目的で現地に水平根の引き抜き試験・分布調査を行ったのでその結果を示します。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ます。最後に、本調査で検討した崩壊抵抗力ΔCを予測する方法を基に土砂崩壊防止機能を高めるための治山事業の手法について検討します。 本調査では、水平根の土砂崩壊防止機能に着目して、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ました。得られた成果は以下の通りです。 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の時間変化を計算することができず。特徴として、水平根量率を算出す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の増分の減少及びその後の回復を表現できます。 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ます。
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いて	執印康裕・鶴見和樹・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明	2009	宇都宮大学船生演習林を対象として、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を行った。対象演習林の総面積は約530haであり、その内およそ320haがヒノキ人工林である。1998年の8月末の豪雨（平成10年福島南部・那須豪雨）によって演習林内のヒノキ人工林を中心に表層崩壊が発生（崩壊面積率約1%）している。ヒノキ人工林全体の林齢面積頻度分布と比較して、山腹崩壊が発生した林齢面積頻度分布は若齢林にシフトしていた。この対応関係を説明することを目的として林齢—粘着力関係を考慮した分布型表層崩壊モデルによる検討を行った結果、根系の補強効果を考慮した粘着力の値はおおよそ5.3kPa から7.6kPaの範囲にあり、ヒノキ人工林の粘着力は林齢20年前後で最小になることが示された。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（5））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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	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、無間伐区に關係なく、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では、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。
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	2010	森林根系の崩壊防止機能は、様々な研究がおこなわれ、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より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、立木間隔が広くなるにつれて、立木間隔に影響されることが考えられた。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、マサ土に關係なかった。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について考察する。間伐を行った方が太い根系が増えることから、同一立木間隔と比較すると、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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（6））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
34	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	1986	はじめに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、根の引張強度、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、土壌凝聚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（ <i>Pseudotsuga menziesii</i> (MIRB.) FRANCO var. <i>menziesii</i>) およびWestern redcedar (<i>Thuja plicata</i> 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・ファーとロッキーマウンテンのダグラス・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 (<i>Pinus densiflora</i> 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の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あたり、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（ <i>Cryptomeria japonica</i> D. 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。
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用を考慮したモデル-（英文）	阿部和時・岩元賢	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、スギに適応した。モデルを作るにあたり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、各土壌層ごと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。

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
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	1996	スギ根系がもつ斜面崩壊防止機能を力学的に評価するために、苗畑に生育させたスギを用いて原位置一面せん断試験を行い、土のせん断抵抗力補強強度を定量的に測定した。さらに、根による土のせん断抵抗力補強強度を推定するために考案された根系補強モデルの適合性を検討した。スギ根系を含んだ土のせん断抵抗力を求めるために31回のスギ林地での試験では、土の破壊規準より0.034～0.077kgf/cm ² 強いせん断抵抗力が測定され、根の機能が大きい役割を果たしていることが示された。特に、崩壊すべり面を浅く0.5～0.7m(垂直応力にて0.09～0.14kgf/cm ²)と想定した試験では、根による補強強度が土のせん断抵抗力の20～34%に及ぶ結果が得られた。根系補強モデルで原位置一面せん断試験から得られたスギ根系によるせん断抵抗力補強強度を算出したところ、土のせん断強度の不均一性を考慮すれば、良い一致をみることもわかった。
38	樹木根系の分布特性と斜面の保護・安定効果	阿部和時	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。そこで、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する。 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連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には、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。とくに、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を、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それぞれ把握しなければならぬ。 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おく必要がある。著者らの行っている直接せん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。
39	樹木根系の変位を考慮した土のせん断抵抗補強の解明	阿部和時	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示された。これらの結果は、単に1本1本の根の力を合計した力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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（8））

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
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	2011	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。
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	2010	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。
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	2010	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と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。
50	樹木の斜面安定効果	駒村富士弥・渡辺武夫	1977	本稿では樹木の重さや根の抵抗力を考慮した場合の斜面安定係数を導き、それを用いて根系の深さより浅い部分に発生する崩壊に対する樹木の効果について考察した。 考察から、力学的にみた場合樹木による斜面安定効果は一応期待できることが説明され、その効果が大きく発揮されるかどうかは、更後の経過年数および斜面傾斜や土質条件によって変化するであろうということが推定された。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（9））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
55	原位置一面剪断試験による樹木根系の崩壊抵抗力和引き抜き抵抗力の比較	佐藤創一・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行	2013	本研究では、その場での直接せん断試験を用いて、樹木根系と浅い地すべりとの抵抗性を比較した。北海道の美幌で40～45歳のアルダーやマツの森林に3つの調査地点を設けた。我々は、土壌ブロックの周りを掘削することによって、土壌表面近くの幹を切断し、根系を含む土壌ブロックを成形した。我々は、土ブロックにせん断箱を置き、チェーンブロックを用いて手動でせん断箱を水平に引っ張り、ロードセルを用いてせん断力を測定した。我々はまた、根のない土壌ブロックを調製し、同様の方法でそれらを測定し、各試験地の土壌収量基準を得た。根元部のせん断強さとして、各測定点と根とのずれ、および垂直応力－せん断力面の降伏基準線を考慮した。我々は直接せん断試験の場の近くで成長する根の引き抜き抵抗を測定し、根の直径－引き抜き抵抗曲線を得た。直接剪断試験における根の強化せん断強度は、せん断面における根の断面積とともに増加した。我々は、直接せん断試験から決定された根の強化された剪断強さと引き抜き抵抗、根変形の角度、および内部摩擦の角度からそれを推測するモデルを使用して、根の強化されたせん断強度を比較した。直接せん断試験の強度は、モデルの強度の半分程度であった。我々はこのモデルが根による強化されたせん断強度を過大評価したと考えている。
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	2009	我々は、天然の寒冷地の落葉広葉樹林における樹木の根系が斜面の安定性に及ぼす影響を定量化しました。北海道苫前町の山地斜面に3本の調査地点を設定し、樹木の直径と位置を測定し、樹種を同定した。根系を掘り出し、プロットごとに3～4本の根系分布を測定しました。プロット毎に2～4本の樹木を切り取り、根の直径と土壌から根を引き出すのに必要な力を測定した。我々は、凝聚力、内部摩擦角、および土壌の密度を測定した。コアボーリングを用いてせん断面を推定した。我々は、根系分布データ、根の直径と根の引き抜き抵抗の関係、および各樹木の直径と掘り出しの直径との比を用いて、各プロットのすべての樹木について、せん断面上の根の引き抜き抵抗を推定した。スライズ法（Janbu Method）を用いて安全率を算出した。我々は、安全係数を計算するために使用された公式の土壌凝聚力に根の引き抜き抵抗を加えた。根の引き抜き抵抗は、3つのプロットにおいて2.29、1.16、および0.50kN / m ² であった。安全係数は、根のプルアウト抵抗を安全係数の公式に加えることによって、それぞれのプロットで0.28、0.1、および0.04増加しました。
58	表層崩壊と森林	佐藤創一	2006	森林の動きとして流域保全機能が大变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必要であった。ここではそれらの試みについて紹介し、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てみたい。 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、各バーツの研究成果はあがりつつあると云えるが、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。各バーツの研究を深めることはもちろん重要なことである。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し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。
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・大橋端江・壇浦正子・平野恭弘	2015	高木2種（クロマツ、スギ）の樹木根系が土砂崩壊防止に寄与する抵抗力を評価するために、土壌圧密が異なる環境下において、根の引き抜き試験を実施した。樹種ごとに、引き抜いた根系のパラメータ（根元直径、分岐数、分岐角度、根の長さ、表面積、体積）と引き抜き抵抗力との関係を解析した結果、根元直径D（mm）は、分岐角度や根の長さ、表面積、体積との間に相関がみられるものの、これらのパラメータよりも相関係数が高いこと、土壌圧密（容積重、土壌硬度）の影響を受けにくいことから、引き抜き抵抗力T（N）を推定するのに適したパラメータであることを明らかにした。引き抜き抵抗力は、クロマツがT＝19.4×D ^{1.5} （R ² ＝0.716）、スギがT＝33.6×D ^{1.5} （R ² ＝0.792）の関係式を用いて、根元直径から精度高く推定できることがわかった。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（10））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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・平野恭弘	2015	台風時の豪雨や強風は、倒木や斜面崩壊をもたらす。これらの崩壊に対する樹木の抵抗力は、土壌中の樹木根によって発揮される。本研究では、高木樹種のスギと、シカ不嗜好性で低木樹種のアセビ、ミツマタの引き抜き抵抗力の違いを明らかにするために、根の引き抜き試験を実施した。根直径（D）と引き抜き抵抗力（T）の関係式（ $T=a \times D^{1.5}$ 、a：回帰係数）を構築し、根直径10mmのときの引き抜き抵抗力を算出したところ、スギ 1012.3 N > アセビ 844.3 N > ミツマタ 200.1 N の順であり、低木樹種であるミツマタの引き抜き抵抗力は小さかったものの、低木樹種のアセビは高木樹種スギと比較して大差はなかった。また、土壌断面積 1m ² あたりの断面抵抗力（引き抜き抵抗力の合計値）は、スギ 26.8 kN > アセビ 15.1 kN > ミツマタ 1.0 kN の順であった。これらのことから、二ホンシカ生息域において、シカ不嗜好性で低木樹種のそれぞれの特性を活かした目標林に誘導することで、崩壊防止機能を向上できる可能性が示唆された。
62	土壌水分変化が斜面表層土における根系の土質強度補強効果に与える影響-模擬根系を用いた一面せん断試験-	執印康裕・加藤尚子・鈴木雅一・太田猛彦	1998	根系が土壌補強に及ぼす影響を評価するために、土壌水分吸引制御による直接せん断試験を行った。試験における吸引力は、0～50cmH ₂ Oの範囲であり、正常なストレス42～140gf / cm ² の範囲であった。豊浦標準砂を試験に使用した。2種類の材料根系をシミュレートしたものをせん断箱に挿入した。最初のものは、竹串（直径0.27cm、長さ10cm）、第2のものはナイロン製ネットであった（厚さ0.05cm、幅10cm、長さ15cm）。前者は厚いルートシステム、後者は、細かいルートシステムである。実験結果は以下の通りである。吸水量と同じ垂直応力に対するせん断強度の増加量との関係については、ナイロン製ネットの場合、30cmH ₂ O、竹串の場合、40cmH ₂ Oでせん断強度のピーク点が認められた。根系が土壌強化に及ぼす影響は見かけの凝集力および内部摩擦角の両方で観察された。吸引力は、吸引と独立して増加した内部摩擦角とは対照的に、見かけの凝集力の増加に大きく影響した。これらの結果は、土壌の強化が根系自体の抵抗力だけでなく、根系の抵抗と、通常の応力と土壌水分条件の両方によって影響を受けるせん断強度との相互作用にも依存していることを示唆している。
64	植生が表層崩壊に与える影響について	執印康裕	2002	（既往研究成果の整理） これまで、植生と表層崩壊の関係及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は土層の根系形成モデルを開發する必要があるが、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あり、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。
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	2012	表層崩壊の発生個所は、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が発生する（野々田1994）。そのため樹木単木の根系分布状況は、表層崩壊発生個所の予測につながるが同時に、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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（11））

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
72	樹木根系の根 返り抵抗力の 理論的算定法	正野光範・ 中村浩之・ 池田浩子	1998	本研究は根系の発揮する抵抗力を力学的に求め、普遍性のある根返り機構モデルを構築し、樹体の根返りに対する抵抗力の計算法を導き、その検証を試みるものである。 本研究では台風等による樹木の根返り機構解明のため、根系の発揮する根返り抵抗力を力学的に求めることを目的とした根返り機構モデルを構築した。そのモデルの特長は以下の通りである。 ・根返りを根鉢を含む樹体が地盤から引き剥がされる現象と考えた。 ・根返りを樹体から離れたところに回転軸をもつ軸回転運動とした。 ・3次元の根の存在位置、成長方向に対応している。 ・個々の根の根返り抵抗力発生過程を、のび・破断・引き抜きの3つのモードに分けて考えた。 ・樹体の回転角ごとに根返り抵抗力を求めた。 そして立木引き倒し試験の結果を用いてこの根返り機構モデルの検証を行ったところ、根の摩擦係数f、変形係数E_s、パラメーターj、mなどの不確定要素を残すものの、上に凸の樹体回転角-樹体の根返り抵抗モーメント曲線を再現することが可能であることがわかった。 本研究で構築した根返り機構モデルは樹木の根返り現象を力学的に評価するための基礎的なものである。今後は曲がりや分岐のある複雑な根系に対応するように改良するとともに、根系の分布予測と組み合わせれば樹木の根返り抵抗力の推定が可能となるだろう。
73	ゼロ次谷にお ける水分環 境・林相と災 害発生に関係 について	清水靖久・ 向山繁幸・ 戸田堅一 郎	2009	平成18年7月17日から19日にかけて長野県中部に停滞した梅雨前線は、諏訪湖の南西方面の山地に総雨量400mmを超える豪雨をもたらし、19日早朝には岡谷市内各所で土石流が発生した。特に、小田井沢川下流では7名、志平沢川下流では1名の人命が奪われ、また、多くの家屋が損壊するなど大災害となった。 今回の岡谷市における災害の特徴としては、集落の背後に近接する里山を発生源にして土石流が流下し、手入れのされていないカラマツ等の流木を伴って、被害を増大させたという傾向が挙げられる。さらに、災害発生直後から行った多くの崩壊地や周辺森林の調査の結果からは、発生箇所と周辺の林相の関係や、林相を形成する土壌の水分環境においても特徴が見られたので報告する。併せて、今後同様の災害が繰り返されないために行政として行ってきた取り組みについて紹介する。
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	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ダ(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こととみてもできる。上記のような生物学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い。 今回は樹根のうち斜出根の動きが斜面安定に与える影響を中心に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動きが大きくなる。Aタイプでは水平根の動きが100%斜面安定に寄与していることとなる。水平根の動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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（12））

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
83	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	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、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り、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。
87	樹木の根系による斜面崩壊防止機能	鳥田宏行・佐藤創		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「大して役に立っていないんじゃないの?」というささやかな懐疑的な意見を持っている人もいます。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。「巨樹は一目に如かず」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、どちらなんだ」と問われれば、「ある場合には役に立ち、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
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・池野英利・壇浦正子・平野恭弘	2015	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、樹木の風倒や土流失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あった。また、間伐が抵抗モーメントを増加させる要因としては、樹木の地下部の間伐が考えられ、根鉢直径は間伐によって大きくなくなった。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を示唆された。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（13））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
89	治山用緑化樹種の根系強度について	陶山正憲・原敏男	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、及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。
91	樹種の違いによる樹木根系の引張強度特性	福田耕司・大塚桑洋・杉山太宏・赤石勝	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、根の変わりに根系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ー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。
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・熊沢至朗	2002	本研究では、現地斜面内で人工降雨実験を実施し、斜面内の不均一性を構成する要素の一つである樹木根系(活性根、腐朽根)が土層内での水移動に及ぼす影響を明らかにするとともに、樹木の根系部周辺での雨水の挙動の定量化を試みた。 以上のように、樹木根系は降雨時に雨水の選択的な経路として働き、森林内における雨水の挙動に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。本研究は、斜面長方向にほぼ平行に伸長する根系(水平根)が雨水の挙動に及ぼす影響について定量化を試みたものである。土層内に存在する根系の伸長方向としては、今回計測対象とした斜面長方向だけでなく、鉛直方向も想定される。このため、同様の現地散水実験を鉛直方向に伸びた根系(鉛直根)を対象として実施することにより、根系が雨水の挙動に及ぼす影響について、総合的な観点から考察を加える必要があることを付記しておく。今後は、水平根だけでなく鉛直根をも対象として現地観測を継続するとともに室内散水実験(渡海・平松、2002)を実施し、根系部周辺の水理特性の定量化や崩壊予測問題へと展開を図る予定である。
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	2013	地下の横方向のネットワークを持つ樹木の根は斜面の安定性において非常に重要な役割を果たす。このような研究では、塚本(1987)、阿部(1997)の著者らは、表面の土壌層とその下の層との間に垂直な結合を有する根に焦点を当てたが、彼らは根の側方への広がりにあまり重点を置いていなかった。斜面崩壊は3次元で起こるため、水平根はその破壊に対する抵抗力を十分に発揮する。本報告は、水平根が与える抵抗力ΔCを記述することを目的としている。2種類の現地調査を行った。1つはルートクランプで引っ張られた根の強度を監視する引っ張り試験であった。他方は、ヒノキとスギの林で掘削した垂直断面に露出した水平根分布を調査した。観察された根の分布を用いて抵抗力ΔCを計算した。フィールドデータは、2つの樹木の間の距離が増加するにつれて、ΔC値がより小さくなることを示した。それらの関係は、負のパワー関数によって記述することができる。また、樹木の年齢が増加するにつれてΔCも増加するが樹木のライフサイクルの後期ではその増加量が小さくなることも証明された。フィールドデータの集約的な作業により、伐採後の森林の間伐処理によって根の体積が減少し、数十年にわたってΔCが増加することが示された。さらに、間伐は、水平根が効果的に増加すると、傾斜の安定性において良好な結果をもたらす。しかし、増加が不十分であれば、斜面の安定性に寄与しない可能性がある。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（14））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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・ 川島 正照・ 山崎 孝成	2013	地下の横方向のネットワークを持つ樹木の根は斜面の安定性において非常に重要な役割を果たす。崩壊は3次元で起こるので、側方の根は完全に崩壊に対する耐性を示す。本論文では、側方根が与える抵抗力 ΔC について述べる。集中的な現地調査とモデル記述が行われた。圃場データは、測量されたプロット間で根の強さ ΔC が大きく変化することを示しているため、樹種、樹木年齢、勾配および土壌厚さなどのプロット情報から ΔC を予測することは困難である。本稿では、予測に役立てるために、種、森林稼働履歴、初期樹密度に関する情報が与えられた時代の樹木が示す抵抗力を計算する ΔC モデルを提案する。 ΔC モデルは、森林収量計算表、近住の根量回帰曲線、塚本が提案したルート分布モデル。このモデルは、特定のパラメータの重要性を強調している。これは、側根と完全根の重量比である。このモデルは、側根の比率が ΔC の大きさに直接影響すること示している。現場調査データと ΔC モデルの出力を調べることにより、 ΔC の経時変化は1つの係数に対数項を掛けた単純な対数曲線によって表される。対数曲線と ΔC モデルの出力を比較すると、対数係数は側根の重量比によく一致する。フィールドデータによって示される ΔC の分散は、係数に集中される。それは、単純な方法で側根強度を記述する可能性があり、 ΔC の良好な指標となり得る。また、森林間伐作業を考慮すると、側根強度の変化は係数によって容易に表される。
101	樹幹引き倒し による根返り の発生機構	野々田 稔・ 林 拙 郎・川邊 洋・本多 潔・小藪一 志	1996	根返りの発生機構を明らかにするために、砂質土壌に生育するヒノキ2本を用いて、根返りを想定した樹木の引き倒し試験を実施した。引き倒し試験の結果より、根返りは、樹幹の真下中央の土中の1点を回転の中心として発生することが明らかになった。このことから、根返りモデルとして回転の中心までの深さと根系抵抗力FRIによって決定される根返り抵抗モーメントを検討した。根系の抵抗力は、根系の引張力の合力より求められる。根系引張力の合力を求めるための一つとして、根系の立体的分布状況の調査を行った。次に、根の引張試験を実施し、根の引張応力-ひずみ関係および最大引張荷重を明らかにした。測定データを検討し、根返りモデルに基づく根返り抵抗モーメントの計算を行った。計算結果によると、根返り抵抗モーメントは、実測値である根返り発生モーメントに対して、モーメントのピーク値までの範囲で良い適合性を示した。
102	根系の引張強 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 稔・ 林 拙 郎・川邊 洋	1994	本報告では、発生直後の表層崩壊地において、表層崩壊面の残存根の引張試験の結果より、曲げ破壊を考慮した根系抵抗力を求めた。次に簡易ヤング法(JANBU, 1957)を用いて、崩壊面の根系抵抗力を考慮した林地斜面の安定解析を行い、樹木根系が抵抗力に及ぼす影響について考察を行った。
113	災害に強い森 林整備	北沢 秋司		近年、局地的な豪雨等による山地災害が頻発しており、特に平成18年7月15日から19日にかけての豪雨は、長野県全域に甚大な被害をもたらしました。このような背景のもと、県では平成18年10月に、「森林土砂災害防止機能に関する検討委員会」を設置し、土砂災害発生源となった森林と土石流が流下した溪流等の現況を把握して、土砂災害の発生原因の究明を行いました。これに加え、上流から下流までの総合的な防災対策の一環として、森林の土砂災害防止機能を高度に発揮できる森林造成、防災林への誘導等を総合的に検討しました。平成18年10月から約2年間にわたる現地調査、各種試験、議論を経て、平成20年1月に、今後の災害に強い森林への誘導・造成等を総合的な整備手法を示す「災害に強い森林づくり指針」を作成しました。

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
120	樹木の根の引き抜き抵抗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	2018	地盤変位によって根が引き抜かれると、地すべり防止に及ぼす根系の影響が発揮される。したがって、表面土壌の変位に対して抵抗が直ちに発揮されてもよいし、根の形態の相違または根が成長する土の硬度のために著しい変位が生じた後に、抵抗が直ちに発揮されてもよい。また、根系を核とする根の放射状成長は、浅い地滑りが発生した場合に根を様々な方向に引き抜き結果をもたらす、根抵抗の発生する仕方に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、根の引き抜き方向と引き出し方向(引き抜き角度)の違いによる影響を明確にする目的で、スギの引き抜き試験を実施した引抜き変位と引抜き角度を考慮した根系の影響を浅い地すべり防止に及ぼす効果を評価する方法を検討した。この研究では、引き出し角度を0度から90度まで変化させて引き出し変位を測定した。①各根の最大引き抜き変位値が異なること、②同じ直径の垂直根の引き抜き抵抗が引き出し角が高いほど大きくなること、③最大引き出し変位は、引き出し角度が高いほど大きくなる傾向がある。以上の知見に基づき、1本の根元からの引張り変位に応じた抵抗値を1mm間隔で算出することにより、数本の根の変位当たりの引抜き抵抗の合力を算出する方法を提案した。この方法を用いて浅い地すべり防止に及ぼす根の影響を評価すると、最大引き抜き抵抗を合計する従来の方法を用いて評価した効果の約40%であることが判明した。
135	根系の引き抜き抵抗によるセン断補強強度の推定	阿部和時	1991	根系による斜面安定効果の評価を引き抜き抵抗力によって行なう方法を検討した。この報告では根系を含んだ砂の大型室内一面セン断試験を行なうとともに、同じ装置で同じ試験初期条件でセン断箱の中から根系を引き抜き試験も行ない、両試験の比較から引き抜き抵抗力で根系によるセン断抵抗力の補強効果を推定する方法を検討した。その結果、引き抜き抵抗力で精度良くセン断抵抗力を補強強度を推定できるモデルを提案できた。引き抜き試験は原位置でも比較的容易に行え、地質・土質などの立地条件や根系の複雑な分布状態の影響も反映した力で、きわめて有効な現場の情報を与えてくれる。このモデルも実際の森林斜面に適応できるようにさらに改良する必要がある。
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(英文)	黒川潮・岡田康彦	2014	2010年7月16日15時から18時の間に非常に強い豪雨が発生し、広島県庄原市に1500箇所以上の斜面崩壊と土石流が発生した。3時間雨量は173mm、最大1時間雨量は72mmであった。本研究では、豪雨によって発生する斜面崩壊と地形との関係を調べた。この災害を分析するために、航空写真、空中レーザー測量で作成された1mのメッシュのデジタル標高地図、および地理情報システムを使用して作成された植生データを使用した。崩壊は標高300～650mの地点で起きたと判断された。崩壊地の勾配の平均値は28.1度であり、対象地全体の平均勾配よりも急である。40度以上の斜面で崩壊が多発した。また、崩壊面積率は北東斜面で最も大きかった。崩壊を経験した地域の植生被覆率は、クヌギ(Quercus acutissima α)、スギ(Cryptomeria japonica α)、ヒノキ(Chamaecyparis obtusa)の順に存在していた。他の森林タイプと比較して急な場所であり、調査地域の森林の95%が16歳級以下で、11歳級の森林が最大の面積を占めていた。崩壊面積率は、1、2および6歳級の森林で非常に高かった。
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	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ていた。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（16））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
147	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		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、かなりの所で研究の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及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。
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	2009	このような背景のもと、森林の表層崩壊防止機能の評価について、私なりに考えていることを此処に記述するものである。 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
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	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、断面積あたりの引き抜き抵抗力を算出し、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。
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	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か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1000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1000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する。
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	2011	樹木の根系は崩壊防止機能を有しており、土壌のせん断抵抗力を増強する力ΔC(kN/m²)として効果を発揮している。本研究では天然広葉樹林の代表的な樹種であるミズナラ、コナラのΔCを算出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、根系分布と直径を測定し、根直径と引き抜き抵抗力の関係式からΔCを算出することとした。その結果、ミズナラとコナラは深くまで太い根が分布し、ミズナラは立木間隔1.6m$\sim$4.9mでΔC46$\sim$10kN/m²、コナラは立木間隔2.2m$\sim$4.9mでΔC36$\sim$14kN/m²の値を示した。この値は人工林に多く用いられるカラマツと比較すると高い。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（17））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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	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られる。また、ミズナラにおける根系分布では、株立ちのものと同程度の根量に差がみられるなどの特徴が明らかになった。
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	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なままである。そこで本研究では竹林の崩壊防止機能の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㎡あ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。
156	立木周囲の崩壊防止力の分布	神田誠也・北原曜・小野裕	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が減少する傾向が窺われた。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。
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	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。同時に、防災に必要な措置や間伐など森林施策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。
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	2014	筆者はヒノキ人工林において胸高直径と立木配置から崩壊防止力分布図の作成を試みた。しかし広葉樹天然林は多様な樹種構成などの複雑な要素が存在し、崩壊防止力の推定は容易ではない。そこで本研究では広葉樹天然林の様々な要素に注目し、反映すべき要素と無視できる要素を区分し、広葉樹天然林における簡易な崩壊防止力推定法の作成を目的とした。崩壊防止力分布図作成法の改良や、多様な樹種を包括できる推定式の検討を行い、広葉樹天然林の崩壊防止力分布図を作成する一方、トレンチを掘削して根系分布調査を行い、推定の精度を検証した。
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	2006	森林根系の崩壊防止機能についての研究は、これまで多数行われてきているがその対象樹種はスギやヒノキがほとんどであった。そこで本研究では、これまで明らかにされていなかったカラマツの根系についてその分布および引き抜き抵抗力を明らかにし、スギ、ヒノキと比較することを目的とした。調査は二本の立木間中央部において根系分布調査を行い、別途根系一本一本について引き抜き抵抗力の測定を行った。分布調査の結果、単位断面積あたりの根系断面積合計値はヒノキと大差ないことが明らかとなった。引き抜き抵抗力は、スギの約5割、ヒノキの5割から8割を示すことが明らかとなり、カラマツ根系はスギ、ヒノキと比較して力学的に弱いことがわかった。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（18））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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	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。
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	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割に減少すること、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。
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	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ヶ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。
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	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、単位断面積あたりの引き抜き抵抗力の合計値 ΔC (kN/m^2)を算出した。その結果、間伐を行った切り株と立木の間に最小となった 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。
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	2009	根系は崩壊防止機能を有している。しかし間伐が根系の崩壊防止機能に及ぼす影響は未解明である。そこで本研究ではカラマツ根系を対象に、間伐の有無による崩壊防止機能の変化を解明するため、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より単位断面積あたりの引き抜き抵抗力合計値 ΔC (kN/m^2)を算出し、間伐の影響を検討した。その結果、間伐を行った森林のほうが ΔC が高い値を示した。また立木間隔が広がるにつれて ΔC は低下する傾向にあり、これは間伐の有無に関係なかった。これらのことから間伐は崩壊防止機能を増加させるが、強度の間伐を行うことは崩壊防止機能を低下させる場合もあると考えられた。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（19））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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	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1㎡当たりの引き抜き抵抗力の合計値 $\Delta C(kN/m^2)$ を算出し、各林齢の崩壊防止機能の評価した。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。
166	カラマツの根系に及ぼす間伐の影響	伴博史・北原曜・小野裕	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、より間伐の効果を確認するため、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）より単位断面積あたりの引き抜き抵抗力合計値 $\Delta C(kN/m^2)$ 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。
167	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	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和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、形状比とは負の相関、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。
168	愛知県伊良湖岬におけるクロマツの引き倒し試験	宮田賢・北原曜・小野裕	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考えられた。
169	アカマツの引き倒し抵抗力和根の形状の根返りメカニズム	高橋悠介・北原曜・小野裕・小野主	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、鉛直根の長さや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。
170	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	2015	立木の引き倒し試験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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（20））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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	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。
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	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。
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き強度の関係	松下将大・小野裕・北原曜	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グサ、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探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程度の根を専用鉋で引き抜き、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。
174	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	2009	森林根系の崩壊防止機能の評価法として引き抜き試験があるが、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が分かった。
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・北原曜・小野裕	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/m ²)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比に比べ、根系の崩壊防止力が高いことが分かった。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（21））

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
176	スギ・ヒノキ・カラマツ・コナラの立木の引き倒し抵抗	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	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と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。
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	岡田萌・北原曜・小野裕	2012	根系の引き抜き抵抗力和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量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、生根の細胞壁率と断面部直径から求めた根系の引き抜き抵抗力和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ことが考えられた。
178	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	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15cm程度の単根を採取し、室内で試験片中央部の断面部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。
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	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。
181	森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察	掛谷亮太・小坂泉・瀧澤英紀・阿部和時・岡田康彦	2020	森林斜面の表層崩壊は表層土全体に至る亀裂が発達して表層土全体が破壊して崩れ落ちてしまう現象で、根系の表層崩壊防止機能はこの歪・亀裂の発達を抑止することによって発揮されていると推察している。この点を解明するために、縦・横1×1m、せん断域の厚さ50cmと0cmに設定した原位置せん断試験を、スギ根系が生育している試験土塊と土だけの試験土塊を対象に実施した。せん断域厚さ50cmの試験は表層土全体が歪んで崩壊に至る場合を、せん断域厚さ0cmの試験はこれまでも考えられていたようにすべり面が生じて崩壊する場合を想定した試験である。その結果、せん断域が厚い場合の方が土塊は容易に破壊され、根系の崩壊防止機能が弱いことが示された。これに対し、薄いすべり面の場合には根系の機能が非常に強くなることが示された。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（22））

番号	論文名	著者名	発行年	概要(抄録)
3001	Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles	M. Schwarz, D. Cohen, and D. Or	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5 cm以内で達成されるのに対して、直径20 mmの根は10 cm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挙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。
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	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る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り、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土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WM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(1000~2000 m 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。
3003	Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes - from a bundle of roots to tree stands	M. Schwarz, P. Lehmann and D. Or	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、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1000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間で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。

既存文献の概要（根系と崩壊の関係（23））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
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	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（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1980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時の降雨量の閾値を調査し、10m DEM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との間の実質的な履歴の効果を説明している。
3005	Long-term modelling of landslides for different forest management practices	Amod S. Dhakal, Roy C. Sidle	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。プリディッシュコロニア州、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。
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	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年以来的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、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。

既存文献の概要（降雨と崩壊の関係（1））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
3007	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	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だけでなく、今後改善すべき点について考察を行った。
3008	2014年8月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害	松村和樹, 長谷川祐治, 藤本将光, 中谷加奈, 西川友章, 笠原拓造, 柳崎剛, 鏡原聖史, 加藤智久, 岡野和行, 鈴木崇, 平岡伸隆	2015	平成26年8月17日午前3時頃に兵庫県丹波市市島町を中心とした約87km ² の範囲において土砂災害や洪水による被害が多発した。兵庫県1)によると丹波市で死者1名、重軽傷者4名、全壊家屋17戸、半壊・一部損壊48戸、床上浸水140戸、床下浸水723戸にのぼる甚大な被害が報告されている。(公社)砂防学会では調査団を派遣し、丹波地方における今回の土砂災害の状況や発生原因について調査を行い記録として残すこととした。本報告では平成26年9月23日に実施した現地調査結果とともに、災害発生要因として地形・地質・降雨状況・避難状況・砂防施設の効果について取りまとめた。今回の災害発生地域において、崩壊は表層崩壊と深層崩壊の二つのタイプが混在し、崩壊は地質構造的には付加体域、また、降雨強度や総雨量の大きい地域に多発している。西山川の上流に設置されている鋼製鋼管透過型堰堤は下流の土砂災害防止に効果的であったことはシミュレーション結果からも認められるが、スリット間隔と流出土砂の粒径との整合はなく、流水の流下でスリット部が閉塞されて流出土砂が捕捉されている。また、流水は土石流や土砂流の先端に集中して流下することが現地調査結果から指摘されており7)、この鋼製鋼管透過型堰堤の土砂捕捉効果も流水の影響が大きい。
3009	2016年9月7日台風13号による柿平沢土砂災害	石川芳治, 執印康裕, 柏原佳明, 宮田直樹, 大野亮一, 飛岡啓之, 梶原誠, 沼宮内信	2016	2016年9月7日に群馬県沼田市柿平沢で台風13号に伴う豪雨により土石流が発生し、4棟の家屋が被害を受けた。震災後、土石流の発生・流動・堆積の過程を調査し、土石流災害の実態を明らかにすることを目的として、直ちに日本砂防学会関東支部が研究チームを組織した。調査の結果、以下の特徴が観察された。1) 土石流は短期間の豪雨によるものであった。2) 土石流が大量の表面流出の影響を受けた。3) 河床の侵食により軽石層が露出した。4) 溪流の丸太や堆積物によって流水のダムが形成された。
3010	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	2015	豪雨による表層崩壊と実効雨量の関係は飽和浸透流の関数から検討した。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。飽和浸透流の関数式には、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。

既存文献の概要（降雨と崩壊の関係（2））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
3011	実効雨量の概念を用いた分布型崩壊概念モデルによる降雨指標と表層崩壊の関係について－東京都伊豆大島を事例として－	執印康裕、堀田紀文	2017	土砂災害対策に関して代表的な降雨の危険度評価指標の1つである実効雨量の考え方を取り入れた分布型崩壊概念モデルによる指標値の有効性について検討した。有効性の検証は、実社会における警戒・避難システムにおいて広く用いられその有効性が実証されている土壌雨量指数および実効雨量の両指標と比較することによって行なった。本モデルは対象とする領域内を10m 正方形のセルに区分し、各セルにおける地下水位の算出結果を用いて無限長斜面安定解析を実施するものである。したがってモデル指標は斜面安定解析において安全率1以下として定義される崩壊セル数の時間変化として出力される。本モデルの特徴は、地下水位計算過程において崩壊面から鉛直方向に抜ける浸透流の影響を考慮するために、応答パラメータとしての鉛直飽和透水係数を設定していることにある。本パラメータが実効雨量においては半減期に相当する。検討の結果として以下の結論を得た。 結論1：本モデルの出力指標は、すでに実社会における有効性が実証されている土壌雨量指数、実効雨量と極めて高い相関関係を示し、このことが本モデルのある程度までの有効性を示唆していること。 結論2：本モデルを警戒・避難基準の設定に用いることを想定した場合、鉛直飽和透水係数の値の違いに対応した降雨危険度評価レベルを段階的に設定し、各レベルにおける崩壊セルの発生時および消滅時を警戒・避難の発令および解除時と設定することが有効であると。 以上の2点である。
3012	斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法	小杉賢一、朗	2015	本研究では斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法に関して、「単独の実効雨量を用い、半減期を様々に変化させて既往最大値超過を評価する手法」と「スネーク曲線図を用い、横軸実効雨量の半減期と縦軸実効雨量の半減期を様々に変化させて既往最大値超過を評価する手法」を提案し、5つの災害事例に適用した。得られた結果は以下の通りである。 1) それぞれの評価手法において既往最大値超過状況を容易に判定することのできる、一次元判定図ならびに二次元判定図が提示された。 2) 提案した評価手法を用いることで、降雨強度、積算雨量、先行雨量などの複合的な影響を隈無く解析し、降雨の既往最大値超過の有無を示すことができた。 3) 4つの災害事例において、崩壊が発生した時間帯に降雨の既往最大値超過が検出された。 4) 二次元判定図は、より早く確実に既往最大値超過を検出でき、包括的な斜面崩壊発生危険度評価に役立つ情報を提供できることが示された。 5) 土砂災害警戒情報の基準に用いられる雨量指標は、二次元判定図の一部しか着目しておらず、既往最大値超過を見落とす可能性があることが示された。 6) 深層崩壊事例（平成23年紀伊半島豪雨）と表層崩壊事例（平成22年広島県庄原市災害）の比較では、崩壊発生時に既往最大値超過を示す実効雨量の半減期が深層崩壊でより大きくなることが示された。 7) 平成18年岡山県真庭市災害の事例では、風倒木被害を受けた地域において、降雨の既往最大値超過が起きる以前に崩壊が発生したことが示され、斜面環境の変化が崩壊を誘発したことがわかった。

既存文献の概要（早生樹の関係（1））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
1001	センダン植栽木への施肥が成長に及ぼす影響	池本省吾	2018	早生樹として期待が高まっているセンダン(Melia azedarach)は、熊本県など九州各地で植林が行われているが、鳥取県のように冬季にまとまった積雪のある地域での植林事例はほとんどない。そこで、今後センダンを植林する際の基礎資料とするため、県内5カ所に植栽試験地を設けた。植栽に用いた苗は1年生コンテナ苗で、2016年秋に1カ所97本、2017年春に4カ所252本植栽し、一部の試験地で植栽後に施肥を行った。植栽後の苗高、根元径を定期的に計測するとともに、雪害、病虫害等の発生状況を調査した。2016年秋試験地(標高480m)では、積雪による幹折れが発生した(被害率92.1%)。幹の折損部からは萌芽が発生したが成長は不良であり、積雪地での植栽は不適と考えられた。2017年春試験地の1成長期経過後の成長量の平均は、伸長成長(施肥区25.6cm>無施肥区11.4cm)、直径成長(施肥区10.9mm>無施肥区6.9mm)で、施肥の効果が認められた。また全ての試験地でゴマダラカミキリによる幹の食害が発生していたが、病害は認められなかった。一部の試験地では、イノシシによる掘り返し、シカによる食害が認められた。2年目以降の成長についても継続調査する予定である。
1002	施肥がセンダン苗木の成長に及ぼす影響	池本省吾	2017	鳥取県で標高の低い海岸近くに自生しているセンダン(Melia azedarach)は、一般に日当たりさえ良ければ土地を選ばず成長するといわれ、早生樹として期待が高まっており、今後苗木の需要が増加することが予想される。センダンを育苗する際の基礎資料とするため、林業試験場構内に植栽された35年生母樹の落下した種子を採取し、発芽試験及び施肥試験を行った。発芽試験の結果、3月に採取・播種したものに比べて、12月に採取・播種した方が2週間程度発芽の開始が早く、最終発芽率は12月:57.7%、3月:33.5%で、12月の方が高かった。このことから、当年産種子は取りまきの方が実用上有利と考えられた。施肥試験の結果、施肥量別の苗高の平均は、1.5g:32.1cm、3.0g:60.1cm、6.0g:70.1cmで、施肥量が増加すると成長量が大きくなる傾向がみられた。ただし6gと3gでは大きな差はみられなかったことから、実用的には3g程度が適量と考えられた。無施肥のものはほとんど成長しなかったことから、センダンは肥料要求度の高い樹種と考えられた。今後は、これら苗木を植栽し、植栽後の成長について調査する予定である。
1003	京都府立大学大野演習林での早生樹センダンの植栽試験	糟谷信彦, 上田菜津美, 堀田耀介, 藤田夏子, 藤久子, 宮藤久士, 村田功二, 片山宏文, 横尾謙一郎	2016	木材の需要拡大のため、国産広葉樹の活用が検討されている。特に有用材として近年注目を集めている早生樹のセンダンは、これまで九州の熊本では植栽試験が行われ、センダンの育成方法が確立している。しかしながら、九州以外の地域で植林された事例はほとんどなく、京都地域で植栽試験を行った。調査地は、京都府南丹市にある京都府立大学生命環境学部附属大野演習林で、2014年5月に10本、2015年5月に20本植栽した。施肥区・無施肥区、シカ柵(単木ネット)の有無を設け、土壌pH、土壌硬度、土壌の三相組成を調べた。また、京都市にある京都府立大学構内の苗畑で2015年5月に21本植栽した。2015年終了時のDBHと樹高はそれぞれ2014年植栽で4.7 cm、4.2m、2015年植栽で1.4 cm、1.6 mであった。施肥区では直径・樹高成長とも無施肥区の約2倍であった。この他、近畿中国森林管理局管内との共同試験において、5府県10箇所の国有林で計170本のセンダンを2015年春に植栽しており、その結果生育良好木の割合は33(8~60)%、枯死率は9(7~13)%となり、シカなどによる獣害、シュートの先枯れ、先折れ、が顕著であった。今後生育良好木の割合を高める必要性が確認された。

既存文献の概要（早生樹の関係（2））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
1004	本州西部地域 での早生樹セ ンダンの植栽 試験	糟谷信彦, 宮藤久士, 村田功二, 中村彰男, 横尾謙一 郎	2017	木材の需要拡大のため、国産広葉樹の活用が検討されている。特に有用材として近年注目を集めている早生樹のセンダンにおいては、これまで九州の熊本では植栽試験が行われ、センダンの育成方法がマニュアル化されている。しかしながら、九州以外の地域で植栽された事例はほとんどなく、岡山～福井までの本州西部地域各地で植栽試験を行った。京都市の京都府立大学構内では植栽後1年間の直径、樹高成長量が、施肥ありと施肥なしでそれぞれ、3.5 cm, 2.3 cm, 2.2 m, 1.5 mとなり、施肥の成長促進効果が顕著であった。京都府南丹市にある京都府立大学大野演習林では、植栽後3年間の直径、樹高成長量が、施肥ありと施肥なしでそれぞれ、7.7 cm, 4.7 cm, 5.7 m, 4.5 mとなり、同様に施肥の効果が見られた。この他、近畿中国森林管理局管内との共同試験において、6府県11箇所の国有林で10～25本のセンダンを2015～2016年春に植栽しており、その結果健全木（樹高1.4m以上）の割合は59（20～90）%となり、シカなどによる獣害、枯損、が少なかった。今後シカ柵（単木）設置や芽かきの適切な実施により健全木の割合を高める必要性が確認された。
1005	本州西部地域 での早生樹セ ンダンの造林 成績	糟谷信彦, 宮藤久士, 村田功二, 中村彰男, 横尾謙一 郎	2018	木材の需要拡大のため、国産広葉樹の活用が検討されてきている。特に有用材として近年注目を集めている早生樹のセンダンにおいては、これまで九州の熊本では植栽試験が行われ、センダンの育成方法がマニュアル化されている。しかしながら、九州以外の地域で植栽された事例はほとんどなく、岡山～福井までの6府県11箇所の国有林で植栽試験を行った。各地で10～25本のセンダンを2015（一部は2016年）春に植栽し、芽かきをおこなったところ、2017年秋時点で、健全木（樹高3.0m以上のものと定義）の割合は各地で0～75%とばらつきが大きく、また全体平均で25%であった。シカなどによる食害、樹皮剥ぎ、折損、霜害、枯損、がそれぞれ10～20%みられた（全体の平均）。今後シカ柵（単木）設置や芽かきの適切な実施により、健全木の割合を高める必要性が再確認された。
1006	センダン植栽 木の初期成長 と立地環境	高山勉, 山 田範彦, 山 瀬敬太郎	2018	早生樹として期待されているセンダン（ <i>Melia azedarach</i> ）については、九州地方、特に熊本県で研究が進んでいるが、兵庫県における植栽箇所が少なく、成長特性の研究事例がほとんどない。そのため、植栽後2年間の成長と立地環境の関係を明らかにすることを目的とし、兵庫県栗東市内の標高の異なる3箇所で調査を行った。結果、標高180mの調査地が平均苗高39.5cmと最も成長が良く、標高370～400mで同16.3cm、標高680mで同11.3cmとなった。全調査地計235本のデータから、苗高を応答変数とし、説明変数候補を標高、傾斜、苗高成長が最も良い時期である8月16日の直射光透過時間（min）、土壌含水率、植栽時苗高とした一般化線形混合モデルを構築し、赤池情報量規準（AIC）を指標に変数選択をしたところ、標高、傾斜、8月16日の直射光透過時間が選択されたため、良好な初期成長には、標高が低いこと、傾斜が緩いこと、光環境が良いことが必要であることがわかった。このことから、気温が高く、表層土壌が厚い場所、北斜面よりも南斜面が適していると考えられた。

既存文献の概要（早生樹の関係（3））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
1007	関西地区における国産早生樹センダンの試験植林	村田功二, 内海真弓, 宮藤久士, 横尾謙一郎, 横尾国治	2015	熊本県では早期成長と多収穫を目的とした新しい林業経営開発が試みられ、センダン(Melia azedarach)が選抜された。そして密植や枝打ちではなく、芽かきによって通直な材を得る技術が開発された。これまでの研究は主に熊本県で行われており、日本で生育したデータは少ない。そこで本研究では、関西地域で実際にセンダンを植栽その成長量を確認すると同時に、自生するセンダンの材質を調査した。 熊本県で優れた成長が確認されたクローンから採取した種子由来の1年生苗木を関西西地区で植栽した。対象地域は大阪市住之江区平林の海岸沿いの遊休地と、南丹市美山町の京都府立大学附属大野演習林である。センダン苗木をそれぞれ10本ずつを植栽し、樹高と根元直径の成長量を測定した。両方の調査地で1年間の成長量は良好であり、最も成長の良いものは樹高3m、根元直径60mmに達した。大野演習林に自生していたセンダンの地上50cmから約1mを供試材として年輪解析や材質評価を行った。降雪があり比較的冷涼な大野演習林でも、11年目には直径30cm、20年目には直径50cmに成長しており、優れた成長が見込めることが分かった。
1008	コウヨウザンの簡易収穫予想表の試作	山田浩雄, 近藤禎二, 大塚次郎, 磯田圭哉, 生方正俊	2018	コウヨウザンは30年程度で収穫が見込める早生樹の一つとして注目されているが、江戸時代に渡来した外来樹種であることから、実際は日本における造林実績は少なく、また、どの程度の収穫が見込めるか等の情報も不足している。一般に収穫予想表は、様々な環境に成立する大量の林分データから作成するが、コウヨウザンを造林樹種の選択肢の一つと考えるためには、将来の収穫予測の提示が不可欠と考え、今回は樹齢が21年生から68年生のコウヨウザン12林分の毎木調査データから、暫定的な収穫予想表の試作を行った。広島県庄原市の52年生林分での樹幹解析により樹高成長曲線を求め、これをガイドラインとして、地位指数曲線群を推定した。この地位指数曲線群に12林分の毎木調査データをプロットし、地位「上、中、下」の樹高成長曲線をそれぞれ決定した。また、12林分の毎木調査データから樹高と胸高直径と林分密度の関係式を推定し、この関係式を地位「上、中、下」の樹高成長曲線にそれぞれ当てはめて林分材積を求めた。その結果、地位「上、中、下」の30年次の林分材積は、それぞれ約700、500、350m³/haと推定された。
1009	コウヨウザンの所在地データベースの作成	山田浩雄, 安部波夫, 塙栄一, 大塚次郎, 磯田圭哉, 生方正俊	2016	早生樹種の一つとして注目されているコウヨウザンは、江戸時代に渡来したとされる外来樹種であることから、日本における植栽可能地域やその環境条件についての情報が十分ではない。コウヨウザンの生育範囲を明らかにするため、コウヨウザンが植栽されている所在地を探索してデータベースを作成し、データベースにリンクさせた国土数値情報から所在地の気候要因を抽出した。これまでに226件のコウヨウザンの所在地が確認され、宮城県および新潟県以西から九州までの照葉樹林帯と考えられる地域に広く植栽されていた。特に、関東地方と近畿・東海地方から北陸地方にかけての地域に多く植栽されている傾向にあった。226件のうち、約50%が神社・仏閣の社叢林に、約25%が都道府県・市町村の公園や植物園に、それぞれ単木的に植栽されている個体が多く、巨樹巨木や天然記念物として登録されている個体もあった。所在地の気候要因から、年平均気温12℃以上、暖かさの指数90℃・月以上、寒さの指数-15℃・月以上の地域が植栽可能地域と考えられた。年降水量は約1000～3000mmの範囲に植栽されており、日本の気候では制限要因にはなっていないようであった。

既存文献の概要（早生樹の関係（4））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
1010	成長曲線を用いたコウヨウザンの材積成長過程の解析	山田浩雄, 近藤禎二, 磯田圭哉, 大塚次郎, 生方正俊	2017	コウヨウザンは早生樹種の一つとして注目されているが、江戸時代に渡来した外来樹種であることから、実際は日本における造林実績は少ない。また、僅かに存在する情報に関する成長特性に不足している。コウヨウザンの成長特性を明らかにするため、広島県庄原市のさ晩性や持続性などの成長特性に関する情報を収集し、コウヨウザンの成長特性を明らかにする。成長曲線の解析から、成長曲線のパラメータを推定した。SSR遺伝子型によるクロン分析の結果、優勢木、劣勢木、平均木のそれぞれに共通のクロンが存在し、また、成長曲線のパラメータにはクロン間差が認められた。これは成長や成長パターンがクロンによって異なっていることを示し、成長形質の改良が期待できることを示唆している。連年成長が最大となる成長曲線の変曲点の樹齢は約30年～75年の範囲にあり、成長の早晩性のクロン間差の存在も示唆された。
1011	平成29年度早生樹利用による森林整備手法検討調査委託事業報告書	林野庁	2017	早生樹の植栽は、特定地域において試験的行われる段階であり、早生樹の気候、地形、土壌等の自然条件や目的に応じた適切な樹種の選択、需要・供給の実態、植栽方法及び苗木の需給状況等に関する情報を収集・分析とともに、早生樹の利用が期待される地域において資源造成に向けた実証的植栽を行い、早生樹利用による森林整備のためのガイドラインを作成することを目的とした。
1012	コウヨウザン林における土砂流出量の変化	渡辺靖崇, 鈴木保志, 涌嶋智, 坂田勉, 東敏生	2018	コウヨウザンとは中国では主要な造林樹種の一つであるが、日本では造林実績が少なく林分としての性質は不明な点が多い。本研究ではコウヨウザン林における表土移動特性とそれに関係する要因を明らかにするため、コウヨウザン林とヒノキ林に簡易土砂受け箱を設置して表土移動量を観測した。コウヨウザン林では落葉落枝が堆積しやすい特徴があるため、その評価を目的に落葉落枝の除去区を設けた。他の土砂受け箱の設置要因として傾斜条件（急・緩）を加えた。また、物質移動レート（ $g\ m\ mm^{-1}$ ）を指標として他の樹種の林分を調べた既往の研究事例と比較検討した。コウヨウザン林の落葉落枝の有無を比較すると、有りのほうが物質移動レートが低く、コウヨウザンの落葉落枝による表土保全の効果を確認できた。コウヨウザン林では落葉落枝の除去区でも下層植生の回復がほとんど見られず、その原因として照度不足と上層木のコウヨウザンによるアレロパシーが考えられた。既往研究による他樹種林分と比べると、コウヨウザン林は表土保全の効果が高いとされアカマツ林と同程度の物質移動レートとなった。

既存文献の概要（挿し木の関係（1））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
2001	スギ挿し木コ ンテナ大苗の 活着と初期成 長	重永英年, 山川博美, 野宮治人, 荒木眞岳	2015	300ccマルチキヤビティコンテナ(24本/トレイ)で育苗したスギ挿し木1年生コンテナ苗(平均苗高54cm、同地際直径6.1mm、同比較苗高89)と、同容器で育苗密度を3段階(24本/トレイ、12本/トレイ、6本/トレイ)に設定し、育苗期間を1年間延長したスギ挿し木2年生コンテナ苗(平均苗高71cm、同地際直径6.8～7.7mm、同比較苗高93～120)を人工林伐採跡地に植栽し、植栽時の苗の地上部サイズの違いが活着ならびに1年目の成長に及ぼす影響を調べた。活着率は、1年生コンテナ苗が94%であったのに対し、2年生コンテナ苗では70～85%と低かった。植栽時のD ² Hが大きい個体では活着率が低くなる傾向があり、葉量が多い個体では植栽直後の少雨による乾燥ストレスに対して脆弱であることが予想された。樹高成長は、1年生コンテナ苗で22cm、2年生コンテナ苗では11～16cmと2年生コンテナ苗で小さく、植栽時の比較苗高が大きい個体では樹高成長が小さい傾向にあった。
2002	夏季植栽され たスギ挿し木 苗の生残規定 要因－苗種か 物質分配か？－	新保優美, 平田令子, 今岡成紹, 伊藤哲	2017	コンテナ苗は発達した根系と培地があることの効果によって、植栽時にストレスを受けにくいと考えられ、伐採から植栽までの「一貫作業システム」への適用が期待される。近年の植栽試験では、コンテナ苗が裸苗よりも耐乾性に優れている傾向が読み取れるが、なぜコンテナ苗が乾燥に強いかは不明な点が多い。そこで本研究ではスギ挿し木苗の生残規定要因を明らかにする目的で、夏季植栽された苗の物質分配を分析した。2015年8月に圃場および温室に、1年生および当年生コンテナ苗、当年生裸苗を植栽し、同年11月に温室、翌年6月に圃場の苗木を掘り取って各器官重量を測定した。分析では①苗種の違いに関わらず各器官重量が生死を分けている、②苗種によって生残枯死は異なり各器官重量の効果も異なるという2つの仮説に基づき、目的変数を苗種の生残枯死、説明変数を各苗の器官重量、その比率や苗種による違いとするモデルを構築した。各モデルのAICおよび採用された説明変数とその回帰係数を比較した結果、苗種によって耐乾性は異なり、各器官重量の効果も異なった。また、各器官重量の同じコンテナ苗と裸苗を比較したところ、コンテナ苗培地の効果が大きいことが示唆された。
2003	福岡県におけ るスギ挿し木 コンテナ苗と 裸苗の成長－ 植栽年の異な る5つの調査 地の事例－	鶴崎幸, 佐々木重 行, 宮原文 彦	2016	近年、植栽が容易で時期を問わずに植栽できるコンテナ苗が注目されている。福岡県においてもコンテナ苗の成長を明らかにするため、2010～2014年にスギ挿し木コンテナ苗(MC300)と裸苗が植栽された計5か所の調査地において、植栽直後から毎年成長休止期に苗高と根元径を計測し、プロット毎に平均値を求めた。植栽時の平均樹高(以降、H)39～56cm、平均根元径(以降、Dr)5.5～6.2mmであったプロットのコンテナ苗は、裸苗と同様の成長傾向であった。徒長したコンテナ苗を2014年①8月②9月に植栽した箇所では、植栽時H①86cm②94cm、Dr①7.4mm②7.9mm、2成長期後H①100cm②98cm、Dr①20.0mm②16.4mmであった。徒長したコンテナ苗はHの成長が小さい一方、Drの成長が大きかったことから、伸長成長よりも肥大成長を優先させ、苗木の形状を安定させたと考えられる。このことから、苗木の形状が安定するまでの数成長期間、苗高方向の成長が期待できない可能性が示唆された。

既存文献の概要（挿し木の関係（2））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
2004	東北地方におけるスギコンテナ苗と裸苗の成長	榎間岳, 八木橋勉, 松尾亨, 中原健一, 那須野俊, 野口麻穂子, 八木貴信, 齋藤智之, 柴田銃江	2015	コンテナ苗が、東北地方の厳しい気候下で良好な成長ができるのか、また徒長気味にも見えるコンテナ苗でも良好な成長をするのかを確かめるため、最大積雪深が1m前後である岩手県二戸市浄法寺町と宮城県白石市において、裸苗とコンテナ苗の成長を植栽後3成長期間に渡って計測した。その結果、岩手県の事例では、コンテナ苗の方が裸苗よりも樹高、直径成長ともに速かったが、宮城県の事例では裸苗の方が初期成長が速かった。両試験地の環境差による影響も考えられるが、植栽されたコンテナ苗の形状比に大きな違いがあり、これが、植栽後の成長に影響したものと考えられた。このため、コンテナ苗は東北地方でも良好な成長をする能力はあるが、そのためには、植栽時の形状比を低く保つ必要がある可能性が示された。
2005	スギコンテナ苗および裸苗の根系形態	平田令子, 大塚温子, 伊藤哲	2013	【目的】スギコンテナ苗はポット苗のように根の変形が起こり難いことから、植栽後も根系の不良に基づく生育不良や枯死等が起こる危険性が少ないと言われている。また、根の分岐が非常に多いことから、植栽後の活着にとって有利な根系形態であると考えられている。しかし、コンテナ苗の植栽後の根系形態は殆ど確認されていない。そこで本研究では、コンテナ苗の植栽後2年間の根系の発達と形態を観察した。【方法】宮崎市に位置する宮崎大学田野フィールドに、2011年2月にスギコンテナ苗と裸苗（いずれも挿し木苗）を各210本植栽した。裸苗は植栽時に根切りを行った。2011年7月、2012年2月、8月、11月に両苗を各10本ずつ掘り取った。【結果】伸長を停止していたコンテナ苗の太い側根は植栽後に成長を再開し、根系を拡大させていた。一方、植栽時に非常に多く発達していた細根は、植栽後も維持されていたものの殆ど伸長していなかった。植栽時のコンテナ苗の根系はコンテナ苗のキャビティの形状を保っており、裸苗とは著しく異なる形態であった。しかし、植栽から2年後には側根を水平方向および斜め方向に発達させており、裸苗に類似した形態となった。
2006	スギ挿し木コンテナ苗と裸苗の植栽後2年間の地上部成長と根系発達	平田令子, 大塚温子, 伊藤哲, 高木正博	2014	スギ挿し木コンテナ苗の植栽後2年間の地上部と地下部の成長を裸苗と比較した。植栽時のコンテナ苗の苗高と根量は裸苗よりも小さかった。2生育期間の伸長成長量は苗種間で差はなく、結果として、コンテナ苗の苗高は裸苗よりも低いままであった。また、植栽後の根量の増加もコンテナ苗の方が少なく、コンテナ苗の優位性は確認できなかった。T/R比（地上部/根乾重比）は両苗種とも植栽後に低下したことから、両苗種ともにプランティング・ショックによる水ストレスを受けたと考えられた。ただし、コンテナ苗のT/R比は裸苗より早く増加したことから、コンテナ苗の方が水ストレスからの回復が早いと推察された。本調査からは、コンテナ苗が水ストレスから早く回復する利点を持つと推察されたが、それは、裸苗の苗高を上回るほどの伸長成長量にはよつながらなかったことが示された。現時点では、下刈り回数省略に対して過度の期待を持ってコンテナ苗を導入することは危険であると考えられた。

既存文献の概要（挿し木の関係（3））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
2007	スギおよびヒノキにおける実生とさし木の初期成長形質の比較	松永孝治, 倉本哲嗣, 下村治雄, 江藤幸二	2008	スギ(<i>Cryptomeria japonica</i>)とヒノキ(<i>Chamaecyparis obtusa</i>)は日本の主要な造林樹種であり、現在も山出しされている苗の多くはスギやヒノキである(林野庁, 2007)。九州地域のスギは福岡・佐賀・大分の一部と長崎県において実生造林地がみられるが、その他の地域では挿し木で増殖するのが一般的である(宮島, 1989)。また、ヒノキは一般に実生で増殖されるが、九州地域では挿し木品種であるナンゴウヒ(南郷桧)の植栽も行われている。これまでの研究から、一般的に実生は挿し木に比べて成長形質や材質にばらつきが生じること、曲がりやすいこと、初期成長で優れること等が指摘されている(有井, 1986; 藤澤, 1998; 宮島, 1989; 大山ほか, 1985; 津島ほか, 2006)。しかしながら、これまでの研究の多くは系統の明らかでない実生と在来品種の間で行われてきた。そこで本研究では、挿し木苗と実生苗の初期成長形質等を系統に関連付けて評価するため、スギとヒノキについて同じ精英樹系統の挿し木とそのF ₁ (自然交配家系)の実生を同一条件に植栽した試験地で調査を行い、その結果を取りまとめたので報告する。
2008	多雪地帯に植栽されたスギ挿し木苗と実生苗の幼齢期における成育特性の比較	宮下智弘	2007	スギ挿し木苗と実生苗の多雪地帯における造林初期の成育特性を比較した。互いに近距離に設定され、環境条件も類似している挿し木検定林と実生検定林の組合せを選択した。挿し木検定林には挿し木苗が、実生検定林には実生苗が植栽されている。選択された挿し木検定林と実生検定林の各組合せにおける同一系統の挿し木クローンと実生後代のデータをデータセットと定義し、三つのデータセットを用いて解析した。挿し木苗と実生苗の5年次生存率は同程度であったが、挿し木苗の10年次生存率は実生苗より明らかに低かった。枯死の原因の多くは、幹折れまたは根元折れであった。実生苗と比べ、挿し木苗の根元曲がりや樹高は小さかった。以上の結果から、挿し木苗は根元曲がりやが少ないものの、成長にともなう多発する幹折れのために、生存率は低下することがわかった。挿し木苗の劣った樹高成長は、埋雪期間を長期化する。したがって、多雪地帯における挿し木造林は、雪圧による折損被害のため、生存個体数が少なくなる危険性が高いことが示された。
2009	スギにおける光質とさし木発根性との関係	吉村知也, 栗田学, 田村美帆, 酒本大, 大田宗太郎, 渡辺敦史	2018	スギは我が国における主要な林業樹種でありながら、非モデル植物でありその遺伝的・生理的理解が遅れているのが現状である。挿し木における遺伝的・生理的理解もその1つであり、植物工場等による効率的な苗木生産体制の体系化を一層進めるためにも、さし木に関する遺伝的背景の理解が必要である。本研究では、挿し木に影響を及ぼす環境要因の中でも、光に着目した遺伝子発現解析を行った。赤色光、青色光、またそれらの混合色光の各光質(色)をスギの挿し穂に照射した結果、各光質におけるスギ挿し木の発根率には差異が認められた。そこでスギに対する光質の影響に関する遺伝的背景を明らかにするため、スギ実生を24時間暗黒条件下に静置した後、白色光、赤色光、青色光を40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の各条件下で処理し、この時の遺伝子発現を次世代シーケンサーを用いて網羅的に解析した。さらに、これら人工光と自然光間における比較から、室内環境を想定したスギ挿し木における光環境について考察した。

既存文献の概要（挿し木の関係（4））

番号	論文名	著者名	発行年	概要（抄録）
2010	アカマツ・アイグロマツ挿し木の発根指数と吸水量および植栽後の針葉発生数・生存・枯死の関係	米道学, 軽込勉, 久本洋子, 後藤晋	2018	難発根性の樹木では、挿し木苗の根系状態の良否を見た目で数値化した発根指数が苗木生産現場でしばしば使われる。発根指数な簡便な指標だが、挿し木苗の形質に関するデータは少なく、特に、発根指数が高い苗を植栽するとよく活着することを検証した例も乏しい。そこで本研究では、難発根性のアカマツとアイグロマツを対象に挿し木を行い、挿し木苗の発根指数を調べ、挿し木苗の根の容量と吸水量を測定した。また、これらの挿し木苗を苗畑に植栽し、植栽から約6か月後に出現した針葉発生数、生存・枯死を調査した。本研究の結果、発根指数の高い苗木は、植栽後の針葉発生数が多く、生存率も高いことが示され、発根指数は、挿し木苗の評価として、有用な指標となりうることが示唆された。
2011	スギ及びヒノキの系統別の挿し木苗と実生苗による成長比較試験	九州森林管理局 森林技術・支援センター	2014	スギ：肥大成長及び上長成長は、挿し木苗より実生苗が良好な系統が多かったが、実生苗より挿し木苗が個体差が小さい傾向が見られた。形質は、実生苗より挿し木苗が根曲の値が高い傾向が見られた。幹曲の値は挿し木苗と実生苗の違いによる明確な傾向は見られなかった。 ヒノキ：スギと比較するとヒノキの方が挿し木苗と実生苗の違いがより明確に現れており、特に肥大成長については、挿し木苗より実生苗が全ての系統において良好であり顕著な差が確認できた。また、上長成長についての、挿し木苗より実生苗がほぼ全ての系統において成長良好であった。形質は、根曲、幹曲共に挿し木苗と実生苗の違いによる明確な傾向は見られなかった。

既存文献の概要（指針等）

番号	発行機関	指針等	発行年	内容	
				根系と崩壊の関係等	森林整備の方法
9	岡山県 農林水産部林政課	21世紀のおかやまの新しい 森育成指針 -災害に強い 森林づくり-	2005	根系は土壌緊縛作用、杭作用、網 作用により土壌の崩壊に対する抵 抗力を増加させる。	長伐期施業、複層林施業、針広混交林・広葉樹林へ の誘導、深根性樹種・浅根性樹種の選択 間伐率35%以上、壮齡林の間伐
25	奈良県 農林部	災害に強い森林づくり奈良 県ガイドライン	2016	根系の引き抜き抵抗による崩壊防 止機能、流下している土砂を立木が 抑止する土砂捕捉機能	間伐
105	林野庁 森林整備部整備課	土砂流出防止機能の高い森 林づくり指針 【解説版あり】	2015	根系の引き抜き抵抗による崩壊防 止機能、流下している土砂を立木が 抑止する土砂捕捉機能	崩壊防止林：根系の発達を促進する立木間隔の保 持、補植又は天然更新補助作業、弱度な間伐の段 階的实施 土砂流下緩衝林・土砂捕捉林：適切な間伐、補植又 は天然更新補助作業、強度間伐や更新伐
108	山口県	平成21年7月21日豪雨山地 災害対策検討委員会報告書	2009	表面侵食防止機能、土砂崩壊防止 機能、災害緩衝機能	間伐の推進、複層林化・針広混交林化の推進、広葉 樹林の保全
112	三重県 農林水産部	「災害に強い森林づくり」の 評価のためのガイドライン	2016	樹木の抵抗機能向上、樹木の根系 支持機能向上	調整伐、土砂止めの設置等
114	長野県 林務部	災害に強い森林づくり指針 (本編) 【解説版あり】	2008	森林根系ネットワークの発達による 崩壊防止機能の向上	適地適木・適正管理、広葉樹に樹種転換するための 早期強度間伐、針広混交林又は広葉樹林へ誘導す るための間伐、治山施設による補完
149	宮崎県	森林の整備及び保全に関す る指針	2007	根系発達による土壌緊縛力の向上	下層・林床植生の繁茂による表土の流出防止：人工 林の適切な間伐及び筋工等の設置、天然林の適切 な保全管理 地形や土壌条件に応じた多様な樹木による土壌緊 縛力の増加：複層林・針広混交林への誘導、溪畔林 等広葉樹林への誘導
150	大分県 農林水産部	次世代の大分森林づくりピ ジョン H29改訂版	2018	樹木根系の発達による土壌緊縛力 の強化 土壌保持力や保水能力、生物多様 性に優れた公益的機能	複層林や針広混交林へ誘導、早めの間伐 針広混交林化を図りながら高木性の天然生林に誘 導
180	兵庫県	災害に強い森林づくり事業検 証報告書2015	2015	表面侵食防止機能、土石流緩衝機 能、豪雨に対する防災機能	針葉樹林と広葉樹林の混交林整備

卷末資料 3 現地実態調査データ

座 標 リ ス ト

現 場 名	NHK 富津市調査
-------	-----------

1/2

No.	測 点	X 座 標	Y 座 標	Z 座 標	備 考
1	No1	100.000	100.000	23.000	
2	N1	135.790	100.000	16.470	
3	N2	128.580	100.000	16.660	
4	N3	126.340	100.000	17.300	
5	N4	116.990	100.000	17.110	
6	N5	115.470	100.000	18.370	
7	N6	109.630	100.000	18.110	
8	N7	108.050	100.000	19.130	
9	N8	104.810	100.000	21.420	
10	N9	102.960	100.000	21.720	
11	N10	100.600	100.000	23.000	
12	No2	75.810	100.000	22.870	
13	No3	67.340	100.000	29.050	
14	No4	63.910	100.000	29.140	
15	No5	57.280	100.000	30.580	
16	No6	53.150	100.000	34.960	
17	No7	48.910	100.000	37.740	
18	No8	44.780	100.000	41.190	
19	No9	42.730	100.000	41.710	
20	境1	45.832	88.286	39.320	
21	境2	42.251	105.058	42.680	
22	8-3	44.980	97.608	40.820	
23	8-4	45.296	94.856	40.370	
24	8-2	44.647	102.627	41.080	
25	8-1	44.155	105.263	41.070	
26	7-3	49.341	97.477	37.500	
27	7-4	49.627	95.517	37.010	
28	7-2	49.033	102.617	37.510	
29	7-1	49.303	105.035	36.780	
30	6-3	53.236	97.401	34.730	
31	6-4	53.293	95.102	34.710	
32	6-2	53.121	102.610	34.960	
33	6-1	52.950	104.896	34.350	
34	①	52.839	99.460	34.924	
35	②	49.000	99.777	37.771	
36	③	46.530	99.765	39.745	
37	④	52.969	95.057	34.930	
38	⑤	50.345	95.278	36.642	
39	⑥	47.413	95.788	39.023	
40	S1	53.601	109.282	31.103	
41	S2	51.270	108.528	33.601	
42	S3	49.943	106.840	35.607	
43	S4	47.441	105.544	37.429	
44	S5	46.452	104.218	39.186	
45	S5'	46.775	103.891	38.292	
46	S6	45.970	103.406	39.879	
47	S6'	46.189	103.340	38.806	
48	S7	46.454	101.397	39.582	
49	S7'	46.534	101.312	38.710	
50	S8	45.816	100.006	40.302	

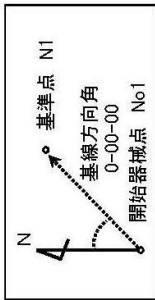
座 標 リ ス ト

現 場 名	NHK 富津市調査
-------	-----------

2/2

[illegible]

測量成果簿



基準点(後視)	N1
---------	----

開始器基点	No1	視線方向角	0.0000
器基点座標	X座標	Y座標	Z座標(標高)
	100.000	100.000	23.000

No	測点	後視点器基点前視点	水平角	水平距離	垂直距離	高低角 (天頂角)	斜距離	器基点 IH	器基点 FH	視準高
1	No1	No1								
2	N1	No1	N1	0.0000	35.79	-6.83		1.50	1.20	
3	N1	No1	N2	0.0000	28.58	-6.64		1.50	1.20	
4	N1	No1	N3	0.0000	26.34	-6.00		1.50	1.20	
5	N1	No1	N4	0.0000	16.99	-6.19		1.50	1.20	
6	N1	No1	N5	0.0000	15.47	-4.93		1.50	1.20	
7	N1	No1	N6	0.0000	9.63	-5.19		1.50	1.20	
8	N1	No1	N7	0.0000	8.05	-4.17		1.50	1.20	
9	N1	No1	N8	0.0000	4.81	-1.88		1.50	1.20	
10	N1	No1	N9	0.0000	2.96	-1.58		1.50	1.20	
11	N1	No1	N10	0.0000	0.60	-0.30		1.50	1.20	
12	N1	No1	No2	180.0000	24.19	-0.43		1.50	1.20	
13	N1	No1	No3	180.0000	32.66	5.75		1.50	1.20	
14	N1	No1	No4	180.0000	36.09	5.84		1.50	1.20	
15	N1	No1	No5	180.0000	42.72	7.28		1.50	1.20	
16	N1	No1	No6	180.0000	46.85	12.16		1.50	1.70	
17	N1	No1	No7	180.0000	51.09	15.24		1.50	2.00	
18	N1	No1	No8	180.0000	55.22	17.89		1.50	1.20	
19	N1	No1	No9	180.0000	57.27	18.41		1.50	1.20	
20	N1	No1	墳1	192.1210	55.42	16.02		1.50	1.20	
21	N1	No1	墳2	174.5940	57.97	18.90		1.50	0.72	
22	No1	No8	8-3	274.4620	2.40	-0.44		1.27	1.20	
23	No1	No8	8-4	275.4350	5.17	-0.89		1.27	1.20	
24	No1	No8	8-2	92.5430	2.63	-0.18		1.27	1.20	
25	No1	No8	8-1	96.4640	5.30	-0.19		1.27	1.20	
26	No8	No7	7-3	99.4210	2.56	-0.37		1.33	1.20	
27	No8	No7	7-4	99.0500	4.54	-0.86		1.33	1.20	
28	No8	No7	7-2	267.1850	2.62	-0.36		1.33	1.20	
29	No8	No7	7-1	265.3220	5.05	-1.09		1.33	1.20	
30	No1	No6	6-3	271.5420	2.60	-0.43		1.40	1.20	
31	No1	No6	6-4	271.4010	4.90	-0.45		1.40	1.20	
32	No1	No6	6-2	90.3800	2.61	-0.20		1.40	1.20	

現場名		NHK 富津市調査				
水平距離	垂直距離	方向角	座標 (X=N,Y=E;表示;少数3位計算:∞)			
			測点	X座標	Y座標	Z座標
			No1	100.000	100.000	23.000
35.79	-6.53	0.0000	N1	135.790	100.000	16.470
28.58	-6.34	0.0000	N2	128.580	100.000	16.660
26.34	-5.70	0.0000	N3	126.340	100.000	17.300
16.99	-5.89	0.0000	N4	116.990	100.000	17.110
15.47	-4.63	0.0000	N5	115.470	100.000	18.370
9.63	-4.89	0.0000	N6	109.630	100.000	18.110
8.05	-3.87	0.0000	N7	108.050	100.000	19.130
4.81	-1.58	0.0000	N8	104.810	100.000	21.420
2.96	-1.28	0.0000	N9	102.960	100.000	21.720
0.60	0.00	0.0000	N10	100.600	100.000	23.000
24.19	-0.13	180.0000	No2	75.810	100.000	22.870
32.66	6.05	180.0000	No3	67.340	100.000	29.050
36.09	6.14	180.0000	No4	63.910	100.000	29.140
42.72	7.58	180.0000	No5	57.280	100.000	30.580
46.85	11.96	180.0000	No6	53.150	100.000	34.960
51.09	14.74	180.0000	No7	48.910	100.000	37.740
55.22	18.19	180.0000	No8	44.780	100.000	41.190
57.27	18.71	180.0000	No9	42.730	100.000	41.710
55.42	16.32	192.1210	墳1	45.832	88.286	39.320
57.97	19.68	174.5940	墳2	42.251	105.058	42.680
2.40	-0.37	274.4620	8-3	44.980	97.608	40.820
5.17	-0.82	275.4350	8-4	45.296	94.856	40.370
2.63	-0.11	92.5430	8-2	44.647	102.627	41.080
5.30	-0.12	96.4640	8-1	44.155	105.263	41.070
2.56	-0.24	279.4210	7-3	49.341	97.477	37.500
4.54	-0.73	279.0500	7-4	49.627	95.517	37.010
2.62	-0.23	87.1850	7-2	49.033	102.617	37.510
5.05	-0.96	85.3220	7-1	49.303	105.035	36.780
2.60	-0.23	271.5420	6-3	53.236	97.401	34.730
4.90	-0.25	271.4010	6-4	53.293	95.102	34.710
2.61	0.00	90.3800	6-2	53.121	102.610	34.960

No	測點	後視點	器械點	前視點	水平角	水平距離	垂直距離	高低角 (天頂角)	斜距離	器械高 IH	杭高 FH	視準高
33	No1	No6	6-1	92.2010	4.90	-0.81				1.40	1.20	
34	No1	No4	①	182.4725	11.08	5.26				1.25	0.24	0.20 0.77
35	No1	No4	②	180.5120	14.91	7.96				1.25	0.24	0.20 0.62
36	No1	No4	③	180.4630	17.38	9.98				1.25	0.24	0.20 0.66
37	No1	No4	④	204.1850	12.01	5.12				1.25	0.24	0.20 0.62
38	No1	No4	⑤	199.1130	14.36	6.96				1.25	0.24	0.20 0.75
39	No1	No4	⑥	194.1920	17.03	9.42				1.25	0.24	0.35 0.68
40	No1	No5	S1	111.3720	9.99	0.48				1.25		1.21
41	No1	No5	S2	125.1020	10.43	2.98				1.25	1.21	
42	No1	No5	S3	137.0030	10.03	4.99				1.25	1.21	
43	No1	No5	S4	150.3600	11.29	6.81				1.25	1.21	
44	No1	No5	S5	158.4300	11.62	8.57				1.25	1.21	
45	No1	No5	S5'	159.4030	11.20	7.67				1.25	1.21	
46	No1	No5	S6	163.1430	11.81	9.26				1.25	1.21	
47	No1	No5	S6'	163.1430	11.58	8.19				1.25	1.21	
48	No1	No5	S7	172.3850	10.92	8.96				1.25	1.21	
49	No1	No5	S7'	173.0230	10.83	8.96				1.25	2.08	
50	No1	No5	S8	179.5810	11.46	9.68				1.25	1.21	
51	No1	No5	S8'	179.5950	11.30	9.51				1.25	2.08	
52	No1	No5	S9	191.4030	11.73	9.55				1.25	1.21	
53	No1	No5	S9'	191.4220	11.46	9.38				1.25	2.08	
54	No1	No5	S10	186.3000	11.96	9.85				1.25	1.21	
55	No1	No5	S10'	186.2500	11.77	9.22				1.25	1.21	
56	No1	No5	S11	199.1110	11.48	8.92				1.25	1.21	
57	No1	No5	S11'	198.0050	11.10	8.21				1.25	1.21	
58	No1	No5	S12	209.0220	11.67	8.55				1.25	1.21	
59	No1	No5	S12'	209.0440	11.22	8.17				1.25	2.08	
60	No1	No5	S13	213.3700	11.38	7.88				1.25	1.21	
61	No1	No5	S13'	213.4300	11.21	7.00				1.25	1.21	
62	No1	No5	S14	230.2430	9.85	5.56				1.25	1.21	
63	No1	No5	S14'	230.2430	9.62	4.68				1.25	1.21	
64	No1	No5	S15	245.2840	10.09	4.09				1.25	1.21	
65	No1	No5	S15'	244.5640	9.65	3.49				1.25	1.21	
66	No1	No5	S16	258.1850	8.77	0.69				1.25	1.21	
67	No1	No5	S17	284.5710	8.92	-1.06				1.25	1.21	
68	N1	No9'	No9'	180.0000	57.27	18.39				1.24	0.26	
69	N1	No8'	No8'	180.0000	55.22	16.83				1.24	0.26	0.04 0.11
70	N1	No7'	No7'	180.0000	51.09	12.70				1.24	0.26	0.04 0.26
71	N1	No6'	No6'	180.0000	46.85	9.66				1.24	0.26	0.04 0.29

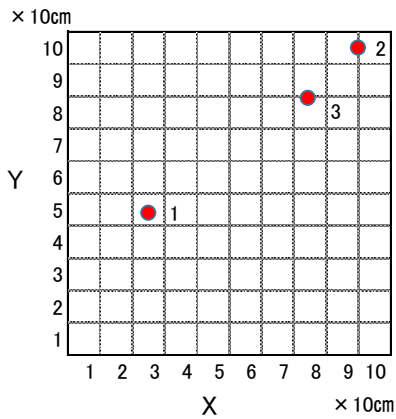
座標 (X=N,Y=E; 表示: 少數3位計算: ∞)	測點	X座標	Y座標	Z座標
6-1	6-1	52.950	104.896	34.350
①	①	52.839	99.460	34.924
②	②	49.000	99.777	37.771
③	③	46.530	99.765	39.745
④	④	52.969	95.057	34.930
⑤	⑤	50.345	95.278	36.642
⑥	⑥	47.413	95.788	39.023
S1	S1	53.601	109.282	31.103
S2	S2	51.270	108.528	33.601
S3	S3	49.943	106.840	35.607
S4	S4	47.441	105.544	37.429
S5	S5	46.452	104.218	39.186
S5'	S5'	46.775	103.891	38.292
S6	S6	45.970	103.406	39.879
S6'	S6'	46.189	103.340	38.806
S7	S7	46.454	101.397	39.582
S7'	S7'	46.534	101.312	38.710
S8	S8	45.816	100.006	40.302
S8'	S8'	45.981	100.001	39.258
S9	S9	45.789	97.626	40.170
S9'	S9'	46.060	97.675	39.134
S10	S10	45.398	98.646	40.467
S10'	S10'	45.584	98.685	39.839
S11	S11	46.440	96.228	39.544
S11'	S11'	46.727	96.568	38.830
S12	S12	47.077	94.335	39.174
S12'	S12'	47.475	94.548	37.920
S13	S13	47.800	93.697	38.500
S13'	S13'	47.956	93.778	37.624
S14	S14	51.002	92.409	36.177
S14'	S14'	51.150	92.588	35.304
S15	S15	53.091	90.817	34.706
S15'	S15'	53.192	91.256	34.105
S16	S16	55.504	91.413	31.312
S17	S17	59.582	91.379	29.558
No9'	No9'	42.730	100.000	42.886
No8'	No8'	44.784	100.000	41.183
No7'	No7'	48.906	100.000	36.904
No6'	No6'	53.150	100.000	33.832

[illegible]

根系データ

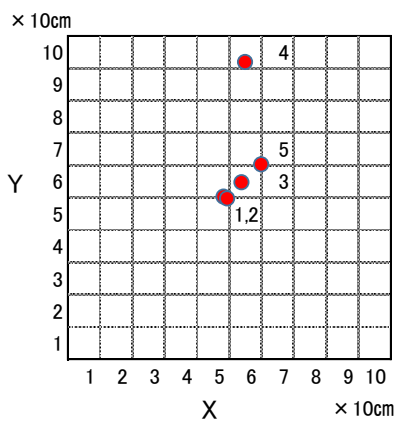
X : X座標 cm
Y : Y座標 cm
L : 根の長さ cm
A : 地際径 mm
B : 先端径 mm

AまたはBが2.0mm以上を計測



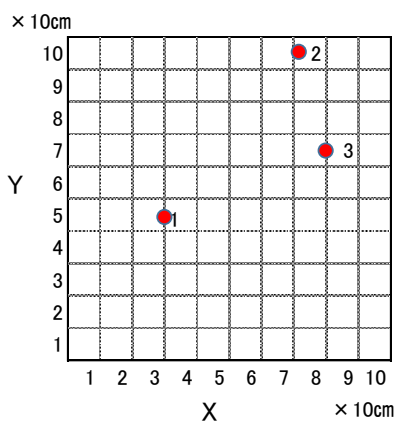
NO1-1

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	25	46	16	2.0	1.7	
2	90	95	105	2.5	1.4	
3	74	79	19	3.7	3.3	



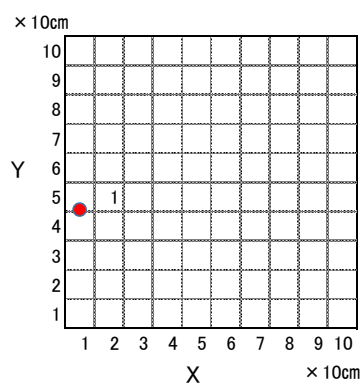
NO1-2

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	48	50	75	3.0	2.6	
2	50	48	122	2.5	2.5	
3	54	53	90	2.3	0.8	
4	56	92	20	2.4	1.8	
5	61	60	4	3.7	3.0	



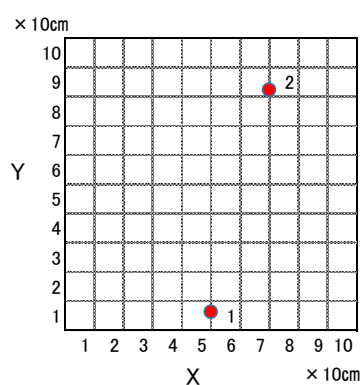
NO1-3

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	30	54	32	2.0	2.0	
2	73	96	9	1.6	2.0	
3	80	65	44	2.0	0.9	



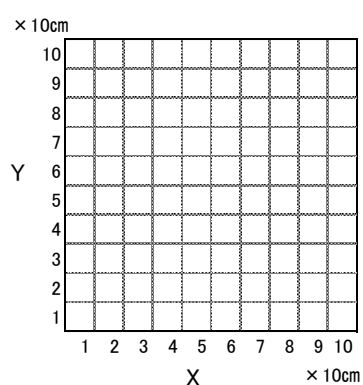
NO1-4

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	10	40	2	2.0	2.0	



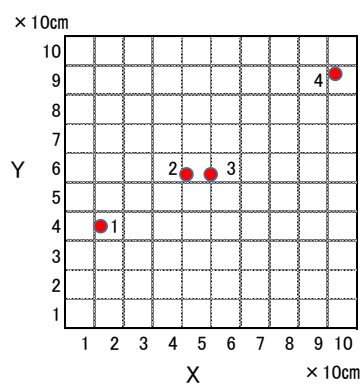
NO1-5

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	50	7	30	2.8	2.1	
2	70	82	10	2.3	1.3	



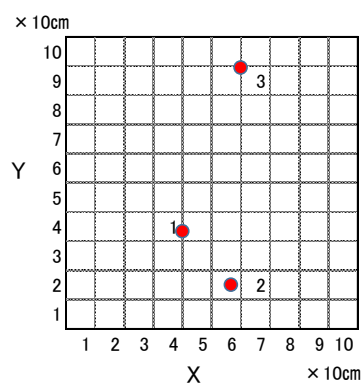
NO1-6

NO	X	Y	L	A	B	備考
該当無し						



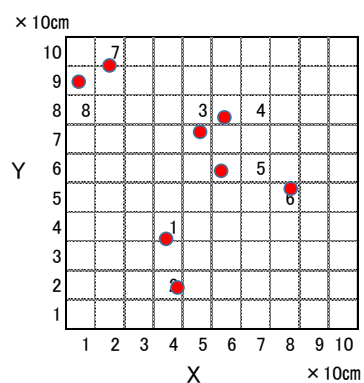
NO1-7

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	13	34	32	2.2	2.0	
2	42	52	6	2.0	2.0	
3	50	52	5	2.0	1.3	
4	93	87	92	7.2	9.7	



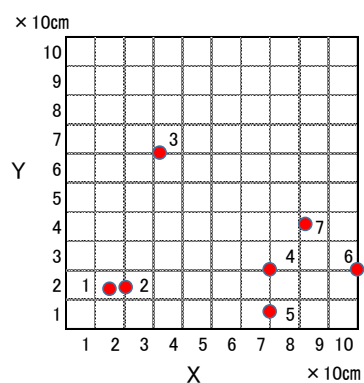
NO1-8

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	40	33	56	5.8	0.6	
2	57	16	30	3.3	3.5	
3	60	89	70	1.8	2.1	



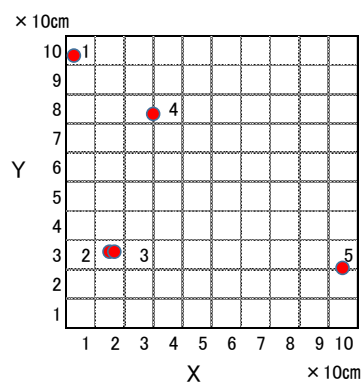
NO1-9

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	34	30	29	4.2	4.0	
2	38	14	10	5.3	4.3	
3	46	68	50	4.0	3.7	両端地中
4	54	72	50	2.8	2.9	両端地中
5	53	54	120	2.2	1.1	
6	77	48	50	3.5	3.5	
7	15	90	98	6.9	7.1	
8	4	85	37	2.6	2.8	
3'	45	40				
4'	35	50				



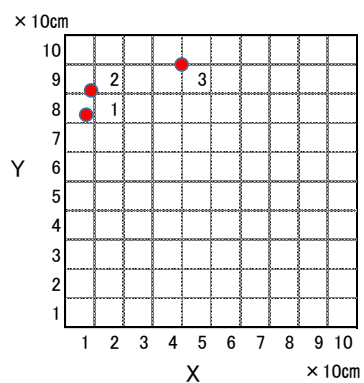
NO1-10

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	15	13	25	8.6	9.1	
2	21	14	30	4.2	4.2	
3	33	60	150	5.4	5.4	
4	70	20	50	10.2	9.9	
5	70	6	90	9.5	7.2	
6	100	20	186	8.5	7.0	
7	82	36	45	3.4	2.6	



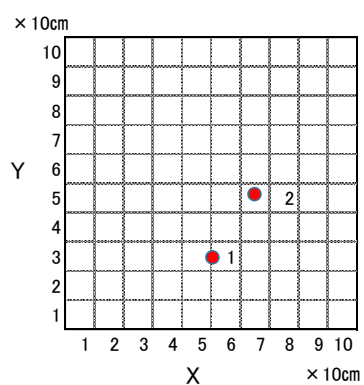
NO2-1

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	3	93	4	3.5	3.5	
2	15	26	20	2.4	2.5	
3	16	26	45	3.1	1.5	
4	30	72	23	3.9	3.2	
5	95	20	14	2.1	2.7	



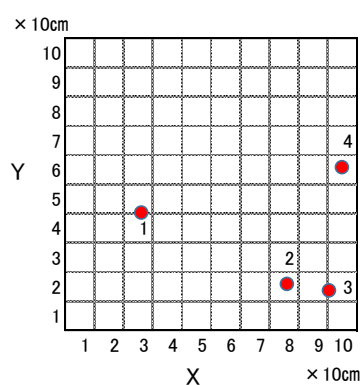
NO2-2

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	7	73	18	3.9	1.0	
2	9	81	170	8.2	5.7	
3	40	90	18	14.2	18.6	



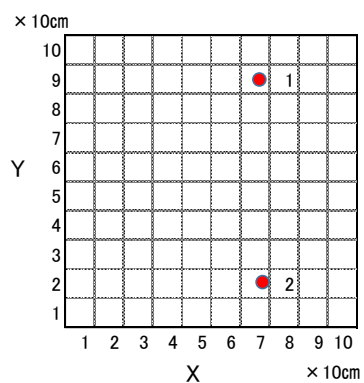
NO2-3

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	51	35	32	3.4	3.7	
2	65	47	146	3.8	0.5	



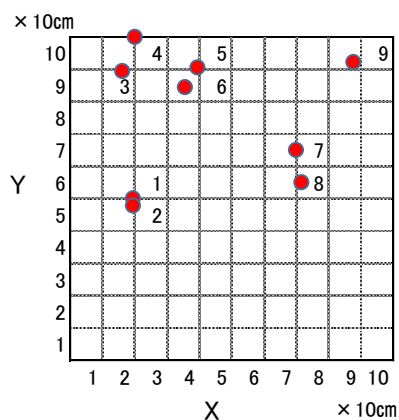
NO2-4

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	26	40	13	2.3	1.8	
2	76	16	5	2.1	1.6	
3	91	13	32	3.5	2.7	
4	95	56	75	5.0	3.7	



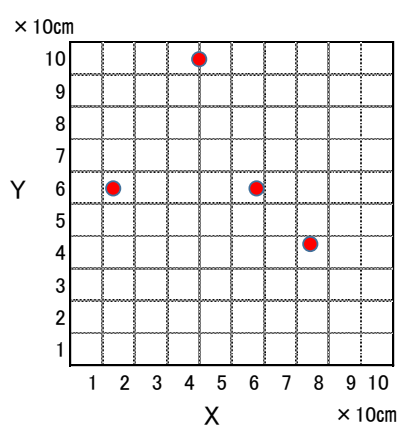
NO2-5

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	67	84	7	1.7	2.3	
2	68	16	43	2.0	1.3	



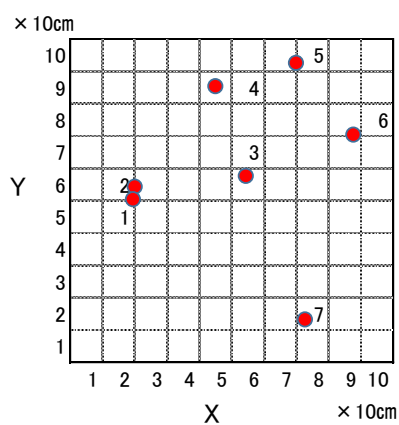
NO2-6

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	19	50	7	2.1	2.2	
2	19	48	7	2.0	1.6	
3	16	89	14	2.3	1.9	
4	20	100	9	2.2	2.1	
5	39	91	10	2.1	2.1	
6	35	85	5	2.3	2.0	
7	70	65	8	2.2	1.6	
8	72	55	26	2.4	1.3	
9	88	92	3	2.0	2.1	



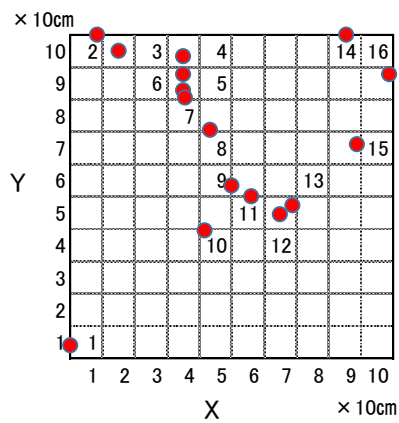
NO2-7

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	13	55	12	2.5	2.3	
2	40	95	19	2.0	2.2	
3	58	55	28	2.3	1.8	
4	74	38	30	2.6	2.8	



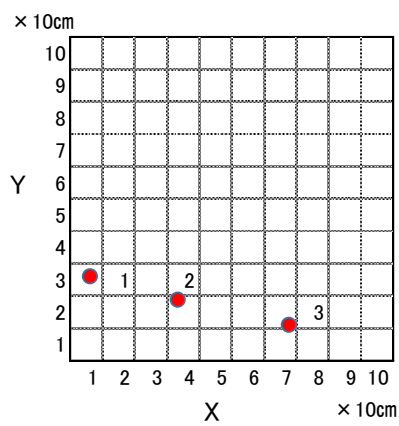
NO2-8

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	19	50	7	2.1	2.1	
2	20	64	5	2.3	2.3	
3	54	58	9	2.2	3.5	
4	45	85	13	3.7	4.0	
5	70	92	60	2.2	2.0	
6	88	70	14	3.0	3.0	
7	73	13	8	2.2	1.5	



NO2-9

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	0	3	23	2.8	3.5	
2	8	100	20	2.3	1.9	
3	14	96	7	2.2	2.2	
4	35	93	18	3.4	3.4	
5	35	88	12	2.3	2.2	
6	35	83	12	2.1	2.0	
7	36	80	45	2.8	2.5	
8	43	70	12	2.9	1.5	
9	50	53	23	3.2	3.7	
10	42	39	50	2.3	2.8	
11	56	50	22	2.6	2.2	
12	65	45	19	6.2	6.2	
13	69	48	25	3.2	2.5	
14	86	100	47	2.0	1.8	
15	89	67	5	3.5	3.7	
16	99	88	9	5.6	5.4	



NO2-10

NO	X	Y	L	A	B	備考
1	6	26	22	2.0	2.5	
2	33	19	23	2.0	2.5	
3	68	10	115	3.4	4.0	
3'	112	115				両端地中

