

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

報 告 書
(概要版)

令和2年3月

林野庁治山課

目 次

1. まとめ	3
2. 業務概要	7
2.1 業務目的	7
2.2 業務数量	8
2.3 業務フロー	9
2.4 業務使用データの出典	10
3. 表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系に関する知見のとりまとめ	11
3.1 文献の収集	11
3.2 千葉県富津市崩壊実験地での採取サンプルの分析	11
3.2.1 崩壊実験箇所の概要	11
3.2.2 簡易貫入試験	11
3.2.3 根系調査	12
3.2.4 根量の計測	13
3.3 収集事例・文献等の整理	14
3.3.1 平成30年度に収集された文献の整理	14
3.3.2 これまでの根系と崩壊に関わる研究	14
3.4 表層崩壊発生のメカニズムと樹木根系に関する知見	15
3.4.1 林野庁資料「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書(案)」について	15
3.4.2 これまでの研究で明らかとなった課題	17
3.4.3 崩壊と根系研究の整理	18
3.5 崩壊防止機能区分図(マップ)の活用	18
3.5.1 断面抵抗力 ΔC による崩壊防止機能評価	18
3.5.2 根重量 W_r による崩壊防止機能評価	20
3.5.3 根重量算定のためのT/R率	20
3.5.4 苧住による単木の根量(現存量)を求める式	20
3.5.5 マップの作成方法	21
3.5.6 レーザ計測データを活用した表層崩壊と森林状態の関係解析	21
3.5.7 ΔC マップと W_r マップの特徴	21
3.5.8 崩壊防止機能指標として W_r の論理的根拠付け	22
3.5.9 ΔC マップと W_r マップの使い分け	23
3.5.10 作成された ΔC マップと W_r マップの比較	23
3.6 森林総研の研究プロジェクト	24
4. 山腹崩壊発生地と森林状態等の関係に関する調査	25
4.1 過去の調査結果のポイント	25
4.1.1 中間とりまとめにおける災害発生時の特徴(ポイント)	25
4.2 平成30年7月豪雨による崩壊発生状況と各種素因との関係(資料編)	26
5. 森林施業と山腹崩壊の検討調査	26

5. 1 広島国有林における森林施業と山腹崩壊発生箇所の関係	26
5. 1. 1 森林施業と山腹崩壊箇所の関係.....	26
5. 2 広島国有林・愛媛民有林における散布図による森林解析	27
6. 詳細調査候補地の選定と現地確認.....	29
6. 1 詳細調査候補地	29
6. 2 現地確認の実施箇所	31
6. 3 現地調査結果.....	31
6. 4 バックパック型レーザスキャナ.....	34
7. 次年度根系調査計画案	35
7. 1 次年度根系調査方法	35
7. 2 根系調査方法.....	36
7. 3 調査小班（案）	37
8. 今後の課題.....	37
8. 1 森林の持つ表層崩壊防止機能を評価する上での課題.....	37
8. 2 今後の行程.....	38
9. 検討委員会の設置・運営	40

1. まとめ

本業務では、樹木根系による表層崩壊防止機能に関する知見の整理と調査を行い、早生樹の活用など最新の造林技術の導入等についても視野に入れた表層崩壊防止機能に着目した森林整備手法について検討を実施した。

令和元年度に実施した本業務の成果をまとめる。

2章 表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系に関する知見のとりまとめ

平成30年度業務で収集された「根系と表層崩壊に関する文献」を精査し、特にその中でも日本における研究の方向性を形作る次の3つの研究を詳しく、2章でレビューをおこなった。

- ①塚本良則（1984～1986）
- ②阿部和時（1997）
- ③北原曜（2006～2015）
- ④掛谷ら（2016）

塚本良則が水平根と鉛直根に分類して根系抵抗を評価する枠組みを提示し、阿部が鉛直根の分布を考慮した抵抗力の評価方法を詳細に取り上げ、北原は水平根が発揮する抵抗力を、立木間中央で ΔC として定義し、これを数多くの樹種、林分で調査した。林野庁が平成27年に作成した「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書（案）」は北原の ΔC の考えを取り入れたものとなっている。

一方、最近の研究で掛谷らは根系が発揮する表層崩壊防止機能は、土塊のせん断ひずみを抑制する効果ではないかと仮定し、地中に存在する根量 W_r で評価できるのではないかと提案している。

本業務において内容を精査し、「樹種」「胸高直径」「立木密度」を基に、 ΔC マップ（区分図）と W_r マップ（区分図）を、広島、愛媛の事例について作成した。これより ΔC と W_r の分布傾向は似るものの異なる部分もあり、今後両者の特徴を分析しつつ、長所・短所を探っていくものとする。

根量 W_r による崩壊防止機能評価は既往研究①～③とは異なる新しい考え方であり、 ΔC と重なる部分もある一方で、異なる部分もある。本業務における今後の現地調査では ΔC だけではなく、根量 W_r をあわせ評価し、その活用法を模索していくこととする。

3章 山腹崩壊発生地と森林状態等の関係に関する調査

平成30年7月豪雨による広島・愛媛の豪雨災害地を対象として、GIS上に10mグリッドで雨量、傾斜、尾根谷度、樹種、林齢について分布図およびプロット図を作成し、分析した。

雨量：アメダスデータで多くの観測点で24、48、72時間降水量の値が観測史上1位、雨量の増加に伴い崩壊箇所数が増加、特に72時間雨量と崩壊発生箇所数に関係性がみられた。

地質：崩壊地を地質別にみると、広島県では深成岩（花崗岩類）が最も多く、愛媛県では付加コンプレックスが69%を占めた。変成岩類では崩壊地はほとんどみあたらない。広島県の山腹崩壊は、花崗岩に加え流紋岩での崩壊が、愛媛県の山腹崩壊では、付加コンプレックスでの崩壊が多い。

斜面傾斜度：崩壊発生地点の最頻値は広島県では28～30°、愛媛県では32～34°。山腹崩壊は森林地域の中でも比較的急勾配な斜面で発生したわけではなく、最頻値よりもやや緩勾配の斜面で

発生している。

尾根谷度：山腹崩壊発生地点は尾根部が多く（例えば谷：尾根＝27：73）、広島県、愛媛県において大きな傾向の違いは見受けられない。平成30年の250mグリッドでの検討結果と異なるが、グリッドサイズを10mに変更した影響と考えられる。

樹種：広島県ではスギ、ヒノキのグループとマツ、広葉樹のグループで傾向が異なる。スギは75%の崩壊地が谷で発生、ヒノキの46%と比較し谷地形に偏った結果となった。愛媛県も同様にスギが谷地形で多く崩壊するがその割合は50%まで低下する。

林齢：平成30年度の調査から林齢データを変更し、森林簿の値を採用した。広島県での山腹崩壊の発生は10～13 齢級が全体の44%となった。愛媛県では10～13 齢級が全体の60%とやはり過半数を占める。愛媛県では面積割合の大きい齢級である壮齢林（10～13 齢級）で多く崩壊が発生し、広島県では5 齢級の若齢林の林分で山腹崩壊が生じやすい結果であった。

4章 森林施業と山腹崩壊の検討調査

広島国有林および愛媛民有林を対象に、根系情報（ ΔC と Wr ）、施業情報（皆伐、択伐等）と山腹崩壊の関係について検討した。

皆伐や択伐等の施業回数と崩壊発生状況を比較したが、施業回数が多いほど崩壊発生率が低下する等の傾向はなく、施業回数と崩壊の関係性はみられなかった。

根系情報（ ΔC と Wr ）については、広島県で280 小班、愛媛県で1700 小班を対象に算定し、崩壊との関係性を検証した。その結果、広島国有林のデータでは、同一林齢の中でも立木密度が高く、かつ根量が少ない小班で崩壊が多く発生していた。また、横軸：立木密度と縦軸： ΔC の関係を検証したところ上に凸型の分布が得られ、 ΔC がピークとなるのは立木密度が800～1000 本/ha 付近となった。これは、北原の研究成果と概ね同じ傾向である。

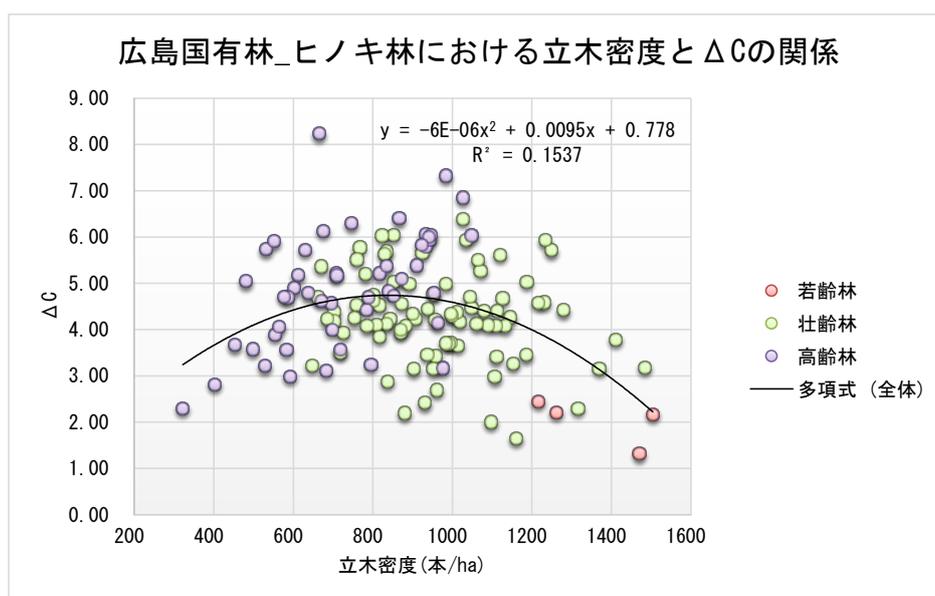


図 1.1 広島国有林・ヒノキ林の立木密度と ΔC の関係

また、森林根系が発揮する抵抗力 ΔC を、無限長斜面の安定解析式に与え斜面安全率を求めた。その結果、森林の林齢が 50 年増加したとき、斜面安全率の増分として広島（ヒノキ）で 0.145 の上昇、愛媛（ヒノキ）で 0.050 の上昇が見込まれる結果が得られた。

5章 詳細調査候補地の選定と現地確認

次年度（R2 年度）に実施する詳細調査（土壌調査、根系調査）を実施する箇所は、広島県、愛媛県ともに平成 30 年災害前の 2012 年に取得された LP データと災害後 2018 年の LP データの両者が重なる範囲とした。また、九州北部豪雨災害では崩壊深度が 3m を越え根系の深さよりも深い崩壊が多かったことから、深い崩壊は除外できるように平成 30 年豪雨災害による崩壊地データ、広島 407 箇所、愛媛 73 箇所の分析を行い、表層崩壊に絞り込めるよう選定基準を設定した。

絞り込みにより詳細調査候補地は、広島 27 箇所、愛媛 9 箇所となった。

そのうち、災害後のアクセス状況や実際の現場状況を踏まえ、広島・愛媛から 10 箇所を選定し、現地確認を行った。現地確認では、崩壊地周辺およびその比較対象地となる未崩壊斜面において、樹高（レーザ距離計トゥルーパルスで測定）、胸高直径（輪尺）、立木密度（樹幹距離から逆算）、土層深（土層強度検査棒）を計測・整理した。また、あわせてバックパック型レーザにより、林内樹木群の点群情報を取得している。

6章 次年度根系調査計画案

次年度（R2 年度）は、現地にて詳細調査（土壌調査、根系調査）を予定する。土壌調査は根系調査の掘削に伴いあわせて実施する予定であることから、ここでは根系調査の具体を提示する。

2 章における文献調査の検討結果を踏まえ、次年度の根系調査では、立木間中央で定義される根系抵抗力 ΔC および根量 W_r 、両者の計測取得を目指す。 ΔC および W_r は、両者ともにそれぞれ森林が発揮する崩壊防止機能と密接に関わっており、両者の特徴を見出していくためである。また、これまでに収集された文献や委員指摘で、 ΔC で算定される崩壊抵抗力が 10 [kN/m²] を超過するケースがあり、絶対値が過大ではないかという点がある。 ΔC の推定は北原らの多数のデータ蓄積から導かれたものだが、今後の現地調査で検証するとともに、すべての根が同時に抵抗力を発揮するわけではない、というルートバンドルモデル（RBM）の概念を踏まえた検討を行うことが望まれる。

4 章の検討で、立木密度や根量 W_r と崩壊発生との関わりが強かったことから、立木密度と ΔC および W_r との関係を現地調査でデータ取得することを目標とする。さまざまな樹間距離（≒立木密度）の調査地を選定できるように、2 立木の樹間距離と立木密度の関係を理論的に整理し、同程度の林齢間での比較、同程度の胸高直径間での比較、同程度の間伐後経過年数間となる比較ペアができるよう候補箇所を厳選した。

5 章では広島 5 箇所、愛媛 5 箇所の計 10 箇所について現地確認を実施した。両者ともヒノキ林であり、国有林である広島が施業情報も充実していることから、広島国有林内のヒノキを対象とした調査計画とし、近傍の小班を新たに加えた 8 小班を対象に計画案を策定した。その上で、さまざまな樹間距離で複数の比較ペアができるよう、対象となる小班同士の組み合わせを複数シミュレーションし、次年度の根系調査の対象小班と調査方法を提示した。

8章 検討委員会の設置・運営

表 1.1 の学識経験者 4 名を委員とした検討委員会を表 1.2 に示す日程で実施した。

表 1.1 検討委員会の委員

	氏名	区分	所属
委員 (座長)	あべ かずとき 阿部 和時	学識 経験者	日本大学 生物資源科学部 特任教授
委 員	しゅういん やすひろ 執印 康裕	学識 経験者	宇都宮大学 農学部 教授
	だいまる ひろむ 大丸 裕武	学識 経験者	森林総合研究所 研究ディレクター
	やませ けいたろう 山瀬 敬太郎	学識 経験者	兵庫県森林林業 技術センター 主席研究員兼部長

表 1.2 検討委員会の実施日程

検討委員会	実施日	検討内容
第1回	R1.7.25	調査目的、計画の説明と調査実施に当たってのアドバイス ・広島及び、愛媛豪雨災害の解析に係る検討方針 ・表層崩壊防止機能に寄与する樹木根系の評価方法とその考え方
第2回	R1.11.15	表層崩壊発生メカニズムと樹木根系の検討結果 広島・愛媛災害重ね合わせ図の分析結果
第3回	R2.2.4	広島現地検討会 (R2.2.3 開催) 表層崩壊と森林所唄の関係に関する検討 詳細調査実施候補地 (10箇所程度) の是非
第4回	R2.3.2	現地詳細調査実施案 (調査箇所、調査項目、調査方法) 今後の課題

2. 業務概要

2.1 業務目的

これまで森林と表層崩壊の関係については、森林が崩壊箇所数や崩壊頻度、崩壊面積を減少させていることが統計的に証明されているものの、表層崩壊防止機能と森林整備との関係については研究事例が少なく、崩壊防止機能を高めるための森林整備手法の確立までには至っていない。

表層崩壊防止機能と森林整備の関係については、伐採された樹木の根の腐朽による根の引抜き抵抗力の低下や本数調整伐等の森林整備手法との関係については十分な知見は得られていない状況にある。

一方、水土保持機能が低下した過密な人工林等を対象に治山事業による森林整備を進めているが、近年、表層崩壊に伴う流木の発生が全国各地で発生しており、平成 29 年に九州北部で発生した豪雨災害では人工林の表層崩壊に伴う流木により大きな被害が発生している。

このような被害を軽減するため、特に 0 次谷や山地災害危険地区等、山腹崩壊の発生する恐れの高い箇所においては、事前防災の観点から、治山事業により表層崩壊防止機能を高める森林整備を積極的に行っていく必要がある。

このため、樹木根系による表層崩壊防止機能に関する知見の整理と調査を行い、早生樹の活用など最新の造林技術の導入等についても視野に入れた表層崩壊防止機能に着目した森林整備手法について検討を行う。

業務名：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

契約期間：令和元年 5 月 24 日より令和 2 年 3 月 10 日まで

発注者：林野庁森林整備部治山課

〒100-8952 東京都千代田区霞が関 1-2-1

TEL：03-6744-2309 FAX：03-3503-6499

監督職員：玉舘 力 課長補佐

受注者：国土防災技術株式会社

〒330-0074 さいたま市浦和区北浦和 2-12-11 (代表)

TEL：048-833-0422 FAX：048-833-0424 (代表)

管理技術者：大野 亮一 (国土防災技術株式会社)

照査技術者：田中 賢治 (国土防災技術株式会社)

担当技術者：木内 秀叙 佐藤 亜貴夫

田中 淳 高田 香

佐羽内 美千絵

2.2 業務数量

業務数量一覧を表 2.1 に示す。

表 2.1 業務数量一覧

項目		数量	仕様書の対応項目番号	報告書対応目次、頁
(1) 表層崩壊発生メカニズムと樹木根系に関する知見のとりまとめ	平成 31 年度調査において収集・整理した文献、崩壊実験の現地調査の成果を基に表層崩壊発生メカニズムと根系に関する知見の取りまとめ	1 式	3. (1)	2.1、2.2、2.3 p.2-1~p.2-36
(2) 山腹崩壊発生地と森林状態等との関係に関する調査	平成 30 年 7 月豪雨で表層崩壊が集中した広島県、愛媛県の地域において、平成 30 年業務取得のレーザ計測データを活用し、地形・森林情報等の基礎データを収集し、山腹崩壊との関係を重ね合わせ図として整理・解析	1 式	3. (2) ①	3.2、3.3 p.3-4~p.3-20
	上記で整理・解析したデータを基に、土壌調査、根系分布調査等の詳細調査を実施する箇所を 10 箇所程度抽出	10 箇所	3. (2) ②	5.1、5.2、5.3、 5.4 p.5-1~p.5-17
	上記で抽出した箇所について、崩壊地及び近接する森林の現地確認を行い、根系分布調査等を実施する調査箇所、調査項目、調査方法等を設定	1 式	3. (2) ③	5.5、5.6、 6.1、6.2、6.3、 6.4、6.5 p.5-18~p.5-31 p.6-1~p.6-12
(3) 検討委員会の開催	4 名の有識者からなる検討委員会を開催	4 回	3. (5)	8.1 p.8-1
(4) 報告書のとりまとめ	(1)~(3) について、報告書にとりまとめる	1 式	3. (6)	—

2.3 業務フロー

本業務における業務フローを図 2.1 に示す。

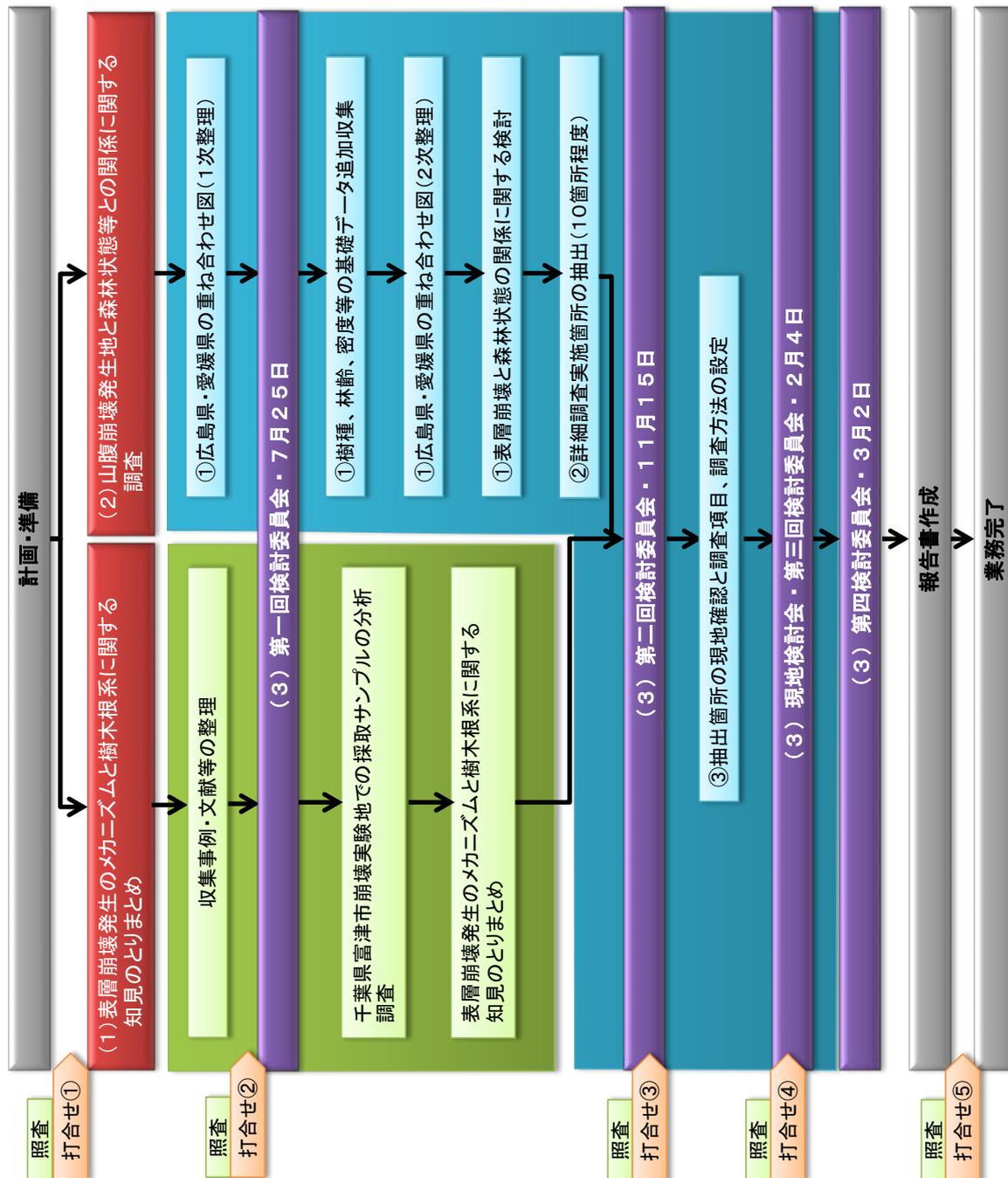


図 2.2 業務フロー

2.4 業務使用データの出典

本業務で使用したデータの出典を表 2.2 に記す。

表 2.2 業務使用データの出典

No	データ名	データ元	形式	備考
1	崩壊箇所等位置図	貸与データ	SHP ファイル	ポリゴンデータ
2	数値地形図データ (災害後)		CSV ファイル TIF ファイル	平成 30 年度森林域における航空 レーザ計測業務成果 ・数値標高モデル ・航空 LP データ ・オルソ画像
3	微地形表現図 (災害後)		TIF ファイル	
4	数値地形図データ (災害前)	貸与データ	CSV ファイル	国土地理院が管理する航空レーザ 測量データ 平成 24 年度航空レー ザ計測業務成果 ・数値標高モデル ・航空 LP データ ・オルソ画像
5	森林調査簿及び小 班区画	貸与データ	CSV ファイル SHP ファイル	ポリゴンデータ
6	造林簿		CSV ファイル	広島国有林分
7	造林沿革簿		CSV ファイル	広島国有林分
8	斜面崩壊分布図	日本地理学会	SHP ファイル	ポイントデータ
9	オルソ画像 (災害後)		TIF ファイル	
10	日本シームレス地 質図	産総研地質調査総 合センター	SHP ファイル	ポリゴンデータ
11	レーダ雨量	XRAINリアルタイム 雨量情報システム	グリッドデータ	10m メッシュ単位の雨量情報を ラスターデータに変換して使用
12	森林情報	国土数値情報	SHP ファイル	ポリゴンデータ

3. 表層崩壊の発生メカニズムと樹木根系に関する知見のとりまとめ

3.1 文献の収集

海岸防災林を津波被害軽減効果の高い目標林型へ誘導するため、本数調整伐や枝打ち及び下層木育成等の保育管理に関する調査研究事例や文献等を収集し、管理主体（国、都道府県等）別に整理した。

3.2 千葉県富津市崩壊実験地での採取サンプルの分析

3.2.1 崩壊実験箇所の概要

平成 30 年 12 月 11 日～12 日にかけて日本放送協会が千葉県富津市において大規模な山腹崩壊実験を実施した。崩壊面に破断した根系が残存している可能性があり、実験後の根系等データを収集・整理し、表層崩壊と根系の関係を検討する材料とする。

- 崩壊実験：平成 30 年 12 月 11 日～12 日
- 実験の実施者：日本放送協会
- 箇所：千葉県富津市小久保地内（図 3.1）
- 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 3.1 現地崩壊実験（千葉県富津市）位置図

3.2.2 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が実施したが、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。

3.2.3 根系調査

(1) 崩壊面における根系調査

崩壊後、崩壊面に多数の根系が残存していたため、時間が余り経過しない早い時期に根系調査を実施した。計測の結果、出現していた根の総数は87本、平均4.35本/m²、長さは平均37cm/本、直径は平均3.2mm/本であった。20個の調査ブロック内の根の分布状況は図3.2のとおりである。

(2) 滑落崖における根系調査

現地の根系重量を把握するため、根系を土壌ごと乱さない状態で採取した。(図3.3)採取箇所は滑落崖の立木位置と立木間中央の2箇所とし、サンプルの大きさ0.5×0.4×崩壊深(m)とした。なお、立木は長さ4.8m、根元径6.5cmのタブノキであった。採取したサンプルは木箱に収納し、安全な場所に保管している。

(図3.4)



図 3.3 滑落崖で採取したサンプル



図 3.4 木箱の保管

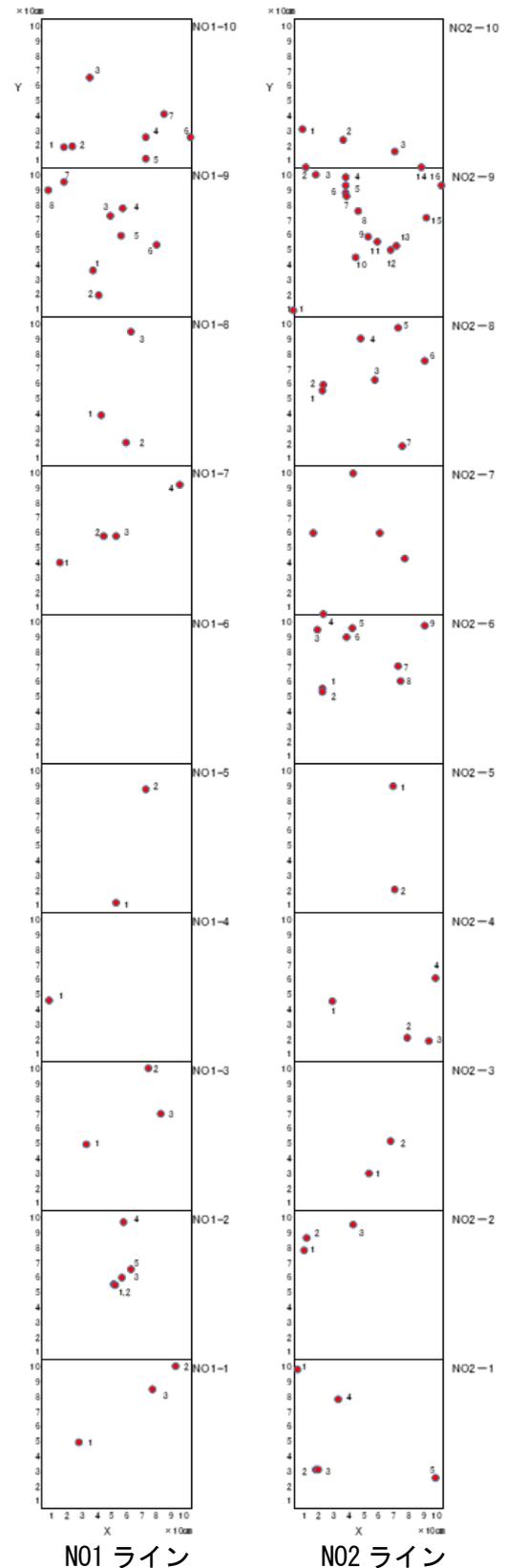
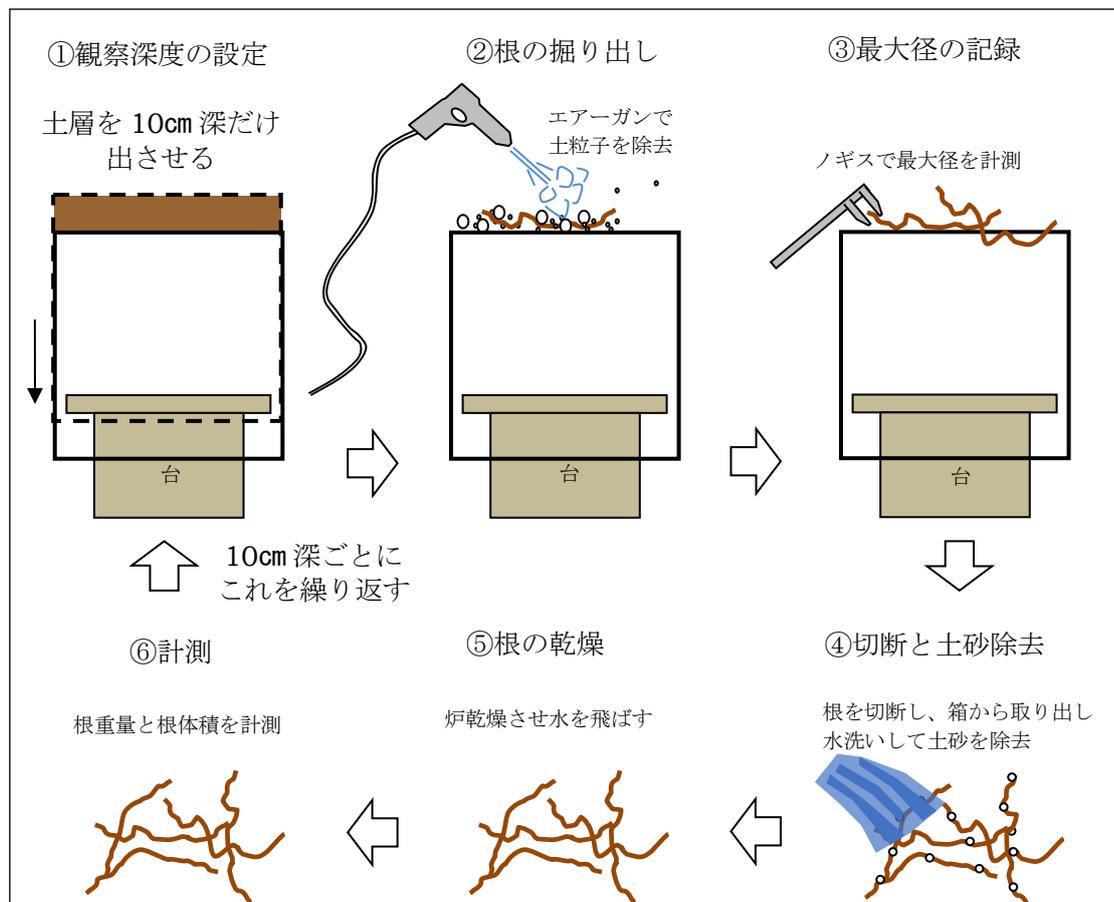


図 3.2 根の分布状況

3.2.4 根量の計測

(1) 根量の計測方法



(2) 室内試験による深度別根量の計測

立木位置と立木間中央で採取したサンプルについて、以下の手順で10cm深度ごとに根本数、根体積、根重量、根径最大値を計測し、その結果をエラー! 参照元が見つかりません。にまとめた。

<室内試験による深度別根量の計測手順>

- ①試料箱の立上げと固定→②電動ソーによる箱切断(10cmごと)→③エアージェンによる土の除去→④最大直径の測定→⑤10cm層から採取された根→⑥根体積の測定→⑦乾燥前の前処理→⑧炉乾燥→⑨根乾燥重量の測定

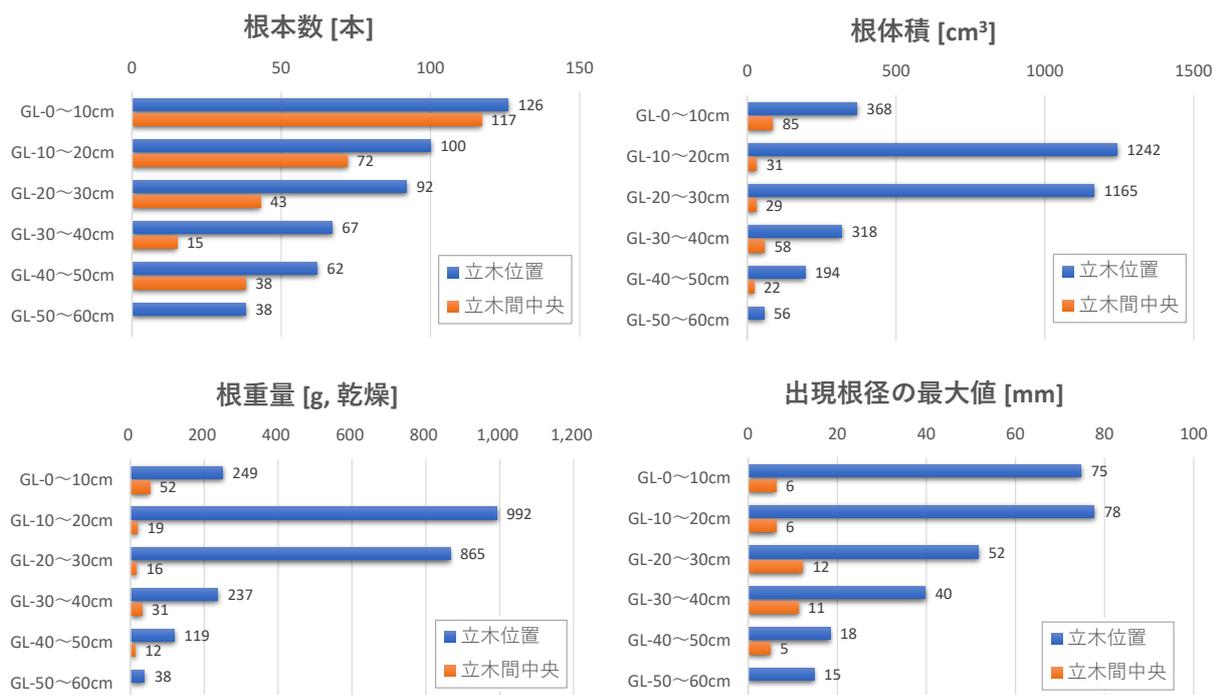
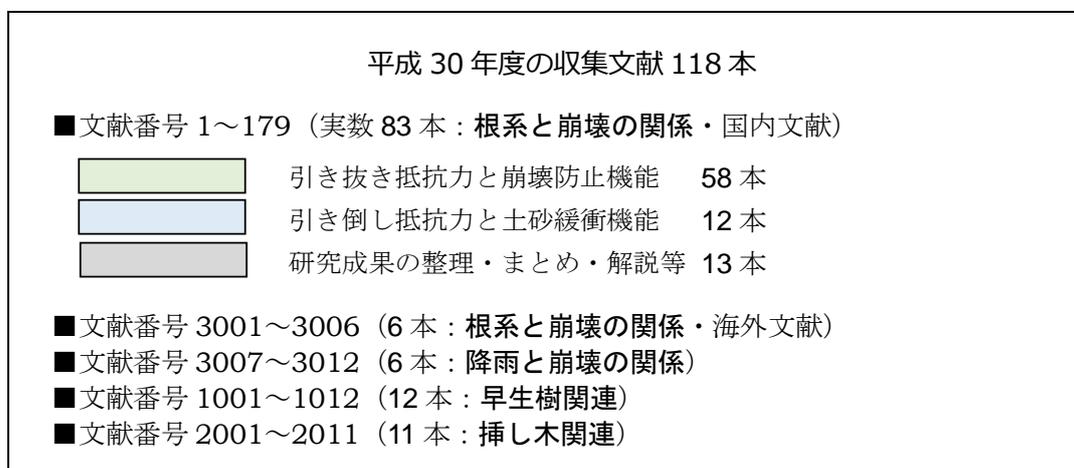


図 3.5 10cm 深度別の根量計測結果 (土壌 0.5m×0.4m×0.1m=0.02m³あたりの根)

3.3 収集事例・文献等の整理

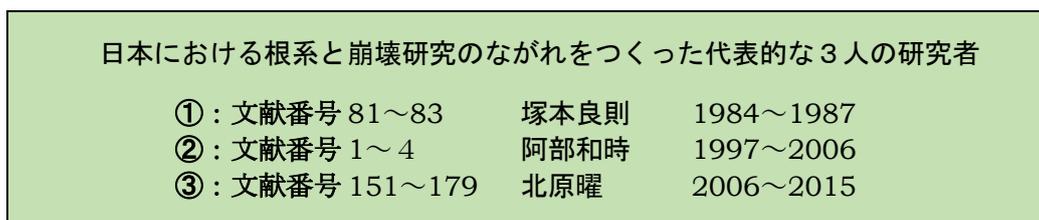
3.3.1 平成 30 年度に収集された文献の整理

平成 30 年度に収集された根系と崩壊に関する 118 本の文献の整理を行った。



3.3.2 これまでの根系と崩壊に関わる研究

研究の大きな流れを作ったキーとなる研究者として次の 3 人を挙げる。



①塚本良則（1984～1987）

塚本の根系研究による方向付け

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

②阿部和時（1997）

阿部の根系研究による方向付け

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

③北原曜（2006～2015）

北原の根系研究による方向付け

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

断面抵抗力 ΔC の簡易算定式

針葉樹（ヒノキ）：	$\Delta C = (0.0033 D^{2.77}) X^{2.8}$ ……………(3)	阿辻・北原ら 2013、文献番号 162
2.77→2.8 丸め	$\Delta C = 0.00330 (D/X)^{2.8}$ ……………(3)'	
広葉樹（全般）：	$\Delta C = 0.00198 (D/X)^{2.8}$ ……………(4)	阿辻・北原ら 2014、文献番号 158

3.4 表層崩壊発生のメカニズムと樹木根系に関する知見

3.4.1 林野庁資料「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書（案）」について

手引 2016 においては、土砂崩壊防止機能が高い森林を以下の条件で捉え、これら①～③があてはまらない森林を抽出する手順を構築している。

手引 2016 により設定される「森林の土砂崩壊防止機能区分」は a, b, c, d の 4 段階で、赤い a が低機能、緑の d が高機能となっている。（図 3.7）

【土砂崩壊防止機能が高い森林】

- ①根系の引き抜き抵抗力が大きい樹種からなる森林
- ②立木密度が1,000～1,200本/ha程度の森林
- ③胸高直径が大きい樹木からなる森林