

令和6年度
衛星画像等の活用による
森林変化と土砂流出の関連性に係る調査

調 査 報 告 書

令和7年3月

株式会社パスコ

内容

1. 業務概要	1
1.1. 業務名	1
1.2. 業務目的	1
1.3. 契約金額	1
1.4. 契約日	1
1.5. 業務期間	1
1.6. 業務対象範囲	2
1.7. 業務数量	2
1.8. 発注者	2
1.9. 受注者	2
1.10. 成果品	3
1.10.1. 納入物品	3
1.10.2. 納入場所	3
1.11. 借用資料	3
1.12. 準拠資料	3
2. 実施方針	4
2.1. 業務実施フロー	4
3. 対象範囲の選定	5
3.1. 調査対象範囲選定基準の設定	5
3.2. 調査対象範囲選定結果	5
4. 衛星画像等の入手	6
4.1. 衛星画像データの収集	6
4.1.1. 使用する光学衛星の選定	6
4.1.2. 画像選定方針	7
4.1.3. 画像入手結果	8
5. 森林変化箇所抽出/土砂流出箇所抽出	12
5.1. 森林変化ポリゴンの取得	12
5.2. 土砂流出ポリゴンの取得	12
5.3. 土砂流出・森林変化ポリゴン抽出結果	13
6. 各種情報の集計	14
6.1. 航空レーザ計測データを用いた地形解析	14
6.1.1. 傾斜	14
6.1.2. 縦断曲率	14
6.1.3. 横断曲率	15
6.2. 基盤地図情報数値標高モデルを用いた地形解析	15
6.2.1. 基盤地図 DEM の解析による地形情報の精度評価	15
6.2.2. 縦断曲率および横断曲率の代替情報の検討	16
6.3. 源頭部ポイントデータ作成	17
6.4. 森林情報の集計	17
6.4.1. 樹種	18
6.4.2. 平均樹高	18
6.4.3. 立木密度	18
6.4.4. 相対幹距比	18
6.4.5. 間伐履歴	18

6.5.	源頭部の森林情報の補完	18
6.6.	路網分布図の作成	19
6.7.	各種情報の集計結果	19
6.7.1.	球磨村(対象範囲全域)	19
6.7.2.	球磨村(針葉樹人工林)	22
6.7.3.	丸森町(対象範囲全域)	26
6.7.4.	丸森町(針葉樹人工林)	27
7.	土砂流出に係る因子の解析	31
7.1.	使用した解析手法	31
7.2.	統計解析対象メッシュ数の調整	31
7.3.	解析手順	32
7.4.	航空レーザ計測データより解析した地形情報を用いた解析結果	33
7.4.1.	航空レーザ計測データより解析した地形情報を用いた解析結果のまとめ	33
7.5.	航空レーザ計測データより解析した地形情報と森林資源情報を用いた解析結果	34
7.5.1.	針葉樹人工林内での解析	34
7.5.2.	航空レーザ計測成果より解析した地形情報と森林資源情報を用いた解析結果のまとめ	36
7.5.3.	路網の影響を考慮したサンプル選択	37
7.5.4.	路網の影響を考慮したサンプル選択による解析結果のまとめ	39
7.5.5.	地形の条件を固定したメッシュでの数量比較	40
7.6.	基盤地図 DEM より解析した地形情報と森林情報を用いた解析結果	43
7.6.1.	球磨村解析結果	43
7.6.2.	球磨村解析結果のまとめ	46
7.6.3.	丸森町解析結果	46
7.6.4.	丸森町解析結果のまとめ	49
7.6.5.	地域間比較	50
7.7.	岩国市への適用	50
7.7.1.	検証対象範囲	50
7.7.2.	検証に使用するモデル	50
7.7.3.	検証結果	52
8.	現地調査	53
8.1.	現地調査概要	53
8.2.	現地精通者との協議内容	55
8.2.1.	現地調査結果	56
8.3.	現地調査結果のまとめ	75
9.	考察・既往知見との比較	76
9.1.	間伐後の経過年数について	76
9.2.	立木密度について	76
9.3.	樹高について	77
10.	調査結果のまとめと今後の課題	77
10.1.	土砂流出が発生しやすい条件の整理	77
10.1.1.	地形条件	77
10.1.2.	森林整備に関する条件	77
10.2.	今後の課題	78
10.2.1.	調査地の選定	78
10.2.2.	森林整備に関する条件の影響調査	79
11.	工程表	80

1. 業務概要

1.1. 業務名

令和6年度 衛星画像等の活用による森林変化と土砂流出の関連性に係る調査

1.2. 業務目的

ア) 背景

近年、平成30年7月豪雨、令和2年7月豪雨などの豪雨災害が頻発する中、林業生産活動を通じた森林変化箇所での表層崩壊等による土砂流出の発生が報告されている。

これまで、林野庁の令和4年度調査業務¹ および令和5年度調査業務² では、「急傾斜地」、「急峻地」、「縦横断面形凹地」かつ「路網作設地」等の森林変化地において土砂流出が多いことが確認された。また、現地調査結果からも、路網が作設された森林変化地における土砂流出起点の大半は路網の路肩に該当する傾向が見られた。

さらに、これらの要因による土砂流出の発生有無等の関係性を明らかにするため、森林全域との比較分析を行った結果、「急峻地」、「凹地形（横断面）」、「路網の近傍」等の因子が重なる箇所において、その地域内で相対的に土砂流出が発生しやすくなることが明らかとなった。

一方で、過年度業務における解析項目は地形、地質情報および皆伐等の大面積の森林変化情報を対象としており、間伐等の森林整備に関する条件については解析できていない。

そこで本業務では、近年の豪雨災害が発生した地域において、森林整備と豪雨災害時における土砂崩壊・流出との関係性について分析し、衛星画像による土砂流出や森林整備の有無を調査するとともに、土砂流出が生じた地域の地勢や森林資源状況を航空レーザ計測等の森林資源解析結果を用いて調査・分析を行い、土砂流出の発生しやすさに影響する要因を調査した。

イ) 本業務の目的

森林整備における観点では、地形、地質、土壌及び施業（管理）方法がほぼ近似した立地条件において崩壊地と未被害地を比較した結果、崩壊が発生した箇所では未被害地と比較して、収量比数が過密傾向にあったことが報告されている（日緑工誌，2015）³。このことを踏まえ、崩壊発生前の森林の状況について、立地条件、樹種、立木密度、管理状況等による土砂流出への影響を検証する必要がある。

以上を念頭に、本事業では、過年度業務において抽出された課題を踏まえつつ、航空写真、航空レーザ計測成果、衛星画像を活用し、対象となる森林の現況と過去を把握できる情報を最大限に活用して時系列で森林変化を確認した。さらに、伐採跡地の状況把握だけでなく、森林整備に伴う森林変化と豪雨災害時における土砂崩壊・流出との関係性について分析を行い、今後の森林整備に関する施策に資することを目的として調査を実施した。

1.3. 契約金額

15,787,200円（税込み）

（うち取引に係る消費税及び地方消費税額1,435,200円）

1.4. 契約日

令和6年11月15日

1.5. 業務期間

令和6年11月15日～令和7年3月21日

¹ 令和4年度衛星画像等の活用による森林変化と土砂流出の関連性に係る調査

² 令和5年度衛星画像等の活用による森林変化と土砂流出の関連性に係る調査

³ 「土砂流出災害における崩壊地の微地形の特徴と森林の関係」日緑工誌（2015）

1.6. 業務対象範囲

調査対象面積は、過去の豪雨災害による被災規模、災害前後の航空レーザ計測成果および森林資源解析成果の有無、地形等の条件の多様性等を踏まえ選定することとした。

最終的な業務対象範囲については発注者と協議の上決定した。

1.7. 業務数量

表 1 業務数量

種 別	単 位	計 画 数 量	実 施 数 量	備 考
(1) 森林の状況や地形等と土砂流出発生の有無の関連性に係るデータ収集				
① 災害発生前の基礎データ収集	式	1	1	
② 森林の経年変化箇所抽出	式	1	1	
③ 近年の豪雨災害に伴う土砂流出・崩壊の解析	式	1	1	
④ 一定の区域での集約	式	1	1	
(2) 森林の状況や地形等と土砂流出の関係に係る分析				
① 地形データが同等と思われる区域での因子分析	式	1	1	
② 土砂流出発生区域と未発生区域での因子分析	式	1	1	
③ 現地調査	回	2	2	
④ 地域間の土砂流出発生頻度やその要因の比較	式	1	1	
(3) 既存の知見と分析結果との比較				
① 既存の知見・研究成果の収集・整理	式	1	1	
② 整理した既存の知見と分析結果との比較	式	1	1	
(4) 調査報告書の作成	式	1	1	調査報告書概要版の作成を含む
(5) 打合せ協議の実施	回	5	7	

1.8. 発注者

林野庁 森林整備部 計画課

1.9. 受注者

受注者 株式会社パスコ 事業統括本部
住所 東京都目黒区下目黒 1-7-1 パスコ目黒さくらビル 4F
TEL 03-5435-3564
FAX 03-5435-3565

1.10. 成果品

1.10.1. 納入物品

- ・ 調査報告書 5 部
- ・ 電磁記録媒体 (DVD-R) 2 部

1.10.2. 納入場所

林野庁森林整備部計画課企画班 (別館 7 階、ドア No. 別 714)

1.11. 借用資料

- ・ 令和 2 年度森林域における航空レーザ計測業務 (その 1) 成果物
- ・ 熊本県中部航空レーザ計測業務 成果物
- ・ 令和 3 年度流域山地災害等対策調査 成果物
- ・ 令和 3 年度球磨村森林資源解析業務委託 成果物
- ・ 令和 4 年度衛星画像等の活用による森林変化と土砂流出の関連性に係る調査 成果物
- ・ 令和 4 年度静岡県デジタル森林資源情報等解析業務委託 成果物
- ・ 令和 4 年度社防砂調 309-B01 号 土砂災害基礎調査航空レーザ測量業務委託 成果物
- ・ 令和 4 年度宮城県森林クラウドシステム森林計画図等適正化業務 成果物
- ・ 令和 4 年度静岡県デジタル森林資源情報等解析業務委託 成果物
- ・ 令和 5 年度山口県航空レーザ計測・森林資源解析業務 成果物
- ・ 令和 5 年度衛星画像等の活用による森林変化と土砂流出の関連性に係る調査 成果物

1.12. 準拠資料

- ・ 林野庁測定規程
- ・ 森林整備保全事業測量業務等標準仕様書
- ・ 山地災害危険地区調査要領 (平成 28 年 7 月) 林野庁
- ・ その他関係法令

2. 実施方針

本業務では、令和4年度及び令和5年度調査の分析手法等を踏襲し、10mメッシュ単位で集計した土地の条件の分布傾向を土砂流出の発生した箇所と発生しなかった箇所と比較することにより、土砂流出の発生しやすさに関わる要因を調査した。

2.1. 業務実施フロー

本業務は下記のフローに基づき、円滑かつ効率的に業務を遂行した。

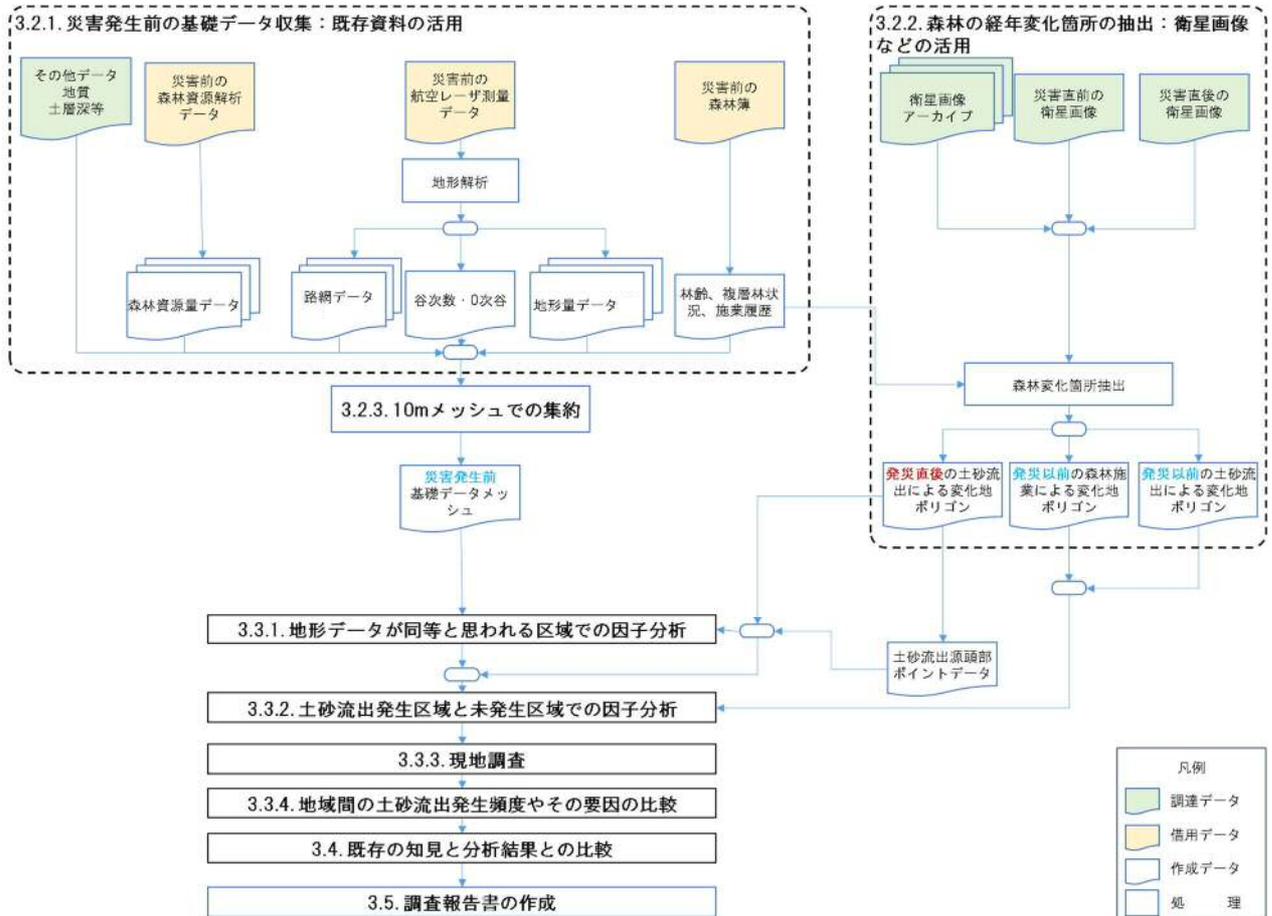


図1 本業務のフロー

3. 対象範囲の選定

3.1. 調査対象範囲選定基準の設定

災害発生時の土地の情報が収集可能であり、かつ条件の比較に十分な数量の土砂流出地サンプルを確保することを目的として、対象範囲の選定条件を以下の通り設定した。

- ・ 過去 10 年以内に豪雨災害が発生した記録がある
- ・ 豪雨災害の発生した時期に対象範囲の属する行政区域（市町村または都道府県）で多数の土砂災害発生記録がある
- ・ 災害発生日と近い時期に航空レーザ計測が実施されている
- ・ かつ森林施業の影響が分析可能な地域 1~2 箇所程度

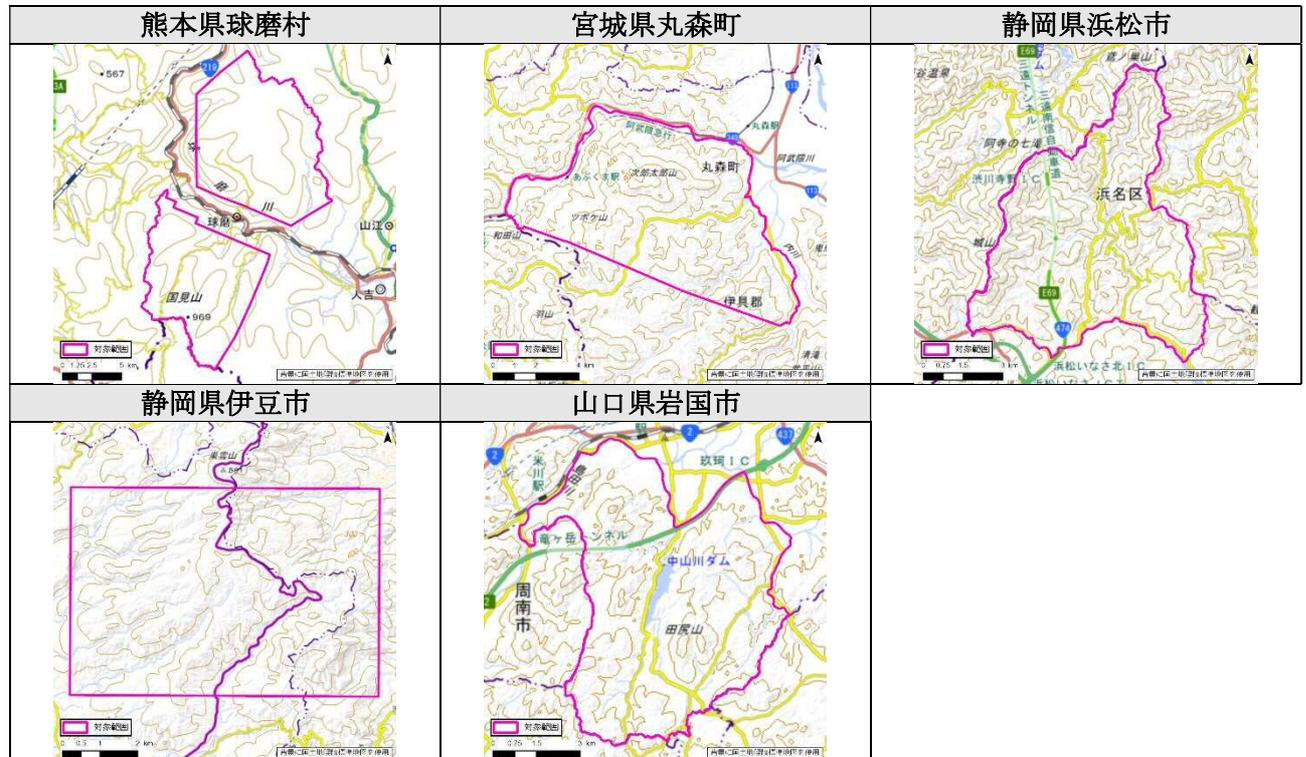
3.2. 調査対象範囲選定結果

3.1 で設定した基準に基づき、以下の地域を対象範囲として選定した。

表 2 対象範囲一覧

対象地	豪雨災害	災害前レーザ計測年	災害後レーザ計測年
熊本県球磨村	令和 2 年 7 月豪雨	2009 年、2012 年	2020 年
宮城県丸森町	令和元年東日本台風災害	-	2022 年
静岡県浜松市	令和 4 年台風第 15 号	2021 年	-
静岡県伊豆市		2019 年	-
山口県岩国市	令和 5 年梅雨前線による大雨	2022 年	-

表 3 対象範囲位置図



4. 衛星画像等の入手

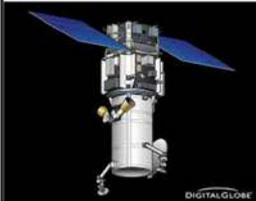
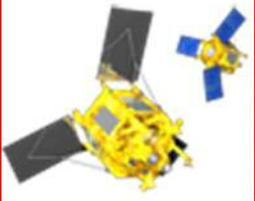
4.1. 衛星画像データの収集

本業務の解析対象範囲のうち、過年度業務で衛星画像データを入手済の熊本県球磨村以外の解析対象範囲である静岡県浜松市、伊豆市、山口県岩国市、宮城県丸森町において、経年的な森林変化を観測する目的で豪雨発生時点から 10 年程度を目安とし、過去の衛星画像等のデータを収集した。さらに、森林変化箇所と当該箇所において豪雨の影響と考えられる土砂流出の有無についてのデータを収集した。

4.1.1. 使用する光学衛星の選定

データ収集に用いる衛星画像は、本調査目的を踏まえ、空間的、時間的な分解能と十分な判読性を有している必要があり、一般的で入手が容易な衛星による空間情報を表 4 に示す。

表 4 森林監視に用いる主要な衛星

種類	光学衛星			SAR衛星
衛星名	WorldView-3 	Spot6&7 	Landsat-8,9 	ALOS-2 
運用者	Maxar	Airbus D&S	USGS/NASA	JAXA
撮影期間	2014/8~	2012/9~	2013/2~	2014/5~
衛星軌道	太陽同期準回帰軌道	太陽同期準回帰軌道	太陽同期準回帰軌道	太陽同期準回帰軌道
衛星高度	617km	694km	705km	628km
撮影幅	13.1km	60km	185km	50~70km
撮影頻度	約2日	毎日(2基体制)	約8日(2基体制)	約7日
地上分解能*	0.3m	1.5m	15m	3~10m(SMモード)

伐採等の森林変化に関する監視用途において活用される地球観測衛星として光学衛星と SAR 衛星がある。SAR 衛星は天候によらず撮影でき、森林から裸地への変化を捉えることが可能であるため、災害時の撮影に適している。しかし、本調査では後述する集材路等の変化を継続的に捉える必要があり、光学画像と比較すると不得手と言える。

光学衛星においては、ポインティングモード（衛星を任意の方向に傾けて観測する機能）を備えた WorldView-3 および SPOT6&7 が観測頻度の面で優位である。また、地上分解能に注目すると、本調査では比較的小規模な変化を捉える必要があるため、同じく、WorldView-3 および SPOT6&7 が候補である。ここで、本調査の条件として 10 年程度過去に遡ってデータを収集することから、アーカイブの特性も加味する必要がある。WorldView-3 は観測幅が比較的狭く、観測需要が高いことからアーカイブ画像は都市部に集中しており、森林域を継続監視するには十分ではない。一方で、SPOT6&7 は観測幅が広くかつ 2 基体制であるため、1 年程度の期間があれば気象条件を考慮しても日本全国をくまなく撮影できる程の能力を有している。過去に遡って森林域のアーカイブを収集しても 1 年に 1 回は良好なアーカイブがあり、今後、広く森林域に調査範囲を広げるにあたって十分なデータを収集することが出来ると考えられる。以上から本調査においては SPOT6&7 を採用してデータを収集した。

4.1.2. 画像選定方針

本調査では対象地域の災害から 10 年間程度を目安に遡って森林変化を把握した上で、発災直前直後の画像を用いて発災後に起こった変化を確実に把握する。これを踏まえ、表 5 に示す方針で画像を選定した。

表 5 画像選定方針

選定画像	摘要
経年変化アーカイブ	10 年程度に遡って複数時期採用する画像。 被雲が少なく、7~9 月の画像とした。
発災直前画像	令和 2 年 7 月豪雨災害発災直前の画像。 被雲が少なく、可能な限り発災日に近いものとした。
発災直後画像	令和 2 年 7 月豪雨災害発災直後の画像。 被雲が少なく、可能な限り発災日に近いものとした。

経年変化アーカイブは 2 時期分の画像を収集した。今回採用する SPOT6&7 衛星は 2012 年打上の衛星であるため、当年から各地域の発災前年にあたる 2020 年までのアーカイブを検索し、4~9 月を基準に年毎に最も状態の良い画像を調査した。調査結果を下記に示す。

4.1.3. 画像入手結果

1) 静岡県浜松市

経年変化アーカイブは、最も古い 2013/11/30 の画像と、発災年にあたる 2022 年との中間点である 2018 年の画像であり、雲量の少ない 2018/7/22 の画像を選定した。

発災直前および直後画像は、2022 年の発災前後で撮影された画像のうち、2022/4/6 および 2022/11/5 の画像を採用した。

アーカイブ画像の検索結果及び選定した衛星画像を表 6 と図 2 に示す。

表 6 採用した衛星画像（浜松市）

No.	観測年	観測日	入射角	雲量
1	2013	2013/11/30	2.3°	5.6%
2	2018	2018/07/22	25.5°	6.9%
3	2022	2022/04/06	17.4°	5.1%
4	2022	2022/11/05	19.5°	5.1%

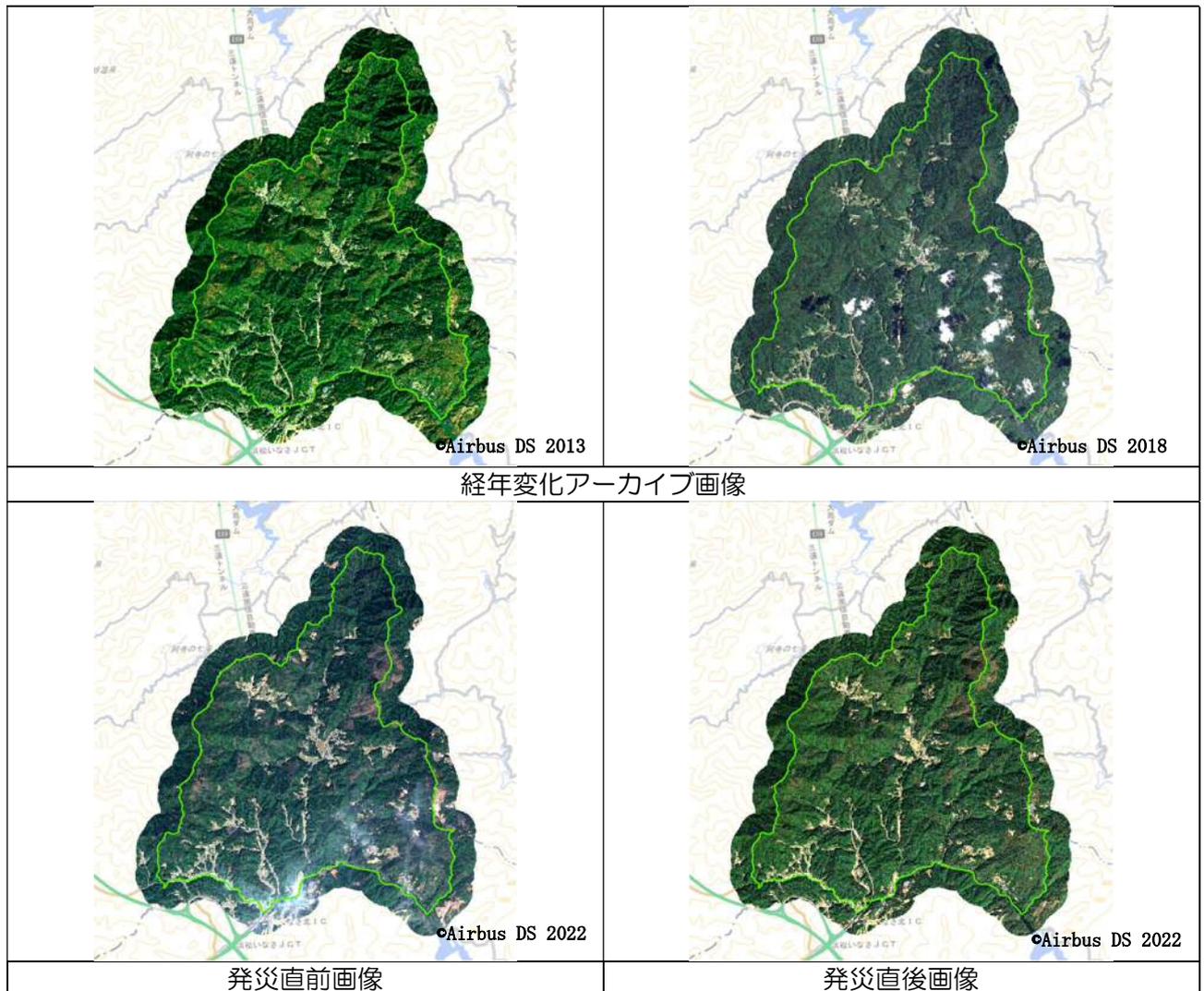


図 2 調達画像一覧（浜松市）

2) 静岡県伊豆市

経年変化アーカイブは、最も古い2013/8/11の画像と、発災年にあたる2022年との中間点である2018年の画像であり、雲量の少ない2018/10/30の画像を選定した。

発災直前および直後画像は、2022年の発災前後で撮影された画像のうち、2022/4/8および2022/10/31の画像を採用した。

アーカイブ画像の検索結果および調達した衛星画像を表7と図3に示す。

表7 採用した衛星画像（伊豆市）

No.	観測年	観測日	入射角	雲量
1	2013	2013/08/11	22.5°	6.6%
2	2018	2018/10/30	8.6°	1.2%
3	2022	2022/04/08	28.0°	0.9%
4	2022	2022/10/31	25.4°	0.1%

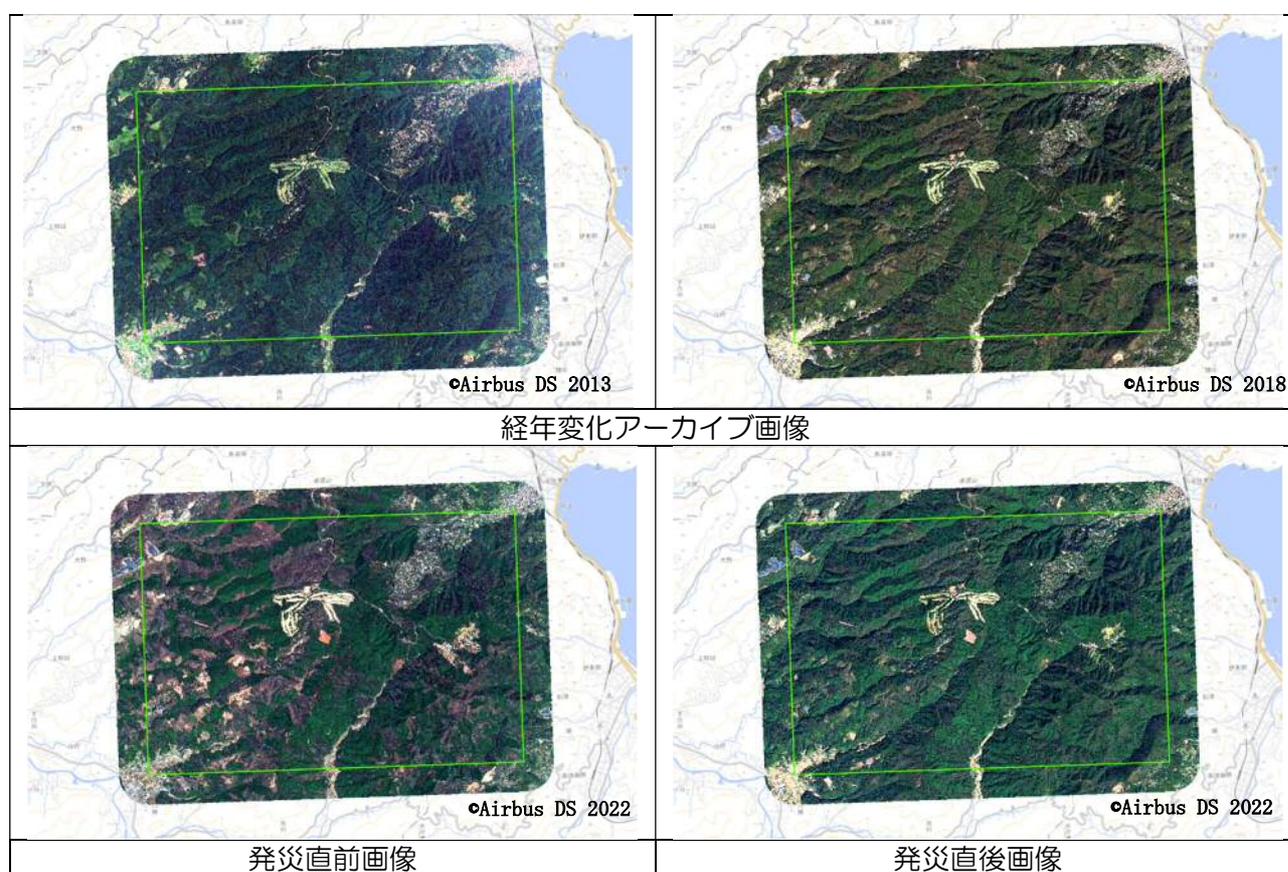


図3 調達画像一覧（伊豆市）

3) 山口県岩国市

経年変化アーカイブは、最も古い2013/9/16の画像と、発災年にあたる2023年との中間点である2018年の画像であり、2018年の画像は対象範囲内に雲が多い箇所があったため被雲が少ない画像と組み合わせて採用した。

発災直前および直後画像は、2023年の発災前後で撮影された画像のうち、2023/4/22および2023/9/4の画像を採用した。

アーカイブ画像の検索結果および調達した衛星画像を表8と図4に示す。

表8 採用した衛星画像（岩国市）

No.	観測年	観測日	入射角	雲量
1	2013	2013/09/16	14.9°	7.5%
2	2018	2018/05/05	20.9°	0%
3	2018	2018/07/20	3.6°	7.1%
4	2023	2023/04/22	10.8°	0%
5	2023	2023/09/04	14.7°	2.7%

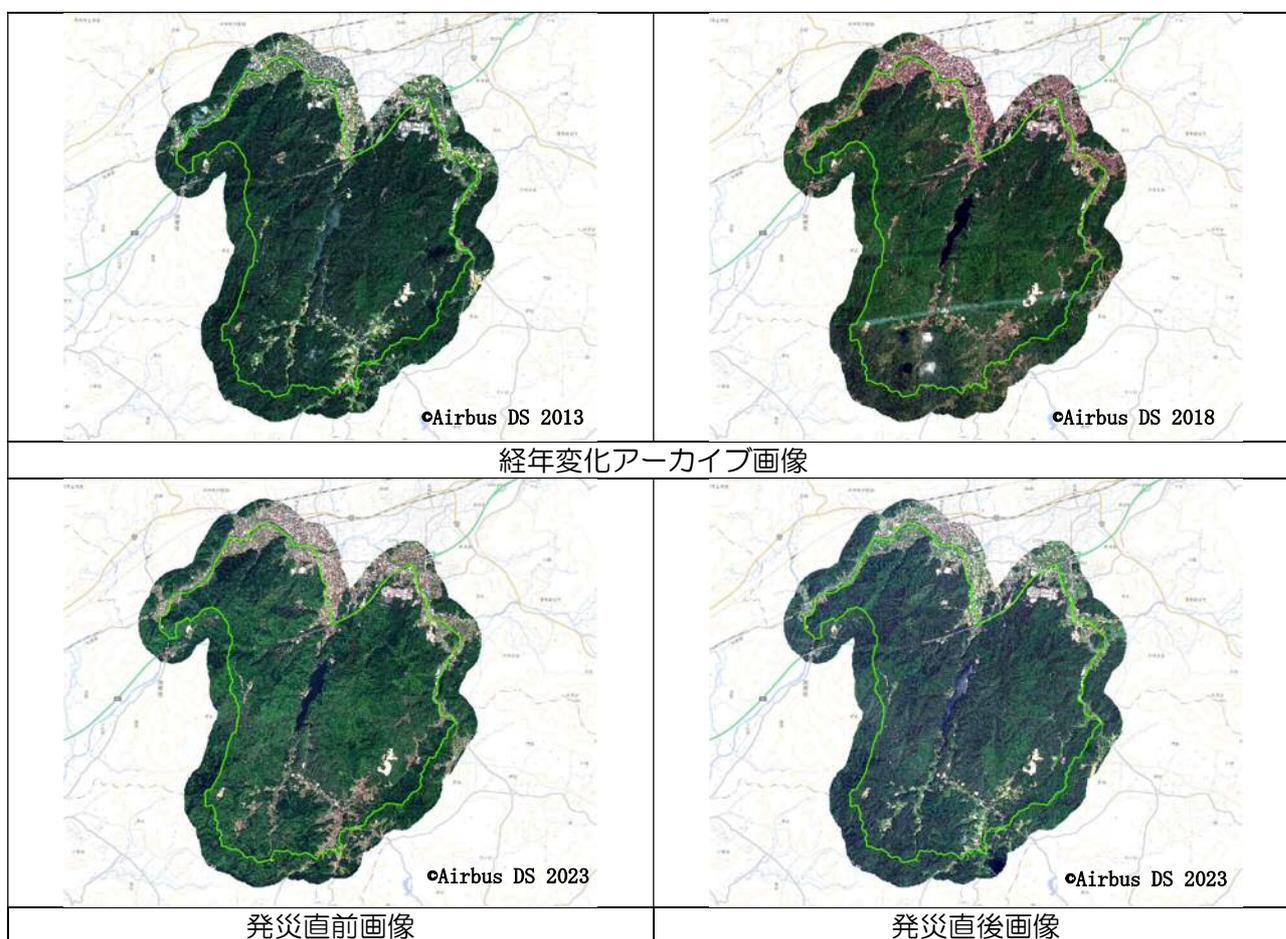


図4 調達画像一覧（岩国市）

4) 宮城県丸森町

経年変化アーカイブは、最も古い 2013/6/3 の画像と、発災年にあたる 2019 年との中間点である 2017 年の画像を採用した。

発災直前画像は適した条件の衛星画像アーカイブが無いため採用せず、直後画像は発災後に撮影された画像のうち、2019/10/23 および 2019/10/28 の画像を採用した。

アーカイブ画像の検索結果および調達した衛星画像を表 9 と 図 5 に示す。

表 9 採用した衛星画像（丸森町）

No.	観測年	観測日	入射角	雲量
1	2013	2013/06/03	22.7°	4.7%
2	2017	2017/10/01	31.1°	3.3%
3	2019	2019/10/23	21.1°	16%
4	2019	2019/10/28	34.1°	1.5%

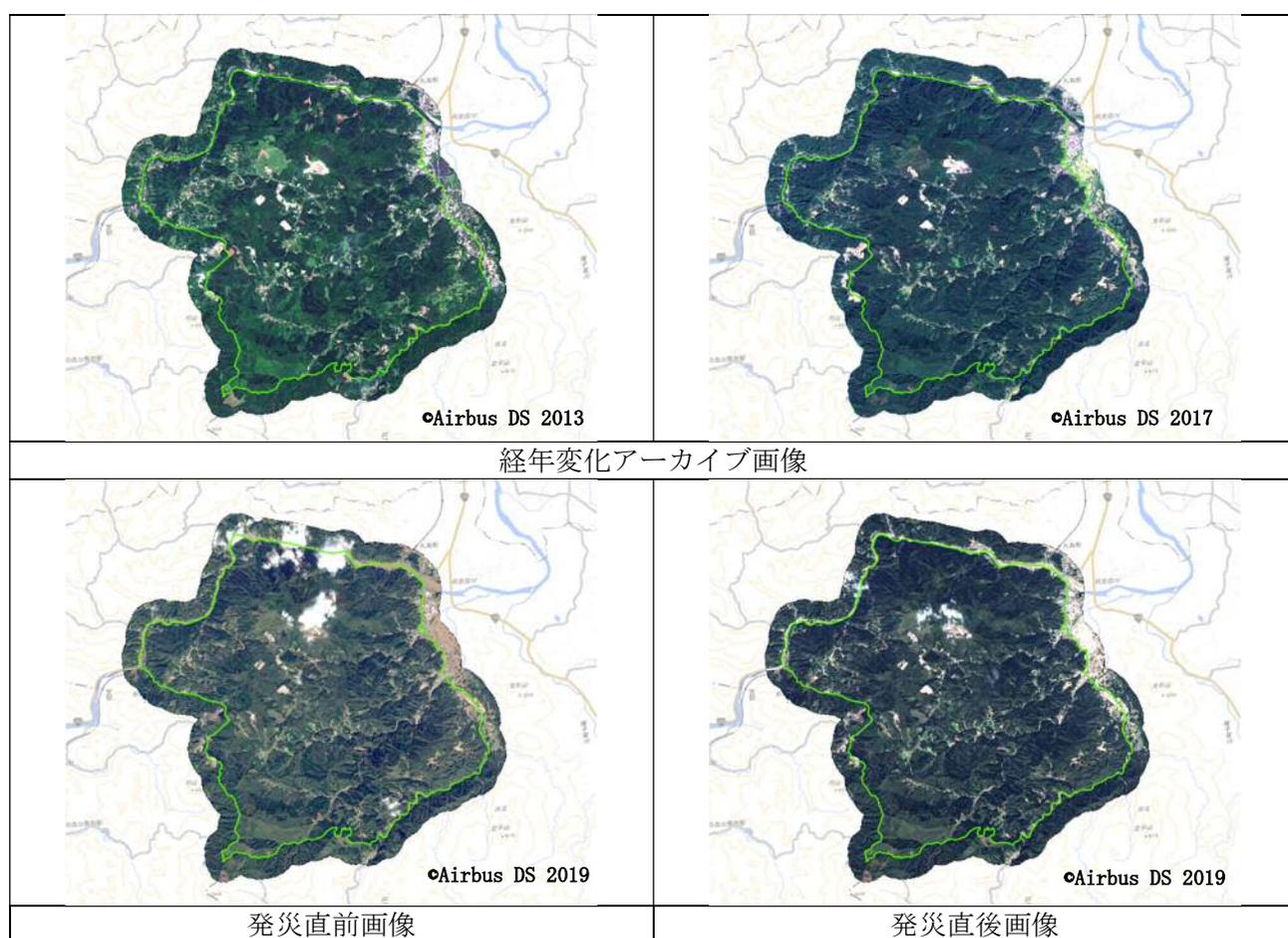


図 5 調達画像一覧（丸森町）

5. 森林変化箇所抽出/土砂流出箇所抽出

収集した衛星画像を判読して「森林変化ポリゴン」と「土砂流出ポリゴン」を作成した。「森林変化ポリゴン」は全ての衛星画像に対して判読を行い、伐採や各地域で対象とした豪雨に起因しない土砂崩壊等を抽出した。「土砂流出ポリゴン」は、発災直後画像のみを対象として、特に豪雨による土砂流出と考えられる箇所を抽出した。

5.1. 森林変化ポリゴンの取得

森林変化箇所は、森林に改変があった箇所に注目し、改変範囲を覆うようにポリゴンデータとして取得した。

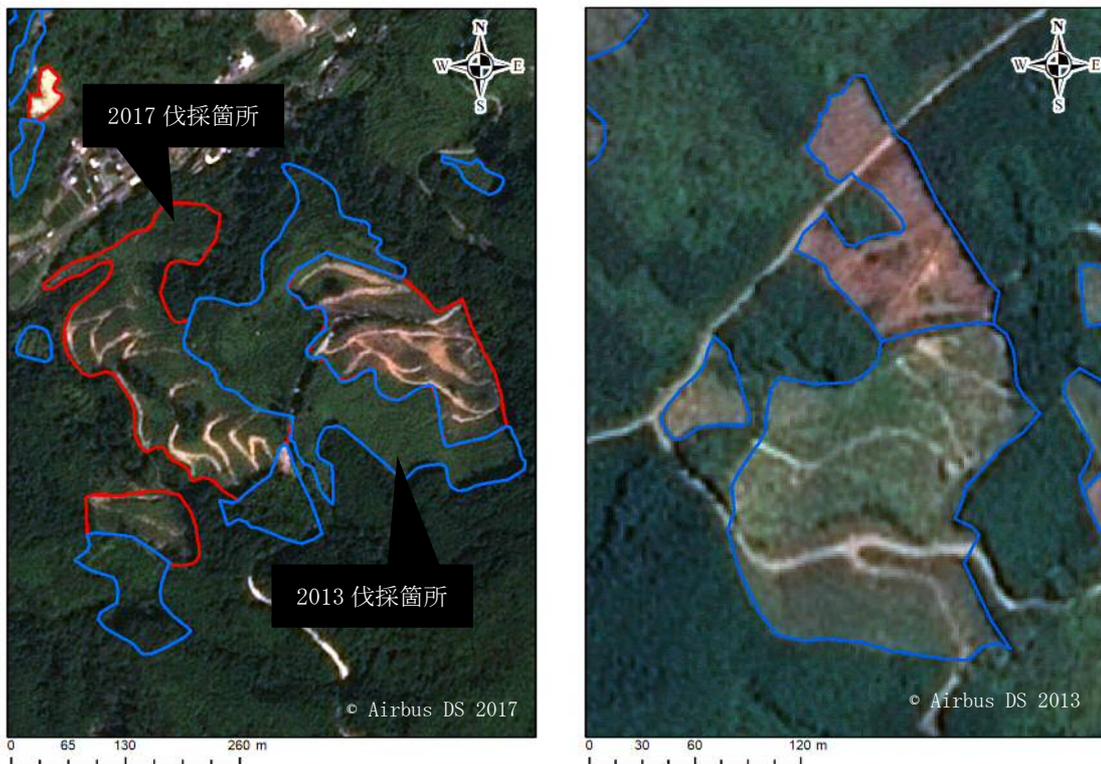


図 6 森林変化ポリゴン取得例

5.2. 土砂流出ポリゴンの取得

土砂流出箇所は、前後の画像比較で土砂の流出が見られる箇所に注目し、土砂流出範囲を覆うようにポリゴンデータとして取得した。



図 7 土砂流出ポリゴン取得例

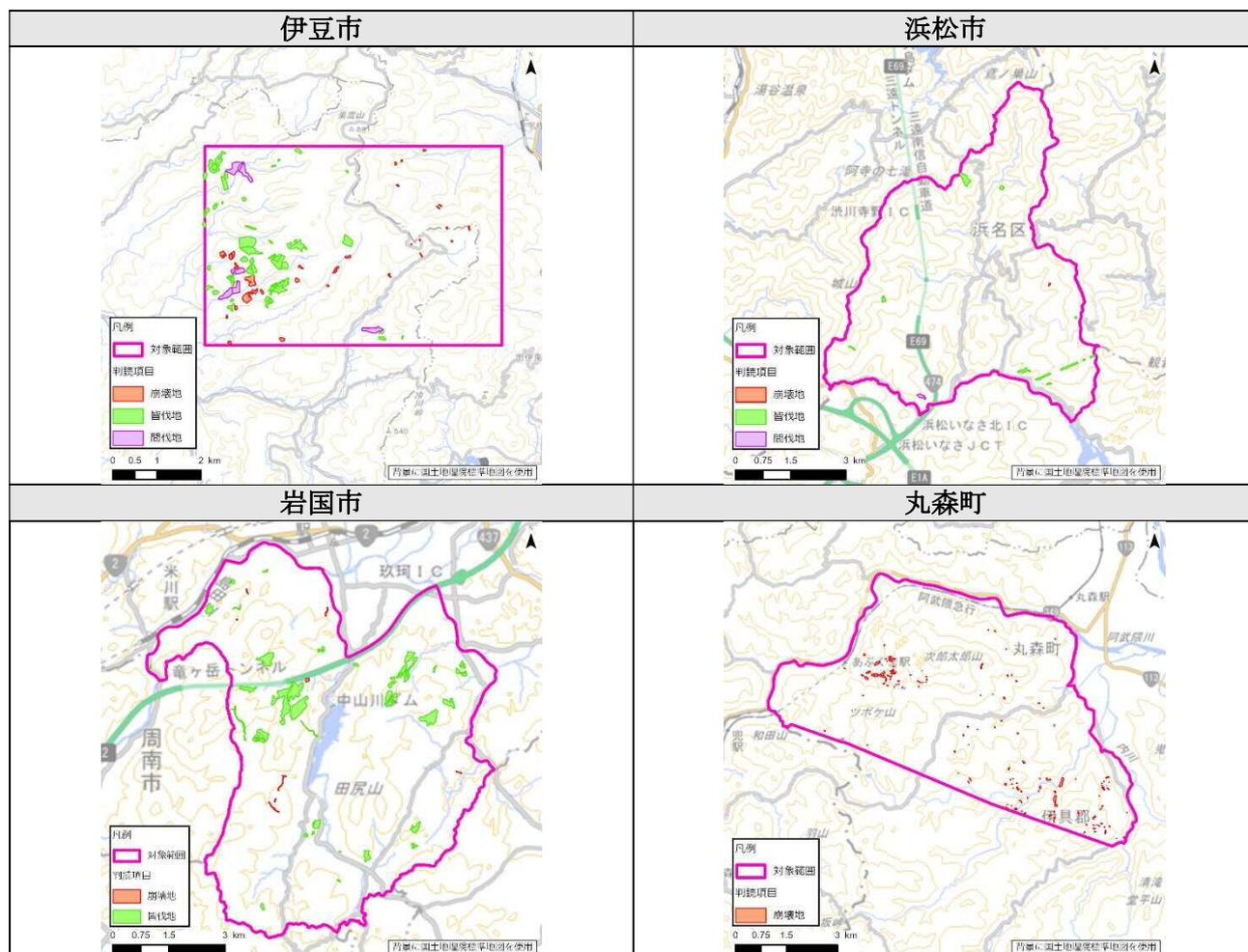
5.3. 土砂流出・森林変化ポリゴン抽出結果

判読結果数量を以下に示す。なお、丸森町の地域においては森林資源解析結果および森林簿情報を用いることで皆伐地および間伐地の判読作業を省略した。

表 10 判読結果

地域	撮影年	崩壊地		皆伐地		間伐地	
		新規判読数	累計	新規判読数	累計	新規判読数	累計
伊豆市	2013	8	8	16	16	1	1
	2018	2	10	25	41	4	5
	2022 前	1	11	31	72	2	7
	2022 後	0	11	0	72	0	7
浜松市	2013	0	0	8	8	0	0
	2018	2	2	0	8	0	0
	2022 前	1	3	5	13	0	0
	2022 後	0	3	0	13	0	0
岩国市	2013	0	0	16	16	0	0
	2018	0	0	18	34	0	0
	2023 前	9	9	13	47	0	0
	2023 後	1	10	0	47	0	0
丸森町	2013	-	-	-	-	-	-
	2017	-	-	-	-	-	-
	2019	183	183	-	-	-	-

表 11 各対象地判読結果位置図



6. 各種情報の集計

土砂流出のしやすさと各種要因との関係性を調査する統計解析の対象地として、土砂流出地のサンプル数が100箇所以上確保できた丸森町および球磨村を解析対象範囲として選定した。また、統計解析により作成されたモデルの適合度合いを調査する対象地として岩国市を選定した。

後述の統計解析で用いる「数量化Ⅱ類」の手法では、「メッシュ数>説明変数カテゴリ総数-説明変数個数+1」の条件を満たす必要がある。条件式より、必要メッシュ数は最大で「 $5 \times 4 - 4 + 1 = 17$ 」となり、源頭部のあるメッシュと、同数の源頭部の無いメッシュを組み合わせたものを1サンプルとして用いることから、衛星判読を行った期間内に新規で発生した源頭部数が9個未満となる伊豆市、浜松市の対象範囲は後続の解析の対象外とした。

選定した対象地において、10mメッシュ範囲内で以下の情報を集計した。

6.1. 航空レーザ計測データを用いた地形解析

解析対象地域の内、災害前の航空レーザ計測データのある球磨村では「山地災害危険地区調査要領（平成28年7月）林野庁」の「山腹崩壊危険地区調査実施要領」（以下、要領）および過年度までの業務成果を参考に、土砂流出の発生しやすさに関係していると考えられる地形要因について解析を実施した。各項目の解析に使用したデータおよび解析方法の概要について以下の表12に示す。

表 12 地形解析項目および使用したデータ

調査項目	使用したデータ	解析の概要
傾斜度	災害前の航空レーザ計測データ	航空レーザ計測により作成された数値標高モデル (DEM) をバイリニア法によって10m間隔にリサンプリングし、傾斜、縦断曲率、横断曲率を算出した。
縦断曲率		
横断曲率		

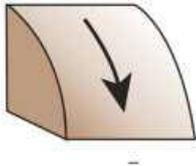
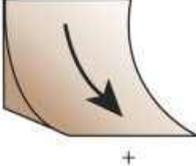
6.1.1. 傾斜

10mグリッドにリサイズした災害発生前のDEMを用いて、Esri社製GISソフトウェア「ArcGIS Pro」のツール「傾斜角」で傾斜の大きさを算出した。

6.1.2. 縦断曲率

10mグリッドにリサイズした災害発生前のDEMを用いて、ArcGIS Proのツール「曲率」で縦断曲率を算出した。

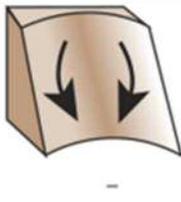
表 13 断面曲率と縦断面形の関係

縦断曲率	小さい(-)	大きい(+)
縦断面形	凸型	凹型
イメージ		

6.1.3. 横断曲率

10m グリッドにリサイズした災害発生前の DEM を用いて、ArcGIS Pro のツール「曲率」で横断曲率を算出した。

表 14 横断曲率と横断面形の関係

横断曲率	小さい(-)	大きい(+)
横断面形	凹型	凸型
イメージ		

6.2. 基盤地図情報数値標高モデルを用いた地形解析

解析対象地域のうち、災害前の航空レーザ計測データの無い丸森町では国土地理院によりインターネット上で公開されている 10m メッシュ基盤地図情報数値標高モデル（以降「基盤地図 DEM」）を用いて地形解析を行った。解析に際し、基盤地図 DEM は航空レーザ計測データと精度が異なり、航空レーザ計測データを用いた地形解析と同じ手法で解析を行うことは適切でない可能性が考えられたため、以下の手法により解析結果の精度検証および解析手法の検討を行った。

6.2.1. 基盤地図 DEM の解析による地形情報の精度評価

基盤地図 DEM は 2 万 5 千分 1 地形図の等高線判読により作成された標高データであるため、実測の値と差異が生じる可能性がある。そのため、災害前のレーザ計測成果より得られた 10m メッシュ標高値およびそれを用いて解析した傾斜、縦断曲率、横断曲率を正解データとし、基盤地図 DEM より得られた地形データと正解データとの差分を求めた。

表 15 基盤地図 DEM を用いた地形解析データの精度評価結果

項目	平均誤差	決定係数	相関係数
標高(m)	4.66876	0.998993	0.999496
傾斜(°)	6.19171	0.42701	0.65346
縦断曲率	2.66007	-1.34545	-
横断曲率	2.52414	-0.36930	-

標高の誤差と比較して隣り合ったセルとの標高差で求められる傾斜および縦横断曲率の誤差が大きくなったため、基盤地図 DEM の各セルで隣接する周辺セルとの平均をとることによりスムージングを行って再度差分を評価した。

表 16 スムージングした基盤地図 DEM を用いた地形解析データの精度評価結果

項目	平均誤差	決定係数	相関係数
標高(m)	4.54394	0.99906	0.99953
傾斜(°)	3.35550	0.79844	0.89356
縦断曲率	1.72977	0.00823	0.09070
横断曲率	1.89931	0.18430	0.42930

評価の結果、スムージングした基盤地図 DEM はスムージングしていないものと比較して航空レーザ計測データとの誤差が小さくなることが分かったため、解析ではスムージングした基盤地図 DEM を使用することとした。また、地形解析項目については傾斜の相関係数が 0.7 以上であったため、後続の解析に使用するが、縦断曲率および横断曲率は相関係数が小さくなったため使用しないこととした。

6.2.2. 縦断曲率および横断曲率の代替情報の検討

精度評価により、航空レーザ計測データの標高データを使用する場合と同じ方法で基盤地図 DEM から縦断曲率および横断曲率を解析すると誤差が大きくなり、実際の地形を表したデータとして解析に使用することは不適切であることが明らかになった。

一方、過年度の業務実施結果および上述の解析結果より、地形の曲率は土砂流出の発生しやすさに強く関係することが示唆されており、土砂流出の発生しやすさの評価を行う際に必要な情報であることが明らかになっている。

以上のことから、縦断曲率および横断曲率の代替で土地の曲率を算出するデータとして、周辺のメッシュとの標高差によりメッシュ位置の土地の「凹凸値」を作成する方法を検討した。

凹凸値の作成手順は以下の通りである。

1. 各メッシュからの検索距離を 20m から 60m まで 10m 間隔で設定する。
2. 各メッシュに検索距離内の平均標高値を付与する。
3. 各メッシュにおける平均標高値とメッシュの標高値との差（凹凸値）を計算する。
4. 検索距離内の平均標高値と比較してメッシュの標高値が小さい場合は凹地形、大きい場合には凸地形として判別する。
5. 航空レーザ計測成果の標高データを用いて同様の解析を行い、凹凸値の誤差が最も小さくなった検索距離のデータを解析に使用する。

災害前の航空レーザ計測成果のある球磨村の対象範囲において、20m から 60m までの各検索距離で作成した凹凸値の精度は以下の通りとなった。

表 17 凹凸値精度評価結果

検索距離 (m)	平均誤差 (m)	決定係数	相関係数
20	0.85651	-48184.1	-
30	1.69371	0.45629	0.67549
40	2.09049	0.56784	0.75355
50	2.44522	0.67194	0.81972
60	2.64330	0.73198	0.85556

精度評価結果より、基盤地図 DEM より検索距離 40m、50m、60m で作成した凹凸値は航空レーザ計測データを用いて同様に作成した凹凸値との相関係数が 0.7 以上となったため、解析に使用可能であるとした。

次に、検索距離 40m、50m、60m で作成した凹凸値を用いて τ 検定により源頭部有無との関係性の強さを判別した。 τ 検定では源頭部ありのメッシュと同数のメッシュを源頭部なしのメッシュからランダムに抽出して使用した。

それぞれの検索距離で作成した凹凸値と源頭部有無との関係の強さは以下の通りとなった。

表 18 凹凸値と源頭部有無の τ 検定結果

検索距離 (m)	τ 値 ^{※1}	p 値 ^{※2}
40	4.9644	0.05 未満
50	5.0115	0.05 未満
60	5.0192	0.05 未満

※1：関係性の強さを表す数値、大きいほど関係性が強い。

※2：結果の偶然性を表す数値、一般的に 0.05 未満であると結果の信頼性が高いとされる。

いずれの検索距離においても関係性の強さに大きな差は無かったため、より小さい半径での検索結果が 10m メッシュの地形を特徴的に表している可能性が高いことから、検索距離 40m で作成した凹凸値を後続の解析に用いた。

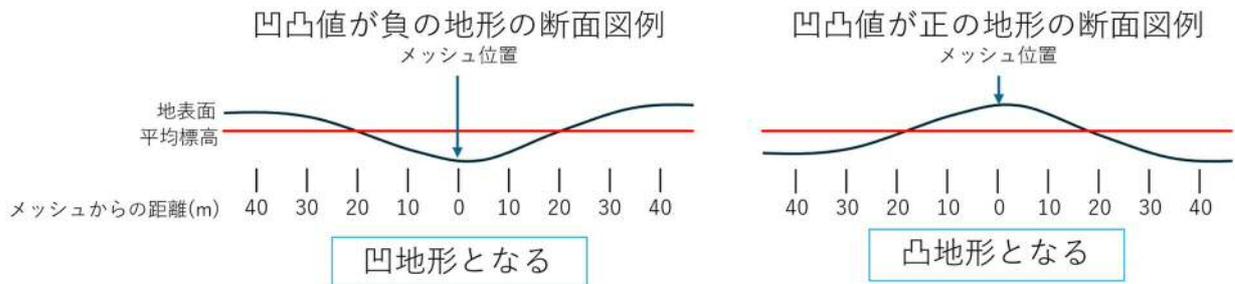


図 8 凹凸値のイメージ

6.3. 源頭部ポイントデータ作成

衛星画像による判読結果、微地形表現図、および災害前後の標高差分より、土砂流出の起点となった箇所（以下、源頭部）を判読し、ポイントデータを作成した

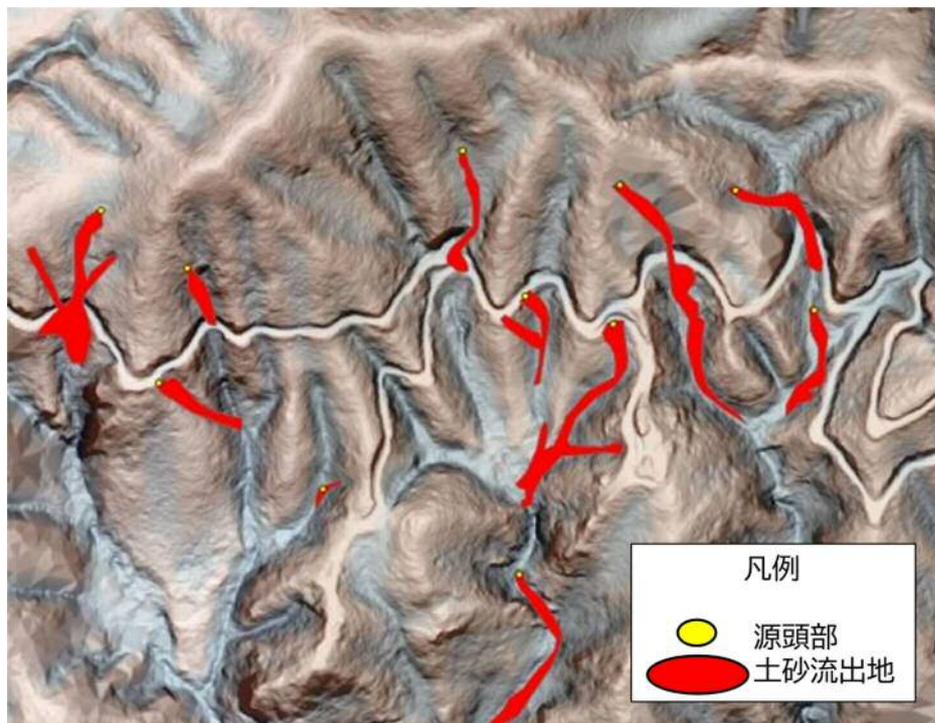


図 9 源頭部の判読イメージ

6.4. 森林情報の集計

森林の状況と土砂流出の発生しやすさとの関係を調査するため、対象範囲内における森林情報を 10m メッシュ内で集計した。集計した項目を以下に示す。なお、資源情報は使用した森林資源解析業務成果で解析対象となっている針葉樹人工林のみで集計した。

表 19 集計した森林資源情報

集計項目	使用したデータ	集計の概要
樹種	森林資源解析業務成果 森林計画図適正化業務成果	借用した業務成果の林相区分図を 10m メッシュ内で再集計
平均樹高(m)	森林資源解析業務成果	借用した業務成果の樹頂点データを 10m メッシュ内で再集計 丸森町では借用した航空レーザ計測業務成果より樹頂点データを新規作成し、10m メッシュ内で集計
立木密度(本/ha)	航空レーザ計測業務成果	
相対幹距比(%)		
収量比数		
間伐履歴	森林簿 施業履歴	10m メッシュの重なる林小班における最新の間伐履歴を参照

6.4.1. 樹種

球磨村では借用した森林資源解析業務成果内の林相区分図データを用いて、10m メッシュ内に占める面積が最も大きい樹種を10m メッシュの樹種として集計した。

丸森町では借用した森林計画図適正化業務成果の森林計画図を林相区分図データとし、10m メッシュ内に占める面積が最も大きい樹種を10m メッシュの樹種として集計した。

6.4.2. 平均樹高

10m メッシュ内の単木樹高平均値を集計した。

6.4.3. 立木密度

10m メッシュ内の単木本数(本/100 m²)を100倍した値を立木密度(本/ha)とした。

6.4.4. 相対幹距比

10m メッシュ内で平均樹高の立木が等間隔に分布していると仮定し、以下の式により算出した。

$$\text{相対幹距比(\%)} = 100 \times \frac{100}{\sqrt{\text{立木密度(本/ha)}} \times \text{平均樹高(m)}}$$

6.4.5. 間伐履歴

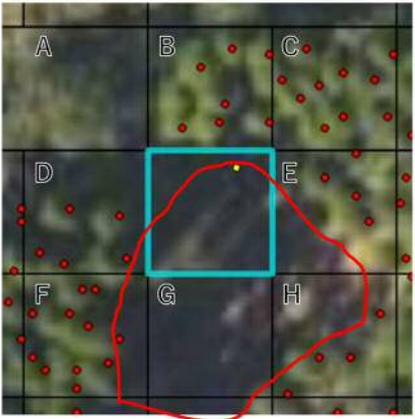
10m メッシュの重なる林小班における最新の間伐実施年から災害発生年までの経過年数を間伐からの経過年数として集計した。

6.5. 源頭部の森林情報の補完

使用した森林資源解析業務成果は災害後の航空レーザ計測データを用いて作成されているため、土砂流出による立木の傾倒や流失により、樹高および本数の解析結果が災害発生前と異なる。そのため、周辺の林況や災害前の航空写真の参照により、源頭部のある10m メッシュが災害前に針葉樹人工林であったことが考えられる場合には周辺のメッシュの情報より源頭部のあるメッシュの森林資源情報を補完した。

補完に使用するメッシュは源頭部のあるメッシュを中心とした周囲8メッシュとし、土砂流出による樹高および立木密度の低下の影響を受ける可能性の最も小さい、周囲8メッシュの森林資源量の最大値を補完の値として使用した。

表 20 源頭部のあるメッシュにおける森林資源情報の補完方法

補完対象とするメッシュ	補完方法
	
<p>□：対象メッシュ ●：源頭部 ●：樹頂点 □：資源解析対象メッシュ（災害後に「スギ」または「ヒノキ」と判読されたメッシュ）</p>	
<p>メッシュ内の立木が流出しており、立木密度が災害発生前より低く算出される可能性が高いため災害前の状況を推定する必要がある。</p>	<p>B、C、D、E、F、Hの最大値を取得する → 隣接した全メッシュが土砂流出している場合を除き土砂流出の影響は受けませんが、高く算出されやすい</p>

周辺のメッシュから補完する値は樹高および立木密度とし、相対幹距比は補完後の樹高および立木密度を用いて再計算した。

6.6. 路網分布図の作成

災害後の航空レーザ計測データより作成された微地形表現図および衛星画像を用いて、集材路等の路網分布図を作成した。路網分布図は微地形表現図等で判読できる路網の中心線にラインデータを作成した。

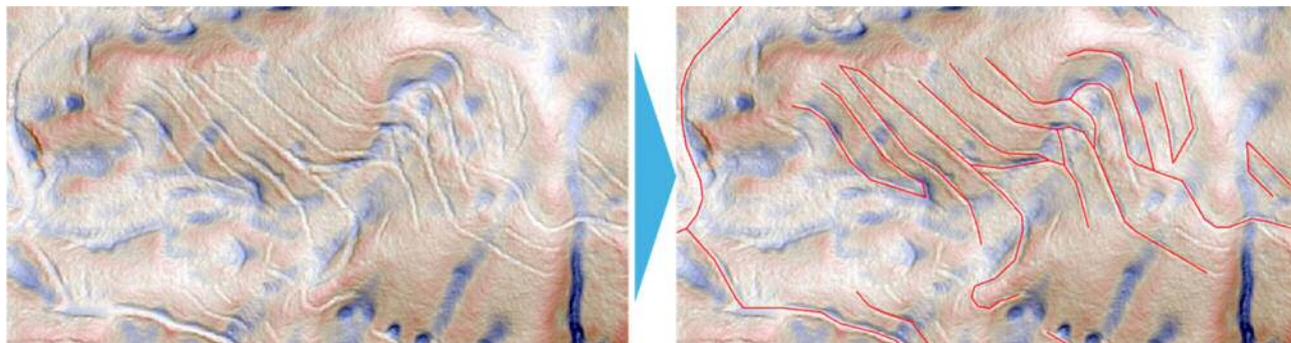


図 10 路網入力例

6.7. 各種情報の集計結果

地形および森林資源情報の各対象地における解析結果は以下の通りとなった。なお、深層崩壊を対象外とするため、災害前後の標高差分値が3m以上である源頭部は対象外とした。

6.7.1. 球磨村（対象範囲全域）

表 21 解析対象メッシュ数

解析対象メッシュ総数	源頭部ありメッシュ数
1,249,435	314

1) 傾斜（航空レーザ計測成果より）

表 22 集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.1	31.7	30.3	74.2

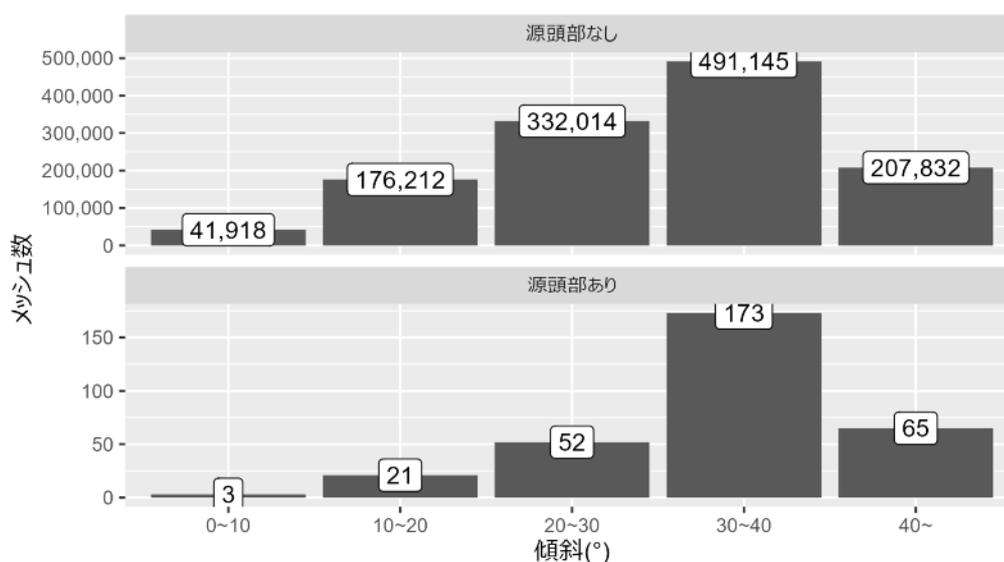


図 11 傾斜分布

2) 傾斜 (基盤地図 DEM より)

表 23 集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.0	28.5	27.9	66.2

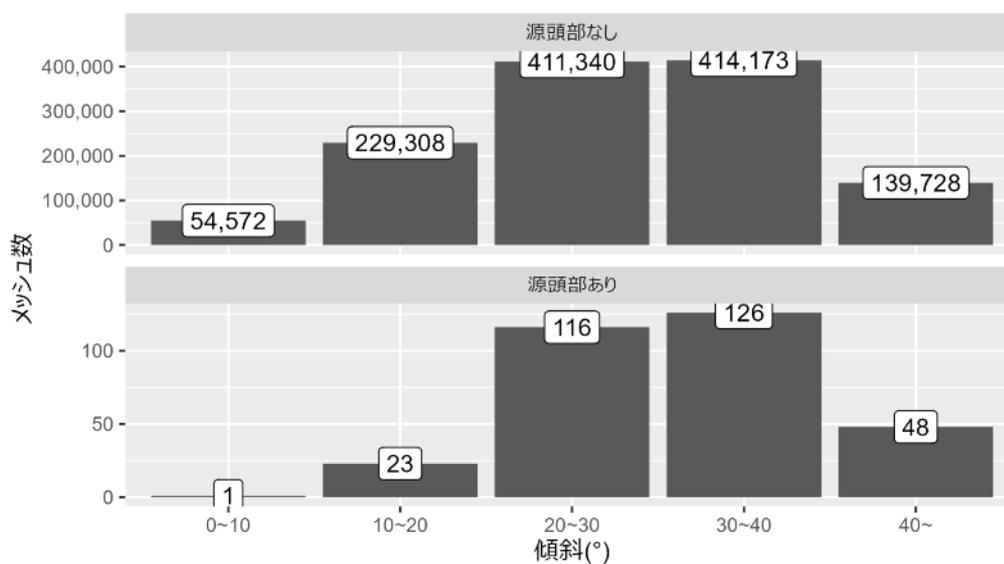


図 12 傾斜分布

3) 縦断曲率 (航空レーザ計測成果より)

表 24 集計値

最小値	中央値	平均値	最大値
-50.5	-0.1	0.0	45.9

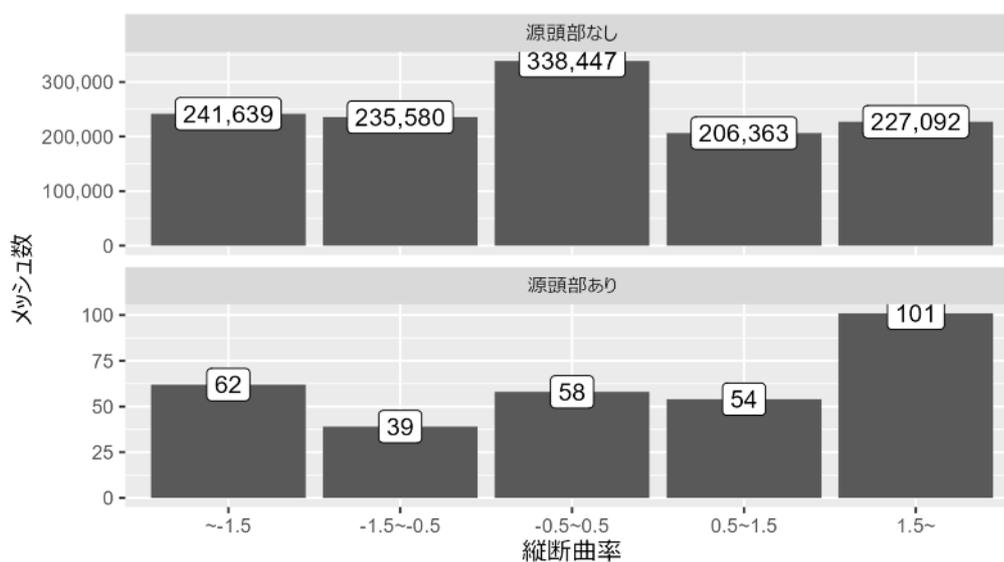


図 13 縦断曲率分布

4) 横断曲率（航空レーザ計測成果より）

表 25 集計値

最小値	中央値	平均値	最大値
-33.1	0.1	0.0	45.7

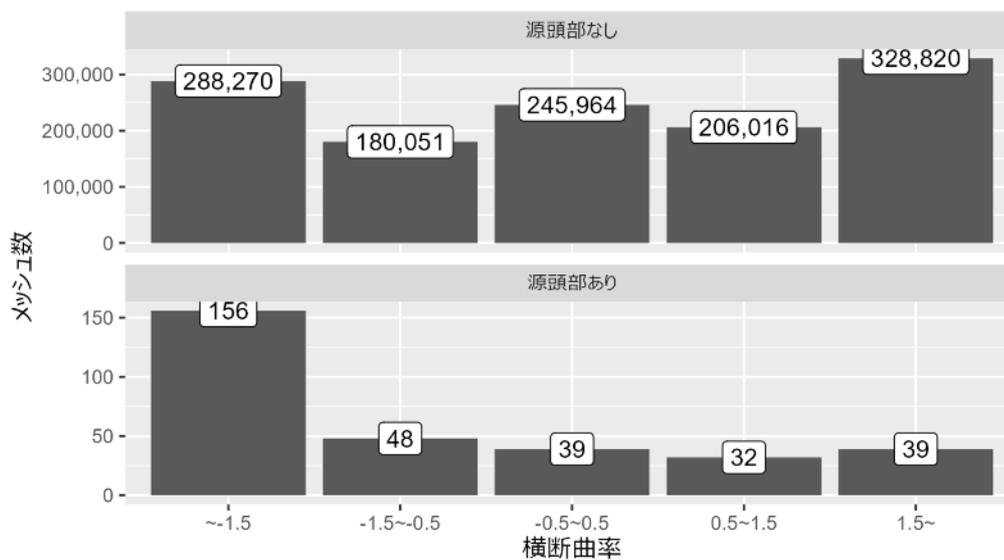


図 14 横断曲率分布

5) 凹凸値（基盤地図 DEM より）

表 26 集計値

最小値(m)	中央値(m)	平均値(m)	最大値(m)
-18.9	0.2	0.0	18.4

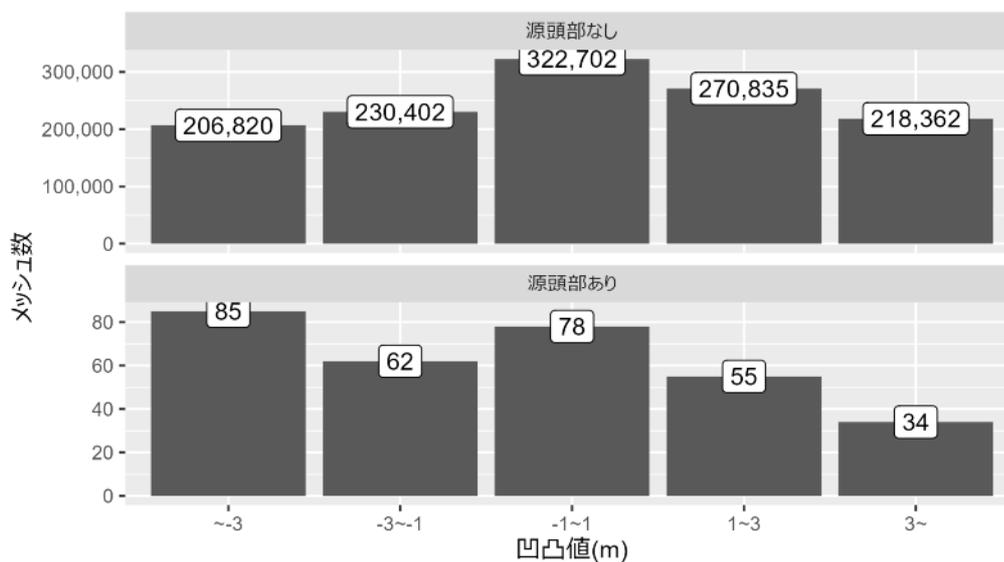


図 15 凹凸値分布

6.7.2. 球磨村（針葉樹人工林）

解析対象メッシュより、樹種がスギまたはヒノキかつ樹高が5m以上のメッシュを針葉樹人工林メッシュとして抽出した。

表 27 針葉樹人工林メッシュ数

針葉樹人工林メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
602,531	67

1) 傾斜（航空レーザ計測成果より）

表 28 集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.1	30.6	29.2	65.6

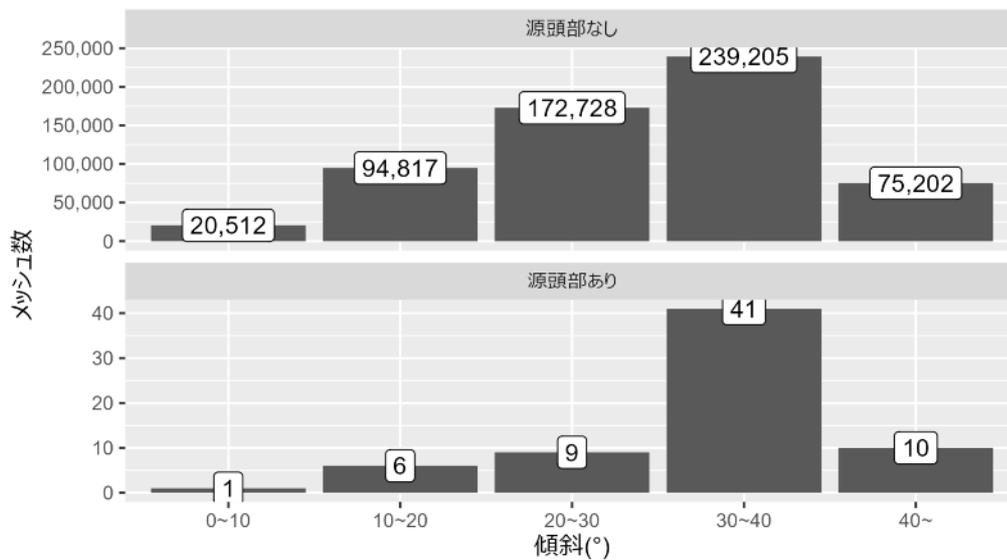


図 16 傾斜分布

2) 傾斜（基盤地図 DEM より）

表 29 集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.1	27.6	27.0	62.9

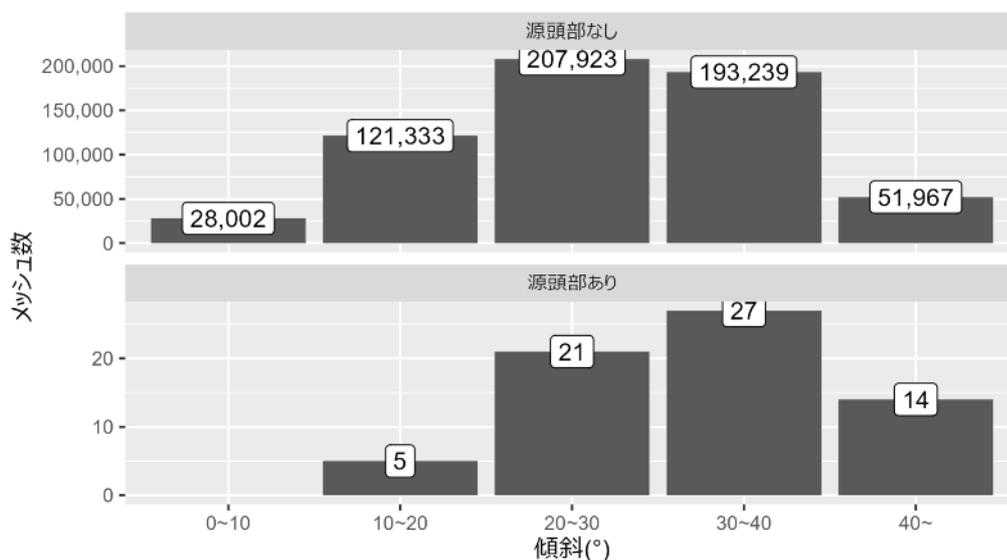


図 17 傾斜分布

3) 縦断曲率（航空レーザ計測成果より）

表 30 集計値

最小値	中央値	平均値	最大値
-27.7	-0.1	0.0	27.1

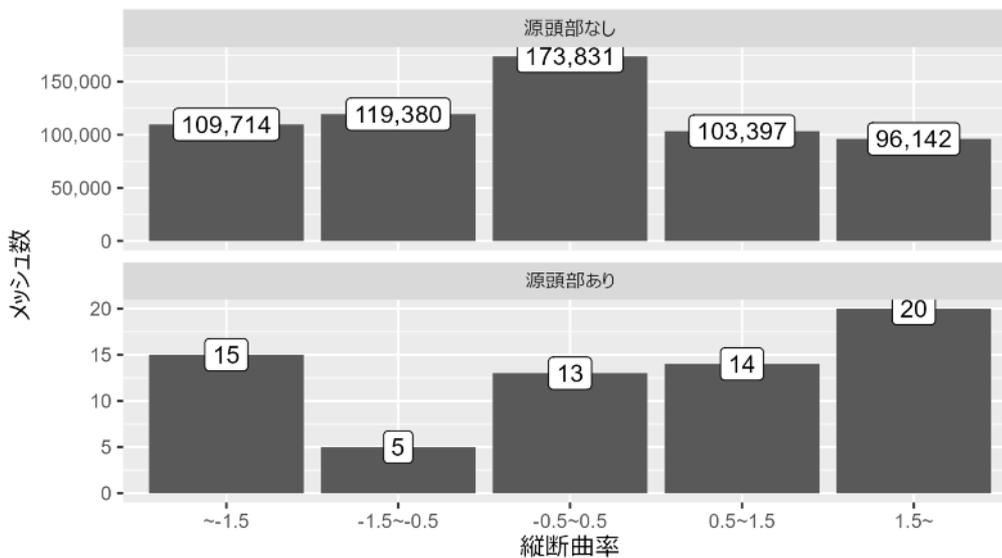


図 18 縦断曲率分布

4) 横断曲率（航空レーザ計測成果より）

表 31 集計値

最小値	中央値	平均値	最大値
-25.4	0.1	0.0	22.9

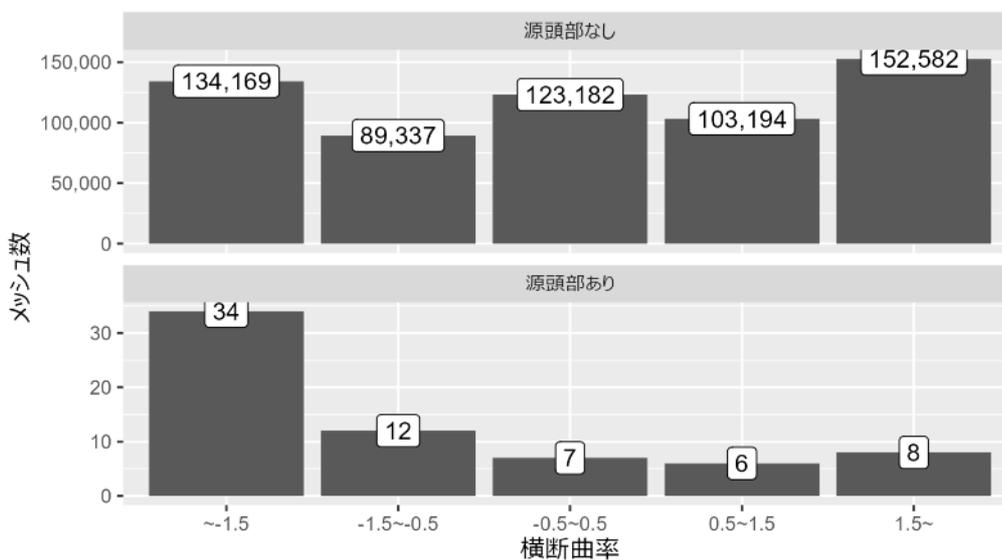


図 19 横断曲率分布

5) 凹凸値 (基盤地図 DEM より)

表 32 集計値

最小値	中央値	平均値	最大値
-15.6	0.2	0.1	14.2

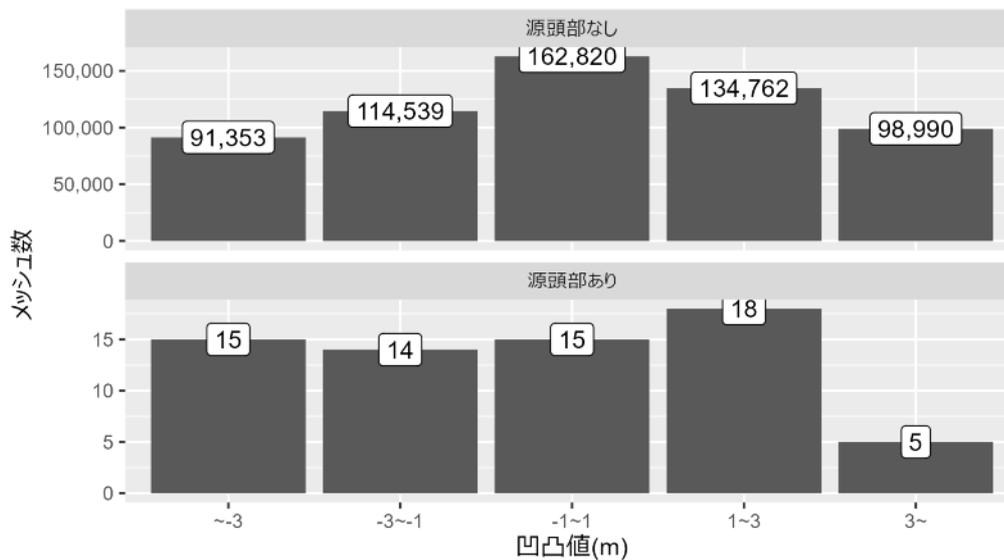


図 20 凹凸値分布

6) 樹高

表 33 集計値

最小値 (m)	中央値 (m)	平均値 (m)	最大値 (m)
5.0	19.1	18.9	43.1

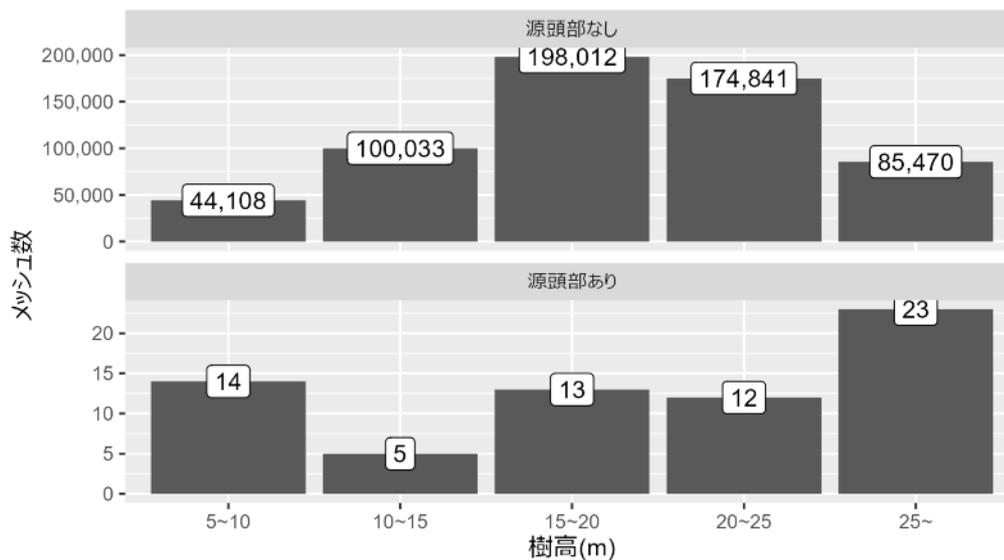


図 21 樹高分布

7) 立木密度

表 34 集計値

最小値(本/ha)	中央値(本/ha)	平均値(本/ha)	最大値(本/ha)
5.0	19.1	18.9	43.1

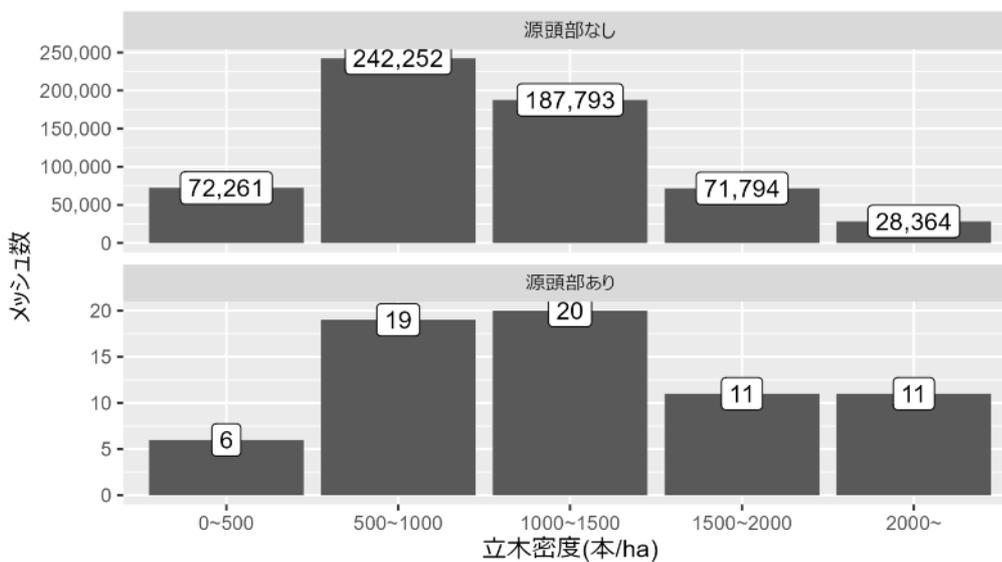


図 22 立木密度分布

8) 相对幹距比

表 35 集計値

最小値(%)	中央値(%)	平均値(%)	最大値(%)
6.9	18.0	20.4	200.0

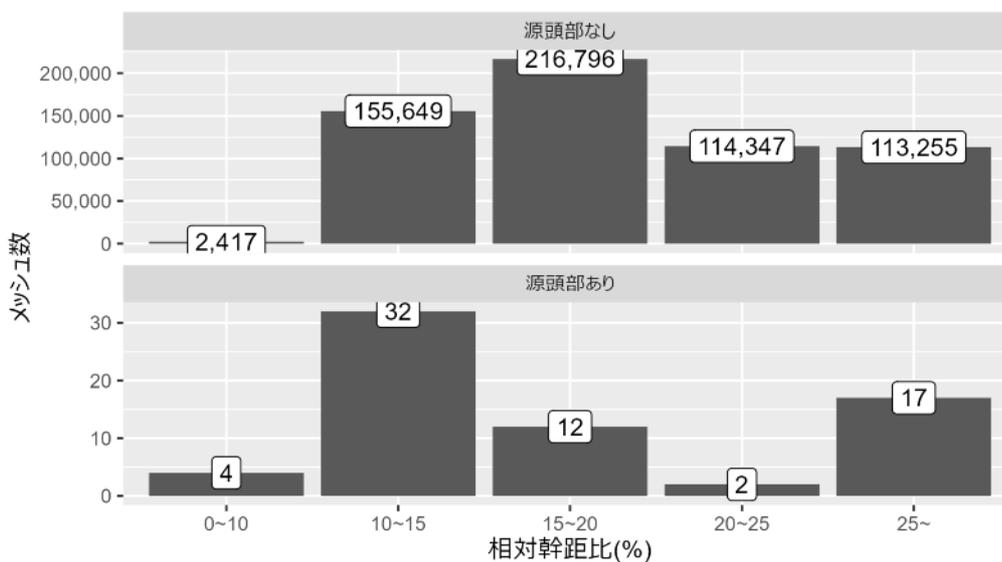


図 23 相对幹距比分布

9) 間伐からの経過年数

表 36 集計値（間伐なしを除く）

最小値(年)	中央値(年)	平均値(年)	最大値(年)
3	12	13.2	24

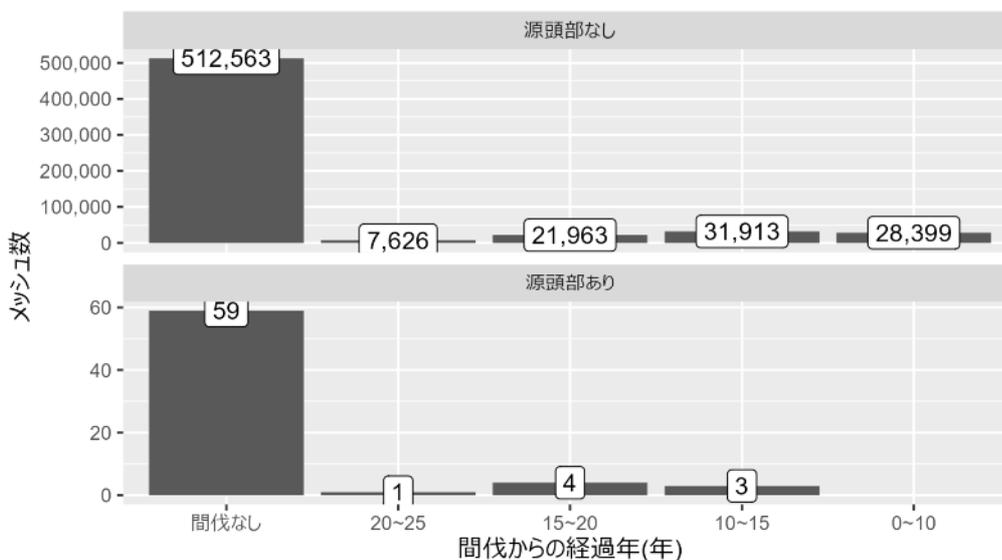


図 24 間伐からの経過年分布

6.7.3. 丸森町（対象範囲全域）

丸森町での地形および森林資源情報の各対象地における解析結果は以下の通りとなった。なお、丸森町では災害前の標高データが基盤地図 DEM のみであるため、標高差分による深層崩壊の除外は行わなかった。

表 37 解析対象メッシュ数

解析対象メッシュ総数	源頭部ありメッシュ数
370,413	172

1) 傾斜（基盤地図 DEM より）

表 38 集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.0	19.3	20.0	58.5

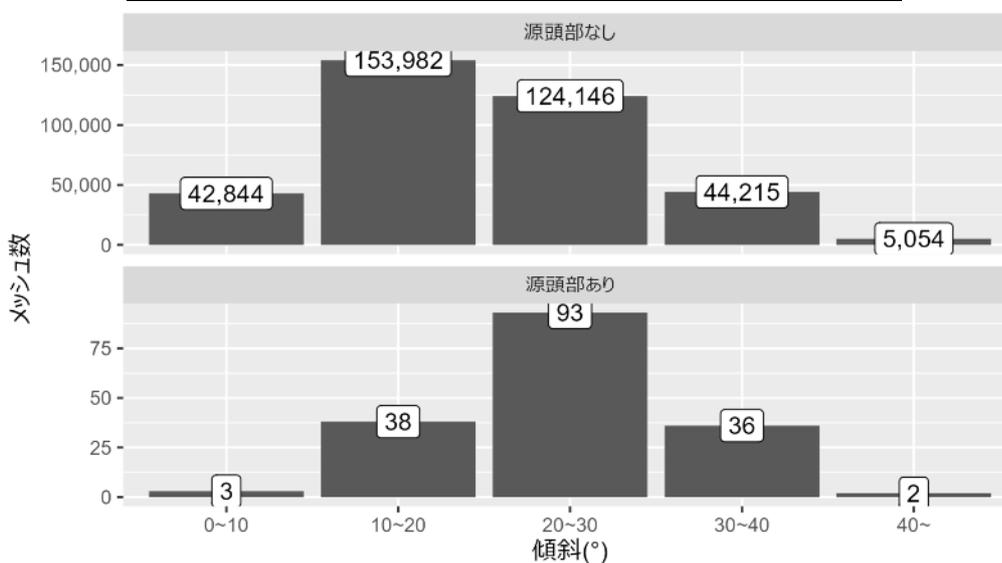


図 25 傾斜分布

2) 凹凸値（基盤地図 DEM より）

表 39 集計値

最小値(m)	中央値(m)	平均値(m)	最大値(m)
0.0	19.3	20.0	58.5

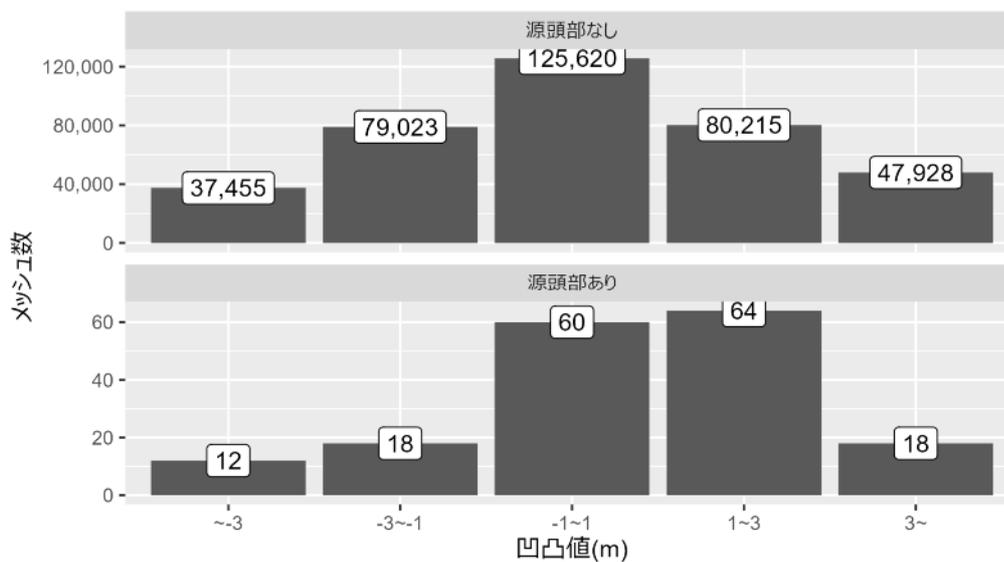


図 26 凹凸値分布

6.7.4. 丸森町（針葉樹人工林）

解析対象メッシュより、樹種がスギまたはヒノキまたはマツ類かつ樹高が 5m 以上のメッシュを針葉樹人工林メッシュとして抽出した。

表 40 針葉樹人工林メッシュ数

針葉樹人工林メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
183,310	38

1) 傾斜 (基盤地図 DEM より)

表 41 集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.1	19.6	20.3	52.9

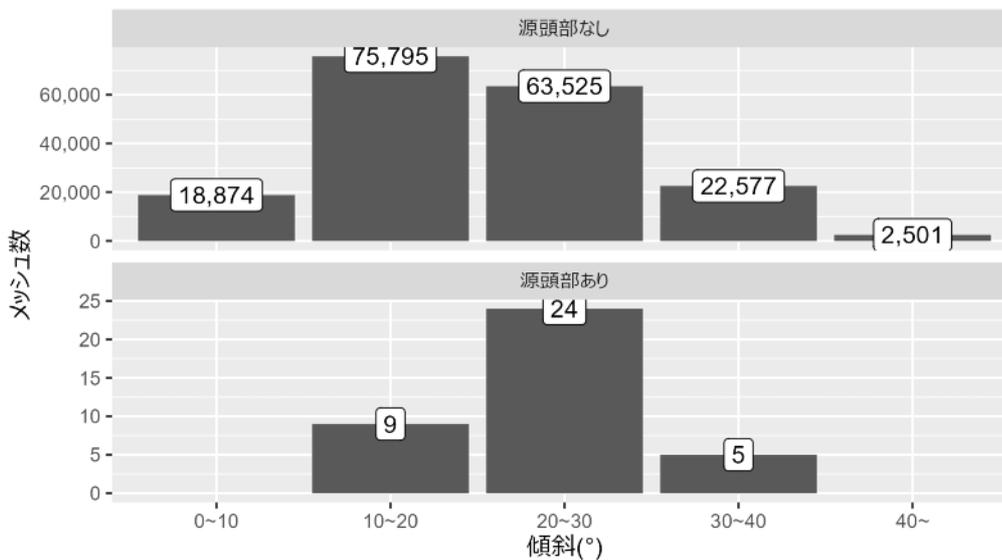


図 27 傾斜分布

2) 凹凸値 (基盤地図 DEM より)

表 42 集計値

最小値(m)	中央値(m)	平均値(m)	最大値(m)
-11.5	0.0	0.1	12.2

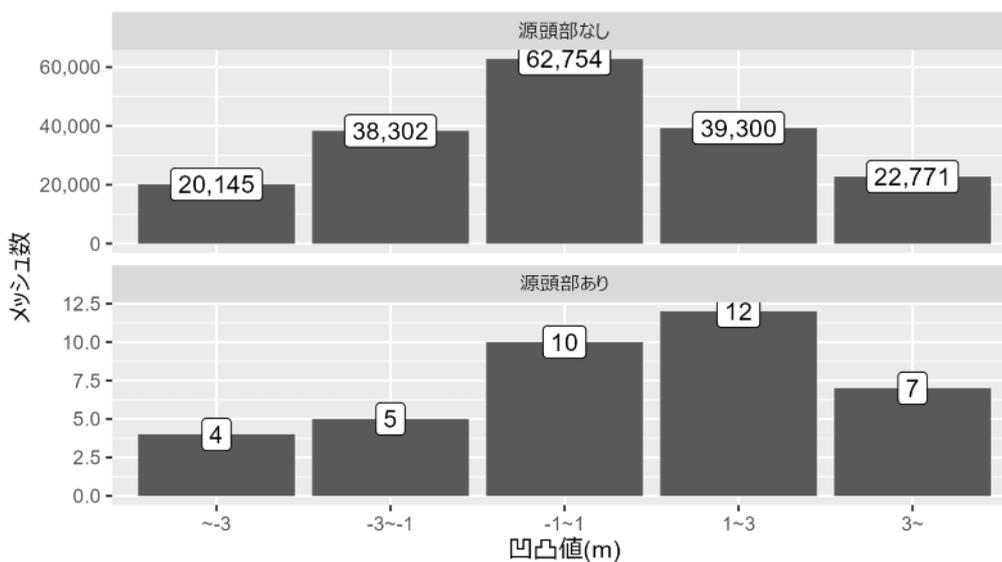


図 28 凹凸値分布

3) 樹高

表 43 集計値

最小値(m)	中央値(m)	平均値(m)	最大値(m)
5.0	19.9	20.2	41.5

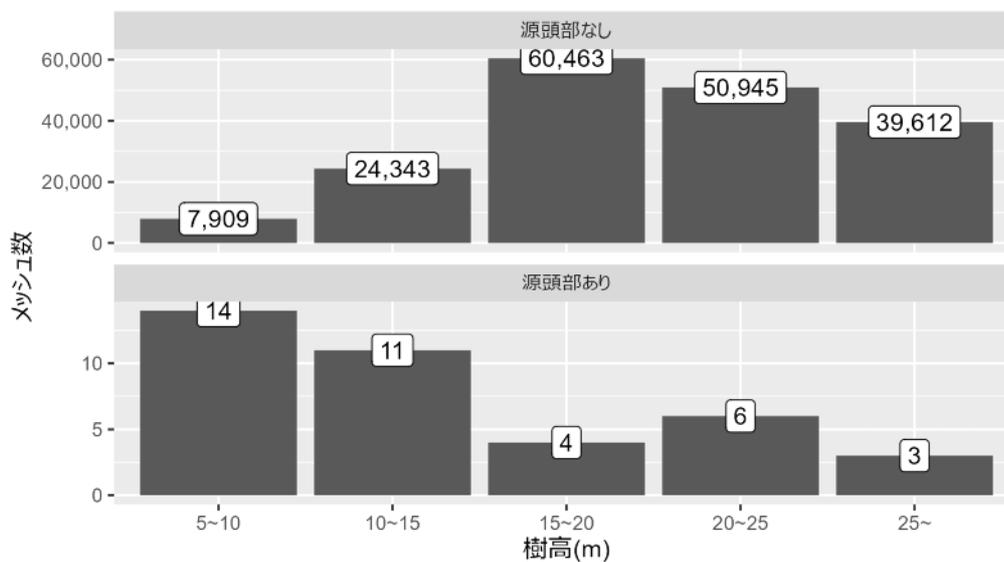


図 29 樹高分布

4) 立木密度

表 44 集計値

最小値(本/ha)	中央値(本/ha)	平均値(本/ha)	最大値(本/ha)
100	600	659.2	3,100

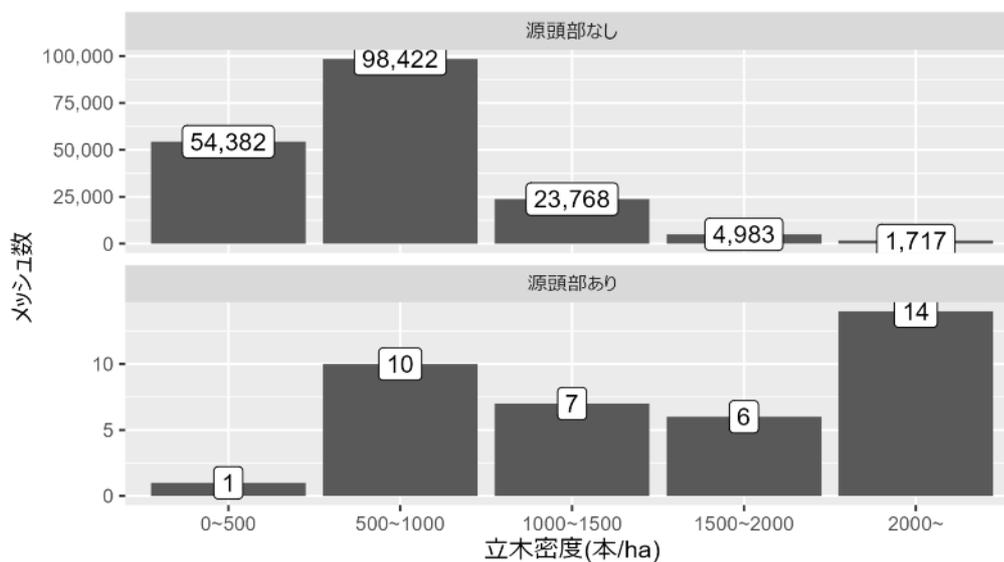


図 30 立木密度分布

5) 相対幹距比

表 45 集計値

最小値(%)	中央値(%)	平均値(%)	最大値(%)
9.6	20.4	23.6	200.0

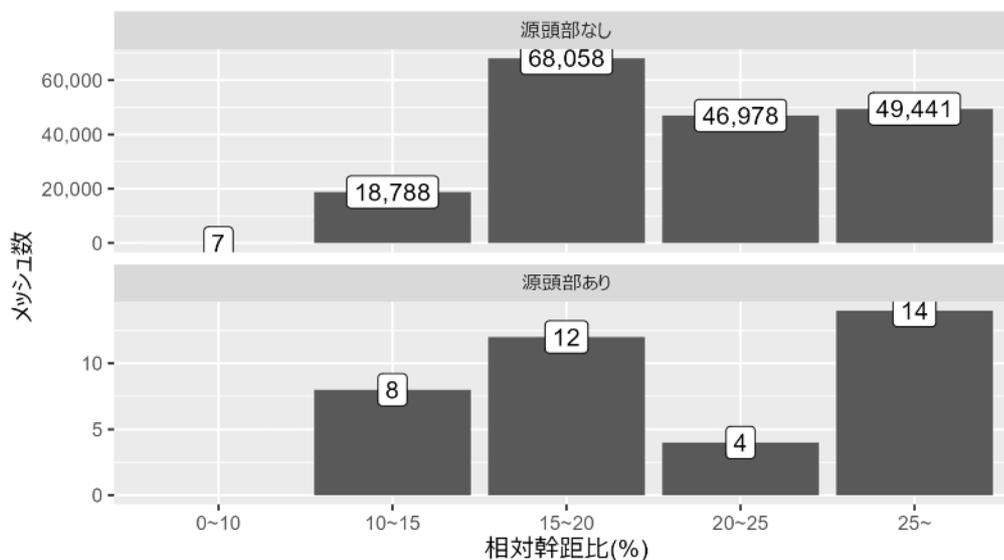


図 31 相対幹距比分布

6) 間伐からの経過年数

表 46 集計値 (間伐なしを除く)

最小値(年)	中央値(年)	平均値(年)	最大値(年)
0	11	11.3	22

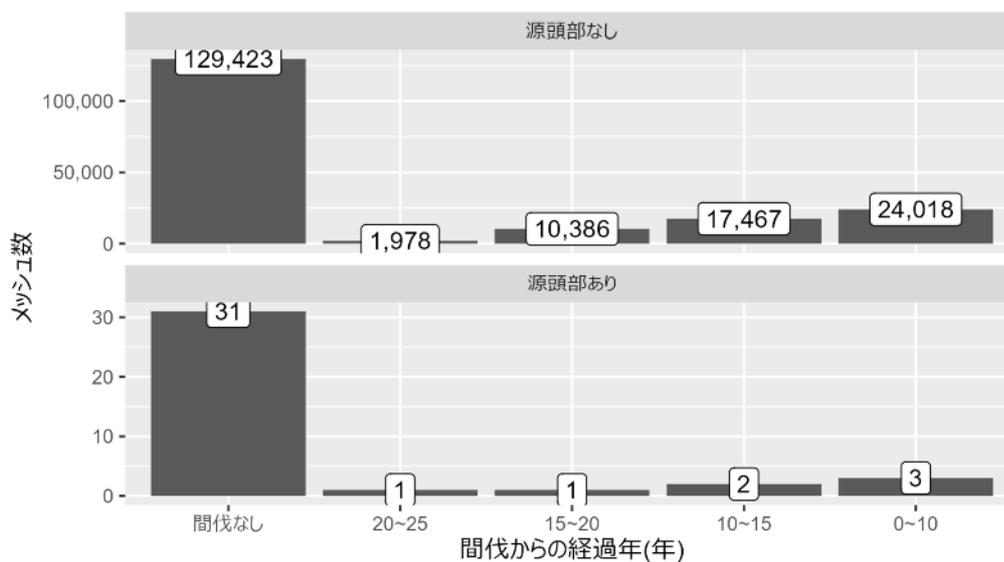


図 32 間伐からの経過年分布

7. 土砂流出に係る因子の解析

本項では、前項までに整備されたデータを用いて、森林変化と土砂流出発生の関係性について分析を行った。

過年度の調査では、土砂流出発生の有無と林種、齢級、地質、地形等との関係について分析を行った結果、急峻地、横断面形が凹地形、路網周辺等の因子が重なる箇所において、一定程度、流出土砂が発生しやすいことが明らかとなった。本年度の調査では、新規の調査項目である森林の状況による影響を調査するとともに、各因子別の土砂流出に与える影響の大きさを調査した。

7.1. 使用した解析手法

本調査では、目的変数が土砂流出「有、無」のカテゴリデータであること、土砂流出の発生しやすさに与える影響が単調でないことが予想される項目（例：立木密度は疎なほど、または密なほど土砂流出が発生しやすいのではなく、極端に疎、または密である場合に土砂流出が発生しやすくなることが予想される）を説明変数として用いることから、下表より「数量化Ⅱ類」を選択して解析を行った。数量化Ⅱ類では各説明変数の影響度を「カテゴリスコア」として点数化することができるため、「傾斜が 30° 以上 40° 未満の土地は○点」という定量的な解釈が可能となる。

表 47 多変量解析手法

手法	採用	目的	目的変数 ^{※1}		説明変数 ^{※2}	
			カテゴリ ^{※3}	数量 ^{※4}	カテゴリ	数量
重回帰分析		予測		1		複数
数量化Ⅰ類		予測		1	複数	
判別分析		予測	1 (2 値)		複数 (2 値)	複数
ロジスティック回帰分析		予測	1 (2 値)			複数
多項ロジスティック回帰分析		予測	1 (多分類)			複数
数量化Ⅱ類	○	予測	1 (多分類)		複数	
一般化線形混合モデル		予測	1 (2 値)	1		複数
Cox 比例ハザード回帰		予測		2 (生存時間)		複数
主成分分析		要約				複数
因子分析		要約				複数
共分散構造分析		予測・要約			複数	複数
クラスター分析		要約				複数
コレスポンデンス分析		要約			2	
数量化Ⅲ類		要約			複数	
決定木		予測		1		複数

※1：求めたい結果（例：土砂流出発生の有無、土砂流出発生数）

※2：予測に使用する値（例：傾斜、樹高）

※3：名前やラベルに基づいて区別されるデータ（例：皆伐有無、0°~10° など区分された傾斜）

※4：量的な数値を表すデータ（例：皆伐面積、区分していない傾斜）

7.2. 統計解析対象メッシュ数の調整

本項においては源頭部の有無を目的変数とするが、源頭部ありのメッシュ数は源頭部無しのメッシュ数と比較して極端に数が少なく、数量バランスの偏りにより適切な解析が行われない可能性が考えられた。

そのため、源頭部ありのメッシュ数と同数のメッシュを源頭部無しのメッシュからランダムに選定し、源頭部有無のサンプル数を同数としたデータを用いて解析を行った。

さらに、ランダムな選択の際に各種条件の偏ったメッシュが採用される可能性を考慮し、源頭部なしのメッシュからランダムに選択する処理を 100 通り行うことで生成された 100 通りのサンプルでそれぞれ統計解析を行った結果の平均値を解析結果として用いた。

また、判別精度の算出には解析に使用した 100 通りのサンプルと別に抽出した 100 通りのサンプルを使用し、解析結果が解析に使用したサンプル以外にも適合することを確認した。

7.3. 解析手順

1) 解析対象メッシュの抽出

対象地域のすべてのメッシュより、源頭部のある（土砂流出の発生した）メッシュおよび源頭部のあるメッシュと同数のメッシュを源頭部の無い（土砂流出の発生していない）メッシュよりランダムに抽出する。抽出は100通り行い、それぞれについて解析を行う。

2) 各要素のカテゴリ区分

解析に使用する各要素（傾斜、横断曲率等）を複数のカテゴリに区分（傾斜 0° 以上 10° 未満、横断曲率-1 以上 1 未満等）する。

3) カテゴリスコアの算出

抽出した解析対象のメッシュについて、各カテゴリの土砂流出の発生に与える影響度をカテゴリスコアとして算出する。算出は100通りのサンプルでそれぞれ行い、各算出の結果として得られたカテゴリスコアの平均値を各カテゴリの最終的なカテゴリスコアとする。

4) サンプルスコアの算出

算出したカテゴリスコアに基づいて解析対象メッシュの各要素を点数付けし、各要素のカテゴリスコアの合計値をサンプルスコアとして算出する。

5) 判別閾値の設定

一定の値を判別閾値として設定し、サンプルスコアが判別閾値以上となったメッシュを「閾値以上」、判別閾値未満となったメッシュを「閾値以下」として区分したのち、以下の式により算出する判別精度が最も高くなる判別閾値の値を100通りのサンプルでそれぞれ探索する。100通りのサンプルで設定された判別閾値の平均値を最終的な判別閾値とする。

メッシュ数	閾値以上	閾値未満
源頭部あり	TP	FN
源頭部無し	FP	TN

$$\text{判別精度(\%)} = \frac{\text{+ (正解判別メッシュ数)}}{\text{+ + + (メッシュ全数)}} \times 100$$

6) 判別精度の算出

5)までの解析で算出したカテゴリスコアおよび判別閾値を用いて、解析に使用したサンプルと別に抽出した100通りのサンプルに対してサンプルスコアの算出および閾値以上・以下の判別を行い、5)と同様の式を用いて判別精度を算出した。解析の最終的な判別精度は100通りの判別精度の平均値とした。

7.4. 航空レーザ計測データより解析した地形情報を用いた解析結果

過年度成果において土砂流出発生の有無と強い関係があるとされた 10m メッシュ内の「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」の 3 要素を説明変数、10m メッシュ内の源頭部の有無を目的変数として、数量化Ⅱ類を用いた解析を行った結果を以下に示す。

なお、丸森町には災害前の航空レーザ計測データが無いいため、本解析は球磨村のみ実施している。

表 48 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
2.002	67.17

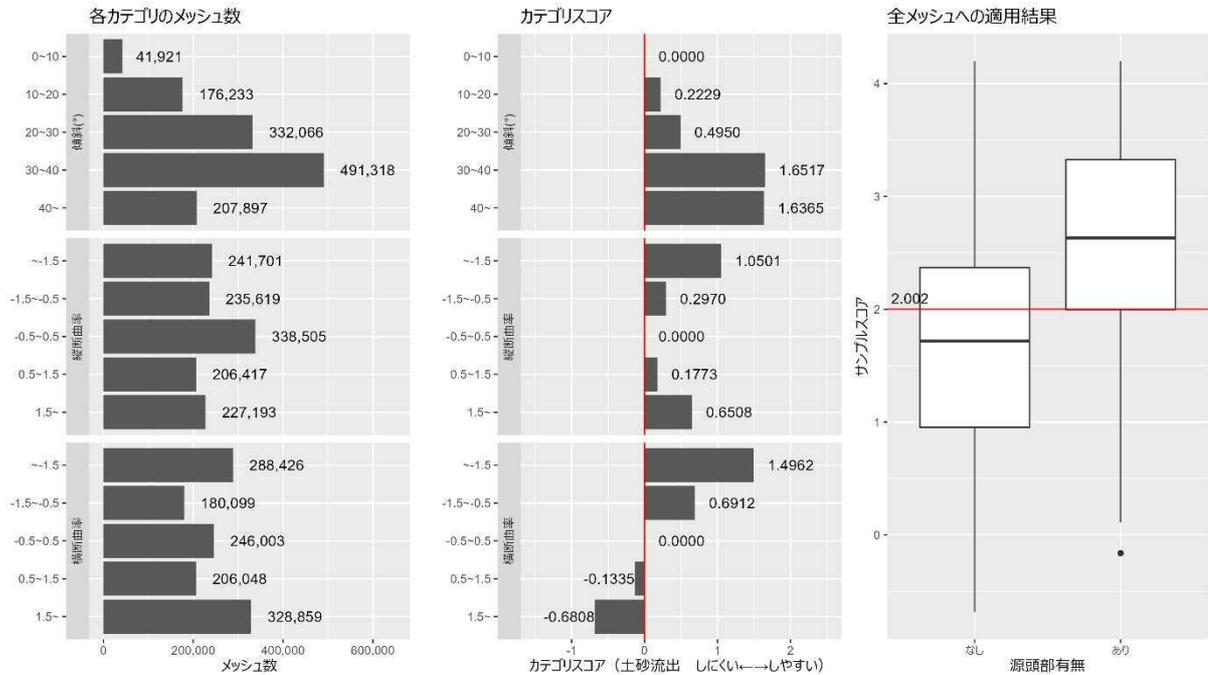


図 33 カテゴリスコア算出結果

7.4.1. 航空レーザ計測データより解析した地形情報を用いた解析結果のまとめ

解析の結果、過年度成果と同様に傾斜の大きいメッシュと、斜面曲率の小さい（斜面横断面形が凹である）メッシュで土砂流出が発生しやすい傾向となった。

過年度成果では縦断曲率を-0.05未満、-0.05以上0.05未満、0.05以上の3区分としていたのに対し、本調査では区分の範囲を広げることにより縦断曲率の大きい（斜面縦断面形が凹である）メッシュと縦断曲率が小さい（斜面縦断面形が凸である）メッシュとともに縦断曲率が0に近い（斜面縦断面形が平滑である）メッシュと比較して土砂流出が発生しやすいという新たな傾向が得られた。

7.5. 航空レーザ計測データより解析した地形情報と森林資源情報を用いた解析結果

過年度成果において強い関係があるとされた土砂流出発生の有無と強い関係があるとされた 10m メッシュ内の「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」の3要素に加えて、森林の情報を説明変数とし、10m メッシュ内の源頭部の有無を目的変数として、数量化Ⅱ類を用いた解析を行った結果を以下に示す。

なお、8.4と同様、球磨村のみ解析対象としている。

7.5.1. 針葉樹人工林内での解析

各森林資源情報は共相関があることが考えられるため、同時に説明変数として用いた解析は行わず、それぞれで独立して解析を行った。また、解析対象のメッシュは資源情報が解析されているスギおよびヒノキの平均樹高 5m 以上のメッシュとした。

表 49 使用した森林資源情報

集計元データ	項目
航空レーザデータによる森林資源解析成果	平均樹高
航空レーザデータによる森林資源解析成果	立木密度
航空レーザデータによる森林資源解析成果	相対幹距比
令和2年度（災害発生年）版森林簿	間伐からの経過年数

表 50 解析対象メッシュ

対象範囲	対象メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
樹種がスギまたはヒノキかつ 平均樹高 5m 以上	602,531	67

1) 解析結果 樹高

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「メッシュ内平均樹高」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 51 解析結果

判別閾値	判別精度 (%)
0.3147	73.84

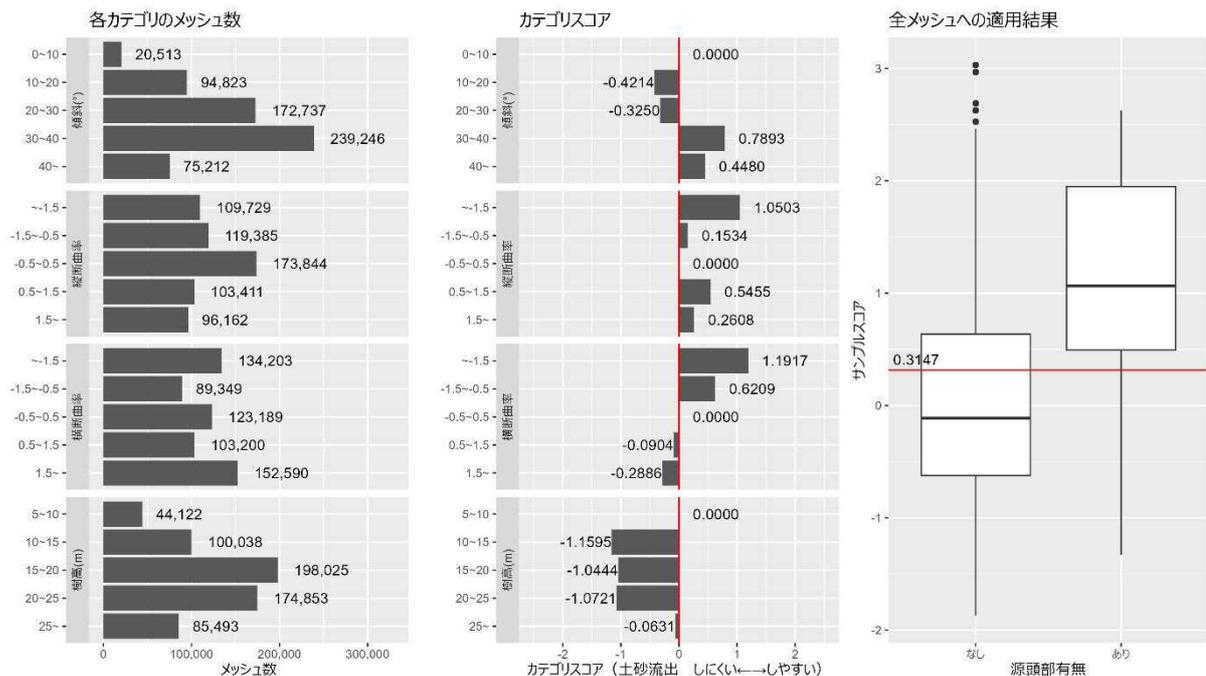


図 34 カテゴリスコア算出結果

2) 解析結果 立木密度

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「メッシュ内立木密度」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 52 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
1.8898	73.87

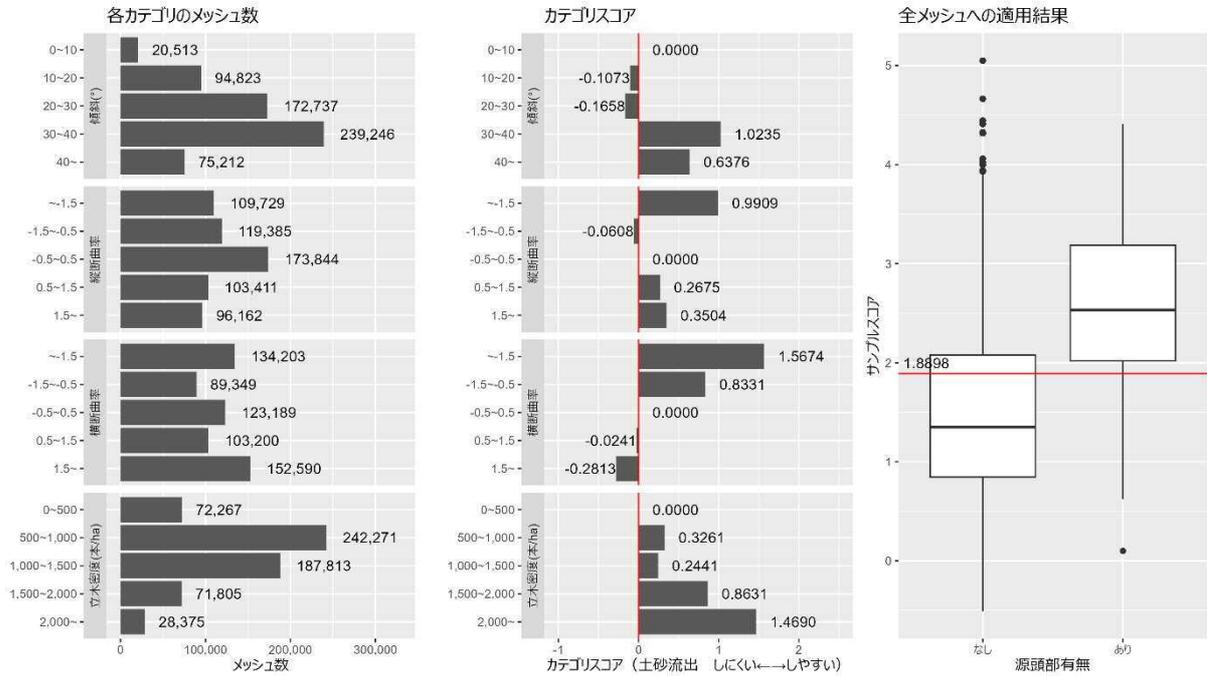


図 35 カテゴリスコア算出結果

3) 解析結果 相対幹距比

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「メッシュ内相対幹距比」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 53 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
-0.1391	74.47

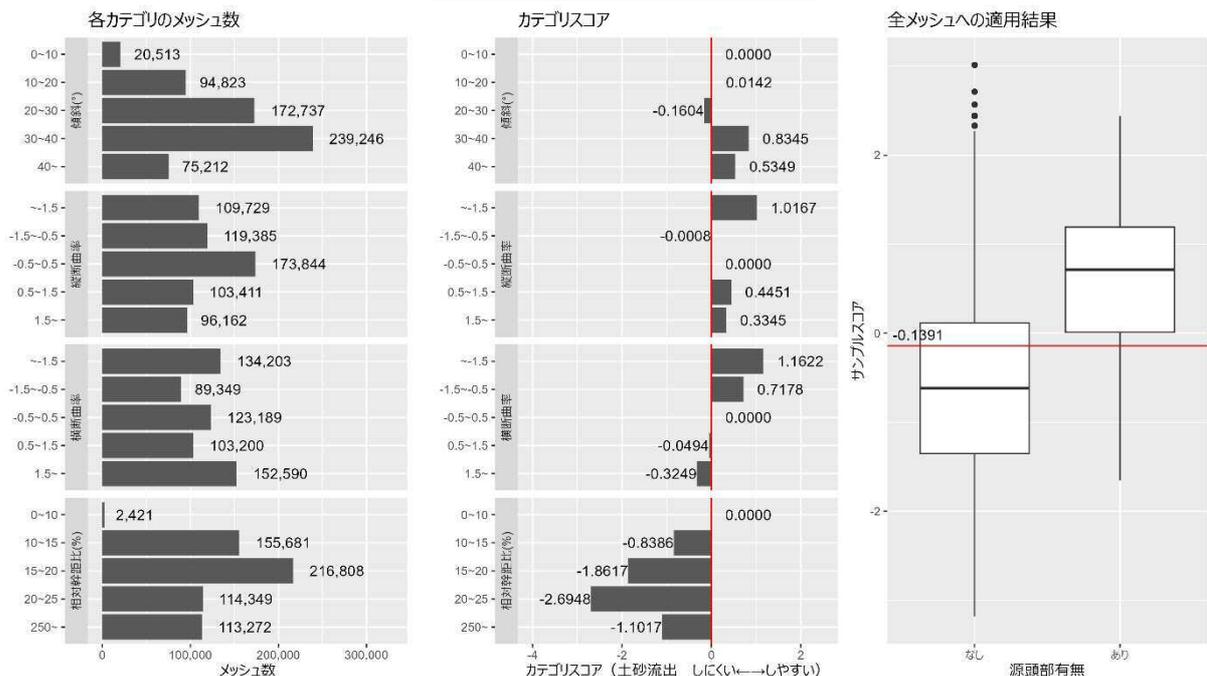


図 36 カテゴリスコア算出結果

4) 解析結果 間伐からの経過年数

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「間伐からの経過年数」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 54 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
1.402	71.20

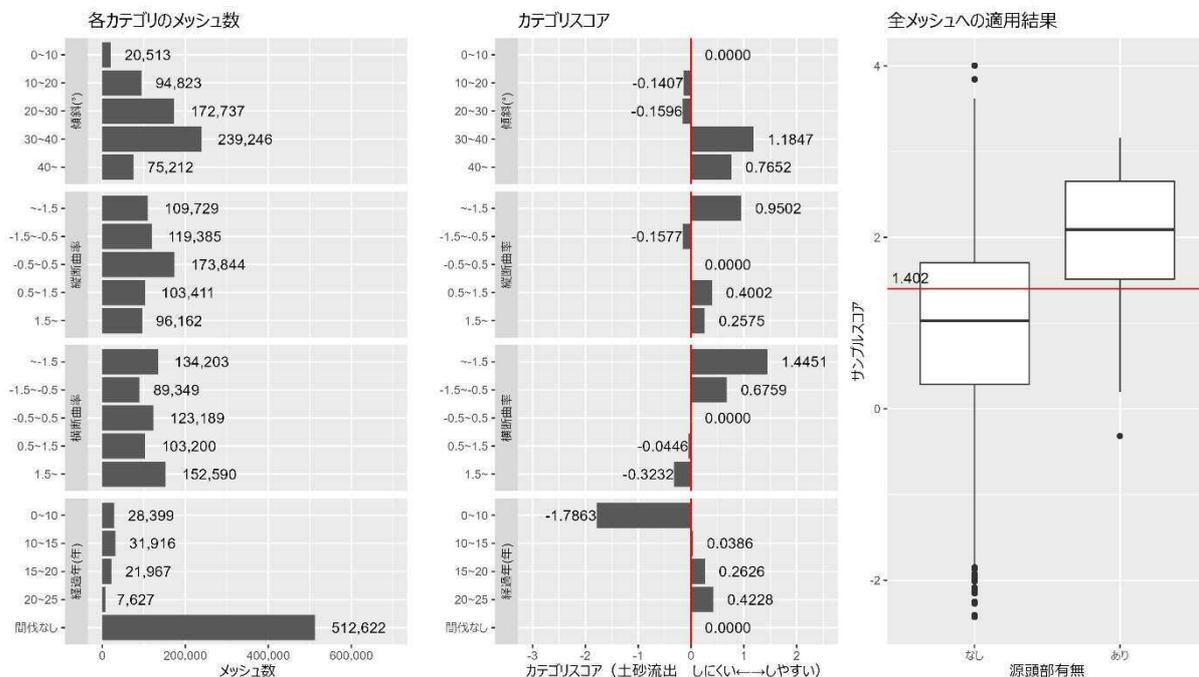


図 37 カテゴリスコア算出結果

7.5.2. 航空レーザ計測成果より解析した地形情報と森林資源情報を用いた解析結果のまとめ

土砂流出発生に与える地形の影響は解析対象全域の結果と比較して概ね整合しているが、人工林内に限定したメッシュでは、傾斜 10° 以上 30° 未満のメッシュが傾斜 0° 以上 10° 未満の平坦な地形と比較して土砂流出が発生しにくい、縦断曲率-1.5 以上-0.5 未満の地形で縦断曲率-0.5 以上 0.5 未満の地形と比較して土砂流出が発生しにくい等の異なる傾向が見られた。

森林資源情報はいずれの説明変数を用いた場合も地形のみでの解析結果と比較して判別精度が向上した。

樹高は 5m 以上 10m 未満および 25m 以上のメッシュで比較的土砂流出が発生しやすくなり、それ以外の区分では大きな差は見られなかった。

立木密度は大きい（密である）森林ほど土砂流出が発生しやすい傾向となった。

相対幹距比は小さい（密である）森林ほど土砂流出が発生しやすい傾向となった一方、25%以上の区分では 15%以上 25%未満の区分と比較して土砂流出が発生しやすい結果となった。

間伐からの経過年数は 10 年未満で最も土砂流出が発生しづらくなり、年数が経つにつれて土砂流出が発生しやすくなる傾向となった。

7.5.3. 路網の影響を考慮したサンプル選択

7.5.1 の結果より、比較的密な森林において土砂流出が発生しやすい傾向にあることが考えられた。過年度成果では路網の有無が土砂流出の発生しやすさに強い影響を与えることが明らかになっていること、本調査における森林情報の補完として周辺の立木密度の最大値をとる手法では路網の幅員分立木密度の小さいメッシュで過大に立木密度が補完されやすいことから、路網のあるメッシュを除外したサンプルで再度解析を行い傾向の違いを確認することで森林の状況による効果を検討した。

表 55 解析対象メッシュ

対象範囲	対象メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
樹種がスギまたはヒノキかつ 平均樹高 5m 以上かつ メッシュ内に路網中心線が無い	556,853	55

1) 解析結果 樹高

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「メッシュ内平均樹高」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 56 解析結果

判別閾値	判別精度 (%)
0.3355	72.48

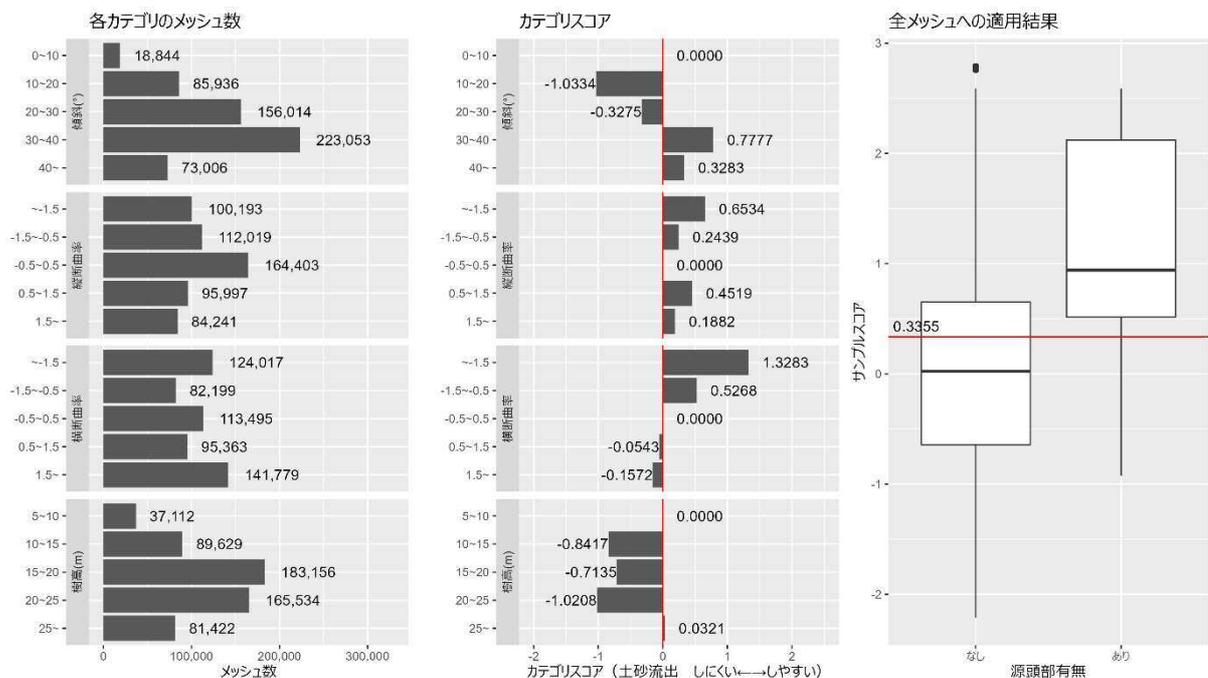


図 38 カテゴリスコア算出結果

2) 解析結果 立木密度

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「メッシュ内立木密度」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 57 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
1.4966	73.84

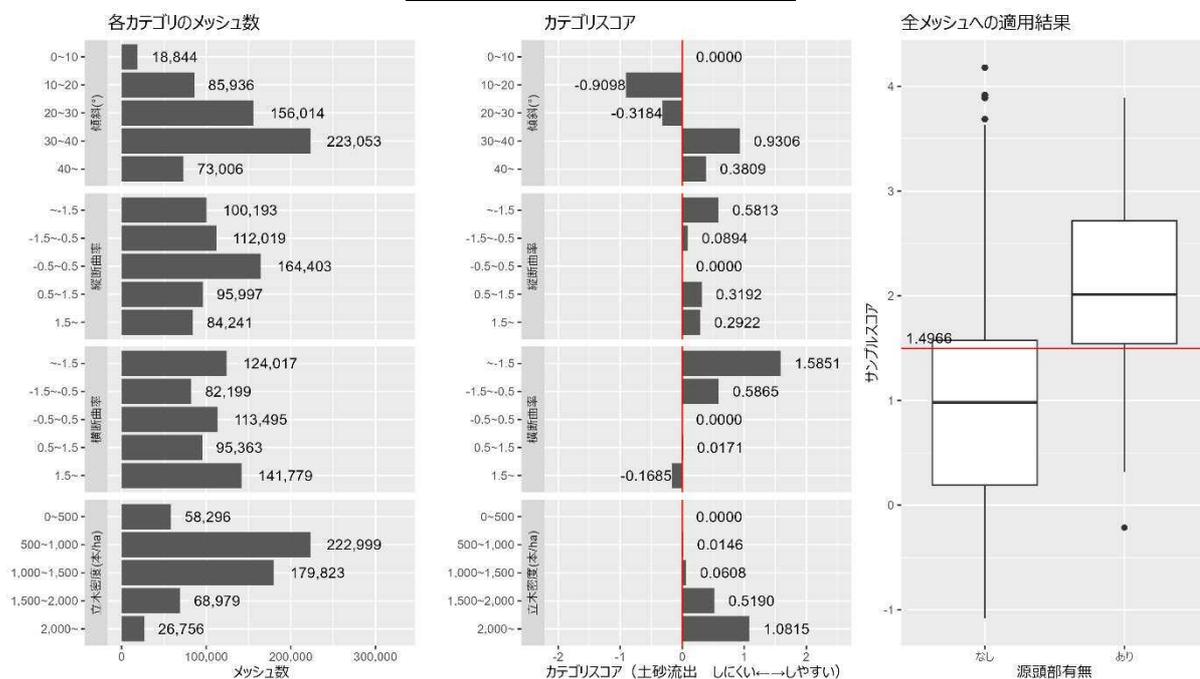


図 39 カテゴリスコア算出結果

3) 解析結果 相対幹距比

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「メッシュ内相対幹距比」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 58 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
-0.0543	73.81

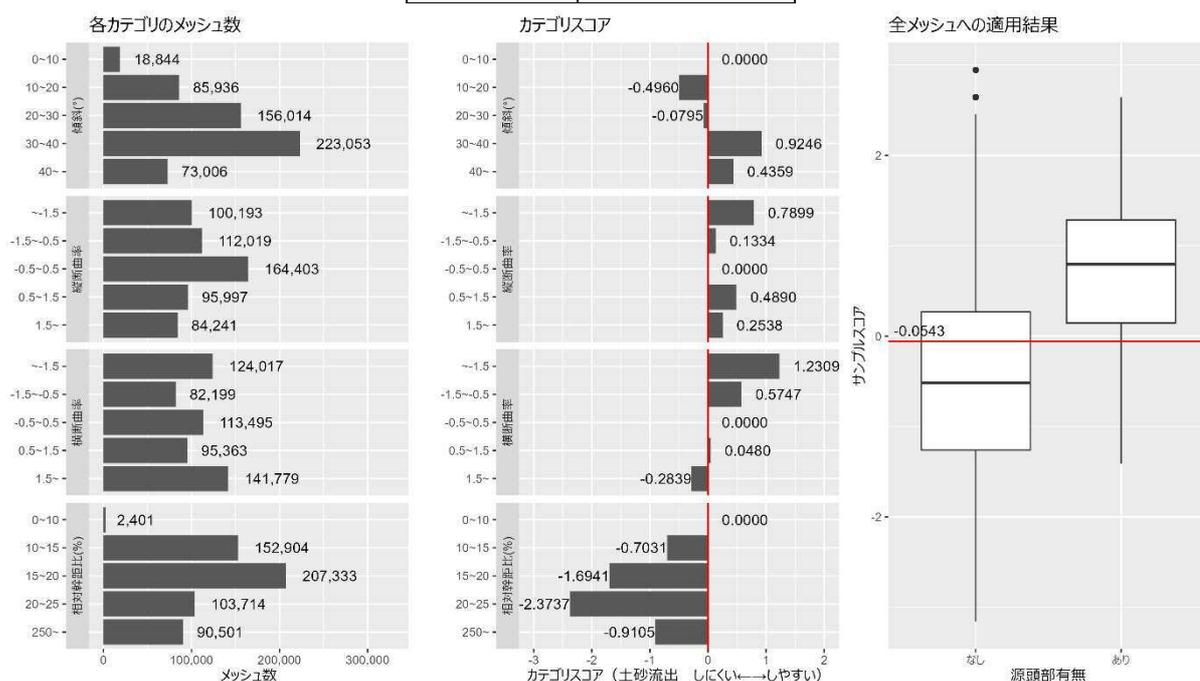


図 40 カテゴリスコア算出結果

4) 解析結果 間伐からの経過年数

「傾斜」、「縦断曲率」、「横断曲率」に加えて「間伐からの経過年数」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 59 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
1.1052	70.63

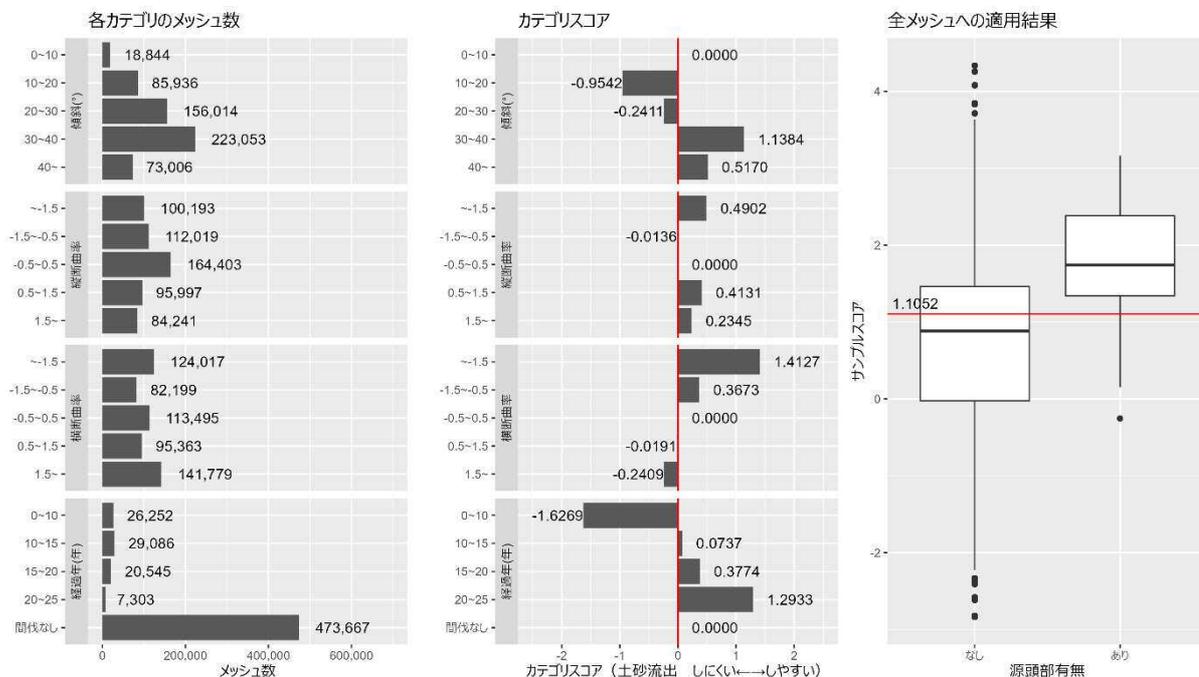


図 41 カテゴリスコア算出結果

7.5.4. 路網の影響を考慮したサンプル選択による解析結果のまとめ

路網の中心線の重なるメッシュを除外して解析を行った結果、除外前の結果と比較して精度、傾向ともに大きな差異は見られなかった。

この結果より、最大値による森林情報の補正は路網の幅員により小さくなる立木密度を過大に補正している可能性は小さいと考えられた。解析の最終結果としては除外を行った結果を用い、以降の解析も森林資源情報を用いる場合は路網の中心線の重なるメッシュを除外する。

なお、この手法によるメッシュの除外では路網密度、路網と源頭部の斜面上下位置関係、路網の切土、盛り土等は考慮されないため、路網が土砂流出発生に与える影響の大きさについては考察できない点に留意する。

7.5.5. 地形の条件を固定したメッシュでの数量比較

人工林内のメッシュの中から過年度調査において土砂流出の発生しやすさへの影響が強いとされた「傾斜 30° 以上」かつ「斜面段打面形が凹」のメッシュのみを抽出し、抽出したメッシュ内で森林資源情報の数量分布を比較した。

比較結果を以下に示す。

表 60 比較対象メッシュ

対象範囲	対象メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
樹種がスギまたはヒノキかつ 平均樹高 5m 以上かつ メッシュ内に路網中心線が無いかつ 傾斜 30° 以上かつ 斜面横断面形凹	133,524	55

1) 樹高

表 61 集計値

最小値 (m)	中央値 (m)	平均値 (m)	最大値 (m)
5.0	20.9	20.4	39.7

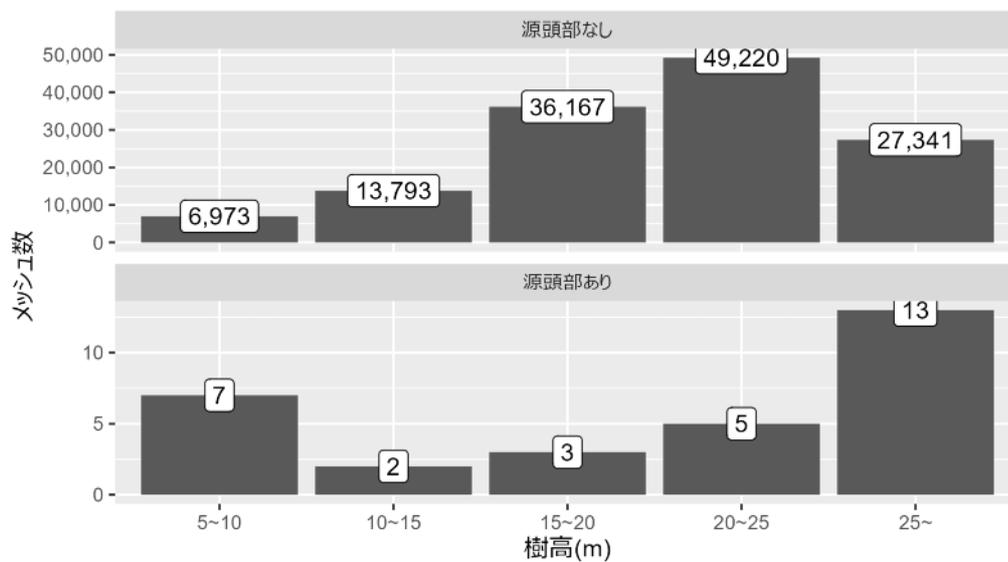


図 42 樹高分布

2) 立木密度

表 62 集計値

最小値(本/ha)	中央値(本/ha)	平均値(本/ha)	最大値(本/ha)
100	900	986.8	5,100

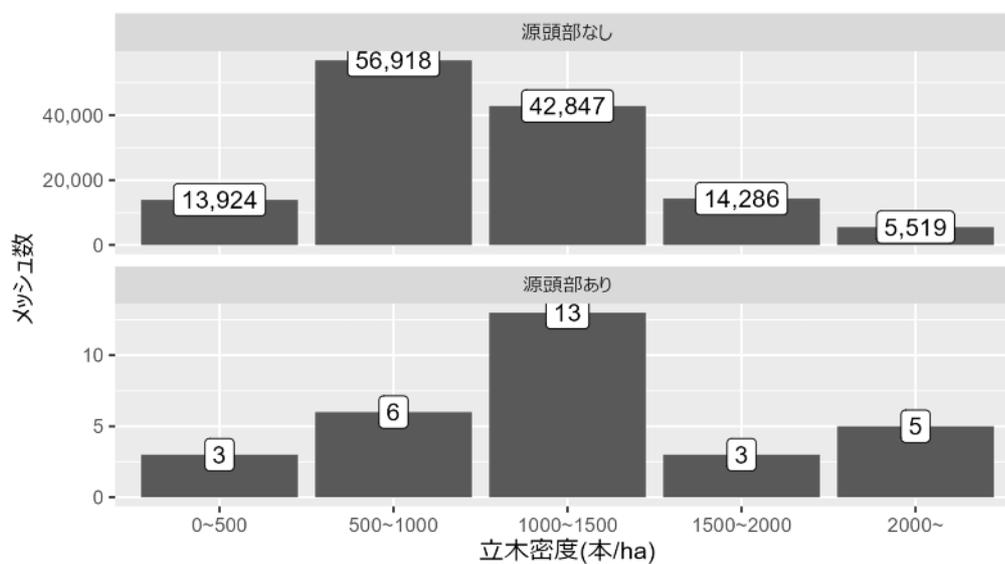


図 43 立木密度分布

3) 相对幹距比

表 63 集計値

最小値(%)	中央値(%)	平均値(%)	最大値(%)
6.9	16.5	18.5	200.0

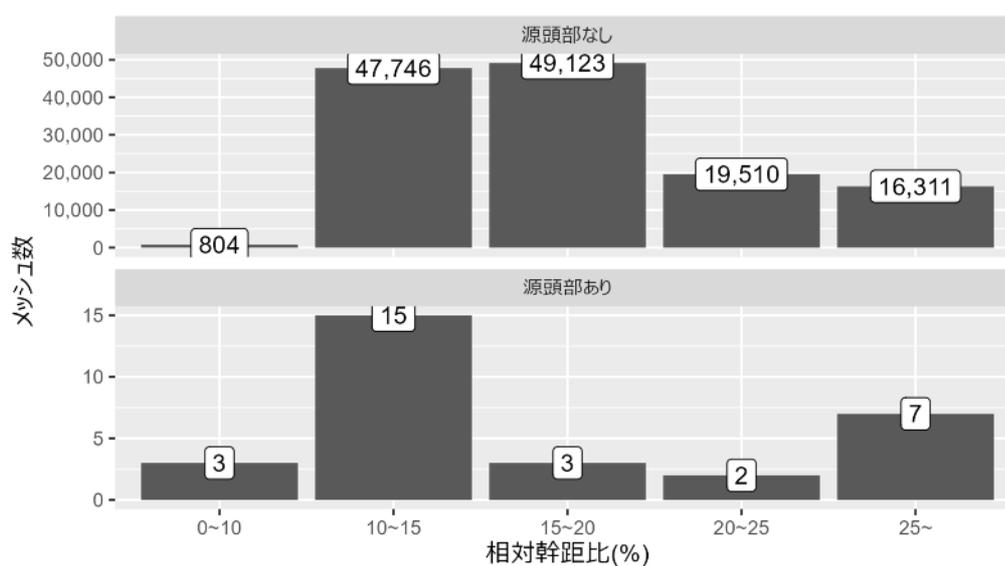


図 44 相对幹距比分布

4) 間伐からの経過年数

表 64 集計値（間伐なしを除く）

最小値(年)	中央値(年)	平均値(年)	最大値(年)
3	13	14.0	24

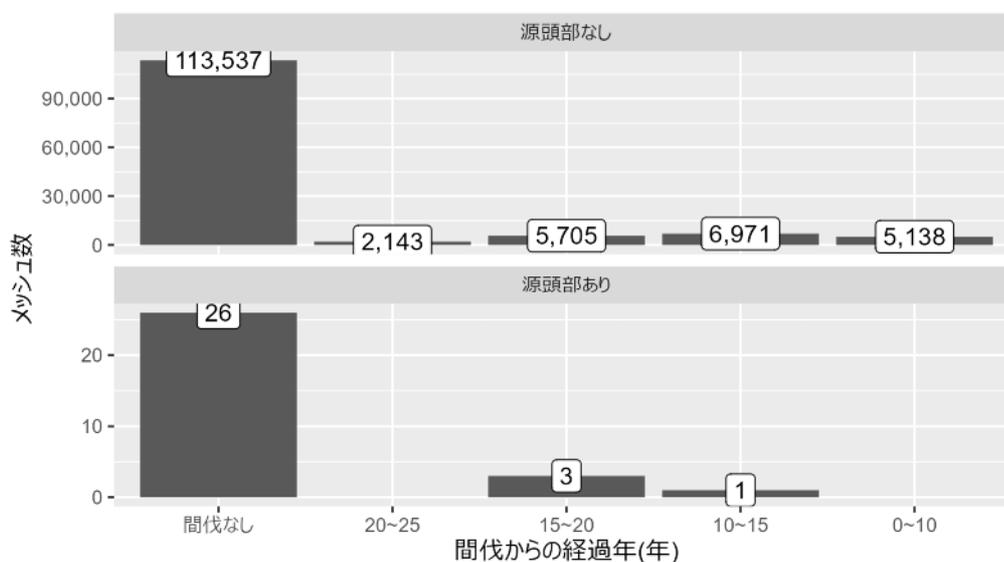


図 45 間伐からの経過年分布

「傾斜 30°」以上かつ「斜面横断面形凹」で地形条件を固定したメッシュ内における森林資源情報ごとのメッシュ数量の分布比較より、推測される土砂流出の発生しやすさと森林資源情報との関係は数量化Ⅱ類の解析結果より解釈される傾向とほぼ同じ傾向となった。このことから、数量化Ⅱ類による解析はメッシュの条件を固定せずに説明変数とする項目単体での土砂流出の発生しやすさに与える影響を正しく評価できる手法であると考えられた。

7.6. 基盤地図 DEM より解析した地形情報と森林情報を用いた解析結果

災害前の航空レーザ計測成果の無い地域での解析を想定し、基盤地図 DEM より作成した「傾斜」、「凹凸値」および森林資源情報を説明変数、10m メッシュ内の源頭部の有無を目的変数として、数量化Ⅱ類で解析を行った（球磨村、丸森町）。7.5.3 と同様に、路網森林資源情報を用いた解析を行う場合は路網のあるメッシュを対象外とした。

7.6.1. 球磨村解析結果

1) 解析結果 地形情報のみ

「傾斜」、「凹凸値」のみを説明変数として解析を行った結果を以下に示す。以降、解析対象メッシュ数は7.4 および7.5.3 と同様とする。

表 65 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
3.0213	58.74

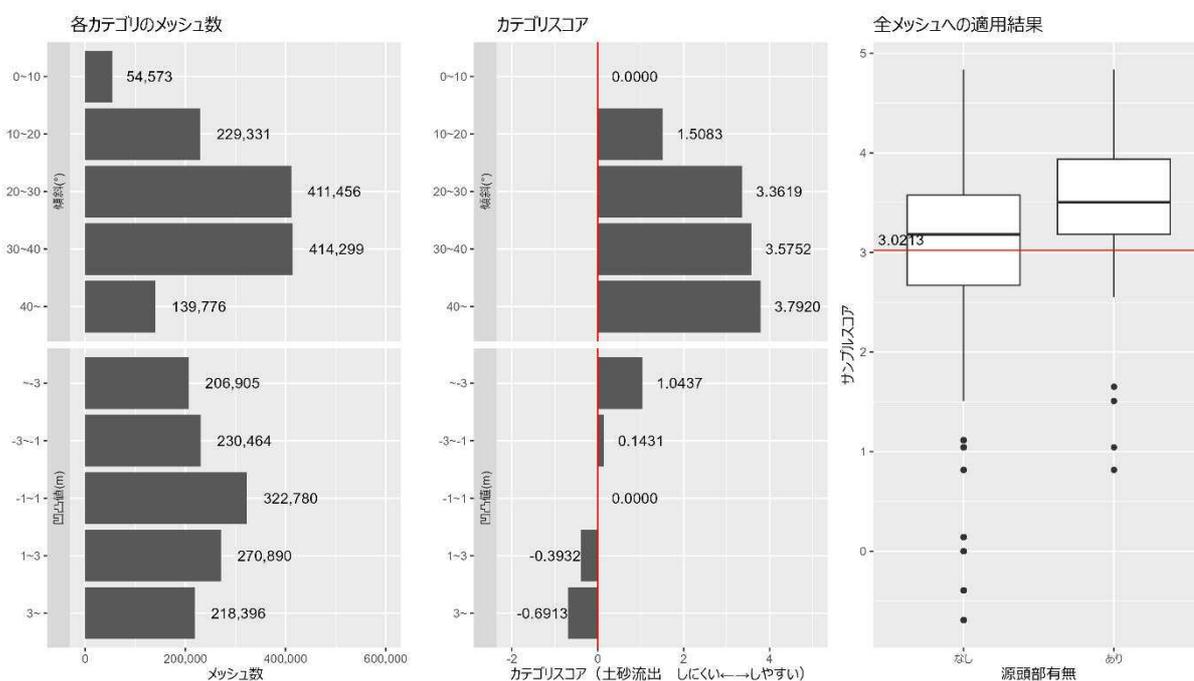


図 46 カテゴリスコア算出結果

2) 解析結果 樹高

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「メッシュ内平均樹高」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 66 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
1.3176	68.51

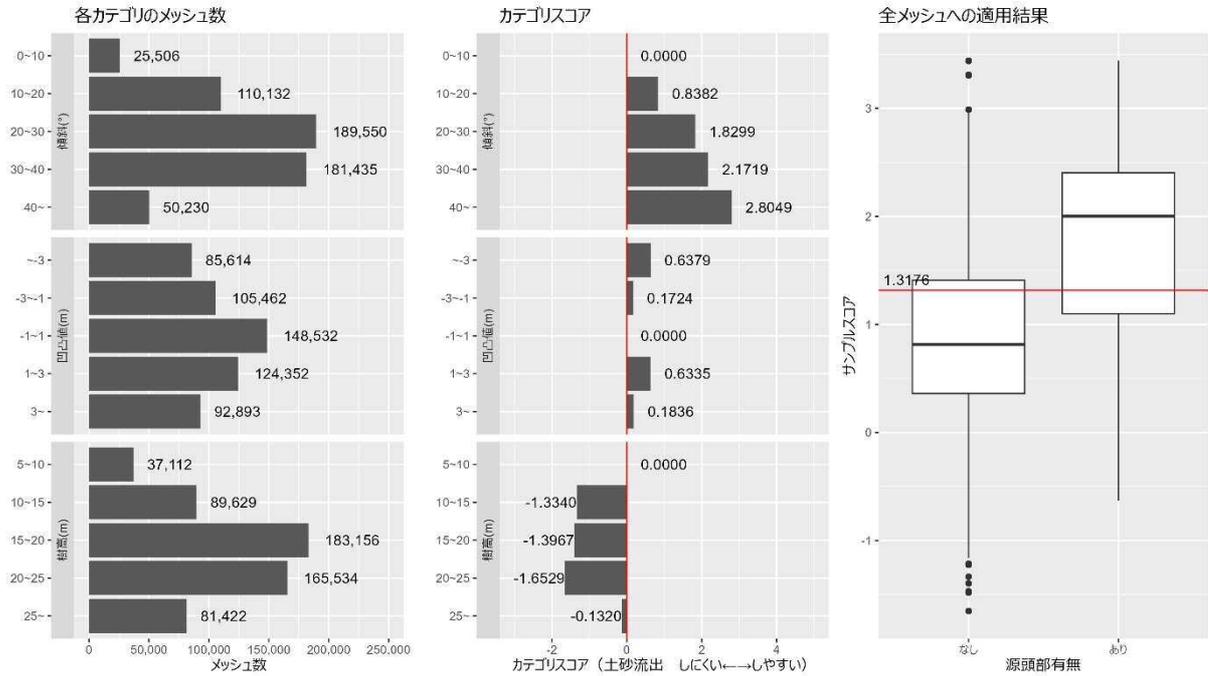


図 47 カテゴリスコア算出結果

3) 解析結果 立木密度

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「メッシュ内立木密度」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 67 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
2.8719	65.73

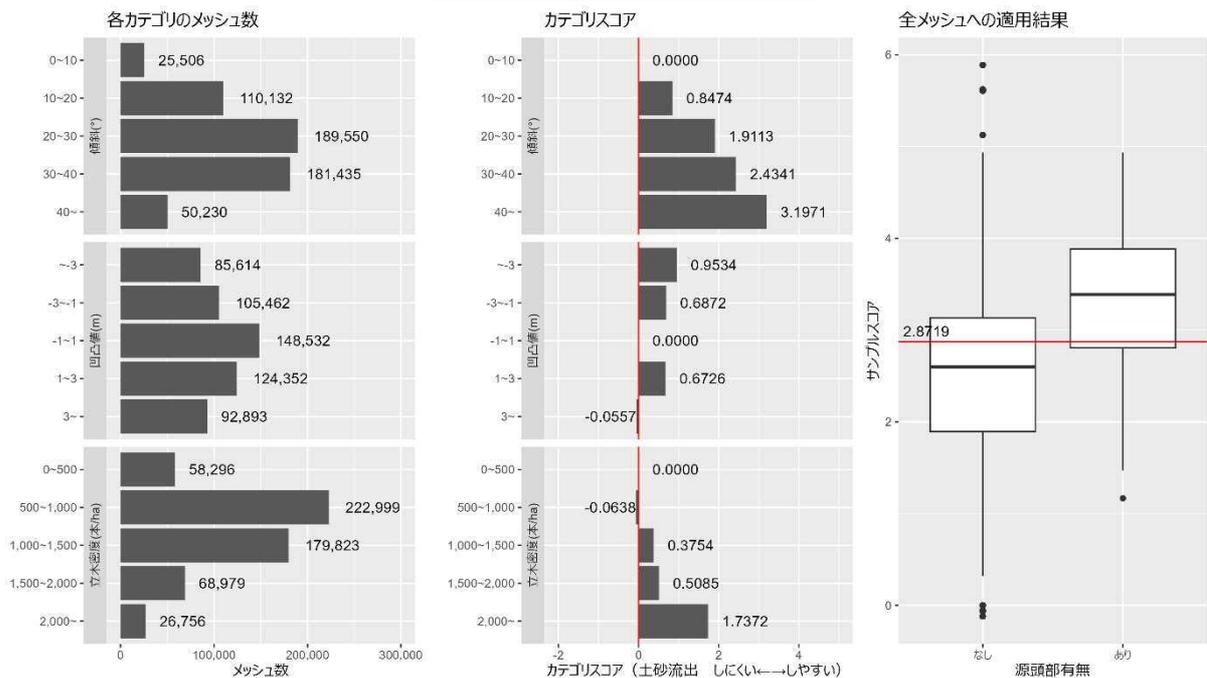


図 48 カテゴリスコア算出結果

4) 解析結果 相対幹距比

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「メッシュ内相対幹距比」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 68 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
0.1552	71.41

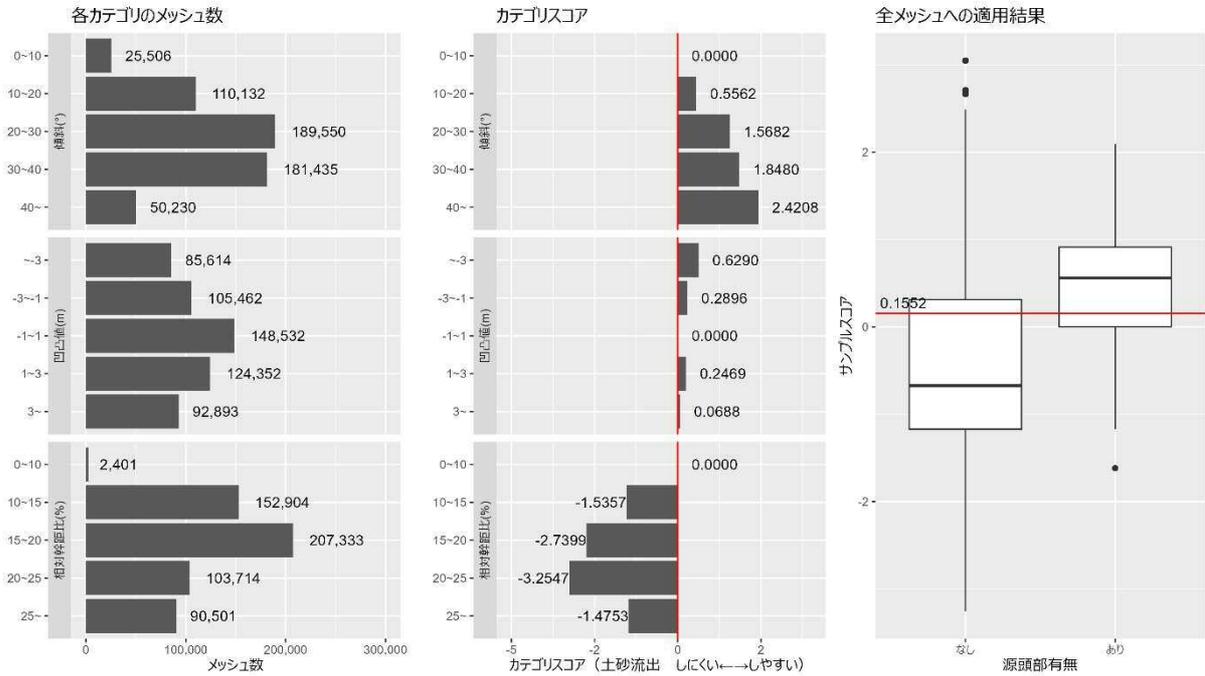


図 49 カテゴリスコア算出結果

5) 解析結果 間伐からの経過年数

「傾斜」、「凹凸値」に加えて間伐からの経過年数を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 69 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
2.4344	65.15

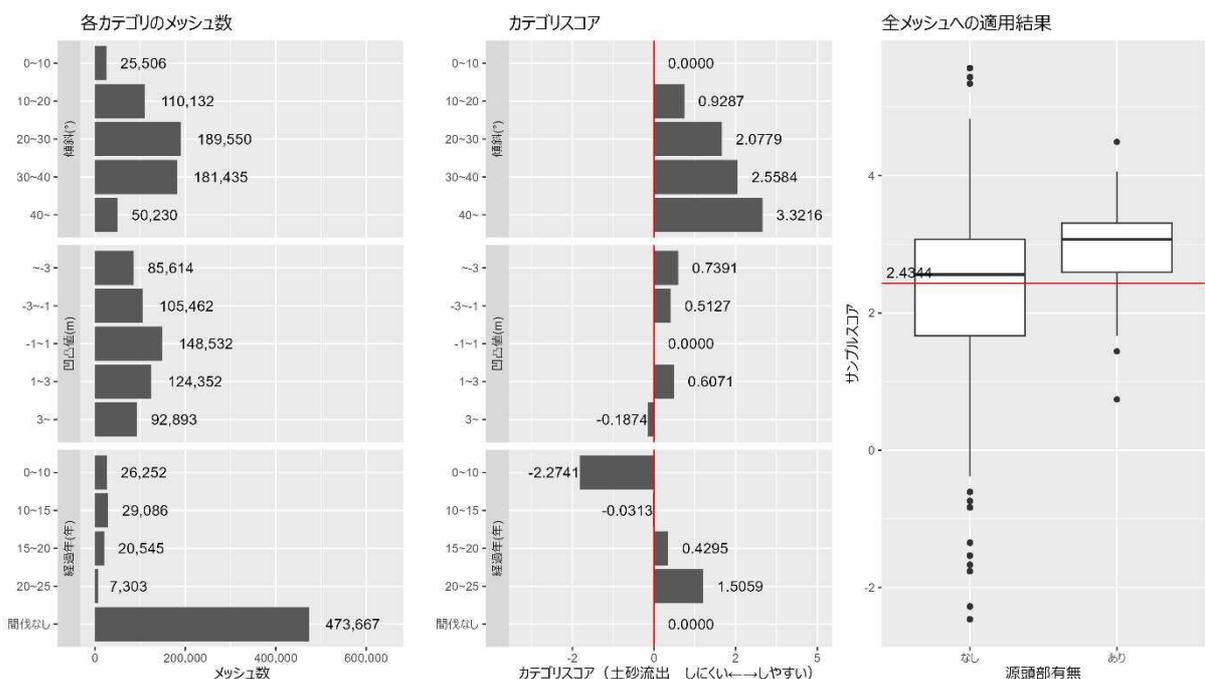


図 50 カテゴリスコア算出結果

7.6.2. 球磨村解析結果のまとめ

「傾斜」、「凹凸値」のみで解析した結果では、航空レーザ計測成果を用いた解析結果と同じく、傾斜の大きい地形ほど土砂流出が発生しやすい傾向となった。また、凹凸値は小さい（凹地形である）ほど土砂流出が発生しやすい傾向となったが、カテゴリスコアの幅が小さいことから、傾斜と比較して土砂流出の発生に与える影響は小さいことが考えられた。

森林資源情報の影響は航空レーザ計測成果を用いた解析結果と同様となった。

7.6.3. 丸森町解析結果

1) 解析結果 地形情報のみ

「傾斜」、「凹凸値」のみを説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 70 解析対象メッシュ

対象範囲	対象メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
基盤地図 DEM 整備範囲	365,912	171

表 71 解析結果

判別閾値	判別精度 (%)
2.1785	66.56

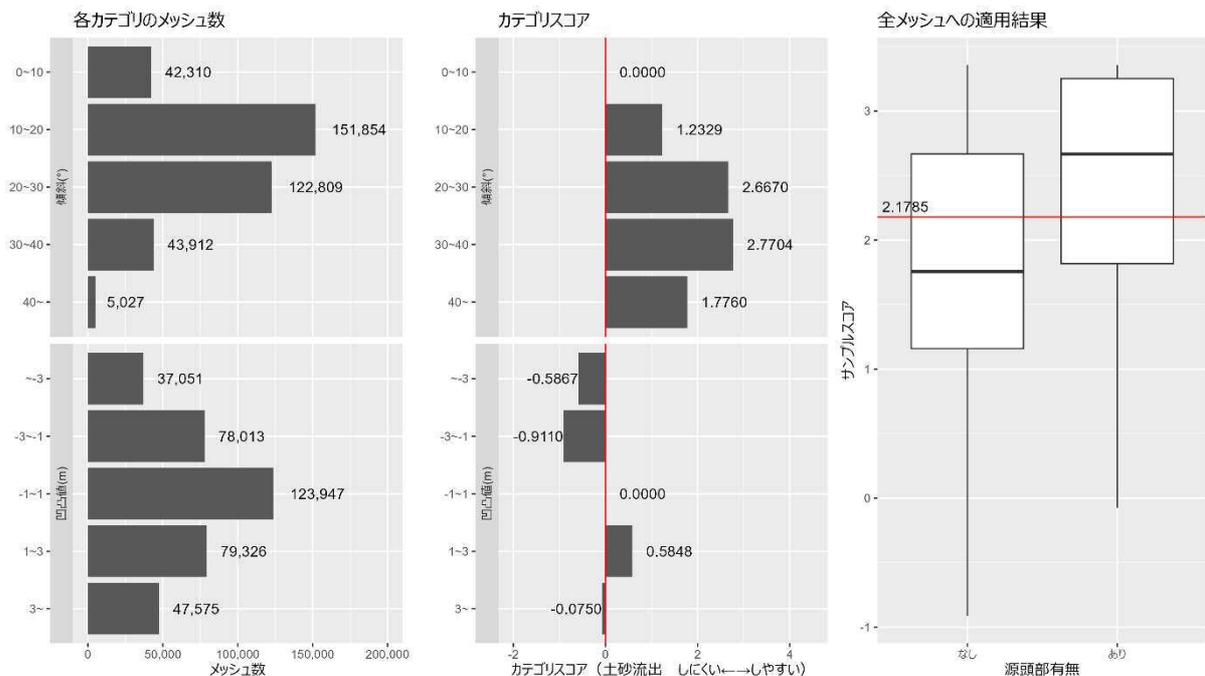


図 51 カテゴリースコア算出結果

2) 解析結果 樹高

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「メッシュ内平均樹高」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。丸森町ではスギ、ヒノキに加えマツ類を森林資源解析対象とした。

表 72 解析対象メッシュ

対象範囲	対象メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
樹種がスギまたはヒノキまたはマツ類かつ 平均樹高 5m 以上かつ メッシュ内に路網中心線が無い	172,309	31

表 73 解析結果

判別閾値	判別精度 (%)
0.2876	80.40

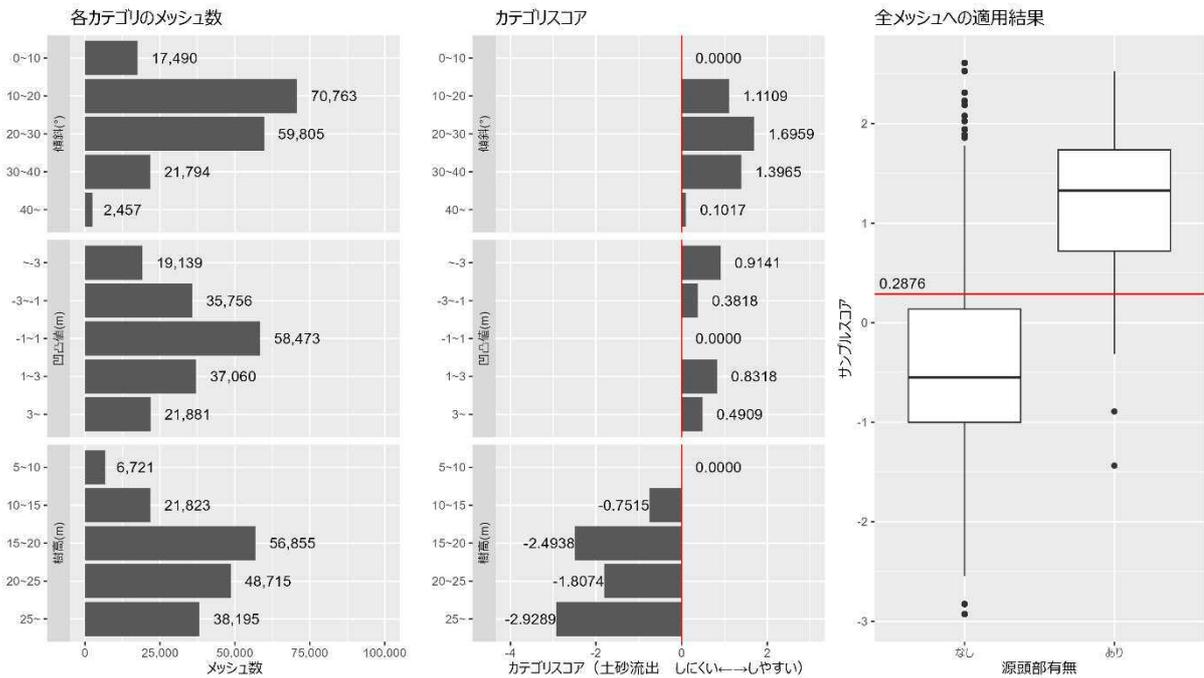


図 52 カテゴリスコア算出結果

3) 解析結果 立木密度

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「メッシュ内平均樹高」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。丸森町ではスギ、ヒノキに加えマツ類を森林資源解析対象とした。

表 74 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
3.4682	85.11

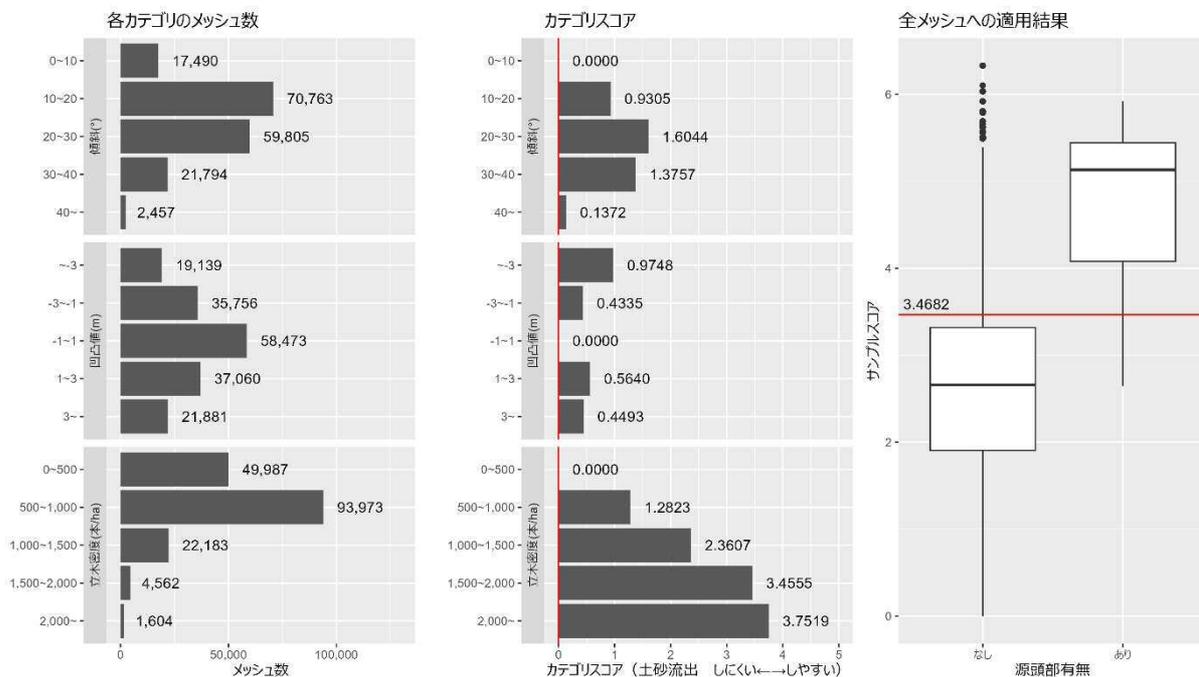


図 53 カテゴリスコア算出結果

4) 解析結果 相対幹距比

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「メッシュ内相対幹距比」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 75 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
2.0420	66.18

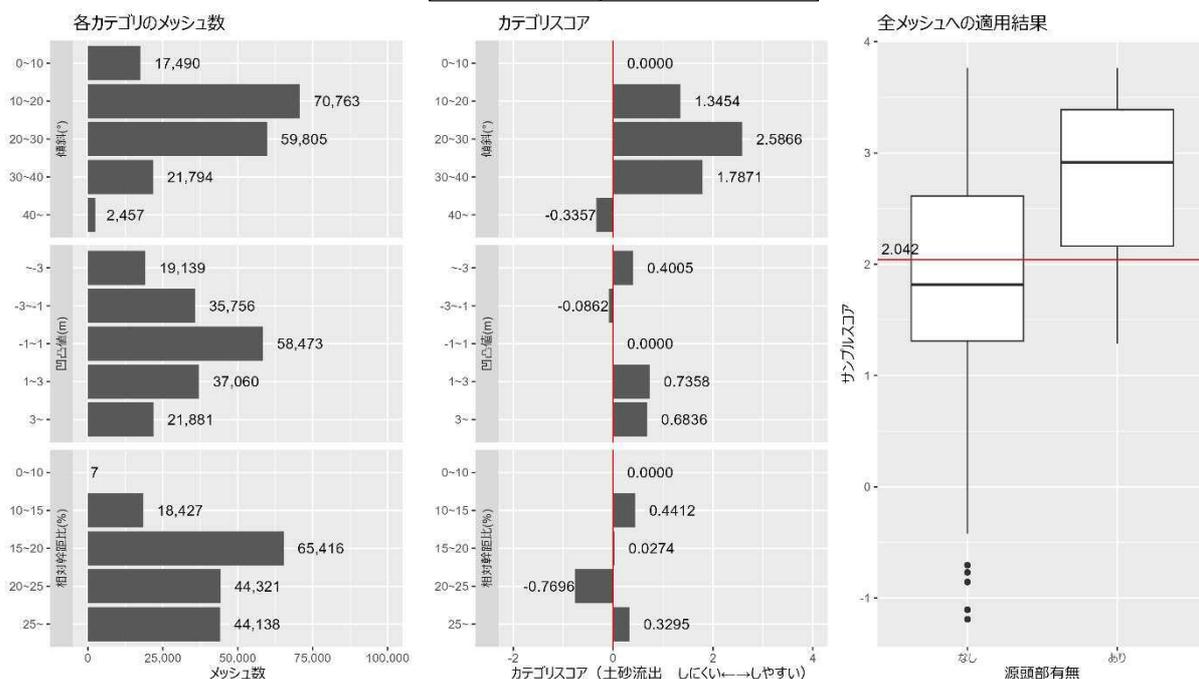


図 54 カテゴリスコア算出結果

5) 解析結果 間伐からの経過年数

「傾斜」、「凹凸値」に加えて「間伐からの経過年数」を説明変数として解析を行った結果を以下に示す。

表 76 解析結果

判別閾値	判別精度(%)
2.2464	69.56

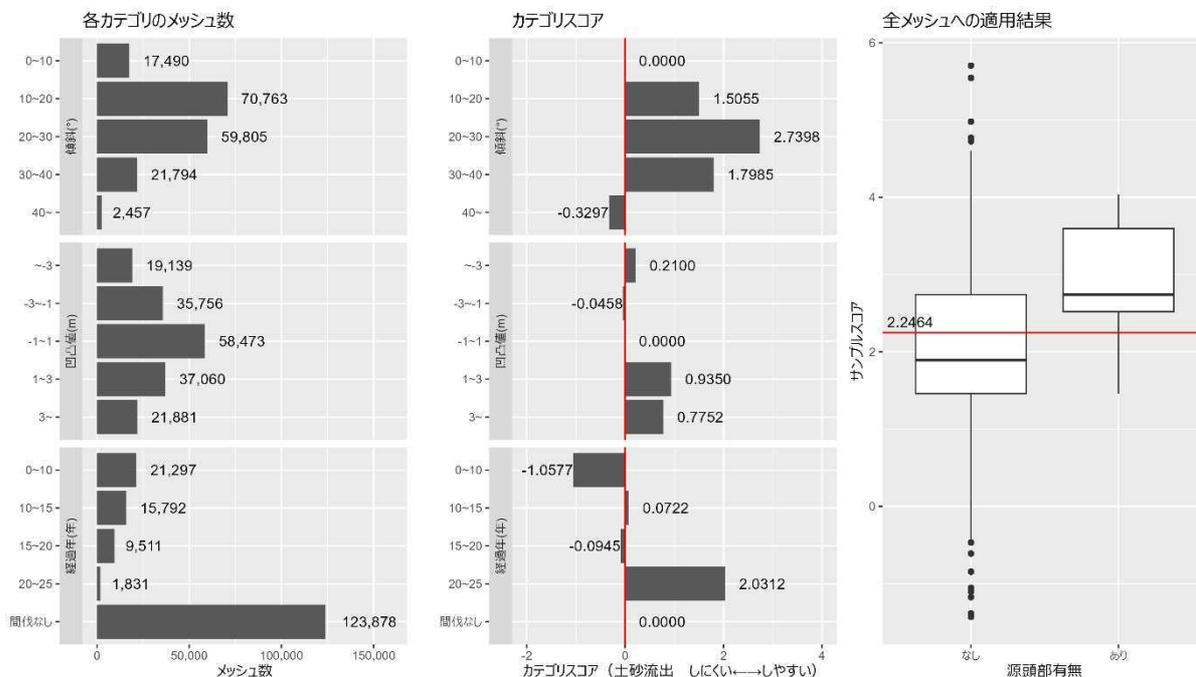


図 55 カテゴリスコア算出結果

7.6.4. 丸森町解析結果のまとめ

「傾斜」、「凹凸値」のみで解析した結果では、球磨村と比較して地形の要因による影響がより曖昧となる結果となった。傾斜は比較的大きい地形で土砂流出が発生しやすい傾向が球磨村と共通して見られた一方、凹凸値の影響は小さく、一様な傾向が見られなかった。

森林資源情報の影響は基本的に球磨村と同様の傾向となったが、樹高を説明変数として用いた場合の判別精度が 80.40%と高く、樹高を計算に用いる相対幹距比の影響が一様でない結果となった。

7.6.5. 地域間比較

1) 地形

全メッシュを対象として地形情報のみを用いた解析結果では、傾斜のカテゴリスコアは球磨村、丸森町いずれの地域においても急であるほど土砂流出が発生しやすい傾向にある結果となった。一方、人工林内に対象メッシュを限定した解析では異なる傾向となり、地域間で一様な傾向は見られなかった。

凹凸値のカテゴリスコアは球磨村では凹凸値が小さいほど、すなわち凹地形であるほど土砂流出が発生しやすいという傾向となったが、丸森町では一様な傾向が見られなかった。

2) 森林資源情報

樹高は球磨村、丸森町いずれも 5m 以上 10m 未満の区分で最も土砂流出が発生しやすくなり、それ以上の区分ではカテゴリスコアの大きな変動は見られなかった。

立木密度はいずれの地域も立木密度が高い森林ほど土砂流出が発生しやすい傾向となった。

相対幹距比は球磨村では相対幹距比の小さい密な森林ほど土砂流出が発生しやすくなる一方、相対幹距比が 25%以上の疎な森林も相対幹距比が 10%以上 25%未満の森林と比較して土砂流出が発生しやすい傾向となった。一方で、丸森町では相対幹距比と土砂流出の発生しやすさに一様な傾向が見られず、カテゴリスコアの幅（影響の大きさ）も小さい傾向となった。

間伐年数は球磨村、丸森町いずれも間伐からの経過年数が 0 年以上 10 年未満で土砂流出が発生しにくくなり、その後年数が経つにつれ土砂流出が発生しやすくなる傾向となった。ただし、間伐の記録はサンプル数に偏りが大きいいため、一概に傾向を把握することは困難であることに留意する。

7.7. 岩国市への適用

基盤地図 DEM を用いた解析で得られた球磨村、丸森町のカテゴリスコアおよび判別閾値（以下、球磨村モデル、丸森町モデル）を岩国市の解析対象範囲に対して適用した。

7.7.1. 検証対象範囲

岩国市の対象範囲内で基盤地図 DEM 整備範囲内の全メッシュを対象とし、対象とする土砂流出は 2018 年から 2023 年の期間に発生したものとした。

表 77 解析対象メッシュ

対象範囲	対象メッシュ数	源頭部ありメッシュ数
基盤地図 DEM 整備範囲内	320, 867	7

7.7.2. 検証に使用するモデル

土砂流出源頭部はいずれも人工林外であったため、説明変数は基盤地図 DEM より解析可能な地形情報である傾斜、凹凸値のみのモデルを用いた。

表 78 使用したモデルのカテゴリスコア

項目	カテゴリ	球磨村モデルのカテゴリスコア	丸森町モデルのカテゴリスコア
傾斜(°)	0~10	0	0
	10~20	1.5083	1.2329
	20~30	3.3619	2.6670
	30~40	3.5752	2.7704
	40~	3.7920	1.7760
凹凸値(m)	~-3	1.0437	-0.5867
	-3~-1	0.1431	-0.9110
	-1~1	0	0
	1~3	-0.3932	0.5848
	3~	-0.6913	-0.0750
判別閾値		3.0213	2.1785

検証対象範囲内における各カテゴリのメッシュ数分布を以下に示す。

表 79 傾斜集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
0.0	18.1	18.5	54.1

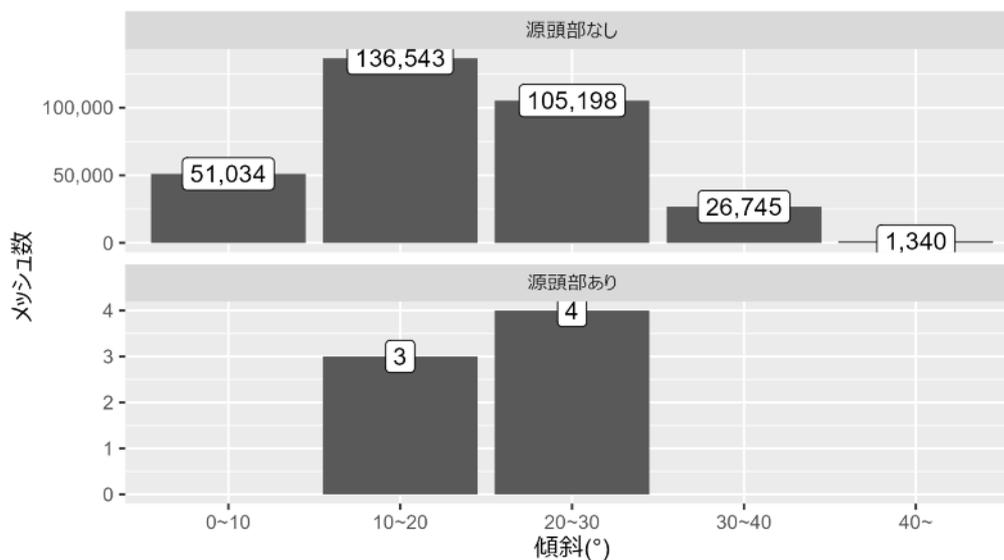


図 56 傾斜分布

表 80 凹凸値集計値

最小値(°)	中央値(°)	平均値(°)	最大値(°)
-52.0	0.2	2.8	110.2

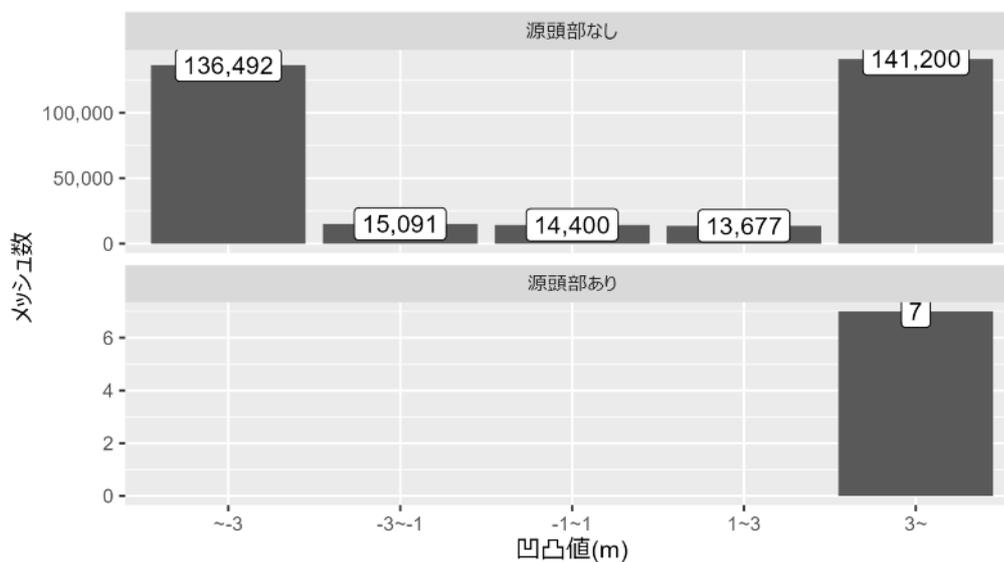


図 57 凹凸値分布

7.7.3. 検証結果

球磨村モデル、丸森町モデルをそれぞれ適用した結果は以下の通りとなった。なお、球磨村、丸森町での解析と同様に、精度は源頭部のあるメッシュと、源頭部のあるメッシュと同数の源頭部の無いメッシュを組み合わせさせたサンプル 100 通りで算出した結果の平均値とした。

表 81 検証結果

	球磨村モデル	丸森町モデル
判別精度 (%)	40.8	64.1

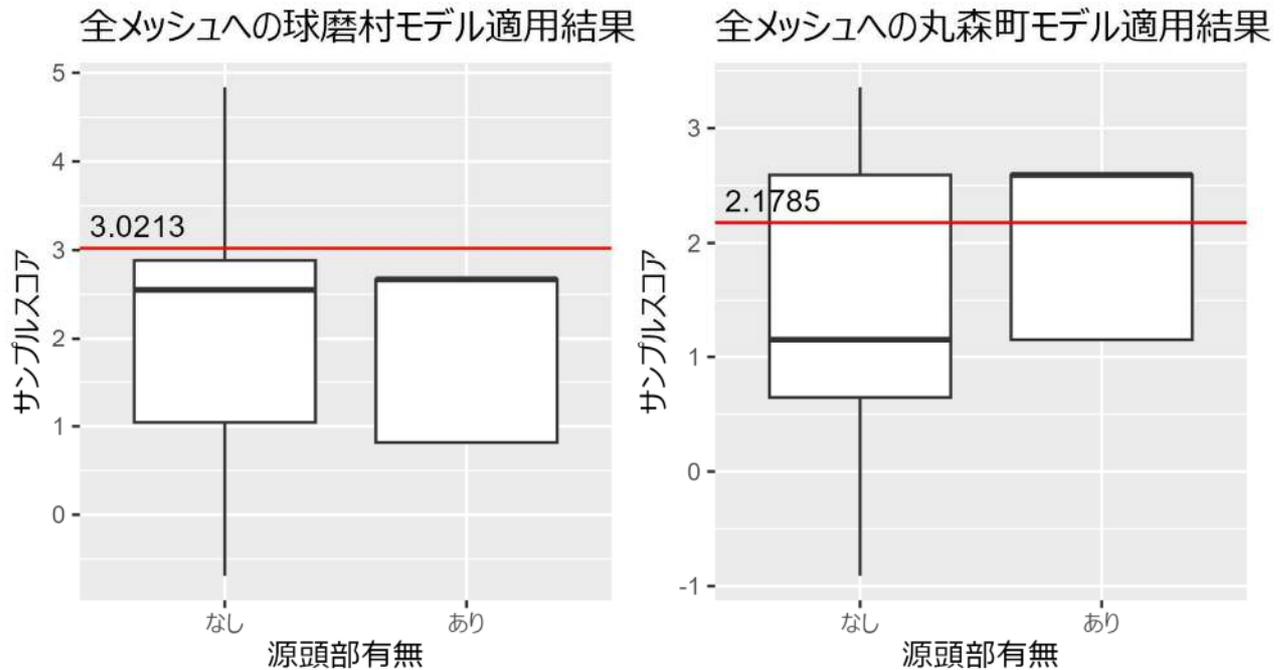


図 58 全メッシュへの適用結果比較

検証の結果、岩国市では球磨村モデルと比較して丸森町モデルがより適用しやすいことが明らかになった。

各カテゴリのヒストグラムを確認すると、30°以上の急傾斜地に源頭部のあるメッシュが分布していないこと、凹凸値が3m以上の凸地形に源頭部のあるメッシュがすべて分布していることから、より傾斜の影響が小さく、凹地形ほど土砂流出しやすいという傾向の無い丸森町モデルがより適合したと考えられる。

8. 現地調査

現地調査は、衛星画像や航空レーザーデータ等に基づき判読・生成した各種データ（森林変化地、土砂流出地、路網など）から得られた解析の傾向と比較して、同様の傾向が他の地域においても認められるか確認を行った。また、併せて現地精通者へのヒアリングを実施した。得られた情報については分析結果と照らし合わせ、土砂流出の要因分析に用いるとともに、今後の対策の在り方について整理することとした。

調査対象地は伊豆及び浜松地区の全 21 か所選定し、調査を行った（図 59 図 60）。なお、本記事では、土砂流出や崩壊跡地が認められた箇所について記載することとした。

8.1. 現地調査概要

現地調査の概要を表 82 に示す。現地調査に先立ち伊豆地区では、伊東市役所、田方森林組合、浜松地区では、引佐森林組合と協議し、土砂流出状況や現地通行状況、施業方法について情報収集を行った。

表 82 現地調査の概要

伊豆地区	
調査日	令和 6 年 1 月 9 日、10 日
場所	静岡県伊東市（：地点 I-1）2020 年～2021 年間伐実施箇所（土砂流出あり） 静岡県伊東市（：地点 I-2）2020 年～2021 年間伐実施箇所 静岡県伊豆市（：地点 I-3）間伐記録なし（崩壊跡地あり） 静岡県伊豆市（：地点 I-4）間伐記録なし（崩壊跡地あり） 静岡県伊豆市（：地点 I-5）間伐記録なし（崩壊跡地あり） 静岡県伊豆市（：地点 I-6）間伐記録なし（崩壊跡地あり） 静岡県伊豆市（：地点 I-7）間伐記録なし（崩壊跡地あり） 静岡県伊豆市（：地点 I-8） 静岡県伊豆市（：地点 I-9） 静岡県伊豆市（：地点 I-10） 静岡県伊豆市（：地点 I-11） 静岡県伊豆市（：地点 I-12）
浜松地区	
調査日	令和 6 年 1 月 21 日、22 日
場所	静岡県浜松市（：地点 H-1）2016 年頃に間伐実施（2018 年崩壊 2020 年山腹工施工済み） 静岡県浜松市（：地点 H-2）2016 年頃に間伐実施（2023 年崩壊 2025 年山腹工施工中） 静岡県浜松市（：地点 H-3） 静岡県浜松市（：地点 H-4） 静岡県浜松市（：地点 H-5） 静岡県浜松市（：地点 H-6） 静岡県浜松市（：地点 H-7）2018 年頃に間伐実施、2021 年に作業道開設、（2023 年崩壊 2025 年山腹工施工中） 静岡県浜松市（：地点 H-8） 静岡県浜松市（：地点 H-9）2018 年頃に間伐実施（倒木被害あり）
調査内容	<ul style="list-style-type: none"> 判読結果の精度確認 崩壊地周辺の森林状況（レーザーデータがない箇所については必要に応じて円形プロット調査による立木密度（本/ha）、樹高(m)、胸高直径（cm）を計測 土砂流出の痕跡の確認、表層土や路網の侵食の様子など土砂流出の要因を調査

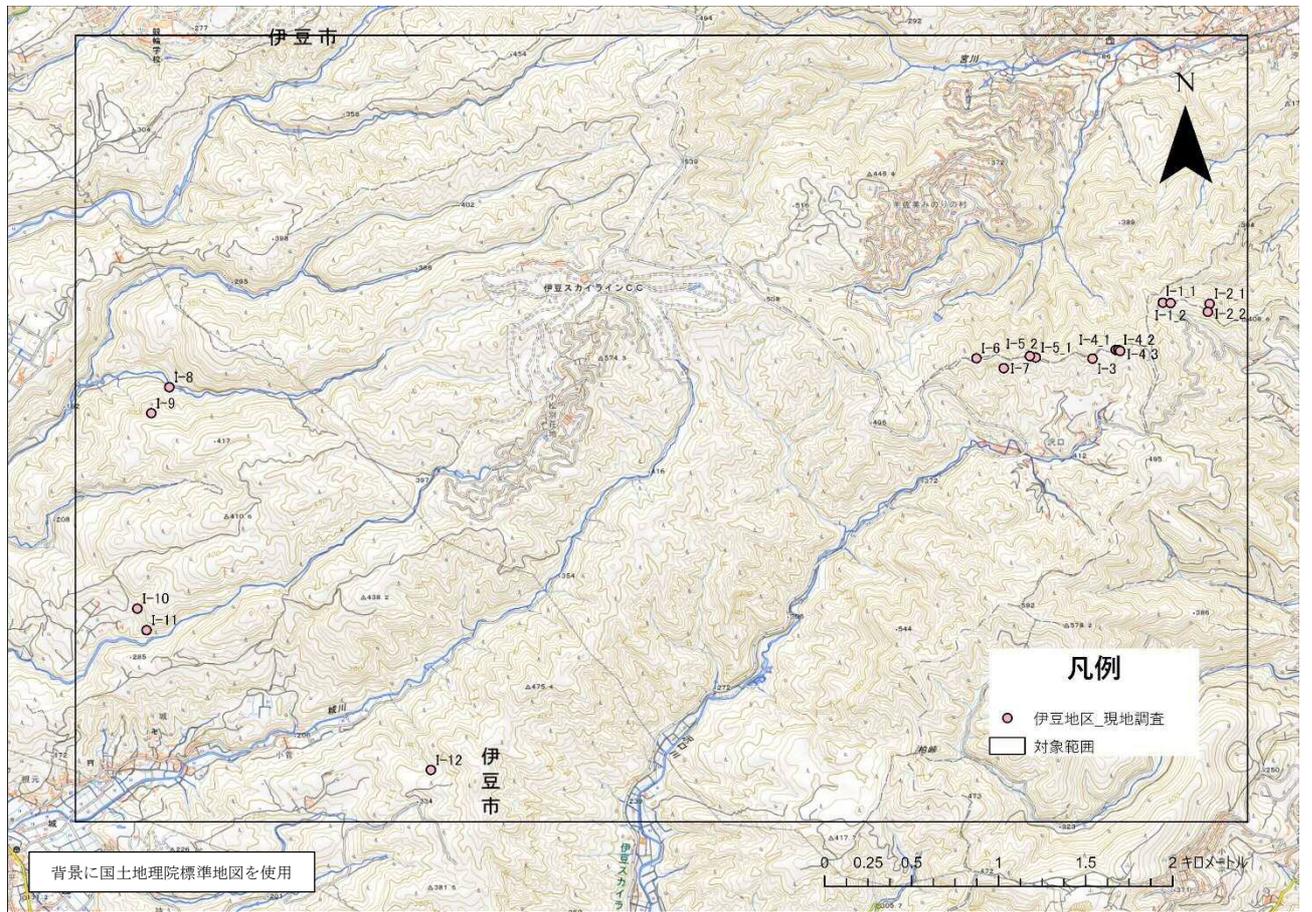


図 59 現地調査予定箇所図：伊豆地区（背景：地理院地図）

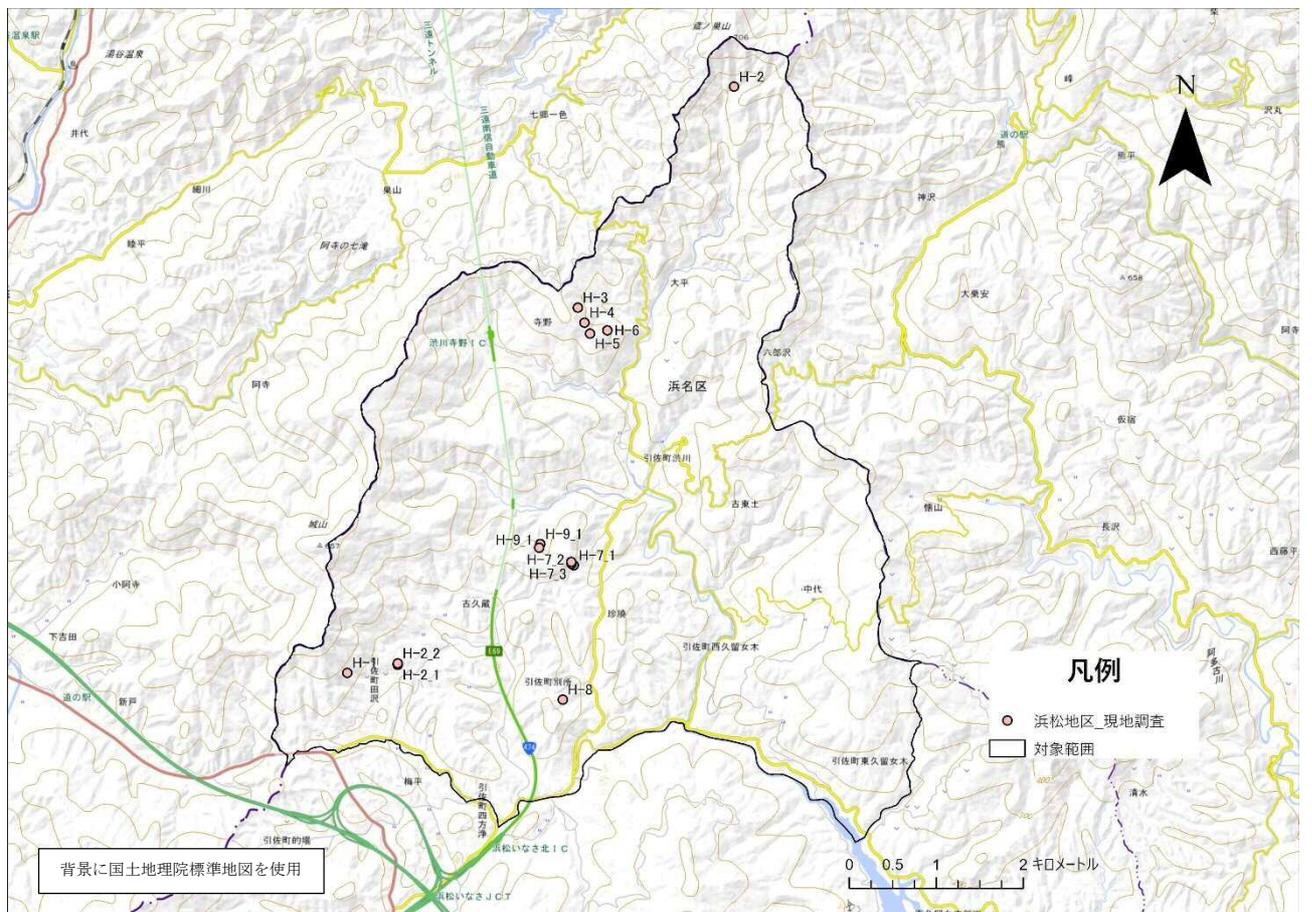


図 60 現地調査予定箇所図：浜松地区（背景：地理院地図）

8.2. 現地精通者との協議内容

伊東市役所、田方森林組合及び引佐森林組合様に対象地域内の森林施業手法などを伺った。以下、協議内容である。

3) ヒアリング結果

(1) 施業について

- ・半々～7:3 くらいの割合で利用間伐をしている。
 - ・切り捨て間伐を行う際は等高線沿いに木を横倒しにしている。
 - ・利用間伐の際は水切りをこまめにしている。
 - ・基本は作業道を使って機械で搬出している。
 - ・索道は減った。架線は技術者がいなくなり、現在下請け 4 社中 1 社のみ可能。
 - ・沢へ水が集まり過ぎることが予想される場合は施業をあきらめる。
 - ・盛土は土砂流出の恐れがある認識あり。
 - ・道を作るのにコストをかけられないため、脆い斜面を切土した土を盛土に使い、固定も十分にされていないため盛土は崩れやすい。
 - ・群状間伐が森の力で推奨されている。以前は 7m×7m、8m×8m で行われていたが現在は 5m×5m である。
 - ・森林の育成には群状と列状伐採はよくないと考えている。
 - ・裸地において崩れるイメージはない。
 - ・水が多いと崩れるイメージがある。
 - ・間伐がおこなわれていないところの方が崩れるイメージがある。
 - ・強い雨が続けて降ると崩れるイメージがある。
- (南西部の過去の大規模崩壊地について) 直前に隣接地で間伐を行っており、間伐していない箇所が崩れた。
- ・根の張りが狭いのにに対して樹高が高いとバランスが悪い。
 - ・葉が水を持つ(葉に水滴が付着)と重くなり重心が上がる。
 - ・林地に根系を残したくないときは切らずにワイヤーで引き倒す。
 - ・間伐により風が抜ける状態でないとドミノ倒し状に倒れる。

(2) 食害について

- ・ここ 10 年以内で急激にシカ、イノシシ、サル、カモシカが増えた。増えすぎて要注意地域に指定されている。

(3) 皆伐をしない理由

- ・植林してもシカに食べられるため再造林ができず、そのため皆伐もできない。
- ・皆伐の利益では植林、下刈りの費用がまかなえず、間伐はそれらの作業が無いことに加え補助金が出るため施業を行いやすい。
- ・引佐町森林組合の管轄範囲は人で、森林資源ともにまだ間伐を続けられる状況だが、他の地域は皆伐していかなければいけない状況にある可能性がある。

(4) その他

- ・作業道があっても作業道や林道にアクセスするまでの道が改良されておらず使えない場合が多い。
- ・道がつけやすい場所はすなわち地質が脆かったり水が集まりやすかったりする崩れやすい場所である。
- ・近年は土砂の流出が顕著である。

8.2.1. 現地調査結果

1) 伊豆地区

(1) I-1・I-2

当該調査地はヒノキ林であり、2020年から2021年にかけて列状間伐が実施されている。林床植生が乏しく、地表面近くの根系が裸出している状況にある。また、尾根部では、風による影響と考えられるヒノキの倒伏被害が発生している。

表 83 調査地 I-1・I-2 の概要

調査地概要	
調査日時	2025年1月9日 15:00~16:00
地形・地質	安山岩および玄武岩質の火成岩。標高400~450mの緩傾斜の尾根部に位置する。尾根を挟んで、北側と南側には、東側に流下する谷筋があり、谷筋に沿って、相模灘からの海風が吹き上げる地形となっている。
傾斜・斜面方位	尾根部の傾斜は約15°以上35°未満、ほぼ南向き斜面である。
植生・被覆状況	ヒノキ林の列状間伐地、地表面の侵食が認められる。
路網状況	標高420m付近に作業道が敷設されている。
調査項目	列状間伐地における立木密度の計測。現況の収量比数は0.58と疎である。



地表面侵食が発生し、ヒノキの根系が裸出している



尾根部上に生育するヒノキの倒伏状況



平坦な箇所では、顕著な侵食は認められない



シカによる食害が発生している

図 61 現地写真：I-1・I-2 森林内の状況

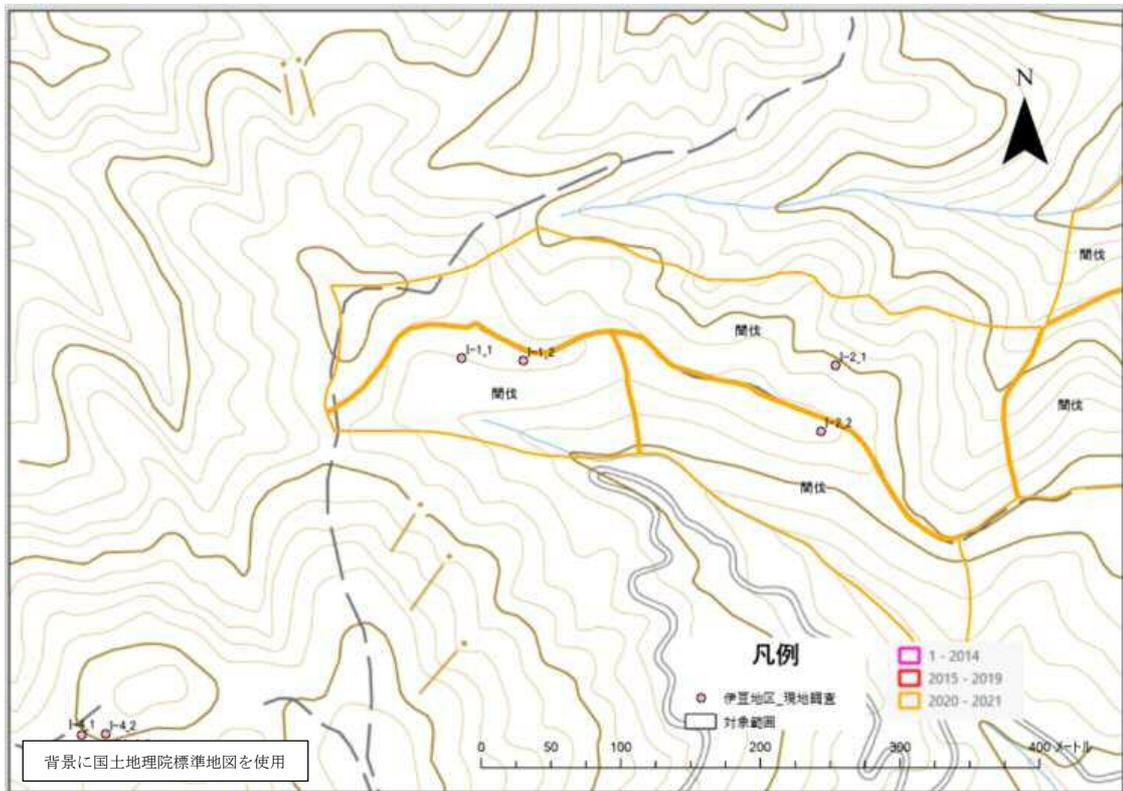


図 62 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

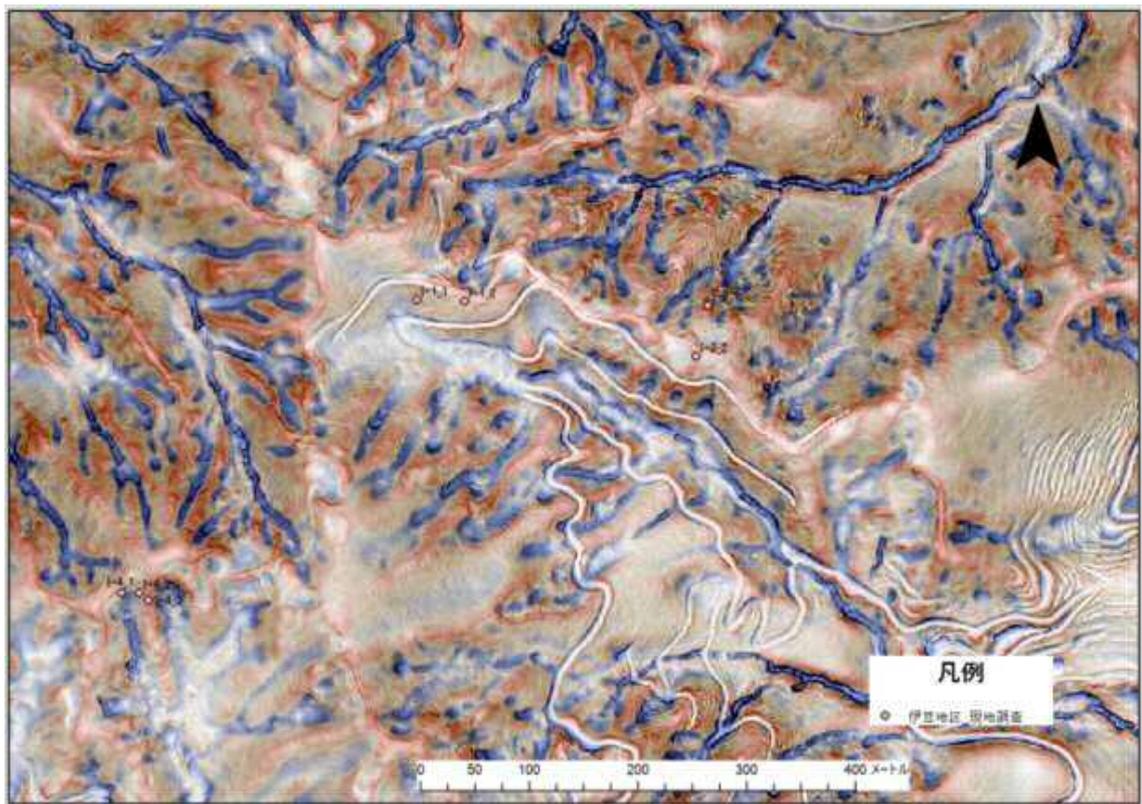


図 63 現地調査位置図（CS 立体図）

(2) I-3

当該調査地は、植栽後、1 から 2 回程度の間伐の形跡があるが、その後間伐の履歴が認められない林分であり、2011 年から 2014 年の間に崩壊が発生している。

近年、地表面の土砂が流出した形跡は認められないが、ヒノキの地表面付近の根系が裸出していること、林床植生の侵入も認められないことから、今後、豪雨が発生した場合、地表面流が発生し、土壌の流出が発生する可能性がある。

表 84 調査地 I-3 の概要

調査地概要	
調査日時	2025 年 1 月 10 日 9:30~10:00
地形・地質	安山岩および玄武岩質の火成岩。標高 500m 程度の東西に延びる尾根の遷急線を源頭部とする崩壊跡地である。
傾斜・斜面方位	傾斜は標高約 500m 付近を遷急線として、南向きの斜面で傾斜は約 15~30 度である。
植生・被覆状況	崩壊後の斜面には、ススキが生育している。木本類の侵入は認められない。
路網状況	調査地付近には、路網は整備されていない。
調査項目	崩壊跡地周辺の森林の状況について調査を実施。現況の収量比数は 0.8 と密である。



地表面の侵食によりヒノキの根系の表層が裸出



源頭部から下流部を望む

図 64 現地写真：I-3 森林内の状況

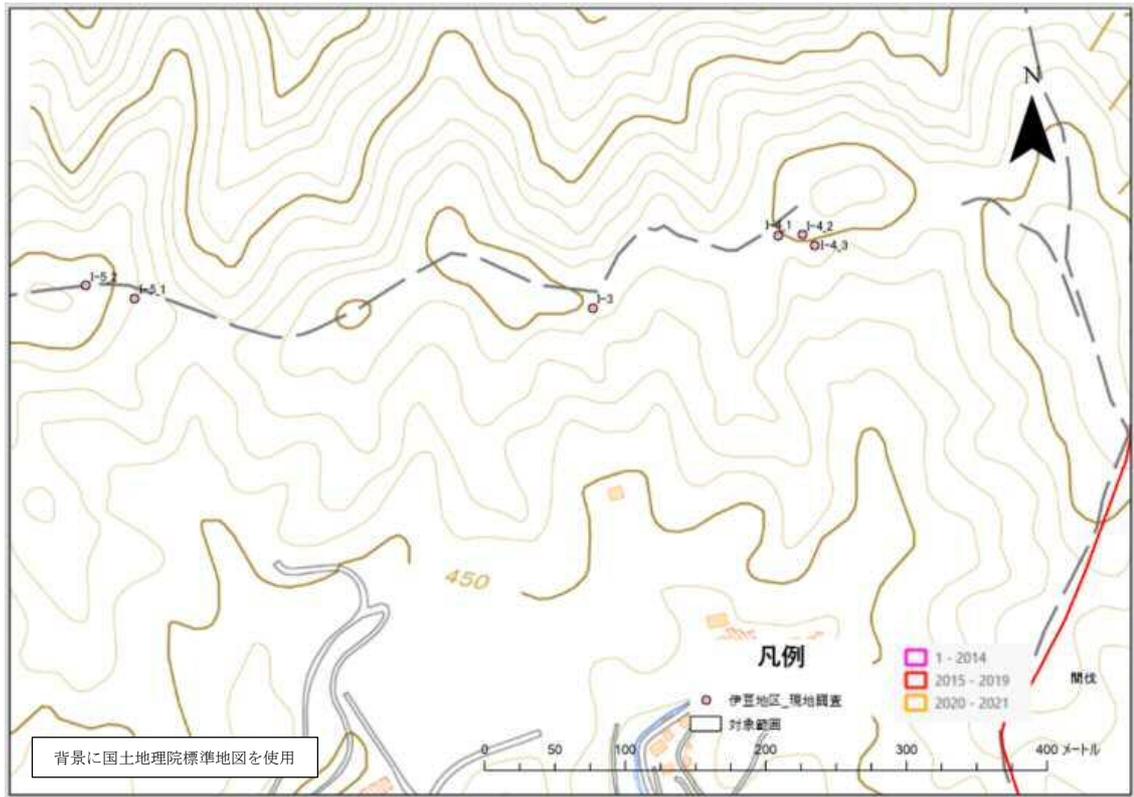


図 65 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

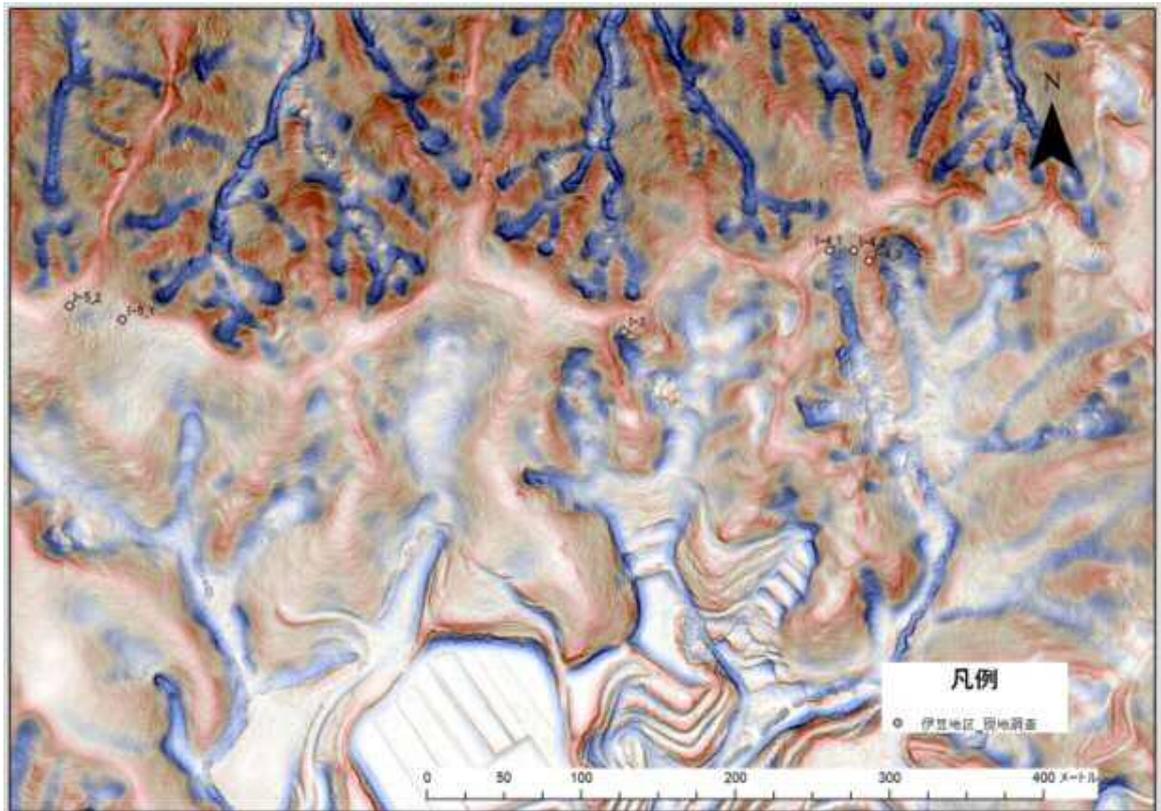


図 66 現地調査位置図（CS 立体図）

(3) I-4

当該調査地においても植栽後、1 から 2 回程度の間伐の形跡があるが、その後間伐の履歴が認められない状況にある。I-3 同様、2011 年から 2014 年の間に発生した崩壊地である。

近年、地表面の土砂が流出した形跡は認められないが、ヒノキの地表面付近の根系が裸出していること、林床植生の侵入も認められないことから、今後、豪雨が発生した場合、地表面流が発生し、土壌の流出や倒伏が発生する可能性がある。

表 85 調査地 I-4 の概要

調査地概要	
調査日時	2024 年 1 月 10 日 9:30~10:00
地形・地質	安山岩および玄武岩質の火成岩。標高 500m 程度の東西に延びる尾根の遷急線を源頭部とする崩壊跡地である。
傾斜・斜面方位	傾斜は標高約 500m 付近を遷急線として、南向きの斜面で傾斜は約 15~30 度である。
植生・被覆状況	崩壊後の斜面には、ススキが生育している。木本類の侵入は認められない。
路網状況	調査地付近には、路網は整備されていない。
調査項目	崩壊跡地周辺の森林の状況について調査を実施。現況の収量比数は 0.8 と密である。



崩壊跡地の源頭部（表層崩壊）



崩壊跡地の源頭部から下流を望む



源頭部の崩壊深さは約 60 cm



安山岩質岩石の露頭

図 67 現地写真：I-4 土砂流出地点の遠景

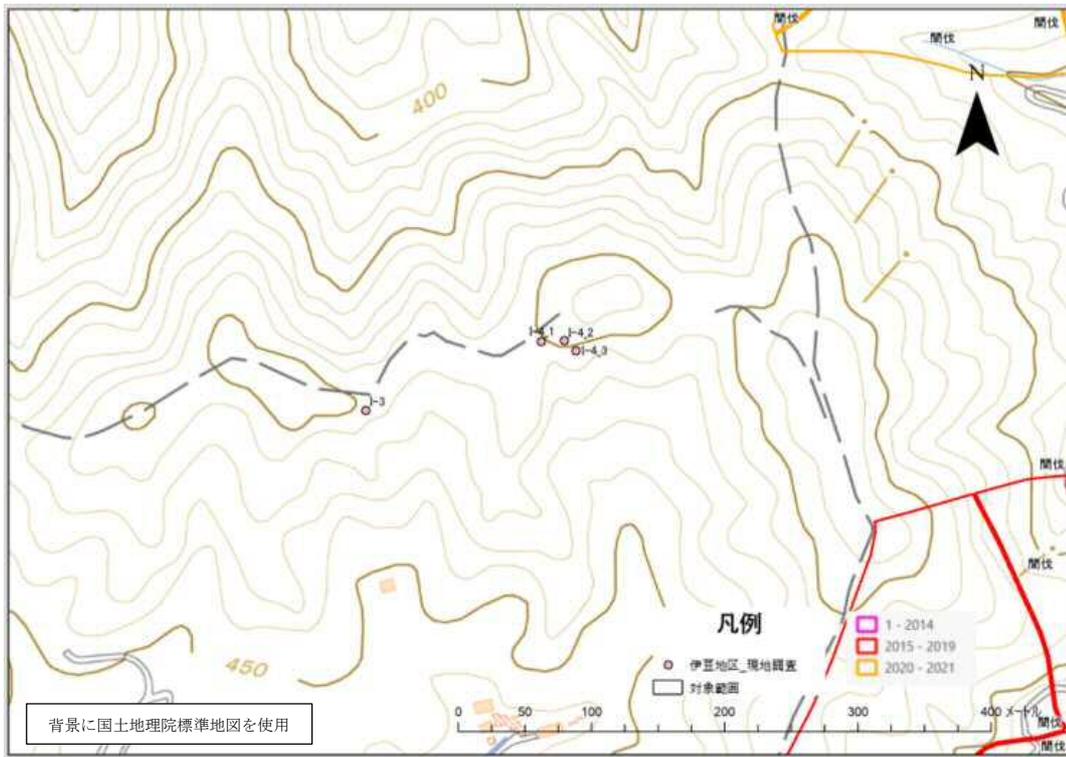


図 68 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

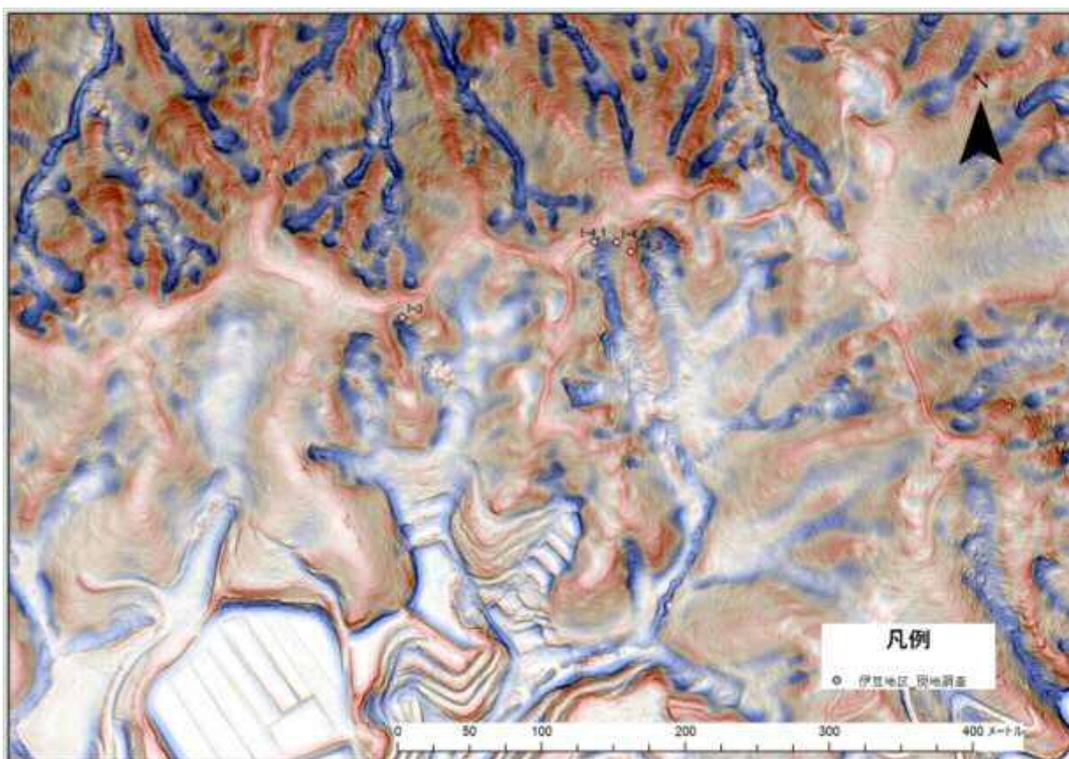


図 69 現地調査位置図（CS 立体図）

(4) I-5

当該調査地は、2011年から2014年の間に発生した風倒被害の跡地である。倒木跡地には、カエデ類の広葉樹の侵入・生育が認められる。付近には、新しいシカの糞粒や剥皮の被害が認められることから、今後も当該調査地周辺では林床植生や立木への食害が継続するものと考えられる。

表 86 調査地 I-5 の概要

調査地概要	
調査日時	2024年1月10日 10:25~10:40
地形・地質	安山岩および玄武岩質の火成岩。標高500mの東西に延びる緩やかな尾根部を源頭部とする風倒木地である。
傾斜・斜面方位	南向きの斜面で傾斜は15°以上30°未満である。
植生・被覆状況	崩壊後の斜面には、ウリハダカエデなどの広葉樹の木本類が生育
路網状況	調査地付近には、路網は整備されていない。
調査項目	崩壊跡地周辺の森林の状況について調査を実施。現況の収量比数は0.8と密である。



風倒木地を下流から上流を望む



風倒木の跡地には広葉樹が生育



シカの糞粒



シカによる剥皮被害

図 70 調査地点位置図：I-5

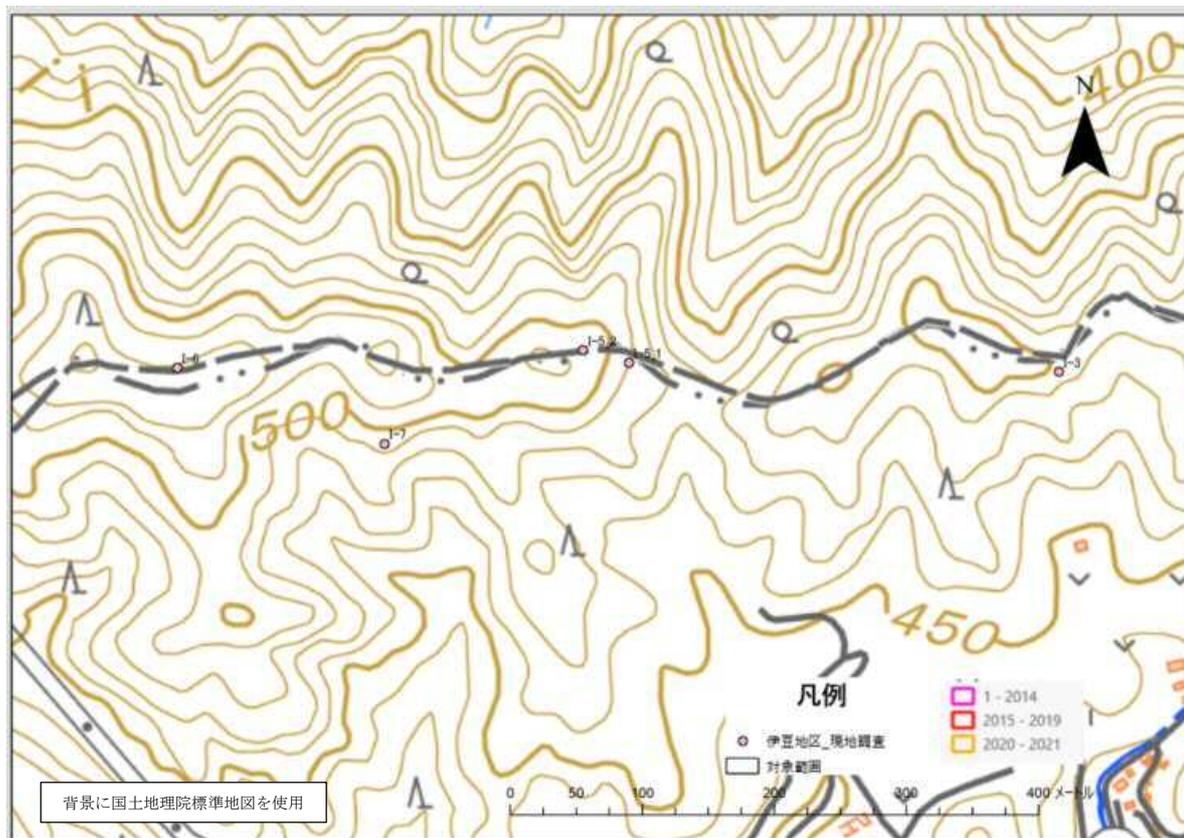


図 71 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

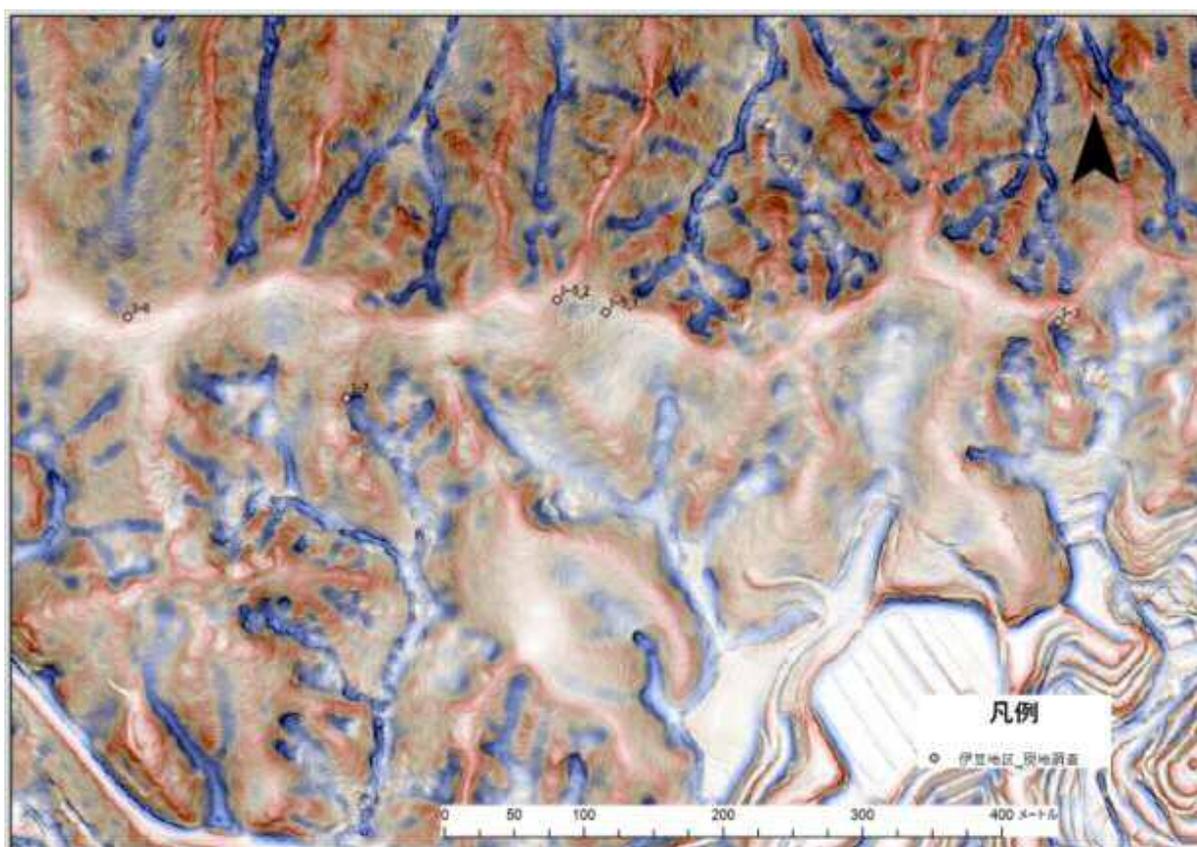


図 72 現地調査位置図（CS 立体図）

(5) I-6

当該調査地は、2011年から2014年の間に発生したヒノキ林の風倒被害による崩壊跡地である。風倒木被害は、北向き斜面の遷急線より下流の35度以上の傾斜の斜面を吹き上げてくる風により、発生したものと考えられる。表土が薄いため、直根は発達できず、根系層は地表面近くにしか発達していないことから、地上部と地下部のバランスが崩れて倒伏に至ったものと考えられる。

周辺の森林においては、近年、間伐されていないことから、同様の被害が発生する可能性がある。

表 87 調査地 I-6 の概要

調査地概要	
調査日時	2024年1月10日 10:30~10:45
地形・地質	安山岩および玄武岩質の火成岩。標高520mの東西に延びる緩やかな尾根部を源頭部とする風倒木地である。
傾斜・斜面方位	尾根部周辺の傾斜は約15°以上30°未満の北向き斜面で崩壊が発生している。尾根部の北側の遷急線より下流は、35°以上の急峻な地形となっており、強い風が吹き上げてくる可能性がある
植生・被覆状況	周辺は、ヒノキの植林地であるが、近年は間伐されていない。
路網状況	調査地付近には、路網は整備されていない。
調査項目	ヒノキの倒伏状況について調査を実施。現況の収量比数は0.8と密である。



ヒノキの倒伏状況 根系の厚さは約50cm程度



倒伏は北向き斜面の下流部から吹き上げてくる風により発生



倒伏後、時間が経過している



間伐されていない周辺のヒノキ林

図 73 調査地点位置図：I-6

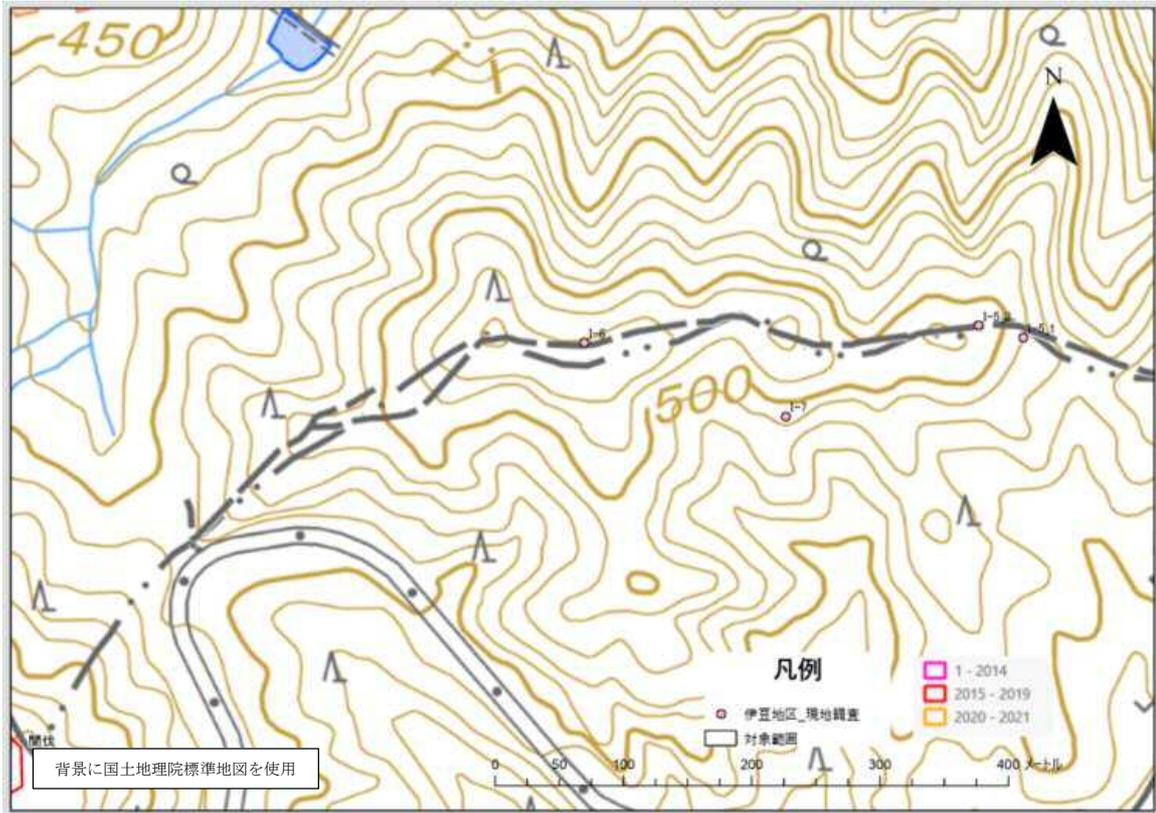


図 74 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

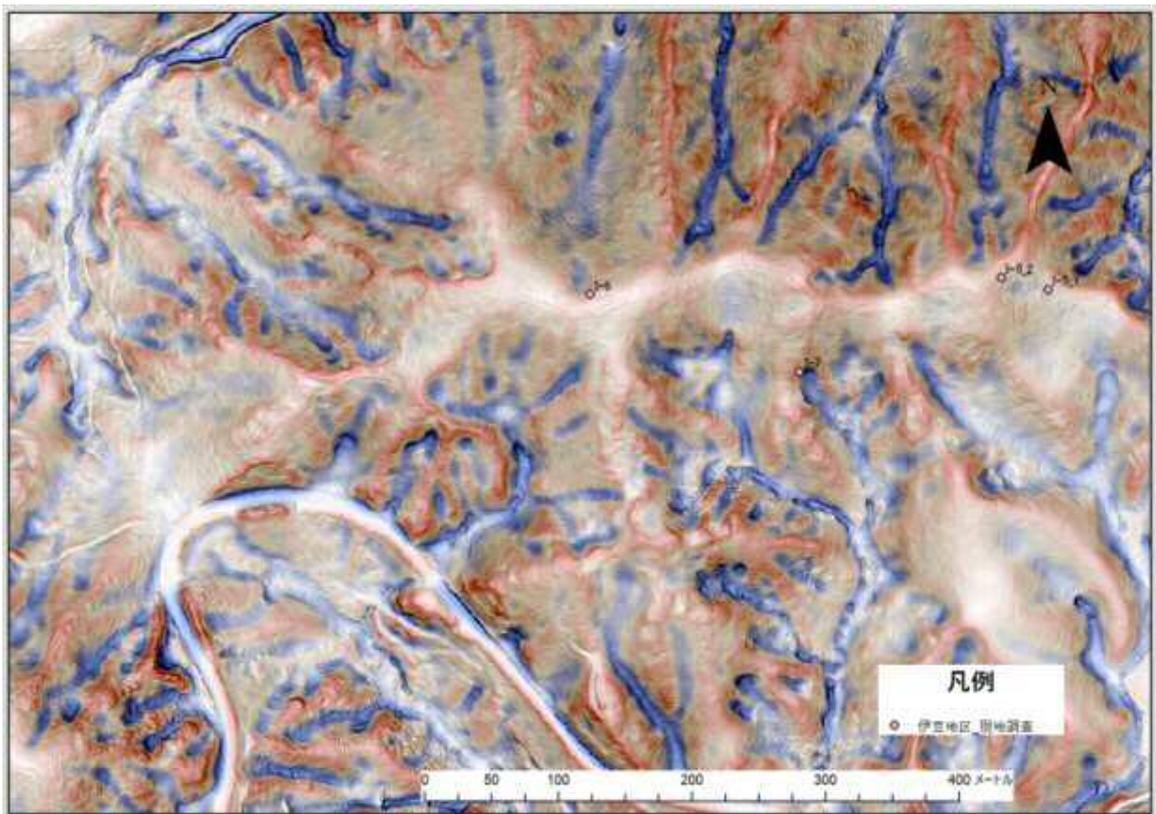


図 75 現地調査位置図（CS 立体図）

(6) I-7

当該調査地は、2011年から2014年の間に発生したヒノキ林した崩壊跡地である。

南向き斜面の遷急線より下流の35°以上の傾斜の斜面を源頭部として、崩壊が発生している。表土が約50cmと薄く、崩壊地の斜面上部では露岩していることから、浸透水などの湧出により崩壊が発生したものと考えられる。周辺の森林においては、近年、間伐されていないことから、根系による土壌の緊縛力が低下していることが想定され、今後、同様の被害が発生する可能性がある。

表 88 調査地 I-6 の概要

調査地概要	
調査日時	2024年1月10日 10:50~11:15
地形・地質	安山岩および玄武岩質の火成岩。標高490mの東西に延びる尾根部の下流の遷急線を源頭部とする崩壊地である。
傾斜・斜面方位	尾根部の下流の遷急線を源頭部として崩壊しており、周辺の傾斜は35°以上の南向き斜面である。
植生・被覆状況	周辺は、ヒノキの植林地であるが、近年は間伐されていない
路網状況	調査地付近には、路網は整備されていない。
調査項目	ヒノキの倒伏状況について調査を実施。現況の収量比数は0.8と密である。



ヒノキの根系の厚さは約50cm程度



源頭部付近の崩壊面では、風化した基岩が裸出



全体的に表土が薄い状況にある

図 76 調査地点位置図 : I-7

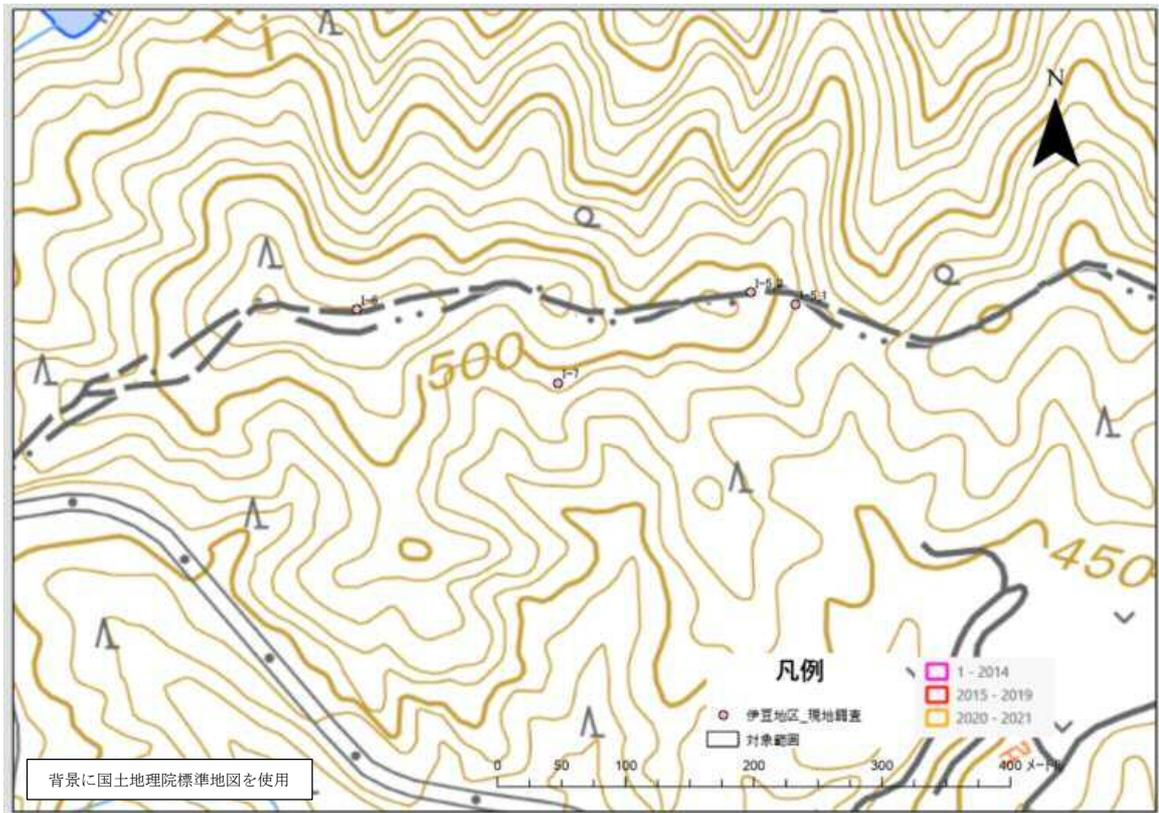


図 77 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

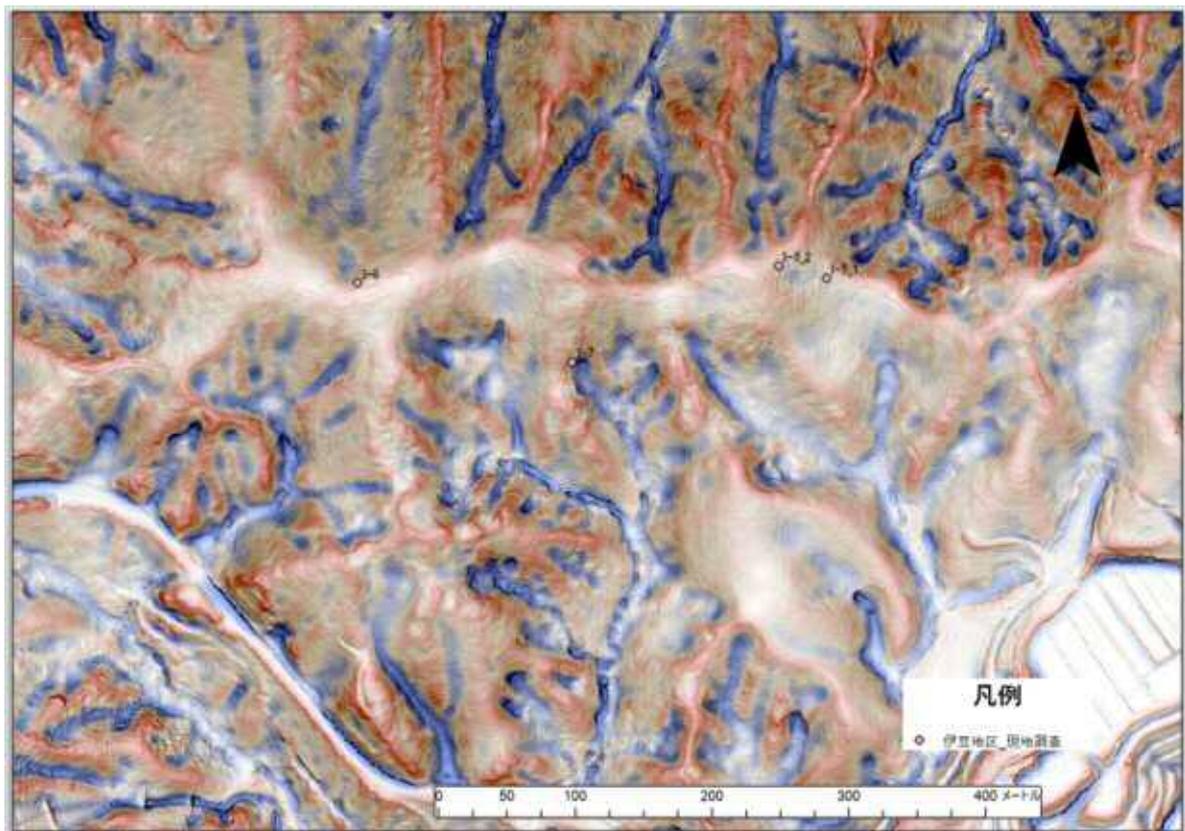


図 78 現地調査位置図（CS 立体図）

2) 浜松地区

(1) H-1

当該調査地は、2018年に崩壊が発生し、2020年に山腹工が整備された崩壊跡地である。

南東向きの標高 450m 付近の凹地を源頭部として、崩壊が発生している。山腹工が施工されているため、源頭部の詳細な状況は不明であるが、2012年頃から源頭部では無立木地が認められており、その後、2018年に発生した豪雨により、崩壊が発生したものと考えられる。なお、崩壊地の左岸の斜面周辺では2016年から間伐が実施されている。

表 89 調査地 H-1 の概要

調査地概要	
調査日時	2024年1月21日 12:15~12:30
地形・地質	泥質片岩などの変成岩類。標高 450mの南東向きの凹地斜面を源頭部とする崩壊地である。
傾斜・斜面方位	源頭部の傾斜は、35°以上、南東向き斜面である。
植生・被覆状況	周辺の凹地では、スギ、山腹の斜面はヒノキ林である。崩壊地の左岸斜面では2016年に間伐されている。
路網状況	調査地付近には、標高 300mの等高線に沿って林道が整備されている。
調査項目	崩壊地の発生状況について調査を実施。



2020年に山腹工が整備



源頭部付近では、植栽がされている



山腹施工後に間伐された状況にある



ブロック化した泥質片岩

図 79 調査地点位置図：H-1

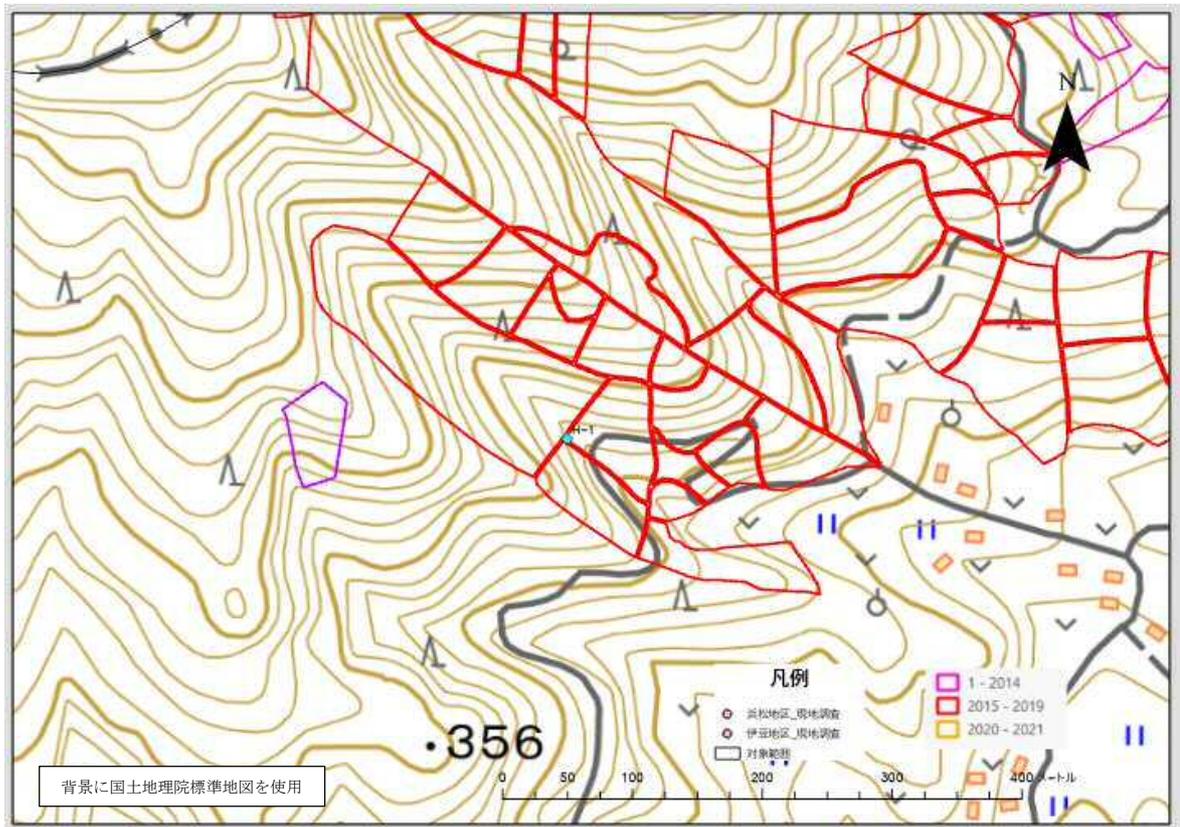


図 80 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

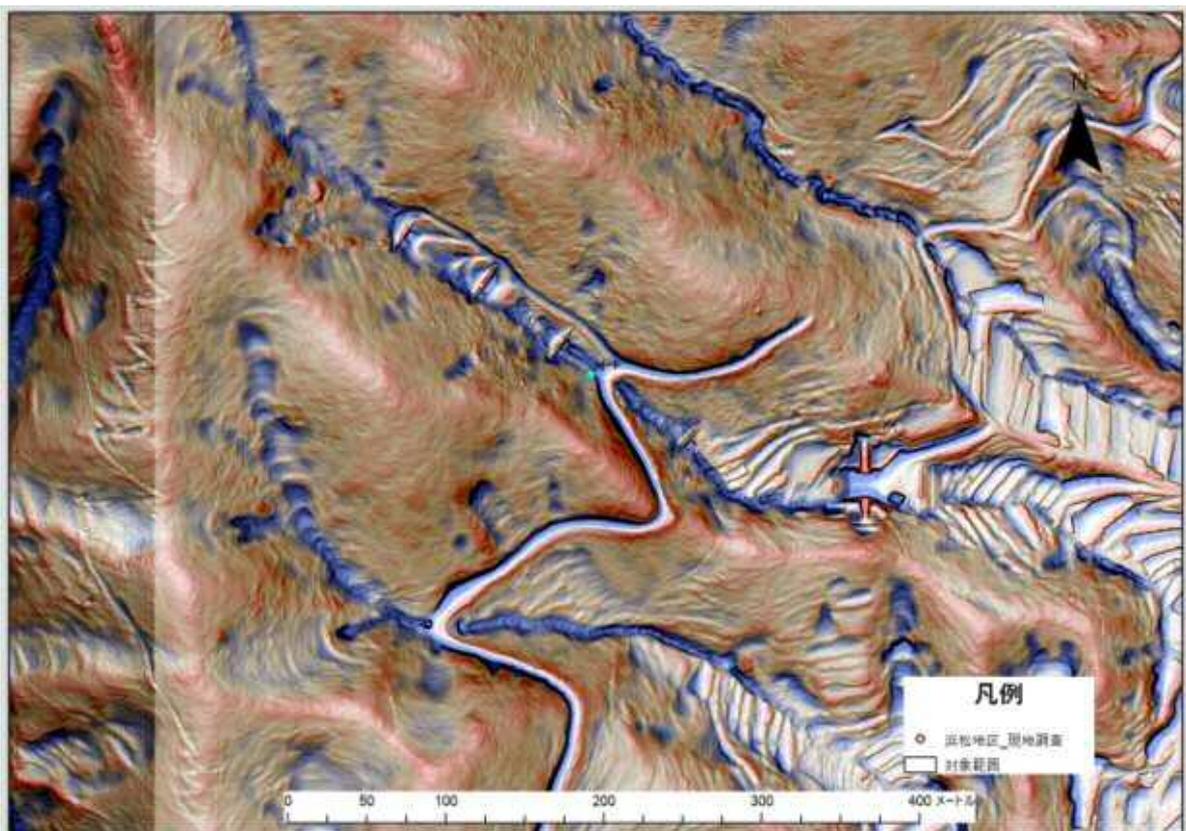


図 81 現地調査位置図（CS 立体図）

(2) H-2

当該調査地は、2023年に民家の裏山において崩壊が発生し、現在、山腹工が整備されている。南東向きの標高270m付近の凹地を源頭部として、崩壊が発生している状況にある。なお、2018年から2019年にかけて山腹工上部の森林において、間伐が実施されている。

表 90 調査地 H-2 の概要

調査地概要	
調査日時	2024年1月21日 14:40~15:00
地形・地質	泥質片岩などの変成岩類。標高270mの南東向きの凹地斜面を源頭部とする崩壊地である。
傾斜・斜面方位	源頭部の傾斜は、35°以上、南東向き斜面である。
植生・被覆状況	周辺の凹地では、スギ、山腹の斜面はヒノキ林である。崩壊地周辺の森林では2018~2019年にかけて間伐が実施されている。
路網状況	調査地付近には、調査地上部の標高280mの等高線に沿って道路が整備されている。
調査項目	崩壊地の発生状況について調査を実施。



現在施行中の山腹崩壊地



源頭部付近では、湧水が認められる



間伐が実施されているスギ林



流下した土石流の衝撃痕は1.5mの高さ

図 82 調査地点位置図：H-2

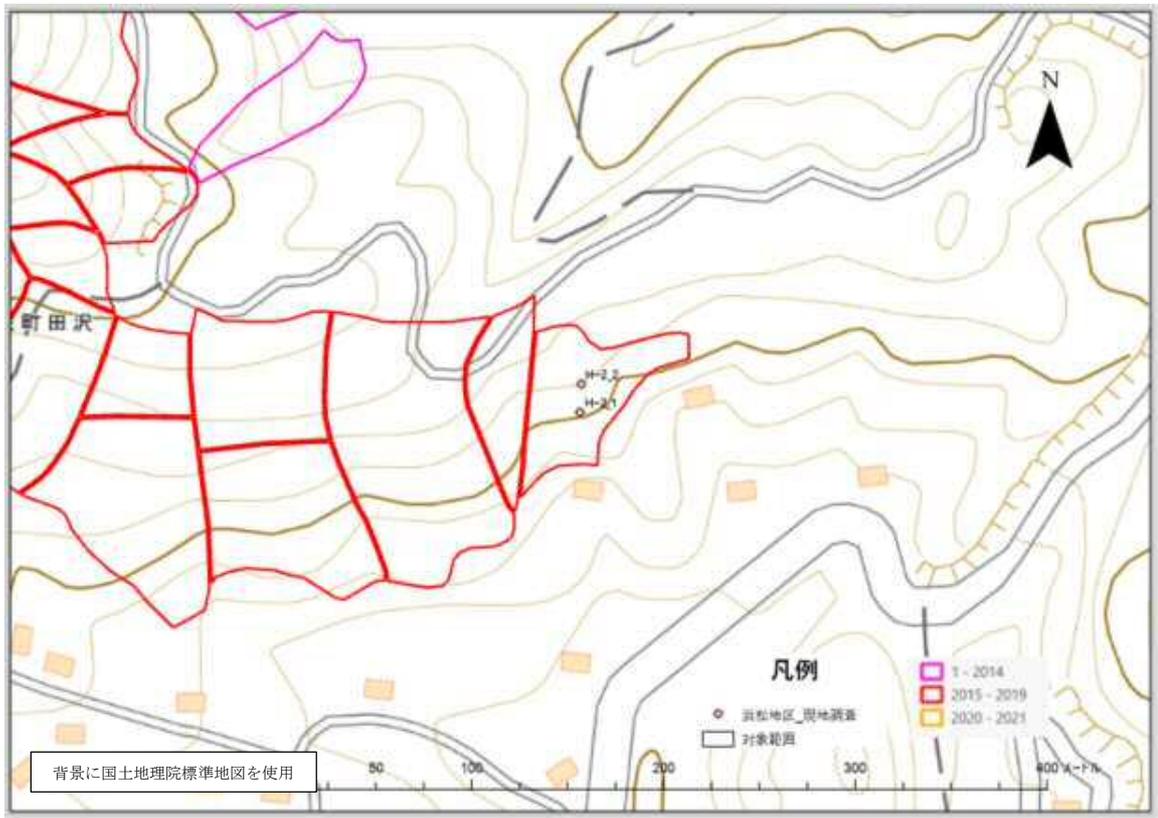


図 83 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

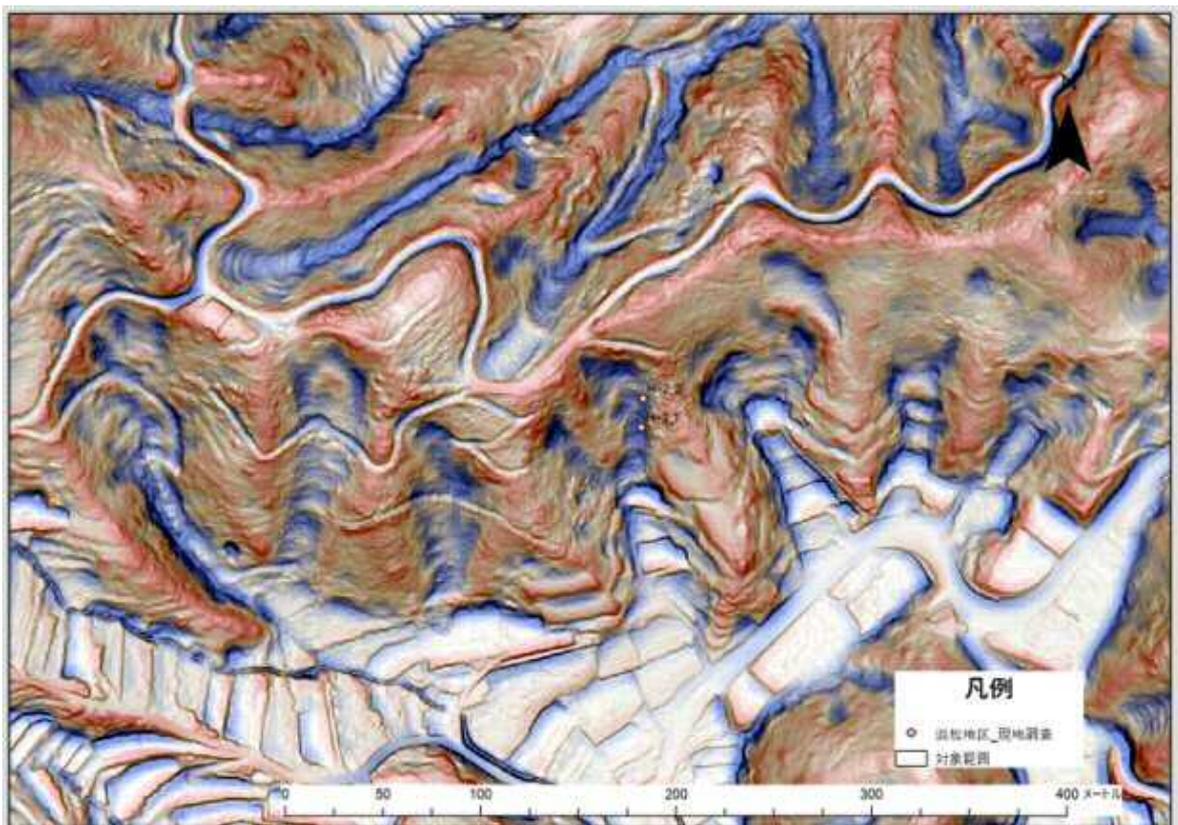


図 84 現地調査位置図（CS 立体図）

(3) H-7

当該調査地は、2023年に標高300mの凹地より崩壊が発生し、流下した土砂が下流の民家を直撃し、1名の死者が発生した崩壊地であり、現在、土留工の施工を中心とした山腹工の整備が進められている。なお、2018年から2019年にかけて崩壊地周辺の森林において、間伐が実施されている。また、2021年には、崩壊地の源頭部付近に標高290mの等高線に沿って、作業道が敷設されている。

表 91 調査地 H-7 の概要

調査地概要	
調査日時	2024年1月22日 14:00~15:00
地形・地質	泥質片岩などの変成岩類。標高300mの南東向きの凹地斜面を源頭部とする崩壊地である。
傾斜・斜面方位	源頭部の傾斜は、35°以上、南東向き斜面である。
植生・被覆状況	周辺の森林はスギ林である。崩壊地周辺の森林では2018~2019年にかけて間伐が実施されている。
路網状況	調査地付近には、崩壊地の源頭部付近について、標高290mの等高線に沿って2021年に作業道が整備されている。
調査項目	崩壊地の発生状況について調査を実施。現時点の収量比数は0.76とやや密である。



現在施行中の山腹崩壊地



源頭部付近では、湧水が認められる



間伐が実施されているスギ林



流下した土石流の衝撃痕は1.5mの高さ

図 85 調査地点位置図：H-7



図 86 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

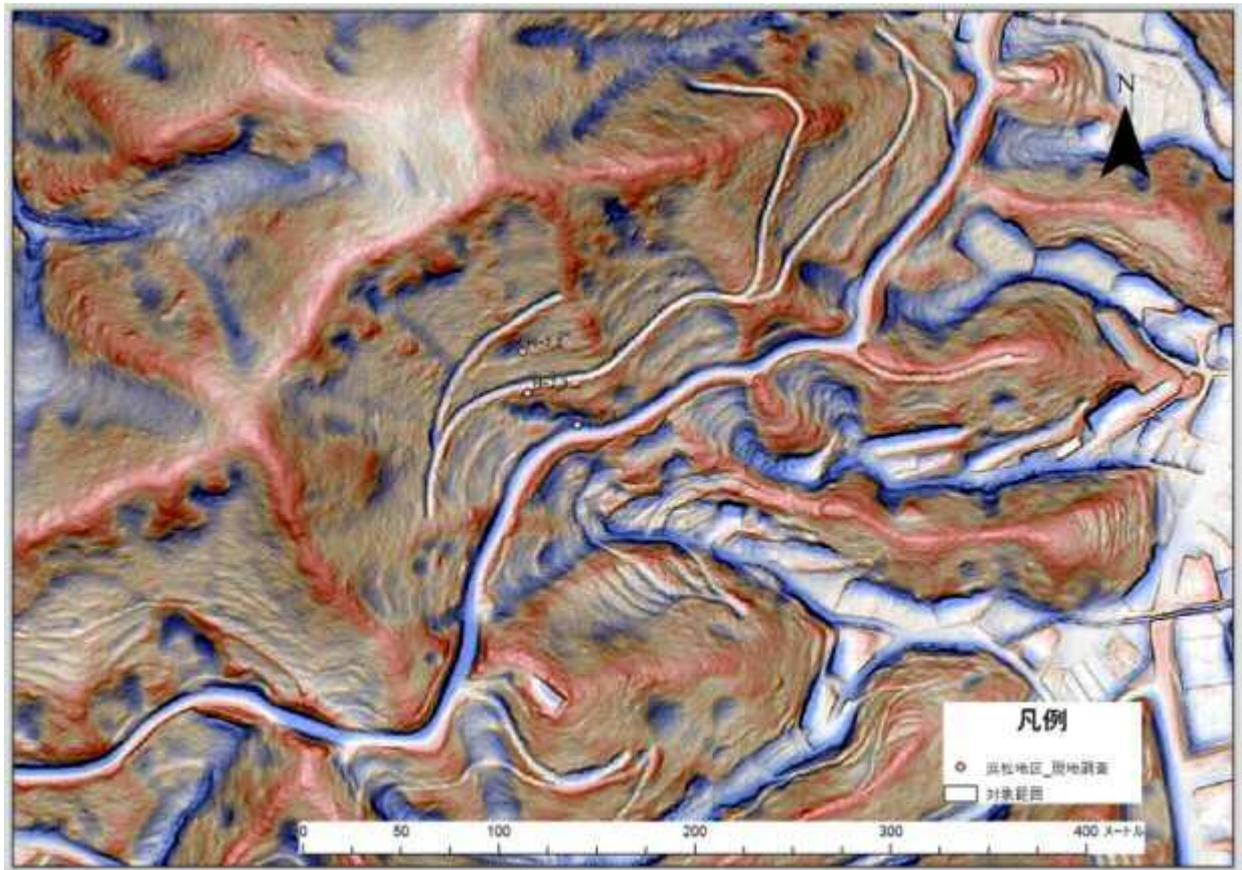


図 87 現地調査位置図（CS 立体図）

(4) H-9

当該調査地は、2018 から 2019 年の間に標高 270m の凹地において風倒木が発生している。
 なお、2018 年から 2019 年にかけて崩壊地周辺の森林において、間伐が実施されている。

表 92 調査地 H-9 の概要

調査地概要	
調査日時	2024 年 1 月 22 日 15:50~16:30
地形・地質	泥質片岩などの変成岩類。標高 270m の北向きの凹地斜面を源頭部とする風倒被害地である。
傾斜・斜面方位	源頭部の傾斜は、35° 以上、北向き斜面である。
植生・被覆状況	周辺の森林はスギ林である。風倒木地周辺の森林では 2018~2019 年にかけて間伐が実施されている。
路網状況	被害地の下部の南北に延びる沢筋に沿って作業道が整備されている。
調査項目	被害地の発生状況について調査を実施。現況の収量比数は 0.53 と疎である。



山腹上部から下部に向けて倒伏が発生



大径木についても倒伏している

図 88 調査地点位置図：H-9

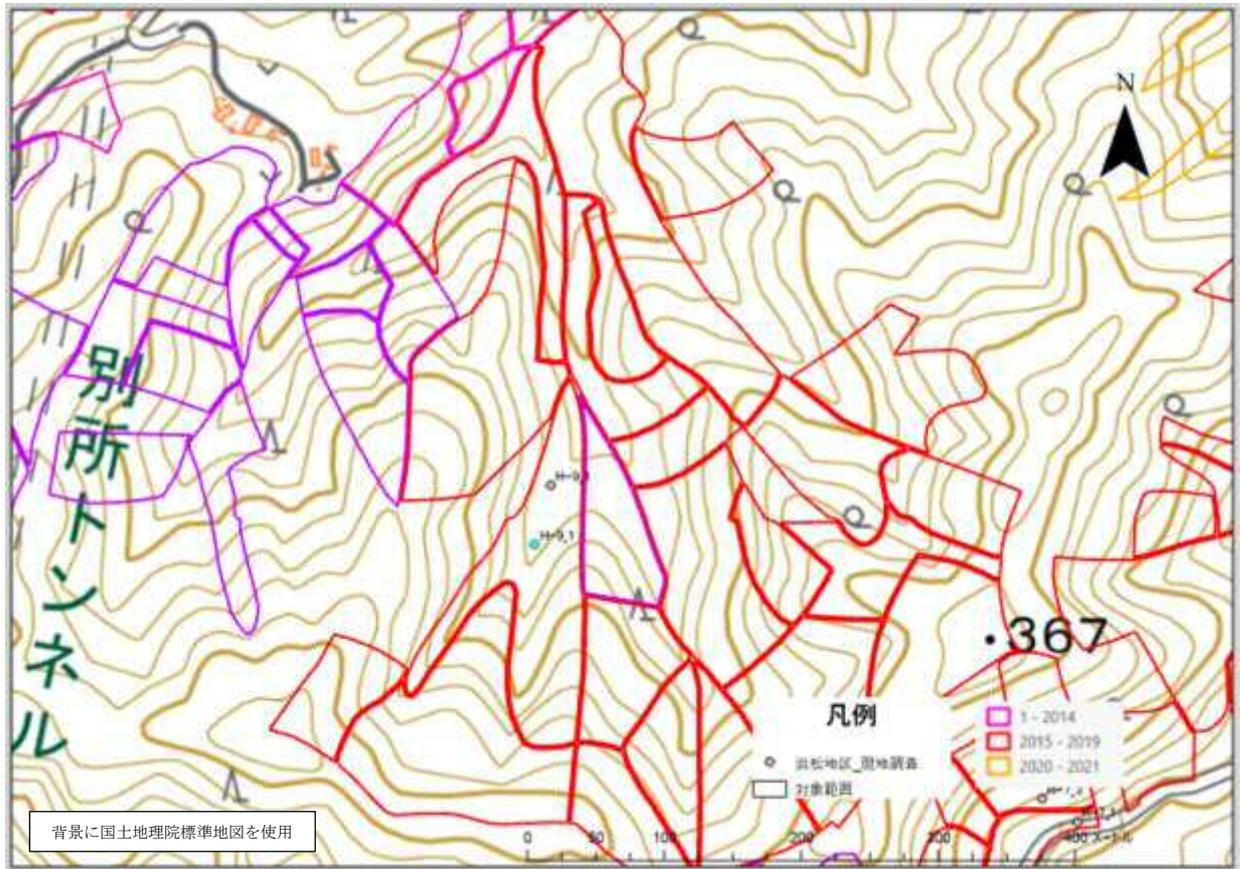


図 89 現地調査位置図（間伐実施年度含む）

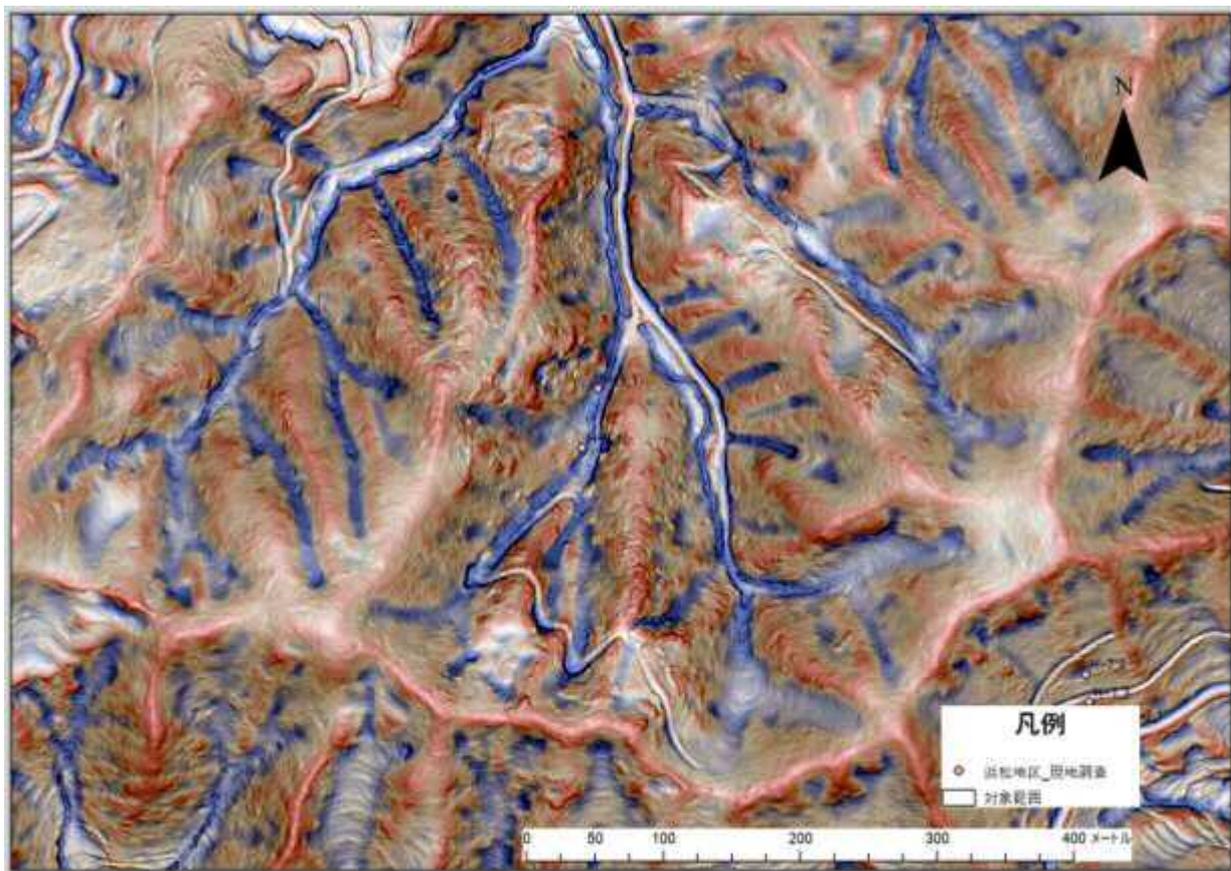


図 90 現地調査位置図 (CS 立体図)

8.3. 現地調査結果のまとめ

現地調査により土砂流出の発生しやすさに関連があると考えられた条件について以下に示す。

- ・ 伊豆市及び浜松市では、間伐が近年実施されていないヒノキ林において、地表面の侵食が認められるとともに、表層崩壊の跡地が確認された。これらの調査地はいずれも収量比数が 0.8 前後であり林分密度が高い傾向にあった
- ・ 地表面の侵食は、下層植生が少ないことにより、流水の浸透・分散が妨げられていることが要因として考えられる
- ・ 林床植生が少ない原因として、樹冠の閉鎖に伴う林内照度の低下とシカによる食害の影響が考えられる
- ・ 伊東市と浜松市の事例では、尾根部に付近において間伐後の経過年数が約 5 年以内で収量比数が 0.6 前後の林分において風倒木被害が認められた

9. 考察・既往知見との比較

本調査においてカテゴリスコアで評価した結果を以下に示す。

- ・ 間伐後 10 年までが土砂流出しにくく、その後土砂流出しやすくなる
- ・ 林分が混みあう箇所（立木密度が低い箇所）では土砂流出しやすく、その後立木密度が増加し混み具合が正常になると崩れにくくなる一方、疎である地域も土砂流出しやすい
- ・ 樹高が低い若齢林では壮齢林より土砂流出が発生しやすい

9.1. 間伐後の経過年数について

既往文献 1⁴ではスギ林における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とされている。

一方で既往文献 2⁵のヒノキ林の調査では、間伐後 5 年間は崩壊防止機能が低下するが、それ以降は崩壊防止機能が增大するのに対して、無間伐の場合は崩壊防止機能が頭打ちとなる（2010 年、北原）。これらは間伐によって伐採されても根系の緊縛力が土壌を捕捉しているため土砂流出が起きにくいと考えられる。一方、既往文献 3⁶では間伐後の土砂流出量はスギ人工林では減少か同程度であったが、ヒノキ人工林では増加したと報告されている。

本調査では間伐後 10 年未満の間土砂流出が発生しづらくなり、その後徐々に土砂流出が発生しやすくなるという傾向となった。この傾向は既往文献のいずれとも異なる傾向であるため、今後は間伐箇所数の多いサンプルで解析を行うことで結果の確からしさを高めることに加え、樹種間での間伐による違いを考慮した解析を行うことが必要があると考えられる。

9.2. 立木密度について

既往文献 4⁷では多様な立木密度のカラマツ人工林における林分中央部の根系分布調査を行い、崩壊防止力を算出し比較することで、立木密度が根系の崩壊防止力に及ぼす影響を評価した。その結果、崩壊防止力は、立木密度 1,000 本/ha 程度までは間伐の効果で上昇する一方、立木密度が 1,000 本/ha を低下すると、崩壊防止力は低下する傾向が見られる結果となった。また、既往文献 5⁸では全国 15 地点（30 箇所）の豪雨災害が発生した森林の収量比数を調査した結果、崩壊地：0.79±0.12、非崩壊地 0.72±0.12 であり、検定の結果収量比数の差が有意に見られた。加えて既往文献 6⁹では間伐と無間伐のスギ人工林において立木の引き倒し抵抗モーメントの実測結果を比較した結果、間伐林分のほうが大きい抵抗力を示したことが報告されている。既存文献 2 でも、立木密度の増加と土砂流出防止機能は反比例する結果となった。

本調査では球磨村、丸森町いずれの地域においても立木密度が高いほど土砂流出が発生しやすい傾向となったことから、既往文献と一致した傾向が得られたと考えられる。

⁴ 阿部和時 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 日本地すべり学会誌地すべり 41(3), 225-235, 2004-09-25

⁵ 北原曜 森林根系の崩壊防止機能 水利科学 311号, p.11-37(2010)

⁶ 奈良雅代他3名 東京都多摩地域スギ・ヒノキ人工林における間伐後3年間の土砂流出量の経年変化 東京都農林総合研究センター研究報告(9), 7-14, 2014-03

⁷ 伴博史他2名 カラマツ根系の崩壊防止力と立木密度の関係 中部森林研究No. 59

⁸ 田中淳他8名 土砂流出災害における崩壊地の微地形の特徴と森林の関係 日本緑化工学会誌 41(2), p.326-330(2015)

⁹ 藤堂千景他6名 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 日本緑化工学会誌 41(2), p.308-314(2015)

9.3. 樹高について

既往文献⁶¹⁰では、間伐後7年が経過した49年生のスギ人工林と無間伐林の両者の引き倒し抵抗モーメントを比較した。引き倒し抵抗モーメントは材積と比例関係にあり、間伐によって抵抗モーメントが増大すると報告されている。

既存文献⁸¹¹では、3つの豪雨災害（平成21年7月21日豪雨災害、平成7年梅雨前線豪雨、昭和36年梅雨前線豪雨）において発生した斜面崩壊と森林の関係について数量化I類を用いて解析した。その結果樹齢・樹高、樹木密度の違いが崩壊面積率（全流域面積に対する斜面崩壊面積）に与える影響は明瞭には見られないとしている。

既往文献⁶では、同一の林齢で間伐がある林分は間伐のない林分と比較して樹高が高くなる前提を踏まえると、樹高が高い林分ほど土砂流出が発生しやすくなる傾向となると解釈できる。一方、既往文献⁸では樹高と土砂流出の明確な関係性が認められていないことから、既往文献では樹高と土砂流出の関係性について一般的な知見が確立されていないと言える。

本調査では若齢または壮齢と考えられる10m未満と25m以上の樹高区分を除き、球磨村、丸森町いずれも明瞭な傾向は見られなかったことから、既往文献と同様に樹高が高いほど、低いほどといった単調な傾向は見られなかった。樹高と土砂流出の発生しやすさとの関係については間伐履歴や樹齢等、樹高と関係のある条件を加味してさらに検討を深める余地が残ると考えられる。

以上のことから、本調査での結果から得られた森林の整備状況と土砂流出の発生しやすさとの関係として、立木密度は地域間で傾向が一致し、かつ既往文献との整合も取れているため、本調査で使用方法が土砂流出の発生しやすさの検討に有効活用できることが考えられた。

地域間で傾向の一致しなかった相対幹距比、既往文献と傾向が一致しない、または既往文献で一般的な傾向が見られていない間伐からの経過年数および樹高についてはさらなる調査により、サンプル数や土地の特徴等を考慮した解析を実施した上で土砂流出の発生しやすさとの関係の有無を判断する必要があると考えられた。

10. 調査結果のまとめと今後の課題

土砂流出の因子および土砂流出に係る因子の分析因子の調査結果を以下に示す。

10.1. 土砂流出が発生しやすい条件の整理

10.1.1. 地形条件

地形条件と土砂流出の発生しやすさは過年度までの成果と同様に、傾斜が急かつ斜面横断面形が凹の土地で土砂流出が発生しやすい傾向となった。また、過年度までは縦断面形が凸の地形と縦断面形が凹の地形の土砂流出の発生しやすさは同程度であると結論付けられていたが、縦断面曲率の値で再区分した結果、縦断面曲率の絶対値が大きいほど土砂流出が発生しやすい傾向が見られた。ただし、調査対象を人工林内に限定した場合は傾向が異なる場合があり、森林整備の目安として結果を用いる場合は留意が必要である。

10.1.2. 森林整備に関する条件

2地域共通の結果として、立木密度の高い森林で比較的土砂流出が発生しやすい傾向が見られた。一方、相対幹距比では球磨村と丸森町で異なる傾向となり、球磨村では立木密度と同様に概ね密な森林で土砂流出が発生しやすい傾向となったのに対し、丸森町では一様な傾向は見られなかった。

樹高による影響は2地域共に樹高が高いほど、低いほどといった単調な影響は見られなかったが、2地域共に最も樹高が低い区分で比較的土砂流出が発生しやすい結果となり、球磨村では最も高い区分でも比較的土砂流出が発生しやすい傾向となったことから、幼齢林、壮齢林で土砂流出が発生しやすくな

¹⁰ 藤堂千景他6名 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 日本緑化工学会誌41(2), p.308-314(2015)

¹¹ 小山内信智, 桂真也, 富田陽子, 小川紀一郎, 中田慎 森林の崩壊抑制効果を反映した生産土砂量の推定に向けた一考察—豪雨災害時の崩壊面積率の解析— 砂防学会誌Vol. 63(5), p. 22-32

る可能性が考えられた。

間伐は2地域共通して間伐経過年数が0年から10年未満の区分で最も土砂流出が発生しづらくなり、それ以降年数が経過するにつれて土砂流出が発生しやすくなるという傾向が見られたが、間伐履歴のあるメッシュ数は2地域とも間伐履歴の無いメッシュ数と比較して非常に小さかったため、解析が十分でない可能性が考えられた。

10.2. 今後の課題

10.2.1. 調査地の選定

本調査では伊豆市、浜松市で対象とした豪雨災害時に発生した土砂流出地が抽出されず、2地域は解析および解析結果の確認に使用されない結果となった。土砂災害情報の詳細な位置情報が得られない場合、衛星画像または航空レーザ計測成果を調達するまで対象範囲内で何件の土砂流出サンプルが得られるかを把握することができないため、作業の手戻りが発生する可能性が高くなる。一方、災害発生前の航空レーザ計測成果があり、かつ崩壊地の詳細な位置情報が得られる対象地の数は限られるため、あらかじめ対象地域を限定すると複数地域での解析結果の検証が困難となる。豪雨災害被災地では災害を受けて航空レーザ計測が実施されることがあり、航空レーザ計測成果は災害前後で比較すると災害後に存在する可能性が高いと考えられる。そのため、本調査で採用した基盤地図 DEM による災害前地形の解析手法および、災害後の航空レーザ計測成果による森林資源解析成果を用いた災害前の森林資源情報の推定手法の精度を向上させることで、「災害後の航空レーザ計測成果があり、かつ崩壊地の詳細な位置情報が得られる」という条件を新たに採用することが可能になり、より解析対象とする地域を拡大できることが考えられる。

10.2.2. 森林整備に関する条件の影響調査

森林整備に関する条件の影響として、本調査では球磨村と丸森町の2地域で同様の傾向が見られた項目があった一方、異なる傾向となる項目も見られた。このことから、地質等、森林の状況とは別の土地の条件によって森林整備に関する条件の影響が異なることが考えられた。今後、複数の地質条件の土地を対象として同様の解析を行い、傾向を比較することで森林整備と土砂流出との関係をより正確に理解することができると思われる。

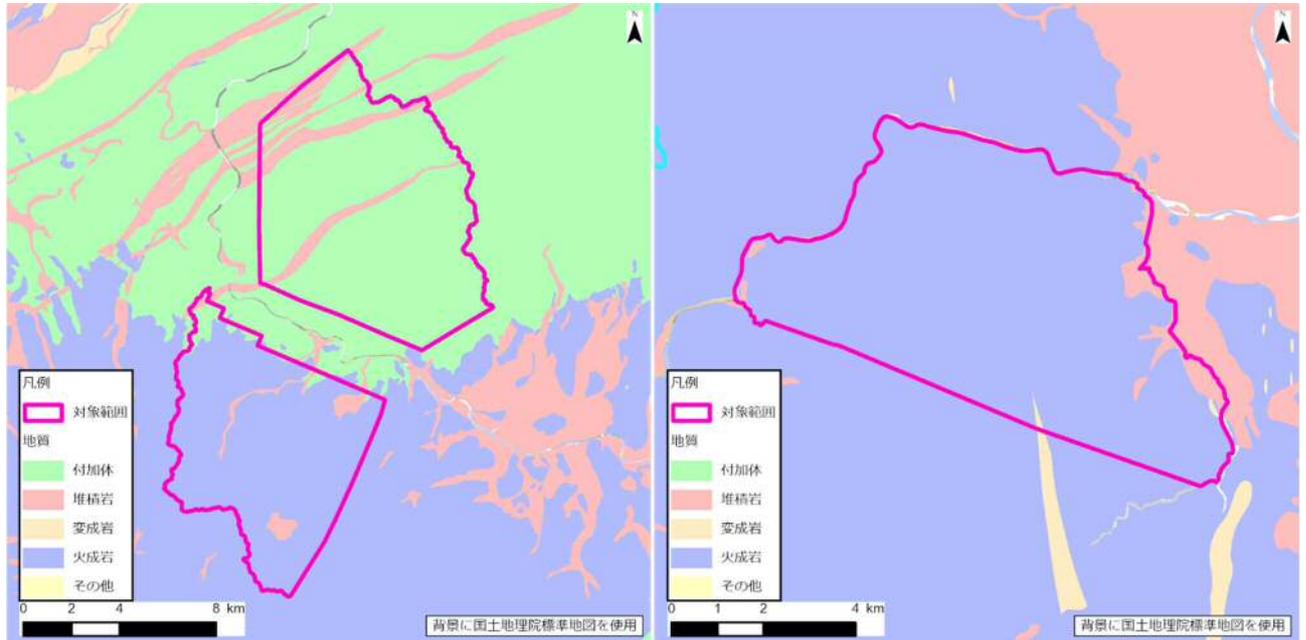


図 91 対象地の地質（左：球磨村 右：丸森町）

また、本調査では災害後の航空レーザ計測成果による森林資源解析成果を用いたため、源頭部のあるメッシュの森林資源情報として隣接するメッシュの樹高および立木密度の最大値を使用した。前述の通り、妥当性を確認した上で使用しているが、実際の災害発生前の立木密度より高く算出される可能性があり「立木密度が高いと土砂流出が発生しやすい」という結果になりやすい、路網の幅員を含むメッシュの場合は土砂流出が路網の影響によるものか、高い立木密度によるものか判別がしづらいついた留意事項が残る。そのため、災害発生前の航空レーザ計測成果による森林資源解析成果のある地域で再度解析および最大値による補正の妥当性確認を行い、森林整備に関する条件の影響の確からしさを確認する必要がある。

11. 工程表

本業務は下記の工程表の通り実施した。

表 93 工程表

工程表

	主な作業内容	業務数量	令和6年			令和7年		
			10月	11月	12月	1月	2月	3月
業務計画		1式	■	■	■			
資料収集整理		1式	■	■	■			
1.2.3.森林の状況や地形等と土砂流出発生の有無の関連性に関するデータ収集	1.2.3.1. 災害発生前の基礎データ収集：既存資料の活用	1式		■	■			
	1.2.3.2. 森林の経年変化箇所抽出：衛星画像等の活用	1式		■	■			
	1.2.3.3. 近年の豪雨災害に伴う土砂流出・崩壊の解析：航空レーザー計測データ等の活用	1式			■	■	■	■
	1.2.3.4. 一定の区域での集約	1式			■	■	■	■
1.2.4.森林の状況や地形等と土砂流出の関係に関する分析	1.2.4.1. 地形データが同等と思われる区域での因子分析	1式				■	■	■
	1.2.4.2. 土砂流出発生区域と未発生区域での因子分析	1式				■	■	■
	1.2.4.3. 現地調査	2回			■	■	■	■
	1.2.4.4. 地域間の土砂流出発生頻度やその要因の比較	1式			■	■	■	■
1.2.5.既存の知見と分析結果との比較	1.2.5.1. 既存の知見・研究成果の収集・整理	1式		■	■	■	■	■
	1.2.5.2. 整理した既存の知見と分析結果との比較	1式				■	■	■
1.2.6.調査報告書の作成	・調査報告書の作成 ・概要版の作成	1式						■
照査	・作業計画、上記1.2.3～1.2.6の作業項目の要点的整理・成果提出時に照査を実施	5回		◎		◎	◎	◎
打合せ	・毎月1回進捗等に関する打合せ	5回	■	■	■	■	■	■

 : 当初工程
 : 実績工程