

公益社団法人 国土緑化推進機構
「緑と水の森林ファンド」事業助成

森林調査手法の現状と今後のあり方に関する報告書

平成30年度報告書

令和元年6月

公益社団法人 森林・自然環境技術教育研究センター

【目次】

はじめに	1
第1節 部会の調査研究目的.....	1
第1項 森林調査手法部会の目的.....	1
第2項 調査の方向性.....	1
第3項 全体計画	1
第2節 部会の開催状況.....	2
第1項 平成29年度の検討委員会と作業部会のメンバー構成.....	2
第2項 平成30年度の検討委員会のメンバー構成	3
第3項 部会の開催状況	3
0.2.3.1 平成29年度第1回検討委員会	3
0.2.3.2 平成29年度作業部会準備会	3
0.2.3.3 平成29年度第1回作業部会	3
0.2.3.4 平成29年度第2回検討委員会	3
0.2.3.5 平成30年度第1回検討委員会	4
0.2.3.6 平成30年度第2回検討委員会	4
0.2.3.7 平成30年度第3回検討委員会	4
第3節 報告書の要約	4
第1章 平成29年度検討内容	6
第1節 第1回検討委員会	6
第2節 作業部会準備会	7
第3節 第1回作業部会.....	7
第4節 第2回検討委員会	8
第2章 平成30年度検討内容	9
第1節 第1回検討委員会	9
第2節 第2回検討委員会	9
第3節 第3回検討委員会	10
第3章 森林調査の基礎と技術動向.....	11
第1節 森林調査および調査方法の変遷	11
第1項 はじめに	11
第2項 森林調査（森林資源調査～森林生態系多様性基礎調査）調査項目の変遷	11
第3項 従来の一般的な森林調査方法.....	15
3.1.3.1 樹種.....	15
3.1.3.2 樹高	15
3.1.3.3 直径（周長）	16
3.1.3.4 林分材積	17
3.1.3.4.1 每木法.....	17
3.1.3.4.1 標準木法.....	18
3.1.3.4.3 標準地法.....	18
3.1.3.4.4 標本調査法	19
3.1.3.5 ビッターリッヒ法（定角測定法）による胸高断面積合計の推定	19
3.1.3.5.1 ビッターリッヒ法（定角測定法）の原理	20
3.1.3.5.2 ビッターリッヒ法（定角測定法）の応用方法.....	21

3.1.3.6 根系	23
第2節 森林における土砂流出調査技術	25
第1項 はじめに	25
第2項 山地斜面および溪流における土砂生産現象に係わる調査・観測	25
3.2.2.1 地質調査	25
3.2.2.2 土質調査	25
3.2.2.3 植生調査	26
3.2.2.4 降雨	26
3.2.2.5 地表水調査	26
3.2.2.6 地下水調査	26
3.2.2.7 気象・地象	26
3.2.2.8 土砂移動形態、移動量	26
第3項 溪流における土砂および流木の流下・堆積現象に係わる調査・観測	26
第4項 降雨による土壤侵食の調査・観測	27
第5項 森林内における樹冠通過雨量と樹冠遮断損失率	29
3.2.5.1 森林内の水収支	29
3.2.5.2 開空度の測定	30
第3節 デジタル技術を用いた森林調査	32
第1項 はじめに	32
第2項 ICT を用いた森林調査方法のレビュー	32
3.3.2.1 ICT を用いた森林計測と森林管理：現況把握	32
3.3.2.2 ICT を用いた森林計測と森林管理：バイオマスの推定	34
3.3.2.3 ICT を用いた山地災害監視：地すべり観測	34
3.3.2.4 ICT を用いた治山施設監視	36
第3項 調査事例	36
3.3.3.1 Web 型自動観測システムを用いた山地災害の監視	36
3.3.3.2 Web 型自動観測システムを用いた治山施設経年変化の監視	37
第4節 モバイル GIS を用いた森林調査	41
第1項 モバイル GIS を用いた森林調査方法のレビュー	41
3.4.1.1 PDA を使ったモバイル GIS	41
3.4.1.2 スマートフォンやタブレットを使ったモバイル GIS	42
第2項 モバイル GIS の事例	43
第5節 UAV を用いた森林調査	46
第1項 UAV について	46
3.5.1.1 UAV 機体の種類と特徴	46
3.5.1.2 UAV 搭載センサの種類	46
第2項 UAV 計測の注意事項	47
3.5.2.1 飛行可能な空域	47
3.5.2.2 飛行方法	48
3.5.2.3 安全対策	48
第3項 UAV 計測によって得られる情報	48
第4項 UAV 計測によって得られる情報の特徴	49
3.5.4.1 デジタルカメラによって得られるオリジナル点群、DSM の特徴	49
3.5.4.2 レーザスキャナによって得られるオリジナル点群、DSM の特徴	50
第5項 UAV による森林計測の今後	51
第6節 空中写真を利用した森林調査	52

第1項 空中写真の準備	52
3.6.1.1 空中写真の特徴.....	52
3.6.1.2 日本の森林分野での空中写真の歴史.....	52
3.6.1.3 空中写真の種類.....	52
3.6.1.3.1 アナログ撮影空中写真.....	52
3.6.1.3.2 デジタル撮影空中写真.....	53
3.6.1.4 空中写真の入手方法	54
第2項 空中写真を利用した森林調査例.....	54
3.6.2.1 林相・樹種判読.....	54
3.6.2.2 土地被覆変化	55
3.6.2.3 境界調査.....	55
第7節 航空レーザを用いた森林調査.....	57
第1項 航空レーザ計測について	57
第2項 航空レーザ計測による取得データ	58
第3項 航空レーザ計測の森林調査の目的	58
3.7.3.1 森林資源状況の把握	58
3.7.3.2 樹木生育状況	59
3.7.3.3 山地災害被害状況	59
3.7.3.4 経年変化.....	59
3.7.3.5 森林境界管理	60
第4項 航空レーザ計測の今後.....	60
第8節 人工衛星を用いた森林調査	61
第1項 人工衛星を用いた森林調査方法のレビュー.....	61
3.8.1.1 人工衛星観測の特徴	61
3.8.1.1.1 広域同時性	61
3.8.1.1.2 広域均質性	61
3.8.1.1.3 多波長性	61
3.8.1.1.4 経済性.....	61
3.8.1.2 事業計画策定における留意事項	62
第2項 光学センサ	63
3.8.2.1 画像利用	63
3.8.2.2 写真測量	63
3.8.2.3 光学センサ利用における留意点	64
3.8.2.3.1 太陽エネルギー	64
3.8.2.3.2 大気諸成分	64
3.8.2.3.3 斜面方位と傾斜角	64
3.8.2.3.4 ミクセル	65
第3項 衛星 SAR	65
3.8.3.1 後方散乱画像	65
3.8.3.2 干渉 SAR 解析	66
3.8.3.3 衛星 SAR 利用における留意点	66
3.8.3.3.1 散乱特性の理解	66
3.8.3.3.2 レーダシャドウ	66
3.8.3.3.3 レイオーバ	67
3.8.3.3.4 干渉 SAR 解析のためのペア画像選択	67
第4章 応用編：森林調査の事例	68

第1節 森林資源状況の把握.....	68
第1項 樹頂点抽出手法と航空レーザ計測密度.....	68
第2項 胸高直径の推定	68
第3項 森林資源把握結果の留意点	70
第2節 造林木の生育状況の把握：人工衛星データによる常緑針葉樹人工林の成長評価	72
第1項 はじめに	72
第2項 成長による反射スペクトルの変化に基づく成長評価.....	72
4.2.2.1 成長による反射スペクトルの変化（栗屋ほか 1996）	72
4.2.2.2 スペクトルの経年変化を利用した成長評価（栗屋 1997）	72
4.2.2.3 推定林齢の分布図（栗屋 1998）	74
4.2.2.4 推定林齢による成長状況の判定（栗屋 1998）	74
第3項 多雪地帯での広葉樹林混交の実態把握と広葉樹林化のポテンシャル評価（栗屋・西園 2005）	76
4.2.3.1 TM データによる森林タイプ分類.....	77
4.2.3.2 落葉樹混交の特徴	77
4.2.3.3 広葉樹林化ポテンシャルと誘導指針	78
第3節 空中写真を活用した効果的なマツ枯れ防除法.....	80
第1項 はじめに	80
第2項 マツ枯れの仕組み.....	80
第3項 何が難しいのか	81
第4項 効果的な方法とは.....	81
4.3.4.1 どのように空中撮影するか.....	81
4.3.4.2 解析事例.....	82
第5項 マツ枯れ対策法を空撮に変更した岩手県	83
第4節 ナラ枯れ被害の抽出および拡大予測の手法について	85
第1項 はじめに	85
第2項 ナラ枯れの抽出手法	85
4.4.2.1 レーザ計測による大径木の抽出	85
4.4.2.2 衛星画像を用いたナラ枯れの抽出.....	86
第3項 ナラ枯れの拡大予測手法.....	86
第4項 おわりに	87
第5節 山地災害状況の把握.....	89
第1項 はじめに	89
第2項 平成 20 年 岩手・宮城内陸地震.....	89
第3項 平成 25 年台風第 26 号（東京都大島町）	90
第4項 平成 30 年 7 月豪雨災害（広島県、岡山県、愛媛県等の中四国地方）	91
第5項 おわりに	92
第6節 治山施設の管理：デジタルカメラを用いた集水井工の維持管理.....	93
第1項 維持管理の必要性	93
第2項 維持管理の必要性と実施上の課題	93
第3項 近年の維持管理手法	94
第4項 SfM 解析による集水井 3D モデル及び展開写真の作成事例	95
4.6.4.1 高画質静止画の撮影	95
4.6.4.2 3D モデル及び展開写真の作成.....	96
4.6.4.3 従来の点検手法との比較	97
4.6.4.4 今後の展望	97

第7節 空中写真の立体視による森林境界管理.....	98
第1項 はじめに（何が難しいのか）	98
第2項 今的方法でよいのか	98
第3項 効果的な方法とは.....	98
4.7.3.1 空中写真を立体視して使う	99
4.7.3.2 空中写真による境界線確定事例	99
第4項 外業対応型のGISと活かす	101
第5章 展望編：森林調査の将来	103
第1節 土砂移動現象とリモートセンシング技術	103
第1項 土砂移動研究におけるリモートセンシング技術	103
第2項 森林植生の空間的および時間的な違いが斜面崩壊に与える影響についての簡単な検討事例.....	106
5.1.2.1 林齢の空間的な違いが斜面崩壊発生に与える影響	107
5.1.2.2 林齢空間分布の時間的な違いが斜面崩壊発生に与える影響	107
第3項 おわりに	108
第2節 マルチスペクトルレーザ（先端レーザ）を使った森林調査.....	110
第1項 マルチスペクトルレーザとは.....	110
第2項 色調情報を加味した土地被覆分類	111
第3項 グリーンレーザを活用した測深計測.....	112
第3節 UAVを用いた森林調査.....	114
第1項 はじめに	114
第2項 UAVの飛行ルールに関する動向	114
5.3.2.1 飛行禁止区域の拡大（規制強化）	114
5.3.2.2 目視外飛行の要件明確化（規制緩和）	114
第3項 UAVの技術革新に関する動向	116
5.3.3.1 非GPS環境での飛行制御技術	116
5.3.3.2 垂直離陸型UAV「VTOL」	116
第4項 UAVを用いた森林調査の将来展望.....	117
第5項 おわりに	117
第4節 山地災害状況とリモートセンシング技術.....	118
第1項 はじめに	118
第2項 超小型衛星による準リアルタイム観測.....	118
第3項 高高度疑似衛星によるリアルタイム観測	119
第4項 進化型コーナーリフレクタ	120
5.4.4.1 常時設置型コーナーリフレクタ	120
5.4.4.2 アクティブコーナーリフレクタ	121
第5項 おわりに	121
付表 測高器	123
あとがき	125

【巻末資料】

【巻末資料】	i
資料 1：森林調査手法キーワード集	ii
資料 2：森林調査手法事例一覧表	xi
資料 3：森林調査方法部会 平成 29 年度第 1 回検討委員会討議事項メモ	xiii
資料 4：森林調査方法部会 平成 29 年度作業部会準備会討議事項メモ	xvi
資料 5：森林調査方法部会 平成 29 年度第 1 回作業部会討議事項メモ	xviii
資料 6：森林調査方法部会 平成 29 年度第 2 回検討委員会討議事項メモ	xxi
資料 7：森林調査方法部会 平成 30 年度第 1 回検討委員会討議事項メモ	xxiv
資料 8：森林調査方法部会 平成 30 年度第 2 回検討委員会討議事項メモ	xxvi

はじめに

第1節 部会の調査研究目的

第1項 森林調査手法部会の目的

森林調査はその目的によって、調査内容と調査方法が異なってくる。経済社会情勢の変化とともに森林に対する国民の要請・関心が変わることにより森林調査の目的、調査内容が複雑多岐にわたるようになり、また、科学技術の進歩に伴って調査方法も進化を続けている。

わが国の森林調査は、森林計画作成のための基礎資料として小班ごと現況を把握する森林簿方式と全国の森林資源の状況を客観的に把握するための標本調査法（サンプリング）による全国森林資源調査からスタートしている。調査手法としては、収穫予想表、空中写真などを活用した現地調査であった。

現在、調査目的は樹木の生育状況、病害虫の被害状況、山地災害発生状況や経年変化などの把握、森林境界管理等々多岐にわたってきた。また、調査方法としては、従来の空中写真に加えて、デジタル空中写真、衛星画像、レーザプロファイラの活用も進んでいる。さらに、航空機に加えて、人工衛星、UAV、また、ICTの利用も進んでいる。

このような状況を踏まえて、本研究開発課題は、森林調査手法のこれまでの変遷を取りまとめ、経済社会情勢の動向に対応したこれからの森林調査のあり方を検討する。

第2項 調査の方向性

地方公共団体が注目し集中的に予算を投入している分野を対象とする。本調査研究のアウトライチとして作成する報告書は、地方公共団体の林務担当者が読んで、森林調査方法がアナログからデジタルへ、そして、地上での調査から空からの調査へ、それに伴って個別計測から全体計測へ、また、概略測定から高精度測定へ、という流れで発展してきたことがわかるものとする。そして、森林調査の目的別に応用事例を収集し、林務担当者が知りたい結果を得るためにには、どのように計測の要素技術を組み合わせて解析を進めていくのかわかるようにする。

現在までの技術発展を踏まえたうえで、今後の技術動向を展望する。森林調査の目的別に、技術発展によって何が可能になるか、こういうことを明らかにするためには何を計測できるようにしたいか、というような将来の研究シーズも収集する。

第3項 全体計画

森林調査手法部会は平成29年7月から令和元年6月までの2年間の計画である。全体の計画を表0.1に示す。

表0.1 年間（平成29年度～平成30年度）の計画工程表

事業内容	H29	H30
森林調査手法を適用する分野の検討	↔	
規模、対象、方法別の森林調査手法に関する文献や資料等の収集・分析	↔	
森林調査手法適用事例の文献・資料の収集・分析	↔	
森林調査手法の変遷のまとめと整理	↔	
現行・最新調査技術の分析	↔	→
将来調査手法の展望		↔

第2節 部会の開催状況

第1項 平成29年度の検討委員会と作業部会のメンバー構成

平成29年度は森林調査手法部会を立ち上げ、学識経験者および森林分野技術者からなる検討委員会を設置した（表0.2）。さらに、実務を担う作業部会を設置した（表0.3）。

表0.2 学識経験者委員らによる検討委員会メンバー

【学識経験者委員】 ※ 座長

栗屋善雄※	岐阜大学 流域圏科学研究センター 教授
佐野真琴	森林総合研究所 森林管理研究領域 領域長（30年3月まで）
鷹尾 元	森林総合研究所 森林管理研究領域 領域長（30年4月より）
石川芳治	東京農工大学 名誉教授
執印康裕	宇都宮大学 学術院 森林科学科 教授
大野勝正	アジア航測、鹿児島大学 客員講師

【本部事務局・オブザーバー】

弘中義夫	森林保全・管理技術研究所 事務局長
志水俊夫	森林保全・管理技術研究所 主任研究員
今井靖晃	国際航業 技術サービス本部 生産プロセス監理室 室長
後藤智哉	グリーン航業 事業部 部長・主任研究員
淵田康裕	パスコ 中央省庁営業二課 担当課長（30年3月まで）
洲濱智幸	パスコ システム技術部 副部長（30年4月より）

【部会事務局】

榎田充哉	国土防災技術
木内秀叙	国土防災技術
岡本勝男	国土防災技術

表0.3 学識経験者・実務者委員らによる作業部会メンバー

【ワーキンググループ】 ※ 部会長

栗屋善雄※	岐阜大学 流域圏科学研究センター 教授
大野勝正	アジア航測、鹿児島大学 客員講師
今井靖晃	国際航業 技術サービス本部 生産プロセス監理室 室長
後藤智哉	グリーン航業 事業部 部長・主任研究員
淵田康裕	パスコ 中央省庁営業二課 担当課長（30年3月まで）
洲濱智幸	パスコ システム技術部 副部長（30年4月より）

【本部事務局・オブザーバー】

弘中義夫	森林保全・管理技術研究所 事務局長
志水俊夫	森林保全・管理技術研究所 主任研究員
北林 拓	アジア航測 国土保全コンサルタント事業部

【部会事務局】

榎田充哉	国土防災技術
木内秀叙	国土防災技術
岡本勝男	国土防災技術

第2項 平成30年度の検討委員会のメンバー構成

平成29年度に森林調査手法部会を立ち上げ、学識経験者および森林分野技術者からなる検討委員会を設置した（表0.2）。そのメンバーを平成30年度も引き継いだ。

第3項 部会の開催状況

平成29年度は検討委員会を2回開催し、部会で扱う内容および方針等を決めた。作業部会を準備会と合わせて2回開催して文献や資料の収集と分析を行った。検討委員会では、森林調査の対象分野や森林調査における課題、活動方針について議論がなされ、検討結果報告書の想定利用者やどのような書きぶりが必要か、意見の交換がなされた。

平成30年度は本調査研究の最終年度であることから、本調査研究報告書の内容について検討した。以下に、検討委員会と作業部会の開催日ならびに討議内容を日付順に示す。

0.2.3.1 平成29年度第1回検討委員会

開催日：平成30年2月7日（水） 14:00～17:00

開催場所：森林保全・管理技術研究所 5階会議室

委員会検討内容：

- ① 本研究部会で取り扱う森林調査の目的；
- ② 森林調査項目；
- ③ 報告書の目次案；
- ④ 委員とオブザーバーの執筆分担案；
- ⑤ 作業部会の設置；
- ⑥ 第一回検討委員会後のスケジュール

0.2.3.2 平成29年度作業部会準備会

開催日：平成30年3月13日（火） 14:00～17:00

開催場所：森林保全・管理技術研究所 5階会議室

準備会検討内容：

- ① 作業部会の設置；
- ② 報告書の目次案；
- ③ 報告書執筆分担；
- ④ 作業部会設置後のスケジュール

0.2.3.3 平成29年度第1回作業部会

開催日：平成30年5月15日（火） 14:00～17:00

開催場所：国土防災技術 虎ノ門オフィス 5階会議室

準備会検討内容：

- ① 初年度報告書目次案；
- ② 最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補；
- ③ 最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補；
- ④ 最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補；
- ⑤ 森林リモートセンシングの利用と装置の事例リスト；
- ⑥ 報告書へのISBNコード（出版者記号）の取得

0.2.3.4 平成29年度第2回検討委員会

開催日：平成30年5月21日（月） 14:00～17:00

開催場所：森林保全・管理技術研究所 5階会議室

委員会検討内容：

- ① 初年度報告書目次案；
- ② 報告書原稿の用語の統一；
- ③ 最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補；
- ④ 最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補；
- ⑤ 最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補；
- ⑥ 第二回検討委員会後のスケジュール

0.2.3.5 平成30年度第1回検討委員会

開催日：平成30年12月10日（月）～平成31年1月8日（火）

開催場所：インターネット

委員会検討内容：

- ① 最終報告書目次案；
- ② 最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補；
- ③ 最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補；
- ④ 最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補；
- ⑤ 第1回検討委員会後のスケジュール

0.2.3.6 平成30年度第2回検討委員会

開催日：令和元年6月上旬

開催場所：インターネット

委員会検討内容：

- ① 最終報告書内容；
- ② 研修会；
- ③その他

0.2.3.7 平成30年度第3回検討委員会

開催日：令和元年7月（予定）

開催場所：インターネット

委員会検討内容：

- ① 研修会；
- ②その他

第3節 報告書の要約

平成30年度報告書は基礎編、応用編、展望編から成る。目次と概要を以下に示す。

はじめに（事務局）

第1節 部会の調査研究目的

第2節 部会の開催状況

第3節 報告書の要約

第1章 初年度検討内容（事務局）

第1節 第1回検討委員会

第2節 作業部会準備会

第3節 第1回作業部会

第4節 第2回検討委員会

第2章 最終年度検討内容（事務局）

第1節 第1回検討委員会

第2節 第2回検討委員会

第3節 第3回検討委員会

第3章 森林調査の基礎と技術動向

第1節 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）

これまでに実施されてきた森林資源調査の内容について、その変遷の概略を整理するとともに、リモートセンシング技術によらない従来から実施されている一般的な森林調査方法についても整理する。

第2節 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）

山地災害および土砂災害を引き起こす土砂移動現象は一般に「土石流、土砂流、掃流」、「地すべり」、「急傾斜地崩壊」に分けることができる。この誘因として、降雨を対象とする。山地斜面で発生する「土壤侵食、斜面崩壊、地すべり」と渓流で生じる「土石流、土砂流、掃流等」および「流木」がある。土砂移動現象毎に主な現地における調査・観測手法について述べる。

第3節 デジタル技術を用いた森林調査（岡本勝男）

接触型および非接触型センサを地上に設置し、あるいは地上を移動しながら森林や山地を観測する方法を概観する。そして、それらを用いた山地災害の監視と治山施設の管理の事例を紹介する。

第4節 モバイルGISを用いた森林調査（龍見栄臣・竹村文・高田香・岡本勝男）

モバイルGISを用いた森林調査を行うために必要な基礎知識と使用上の注意を紹介する。そして、治山施設調査への応用事例を紹介する。

第5節 UAVを用いた森林調査（今井靖晃）

UAVを用いた森林調査を行うために必要なUAVの基礎知識と使用上の注意を紹介する。そして、森林資源、樹木生育状況、山地災害、林地境界への応用事例を紹介する。

第6節 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）

空中写真を用いた森林調査のために必要な空中写真の基礎知識と利用上の注意を紹介する。そして、林相・樹種判読、土地被覆変化、林地境界調査への応用事例を紹介する。

第7節 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）

航空レーザを用いた森林調査を行うために必要なレーザ計測の基礎知識と利用上の注意を紹介する。そして、森林資源状況の把握、樹木生育状況、山地災害被害状況、経年変化、森林境界管理への応用事例を紹介する。

第8節 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）

人工衛星を用いた森林調査方法のレビューを行い、衛星光学センサデータを用いた樹種分類図作成に関する事例と、衛星SARセンサデータを用いた地すべり調査に関する事例を紹介する。

第4章 応用編：森林調査の事例

第1節 森林資源状況の把握（大野勝正）

航空レーザ計測により樹頂点抽出と胸高直径を推定する事例を示し、森林資源把握結果の留意点を説明する。

第2節 造林木の生育状況の把握：人工衛星データによる常緑針葉樹人工林の生長評価（粟屋善雄）

ランドサットTMを用いて行った研究事例を紹介する。

第3節 空中写真を活用した効果的なマツ枯れ防除法（中北理）

空中写真を用いて行った効果的なマツ枯れ防除法の研究事例を紹介する。

第4節 ナラ枯れの被害の抽出および拡大予測の手法について（船越和也・金宗煥）

ナラ枯れの被害を受けやすい大径木をレーザ計測で把握する方法と衛星リモートセンシングにより広域のナラ枯れを推定する事例を示し、拡大予測についてもを説明する。

第5節 山地災害被害状況の把握（洲濱智幸）

リモートセンシングを用いて行った山地災害被害状況把握の研究事例を紹介する。

第6節 治山施設の管理：デジタルカメラを用いた集水井の維持管理（齊藤雅志）

デジタルカメラを用いて行った集水井維持管理の事例を紹介する。

第7節 空中写真の立体視による森林境界管理（中北理）

空中写真を用いて行った立体視による森林境界管理の研究事例を紹介する。

第5章 展望編：森林調査の将来

第1節 土砂移動現象とリモートセンシング技術（執印康裕）

リモートセンシングと土砂移動物理モデルの融合の研究として、森林植生と斜面崩壊の関係について検討した事例を紹介し、リモートセンシング技術を用いた土砂移動研究を展望する。

第2節 先端レーザを使った森林調査（大野勝正）

先端的な航空レーザ計測を用いた森林調査を展望する。

第3節 UAV を使った森林調査（今井靖晃）

UAV 計測を用いた先端的な森林調査を展望する。

第4節 山地災害とリモートセンシング技術（洲濱智幸）

リモートセンシングを用いた先端的な災害被害把握を展望する。

付表 測高器と地上レーザ（鷹尾元）

現在の測高器と地上レーザをまとめた。

あとがき（事務局）

第1章 平成29年度検討内容

平成29年度は、本調査研究の初年度であることから、課題を設定して調査方法の検討及び森林調査の文献・資料の収集を実施し、地上から人工衛星にいたる調査方法について取りまとめた。具体的には、以下の5項目である。

- ① 森林調査手法を適用する分野の検討；
- ② 規模、対象、方法別の森林調査手法に関する文献や資料の収集・分析；
- ③ 森林調査手法適用事例の文献・資料の収集・分析；
- ④ 森林調査手法の変遷のまとめと整理；
- ⑤ 現行・最新調査技術の分析

規模、対象、方法別の森林調査手法に関する文献や資料の収集、適用事例の文献・資料の収集、森林調査手法の変遷のまとめと整理、現行・最新調査技術資料の収集と整理を行った。そして、森林調査の対象分野や森林調査における課題、活動方針について議論がなされ、検討結果報告書の想定利用者やまとめ方について意見の交換がなされた。

第1節 第1回検討委員会

平成30年2月7日（水） 14:00～17:00に、森林保全・管理技術研究所 5階会議室で開催され、次の議題について検討した。

【討議事項1】本研究部会で取り扱う森林調査の目的について

【討議結果1】森林調査の目的は、次の6分野とする

- ① 森林資源状況の把握；
- ② 樹木生育状況の把握；
- ③ 病虫害被害状況の把握；

- ④ 山地災害被害状況の把握；
- ⑤ 治山施設の管理；
- ⑥ 森林境界の管理

【討議事項 2】報告書の目次案について

【討議結果 2】

- ① 規模（エリア、スケール）別に、対象（事象）、方法を書く；
- ② 前半に「基礎編」、その後に「応用編（事例）」、「展望」、「まとめ」とする

【討議事項 3】作業部会の設置について

【討議結果 3】

- ① 作業部会が必要、作業部会メンバーはオブザーバーと事務局を想定；
- ② 作業部会設置可能か準備会を開く；
- ③ 設置可能なら、作業部会の内容、原稿をどう書くか検討する

第2節 作業部会準備会

平成30年3月13日（火） 14：00～17：00に、森林保全・管理技術研究所 5階会議室で開催され、次の議題について検討した。

【討議事項 1】作業部会の設置について

【討議結果 1】作業部会を設置する

【討議事項 2】報告書目次案について

【討議結果 2】報告書は基礎、技術動向、展望とする

- ① 基礎編と技術動向の一部を初年度報告書に入れる

【討議事項 3】報告書執筆分担について

【討議結果 3】

- ① 基礎は作業部会と事務局、技術動向は作業部会と専門家、展望は目的ごとに委員と書ける人を探して依頼；
- ② グリーン航業：航空機／写真とマルチスペクトル；
- ③ パスコ：衛星光学；
- ④ アジア航測：航空機レーザ；
- ⑤ 国際航業は UAV；
- ⑥ 国土防災技術：ICT；
- ⑦ 書く分量は、4～5ページが基本

【討議事項 4】今後のスケジュール

【討議結果 4】

- ① 第1回作業部会を4月下旬～5月上旬に開催する；
- ② 第2回検討委員会を5月下旬に開催する；
- ③ 原稿骨子を4月20日（金）までに提出する；
- ④ 原稿（初稿）を5月7日（月）までに提出する

第3節 第1回作業部会

平成30年5月15日（火） 14：00～17：00に、国土防災技術 虎ノ門オフィス 5階会議室で開催され、次の議題について検討した。

【討議事項 1】初年度報告書目次案

【討議結果 1】初年度報告書は全て基礎編とする

1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）

- 1.3 情報通信技術を用いた森林調査（岡本勝男）
- 1.4 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
- 1.5 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）
- 1.6 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）
- 1.7 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）
- 1.8 土砂移動現象とリモート・センシング技術（執印康裕）

【討議事項 2】最終報告書の基礎編、応用編、展望に入る分野と事例、著者候補

【討議結果 2】

- ① 基礎編は初年度報告書に準ずる；
- ② 応用編は初年度の内容を膨らませる、または、目的に沿って書いてもらう；
- ③ 展望編は初年度の内容を膨らませる、または／加えて、目的に沿って夢を語ってもらう

【討議事項 3】森林リモートセンシングの利用と装置の事例リスト

【討議結果 3】研究レベルは除外して、実用レベルだけ載せる

【討議事項 4】本報告書への ISBN コード（出版者記号）の取得

【討議結果 4】事務局で検討する

第4節 第2回検討委員会

平成 30 年 5 月 21 日（月） 14：00～17：00 に森林保全・管理技術研究所 5 階会議室で開催され、次の議題について検討した。

【討議事項 1】初年度報告書目次案

【討議結果 1】

- 1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 デジタル技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.4 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
 - 1.5 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）
 - 1.6 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）
 - 1.7 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）
 - 1.8 土砂移動現象とリモート・センシング技術（執印康裕）

【討議事項 2】最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補

【討議結果 2】初年度報告書が出た後で追加する

- ① 前書きを入れる；
- ② 森林調査全体の目的をつける

【討議事項 3】最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補

【討議結果 3】応用編に入る分野と事例、著者候補

- ① 森林資源状況の把握：大野勝正氏；
- ② 樹木生育状況の把握：粟屋善雄氏；
- ③ 病虫害被害状況の把握（ナラ枯れ、マツ枯れ）中北理氏；
- ④ 山地災害被害状況の把握：洲濱智幸氏；
- ⑤ 治山施設の管理（図面→GIS へ 維持管理は？）：担当者未定；
- ⑥ 森林境界の管理：日林協担当者
- ⑦ ①、③～⑥は事務局から依頼する；
- ⑧ ③と⑤の人選は事務局が行う

【討議事項 4】最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補

【討議結果 4】展望編に入る分野と事例、著者候補

- ① 土砂移動現象とリモートセンシング技術：執印康裕氏；
- ② 先端レーザを使った〇〇：大野勝正氏；
- ③ UAV：今井靖晃氏；
- ④ 山地災害：洲濱智幸氏；
- ⑤ 生育状況か生長：粟屋善雄氏

【確認事項 1】原稿執筆要領

【確認結果 1】引用は番号でなく（著者名 年）にする

【確認事項 2】森林リモートセンシングの利用と装置の事例リスト

【確認結果 2】鷹尾元氏に「測高器、地上レーザ」を書いてもらう

第 2 章 平成 30 年度検討内容

本調査研究の最終年度であることから、本調査研究報告書の内容について検討した。報告書には最近の新しい森林調査方法を用いた調査の事例を取りまとめ、今後のあり方についての検討を行う。基礎編の不足部分を補い、応用事例と展望について検討する。

- ① 基礎編に追加する項目、著者候補；
- ② 応用編に追加する項目、著者候補；
- ③ 展望編に追加する分野と事例、著者候補

本調査研究のアウトリーチとして作成する報告書は、地方公共団体の林務担当者が読んで、実務に役立つものでなくてはならない。森林調査方法がアナログからデジタルへ、そして、地上での調査から空からの調査へ、それに伴って個別計測から全体計測へ、また、概略測定から高精度測定へ、という流れで発展してきたことがわかる構成にする。それに向けて、平成 29 年度では修正しきれなかった基礎編原稿を改良するとともに、森林調査の目的別に応用事例を収集し、林務担当者が知りたい結果を得るためにには、どのように計測の要素技術を組み合わせて解析を進めていくのかわかるようにしたいというのが、検討委員と作業部会員の一致した思いである。例えば、要素技術を組み合わせて森林資源状況の把握、樹木生育状況の把握、病虫害被害状況の把握、山地災害被害状況の把握、治山施設の管理、森林境界の管理という森林調査の目的別に最新の事例を紹介する。

さらに、現在までの技術発展を踏まえたうえで、今後の技術動向を展望する。土砂移動現象とリモートセンシング技術、先端レーザ関連、UAV の技術動向と応用分野、山地災害のリモートセンシング、生育状況や生長状況の推定に関して展望し、技術発展によって何が可能になるか、こういうことを明らかにするためには何を計測できるようにしたいか、というような将来の研究シーズも収集する。

第 1 節 第 1 回検討委員会

平成 30 年 12 月 10 日（月）～平成 31 年 1 月 8 日（火）に、インターネット上で開催され、次の議題について検討した。

- 【討議事項 1】最終報告書目次案について
- 【討議事項 2】最終報告書の基礎編に入れる項目、著者候補について
- 【討議事項 3】最終報告書の応用編に入れる分野と事例、著者候補について
- 【討議事項 4】最終報告書の展望に入れる分野と事例、著者候補について
- 【討議結果 1～4】「はじめに 第 3 節 報告書の要約」参照
- 【討議事項 5】第 1 回検討委員会後のスケジュールについて
- 【討議結果 5】報告書の原稿が出そろった時点で第 2 回検討委員会を開催する

第 2 節 第 2 回検討委員会

開催日：令和元年 6 月上旬に、インターネット上で開催し、次の議題について検討する。

【討議事項 1】最終報告書内容について

【討議結果 1】提出された報告書原稿を逐次回覧し、修正意見や疑義は出されなかった

【討議事項 2】研修会について

【討議結果 2】たたき台が出た時点で第 3 回検討委員会を開催する

第 3 節 第 3 回検討委員会

令和元年 7 月に、インターネット上で開催する予定。

【討議事項 1】研修会について

(未開催)

第3章 森林調査の基礎と技術動向

第1節 森林調査および調査方法の変遷

- ①目的または適応分野：森林調査全般；
- ②プラットフォーム：－；
- ③キーワード：調査方法概観、調査方法の変遷、森林資源調査の項目

第1項 はじめに

森林調査が実施される主な場面としては、まず林業があげられるだろう。林業において森林は資源として扱われ、過去に様々な調査が林野庁により実施してきた。これらの森林調査は、その後の社会的な要請に応じる形で、時代とともに調査の目的、項目なども変化し、現在は「森林生態系多様性基礎調査」という形で継続実施されている。

ここでは、これまでに実施してきた森林調査の内容について、その変遷の概略を整理するとともに、リモートセンシング技術によらない、従来から実施されている一般的な森林調査方法の概略についても整理する。

第2項 森林調査（森林資源調査～森林生態系多様性基礎調査）調査項目の変遷

戦後、林野庁が主導する形で実施してきた全国森林資源調査として吉田(2008)は以下の①～⑥をあげている（⑦は筆者追記）。

- ①1954年実施の全国3,000点調査；
- ②1961年実施の全国10,000点調査（第1回全国森林資源調査）；
- ③1966年実施の第2回全国森林資源調査；
- ④1970年実施の民有林森林生産力調査；
- ⑤1981～85年実施の全国広葉樹賦存量調査；
- ⑥1999年開始の森林資源モニタリング調査；
- ⑦2010年開始の森林生態系多様性基礎調査

これら森林調査の調査目的および調査項目の変遷について吉田(2008)より整理すると表3.1.1(1)～(2)のようになる。

その時々の社会的な要請や、それに基づき設定された調査目的などにより、調査項目が増減していることが分かる。

現在は、上記の⑦とした「森林生態系多様性基礎調査」が実施されており、その調査項目を林野庁ホームページ（林野庁森林整備部計画課全国森林計画班 2019）から引用すると表3.1.2に示すとおりである。

表 3.1.1 これまでに実施されている森林調査の調査目的、調査項目の変遷

調査名	(1)	(2)	(3)
	全国 3000 点調査 (1954)	第 1 回 全国森林資源調査 (1961)	第 2 回 全国森林資源調査 (1966)
調査の目的・目標	全国森林資源および森林の状況を客観的手法によって早急に把握する。 全国レベルの総蓄積を信頼度 95%で推定誤差 5%以下の精度で推定する（県別、樹種別、齡級別、土地利用別等）。	全国の資源の総体（森林面積と立木材積の現況）を統一した調査法により、同一時点で客観的に把握する。 全国レベルでの蓄積推定の推定誤差を 3%（信頼度 95%）	全国の資源の総体（森林面積と立木材積の現況）を統一した調査法により、同一時点で客観的に把握するとともに、5 年間にわける森林資源の推移を明らかにする。 国有林とそれ以外に分け、各集団ごとに、全国の森林総蓄積の推定誤差を 3%（信頼度 95%）、さらに営林局ごとに総材積の推定誤差が 10%以内。
調査項目（全体）	土地利用: 森林、田、畑、牧野、市街地など 所有: 国有、民有	経済地帯: 大都市近郊、都市近郊、平地農村、農山村、山村 土地利用: 森林、田、畑、牧野、砂地、その他 所有: 国有、民有 森林の種類: 民有林（普通林、制限林、その他）、国有林（第 1 種、第 2 種、第 3 種、その他、官行造林地）	経済地帯: 大都市近郊、都市近郊、平地農村、農山村、山村 土地利用: 森林、原野、耕地、その他 所有: 国有、民有 森林の種類: 制限林、普通林
調査項目（林況）	森林の種類: 民有林（普通林・制限林など）、国有林（普通林・制限林・除地） 林種: 立木地、伐採跡地、未立木地	材積・齡級 林種: 立木地、伐採跡地、未立木地	樹種、材積、齡級、タケ、ササ；林分の連続性 林種: 立木地（人工林・天然林）、無立木地（伐採跡地、未立木地） 林相: 針葉樹林、広葉樹林、針広混交林、竹林
調査項目（地況等）	地位: I 等、II 等、III 等 地利: I 等（開発林）、II 等（準開発林）、III 等（開発可能奥地林）、IV 等（開発困難林） 標高 方位: 8 方位 傾斜: 平（～5°）、緩（5～15°）、中（15～30°）、急（30°～） 地質（土性）	地利: 地利級、造林地利級 標高 方位: 8 方位 傾斜: 平（～5°）、緩（5～15°）、中（15～30°）、急（30°～） 地質	地利: 道路までの距離、部落からの距離 標高 方位: 8 方位 傾斜: 5° きざみ、45° まで 地質

表 3.1.1 (続き) これまでに実施されている森林調査の調査目的、調査項目の変遷

調査名	(④) 民有林森林生産力調査 (1970)	(⑤) 広葉樹賦存状況調査 (1981)	(⑥) 森林資源モニタリング調査 (1999)
調査の目的・目標	森林資源調査と森林所有者の伐採および造林等の態度を調査し、これらの組合せによる森林生産力調査を実施し、生産対策等の基礎資料を得る。	森林計画区ごと、広葉樹林(広葉樹材積割合が75%以上)および針広混交林(広葉樹材積割合が25%以上75%未満)を母集団とし、広葉樹の樹種別材積等を明らかにする。総材積を信頼度95%、推定誤差率15%以内で推定する。	持続可能な森林経営の推進に資する観点から、森林の状態とその変化の動向を全国を統一した手法に基づき把握、評価することにより、地域森林計画及び国有林の地域別の森林計画における森林の整備に係る基本的な事項等を定めるのに必要な客観的資料を得る。
調査項目(全体)	属地調査 属人調査 経済地帯: 大都市近郊、都市近郊、平地農村、農山村、山村 土地利用: 森林、原野、耕地、その他 所有: 国有、民有 森林の種類: 制限林、普通林	林小班 所在地 林齢(標準木を伐採し年輪調査、あるいは森林簿値を利用)	土地利用区分 土地所有区分: 国、都道府県、市町村、財産区、会社、寺社、私 森林簿林種、同樹種、優占樹種 林型: 一段林、二段林、多段林、無立木地 更新区分: 植栽、天然下種、萌芽、根茎、その他 林内写真: プロット中心点から東西南北4方向
調査項目(林況)	材積、齢級、タケ、ササ; 林分の連続性 林種: 立木地(人工林・天然林)、無立木地(伐採跡地、未立木地) 林相: 針葉樹林、広葉樹林、針広混交林、竹林	樹種別林分調査(樹種、胸高直径、樹高) 樹種は広葉樹25種、針葉樹1種の計26種	概況、立木、伐根、倒木、下層植生調査 立木調査(調査対象木: 大円=胸高直径18cm以上、中円=同5cm以上、小円=同1cm以上) 林齢、施業履歴(過去5年間) 施業: 皆伐、複層林、択伐、間伐、その他 特記事項: 病虫害、気象害、その他の害
調査項目(地況等)	地利: 道路までの距離、部落からの距離 標高 方位: 8方位 傾斜: 5° きざみ、45° まで 地質	地位 標高 斜面方位 斜面形状 土壤型 位置	車道からの距離、集落からの距離 標高 方位 傾斜 表層地質、土壤型 土壤侵食度 局所地形

表 3.1.2 森林生態系多様性基礎調査の調査内容

区分	調査内容
調査プロットの位置等	緯度・経度
地況調査	標高 方位 傾斜 表層地質 土壤型分類 局所地形 車道からの距離、集落からの距離 土壤侵食度
林分等に関する特記事項	病虫害、気象害等その他の被害、その他
調査林分概況関連データ	土地利用区分 土地所有区分 法令に基づく地域指定・法令以外の地域指定 伐採方法の指定 森林簿上の林種、森林簿上の林種（細分） 森林簿上の樹種
林分構成	優占樹種 林齡 林型 更新区分
施業履歴	施業の種類 施業歴
立木調査	樹種[a] 胸高直径[b] 樹高 枯損、剥皮、空洞
伐根調査	伐根径
倒木調査	中央径、長さ、原因、腐朽度
下層植生調査[c]	階層別植被率、階層、植物名、優占度

[a] 直径 1cm 以上の木本性の維管束植物を対象に調査

[b] 調査プロットの細区分ごとにより、調査林木の胸高直径は異なる

小円分：胸高直径 1cm 以上の立木を調査

中円部：胸高直径 5cm 以上の立木を調査

大円部：胸高直径 18cm 以上の立木を調査

[c] 下層植生調査における植物名については、被子植物、裸子植物及びシダ植物について同定

第3項 従来の一般的な森林調査方法

各種の森林調査において、これまで実施されてきた一般的な調査方法の主なものについて、その概要を以下に示す。

3.1.3.1 樹種

樹種を同定するための基本的な方法として、植物図鑑、樹木図鑑（印刷物）等の利用があげられる。また、最近であればインターネット上の樹木検索サイトや同定アプリなども開発されている。

著名な図鑑、もしくは一般的な図鑑の主なものとしては以下があげられる。

- ①大井次三郎, 1953, 日本植物誌, 至文堂, 東京;
- ②牧野富太郎, 1961, 牧野新日本植物圖鑑, 北隆館, 東京;
- ③矢野 佐・石戸 忠, 1964, 原色樹木検索図鑑, 北隆館, 東京;
- ④北村四郎・村田 源, 1979, 原色日本植物図鑑・木本編 I およびII, 保育社, 大阪;
- ⑤亀山 章, 1984, 冬芽でわかる落葉樹, 信濃毎日新聞, 長野;
- ⑥林 弥栄・古里和夫・中村恒雄, 1985, 原色樹木大圖鑑, 北隆館, 東京;
- ⑦佐竹義輔・原 寛・亘理俊次・富成忠夫, 1989, 日本の野生植物 木本 I およびII, 平凡社, 東京;
- ⑧馬場多久男, 1999, 葉でわかる樹木, 信濃毎日新聞, 長野

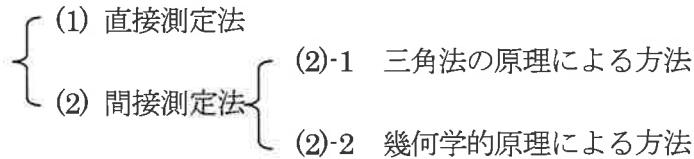
また、樹木検索サイトの中でも、公的機関が運営しているものとしては以下がある。

- ①千葉県立中央博物館, 樹木検索図鑑 ver.1.0,

<http://www.chiba-museum.jp/jyumoku2014/kensaku/>, (2019年5月15日アクセス)

3.1.3.2 樹高

樹高の測定方法は以下のように分類され、それぞれに対応した測高器が開発されている。



以下、それぞれの事例および原理について大隅眞一他 (1987) および日本林業技術協会（のち 日本森林技術協会と改称、移行。以下「日林協」と呼称）(1971) より要約して以下に示す。

(1) 直接測定法

手の届く範囲を巻き尺や測量ポールなどを利用して計測する方法である。10 m 程度までの高さであれば、樹高測桿（伸縮式測高用ポール）を利用し、測定対象木に測桿を立てかけ、やや離れたところから目視により計測することができる。

(2) 間接測定法

(2)-1 三角法の原理による方法

1) 三角法の基本原理 (図 3.1.1 (a))

三角法によって立木の高さ AB を求める方法は以下のとおり。

・水平距離 OC と角 θ_1 、 θ_2 を計測し $AB=OC \cdot (\tan \theta_1 + \tan \theta_2)$ によって求める。

2) 定距離によるもの (図 3.1.1 (b))

三角法の原理と内蔵された距離計により定距離の位置を見出し、樹高を測定するものがブルーメ・ライス測高器である。その原理を図 3.1.1 (b)に示す。ブルーメ・ライス測高器はプリズムを利用して一種の距離計を内蔵しており、定長の補助板 CD を樹幹にピンで固定し、これをプリズムを通して観測することにより、対象木から 15 m、20 m、30 m、40 m の地点を見出すことができる。

これにより OC を定距離として、 AC は $\tan \angle AOC$ に比例することから、角度目盛の代わりに樹高を目盛とすることができまするものである。

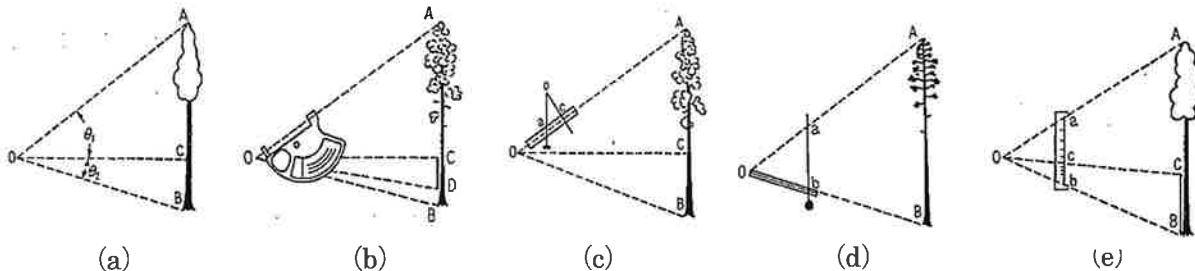


図 3.1.1 樹高間接測定の原理（林業百科事典（日林協 1971）p.526） (a) 三角学的測高法、(b) ブルーメ・ライス測高器、(c) ワイゼ測高器、(d) 麻生式測高器、(e) クリストン測高器

また、原理的にはブルーメ・ライス測高器と同様に三角法を用いるが、距離計測方法を改良したものとして、バーテックス（VERTEX）とトゥルーパルス（Tru Pulse）などの測定器がある。

バーテックスは距離計測に超音波を用いるものであり、トゥルーパルスなどは距離計測にレーザ光を利用する測定器である。これらは角度センサも内蔵しており、距離計測と同時に仰角・俯角も計測し、それらにより計測位置から対象物（梢端、根元）までの水平距離、斜距離、垂直距離（比高）を演算処理しデジタル表示するものである。

超音波により距離測定を行うバーテックスは、トランスポンダー（応答器）を利用することから、森林内など支障木により直接対象木が見えない場合でも距離測定が可能となる反面、溪流沿いやセミの鳴き声などの雑音があるところでは、測定できなくなるなどのデメリットも存在する。逆に、トゥルーパルスなどのレーザ距離計は雑音の影響は受けないものの、梢端を視準する場合など、手前に枝葉などがあると、そこでレーザ光が反射してしまい正確な計測が出来ないこともある。このような場合には、対象木までの水平距離と梢端を視準した仰角を別々に計測し、樹高を算出するなどの工夫が必要である。

(2)-2 幾何学的原理による方法

幾何学的原理によるものは、それぞれに測高器が開発されておりいずれも、図 3.1.1 (a) の $\triangle AOC$ か $\triangle AOB$ の相似形を測高器上に縮写し、その樹高部分を読み取るものである。

1) 水平距離によるもの（図 3.1.1 (c)）

水平距離を利用する測高器の代表的なものとしてワイゼ測高器がある。図 3.1.1 (c) で、水平距離 OC を別途計測した上で器具上の oc にとり、梢端を見通した時 $\triangle oac \sim \triangle OAC$ となる (oa は鉛直) から、 ac が AC となる。同様にして根元までの CB を測り AB が得られる。

2) 斜距離によるもの（図 3.1.1 (d)）

麻生式の例を図 3.1.1 (d) に示す。直接 $\triangle OAB$ の相似形を器具の上に作り、 $\triangle Oab \sim \triangle OAB$ とし、 ab を読むことにより樹高を得るものである。

3) 距離測定を要しないもの（図 3.1.1 (e)）

クリステン測高器の例を図 3.1.1 (e) に示す。定長の棒 BC を立木に添えて立て、 BC と AB の割合を器具上で計測し、それにより樹高 AB を求める方式である。

3.1.3.3 直径（周長）

森林調査においては、多くの場合、立木の胸高直径（地際から 1.2 m or 1.3 m）が計測される。計測方法としては、直接計測と間接計測があり、間接計測のための計測器具としてはシュピーゲル・レラスコープなどがあるが、ここでは直接計測に使用される計測器具について説明する。

(1) 輪尺、ノギス、電子輪尺など

輪尺の例を図 3.1.2 (左) に示す。基本的な構造は尺度とこれに直角に取り付けられた固定脚と移動可能な遊動脚からなっており、両脚で幹を挟み内側の目盛を読むことにより直径を計測することができる。電子輪尺は、これらの表示がデジタルになるとともに、データの保存、PC 等へのデータ転送・通信などの機能を備えたものもある。

(2) 直径巻き尺 など

鋼鉄製や布製の巻き尺で、普通目盛のほかに、長さを円周率で割って円周に対応する直径の値が目盛られているものである。幹の周長を測ると直ちに対応する直径が読み取れるものである。輪尺に比べて携帯性に優れるが、巻き付ける操作が必要となるため調査の効率としてはやや劣る。また大木になると 1 人では巻き付け作業が困難となる場合もある。(図 3.1.2 右)

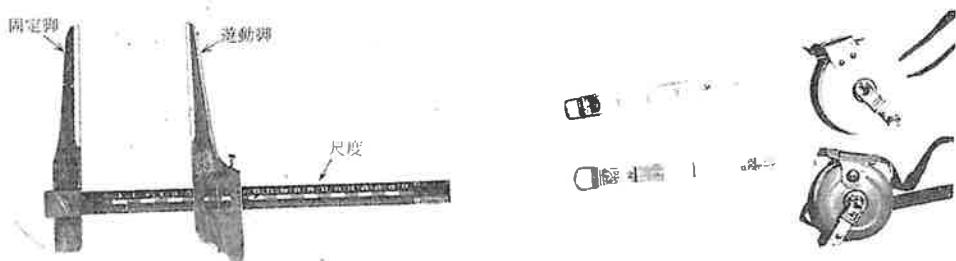


図 3.1.2 直径計測に使用される器具 (測樹 (文部省 1981) p.35,p.37) 左 輪尺、右 直径巻き尺

3.1.3.4 林分材積

樹種、樹高、胸高直径が得られたことにより、立木材積を把握することが可能となるが、ここではまとまった林分単位での材積を計測する方法について、文部省 (1981) より要約、引用して以下に示す。

3.1.3.4.1 每木法

(1) 每木調査

毎木調査とは、対象林分の全木を 1 本 1 本計測するものである。しかしながら林分材積を求める際には胸高直径のみを全木測定することが多い。一方、森林の生態系調査の場合など、調査の目的によっては全木に対して直径・樹高・形質などのすべてを計測・記録していくこともある。

毎木調査は、通常記帳者 1 名と測定者 2~3 名がチームを組み、林内を移動しながら測定を行っていく。胸高直径の測定は、材積把握を目的とする場合には、胸高直径 4 cm 以上のものを対象に 2 cm 括約で測定することが多いが、生態系調査などの場合には胸高直径 1 cm 以上のものを 1 mm 単位で測定することもある。

(2) 樹高曲線

一般的な材積計測のための毎木調査では、樹高は全林木について測定するわけではなく、1 林分で 50~100 本程度の木を選んで測定し、樹高曲線を描いて直径階ごとの平均樹高をグラフから読み取る方法がとられる。樹高曲線とは、横軸に胸高直径、縦軸に樹高をとて、胸高直径に対する樹高の平均的大きさを表す曲線である。

(3) 材積の算出

毎木調査のデータと樹高曲線図をもとに以下の手順で材積を算出する。

- ① 每木調査の野帳から直径階ごとの本数合計を次表 3.1.3 のような材積計算表に転記する；
- ② 樹高曲線から直径階ごとの平均樹高を読み取り、材積計算表に記入する；
- ③ 単木材積を当該地方・当該樹種の材積表から求める；
- ④ 単木材積に直径階ごとの本数を乗じ、直径階別材積を計算する。さらに直径階別材積の合計を求めれば、当該林分の材積が得られる。

表 3.1.3 材積計算表の例（測樹（文部省 1981） p.64）

樹種：

調査場所：

調査年月日：

直 径 階	本 数	平 均 樹 高	単 木 材 積	直 径 階 别 材 積	備 考
4					
6					
8					
計					

3.1.3.4.1 標準木法

(1) 標準木法の考え方

林分の中で、ある要素について代表的・平均的な数値を示すような樹木を標準木という。林分材積の推定を目的とするなら標準木は材積平均木が適切であるが、これは未知であるため、一般的には胸高断面積平均木を用いる。

測定の方法としては、林分の毎木調査データより、当該林分の断面積合計から断面積平均を算出し、断面積平均となる標準木の胸高直径を逆算する。これをもとに再度林内に入り、この直径にはほぼ等しく、かつ樹高や枝張り等も平均的となる何本かの標準木を選定し、立木のまま樹高等を測定して材積表から材積を求めるか、伐倒するなどして材積を求める。

林分全体の材積は次式によって推定する。

$$V = G/g \times v \quad (2.1.1)$$

V : 全林材積、 G : 全林の胸高断面積合計、 v : 標準木の材積合計、

g : 標準木の胸高断面積合計

(2) 標準木法の種類

上記の方法は、標準木法のもっとも基本的なものであり、単級法と呼ばれている。この単級法以外にも標準木の選び方によって色々な方法がある。主なものを以下に示す。

- ① ドラウト (Draudt) 法：各直径階の本数に比例して、各直径階から標準木を選び出す；
- ② ウーリッヒ (Urich) II 法：全林木を数個の直径級に区分し、各直径級の本数が等しくなるようにする。そして直径級毎に断面積の平均を算出し、それに基づき標準木を選ぶ；
- ③ ハルチッヒ (Hartig) 法：各直径級の断面積合計が等しくなるように数個の直径級に区分し、ウーリッヒ II 法と同じように直径級毎に断面積平均木を算出する。

3.1.3.4.3 標準地法

林分の中から一定面積の林地を選び出し、その林地内の材積を調査して、その林地の面積と林分全体の面積比によって全体の材積を推定する方法を標準地法という。このような調査のために選び出された林地を標準地という。標準地はその林分の平均的な材積を持つと思われる特定の区域を設定する。

標準地法は標準地の形によって、方形標準地法、円形標準地法、帯状標準地法等に分けられるが、ここでは方形標準地法について説明する。

(1) 標準地の形

標準地の形を正方形または長方形にとる方法であり、普通に「標準地法」という場合にはこれを指す。必ずしも厳密に四角形でなくてもよい。人工林においては、境界線が隣接木との中間を通るようにして測量を行い標準地を設定する。

(2) 標準地の大きさと数

標準地 1箇所の面積は、普通は 0.1~1 ha 程度とし林分の面積に応じて何箇所か設定する。均齊な林分では、1箇所の標準地の面積を大きめにして数を少なくした方が能率的であり、林相が不均一な場合は、1箇所の面積を小さくして数を増やし精度を上げるようにする。また森林生態系調査などの場合には、概ね上層木樹高と方形枠の 1辺とを同程度にすることにより、一定の出現種数を確保出来ることが知られている。

標準地の合計面積は次のような数値を参考にして、目的と状況に応じてその都度決定する。

均齊で大面積の森林——林分総面積の 3~5%

伐期に近い老齢林——林分総面積の 10%

(3) 標準地の選び方

その林分を代表する場所を選ぶことが基本である。林相の変化の激しい林分では似通った林相の部分がひとまとめになるように区分して、各区分から標準地を選ぶ。また林縁部分や境界線上、道路のすぐそばなどは避ける。

(4) 標準地内の材積調査

每木法によって材積を測定する。面積の大きい標準地では、樹高は樹高曲線によって求めても測高器と目測とを併用して実施してもよい。

(5) 全林の材積の推定

次式のような比例計算によって全林材積を推定する。

$$V = A/a \times v \quad (2.1.2)$$

V : 全林材積、 A : 全林面積、 v : 標準地の材積、 a : 標準地面積

3.1.3.4.4 標本調査法

標本調査法は標準地法と同様に、調査対象林分の一部の測定値から林分全体を推定する方法であるが、調査地は調査者の意志が入らないように無作為に選ばれるところが標準地法と異なる。また標準地法は一般に一つの林分を対象とした調査方法であるが、標本調査法では 1 林分だけでなく、地域、さらに全国の森林を対象とすることができる。

標本調査を行うにあたっては、まず調査の目的が何であるのかを明らかにしておく必要がある。次に調査対象を明確に規定する必要がある。例えば、ある地域の全材積を知りたい時に、農家の屋敷林も対象とするのか、胸高直径何 cm 以上を対象にするのかなどを、あらかじめ明らかにしておく。

3.1.3.5 ビッターリッヒ法（定角測定法）による胸高断面積合計の推定

ビッターリッヒ法とは、1948 年にドイツのビッターリッヒ (W.BITTERLICH) が発表した、林分の面積や林木の胸高直径を測定することなく、単位面積当たりの胸高断面積合計を推定する方法である。これは、林内的一点に立って周囲の林木の胸高直径を一定の水平視準角で視準するとき、

視準角より大きく見える木の本数に、視準角によって定まる定数をかけば、直ちに ha 当たり胸高断面積合計が推定されるとするものである。

3.1.3.5.1 ビッターリッヒ法（定角測定法）の原理

いま、面積 1ha の林分で、その胸高での林木の断面を考えてみる（図 3.1.3 (a)）。この図上に 1,000 個の点を無作為に落として、そのうち立木の胸高断面の中に落ちた点の数が 6 個あつたとすると、比例計算によってこの林分の胸高断面積合計 G を推定することができる。

$$G = 6/1,000 \times 10,000 = 60 \text{ (m}^2\text{)}$$

実際には林地の面積に比べて林木の胸高断面は、はるかに小さなものであるから、林木の断面に落ちる点の数は非常に少ない。そこで各林木の直径を 50 倍（断面積では 50² 倍）に拡大したと仮定すれば、図 3.1.3 (b) のようになり、今度はその拡大円の中に落ちる点の数はずっと多くなる。

1 ha の林分での拡大円の合計面積 G' は、

$$G' = n/N \times 10,000 \quad (2.1.3)$$

N : 無作為に落とした点の総数、n : 林木の拡大円に落ちた点の数

ところで拡大円の面積は、林木の断面積の 2,500 倍であるから、この林分の胸高断面積合計 G は G' を 2,500 で割ればよい。

$$G = G'/2,500 = n/N \times 10,000 \times 1/2,500 = n/N \times 4 \quad (2.1.4)$$

この場合、図 3.1.3(b) のように拡大円は重なるので、1 点落とすとそれが数本の木の拡大円に重複して落ちることになる。そこで N=1 すなわち林分内にある 1 点で、その点を含む拡大円の数 n を数えることができれば、式(2.1.4)から簡単に ha 当たりの胸高断面積合計が求められる。

それには林内の 1 点に立ち、図 3.1.4 のような 25 cm の棒の先端に 1 cm 幅のすき間を持った器具で周囲の木の胸高部分を視準する。

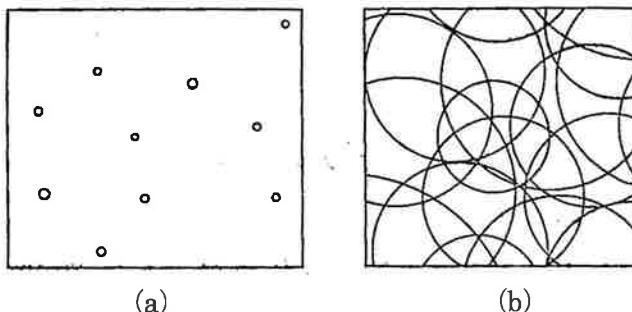


図 3.1.3 林分の胸高断面（一部分）（測樹（文部省 1981） p.83）

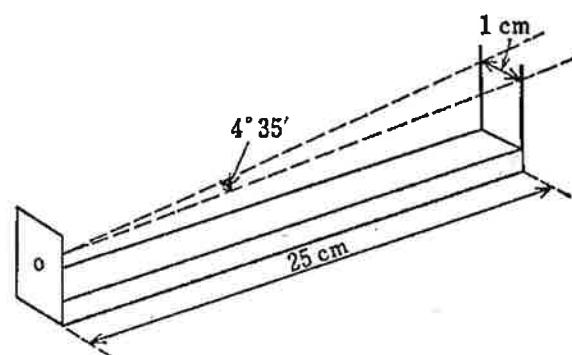


図 3.1.4 ビッターリッヒ法の測定器

出典：両図とも測樹（文部省 1981） p.85

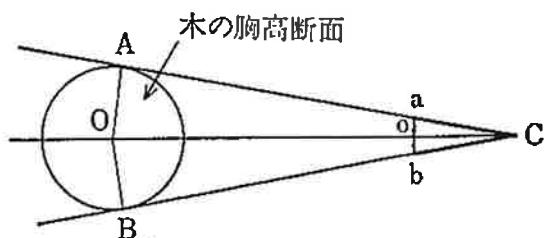


図 3.1.5 ビッターリッヒ法の原理

図 3.1.5 のように C 点から見て、すき間と胸高断面が一致したとすると、
 $\triangle OAC \sim \triangle aoC$ であるから、

$$AO/AC = ao/oC$$

OC が AO に比べて充分に大きいので、

$$AO/OC \approx AO/AC = (1/2 \times ab) / oC = 1/50$$

$$OC = AO \times 50 = r \times 50 = d \times 25$$

r : 木の半径、d : 木の直径

すなわち C 点は、この立木の半径を 50 倍した距離にあるということであり、言い換えれば、ちょうどこの木の 50 倍の拡大円の円周上にあるわけである（図 3.1.6 (a)）。同じように図 3.1.6 (b) の場合は、半径 11cm の 50 倍 5.5m が、その木までの距離より大きいから測点はこの木の拡大円の中に入っていることがわかる。また (c) では、半径 6 cm の 50 倍の拡大円は測点に届いていないことになる。

このようにして、この器具を用いて、すき間からはみ出す木の本数を数えれば先の式(2.1.4)の n が得られる。なお図 3.1.6 (a) のようにすき間と胸高断面が一致して見える場合は、1 本としないで 1/2 本と数えるのが普通である。

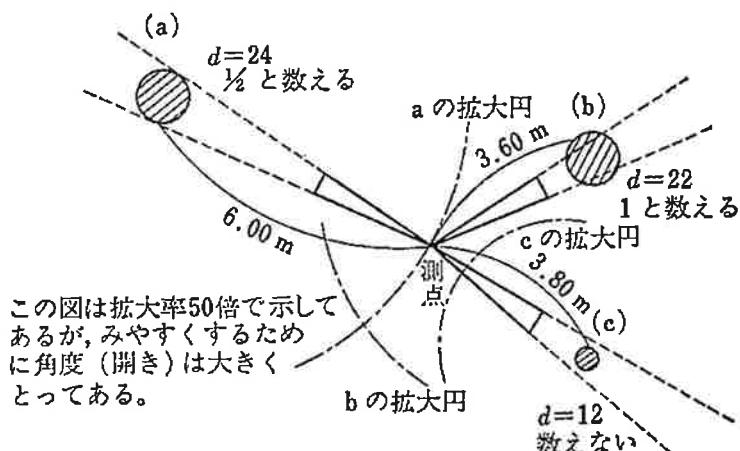


図 3.1.6 ビッターリッヒ法（定角測定法）におけるカウント（測樹（文部省 1981） p.85）

3.1.3.5.2 ビッターリッヒ法（定角測定法）の応用方

法

(1) シュピーゲル・レラスコープ

ビッターリッヒ法を利用するためには様々な器具が考案されているが、実用上、最も完成されたものとして広く使われているものはシュピーゲル・レラスコープであり（図 3.1.7）、1) 距離の測定、2) 直径の測定、3) 樹高の測定、4) 形状高の測定、5) GIRARD の形状級の測定、6) 林分胸高断面積の測定、7) 林分平均高の測定、8) 簡単な地形測量 が可能である。

(2) 簡易な方法（おみとおし）

簡易な方法としては、林野庁東北森林管理局岩手北部森林管理署で開発され、日林協が販売している「おみとおし」がある（図 3.1.8）。他の機器に比べてはるかに安価で手軽に使えるものとなっている。

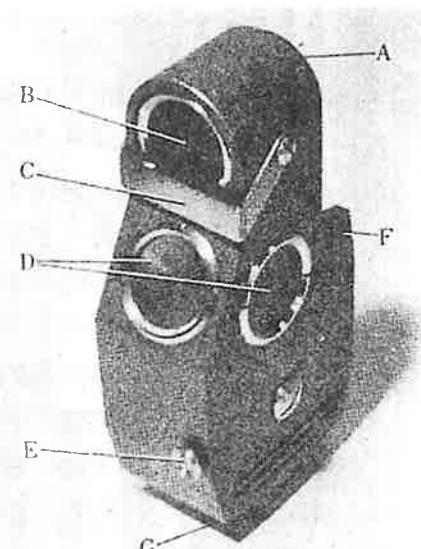


図 3.1.7 シュピーゲル・レラスコープの外観（森林計測学講義（大隅ほか 1981） p.63）



図 3.1.8 おみとおし (日林協 2019a)

(3) 全天球写真の利用（簡易林内計測ツール）

最近ではビッターリッヒ法の原理をデジタル化して応用する形で、デジタル撮影による全天球写真を利用した「簡易林内計測ツール」が日林協で開発・提供されている（日林協 2019b）。

これは、全天球パノラマ写真（撮影地点の上下左右 360° を一枚のパノラマ写真（正距円筒図法）で表現した写真）を利用して、画像上で立木の計測（図 3.1.6 ビッターリッヒ法によるカウント）を行うことを可能にしたものである（図 3.1.9）。現地では全天球写真を撮影するだけによく、計測、解析は事務所で行うことにより、現地調査時間の大幅な短縮や調査の分業化が可能となっている。

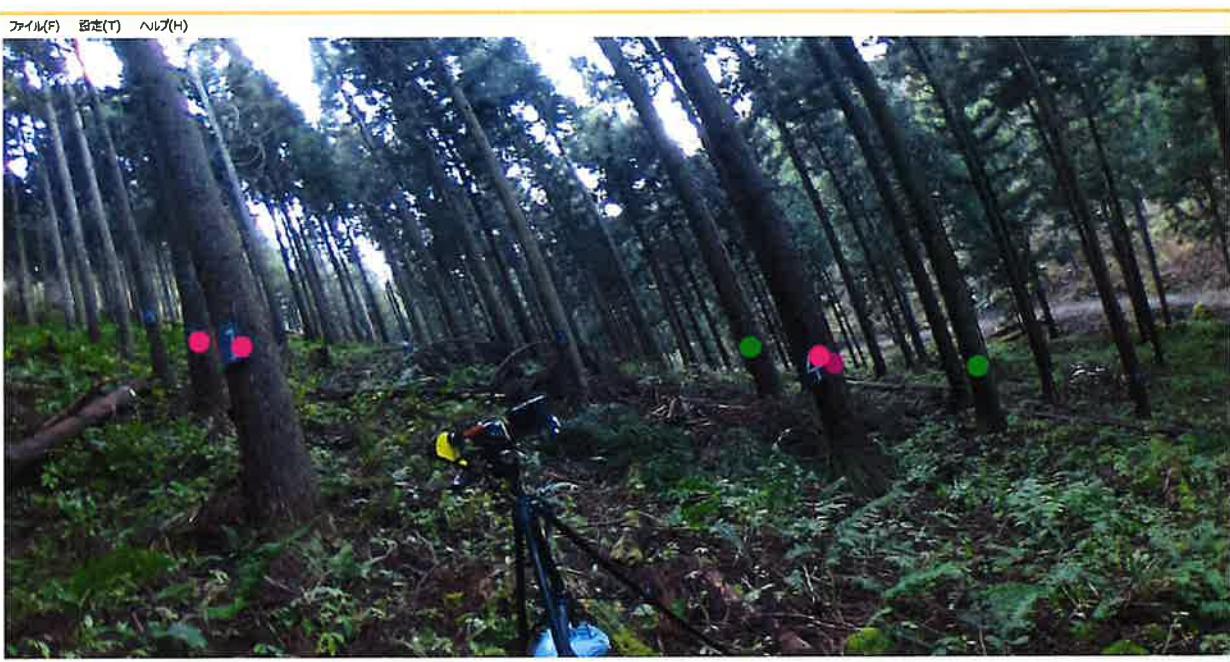


図 3.1.9 簡易林内計測ツール II 画面例 (簡易林内計測ツール II 操作マニュアル (日林協 2018) p.6)

(4) 地上レーザスキャナの利用

前項で取り上げた「全天球写真」と同様の原理によるが、デジタル写真の撮影ではなく、3D レーザスキャナにより同様の情報を得ようという方法についても様々な取り組みが進められている。

手法としては、前記の「全天球写真」と同様の処理を行うことにより胸高断面積合計を得ることができるが、これに加えて「上部直径による林分材積推定法」(「箕輪法」)を用いることにより直接林分材積を推定しようとするもの(米ほか 2004)など、地上レーザスキャナの適用性と応用方法について、様々な検討・検証が行われている。

この他、ビックターリッヒ法の応用からは外れるものの、森林調査での利用を想定し、山地・森林内での利便性を高めた地上レーザスキャナおよび解析システムとして「OWL」(千葉 2017)や「3D Walker + Digital Forest」(woodinfo 2019)などが発表されている。いずれも森林調査の省力化、効率化および人為的な入力・転記ミス等を防ぐことを目的に開発・研究が進められている。

3.1.3.6 根系

根系、中でも特に根量に関する調査方法の主なものについて、森林立地調査法（森林立地調査法編集委員会 1999）より引用し以下に示す。

(1) 挖り上げ法

測定する個体の根系を掘り上げて実重量や根系分布パターンを調査する手法である。根量を測定する手法としては最も誤差が小さいが、多大な労力を必要とし多点のデータを得にくいため、小型の草本や樹木稚苗への適用に限られることが多い。大型の樹木では全てを掘り上げることが困難なため、最も根の分布量の多い部分を掘り上げて測定し、些末な部分は分布パターンから推定して補正することもある。苅住(1979)の樹木根系図説には掘り上げ法による調査手順が記述されている。

(2) 根系サンプリング法

オーガー等を用いて根系を土壤ごと採取し、その中の根量を測定して実際の根系分布量を推定する。根系測定には最もよく用いられる手法であるが、測定可能な根のサイズが限られる、同じオーガーを用いても土壤特性や根の分布状況が異なると精度が変化する、根の分布密度が低い場合は効率が悪く誤差も大きい、など問題点も多い。

(3) 根系観察窓法

調査地に溝を掘り、土壤断面にガラスやアクリルの透明板を密着させて固定し、その界面に伸びる根の生長量や消長を測定する方法である。同一地点における継続観察が可能な点では優れた手法であるが、観察窓の作成時に大規模な攪乱を生じ、また観察用透明平板が土壤とは異なる微環境を作り出すため、それが根の挙動に影響を及ぼす恐れがある。

引用文献

千葉幸弘, 2017, 地上レーザー計測による森林調査のこれから, 森林科学, No.80, pp.32-35

苅住昇, 1979, 樹木根系図説, 誠文堂新光社, 東京

文部省, 1981, 測樹 (文部省著作教科書 農業 443), コロナ社, 東京

日林協 (日本林業技術協会), 1971, 新版林業百科事典, 丸善, 東京

日林協 (日本森林技術協会), 2018, 簡易林内計測ツールⅡ操作マニュアル, 日本森林技術協会

日林協 (日本森林技術協会), おみとおし

http://www.jafta.or.jp/contents/_files/hanbai/omitoshi.pdf (2019a 年 5 月 15 日アクセス)

日林協 (日本森林技術協会), 全天球パノラマ写真を使った簡易林内計測ツール

<http://rashinban-mori.com/article/2017/12/全天球パノラマ写真を使った簡易林内計測ツール>

(2019b 年 5 月 15 日アクセス)

大隅眞一 ほか, 1987, 森林計測学講義, 養賢堂, 東京
林野庁森林整備部計画課全国森林計画班, 森林生態系多様性基礎調査, 調査内容,
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tayouseichousa/naiyou.html>, (2019年5月15日アクセス)
森林立地調査法編集委員会, 1999, 森林立地調査法, 博友社, 東京
woodinfo, 3D Walker + Digital Forest, <http://maple96.wixsite.com/woodinfo/digital-forest>
(2019年5月15日アクセス)
米 ほか, 2004, 地上レーザスキャナを用いた森林計測手法の検討（III）, 第115回日本森林学会
大会学術講演集, 日本森林学会.
吉田茂二郎, 2008, 現行の全国森林資源モニタリング調査と戦後の我が国の森林資源調査について,
日本林学会誌, vol.90, No.4, pp.283-290

著者：
国土防災技術 木内秀叙

第2節 森林における土砂流出調査技術

- ① 目的または適応分野：土壤侵食、土砂移動に係わる水文調査；
- ② プラットフォーム：地上観測機器；
- ③ キーワード：土壤侵食、林内雨量、現地観測

第1項 はじめに

山地災害および土砂災害を引き起こす土砂移動現象は一般に「土石流、土砂流、掃流、（流木）」、「地すべり」、「急傾斜地崩壊（崖崩れ）」等に分けることができる。これらの土砂移動現象を発生させる誘因としては、降雨、融雪、地震、火山噴火等があるが、ここでは主として降雨により発生する土砂移動現象を対象とする。

主として降雨により発生する土砂移動現象にはその発生場所から山地斜面（山腹）で発生する「土壤侵食、斜面崩壊、地すべり」と溪流で生じる「土石流、土砂流、掃流等」および「流木」がある。これらの土砂移動現象に関する調査は、気象学、水理学、水文学、河川工学、地盤工学、地質学、地形学、生態学等における調査手法を用いる場合が多い。ここでは、土砂移動現象毎に主な現地における調査・観測手法について述べる。

第2項 山地斜面および溪流における土砂生産現象に係わる調査・観測

山地斜面において土砂生産を引き起こす現象としては、侵食、斜面崩壊、地すべりなどがあるが、地すべりについては他の章で扱うこととして、ここでは主として侵食、斜面崩壊について述べる。斜面崩壊、侵食による土砂および流木の生産は主として山腹斜面において発生する。一方、土石流や洪水による溪岸、溪床の侵食による土砂および流木の生産は主として溪流において発生する。このため、山腹斜面および溪流における土砂および流木の生産の機構を解明して、発生形態、場所、土砂量（流木量）、時刻等を予測することは、山腹斜面および溪流における土砂（流木）の生産・流出調査の基本的な事項である。

山腹における土壤侵食、斜面崩壊、流木発生の場所および量、ならびに溪流における土砂・流木の生産場所および量は、地形、地質、土質、植生、降雨、地表水、洪水、地下水、気象等と関連していると考えられる。したがって、現地においては地形、地質、土質、植生等に関するデータを収集し、さらに、降雨に関連して、降雨量、地表水量、洪水流量、地下水位などを調査・観測する。
地形調査：地形調査は対象地域の平面図、縦横断面図、DEM（数値標高モデル）、3次元地形等を得るために行なう。具体的には、縦横断測量（2次元断面）および3次元測量がある。また方式としては、地上から行うものと空中（UAV（Unmanned Aerial Vehicles：無人航空機）、ヘリコプタ、飛行機、人工衛星）から行なうものがある。また、測量方式としては、人間によるもの、写真撮影によるもの、レーザプロファイラを用いるもの、光波によるものなどがある。内容としては、斜面の場合は、斜面の高さ、勾配（傾斜）などであり、溪流の場合には川幅、河床勾配などである。また、レーザプロファイラでは各メッシュにおける座標と標高などである。

3.2.2.1 地質調査

地質調査には、対象とする地盤・岩盤の採取方法により、地表の露頭調査、ボーリング調査、トレンチ調査、弾性波探査などがある。調査内容としては、地質のほかに、地質形成過程、節理、風化度などがある。

3.2.2.2 土質調査

土質調査は主として土の力学的性質や強度を調査する場合が多く、具体的には粒径分布調査、土質強度（C（粘着力）、 ϕ （内部摩擦角））、透水係数、N値（標準貫入試験における打撃回数で地盤の強度等を推定できる）、含水比などがある。また場合によっては土の化学的性質の調査を行

う場合もある。また、岩盤の場合には岩盤の性質や強度の調査を行う。斜面崩壊や地すべりでは特に、すべり面の深さ（厚さ）の推定が重要である。調査方法には地表の露頭調査、サウンディング調査、ボーリング調査、トレーンチ調査、弾性波探査などがある。また、室内土質試験としては、一面せん断試験、三軸圧縮試験、粒度分布試験、室内透水試験などがあり、野外では弾性波試験、地盤載荷試験、現位置透水試験等がある。

3.2.2.3 植生調査

森林を構成する樹木の胸高直径、高さ、密度、樹種、林齡、根の発達状況とともに、林床植生（下層植生）、リター（落葉・落枝）の堆積が重要である。それらの中でも、土壤侵食にとって林床植生（下層植生）、リターの堆積の被覆率、単位面積当たりの林床植生や堆積リターの重量が重要である。なお、林床植生（下層植生）に影響を与えるものとしてシカなどの動物による食圧もあるので、このような場合には動物の生息密度等についても調査する。樹木は季節により葉の量が変化するので、開空度（全天空写真に写った枝、幹、葉以外の空の部分の面積率）も季節により変化し、観測が必要な場合がある。

3.2.2.4 降雨

降雨により発生する土壤侵食、山腹崩壊の発生機構、発生予測、生産土砂量等の調査には、降雨量の観測は不可欠である。森林の場合には林外雨量と共に、林内雨量も重要である。

3.2.2.5 地表水調査

地表水には斜面上を流れる地表流と、流路を流れる河川水がある。これらについては流量、（平均）流速などを調査する。地表流や河川水に掃流砂、浮流砂、ウォッシュロード（wash load：浮流砂よりも流径が小さい流砂）などの土砂成分が含まれる場合にはこれらについても観測する。

3.2.2.6 地下水調査

地下水は山腹斜面崩壊を引き起こす一つの重要な原因と考えられており、地下水位の変化、間隙水圧などを調査する。場合によっては地下水の水質、電気伝導度などの調査も行う。

3.2.2.7 気象・地象

降水量（降雨、雪などの大気から地表に落ちた水（氷を含む）の量）以外の気象関係では、地表水や地下水の供給源となる積雪深や融雪量などがある。特に土壤侵食に影響する凍結融解などに関連して、気温、地温、日射などが調査される。雨量計による降雨量の観測値に影響を与えるものとして風速、風向などがある。また植生（森林、葉）の成長に關係する日照などの調査も行う。地象としては、地震や火山噴火が土砂流出に影響する場合もある。

3.2.2.8 土砂移動形態、移動量

斜面崩壊や土壤侵食の形態や時系列的な変化を調査する方法として、カメラによる静止画やテレビカメラによる動画の定点観測などがある。これらの画像を解析することにより、移動速度や移動量（体積）を測定することもできる。斜面崩壊では直接的に伸縮計等を用いて崩壊土砂の移動速度を測定することも可能である。

第3項 溪流における土砂および流木の流下・堆積現象に係わる調査・観測

溪流における土砂の移動形態は、土石流、土砂流、掃流、ウォッシュロードに分かれる。また流木は一般に、山腹斜面や溪流沿いの表層土の上にあった立木が山腹斜面崩壊、地すべり、溪岸崩壊・侵食、溪床侵食にともない土砂と共に溪流を流下するものである。さらに、土石流区間では土砂と流木は混合して一緒に流下すると考えられるので、土石流の調査方法と流木の調査方法は共通する

場合が多い。一方、土石流区間の下流にあたる掃流区間では土砂は河床付近を流れ、流木は洪水の表面付近を流れ、土砂と流木は分離して流れる。このため、土砂と流木は別々に観測する。

溪流における土砂・流木の流下・堆積場所および量を予測する方法については、溪流の地形、地質、植生とともに、流下する土石流・土砂流・掃流の流量や土砂量、土砂の粒径、流木量、流木の大きさ（長さ、直径）等を現地で観測し、気象（降雨量）等との関連を数値的に解析する。したがって、現地調査においては溪流の地形、地質、植生等に関するデータを収集し、さらに、現地において土石流・土砂量・洪水の流量、土砂（流）量、土砂の粒径、流木（流）量、流木の大きさ、降雨量などを調査する。

これらのうち地形調査、地質調査、土質調査、植生調査、降雨調査、地表水調査、地下水調査、気象調査、土砂移動形態・移動量調査、は2.山地斜面および溪流における土砂生産現象とほぼ同様である。一方、溪流における特有の調査としては、次のような項目がある。

①流下・堆積土砂量と質の調査

土石流、土砂流、掃流による土砂量およびウォッシュロードの土砂量および土砂の粒径の調査；

②流下・堆積流木量と質の調査

土石流、土砂流、洪水による流木量および流木の長さ・直径の調査；

③崩壊土砂や土石流、流木の衝突による流体力や衝撃力

崩壊土砂や土石流、流木が施設や家屋に衝突した場合の作用する流体力や衝撃力の測定；

④河床の形態

粗度係数、河床面の粒径分布、最大礫径、砂礫堆、洗掘と堆積の測定；

⑤構造物

斜面においては土留工や水路工、溪流では治山ダム、砂防堰堤等の調査

第4項 降雨による土壤侵食の調査・観測

降雨による斜面侵食は、雨滴の落下エネルギーによる土粒子の飛散作用による雨滴侵食と地表流による掃流力に起因する土粒子の運搬作用による布状侵食に分けられる（芦田ら 1973, 中谷ら 1976）。土壤侵食量の推定手法として開発された土壤侵食モデルは数多くあるが、大きく分けると経験式に基づくもの（USLE (Universal Soil Loss Equation: 汎用土壤流亡予測式) ; RUSLE2）と物理式に基づくもの（WEPP (Water Erosion Prediction Project: 水食予測法) モデル; EUROSEM(European Soil Erosion Model: 欧州土壤侵食モデル) の2つのタイプがある。その中で、経験式のひとつである USLE (Wischmeier et al. 1978) は農地における土壤侵食量を予測する式としてアメリカで開発され、広く用いられている（辻ら 1990, 吉川ら 1998, 比嘉ら 2001a, Amore et al. 2004, 鶴木ら 2009, 2011）。USLE は、以下の式(1)で示される。

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

ここで、A : 侵食土砂量 ($\text{tf} \cdot \text{ha}^{-1}$)、R : 降雨係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{tf} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)、K : 土壤係数 ($\text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)、L : 斜面長係数 (無次元)、S : 傾斜係数 (無次元)、C : 作物 (植被) 係数 (無次元)、P : 保全 (保全施設) 係数 (無次元) である。

USLEにおいて土壤侵食量を左右する最も重要な要因は降雨に関する要因である降雨係数 R であり次の式で表わされる。

$$R=\Sigma E \cdot I_{30(\max)} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{tf} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (2)$$

$$E=210.3+89\log_{10}I_{30} \quad (\text{m} \cdot \text{tf} \cdot \text{ha}^{-1}) \quad (3)$$

ここで、ΣE : 一連続降雨の降雨エネルギーE の合計値、 $I_{30(\max)}$: 一連続降雨の30分間最大降雨強度 ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)、 I_{30} : 30分間降雨強度 ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$) である。

E は単位降雨量当たりの降雨エネルギーであり、降雨強度が大きくなると雨滴の直径及び落下速度が大きくなるため E は大きくなる (Wischmeier et al. 1958)。このため USLE を使用するためには降雨エネルギー(雨滴の直径及び落下速度)の観測が必要となる (Wischmeier et al. 1958)。特に林床植生が衰退した斜面では通常の農地と比べて、上層木があるため林内雨の雨滴の直径の分布が

林外雨とは異なるため雨滴の直径及び落下速度が測定された（南光 2008）。USLEは近年、農地以外の森林、崩壊地などにおける土壤侵食量を推定する手法に用いられている（Kitahara *et al.* 2000, 北原 2002a, 2002b, 大林ら 2002, 小林ら 2004, 山瀬ら 2010）。表 3.2.1 に示すように、土壤侵食を測定するための試験プロットの場所、試験プロットの大きさ、勾配、土地利用等は試験目的により多様である。土壤侵食量調査に用いられた試験プロットの例を図 3.2.1 および図 3.2.2 に示す。USLEからも分かるように、試験プロットの大きさ（特に長さ）は単位面積当たりの土壤侵食量に大きく影響するので、観測結果の比較の際は注意が必要である。北原（2002b）により無積雪期の日雨量を合計した降雨量から降雨係数 R を算出する式が提案されており、比較的良い結果が得られている。比嘉（2001b）により降雨係数の代わりに降雨量及び降雨量×土砂濃度を用いて土壤侵食量を推定する手法が試みられている。さらに土壤侵食量に影響を与える降雨に関する要因としては布状侵食を引き起こす主要な要因である地表流流出量（地表流流出率）が観測され、土壤侵食量との関係が検討されている（Ghahramani *et al.* 2011, 海虎ら 2012, 畠山格図ら 2013）。

表 3.2.1 既往の土壤侵食調査用のプロットの概要（畠山格図ら 2013）

文献	北原 2002b	大林ら 2002	小林ら 2004	山瀬ら 2010	Amore <i>et al</i> 2004	本研究
観測地域	長野県	中国四川省	長野県	兵庫県	Sicily, Italy	神奈川県
観測期間	22年間	4年間	2年間	1年間	25年間	3年間
観測類度	300回/22年 (4~11月)	1回/月 (1~10月)	1回/月 (4~11月)	1回/1~4月 (1~12月)	不明	3~4回/月 (4~11月)
土地利用	○ (ヒノキ)	○ (ヒノキ, カバノキ)	○ (ヒノキ)	○ (スギ, ヒノキ)	○ (牧場, 葡萄畠, オリーブ畠)	○ (ブナ)
試験プロットの大きさ	247.55m ²	*347000m ²	484.5m ² 28.9m ²	36m ²	*115000m ² , 185000m ² , 570000m ²	10m ² ~30m ²
試験プロット数	1	1	2	3	3	5
斜面勾配	40度	不明	41度	32~45度	15~30度	33度
	10分間	×	×	○	×	○
	30分間	×	○	×	×	○
降雨係数	60分間	×	×	○	○	○
	24時間	○	×	×	×	○
	期間内積算	×	×	×	×	○
降雨量	×	×	×	×	×	○
地表流流出量	×	×	×	×	○ (流量)	○

注 ○, 検討している ; ×, 検討していない ; *, 流域面積

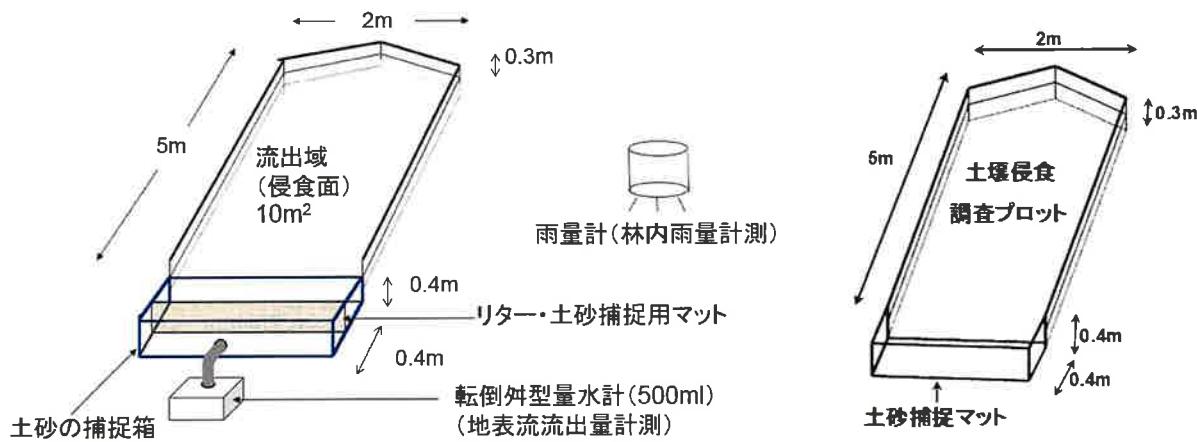


図 3.2.1 流出した土砂と地表流量を測定できる土壤侵食調査用プロットの例（海虎ら 2013）

図 3.2.2 最もシンプルな土壤侵食調査用プロットの例（流出した土砂とリターのみを捕捉する）（Ghahramani 2011）

第5項 森林内における樹冠通過雨量と樹冠遮断損失率

3.2.5.1 森林内の水収支

森林に降った雨水の一部は樹木に触れず直接地面へ到達する(樹冠通過雨)が、大半はまず樹冠に捕捉される。捕捉された雨水は、一部は再度地面に滴下し(樹冠滴下雨)、また一部は枝や幹を伝つて地面に到達する(樹幹流)、そして残りは地面に到達せず、樹冠に捕捉後大気中へと蒸発する(樹冠遮断損失量=林外雨量-樹冠通過雨量-樹冠滴下雨量-樹幹流下量)ことが知られている(図 3.2.3)

(鈴木ら 1979)。樹冠遮断損失率(樹冠遮断損失量/林外雨量)が高いと林床に届く雨量が減少し、大雨時は洪水緩和機能として働く。一方、少雨の際には水不足を引き起こす要因となる。河川へ流れ出る水のほとんどは森林に降った雨であるため、流域内の水収支及び河川の洪水流量を推定するには樹冠遮断損失率の把握が重要である。樹冠遮断損失量は流出解析、流域の水収支及び土壤侵食量の推定にとって重要な要素の1つである。降雨時の林冠では式(4)の水収支が成立する(塙本 1992)。

$$P_I = P_G - P_T - P_S - P_a - P_0 \quad (4)$$

但し、 P_I :樹冠遮断量、 P_G :林外雨量、 P_T :林内雨量、 P_S :樹幹流下量、 P_a :葉や根からの吸収量、 P_0 :林冠での貯留変化量、 P_a は土壤が極端に乾燥しない限り無視できる値であり、 P_0 も降雨後に林冠が乾くまでの水収支期間とするので、 $P_0=0$ とすることが多い。したがって、樹冠遮断損失量を正確に見積もる為には実際の森林地における林外雨量と林内に発生する樹冠通過雨量と樹幹流下量の把握が重要となってくる。

日本のような温帯雨林での林外雨量に対する樹冠遮断損失量の割合は 15~20%であると言われている(村井 1970, 鈴木ら 1979)。しかし、樹冠通過雨、樹幹流等への降雨の分配は樹種や樹齢、林分構造によって異なることも報告されている(佐藤ら 1997)。

神奈川県東丹沢の堂平地区における、壮齢の天然ブナ林を対象に林内雨量、樹幹流下量を測定し、樹冠遮断損失率を観測した事例を写真 3.2.1 に示す。

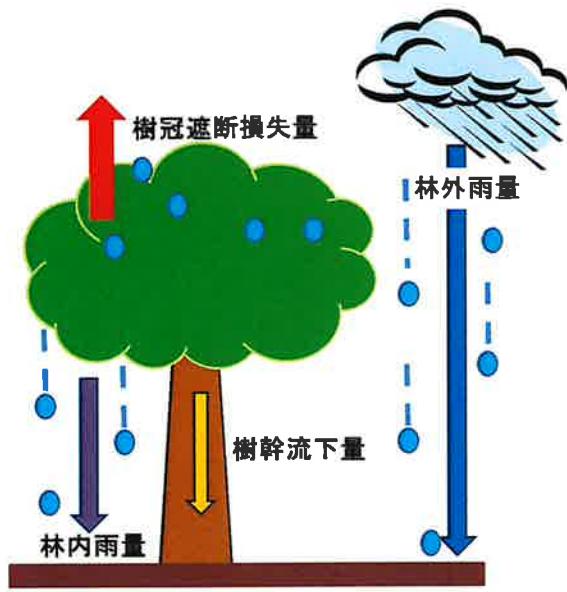


図 3.2.3 森林における水収支



写真 3.2.1 樹幹流下量および林内雨量測定装置

3.2.5.2 開空度の測定

樹木は季節により樹冠の葉の量が異なり、このため樹冠遮断損失率も変化する。このため魚眼レンズを付けたデジタルカメラを用いて天空写真を撮影し開空度（全天空写真に写った枝、幹、葉イ阿木の空の部分の面積率）を測定し樹冠遮断損失率との関係を調べる。魚眼レンズで撮影した写真には半球全体が映されるが、この領域全体が雨量計に捕捉される雨滴に影響があるとは考えにくい。このため既往の研究では天頂角 7.5°、15°および 30°での開空度を解析している（野口ら 2007）。

引用文献

- Amoreo, E., Modicaa, C., Nearingb, M.A., and Santoro, V.C., 2004, Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins, *J Hydrol*, No. 293, pp. 100–114.
- 芦田和男・奥村武信・田中健二, 1973, 斜面侵食に関する実験的研究. 京都大学防災研究所年, Vol. 16, No. B, pp. 449–470.
- 畢力格圖・石川芳治・白木克繁・若原妙子・海虎・内山佳美, 2013, 丹沢堂平地区のシカによる林床植生衰退地における降雨量, 降雨係数および地表流流出量と土壤侵食量との関係, 日本森林学会誌, Vol. 95, No. 3, pp.163-172.
- Ghahramani, A., Ishikawa, H., Gomi, T., Shiraki, K., and Miyata, S., 2011, Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope. *A plot-scale study Catena*, No. 85, pp. 34–47.
- 海虎・石川芳治・白木克繁・若原妙子・畢力格圖・内山佳美, 2012, ブナ林における林床合計被覆率の変化が地表流流出率に与える影響. 日林誌, Vol. 94, pp. 167–174.
- 比嘉榮三郎, 2001, 降雨量と土壤流出量予測方法, 沖縄県衛生環境研究所報, No. 35, pp.79-86.
- 比嘉榮三郎・満本裕彰, 2001, USLE 式による土壤流出予測方法. 沖縄県衛生環境研究所報, No. 35,

pp. 121–127.

- Kitahara, H., Okura, Y., Sammori, T., and Kawanami, A., 2000, Application of Universal Soil Loss Equation (USLE) to Mountainous Forests in Japan, *J For Res*, No.5, pp. 231–236.
- 北原曜, 2002a, 植生の表面侵食防止機能, 砂防学会誌, Vol. 54, No. 5, pp. 92–101.
- 北原曜, 2002b, 森林の土砂流出防止機能の評価手法. 第 40 回治山シンポジウム 治山懇話会, pp. 3–33.
- 小林由佳・北原曜・小野裕, 2004, 風化花崗岩地帯における崩壊地の表面侵食と USLE によるその解析, 日林誌, Vol. 86, No. 4, pp. 365–371.
- 村井宏, 1970, 森林植生による降雨のしゃ断についての研究, 林業試験場研究報告, No. 232, pp. 25–64.
- 中谷三男, 1976, 傾斜地の侵食防止工法. 土と基礎, 地盤工学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 11–17.
- 南光一樹, 2008, ヒノキ林内における雨滴の変化. 恩田裕一編「人工林荒廃と水・土砂流出の実態」, 岩波書店, pp. 15–23.
- 野口正二・安田幸生・村上亘, 2007, 森林総合研究所東北支所実験林内のスギ林とブナ林における樹冠通過雨量の比較, 森林総合研究所研究報告, Vol. 6, No. 3, pp. 157–162.
- 大林圭司・太田猛彦・武内和彦・恒川篤史・朱波, 2002, 中国四川盆地小流域における USLE を用いた土地利用評価, 日本緑化工学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 582–588.
- 佐藤嘉展・井倉洋二・小川滋・大崎進・杉原真司・吉村和久, 1997, 樹冠形態の異なる樹種における林内雨および樹幹流中の水質の比較, 九州大学農学部演習林報告, No. 77, pp. 13–24.
- 鈴木雅一・加藤博之・谷誠・福島義宏, 1979, 桐生試験地における樹冠通過雨量、樹幹流下量、遮断量の研究(II)遮断量の解析, 日本森林学会誌, Vol. 61, No. 11, pp. 391–398.
- 辻修・松田豊・土谷富士夫, 1990, 60 分間降雨量による降雨係数の算出, 帯広畜産大学研究報告, 第 1 部 17, pp. 49–56.
- 塚本良則, 1992, 森林水文学, 文永堂出版, 東京, pp. 78–79.
- 鵜木啓二・多田大嗣・細川博明, 2009, USLE による畠地流域からの土砂流出解析, 第 53 回(平成 21 年度) 北海道開発技術研究発表会, <https://thesis.ceri.go.jp/db/giken/h21giken/JiyuRonbun/GT-21.pdf> (2019 年 6 月 18 日アクセス)
- 鵜木 啓二・古檜山 雅之, 2011, 汎用土壤流亡予測式による農業流域からの土砂流亡量予測, 寒地木研究所月報, No. 700, pp. 13–19.
- 山瀬敬太郎・柄本大介・関岡裕明・藤堂千景, 2010, 間伐木を利用した筋工による森林表土の流亡抑制, 日緑工誌, Vol. 36, No. 1, pp. 9–14.
- 吉川省子・山本博・石原暁・花野義雄, 1998, 四国地域における農地管理の粗放化に伴う土壤侵食の変動評価, 土肥誌, Vol. 69, No. 3, pp. 265–277.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D., 1958, Rainfall energy and its relationship to soil loss, *Trans Amer Geophys Union*, No. 39, pp. 285–291.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses. *Agricultural handbook*, US Department of Agriculture, Washington DC, p.537.

著者 :

東京農工大学名誉教授 石川 芳治

第3節 デジタル技術を用いた森林調査

- ①目的または適応分野：森林計測（幹太さ、材積量、樹種分類）、森林管理（害虫被害木把握、生育量推定）、災害（前兆現象と被災範囲）把握（気象値、土塊移動量）、治山施設経年変化把握；
- ②プラットフォーム：バックパック、ハンドヘルド、地上設置；
- ③キーワード：コンパクト3Dスキャナ、合成開口レーダ、ハイパースペクトル・カメラ、マルチスペクトル・カメラ、自動観測

第1項 はじめに

近年の情報通信技術（Information and Communication Technology、以下、ICT）の進歩は目覚ましい。スマートフォンのような携帯情報端末には全球測位システム（Global Positioning System、以下、GPS）が装備されており、だれでも容易に自分の位置を正確に知ることが可能になった。インターネットに接続して世界中のデータ・サーバにアクセスし、データを保存したり、データを読み出したりすることもできるようになった。本稿では、接触型および非接触型センサを地上に設置し、あるいは地上を移動しながら森林や山地を観測する方法を概観する。そして、それらを用いた山地災害の監視と治山施設の管理の事例を紹介する。

第2項 ICTを用いた森林調査方法のレビュー

森林、特に林業の対象となる樹林地は地上からは全容を把握するのが困難であるため、リモートセンシングが積極的に利用され、19世紀末から20世紀初頭の初期の空中写真の頃から、森林經營や植生判読に使われてきた（中島 1960）。しかし、立木や森林環境の詳細な情報取得には現地での計測が必要であり、それは現在も変わらない。立木の胸高直径や樹冠高は、レーザによって計測ができるようになってきた。また、山地災害の兆候を検知するための地下水位や地表面変位は地上設置型の計器によって観測してきた。これらは、観測データを現地に回収しに行かなくてもICTを利用して、離れた場所に蓄積し閲覧できるようになった。森林や山地における地上からのリモートセンシング利用を一覧表にまとめた（表 3.3.1）。本節では、森林現況のパラメータ、山地災害と治山施設の監視について、ICTを用いた観測を概観する。

3.3.2.1 ICTを用いた森林計測と森林管理：現況把握

本項では、樹種分類や窒素含量、病虫害木把握へのICTの利用について概観する。初期の森林リモートセンシングに空中写真が使われたように、画像を用いると現況を把握しやすい。可視光で撮影するデジタルカメラやビデオカメラのカラー画像でも森林の現況を把握することは可能である。葉中のクロロフィルは赤波長の光を吸収するため、赤と緑の画像から活性度の高い（活発に光合成をおこなう）葉を見つけることができる。可視光以外の波長も撮影できる特殊用途カメラ（マルチスペクトル・カメラ）はすでに市販されており、容易に入手できる（図 3.3.1）。赤波長と近赤外波長の間の赤色エッジのデータを用いると、NDVIを使うよりは針葉樹の樹種（スギとヒノキ）を精度良く分類できるという報告もある（後藤・栗屋 2013）。ハイパースペクトル・カメラの観測波長は400～2,500 nmから100～400バンドを観測できるものが多く（ケイエルブイ 2018）、紫外域では2,000バンド以上を観測できるものもある（アルゴ 2018）。長沼・胡（2011）はハイパースペクトルの分光反射特性パターンを複数与えることでスギとヒノキを現地調査と同程度の精度で分類できたと報告している（長沼・胡 2011）。ブドウ園での事例であるが、うどんこ病被害程度を推定した事例が報告されており（Knauer et al. 2017）、森林でのマツクイムシ被害木判定のような病虫害被害木推定への利用に期待できる。

表 3.3.1 森林や山地における地上からのリモートセンシング利用を一覧

実施主体、販売者	プラットフォーム	センサ	目的
エフティーエス (2018)	地上設置	合成開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握
国 土 交 通 省 (2018)	地上設置	合成開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握
日本工営 (2018)	地上設置	合成開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握
小澤・宮城 (2018)	地上設置	合成開口レーダ、実開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握
総務省 (2018)	地上設置	合成開口レーダ	治山施設経年変化把握
ケイエルブイ (2018)	地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、窒素含量、害虫被害木把握
アルゴ (2018)	地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、窒素含量、害虫被害木把握
Makdessi et al. (2017)	地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、窒素含量、害虫被害木把握
Wang et al. (2016)	地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、窒素含量、害虫被害木把握
大政・細井 (2010)	地上設置	3D レーザ・スキャナ	森林計測（幹太さ、材積量）、生育量推定
アルゴ (2018)	携帯、地上設置	3D レーザ・スキャナ	森林計測（幹太さ、材積量）、生育量推定
ファロージャパン (2018)	携帯、地上設置	3D レーザ・スキャナ	森林計測（幹太さ、材積量）、生育量推定
高木 (2015)	携帯、地上設置	3D レーザ・スキャナ	森林計測（幹太さ、材積量）、生育量推定
ケイエルブイ (2018)	携帯、地上設置	マルチスペクトル・カメラとハイパースペクトル・カメラ	生育量推定
アルゴ (2018)	携帯、地上設置	マルチスペクトル・カメラとハイパースペクトル・カメラ	生育量推定

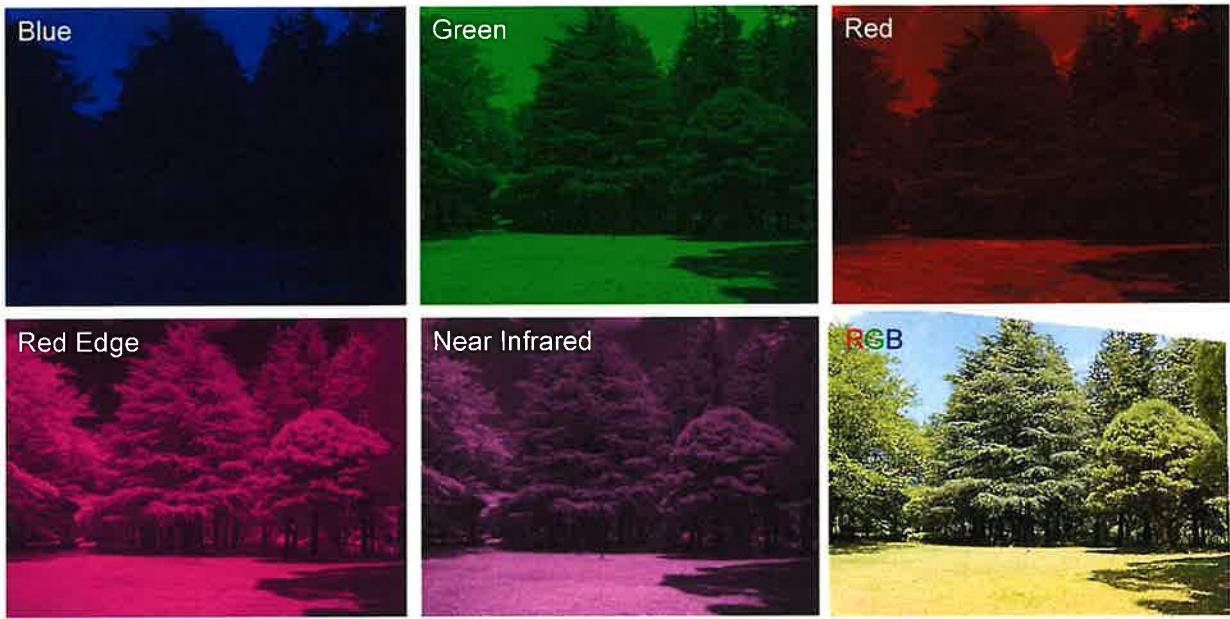


図 3.3.1 マルチスペクトラム・カメラ RedEdge (ジェピコ 2019) で撮影した B, G, R, レッドエッジ、近赤外の波長ごとの画像と RGB 合成カラー画像。波長ごとの画像は疑似カラーで、合成カラー画像は異なる穴で撮影している波長ごとの画像を幾何補正した。

3.3.2.2 ICT を用いた森林計測と森林管理：バイオマスの推定

本項では、幹太さや材積量、生育量推定への ICT の利用について概観する。環境と植物反応との関係を明らかにするためには、植物個体や群落の構造の 3 次元（以下、3D）情報を得ることが不可欠である。近年では、植物個体や群落の計測にレーザ・スキャナ (Laser Scanner、以下、LS) が利用されるようになり、器官バイオマスや葉面積密度、葉傾斜角分布のような構造的特徴量が効率良く正確に取得できるようになってきた（大政・細井 2010）。LS は、スキャナから照射されたレーザによって、対象物の空間位置情報を取得するもので、地上型 3D レーザ、航空レーザ、MMS（モバイルマッピングシステム）の 3 つに大別される。安全に離れた位置から非接触、ノンプリズムで大量点群データを取得できる（リーグル・ジャパン 2018）。地上設置型 LS は航空レーザや MMS に比べて森林内の立木個体の形状を正確に測定しやすいという利点がある。これにより、樹木の直径、樹高、形状、位置、密度を一定の精度で推定することも可能である（高木 2015）。地上型 3D レーザは可搬型のものが市販されており（ファロージャパン 2018）、人手で運搬して地上に設置して計測するだけでなく、ハンドヘルド型もある。例えば、車両や UAV が使えない場所で、バックパックに装着して人が移動したルートに沿って計測することが可能なものもある（アルゴ 2018）。

3.3.2.3 ICT を用いた山地災害監視：地すべり観測

本項では、山地災害の監視、主に地すべり観測への ICT の利用について述べる。我が国では、第四紀地殻変動が継続しており台風や大雨のような気象による自然要因と、開発行為による社会経済的要因により、斜面崩壊が増加している（地すべり観測便覧編集委員会 2012）。2018 年 4 月 11 日午前 3 時 40 分頃に大分県中津市耶馬溪町金吉（やばけいまちかなよし）で発生した斜面崩壊によって 6 人が犠牲になったことは記憶に新しい。このような災害リスクを軽減するためには、防災対策と並んで発災を可能な限り早くとらえるための監視が重要である。地すべり観測では、従来、接触型センサを対象地域に設置する方法がとられてきた。地すべり観測便覧（2012）によれば、設置される計器には、雨量計、地表伸縮計、地盤傾斜計、パイプひずみ計、孔内傾斜計、多層移動量

計、水位計、間隙水圧計といったものがある（地すべり観測便覧編集委員会 2012）。観測方式の変遷を表 3.3.2 に、観測分解能と精度を表 3.3.3 に示す。接触型センサの場合、設置したセンサの数しかデータが得られないため、どこにセンサを設置するかの判断が重要になる。

表 3.3.2 地すべり観測方式の変遷（地すべり観測便覧（2012）より引用加筆）

世代	観測方式	観測頻度と制約
1	機械式計器（1950～1960 年代）や電気式計器（1970 年代以降）を用いて現地で測定	1 週間に 1 回程度
2	電気式計器の自動測定値をアナログ・レコーダに記録し定期的に回収	バッテリー駆動のため低頻度
3	電気式計器の自動測定値をデジタル・レコーダに記録し定期的に回収	バッテリー駆動のため低頻度
4	観測地付近に拠点を設置して電話回線を引き、観測データを送信するテレメータ方式	商用電源を引くため高頻度だが、人家の近くに限られる
5	観測地点の計器にアンテナを設置し、観測データを携帯電話回線で無線伝送する方式	太陽電池モジュールを設置し遠隔地でもリアルタイム、観測装置を操作することも可能

表 3.3.3 地すべり観測の分解能と精度（地すべり観測便覧（2012）より引用加筆）

計測器	観測分解能	精度
GPS 計測	mm 単位	±5 mm 以上（水平）、±10 mm 以上（垂直）
地表伸縮計	0.1～1.0 mm	±2.5～5.0 mm
岩盤傾斜計	10～30 秒	±0.3～3.0 秒

非接触型センサを用いて山地地表面変位を観測する技術も開発されている。地上設置型合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar、以下、SAR）は、航空機や人工衛星搭載の SAR データを用いて行われることが多かったレーダ干渉による地表面変位の計測を、地上で高頻度に計測できるようになるものである（エフティーエス 2018、国土交通省 2018、総務省 2018）。センサを固定した場合は実開口レーダ（Real Aperture Radar、以下、RAR）となる（日本工営 2018、小澤・宮城 2018）。両者の特徴を表 3.3.4 に示す。SAR と RAR センサでは、クロスレンジ方向の分解能は、対象物との距離が長くなれば粗くなる。変位検出の元になる DEM（Digital Elevation Model：数値標高モデル）は航空レーダ計測による 5 m メッシュのものが国内で整備されつつある（国土地理院 2018）。さらに高解像度のデータのアーカイブもあり（日本測量技術協会 2018）、対象地域とその規模に応じてこれらを利用できる。

表 3.3.4 地上設置型合成開口レーダ（エフティーエス 2018、国土交通省 2018、総務省 2018）と実開口レーダ（日本工営 2018、小澤・宮城 2018、総務省 2018）の性能比較

レーダ種別	アンテナ長[m]	対象との距離[m]	観測範囲 [km ²]	1 km 先レンジ解像度[m]	1 km 先クロスレンジ解像度 [m]	変位抽出精度[mm]
SAR	2（レベル上）	10～4,400	5.00～6.25	5	2.9～4.4	0.1～0.8
RAR	-	30～10,000	最大 200	0.75	6.5	0.1～1.0

積雪地域では、融雪期に雪解け水が地盤に浸透して地すべりが多発する（角田ほか 2018）。干渉 SAR 解析を行うと、地表面の微小な変動を数 cm の精度で把握できるが、積雪がある場合には地表面変位を捉えるのが困難であった。そこで、角田ほか（2018）は、積雪位相遅延を補正して、融雪期干渉 SAR 解析を試み積雪下の地すべり変動範囲や変動量を検出する可能性を示唆した。航空機や衛星搭載 SAR データで短い時間解像度で高頻度に監視するのはコスト的物理的に困難である。地上設置型 SAR や RAR は設置場所数に制約はあるが、高時間解像度・高頻度に監視を可能にすることが期待される。

3.3.2.4 ICT を用いた治山施設監視

本項では、治山施設の監視への ICT の利用について述べる。前項で記した接触型センサの多くは治山施設の監視にも使うことができる。荷重計を使ってアンカー工の荷重計測をしたり、流量計を使って横ボーリング工・集水井の流量計測をしたりして、地すべり対策工の経年変化を把握し維持管理業務に生かすことができる（国土防災技術 2018）。また、間隙水圧計や土圧計を構造物基礎に設置することで擁壁や砂防ダムの経年変化や事故の危険性を迅速に把握することが可能となる（中嶋ほか 2018）。

前項で記した地上設置型 SAR と RAR も治山施設の監視にも使うことができる。地すべり対策工が施されている斜面や砂防ダムを監視して治山施設の表面変位を把握することが可能である（エフティーエス 2018, 国土交通省 2018, 日本工営 2018, 総務省 2018, 小澤・宮城 2018）。観測対象物にセンサを取り付ける必要がなく、面的な観測を行う場合に有用な監視方法である。

第3項 調査事例

3.3.3.1 Web 型自動観測システムを用いた山地災害の監視

2017 年 7 月九州北部豪雨では 12 時間雨量 500 mm 以上の雨量が観測された地域で、斜面崩壊が発生したことが報告されている（村上・安田 2018）。このような大雨では崩壊危険区域でなくても斜面崩壊は起こりうると推測できるが、地震によって亀裂が発生していると、通常より少ない降雨でも斜面崩壊は起こる（村上ほか 2017）。気象観測値をリアルタイムに入手できれば、災害危険度を推測できる。スマートフォン用のアクセサリとして気象観測装置が個人で購入できる価格で販売されている（NETATMO 2018）。誰でも簡単に気温や降水量、湿度、気圧、風速といった気象パラメータを観測できる。斜面崩壊の素因となる土壤水分を計測し、無線でゲートウェイを経由してクラウド・ストレージにデータを蓄積して過去の履歴を確認できるシステムも市販されている（SenSprout 2018）。

これは農業用ではあるが、山地で土壤水分を計測し災害危険度を推測するのにも使用可能である。降水量のみにしぼって、スマートフォンに雨量データを配信するシステムも開発されている（重岡・福本 2018）。配信対象は市町村役場から土地改良区、自治会、地域住民まで幅広い。農業土木分野では、発災後に、ICT を用いて災害被害を軽減しようという試み（減災技術）も研究されている（堀・泉 2018）。この研究で取り上げられている事例は、福島県の藤沼ため池で、東日本大震災の発生で堰堤が決壊してから下流域を氾濫水が襲うまでに約 30 分の時間があった。この時間的猶予を利用して、下流域住民への避難指示をしようというものである。

このように発災から避難までに時間的余裕があるのは非常に限られた例である。そこで、リアルタイム観測・監視によって、災害の発生を推測することが重要になる（森林総合研究所 2018）。そして、人的被害軽減のためには、モニタリングだけでなく、警戒避難によるソフト対策が重要になる。そこで、本項では、Web 型自動観測システムによる自然災害監視の事例を紹介する（国土防災技術 2018）。本システムは、（1）多種の計器・ロガーに対応、（2）様々な通信手段に対応、（3）簡易 Web 型による初期・運用コストの低減、（4）他システムとの柔軟な連携による高い拡張性という特徴を持っている（図 3.3.2）。

現地設置センサには、前項 2.3 で紹介した地盤伸縮計や雨量計といった測器があり、これらは全

て自動観測に使用可能なタイプがある。これらの測器は国内で販売されている主要なロガーに対応しているため、機種によらない汎用的なシステムを構築できる。また、通信手段として標準でNTTドコモやauの携帯パケット回線、無線LANによる無線通信、電話やインターネットの有線回線に対応している。データ収集・演算判定・Webページ化・異常通報を観測装置一台のみで全て集約処理しており、Web配信にはISP(インターネット接続業者)のHP領域を活用することで高価なDBMS(データベース・マネージメント・システム)やWebサーバが不要になる。このWebページは既存の端末や携帯電話で見ることができる。さらに、国電通仕第21号(テレメータ装置標準仕様書)に準拠して他システムと連携したり、地下水位から安全率を自動算出して警戒判定したり、電子メールや電話、FAXで警報を通知したりと、より高度な情報集約や他システムとの連携も可能である。



図3.3.2 Web型自動観測システム概要(国土防災技術2018)

3.3.3.2 Web型自動観測システムを用いた治山施設経年変化の監視

グラウンドアンカー工は、自然斜面や法面の安定化を目的として施工してきた(酒井2018)。実際、豪雨時や地震時の外力に対し大きな抑止効果を発揮している。しかし、くさびが損傷したり、アンカー頭部が落下したりという、適切な維持管理が行われていない事例もある。そこで、本項では、Web型自動観測システムによる治山施設の維持管理業務の事例を紹介する(国土防災技術2018)。横ボーリング工や集水井の流水量計測とアンカー工の荷重計測の事例を図3.3.3に示す。

地すべり対策施工後の排水量が設計水量内に収まっているか、アンカーにかかる荷重が設計荷重を超えていないかといった対策工の状態を計測して治山施設が適切に維持されるように監視する。

システムの基本構成は前節で紹介した自動観測システムと同じである。監視すべき対象に応じて計器の種類と数を選ぶ(図3.3.4)。例えば、伸縮計1台、歪水位計1台、雨量計1台というように、測器とその数を決める。そして、観測データを蓄積してホームページ上でチェックするだけで良いのか、観測値が予め設定した危険領域に達したら電子メールや電話で通知する必要があるのか、現地は商用電源が確保できるのか、確保できなければ太陽光発電パネルを設置するといった選択肢に応じてシステムを構築することになる。



図3.3.3 治山施設の維持・管理システムの例：横ボーリング流量計測とアンカー荷重計測（国土防災技術 2018）

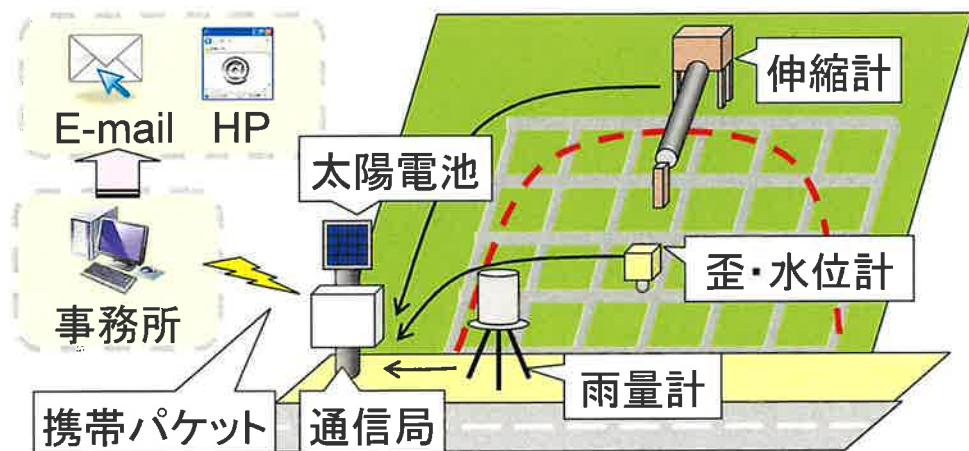


図3.3.4 治山施設の維持・管理システムの設置事例（国土防災技術 2018）

謝辞

本稿を執筆するにあたり、森林研究・整備機構森林総合研究所治山研究室室長 浅野志穂博士、同所山地災害研究室 村上亘主任研究員、長野県林業総合センター育林部 戸田堅一郎主任研究員、農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門技術移転部部長 小川茂男博士、同研究部門地域減災ユニット 吉迫宏ユニット長、国土防災技術 技術本部自動観測課 齊藤雅志技術課長、同

課大類光平係長から情報を提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- アルゴ、特殊カメラ・特殊センサ, <https://www.argocorp.com/spcamera.html>, (2018年4月18日アクセス)
- ファーロージャパン, FARO Laser Scanner Focus, <https://www.faro.com/ja/jp/products/construction-bim/faro-laser-scanner-focus/>, (2018年4月18日アクセス)
- エフティーエス, 【地上設置型合成開口レーダー(GB-SAR)】 IBIS-FM, <http://www.fts-web.jp/products/?id=1469522491-875178&mca=&ca=&sk=>, (2018年4月18日アクセス)
- 後藤誠二朗・栗屋善雄, 2013, RapidEye衛星のRed edgeバンドを用いた森林タイプ分類の精度向上に関する検討 -岐阜県御嵩町を例として-, システム農学, Vol. 29, No. 4, pp. 145-153.
- 堀俊和・泉明良, 2018, 地震・豪雨時の農業用ため池の被害とICT等を用いた減災技術. 地盤工学会誌, Vol. 66, No. 4, pp.4-7.
- ジェピコ, 病気の早期発見におけるレッドエッジバンドの重要性 ” カンザス州 冬小麦における事例紹介” , <https://www.jepico.co.jp/media/maker/a27>, (2019年5月15日アクセス)
- 地すべり観測便覧編集委員会編, 2012, いつでも、どこでもすぐに役立つ地すべり観測便覧, 斜面防災対策技術協会, 東京.
- ケイエルブイ, ハイパースペクトルカメラの製品一覧, https://www.klv.co.jp/product_types/hyperspectral_imaging/, (2018年4月18日アクセス)
- Knauer, U., Matros, A., Petrovic, T., Zanker, T., Scott, E.S., and Seifert, U., 2017, Improved classification accuracy of powdery mildew infection levels of wine grapes by spatial-spectral analysis of hyperspectral images. *Plant Methods*, Vol. 13: 47. Published online 2017 Jun 15. doi: 10.1186/s13007-017-0198-y
- 国土防災技術, 防災情報管理技術, https://www.jce.co.jp/business/research_dev/04/index.html, (2018年4月18日アクセス)
- 国土地理院, 基盤地図情報（数値地形モデル）5m メッシュ（標高）の整備範囲, http://www.gsi.go.jp/kankyochoiri/Laser_demimage.html, (2018年5月9日アクセス)
- 国土交通省, 新技術提供システム 地上設置型合成開口レーダー(SAR)によるリアルタイム変位監視システム, http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KT140106, (2018年4月18日アクセス)
- Makdessi, N. A., Rabatel, G., Ecarnot, M., and Roumet, P., 2017, A Spectral Analysis Of Multiple Scattering Effects In Close Range Hyperspectral Imagery Of Vegetation Scenes: Application To Nitrogen Content Assessment. In *18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy (ICNIRS), held in Copenhagen, Denmark, on 11 - 15 June 2017*, DOI10.13140/RG.2.2.29686.29761, poster.
- 村上亘・大丸裕武・金子守男, 2017, 2008年岩手・宮城内陸地震後の降雨により崩壊が発生した山地斜面の地形的特徴. 日本地すべり学会誌, Vol. 54, No. 1, pp. 3-12.
- 村上亘・安田幸生, 2018, 2017年7月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について. 森林総合研究所研究報告, Vol. 17, No. 1 (No. 445), pp.111-115.
- 長沼靖雄・胡 勝治, 2011, ハイパースペクトルによる植生マッピング技術. FUJITSU, Vol. 62, No. 6, pp. 753-758.
- 中嶋（浅野）勇・向後雄二・林田洋一・増川晋・田頭秀和, フィルダム等の安全性を監視するワイヤレスマルチセンサ, <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2008/nkk08-08.html>, (2018年5月2日アクセス)
- 中島巖, 1960, 海外では航空写真を林業実務にどう利用しているか ーそのIー. 森林航測, No. 21, pp. 2-3.

NETATMO, パーソナルウェザーステーション, <https://www.netatmo.com/ja-JP/product/weather/weatherstation/specifications>, (2018年4月20日アクセス)

日本工営, 地上型合成開口レーダーによる斜面や構造物の変形観測, <https://www.n-koei.co.jp/rd/rd-center/disaster-sand/pdf/2405aj.pdf>, (2018年4月18日アクセス)

日本測量技術協会, 航空レーザ測量ポータルサイト, <http://www.sokugikyo.or.jp/laser/portal/>, (2018年5月9日アクセス)

大政謙次・細井文樹, 2010, 地上型レーザースキャナの植物計測への応用. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 49, No. 4, pp.210-214.

小澤拓・宮城洋介, 地上設置型レーダー干渉計による火山性地殻変動のモニタリングに向けて, <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/203220/1/27K-08-14.pdf>, (2018年4月18日アクセス)

リーグル・ジャパン, レーザースキャナーとは, <http://www.riegl-japan.co.jp/about/>, (2018年5月1日アクセス)

酒井俊典, 2018, 豪雨時のアンカー荷重変化とアンカー損傷事例. 地盤工学会誌, Vol. 66, No. 4, pp.26-29.

SenSprout, 農業センサーシステム「SENSPROUT PRO」, <https://senssprout.net/>, (2018年4月23日アクセス)」

重岡徹・福本昌人, 地域防災のためのスマートフォンを活用した雨量観測・閲覧システム, http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2013/13_068.html, (2018年4月20日アクセス)

森林総合研究所, 山地災害を防ぐ, https://www.ffpri.affrc.go.jp/2050mori/menu_1/menu1-2.html, (2018年4月23日アクセス)

総務省, 17 GHz 帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討報告書, http://www.soumu.go.jp/main_content/000217150.pdf, (2018年4月18日アクセス)

高木勇武, 2015, レーザスキャナと魚眼カメラにより得られた森林計測情報の提示手法に関する研究, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, つくば.

角田富士夫・日外勝仁・倉橋稔幸, 2018, 干渉SARによる積雪下の地すべり変動解析. 地盤工学会誌, Vol. 66, No. 4, pp.30-31.

Wang, Z., Wang, T., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Jones, S., Suarez, L., Woodgate, W., Heiden, U., Heurich, M., and Hearne, J., 2016, Vegetation Indices for Mapping Canopy Foliage Nitrogen in a Mixed Temperate Forest. *Remote Sensing*, www.mdpi.com/journal/remotesensing, Vol. 8, No. 491; doi:10.3390/rs8060491.

著者 :

国土防災技術

岡本勝男

第4節 モバイルGISを用いた森林調査

- ①目的または適応分野：森林計測（幹太さ、材積量、樹種分類）、森林管理（害虫被害木把握、生育量推定）、災害（前兆現象と被災範囲）把握（気象値、土塊移動量）、治山施設点検；
- ②プラットフォーム：PDA端末、スマートフォン、タブレット；
- ③キーワード：モバイル機器（スマートフォン、タブレット）、地図表示、位置情報、帳票処理

第1項 モバイルGISを用いた森林調査方法のレビュー

森林測量や境界調査、単木調査には、情報を整理した地図と帳票が欠かせない。しかし、森林は山地にあって面積が広大で、計測するデータ量が多いため、森林計測と収集した情報の管理に多くの人手と時間が必要となる。従来は紙の帳票に計測したデータを記入していたため、そのデータをデータベースに入力する労力もかかった。そこで、情報機器が小型軽量化され安価に入手できるようになるにつれ、現場で計測と同時に情報機器にデータを入力し、持ち帰ってからデータをデータベースに（半）自動的に転送したり、現場で直接送信したりできるモバイルGIS（Geographical Information System：地理情報システム）関連製品が開発されてきた（図3.4.1）。

モバイルGISは、GPS（Global Positioning System：全球測位システム）の位置特定技術やGIS技術と携帯情報端末機器（PDA: Personal Digital Assistance）を利用して、人や車の移動体に対して現在位置や目的地までの経路、施設情報等を提供するシステム（国土交通省 2008）で、端末上で動作するGISアプリケーションを利用して、現地調査などに活用する。このアプリケーションの要件は以下のとおりである：

- ①山中では電波が届かなかったり航空レーザデータを表示したりするため、オフラインの背景図を利用できること；
- ②現在位置を知るためにGPSを利用できること；
- ③業務に応じた独自の入力様式に対応できること；
- ④記録を残すために写真を登録できること
- ⑤解析結果や調査のためのGISデータを表示できること

モバイルGISは最初にPDA上で実用化され、現在ではスマートフォンやタブレット端末(PC)を使ったものが主流になってきた。



図3.4.1 野帳を使った調査 → モバイルGISを用いた調査のイメージ

3.4.1.1 PDAを使ったモバイルGIS

森林内では見通しが悪く自分の位置を正確に特定し記録することは難しかったため、PDAにGPSレシーバを装着し画面上に地図と現在位置を表示するナビゲーションシステムが開発された

(ギヨロマン 2019, 日本森林技術協会 2019)。森林調査をする前に、調査データを表示する際に背景図となる調査地域の地図を、PC 上で PDA 用に作成（変換）し PDA に取り込む（ギヨロマン 2019）。現地では、GPS レシーバで現在位置を特定し、取り込んだ地図上に表示する（図 3.4.2）。

森林測量のためには GPS 測量用の DGPS (Differential GPS) 測量システムやデジタルコンパスを接続することができるものもある（ジツタ 2019, Trimble 2019）。Differential GPS 方式は、GPS の測位精度を向上させるための方式で、2 つの GPS 受信機が取得する測位情報が同じ誤差を持っていることを利用している（MoGIST 2019）。つまり、位置座標が正確に判明している基準局に設置した GPS 受信機が取得した測位情報から得た誤差を補正情報として発信し、移動局（計測点）で受信して取得した測位情報に誤差を補正するもので、1 m程度まで測位精度を向上させることが可能である。



図 3.4.2 地図準備→地図取り込み→現在位置を特定→調査

PDA は携帯用のコンピュータでもあることから、測量（位置情報）だけでなく、測量地点周囲の属性や林小班の属性のデジタル野帳への入力、属性別カラー表示もできるものもある（ジツタ 2019）。

3.4.1.2 スマートフォンやタブレットを使ったモバイル GIS

近年では、安価で高性能なスマートフォンやタブレット端末が普及してきたので、プラットホームの主流は PDA からこれらに移っている。スマートフォンやタブレット端末は OS (android や iOS) が共通社会基盤になっているため、ハードウェアの選択肢が多い。

森林調査の手順は PDA を使った調査と同じである。iOS 用のアプリ iGIS は単独使用を想定しているが、GIS ソフトウェアとの連携を前提にして開発されたモバイル GIS ソフトウェアが多い。フォーム入力型の Survey123 for ArcGIS や現地調査アプリ Collector for ArcGIS (ESRI 2019)、QGIS (OSGeo 2019) と連携する Geopaparazzi (ジオパパラッチ) (GIS Open Educational Resources WG 2019) が挙げられる。Collector for ArcGIS と Survey123 for ArcGIS は ArcGIS のライセンスに付属するアプリケーションで ArcGIS Online の利用が前提となっている。

スマートフォンやタブレット端末の特徴として、さまざまなアプリをインストールして調査に利用できる。AR (Augmented Reality) 機能を使って、カメラに映し出された近隣の山や地名を確認したり、目標地点や境界線をカメラ画像上で確認することのできるものもある（ギヨロマン 2019）。また、AI 機能を使って、写真から自動で木口直径を推定して材積を計算させることもできる（国土防災技術 2019, woodinfo 2019）。

第2項 モバイルGISの事例

本項では、Geopaparazzi (GIS Open Educational Resources WG 2019) を使った治山施設点検におけるデータの準備から帳票処理までの事例を紹介する。詳細な使用方法についてはマニュアル類（小口高ほか 2019）を参照されたい。Geopaparazzi は、オープンソースのアプリケーションで、Android 版のみである。オフラインでもオンラインでも利用でき、QGIS を用いて独自の背景図を利用できる。また、独自の入力様式をカスタムノートとして作成でき、調査結果を KML (Keyhole Markup Language) や GPX (GPS eXchange Format) にエクスポートできる。SpatiaLite (空間情報を格納できる SQLite の拡張) の利用により、ベクタデータの表示が可能となる。さらに、ラインデータも編集でき、マップベースで帳票に調査データを入力するという感覚で使うことができる（図 3.4.3）。

「Geopaparazzi」の基本的な使い方の流れは次のようになる：

- ① 新規プロジェクトを作成する；
- ② 「GPS Test」で測位状況を確認する；
- ③ ノートを追加する；
- ④ ログをオン（現在位置を測定開始）にする；
- ⑤ マップを表示する；
- ⑥ フォームの入力をする；
- ⑦ データを PC に出力する

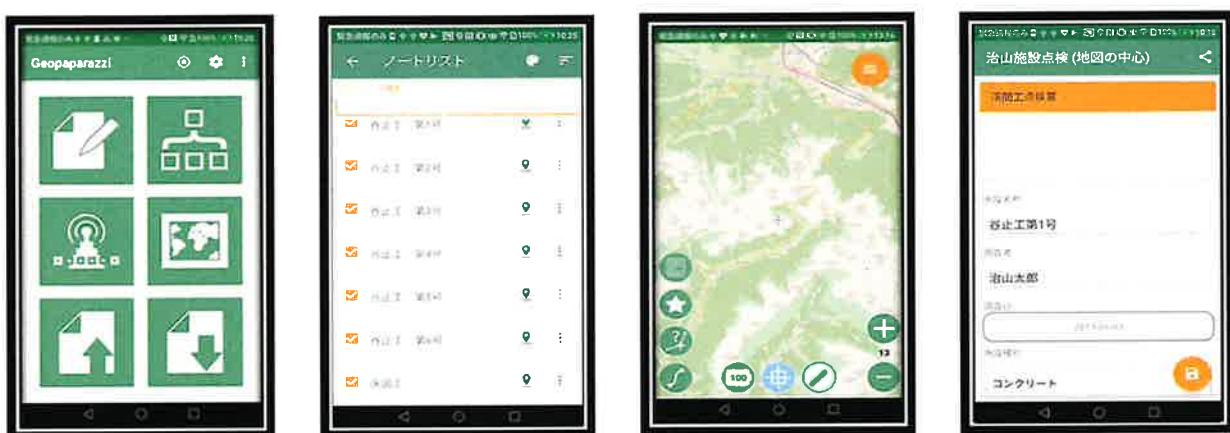


図 3.4.3 Geopaparazzi 起動後の画面（左）、ノートリスト（中左）、マップ上に現在位置を表示した画面（中右）、データ入力画面（右）

背景地図は初期設定で OpenStreetMap (OSM 2019) が表示されるようになっている。ほかの背景地図、例えば、地理院地図（国土地理院 2019）を表示させたい場合は、調査に行く前に予め準備しておく。Geopaparazzi は、カスタムノートとして入力用のフォームを作成でき、そこに現地調査で取得した位置情報を格納できる。入力用フォームは、最終的に出力する帳票を設計しておき、そこで必要となるデータが集められるように設計する。図 3.4.4 に治山施設点検の帳票の設計画面の例を示す。複数シートで同じデータを利用できる場合は、サブシートにメインシートのデータをリンクさせておく。地図で治山施設の位置がわかっている場合は、その場所を予め入力しておく。

現地で治山施設を見つけたら、カスタムノートに記録する。現地でのデータ収集が終了した後、事務所に戻り、カスタムノートを GIS 用データに変換する。QGIS を起動して、治山施設のポイントデータを表示し、入力データを確認する。入力フォーム作成前に設計しておいた帳票は、（エクセルシートのセルと）治山施設の入力データをマッピング（対応づけ）すると作成される。

図 3.4.4 治山施設点検用帳票の設計。表示用の現地点検チェックシート（左）とデータマッピング用の表（右）。

謝辞

本稿は、国土防災技術 モバイル GIS 研修テキスト（非公開）と科学研究費補助金 基盤研究(A) 「GIS の標準コアカリキュラムと知識体系を踏まえた実習用オープン教材の開発」（研究代表者：小口 高 研究課題/領域番号 15H01782）のプロジェクトによって制作された「GIS オープン教材（試験公開版）」（小口高ほか 2019）を参考にした。

引用文献

ESRI, 「モバイル GIS 一覧」, <https://blog.esrij.com/category/モバイルgis/> (2019年5月3日アクセス)

GIS Open Educational Resources WG, CC BY-SA 4.0, スマーフォンを用いた野外調査（作成中）, <https://gis-oer.github.io/gitbook/book/materials/equipment/mobile/mobile.html> (2019年5月4日アクセス)

ギヨロマン, ギヨロモバイル, <http://www.gyoroman.com/product4.html> (2019年4月30日アクセス)

ジツタ, Assist 森林測量版, <http://www.jitsuta.co.jp> (2019年4月30日アクセス)

小口高ほか, GIS オープン教材（試験公開版）, <https://gis-oer.github.io/gitbook/book/> (2019年5月4日アクセス)

国土防災技術, AI 丸太検知くん「木口調査アプリ」, <https://www.jce.co.jp/news/20180824/01.html> (2019年5月2日アクセス)

国土地理院, 地理院タイルの WMTS メタデータ提供実験, https://github.com/gsi-cyberjapan/experimental_wmts (2019年5月12日アクセス)

国土交通省, 2008, 「ITS（高度道路交通システム）の推進」, <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j/html/2002HBook/section2/2-33j.html> (2019年5月2日アクセス)

MoGIST, 地理空間情報技術ミュージアム, <http://mogist.kkc.co.jp> (2019年5月2日アクセス)

日本森林技術協会, 森林内ナビゲーションシステム MoriView II, <http://www.jafta.or.jp> (2019年4月4日アクセス)

月 30 日アクセス)

Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), <https://qgis.org/ja/site/about/index.html> (2019 年
5 月 4 日アクセス)

OpenStreetMap (OSM), OpenStreetMap Japan, <https://openstreetmap.jp> (2019 年 5 月 12 日ア
クセス)

Trimble, Trimble Geo 7 シリーズ, <http://www.nikon-trimble.co.jp> (2019 年 4 月 30 日アクセス)
woodinfo, 檜知丸 写真丸太検知システム, <http://maple96.wixsite.com/woodinfo/kenchimaru>
(2019 年 5 月 2 日アクセス)

著者 :

国土防災技術

龍見栄臣・竹村文・高田香・岡本勝男

第5節 UAVを用いた森林調査

- ①目的または適応分野：森林資源、樹木生育状況、山地災害、林地境界
- ②プラットフォーム：UAV
- ③キーワード：UAV、改正航空法、レーザ、SfM

第1項 UAVについて

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) は、無人で飛行する航空機（無人航空機）のことであり、一般にはドローン（Drone）と称されることが多い。元々は、米国で軍事目的に開発された高高度機から出発した技術であるが、自律航法を可能にする GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) や電子ジャイロ等の小型化や、モータやバッテリの技術の進歩により、UAV の小型化・低価格化が進み、測量、農業、点検、物流等さまざまな用途で用いられるようになってきた。森林管理においても資源量や微地形の把握を目的として、利用事例が増えている。

UAV は、機体とセンサで構成されている。それぞれ、さまざまな種類・特徴があり、その組み合わせが極めて重要である。

3.5.1.1 UAV 機体の種類と特徴

UAV 機体の種類と特徴を表 3.5.1 に示す。機体は「固定翼」と「回転翼」に分けられ、回転翼はヘリコプタ型の「シングルロータ」と複数のプロペラを持つ「マルチロータ」に分けられる。それぞれ、大きさ、飛行可能時間、飛行方法、価格帯等に特徴があるが、現在最も普及しているものは、マルチロータ型の回転翼機である。

表 3.5.1 UAV 機体の種類と特徴

タイプ	特徴	代表的な機体
固定翼	<ul style="list-style-type: none">・大型・長時間飛行が可能・空中停止・低速飛行不可・高価格	eBee (senseFly) UX5 (Trimble)
回転翼 (シングルロータ)	<ul style="list-style-type: none">・大型・長時間飛行が可能・空中停止・低速飛行が可能・高価格	RMAX (YAMAHA) PDH-03 (PRODRONE)
回転翼 (マルチロータ)	<ul style="list-style-type: none">・小型～中型・長時間飛行不可・空中停止・低速飛行が可能・低価格	PHANTOM シリーズ (DJI) INSPIRE シリーズ (DJI) Zion シリーズ (エンルート) SPIDER シリーズ (ルーチェサーチ)

3.5.1.2 UAV 搭載センサの種類

UAV 搭載センサの種類を表 3.5.2 に示す。UAV 搭載センサには、デジタルカメラ、レーザスキャナ、熱赤外カメラ、マルチスペクトルカメラ等があり、その他にもビデオカメラ、暗視カメラ、ハイパースペクトルカメラ等のセンサも市販されている。現在最も多く利用されているものは、デジタルカメラとレーザスキャナである。

表 3.5.2 UAV 搭載センサの種類

タイプ	取得されるデータ	代表的なセンサ名
デジタルカメラ	可視画像	α 5000 (SONY) EOS (Canon) HERO5 (GoPro)
レーザスキャナ	三次元点群データ	VUX-1 (Riegl) VLP-16 (Velodyne) Surveyor (YellowScan)
熱赤外カメラ	温度画像	FLIR duo (FLIR Systems)
マルチスペクトルカメラ	多波長画像	Sequoia (MicaSense) RedEdge (MicaSense) Yubaflex (BIZWORKS)

第2項 UAV 計測の注意事項

UAV は、①地上調査に比べ、立ち入りや地形上の制約が少ない、②広範囲の効率的な計測が可能である、③有人機に比べ、機動的な計測が可能である 等の利点があることから、森林・林業分野においても更なる普及が見込まれているが、法規制や安全対策などに十分注意を払う必要がある。

ここでは、UAV 計測の注意事項について概説する。

3.5.2.1 飛行可能な空域

改正航空法（平成 27 年 12 月 10 日施行）によって、UAV の飛行ルールが定められた。これによると、以下の空域においては、国土交通大臣の許可を受けなければ、UAV を飛行させてはならないと定められている（国土交通省 2018）（国土交通省航空局 2018）。

- ① 空港等周辺に設定された進入表面等の上空の空域（図 3.5.1 の A）；
- ② 地表または水面から 150m 以上の高さの空域（図 3.5.1 の B）；
- ③ 国勢調査の結果を受け設定されている人口集中地区（国土交通大臣が告示で定める区域を除く）の上空（図 3.5.1 の C）

森林・林業分野で UAV を飛行させる場合は、国土交通大臣の許可を必要としない空域が大半であるが、空港近傍の森林や都市近郊の森林では、稀に図 3.5.1 の A や C に該当するケースがあるため、注意が必要である。なお、本ルールは、200g 未満の機体は除外されている。

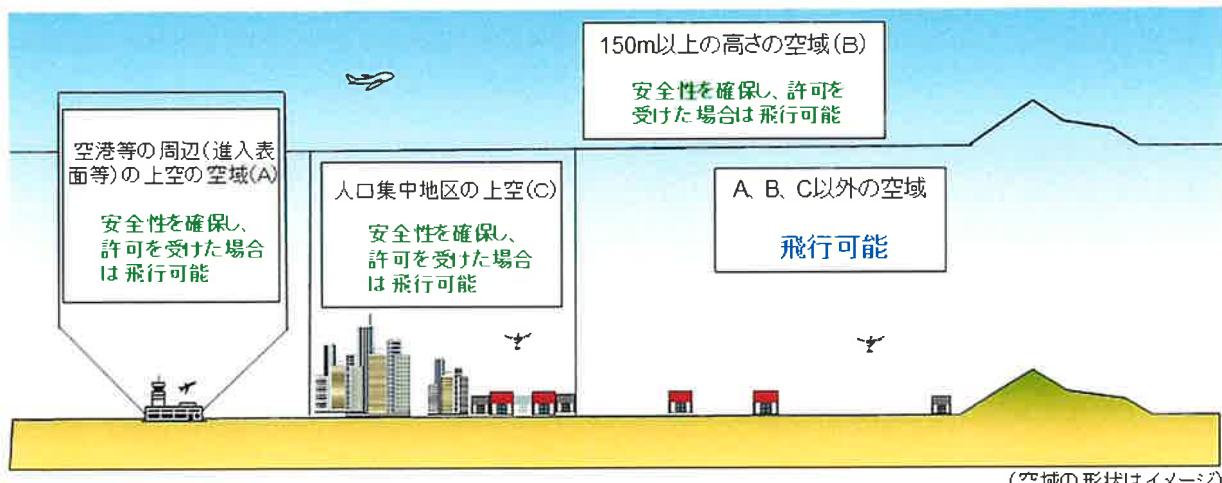


図 3.5.1 UAV の飛行の許可が必要となる空域（国土交通省 2018, 国土交通省航空局 2018）

3.5.2.2 飛行方法

改正航空法では、飛行させる場所に関わらず、以下の安全対策の遵守が定められている（国土交通省 2018）（国土交通省航空局 2018）。

- ① 日中（日出から日没まで）に飛行させること；
- ② 目視（直接肉眼による）範囲内で UAV とその周囲を常時監視して飛行させること；
- ③ 人（第三者）または物件（第三者の建物、自動車など）との間に 30 m 以上の距離を保って飛行させること；
- ④ 祭礼、縁日など多数の人が集まる催しの上空で飛行させないこと；
- ⑤ 爆発物など危険物を輸送しないこと；
- ⑥ UAV から物を投下しないこと

森林・林業分野で UAV を飛行させる場合、特に②、③に注意が必要である。

なお、上記のルールによらずに UAV を飛行させようとする場合には、あらかじめ、地方航空局長の承認を受ける必要がある（図 3.5.2）。

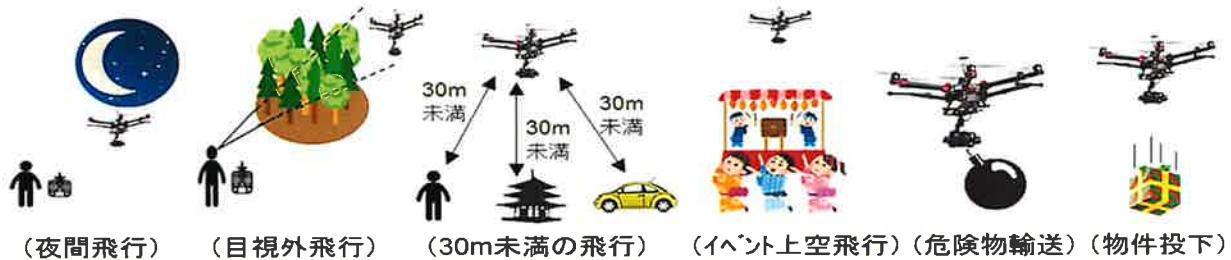


図 3.5.2 承認が必要となる UAV の飛行方法（国土交通省 2018）（国土交通省航空局 2018）

3.5.2.3 安全対策

改正航空法で定められた事項に加え、以下の安全対策に留意することが重要である。

- ① 周辺環境…飛行範囲及び周辺の土地利用に留意し、物的損害、人的な危険が想定される場合は、飛行しないこととする；
- ② 気象条件…降雨・風速については機器性能を踏まえ、安全を確認後実施する；
- ③ 離発着地点の確保…十分な広さのある場所で行い、民地の利用は避ける；
- ④ 飛行時の機体や周辺状況の監視…異常が発見された場合は、速やかに中止する；
- ⑤ 周辺土地利用者への周知…作業中であること周知する看板や幟を掲げるとともに見張り員を配置する

第 3 項 UAV 計測によって得られる情報

UAV 計測では、搭載するセンサの種類によって得られる情報が異なる。現在最も多く利用されているデジタルカメラとレーザスキャナによって得られる情報を表 3.5.3 に示す。

森林・林業分野では、DSM と DEM の差から求められる DCHM (Digital Canopy Height Model: デジタル樹冠高モデル) やオルソフォトが、林相、立木本数、樹高、胸高直径、樹冠投影面積、材積等の森林資源解析に用いられている。

表 3.5.3 UAV 計測によって得られる情報

得られる情報	説明	デジタル カメラ	レーザ スキャナ
オルソフォト	個々の写真の歪みを補正し、地図と同じ正射投影像に変換した画像。	○	×
オリジナル点群	写真測量やレーザ計測で得られる X、Y、Z 座標で定義されるポイントデータ。	○	○
DSM (Digital Surface Model)	樹木や建物の高さを含む標高データ。樹冠表層モデル。	○	○
DEM (Digital Elevation Model)	樹木や建物を除去した後の地盤面の高さを示す標高データ。地盤高モデル。	△	○

第 4 項 UAV 計測によって得られる情報の特徴

UAV 計測によって得られる情報のうち、オリジナル点群、DSM についてはデジタルカメラ、レーザスキャナのいずれにおいても得ることができる（表 3.5.3 前掲）。しかし、データ処理プロセスが異なるため、得られる情報の性質が異なる。

ここでは、UAV 計測によって得られる情報の特徴について概説する。

3.5.4.1 デジタルカメラによって得られるオリジナル点群、DSM の特徴

デジタルカメラの場合、ステレオ写真測量技術を用いてオリジナル点群が生成される。近年は、SfM (Structure from Motion) 技術を実装したソフトウェアが広く普及したことから、SfM によるオリジナル点群生成が多く実施されている。SfM 技術とは、動画や静止画等カメラの視点撮影した複数枚の画像からそのシーンの三次元形状とカメラ位置を同時に復元する技術である。

代表的な SfM ソフトウェアを表 3.5.4 に示す。

表 3.5.4 代表的な SfM ソフトウェア

	 PhotoScan <small>3D Modeling and Mapping</small>			Image Master series
製品名 (呼称)	PhotoScan (フォトスキャン)	ContextCapture (コンテキストキヤップチャ)	Pix4DMapper (ピックスフォーディーマッパー)	ImageMasterUAS (イメージマスター・ユーエーエス)
開発会社	Agisoft (アギソフト)	Bentley (ベントレー)	Pix4D (ピックスフォーディー)	TOPCON (トプコン)
開発国	ロシア	フランス	スイス	日本
機能 (共通)	どのソフトウェアも SfM 技術のアルゴリズムを用いており、写真（航空・地上）から三次元モデルデータを生成する <ul style="list-style-type: none"> ・多量の静止画像や動画で撮影された画像からカメラの撮影位置を推定し、三次元モデルデータに反映可能 ・画像処理はほぼ自動処理で実行される ・価格が比較的安価であり、多くの企業・研究機関が導入している 			

デジタルカメラから生成されるオリジナル点群には、以下の特徴がある。

- ① 植生に覆われている場合、地盤高を得ることが困難；
- ② 写真の重複度（ラップ率）がオリジナル点群の品質を左右する

森林域では、樹木や下層植生によって地表面が写真に写っていないケースが多いため、DEM作成には不向きであると言える（図3.5.3）。また、ラップ率は、オーバーラップ80%以上、サイドラップ60%以上が推奨されている（国土地理院 2018a）。

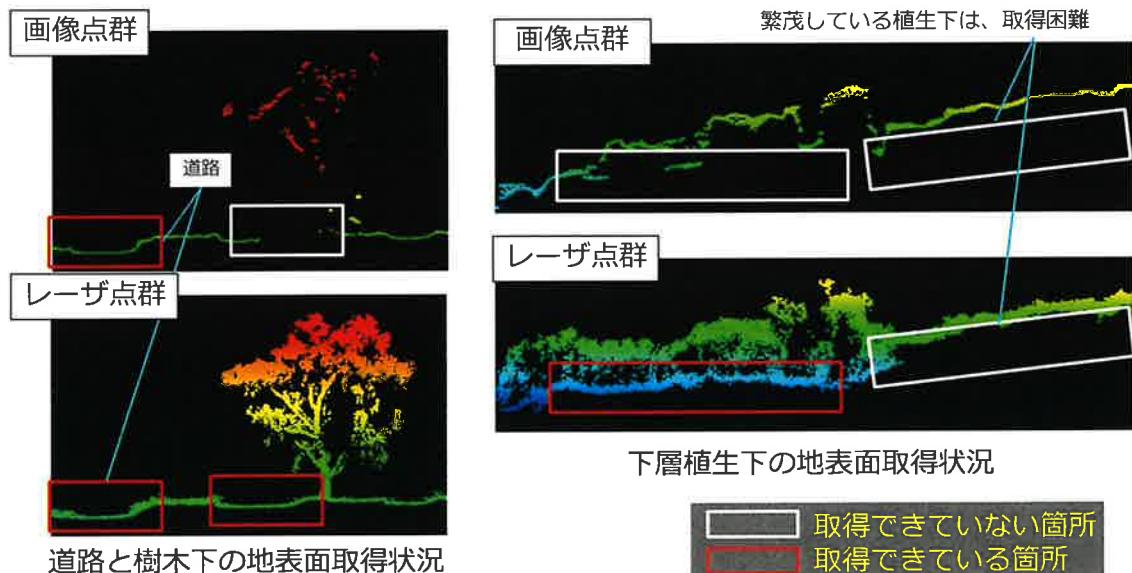


図3.5.3 森林域における画像点群とレーザ点群の比較

3.5.4.2 レーザスキャナによって得られるオリジナル点群、DSMの特徴

レーザスキャナの場合、レーザ光を照射し、その反射光との時間差から得られる距離と、GNSS測量機、IMU（慣性計測装置）から得られる航空機の位置情報からオリジナル点群が生成される。

レーザスキャナから生成されるオリジナル点群には、以下の特徴がある。

- ① 樹木や下層植生の影響を受けるが、隙間を透過するため、地盤高も「ある程度」取得可能；
- ② コース間段差（隣接する2コース間で生じる較差）を補正する必要がある；
- ③ 調整用基準点を用いて高さ精度を検証・調整する必要がある；
- ④ デジタルカメラから生成されるオリジナル点群と比べ、大気中の塵や多重反射に伴うノイズが多い（図3.5.4）

DEM作成を目的とした場合、森林域ではデジタルカメラよりレーザスキャナの利便性が高いが、オリジナル点群から樹木や建物、ノイズを除去する作業として「フィルタリング」が必要になる。高精度のDEMを作成するためには複雑なフィルタリングを行う必要があるため、UAV計測後の後処理に多くの時間を要する場合もある。なお、UAV搭載レーザスキャナの一般的な作業手順は、「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」にまとめられている（国土地理院 2018b）。

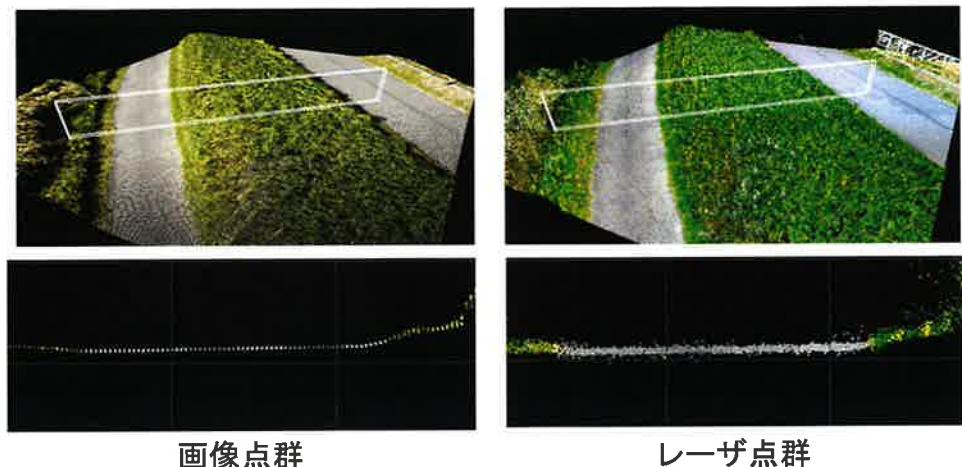


図 3.5.4 画像点群とレーザ点群のノイズの比較

第5項 UAVによる森林計測の今後

UAVは、機体、センサとも、目まぐるしく新商品開発が進んでおり、加速度的に性能が向上している。今後、森林・林業分野での普及と利用が一層進展すると考えられる。

引用文献

- 国土交通省、無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール、
http://www.mlit.go.jp/koku/koku Tk10_000003.html、(2018年5月2日アクセス)
- 国土交通省航空局、無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン、
<http://www.mlit.go.jp/common/001228024.pdf>、(2018年5月2日アクセス)
- 国土地理院、UAVを用いた公共測量マニュアル(案)、<http://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf>、
 (2018a年5月2日アクセス)
- 国土地理院、UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）、
<http://www.gsi.go.jp/common/000198899.pdf>、(2018b年5月2日アクセス)

著者：

国際航業

今井靖晃

第6節 空中写真を利用した森林調査

- ①目的または適応分野：空中写真を利用した森林調査；
- ②プラットフォーム：航空機；
- ③キーワード：空中写真、立体視、オルソフォト

第1項 空中写真の準備

飛行機に搭載したカメラによって撮影された空中写真について、特徴・歴史・種類・入手方法を、文献をもとに取りまとめる（渡辺 2003, 板垣 2017, 加藤 2014, 日本林野測量協会 2018）。

3.6.1.1 空中写真の特徴

空中写真是撮影した箇所の撮影時点での樹木や地形などの状況が記録されており、樹種の判別、樹高の測定、立木数、材積の推定、地図作成などの森林調査に利用されている。

連続した写真是立体視することが可能で、撮影時の現地を忠実に再現でき、近年はデジタル立体視を利用して判読や高さ計測が簡便化している。

写真測量をおこなえば DSM やオルソフォトが作成でき、森林 GIS での利用や、DSM として作成した樹冠高とレーザ計測で得られた地盤高との差から材積の推定も可能となる。

3.6.1.2 日本の森林分野での空中写真の歴史

林野庁では昭和 27 年より自主撮影での森林調査への利用が開始され、現在まで 65 年間の歴史がある。昭和 36 年からは国土地理院撮影区域との重複を最小限とするため、山岳地域と平地地域で撮影分担協定が交わされ、概ね 5 年ごとに同一地域の撮影が継続されている。

技術の進歩によりアナログ撮影からデジタル撮影に移行しており、林野庁では平成 21 年からデジタル撮影が始まり、平成 29 年にはすべての撮影がデジタル撮影となった。

3.6.1.3 空中写真の種類

空中写真的撮影方式にはフィルムカメラによるアナログ撮影と、デジタルカメラによるデジタル撮影がある。またアナログ撮影によるネガフィルムをスキャニングしたデジタル画像数値データもある。

従来はアナログ撮影で得られたネガフィルムを印画紙に焼付けして利用していたが、デジタル撮影では紙媒体へのインクジェット出力の他、森林 GIS でのオルソフォトの活用が容易となっている。

3.6.1.3.1 アナログ撮影空中写真

アナログ空中写真是、フィルムカメラにより隣の空中写真と 60%重複するよう撮影されており、画角は正方形となっている。従来は密着写真を実体視する利用方法が主であったが、専用スキャナーを用いてデジタル化することで、デジタル立体視や森林 GIS での利用が可能になる。初期の空中写真是現在の写真と比較すると画質は良くないが、撮影時の状況が記録されている貴重なデータである。図 3.6.1 にモノクロフィルム（昭和 31 年：奈良県）とカラーフィルム（平成 27 年：長野県）のアナログ撮影空中写真例を示す。

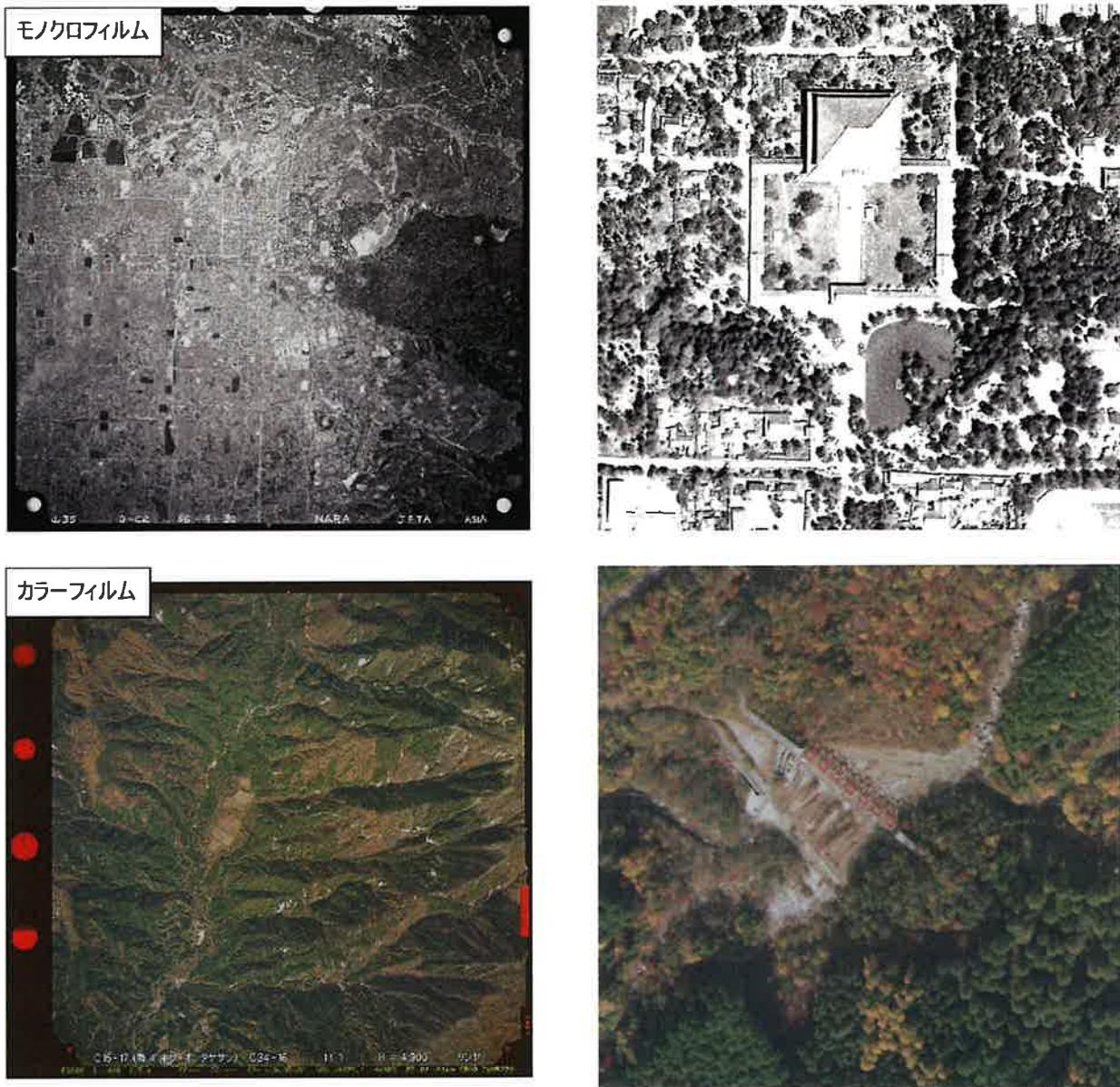


図 3.6.1 アナログ撮影空中写真例。（上）モノクロフィルム（奈良県：昭和 31 年）と（下）カラーフィルム（長野県：平成 27 年）。

3.6.1.3.2 デジタル撮影空中写真

デジタルカメラでの撮影は、一般的には隣の空中写真と 80%以上重複するよう撮影されており、画角は長方形となっている。アナログ撮影と同じ撮影範囲をカバーするにはより多くの写真が必要となる。

近赤外波長を含んだ 4 バンドデータとして作成されれば、フォールスカラー合成や林相区分などの分析に利用できる。フォールスカラー合成では植生が赤色、非植生が青色として表示される（図 3.6.2）。

デジタル撮影データとともに外部評定情報を入手すれば、アナログ撮影空中写真と比べて DSM やオルソフォトが簡単に作成可能である。

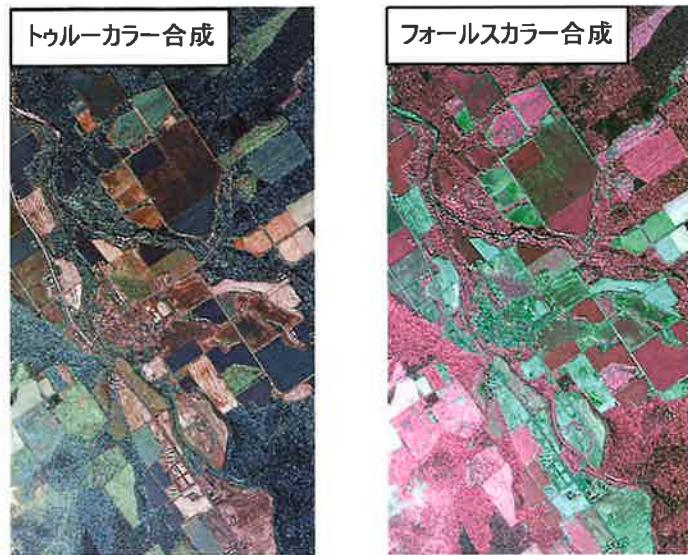


図 3.6.2 デジタル撮影空中写真例

3.6.1.4 空中写真の入手方法

空中写真是日本の国土全域を対象として、山岳地域の国有林は林野庁、民有林は都道府県、平地地域については国土地理院によって撮影が分担されている。そのほか、公共測量成果として整備されている場所では安価に入手可能である。

林野庁撮影地域は管理委託業者から入手でき（林野庁 2005）、国土地理院撮影地域は日本地図センターおよび取次店から入手できる（国土地理院 2005）。

第2項 空中写真を利用した森林調査例

空中写真がもつ、撮影時の現地の状況が記録されており、過去から現在まで継続して撮影されている特徴をいかした森林調査例を紹介する。

3.6.2.1 林相・樹種判読

従来のアナログ空中写真では、立体視による林相・樹種判読結果を印画紙上に記入し、地形図上に移写する等して利用していたが、位置情報が付与されたデジタル空中写真では、パソコン上で判読して林相図を作成できる。

また近赤外波長情報が含まれたデジタル空中写真では、フォールスカラー合成を利用した判読や、解析ソフトウェアでの自動樹種分類などでも利用可能である。図 3.6.3 に樹種判読例を示す。フォールスカラー合成では裸地のほかに枯死木が青色で表現される。

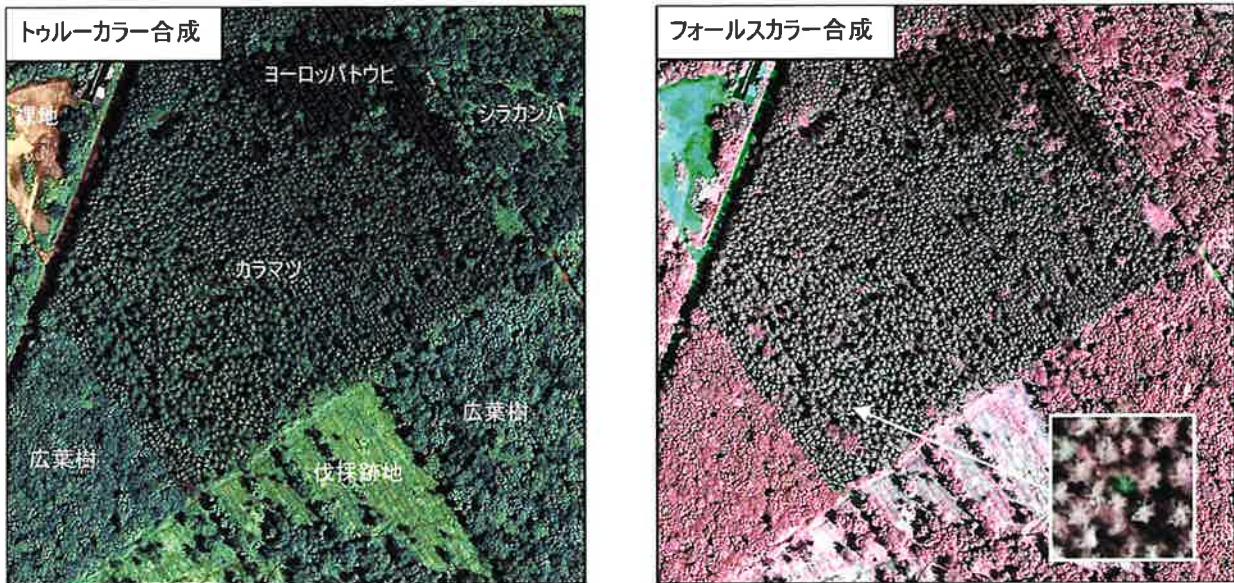


図 3.6.3 林相・樹種判読例

3.6.2.2 土地被覆変化

古いアナログ撮影もネガフィルムをスキャニングしてオルソフォトを作成することで、GISで手軽に土地被覆の変化を確認できる。図 3.6.4 では伊勢湾台風後に撮影された写真に存在する崩壊地が、現在は広葉樹林化していることが判読できる。

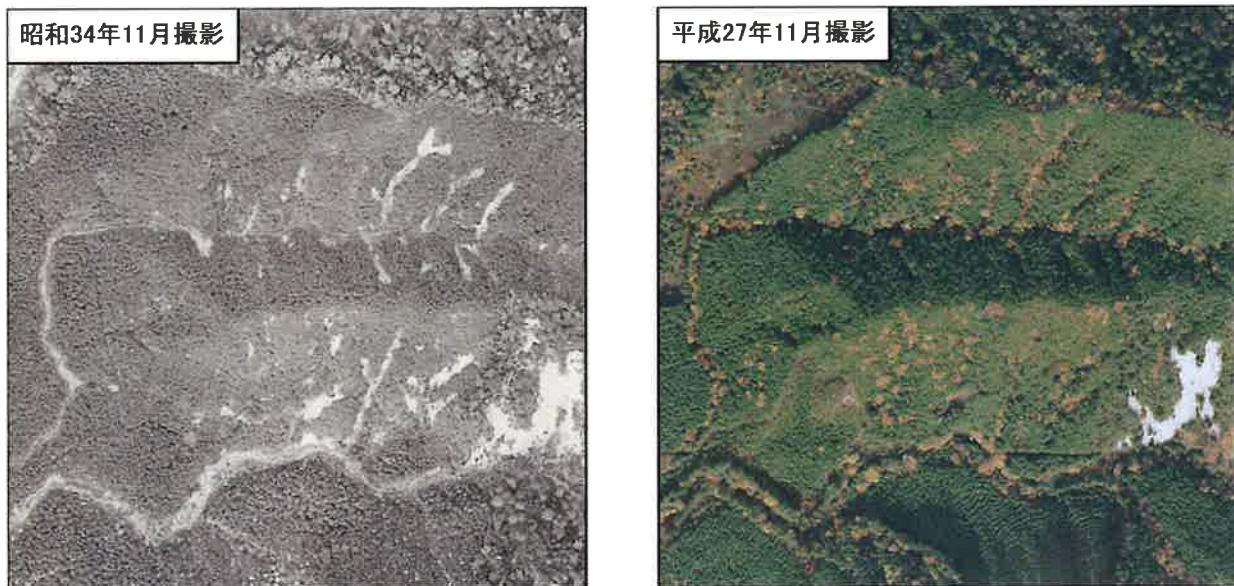


図 3.6.4 土地被覆変化例

3.6.2.3 境界調査

過去から現在まで継続して撮影されている空中写真は、それぞれの時代の森林の状況が記録されているため、境界明確化の資料として利用できる。

近年は立体視用のグラフィックボード・ディスプレイ・メガネ等を準備することで、手軽にデジタル立体視が可能となっている（写真 3.6.1）。

デジタル立体視では過去や現在の林相や地形を複数の人々で同時に確認することが可能であり、森林林所有者の高齢化等で現地立ち合いが困難な場合の境界画定では有力なツールとなる。表

3.6.1にデジタル立体視に対応している代表的ソフトウェアを示す。

表 3.6.1 デジタル立体視に対応している代表的ソフトウェア

製品名	Stereo Viewer pro	図化名人	もりつたい
開発会社	フォテク	アジア航測	パスコ 日本森林技術協会
特徴	<ul style="list-style-type: none">・無償版でデジタル立体視が可能・アナグリフめがね（赤青めがね）でも立体視が可能・有償版では樹高・本数測定などの森林計測機能あり	<ul style="list-style-type: none">・公共測量の数値図化作業に使用可能・DSM やオルソフォトの作成機能あり	<ul style="list-style-type: none">・アナグリフめがね（赤青めがね）でも立体視が可能・オブジェクトベース画像解析による林相区分・樹種分類機能や、蓄積推定・地形解析機能あり



写真 3.6.1 複数人でのデジタル立体視例

引用文献

- 板垣恒夫, 2017, 空中写真判読ノート～森林や自然環境を知る古くて新しいツール～, 共同文化社, 北海道.
- 加藤正人, 2014, 森林リモートセンシング 第4版－基礎から応用まで－, 日本林業調査協会, 東京.
- 国土地理院, 図と空中写真の購入方法, <http://www.gsi.go.jp/MAP/kounyu.html> (2005年5月14日アクセス)
- 日本林野測量協会編, 2018, 森林分野における空中写真の利活用, 日本林野測量協会, 東京.
- 林野庁, 空中写真及びデジタルデータ等の入手方法について, <https://maps.gsi.go.jp/> (2005年5月14日アクセス)
- 渡辺宏, 2003, 最新 森林航測テキストブック, 日本森林技術協会, 東京.

著者：

グリーン航業

後藤智哉

第7節 航空レーザを用いた森林調査

- ①目的または適応分野：森林資源状況の把握、樹木生育状況、山地災害被害状況、経年変化、森林境界管理；
- ②プラットフォーム：航空機（固定翼、回転翼）；
- ③キーワード：レーザプロファイラ

第1項 航空レーザ計測について

航空レーザ計測は航空機をプラットフォームとして、センサはレーザ計測システムを搭載し、上空から地上物の三次元情報を取得する技術である。航空レーザ計測により樹冠表層と地盤面のデータを同時に取得することができ（図3.7.1）、計測の位置精度が±15 cmと高い。

航空レーザ計測システムは航空機から地上物のある一点との距離を計測するレーザ測距装置と航空機の位置と姿勢を計測するGNSS/IMU装置からなり、正確な三次元座標を持った点群を取得することができる（図3.7.2）。レーザは1発の照射から複数の反射を得ることができ、最も早く受信する点（ファーストパルス）は樹冠表層のデータとなり、最も遅く受信する点（ラストパルス）は樹木下の地盤面のデータとなる。樹木下でも詳細な地形図を作成できることにより航空レーザに大きな利点があった。

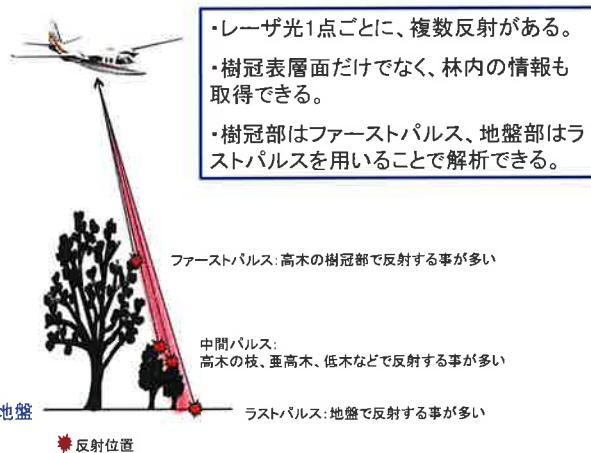


図3.7.1 レーザ計測イメージ



図3.7.2 レーザ計測システム (Leica ALS)

プラットフォームには固定翼と回転翼があり、面的な広がりのある森林では固定翼、山地災害の箇所などでは回転翼とすることで効率的な計測を行うことができる。固定翼と回転翼の特徴を以下に示す（表3.7.1）。

表3.7.1 プラットフォームの特性

	固定翼	回転翼
計測密度	1～10点	1～25点
計測効率	高い	低い
遠隔地の計測	計測可能	スタンバイまでに時間とコストがかかる
計測特性	直進 計測高度一定	機動性 対地高度一定

第2項 航空レーザ計測による取得データ

航空レーザ計測では点群データとして、三次元情報（X、Y、Z）の他に反射強さや、反射した際のプロファイルを取得する。取得した点群は不規則に並んでおり、一般的にはデータを扱いやすくするため、規則的に等間隔に標高値を示すグリッドデータとする。グリッドデータの間隔は計測密度によってかわり、1点/m²では1m間隔、4点/m²では0.5m間隔となる。

地盤高のグリッドデータはDEM(Digital Elevation Model)と呼ばれ、地形解析による傾斜角や尾根谷度の算出や起伏を強調した微地形表現図が作成できる(図3.7.3)。

樹冠表層のグリッドデータはDSM(Digital Surface Model)、樹冠高のグリッドデータはDCHM(Digital Canopy Height Model)と呼ばれ、樹高段彩図や森林解析に用いることができる。

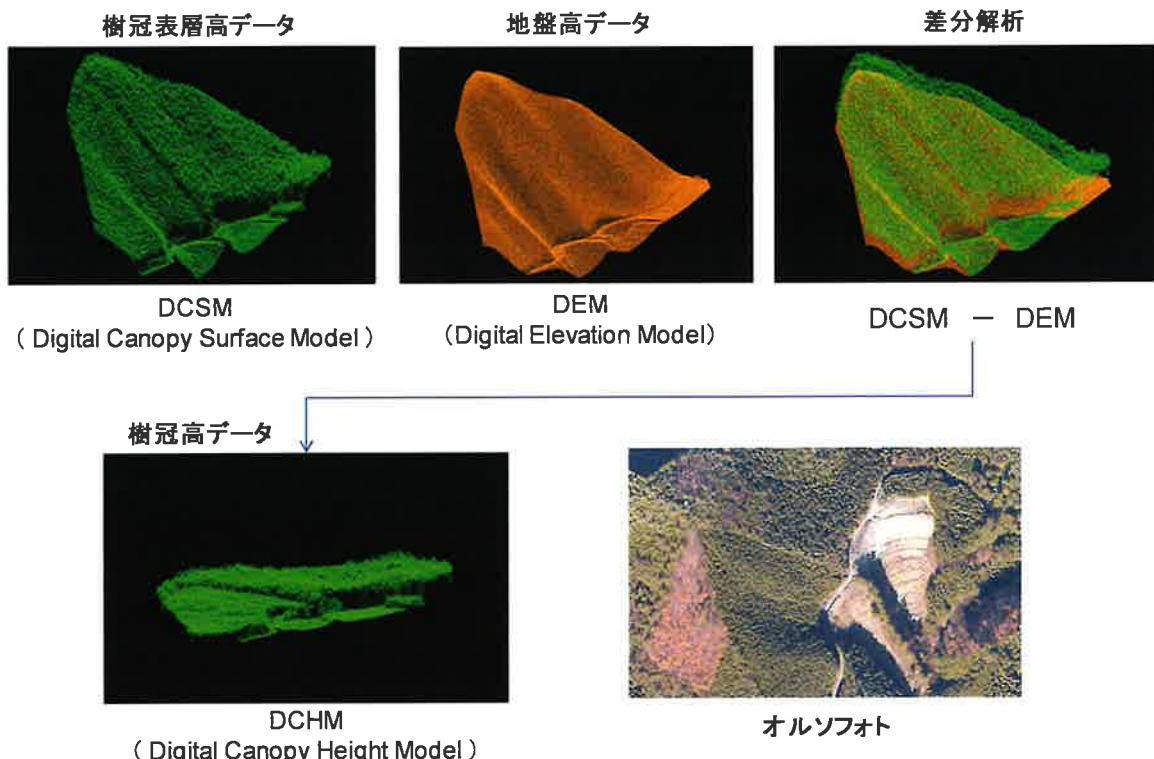


図3.7.3 航空レーザ計測取得データ

第3項 航空レーザ計測の森林調査の目的

航空レーザ計測ではレーザの性質により、樹木と地盤面を同時に取得できるため、地形解析や森林解析を行うことで、以下の目的に用いられる。

3.7.3.1 森林資源状況の把握

森林資源状況では航空レーザ計測データであるDCHMから森林解析により材積を算出し、蓄積量の把握や森林計画の立案を行うことができる。森林解析の手法にはエリアベース解析と単木解析に大きく分かれる(表3.7.2)。

エリアベース解析では樹高と材積の相関を利用して、材積を推定する手法である。針葉樹と広葉樹どちらも解析することができ、計測密度1点/m²以上のデータが使用できるため、アーカイブデータを利用することができる等、汎用性がより高い解析手法である。

単木解析は樹冠の凹凸から樹木の樹頂点を抽出する手法であり、樹冠の大きさと胸高直径の相関を利用し、単木の胸高直径を推定し、二変数材積式により材積を算出する。樹冠の凹凸により一本の樹木がわかる必要があるため、対象樹種が針葉樹に限られる。単木を抽出できるため、立木本数や立木密度、疎密度の評価を行うことができる(図3.7.4)。

表 3.7.2 森林解析手法

	エリアベース解析	単木解析
解析単位	メッシュ単位	単木
解析項目	樹高、材積	樹木位置、樹高、胸高直径、材積
対象樹種	針葉樹、広葉樹	針葉樹
計測密度	1 点/ m^2 以上	4 点/ m^2 以上
解析コスト	低い	高い

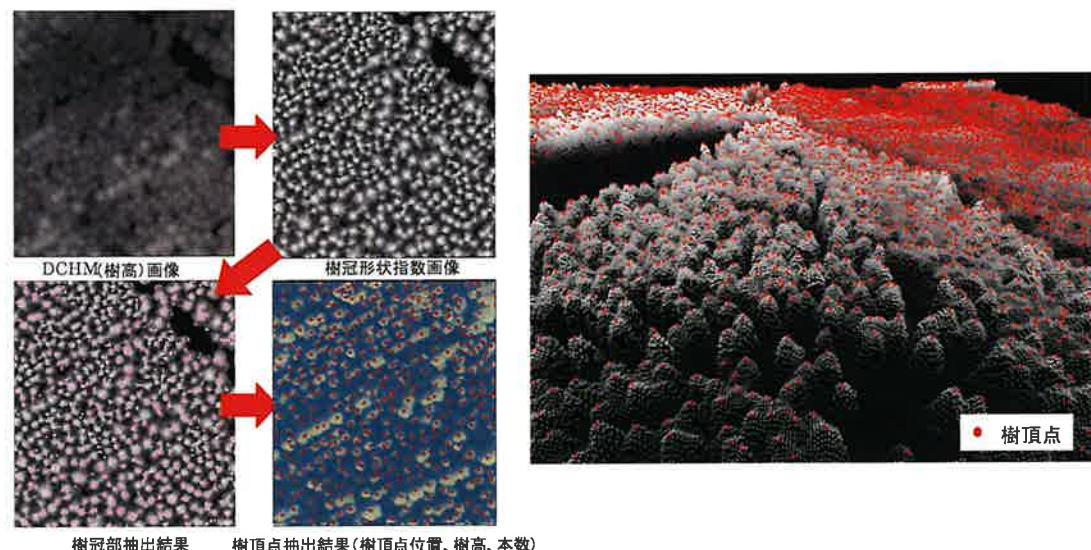


図 3.7.4 単木解析による疎密度の評価イメージ

3.7.3.2 樹木生育状況

樹木生育状況としては収量比数、相対幹距比などの森林情報と樹木の生育する立地環境がある。航空レーザ計測は形状を計測する技術であるため、健全度などを直接的な指標とすることは困難であるが、本数や樹高等などの森林情報を用いて参考となる指標を算出ができる。単木解析であれば収量比数や相対幹距比、形状比、解析方法によって樹冠長率を算出することができ、気象害等への耐性を示すことができる。また、森林情報としては中間パルス^[注 1]を用いた垂直構造分布を解析することにより、林層構造や下層植生などの相対的な比較を行うことができる。

立地環境では傾斜度や尾根谷度による樹木の生育環境を DEM から確認することができる。

3.7.3.3 山地災害被害状況

山地災害被害状況を航空レーザにより確認する方法としては微地形表現図を作成し、被害の状況を調査し、二次被害の想定される箇所を絞りこむことができる。また、災害前の航空レーザ計測データの DEM と災害後の DEM の差分解析を行うことにより、変状のあった箇所を抽出することができるとともに変化を定量的な数値で評価することができる。

3.7.3.4 経年変化

経年変化としては 3.4 での山地災害被害の差分解析がある。樹冠表層の高さの経年の変化を差分解析することにより生長量の把握や間伐箇所の把握を行うことができる。経年変化を抽出するためには二時期の計測データが必要である。

3.7.3.5 森林境界管理

森林境界管理はこれまで現地に標識を設置したり、特徴のある樹木を境界木としたりすることによって所有界を決めていた。近年では境界を測量した結果等をGISにより管理できるようになった。GISは航空レーザ計測データとの親和性が高く、境界情報と地形情報と森林情報を比較することができる。

また、境界情報が不明確、未確定である地域では航空レーザ計測データから微地形表現図や林相識別図を作成することにより、尾根谷や林道での境界や樹種や樹冠の大きさ、境界木といった境界情報を読み取ることができ、境界の根拠資料として合意形成を図りやすくなる（図3.7.5）。

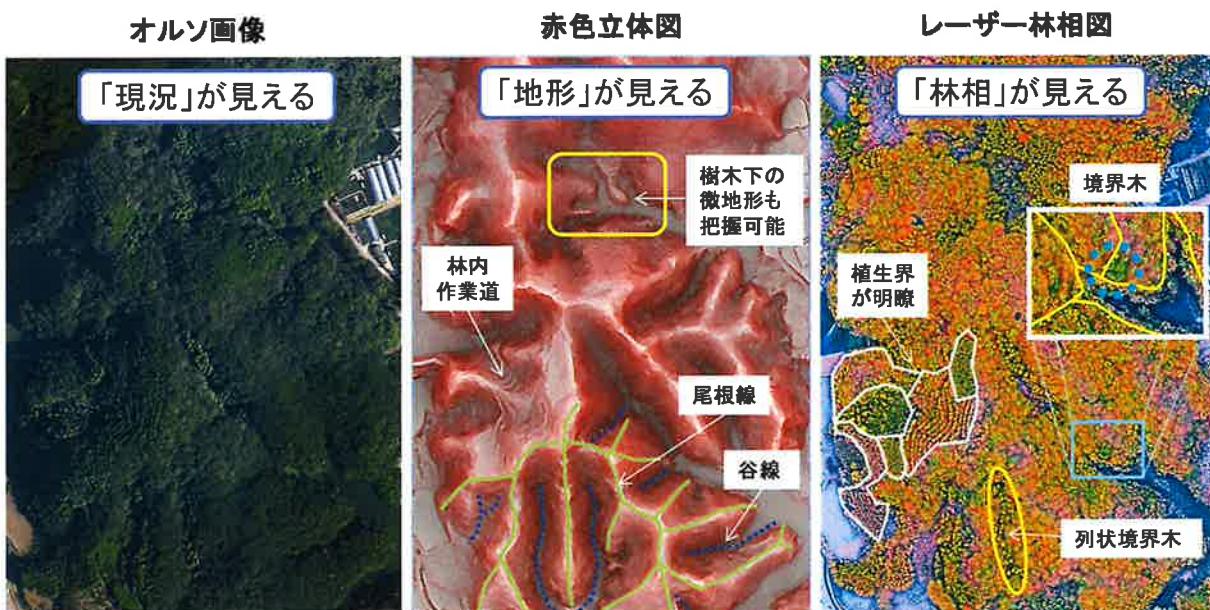


図3.7.5 森林境界管理

第4項 航空レーザ計測の今後

航空レーザ計測は航空写真計測と比較するとコストが高く、アーカイブデータが少ないため利用が限られている。航空レーザ計測は森林資源状況の把握、樹木生育状況、山地災害被害状況、経年変化、森林境界管理と幅広い分野での利用が考えられる。そのため、航空レーザ計測を行う場合には広い分野・立場での利用を想定した計画が必要である。

注釈

【注1】図3.7.1に示すファーストパルス、ラストパルス以外の中間層で反射したレーザのデータのこと。中間パルスが多ければ複層林である。

参考文献

加藤正人, 2014, 森林リモートセンシング 第4版－基礎から応用まで－, 日本林業調査協会, 東京.

齋藤和也, 2008, 図解 航空レーザ計測 基礎から応用まで, 日本測量調査技術協会, 東京.

著者：

アジア航測

大野勝正・北林拓

第8節 人工衛星を用いた森林調査

- ①目的または適応分野：害虫被害木把握、地すべり把握、土地被覆分類、樹木生育状況把握；
- ②プラットフォーム：人工衛星；
- ③キーワード：光学センサ、マイクロ波センサ

第1項 人工衛星を用いた森林調査方法のレビュー

我が国の人工衛星リモートセンシング利用の研究は、1972年5月に打ち上げられたERTS 1号（LANDSAT 1号）のデータ入手と同時に着手された。ただし、農林水産省林業試験場は同時期の1973年中に、ほぼ日本全国の1/1,000,000から1/400,000の赤外カラーおよび類似天然色のカラー合成画像を完成し、さらに森林・草地・耕地・都市・裸地・水部を色分けした地表判別カラー像のアナログ処理による作成方法を明らかにしている（中島 1979）。このように、すでに我が国では詳細な国土基盤情報が整備されていたことと、細分化された複雑な土地利用であることも相まって、長く人工衛星は地上調査や空中写真に代わるものとならなかった。しかし、1999年に世界初の商用高解像度人工衛星 IKONOS（直下視の解像度82 cm）が打ち上げられてから人工衛星の高解像度化は進み、最新のWorldView-3およびWorldView-4は、30 cmという空中写真に迫る高い解像度を保有し、森林調査分野でも利用されつつある。

3.8.1.1 人工衛星観測の特徴

空中写真に対する人工衛星の主な特徴は、広域同時性、広域均質性、多波長性、そして経済性に代表される。

3.8.1.1.1 広域同時性

広域同時性は、空中写真であれば全域を観測するのに数日かかるような面積でも、人工衛星であれば、ほぼ同時に観測できることを示している。これは、季節変化の影響を受けやすい森林を広域に観測する際に有利である。

3.8.1.1.2 広域均質性

広域均質性は、広い範囲を同じセンサで観測することができる事を示している。それに加えて、空中写真では飛行コース間で観測角等の違いが生じるが、人工衛星ではそのような違いが生じにくい。

3.8.1.1.3 多波長性

多波長性は、人間の眼では捉えられない情報を知ることができることを示している。空中写真も可視域よりも長い波長帯である近赤外線の反射光を観測できるが、人工衛星は、さらに長い波長帯の遠赤外やマイクロ波を観測することができる事が特徴である。

3.8.1.1.4 経済性

人工衛星観測にかかるコストは、一般的に空中写真よりも低く、経済性において優位であるといえる。代表的な人工衛星画像データのアーカイブ（既に撮像された画像ライブラリ）販売価格を表3.8.1に、新規撮像価格を表3.8.2に示す。

リモートセンシングで用いられる人工衛星のセンサは、観測する波長帯によって光学センサとマイクロ波センサに分類することができる。本稿は、可視から近赤外の反射光を画像として観測するものとして、光学センサを解説する。また、マイクロ波センサには、人工衛星から地表面に照射した電磁波の反射を観測するもの（能動型）と、地表面から放射される電磁波を観測するもの（受動型）がある。後者の代表はマイクロ波放射計だが、その解像度は数キロメートルであるため森林調

査で活用される機会は少ない。そこで本稿は、マイクロ波センサの代表として能動型の SAR について解説するものとする。

3.8.1.2 事業計画策定における留意事項

例えば、長野県全域の森林（約 106 万 ha）を例に、表 3.8.1 中の面積単価の最も安い SPOT6/7 衛星のアーカイブ画像（1.5m 解像度の 4 バンドオルソ画像）を購入した場合の価格を推定すると、約 600 万円となる。ここで、表 3.8.1 および表 3.8.2 に示すように、同じ人工衛星でも、解像度や撮像期間などの条件によって画像データ価格が異なっている。したがって、人工衛星による森林調査を初めて計画する際には、調査概要（対象物が樹木なのか地形変動なのか？モニタリングなのか、災害時の緊急撮像なのか？）を整理したうえで、適切な人工衛星画像データの購入に関して、販売代理店に相談することが望ましい。

先に述べたように、我が国はすでに地上調査や空中写真によって詳細な国土基盤情報が整備されている。しかし、同じ手段によって既存資料を改修しつづけることは、経費や労力の面を鑑みても困難である。今後は、国土基盤情報が要求する精度や更新頻度などの条件に応じて、低コストの人工衛星を併用することが望ましいといえる。次項以降において、光学センサと衛星 SAR のそれによる森林調査の概要について述べるものとする。

表 3.8.1 人工衛星画像データのアーカイブ販売価格。光学センサデータの価格は 1 km²当たり、SAR データの価格は 1 シーン当たりを表す。

人工衛星／打ち上げ機関	解像度 (m)	価格 (円)	最小購入面積 (km ²)	備考
光学衛星	WorldView /Digital Globe	0.3	9,000～17,500	25 国内撮像分、オルソ 4 バンド画像
		0.4	7,700～9,700	25 同上
		0.5	6,000～7,500	25 同上
		0.6	5,500	25 同上
		0.8	4,500	25 同上
	Pleiades/AIRBUS	0.5	2,400	25 オルソ 4 バンド画像
	SPOT/AIRBUS	1.5	560	100 同上
	RapidEye/Planet Lab	5.0	260～280	500～1200 オルソ 5 バンド画像
	ALOS-2/JAXA	3.0×1.0～44.2×56.7	80,000 25 km×25 km～489.5 km×355 km	シーン単位販売
	TerraSAR-X・TanDEM-X /DLR・Infoterra	0.25	550,000～1,100,000 4 km×3.7 km	同上
		1.0	475,000～950,000 10 km×5 km	同上
		2.0	340,000～680,000 10 km×10 km	同上
		3.0	240,000～480,000 30 km×50 km	同上
		1.0	1,050,000 18 km×8 km	同上
SAR衛星	RADARSAT-2	3.0	970,000 50 km×50 km	同上
		5.0	930,000 125 km×125 km	同上
		8.0	930,000 90 km×90 km	同上

表 3.8.2 人工衛星画像データの新規撮像価格。光学センサデータの価格は 1 km²当たり、SAR データの価格は 1 シーン当たりを表す。

人工衛星／打ち上げ機関	解像度 (m)	価格 (円)	最小撮像面積 (km ²)	備考
光学衛星	WorldView /Digital Globe	0.3	17,500～25,500	100 国内撮像分、オルゾ 4 バンド画像
		0.4	9,700～15,000	100 同上
		0.5	7,500～11,000	100 同上
	Pleiades/AIRBUS	0.5	3,000～6,000	100 指定期間内に撮像、オルゾ 4 バンド画像
	SPOT/AIRBUS	1.5	680～2,040	500 オルゾ 4 バンド画像
	RapidEye/Planet Lab	5.0	260～280	3500 オルゾ 5 バンド画像
	ALOS-2/JAXA	3.0×1.0～44.2×56.7	230,000	25 km×25 km～489.5 km×355 km シーン単位販売
	TerraSAR-X・TanDEM-X /DLR・Infoterra	1.0	950,000	10 km×5 km 同上
		2.0	680,000	10 km×10 km 同上
		3.0	480,000	30 km×50 km 同上
SAR衛星	RADARSAT-2	1.0	1,066,000～1,500,000	18 km×8 km 同上
		3.0	986,000～1,420,000	50 km×50 km 同上
		5.0	946,000～1,380,000	125 km×125 km 同上
		8.0	946,000～1,380,000	90 km×90 km 同上

第2項 光学センサ

光学センサは、可視から近赤外の反射光を画像として観測するものであり、画像の色調やテクスチャの違いをキーにした画像分類や、樹冠高等のステレオ観測に利用される。

3.8.2.1 画像利用

画像分類によって取得できる情報には、スギ・ヒノキなどの主要樹種の分類、土地被覆分類、そして害虫被害木把握などがある。画像分類には最尤法といった統計手法が用いられてきたが、分類精度を確保するために、実務ではあえて目視判読を採用することがある。これは、観測時の太陽・大気条件によって画素値が変動し、このような変動を補正しないままに数値的な分析をすると、過度に誤分類の問題が生じるためである。光学センサ画像の画素値を変化させる要因と、それに対する留意事項を以下に示す。

3.8.2.2 写真測量

光学センサ画像の高解像度化に伴い、ステレオ観測に関しても空中写真と同等の精度を得ることができるようになりつつある。例えば、仏国 AIRBUS の Pleiades 衛星画像データによる標定精度は地図情報レベル 2500（等高線の図化精度は地図情報レベル 25000）を満たしていることが確認されている（藤原ら 2014）。ここで、空中写真による写真測量と同様に、樹冠や建物を含む DSM 計測に用いられることに留意する必要がある。

空中写真測量は、複数の写真で観測された対応点に関して共線条件を適用し、複数のカメラの位置と姿勢、および対応点の三次元位置を観測するものである。ここで用いられるバンドル調整は、投影中心と対応点の三次元位置を結ぶ直線を投影中心において束にすることにより、以下に示す三

要素を数式にした幾何モデルを調整し、出力するものである。

- ①外部標定要素：各写真の撮影した位置と姿勢；
- ②内部標定要素：センサの画面距離、素子サイズ、そして画像歪み；
- ③XYZ：対応点の三次元位置座標

光学センサの幾何モデルは、これらの三要素をひとつの行列式で近似した RPC (Rational Polynomial Coefficients : 有理多項式係数) として画像データごとに提供される。RPC を使えば衛星画像上の対応点の位置から三次元位置座標を推定することができる。バンドル調整を用いた空中写真測量には劣るものの、RPC を用いることによって写真測量やオルソ幾何補正を簡単にを行うことができるところから、空中写真測量（高精度）と光学センサ（低コスト、広域）が相互に補完利用されるようになるだろう。

3.8.2.3 光学センサ利用における留意点

人工衛星の光学センサは、空中写真測量に用いられるデジタルカメラと同様の原理で画像をしゅとくする。したがって、画像利用においてはデジタルカメラと同様に、撮像時の各種条件に留意する必要がある。

3.8.2.3.1 太陽エネルギー

太陽から射出されるエネルギー（大気上端における下向き太陽光）は、ほぼ一定とみなしてよいが、地表面に入射する量は、空間的にも時間的にも変動している。その要因は、天文的要素と気象的要素に分けられ、前者は、その地点の緯度、その時の時刻が定まれば計算によって得られる。これに対し、気象的要素、すなわち、大気内での大気諸成分との相互作用は、大気物質の性質や量などの状態に左右されるので、これを知らない限り求まらない（柴田・内嶋 1987）。太陽エネルギー変動の影響を補正した画像は商用光学衛星の販売代理店の一般的なサービスとして購入することができる。

3.8.2.3.2 大気諸成分

大気上端に入射した太陽光は、大気物質による散乱と吸収の効果を受け、地表面に到達するまでに光の強さが変化する。地表面によって反射された光は上向きに反射され、一部は再び宇宙空間に届き、画像として光学センサで観測される。このように、地球大気に入射して光学センサに届くまで、光の強さは大気中の物質によって散乱および吸収の効果を受ける（柴田・内嶋 1987）。観測地域にかすみや薄雲がかかり、コントラストが低く、不鮮明な画質となっている光学センサの画像はこれらの影響である。一般的なリモートセンシングソフトウェアには、大気物質による散乱と吸収の影響を補正する機能を持っているものもあるが、その過程は非常に複雑なため、その補正にあたっては画像処理を専門とする機関や有識者に相談されることが望ましい。

3.8.2.3.3 斜面方位と傾斜角

斜面が受け全日照射量は、その斜面が受け直達日射量、その斜面が受け散乱日射量、そして周辺の斜面が受け全日照射量のうち、反射してその斜面に入射する量の総和となる。これは直達日射量、散乱日射量、そして太陽と斜面のなす角度によって計算することができる。さらに、その斜面によって反射される光の強さは、斜面と人工衛星のなす角度を考慮することによって計算することができる。このほか、地形の凹凸によって生じる影も、光学センサ画像利用における問題となる。光学センサの画像における斜面方位と傾斜角の影響は、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル等の DEM を用いることによって補正することができるが、その補正にあたっては大気諸成分と同様に画像処理を専門とする機関や有識者に相談されることが望ましい。

3.8.2.3.4 ミクセル

ひとつの画素のなかに複数の地物が混合していることを示し、森林の場合は樹冠、樹冠によって生成される影、そして草地などが混在することが多い。解像度が低いためにミクセルが生じるのは避けられないため、できる限り高解像度の光学センサ画像を用いることによりミクセルを避けることが直接的な解決方法である。そのほか、樹種分類であれば対象とする樹種の凡例を光学センサ画像から特定可能な樹種に一致させる調整をすることも必要である。例えば、スギとヒノキの違いは高解像度画像では樹冠形状や色調の違いとして認識することができるが、中解像度画像では樹冠と影がひとつの画素に混在していることから、スギとヒノキの違いが明瞭ではない。このような場合には、スギとヒノキをひとつのカテゴリ（針葉樹または人工林）に統合するなど、凡例の仕様を変える工夫が必要である。

第3項 衛星 SAR

衛星のレーダーセンサは人工衛星から地表面に向かって電磁波を照射し、地表面によって反射されて人工衛星に戻ってきた反射電磁波の反射強度を観測するものである。ここで、人工衛星と反対方向に電磁波が反射されることを前方散乱といい、人工衛星方向に電磁波が反射されることを後方散乱という。反射強度は後方散乱画像として観測され、電磁波の波長に対してアンテナサイズが相対的に大きくなるほど後方散乱画像の解像度は高くなる。レーダーセンサのなかでも衛星 SAR は、実効的に大きなサイズのアレーアンテナとして働くように、人工衛星の各時刻での飛行位置をもとに工夫したセンサであり、比較的小さいサイズのアンテナを用いながらも高解像度の後方散乱画像を観測することができる。本稿ではマイクロ波センサとして衛星 SAR について解説するものとする。

3.8.3.1 後方散乱画像

後方散乱画像の画素値の大きさは反射強度を示しており、人工衛星の方向に向かう地形と地表物の散乱特性に関係する。散乱特性は、電磁波の波長、偏波および入射角といった入射電磁波の条件と、対象物の表面近くの誘電率と幾何学的条件に左右される。図 3.8.1 に示すように、電磁波とは電界と磁界が相互に作用しながら空間を伝播する波である。電磁波は光と同じ速度で進み、隣り合う山と山の間または隣り合う谷と谷の間の長さを波長、山と谷の大きさを強度、そして山と谷のピーク位置を位相という。一般に森林観測には長い波長が適しているとされ、L バンドという長い波長帯を持っている ALOS-2 衛星が森林地域のモニタリングに良く使われている。そして、電界は面に沿って振動するが、振動面が鉛直方向にあれば鉛直偏波、振動面が水平方向にあれば水平偏波といい、SAR は入射電磁波と反射電磁波のそれについて、鉛直偏波と水平偏波を照射・観測することができる。また、誘電率とは外部から電界を与えたときに物質中の原子や分子がどのように応答するかを示す数値であり、各物質は固有の誘電率を持っている。

誘電率と幾何学条件は散乱特性に影響し、例えば平坦な土壌面からの反射電磁波は土壌水分量が多くなるほど（誘電率が大きくなるほど）前方散乱しやすくなるが、土壌面の凹凸が大きくなると後方散乱しやすくなる（図 3.8.2）。さらに農作物などの植生が覆っている地表面を

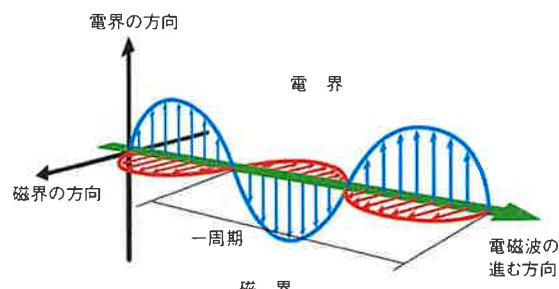


図 3.8.1 電界と磁界
(文部科学省 2018)

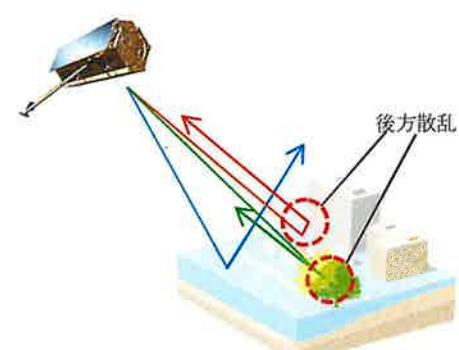


図 3.8.2 レーダーセンサによる
反射電磁波の観測

考えると、短い波長で観測すると植生自体の後方散乱が大きくなるが、長い波長で観測すると、植生は地表面からの後方散乱を減衰させる。

1988 年にミシガン州立大学によって開発された MIMICS (MIchigan MIcrowave Canopy Scattering models)は、森林の後方散乱特性を理解し、後方散乱画像から森林情報を観測することを目的として開発された放射伝達モデルである(Ulaby *et al.* 1988)。ここで放射伝達モデルは、大気中の電磁波の放射・吸収・散乱過程を数式によって表したものである。しかし、先に述べたような単純化された地表面と植生の散乱特性は理解しやすいが、実際の森林では幹や枝の大きさ、立木位置、葉の量や傾き分布など、さらに多くの要素が散乱特性に関係する。したがって、後方散乱画像をもとに森林資源量を定量的に把握する手法は、いまだ確立されているとは言い難い。

3.8.3.2 干渉 SAR 解析

図 3.8.1 に示した通り、電磁気学の基本知識に立ち返ると、電磁波は振動しながら空中を伝わる電磁界のことであり、強度と位相の二つの特性で表される。位相は時間に関係する情報であり、空中を伝わる電磁波の速度が一定であれば、位相によって人工衛星－地表間の距離に関連する情報を知ることができる。干渉 SAR 解析は、電磁波の位相のズレをもとに地形変化量を観測するものである。図 3.8.3 にしめすように、人工衛星と地表面間の距離が変化すると、地表面によって反射されて人工衛星で受信される電磁波のピーク位置(位相)が地表面の位置の変化量分に応じて変化する。干渉 SAR 解析は、位相のズレを面的に把握することによる地形変動を面的に把握するものであり、探知できる変化量の大きさは数ミリから数センチである。干渉 SAR 解析は埋立地の沈下やトンネル工事における地山変動のほか、山地の地すべり現象を広域に把握する手法として注目されている。

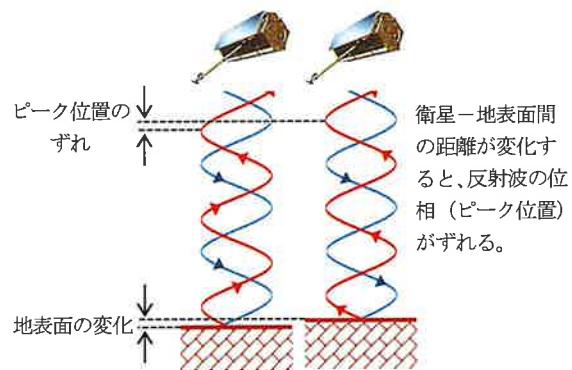


図 3.8.3 干渉 SAR 解析の原理

3.8.3.3 衛星 SAR 利用における留意点

後方散乱画像は光学センサの画像とは異なり、反射電磁波の強さを表す白黒の画像である。人間の眼で見た地表面とは印象が異なることから、その解釈が難しく、地表面の状態を直感的に理解することが難しい。一方で観測に太陽光を必要とせず、雲を通して観測できることから観測機会が多くなり、安定的に観測することができるという特徴がある。衛星 SAR 利用における留意点を以下に示す。

3.8.3.3.1 散乱特性の理解

後方散乱画像によって対象物の状態を理解するためには、対象物ごとの散乱特性を理解しておく必要がある。散乱特性は、電磁波の波長、偏波および入射角といった入射電磁波の条件と、対象物の表面近くの誘電率と幾何学的条件に左右されることから、簡単なルールを作ることが難しい。そこで、時期の異なる後方散乱画像の差を抽出し、それによって対象物の変化を把握することが一般的である。そのため森林地域では、大規模な崩壊などによって斜面の散乱特性が変化した状況を判読し、崩壊地を特定することなどに用いられている。

3.8.3.3.2 レーダシャドウ

衛星 SAR は人工衛星の進行方向に対して、真横斜め下方向に向けて電磁波を発射するが、電磁波の入射角よりも勾配が急な山地においては、電磁波が稜線に遮蔽され、稜線の裏側の斜面や谷が

影となって観測できないことがある。山地の後方散乱画像にはレーダーシャドウによる判読不能な斜面が生じる可能性があり、複数方位・入射角による観測でも回避できない場合がある。

3.8.3.3.3 レイオーバ

衛星と対象物の距離が短くなるほど、電磁波の受信タイミングが早くなる。例えば、衛星に対して手前の位置にある谷部と奥に位置する稜線を例にしたとき、谷部と稜線の標高差によっては衛星からの直線距離が逆転する場合がある。このとき衛星によって受信される電磁波のタイミングが水平位置の関係と逆転し、後方散乱画像では白く潰れたような画素を示す。このような現象をレイオーバという。これについても、レーダーシャドウと同様に回避できない場合がある。

3.8.3.3.4 干渉 SAR 解析のためのペア画像選択

干渉 SAR 解析のなかでも、二回の観測の間に生じた地表変位量を推定する差分干渉 SAR は、地震などの広域な地殻変動の抽出において有効な手法として広く活用されてきているが、地すべりや埋立地の地盤沈下などの比較的狭い範囲の斜面変動の抽出への利用も期待されている（林野庁近畿中国森林管理局 2018）。差分干渉 SAR 解析による地表変位量を精度良く行うためには、変化前後のペア画像を適切に選択し、地表変位量に起因する位相差のみに着目して解析できるように条件を整えること、いわゆる干渉性を高めることが必要である。解析条件として考慮すべきこととして、ペア画像の撮像日が離れておらず、季節が近いことがあげられる。これは、撮像日が離れていることにより、抽出すべき地表変位以外の変化要因が増えることが、干渉性を下げるためである。特に、森林のように季節変化を示す対象地について注意が必要である。次に、ペア画像の軌道間距離が近いことがあげられる。これは電磁波の位相差のみが干渉処理で重要であるのに対し、入射角が大きくなることによる対象物の散乱特性変化が干渉処理に悪い影響を及ぼすためである。

引用文献

- 藤原博行・瀧繁幸・大塚力・大野裕幸, 2014, Pleiades 画像を用いて作成した地図情報の精度評価,
<http://www.gsi.go.jp/common/000092768.pdf> (2018年5月1日アクセス)
- 文部科学省, 2018, 高校生のための放射線副読本. http://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afieldfile/2013/09/09/1339122_3.pdf (2018年5月29日アクセス)
- 中島巖, 1979, リモートセンシング－林業的利用の基礎知識－, 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁近畿中国森林管理局, 2018, 山地災害に関する地盤変動の監視・観測に向けた干渉 SAR 解析業務報告書, 大阪.
- 柴田和雄・内嶋善兵衛編, 1987, 太陽エネルギーの分布と測定, 東京.
- Ulaby, F. T., McDonald, K., Sarabandi, K., and Dobson, M. C., 1988, Michigan microwave canopy scattering models (MIMICS), *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, UK.

著者：

パスコ

洲濱智幸

第4章 応用編：森林調査の事例

第1節 森林資源状況の把握

①目的または適応分野：森林資源状況の把握、樹木生育状況、森林境界管理；

②プラットフォーム：航空機（固定翼、回転翼）；

③キーワード：レーザプロファイラ

第1項 樹頂点抽出手法と航空レーザ計測密度

単木レベルでの森林資源情報把握にはDCHMを用いて機械的処理により樹頂点を抽出することが一般的である。樹頂点の抽出には任意のウィンドウサイズ（例えば、 3×3 や 5×5 ウィンドウサイズ）をDCHMに適用し、ウィンドウサイズ内で中央値が最も高い値である場合に樹頂点として抽出する局所最大値フィルタ法（Hyyppä 2001など）やDCHMの代わりに樹冠の凹凸を角度で表現し、角度情報から樹冠部として樹木の本数を抽出した後に樹頂点の位置を抽出する手法（大野ほか 2008）などがあるが、いずれの方法であっても樹冠高データであるDCHM（Digital Canopy Height Model）がベースとなって樹頂点を抽出している。このため、作成するDCHMの解像度（グリッド間隔）が低い場合は樹冠の高い箇所が認識しづらくなり、抽出できる樹木本数が減少する（図4.1.1）。高精度に単木資源情報を把握するためには、DCHMの解像度を規定する航空レーザの計測密度が重要になると考えられる。

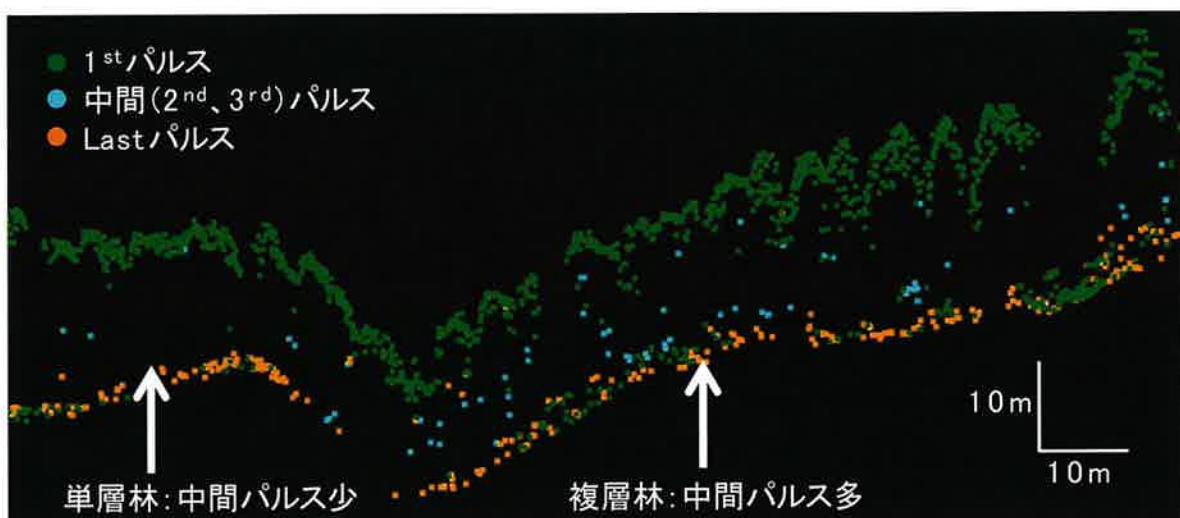


図 4.1.1 航空レーザ計測の地上反射点の分布状況。レーザの計測密度により樹冠の凹凸が認識しづらくなる。断面図の計測密度は 4 点/ m^2 である。

航空レーザの計測密度 4 点/ m^2 （グリッド間隔 0.5 m）のデータを用いた樹頂点抽出の結果を現地調査結果と比較した事例では、スギ、ヒノキとともに 2,000 本/ha 程度の立木密度でも十分な精度で抽出することができている。また、縄村ほか(2007)は航空レーザ計測の密度を変え、樹頂点抽出を行ったときの抽出精度を比較し、立木密度 1,600 本/ha までの林分であれば、計測密度 2 点/ m^2 以下になると抽出精度が大幅に下がることを明らかにした。このような事例から、航空レーザから単木情報を取得する場合、航空レーザの計測密度は 4 点/ m^2 以上であることが重要であると考えられる。

第2項 胸高直径の推定

航空レーザ計測データを解析して得られる森林資源情報を現地調査の代替として利用するためには、樹木位置や樹高だけでなく、胸高直径も把握する必要がある。しかしながら、胸高直径は航

空機など上空からの測量では計測することは困難であることから、過去空中写真など上空から得られる情報を活用して推定する手法が森林航測では行われてきた（中島 1973）。このような手法は胸高直径と樹冠の大きさとの相関を利用していることから、上空からの情報を利用した胸高直径推定の可能性を示唆している。航空レーザ計測では単木レベルの樹高だけでなく、樹冠投影面積や樹冠表面積といった樹冠の大きさに関する情報も取得できることから、航空レーザ計測による胸高直径推定も可能と考えられる。

胸高直径の推定は図 4.1.2 に示す樹高、樹冠長、樹冠長率、樹冠投影面積、樹冠表面積と樹冠体積の 6 つのパラメータを組み合わせ、現地調査との重回帰分析により回帰式を求める。

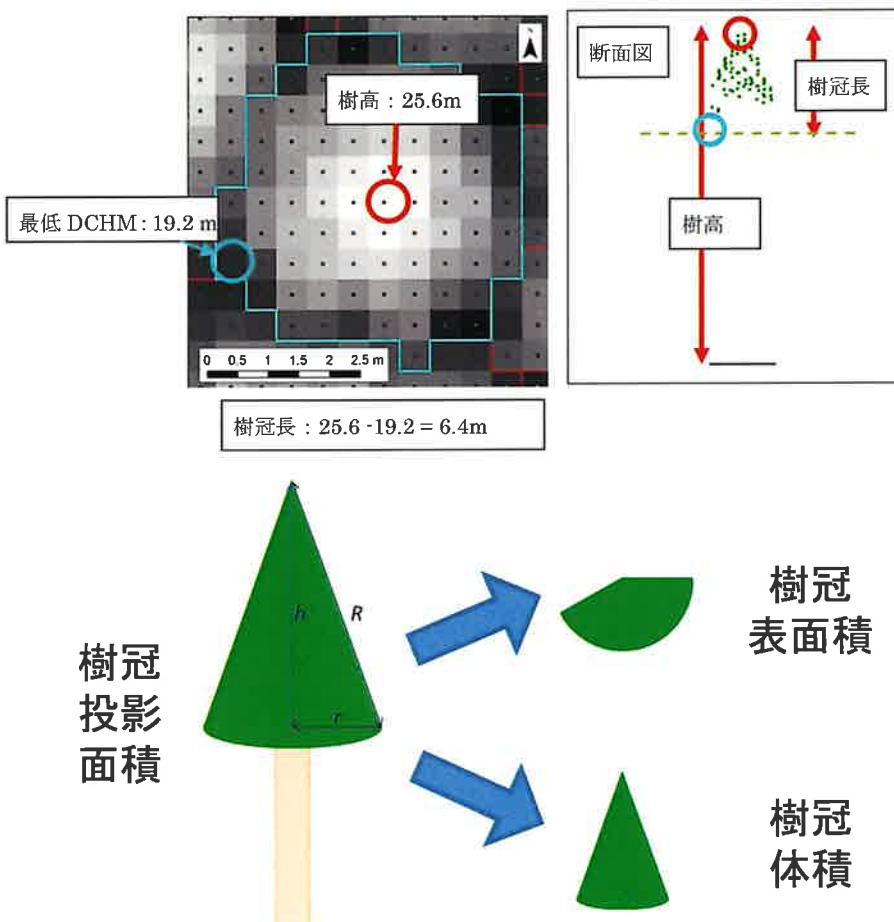


図 4.1.2 航空レーザ解析で得られる胸高直径推定のためのパラメータ

重回帰分析では全てのパラメータを使用するのではなく、樹冠長と樹冠長率など要素の重複を避けて 1~3 つのパラメータの組み合わせを用いている。この重回帰分析の結果、樹冠投影面積と樹高もしくは樹冠投影面積、樹高、樹冠長率の組み合わせにより約 2 cm 程度で胸高直径推定が可能であることが示されている（大野 2016）。この事例では北海道から九州まで、スギ、ヒノキ、カラマツ、アカマツといった主要な人工林樹種を対象としており、航空レーザ計測による胸高直径推定が広く使用できる手法であることが分かる。また、佐賀県の民有林 64,000 ha を対象にスギ、ヒノキの胸高直径推定を行った事例（Oono and Tsuyuki 2018）では、64,000 ha という広域を対象に解析したにも関わらず、樹種毎に 1 つの回帰式で約 2.5 cm の RMSE で胸高直径推定できることが示されている。

空中写真を用いて森林資源量の把握を森林航測では行っており、上述したような近年の研究事例を踏まえ、航空レーザ計測による胸高直径推定は広域かつ多様な樹種に適用できる手法である可能性が高いと考えられる。国内では材積式のように地域にあった一般式が整備されてきたことか

ら、胸高直径推定に関しても現地調査と航空レーザ解析との重回帰分析の事例を増やし、一般化した回帰式を整備していくことで、現地調査を実施せずに胸高直径推定が可能になると考えられる。近年ではドローン空撮から SfM ソフトを利用して DSM を作成することが可能であり、写真から樹高や樹冠の大きさの把握が可能となっている。整備する回帰式は航空レーザ計測だけでなく、ドローン空撮の DSM にても適用できることから、将来的な現地調査の省力化にも大きく貢献すると考えられる。

第3項 森林資源把握結果の留意点

航空レーザ解析により単木レベルの資源量が把握できるようになり、現地調査の代替として利用できる可能性があるが、情報の活用にあたり、以下の点に留意することが重要である。

- ・被圧木の識別は困難
- ・曲がり、品等などの質の把握は困難
- ・樹高や材積は過少に計測される傾向がある
- ・収量比数は相対的に比較する

航空レーザ計測は上空から地上を計測しているため、上層を形成する樹冠で多くのレーザが反射するため、樹冠内の情報を詳細に取得することが困難である。航空レーザ解析で取得できる単木情報は上層を形成する樹木の本数であり、亜高木や低木などの被圧木の本数までは識別することはできず、推定する手法が検討されている。本数調整伐を行う場合には上記のことを念頭に施業計画を行う必要がある。

胸高直径推定や材積といった量的な計測は可能ではあるが、曲がりや品等など質的な情報の取得は困難であることから、素材生産のためには現地調査などをを行い、質的な情報の取得が必要となる。なお、近年では地上レーザが活用されるようになり、曲がりや矢高などの計測が可能となっている（図 4.1.3）。しかしながら、林内計測であることから GNSS の精度が不十分であり、GIS に搭載するなど絶対座標が必要な場合には使用に注意が必要である。

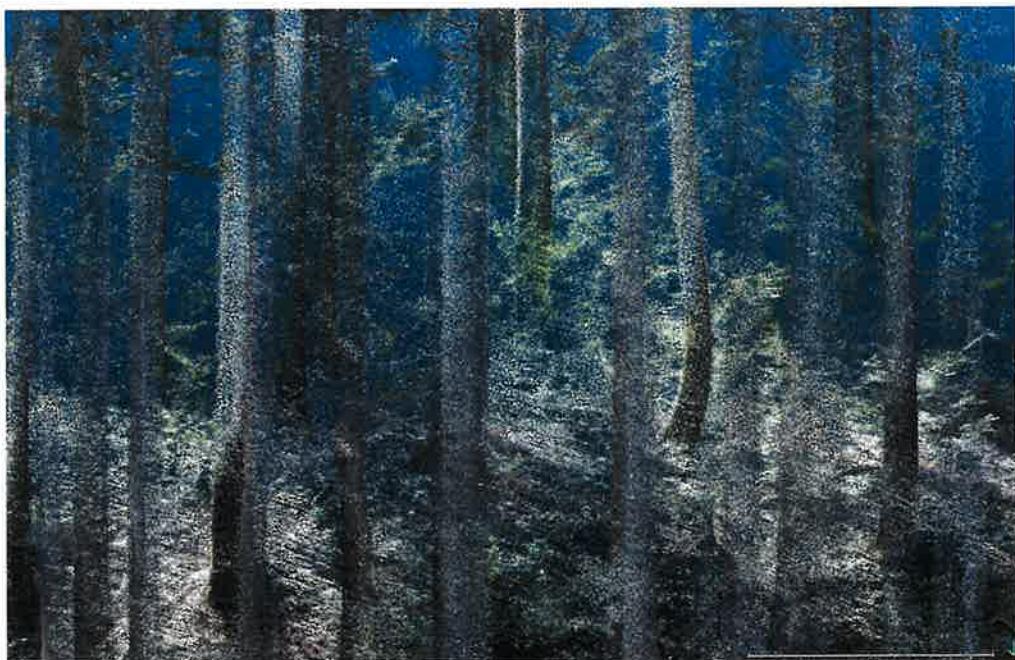


図 4.1.3 地上レーザによる計測事例

航空レーザ計測のレーザパルスが樹頂点から反射せずに樹頂点付近のやや低い箇所からレーザが反射することがあるため、樹高は 1 m 程度過少に計測される傾向がある。また、樹高が過少傾向

であることから、材積の計算結果も過少になる傾向がある。樹高や材積の情報を活用する場合、このような点に留意することが必要である。

単木情報は収量比数の計算に使用されることがあるが、収量比数は本来立木密度と上層樹高から計算される。航空レーザ解析の立木密度は被圧木を含まないことから、従来の収量比数よりもやや過少となる。このため、収量比数の絶対値ではなく、収量比数を相対的に比較して施業の優先度を評価することが望ましいと考えられる。

このように航空レーザ解析で得られる単木レベルの森林資源量は計測による特性が生じるため、使用目的と特性を考慮して情報を活用していく必要がある。

引用文献

- Hyppä, J., 2001, A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-d tree height models produced by laser scanners, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, pp.969-975.
- 中島巖, 1973, 空中写真利用による森林調査法に関する研究, 林業試験場研究報告, Vol. 251, pp.1-253.
- 繩村達矢・遠藤貴宏・安岡善文, 2007, 研究速報「スギ人工林における LiDAR を用いた樹木抽出の最適観測密度に関する考察」, 生産研究, Vol. 59, No. 3, 71-73.
- 大野勝正・沼田洋一・平野篤, 2008, LiDAR データを用いたスギ・ヒノキ林の単木抽出. 日本写真測量学会秋季学術講演会発表論文集, pp.59-62.
- 大野勝正, 2016, 航空レーザデータを利用した胸高直径推定手法の検討. 日本森林学会大会発表データベース, Vol. 127, p. 61.
- Oono, K., and Tsuyuki, S., 2018, Estimating Individual Tree Diameter and Stem Volume Using Airborne LiDAR in Saga Prefecture, *Japan. Open Journal of Forestry*, Vol. 8, pp.205-228.

著者 :

アジア航測

大野勝正

第2節 造林木の生育状況の把握：人工衛星データによる常緑針葉樹人工林の成長評価

- ①目的または適応分野：人工林、生育状況把握；
- ②プラットフォーム：人工衛星；
- ③キーワード：反射スペクトル、時系列データ、常緑針葉樹、林齡、成長不良、過密林分

第1項 はじめに

造林木は適切に保育されていなければ、雑草木との種間競争に敗れて枯れしていく。また、気温や積雪などが過酷な場合は成長できず、風害や冠雪害によって成長が妨げられることがある。このような成長不良を広域にわたって地上で把握することは困難であることから、リモートセンシングを利用した解析が有効と考えられる。

リモートセンシングを利用するうえで配慮すべき点は以下の通りである。

- 1) 衛星データへの大気と地形の影響 (Kaufman 1989, Smith *et al.* 1980)
- 2) 樹木の成長による反射スペクトルの変化 (栗屋ほか 1996)
- 3) 樹木の反射スペクトルの季節変化 (栗屋ほか 1996, 栗屋・田中 1999)

樹木の成長による反射（明るさ）の変化が十分大きく、成長による変化を明瞭に確認できる季節があり、衛星データへの大気や地形の影響を補正して広域を評価できることが、生育状況を把握できる条件になる。本稿では常緑針葉樹人工林を取り上げ、ランドサット衛星のセマティック・マッパー(TM)のデータを利用して、エゾマツを対象に成長による反射スペクトルの変化パターンを概観し、分類によって生育状況を評価した事例を紹介する。また、TMデータでスギ林と落葉広葉樹林を分類し、地形因子と落葉樹率の関係を明らかにして落葉樹林化のポテンシャルを評価した後、材積推定の結果を併用して施業指針を作成した例を紹介する。

第2項 成長による反射スペクトルの変化に基づく成長評価

常緑針葉樹人工林では植栽後に落葉性の雑草木が繁茂して植栽木の成長を阻害するため、下刈りにより雑草木を除去するが、次第に植栽木が成長して樹冠が閉じる。植栽後から閉鎖までは落葉植生の被度が減少し、これとともに落葉広葉樹（明るい）のスペクトルから常緑針葉樹（暗い）のスペクトルに変化する。成長不良の場合は落葉広葉樹の影響を強く受けたスペクトルとなる。

4.2.2.1 成長による反射スペクトルの変化（栗屋ほか 1996）

以下の事例は北海道苫小牧の平地の国有林を対象にしたもので、大気の影響が一樣で地形の影響を受けない特殊な例になる。同じ林齡の森林の中で可視から短波長赤外の反射の強さ (DN あるいは反射係数) が小さい林分は、順調に植栽木が成長している林分と判断できる。林齡ごとに TM データのデジタルナンバ(DN) の最低値と林齡を比較すると、林齡とともに DN が小さくなって 30 年生以上で安定することが分かる（図 4.2.1）。この関係は指数式で近似できるが季節によってパターンが変化し、解析にどの季節の衛星データを利用するのかによって、結果は変わると予想される。

4.2.2.2 スペクトルの経年変化を利用した成長評価（栗屋 1997）

図 4.2.1 に記された回帰曲線を利用すれば、順調に成長した森林の林齡別の DN を推定できる。林齡毎に推定した DN を基準にして、最短距離法（高木・下田 1991）と呼ばれる分類方法で林齡を推定した（推定林齡）。林齡毎に推定した DN を基準にする方法は、分類の基準エリア（トレーニングエリア）を設定する時に解析者の主観や季節変化の影響が入りにくく、個人差を排除して基準データを設定できる。

分類結果の妥当性を知るために推定林齡を比較した（図 4.2.2）。1985 年の 3 月と 8 月の推定結果の場合、季節の違う TM データの推定林齡でも両者の関係は $Y=X$ の式で表せて同等であることが分かり、季節の違う場合でも比較しうることが分かる。1985 年 8 月と 1993 年 7 月の推定林齡

を比較すると、相関係数は 0.9 と高いものの、回帰式の切片が 12.3 年で TM データの観測年の違
い 8 年（期待値）よりやや大きいが、比較しうる結果が得られた。林齢と DN の関係を表す曲線（図
4.2.1）から明らかなように、高齢林分の場合は成長による毎年のスペクトル変化はごく小さく、経
過年ほど推定林齢が変化することはない。このため高齢林分では 1985 年と 1993 年における推定
林齢の差は、実際の経過年数より小さく、回帰式の傾きが 1 より小さくなつた原因と考えられる。
これは、森林のスペクトル特性から必然的に生じてくる問題であり、リモートセンシングの大きな
課題である。

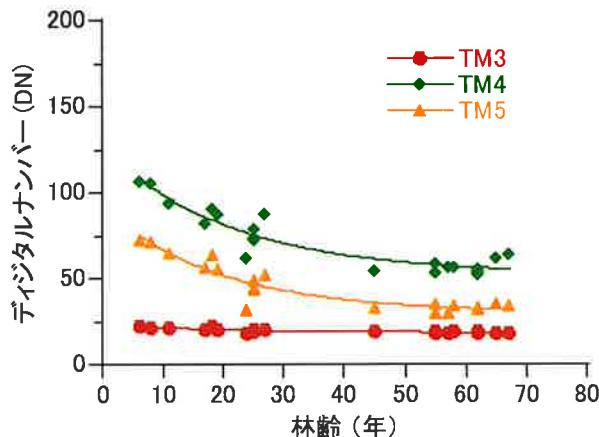


図 4.2.1 成長に伴う反射係数の変化 TM3:赤、TM4:近赤外、TM5:短波長赤外
1985 年 8 月 10 日観測のランドサット TM データ利用

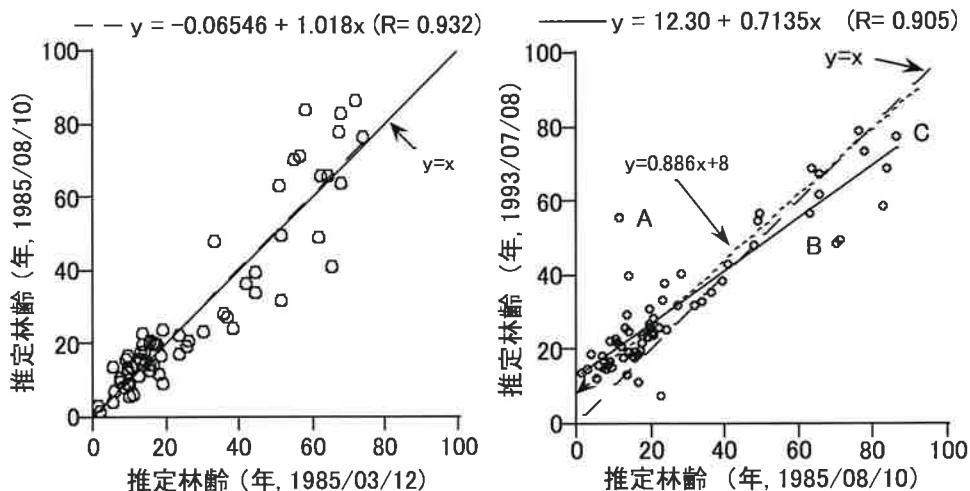


図 4.2.2 TM データで推定した林齢の比較

本稿で紹介した解析法の利点を以下のように要約できる。

- 植栽木が常緑針葉樹の場合は、林齢ごとに画像上で暗く現れる密度の高い林分をトレーニングエリアとして選択できるため、トレーニングエリア選定の個人差が小さい。
- 林齢と DN の関係曲線によってトレーニングエリアの妥当性を客観的に評価できる。
- 季節（衛星データ）ごとの林齢と DN の関係に基づいて衛星データを解析するので、樹木のスペクトルの季節変化の影響をかなり除去できる。

図 4.2.1 の曲線から判断すると、高齢で樹冠が良く閉鎖し、エゾマツの樹冠占有率が大きくて落葉広葉樹の占有率が少ない林ほど、推定林齢が大きいと判断される。エゾマツ壮齢林の樹冠占有率と推定林齢の関係を調べると、エゾマツの樹冠占有率が減って落葉広葉樹の占有率が増すと推定林

齢が減少し、落葉広葉樹が影響していることが分かった。推定林齢と実林齢を比較すると両者の相関は 0.66 でやや低く、推定値がばらつく（図 4.2.3）。空中写真を判読すると、図 4.2.3 で実林齢約 25 年、推定林齢が 40～70 年程度に位置する、回帰直線から上側に遠く離れて分布する林分は、間伐の必要な過密なエゾマツ林と考えられる。一方、50～70 年生付近で回帰直線から下側に遠く離れて分布する林分は、落葉広葉樹の樹冠占有率の高い林である。伐採地あるいは伐採後時間の経った未立木地などの推定林齢も非常に小さい。このように、推定林齢と実林齢を比べると、落葉広葉樹の混交率の違いによるエゾマツ林の林況の概要を把握できる。

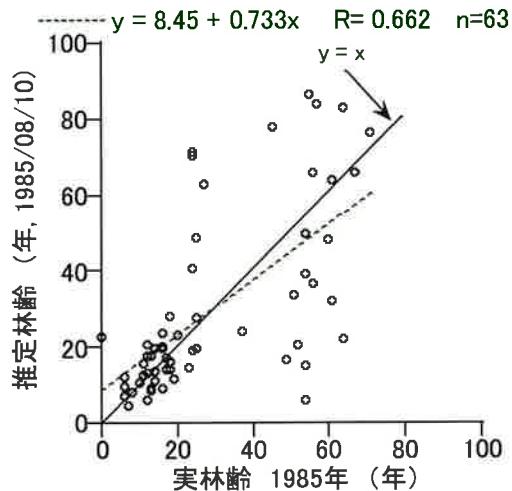


図 4.2.3 TM データで推定した林齢と実林齢の比較

4.2.2.3 推定林齢の分布図（栗屋 1998）

推定林齢の分布図（図 4.2.4）では、高齢林分は a) 夏のデータのほうが推定林齢が大きく出る（赤い部分）部分と、b) 逆に推定林齢が小さく出る部分がある。

空中写真の判読と林況の概況踏査に基づくと、a) はエゾマツの樹冠占有率の高い林分が該当している。逆に b) は落葉広葉樹が混交してエゾマツの樹冠占有率の低い林分が該当している。推定林齢は植生の季節変化の影響をかなり排除した指標であるが、残念ながら冬と夏のデータから得られた値に差が生じる。冬には密度の高い林分でも下層の雪の影響で林齢が小さめに推定されるが、夏には下層植生の影響が小さいので大きめに推定される（栗屋 1998）。この特徴を利用すると、夏と冬の推定林齢から過密林分と成長不良林分の分布を把握できる。

4.2.2.4 推定林齢による成長状況の判定（栗屋 1998）

図 4.2.2 左のように 1985 年 3 月と 8 月の推定林齢を比較した場合、直線 $Y=X$ の上下にばらつきが生じ、若齡林で小さく壮齡林で大きい傾向がある。両者の差画像を作成すると、エゾマツの樹冠占有率の違いを面的に把握できる。図 4.2.5 左は 1985 年 8 月の推定林齢から 1985 年 3 月の推定林齢を引いた結果で、エゾマツの樹冠占有率の高い林分が正（赤）、低い林分が負（青）で現れた。赤く現れた林分の幾つかについて、間伐が行われていたことを確認しており、この画像から、除伐や間伐の必要な林分を把握できると考えられた。

次に 1985 年 8 月と 1993 年 7 月の推定林齢を比較して成長の状況をモニタリングした。図 4.2.2 右には 8 年間の時間差を示す直線 $Y=X+8$ と回帰直線および、 $Y=0.886X+8$ という 3 本の直線を示した。エゾマツ林のスペクトルの経年変化の性質上（栗屋 1997）、図 4.2.2 右に示される 2 つの推定林齢の関係は直線 $Y=X+8$ には一致しない。分類の教師データとした林齢と DN の関係曲線（栗屋 1997）から 8 年間のスペクトル変化量が 3 チャンネルの DN で 1 以下で、8 年間の成長を全く識別できなくなるのは、おおよそ林齢 70 年付近であることが分かる。つまり、1985 年 8 月の推定

林齢が 70 の林分は 8 年後にも同じ値を示すと見なせ、図 4.2.2 右では Y 軸の切片が 8 で X と Y が 70 の点を通るおおよそ $Y=0.886X+8$ の直線が標準的な成長をした林分を表すと考えられる。このため、直線 $Y=0.886X+8$ より上側の林分は 8 年間で予想される以上に成長したことになる。逆に直線 $Y=0.886X+8$ よりも極端に下に逸脱するケースは、エゾマツよりも広葉樹あるいは草本が優占してきたことを意味する。データの分布から上側に逸脱した林分 A は、エゾマツの樹冠占有率が卓越してきたと理解でき、落葉広葉樹林帯が列状に除伐された林分だった。一方、回帰直線の下側に逸脱する林分は、エゾマツよりも落葉広葉樹が優占してきたことを意味する。林分 B は皆伐による推定林齢の変化を知るために選定したカラマツ林の伐採地で、ゴルフ場に転用されたケースである。林分 C はエゾマツだけで構成される密な一斎林で、除伐が行われていた。図 4.2.2 右では林分 C はこの直線に近いが、A、B はかなり離れていて、実林齢が不明でも推定林齢の変化から森林変化の内容をある程度類推できた。期待される直線 $Y=0.886X+8$ からの隔たりを画像化した(図 4.2.5 右)。

図 4.2.5 右から林況と推定林齢の変化の関係を以下のように把握できた。間伐の場合、保護樹帯の落葉広葉樹を除いた林分は赤く現れたが、保護樹帯を残した林分では推定林齢の変化はわずかだった。一方、高齢でエゾマツの樹冠占有率が高くて相応の推定林齢を示す林分の多くは、赤と青がモザイク状に入り組んでいた。これらの林分では衛星データの取得日を挟んで間伐が行われていた。この場合、赤は間伐後に成長した箇所、青は期間中の間伐箇所と考えられた。一方、高齢であってもエゾマツの樹冠占有率が低い林では、間伐による推定林齢の変化は小さかった。これは、混交している落葉広葉樹も伐採されて混交率の変化が小さかつたためと思われた。このように推定林齢を用いて施業による森林変化を把握できることが分かった。

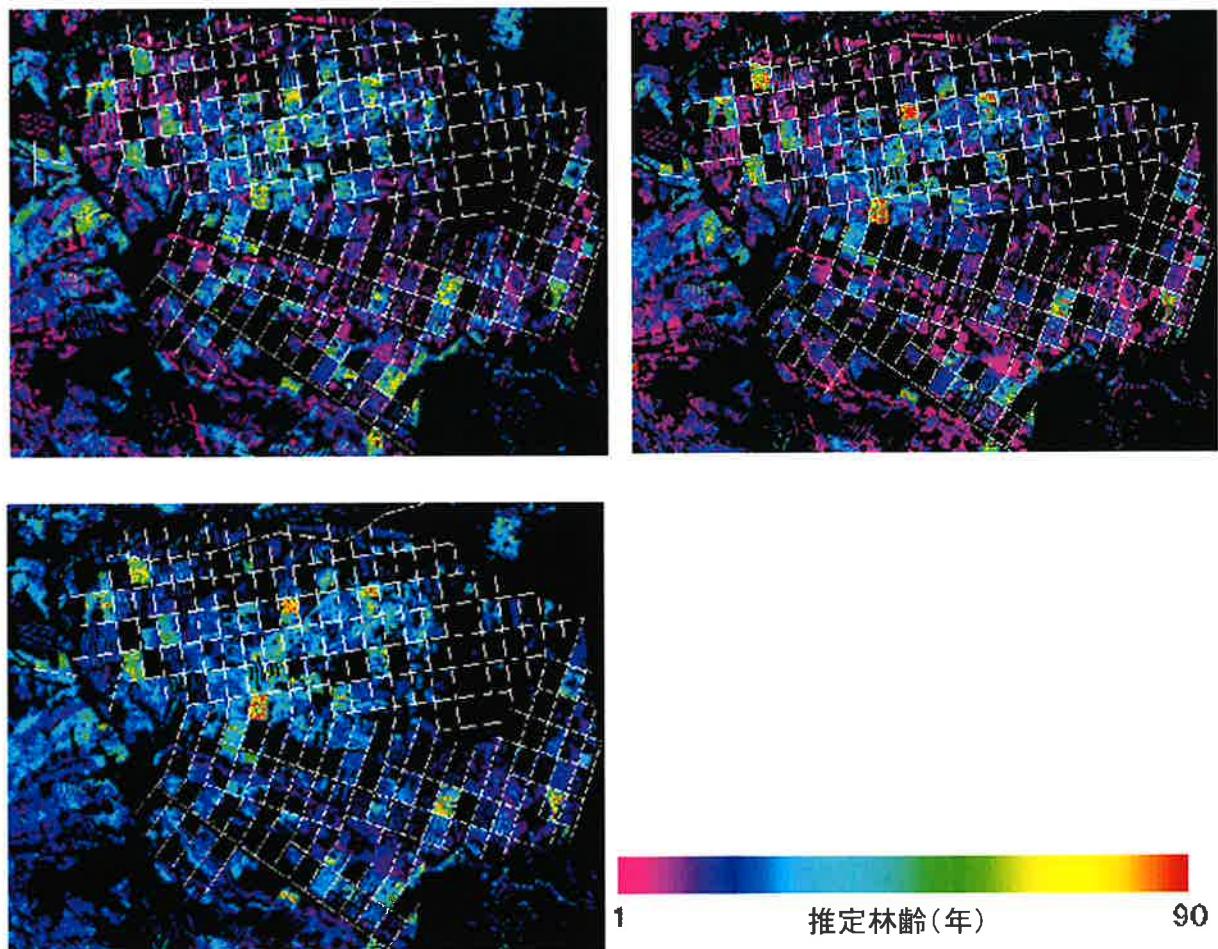


図 4.2.4 推定林齢の分布図 上: 同一年の比較 左: 1985 年 3 月 12 日、右: 1985 年 8 月 10 日、下: 1993 年 7 月 8 日

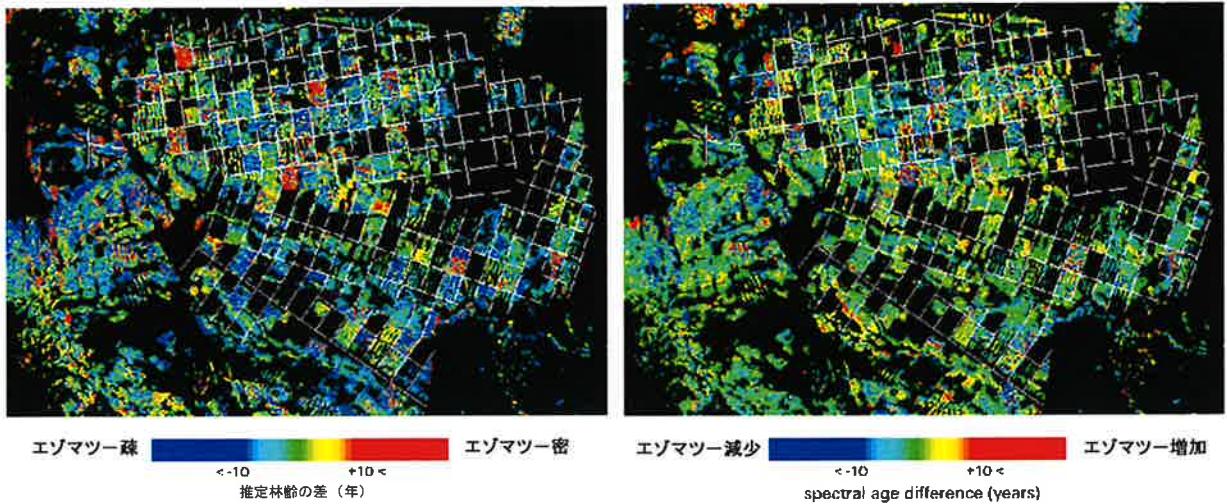


図 4.2.5 推定林齢の差 左：1985/08/10-1985/03/12、右：図 4.2.2 右の回帰直線からの偏差

以上のように、推定林齢は林況を示す数値指標であり、これに基づいてエゾマツの樹冠占有率の大小、落葉広葉樹やエゾマツの伐採による林況の変化の概要などを面的に把握できる。

第 3 項 多雪地帯での広葉樹林混交の実態把握と広葉樹林化のポテンシャル評価（栗屋・西園 2005）

2001 年に森林・林業基本法が改正されて、森林管理はこれまでの木材生産中心から森林のもつ多面的機能を発揮させる方向に転換された。これにより、従来の植林地を木材生産林や環境保全林、あるいは人との共生林という、重視すべき機能に応じて再区分して森林を望ましい姿に誘導することが求められている（林野庁 2002）。一方、林業従事者は大幅に減少して個々の森林の実態を把握することが困難になっている。さらに多雪地帯では雪により植栽木の成長が阻害され、成林できずに落葉広葉樹に置き換わる林分が多く生じる（豪雪地帯林業技術開発協議会 2000、小野寺 1990）。

本節では秋田県北秋田郡森吉町にある太平湖周辺の国有林のスギ林を対象に成長不良林分を把握して、地形因子と成長不良の状況との関係から落葉樹林化のポテンシャルと施業指針を評価した例を紹介する。対象地は標高 169 m（小又川周辺）～1,454 m（森吉山山頂）における、急峻な渓谷を含む。人工林のほとんどはスギ林である。対象地域は豪雪地帯に位置して積雪が約 4 m に達するスギ人工林もあり、スギ造林が極めて困難な地域（小野寺 1990）と言える。本節ではスギ人工林の成林状況を図化し、落葉樹林化のポテンシャルを評価して、これらに基づいてスギ人工林の施業指針のマップを作成した例を紹介する。

解析には 1994 年 6 月 16 日と 1996 年 9 月 25 日に観測されたランドサット TM データと国土地理院の 50 m メッシュの標高データ(DTM)を 25 m メッシュにリサンプリングして利用した。また、国有林の基本図から林小班界をデジタイズして森林簿をリンクさせ、森林簿の樹種情報に基づいて、対象地を常緑樹林（75%以上）、混交林 A（常緑樹(50～75%)>落葉樹(25～50%)）、混交林 B（落葉樹(50～75%)>常緑樹(25%～50%)）、落葉樹林（75%以上）に 4 区分し、これを TM データの分類基準とした（図 4.2.6 左）。また、空中写真と DTM から簡易オルソを作成して分類結果の検証に利用した。

TM データの大気補正は困難なため省略し、以下の手順で解析した。a) TM データにパターン展開法（藤原ほか 1996）を適用して地形の影響を除去する。b) 教師なし分類の ISODATA 法（高木・下田 1991）でパターン展開係数を分類して意味づける。c) サンプリングと空中写真判読によって小班レベルで分類精度を評価し、d) 精度を判断基準として分類クラスを統合する。e) スギ人工林で

の落葉樹混交の実態を地形要因との関係で明らかにする。f) 地形因子から落葉樹の混交率を計算してこれを落葉樹林化ポテンシャルとする。g) スギ林の蓄積をパターン展開係数と林齢から推定し、落葉樹化ポテンシャル、森林タイプ、蓄積から施業指針を提案する。

4.2.3.1 TM データによる森林タイプ分類

分類に先立ち TM データから地形の影響を除くため、パターン展開法（藤原ほか 1996）と呼ばれるミクセル分解（高木・下田 1991）に類似した方法を利用した。この方法は植生、土壤、水の 3 つの被覆の基準スペクトルを定めて、1 画素内の基準スペクトルの寄与率（類似度）を推定する方法である。寄与率はパターン展開係数と呼ばれ、地形の影響が除去された画像が得られる。2 季節の TM データに別々にパターン展開法を適用して、それぞれの植生、土壤および水のパターン展開係数画像を作成した。

2 季節の TM データのパターン展開係数をひとつにまとめて、ISODATA 法によって 25 カテゴリに分類した。GIS で作成した分類基準データとカラー表示された TM データを参照しながら、極力、分類結果が視覚的に分類基準データに近づくように、各カテゴリに 4 つの森林クラスを割り当てて分類図を作成した。小班単位で分類項目を統合して精度を検証したところ、常緑林、混交林、落葉林の 3 タイプに統合した分類図（図 4.2.6 右）で分類精度は 90.0% となった。

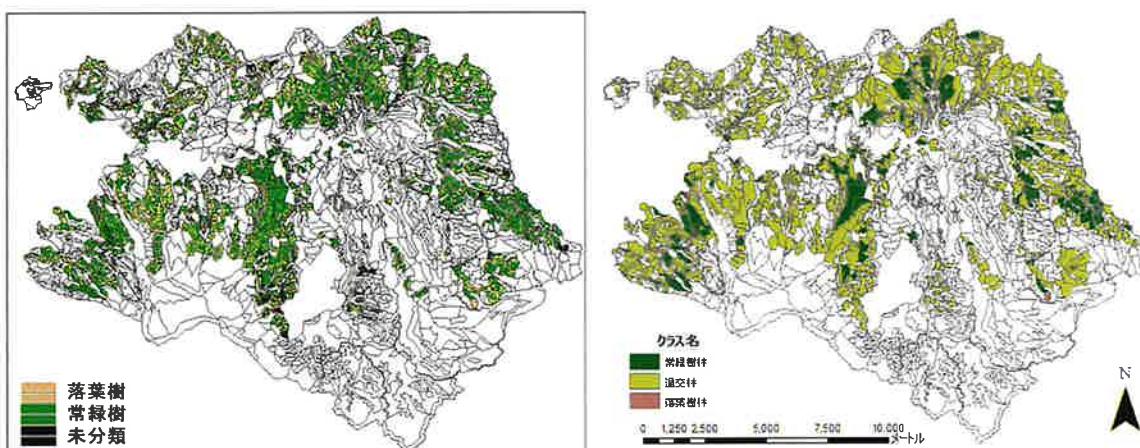


図 4.2.6 森林簿（左）と TM データ分類結果（右）によるスギ人工林の状況

4.2.3.2 落葉樹混交の特徴

標高、傾斜、斜面方位と林齢をそれぞれ 50 m 間隔、5 度間隔、30 度間隔と 5 年間隔のグループに区切って、各グループ単位で落葉樹林の画素の割合を計算して落葉樹率とし、各因子との関係を解析した。その結果、スギ人工林では傾斜が急なほど落葉樹率が高く、両者の関係を一次式で近似できた（危険率 1% で有意、図 4.2.7 左）。斜面方位との関係では落葉樹率は南東斜面で高く北西斜面で低い傾向が認められ、サインカーブで近似できた（図 4.2.7 右）。標高との関係はやや不明瞭だが標高が 800 m を越えると落葉樹率が上昇した。また、林齢に対しては 30 年生付近で落葉樹率が最小となった後、落葉樹率が増える傾向が現れた。

多雪環境の急傾斜地では積雪の移動により根曲がりが激しくて、スギの成林が困難となるため（豪雪地帯林業技術開発協議会 2000）、急傾斜地で落葉樹が多くなったと考えられる。南東斜面で落葉樹率が高かったことに関しては、以下の 2 つの理由が考えられる。a) 方位と傾斜の関係を検証すると北西側では傾斜 5~25 度の緩やかな斜面が多く、南東側では 15~30 度の急な斜面が多いため、傾斜の影響が現れた。b) 一般に風下側の斜面で積雪が多く森林の発達が阻害されるが（杉田 1988）、対象地の場合も空中写真上では冬の北西風の風下にあたる南東斜面の上部で成林の状況が芳しくない林分が目立った。標高の場合に 800 m を越えると落葉樹率が上昇する理由としては、一般に標高が高いほど積雪量が多く（中島ほか 1993）、寒冷なのでスギが成林しにくいためと考え

られる。このように TM 分類図はスギ成林が積雪環境に依存していることを示唆しており、スギ成林は最大積雪深に左右されるといった知見に合致していた（豪雪地帯林業技術開発協議会 2000, 横井・山口 2000）。

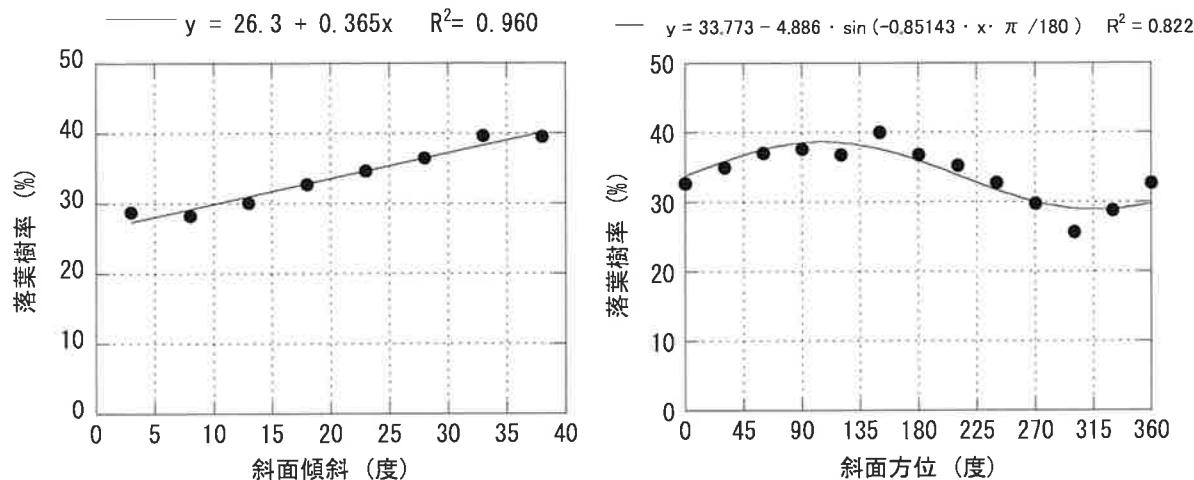


図 4.2.7 地形因子と落葉林率の関係 左：傾斜、右：方位

表 4.2.1 スギ林の目標林型の判定表

落葉樹化ポテンシャル	常緑・落葉分類図	スギ蓄積推定値	タイプ
常緑樹	常緑樹	全て	生産林
常緑樹	落葉樹	全て	育成天然林
落葉樹	常緑樹	150m ³ /ha以上	生産林
落葉樹	常緑樹	150m ³ /ha未満	育成天然林
落葉樹	落葉樹	全て	天然林



図 4.2.8 広葉樹林化のポテンシャル

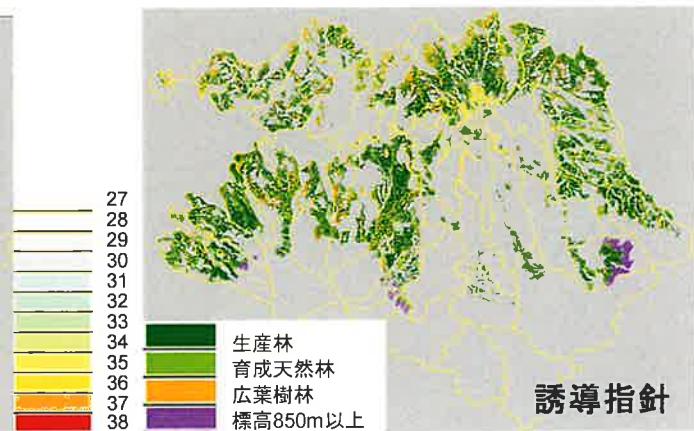


図 4.2.9 スギ人工林の誘導指針

4.2.3.3 広葉樹林化ポテンシャルと誘導指針

スギ林が落葉樹林化するポテンシャルは斜度と斜面方位から落葉樹率を推定して、その平均値をポテンシャルとした（図 4.2.8）。スギ林の誘導指針を評価するために、落葉樹林化ポテンシャル、常緑・落葉の分類図およびスギ林の蓄積を評価因子とした。スギ林の蓄積はパターン展開係数と林齢を独立変数としてスギ林と混交林について蓄積推定式を作成して、蓄積の分布を推定した。これらのに基づいて表 4.2.1 のような誘導指針（目標林型：タイプ）を設定し、誘導指針を図化した（図

4.2.9)。図 4.2.9 はスギ林の成林状況に基づいた誘導指針であり、広域の森林の実態を把握できるリモートセンシングの利点を生かしている。今後、このような情報が森林の管理計画や経営計画に活用されることを望む。なお、今日では林況だけではなく、林道からの距離などの施業に関するコスト要因を加えて、林業経営の観点から人工林の誘導指針が設定されている。

本稿で紹介した事例は研究レベルの成果であるが、リモートセンシングを利用して人工林の成長をモニタリングした例は少ない。1972 年にランドサット 1 号が打ち上げられて以降、衛星データが蓄積されてきたことから、森林を長期間にわたりモニタリングすることが可能になっている。衛星データの効果的な利用が望まれる。

引用文献

- 栗屋善雄・田中伸彦・森山隆・前里卓・小熊宏之, 1996, エゾマツ林分のスペクトルの季節別・年齢別変化, 日本林学会誌, Vol.78, No.2, pp.201-206.
- 栗屋善雄, 1997, スペクトルの経年変化曲線に基づくエゾマツ林の林齢の推定, 日本林学会誌, Vol.79, No.1, pp.22-28.
- 栗屋善雄, 1998, スペクトルの経年変化曲線に基づくエゾマツ林の林況評価とモニタリング, 日本林学会誌, Vol.80, No.1, pp.1-7.
- 栗屋善雄・田中伸彦, 1999, 冷温帯森林の反射スペクトルの季節変化の特徴: ランドサット TM データを利用した解析, 写真測量とリモートセンシング, Vol.38, No.4, pp.35-46.
- 栗屋善雄・西園朋広, 2005, 多雪地帯スギ人工林での落葉広葉樹混交実態の把握—ランドサット TM データと森林調査簿情報を用いた解析—, 日本森林学会誌, Vol.87, No.6, pp.293-303.
- 藤原昇・村松加奈子・阿波忍・羽澄妙子・落合史生, 1996, 衛星データのためのパターン展開法の開発, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.16, No.3, pp.17-34.
- 豪雪地帯林業技術開発協議会(編), 2000, 雪国の森林づくりースギ造林の現状と広葉樹の活用—, 日本林業調査会, 東京, 189p.
- Kaufman, Y. J., 1989, The atmospheric effect on remote sensing and its correction. *Theory and Application of Optical Remote Sensing*, edited by Asrar, G., Jhon Wiley & Sons, New York, pp.336-428.
- 中島皇・福島義宏・小橋澄治, 1993, 暖候性積雪域の山地における気象要素の空間的分布—降雨量・気温・積雪深—, 京都大学農学部演習林報告, Vol.65, pp.113-124.
- 小野寺弘道, 1990, 雪と森林, 林業科学技術振興所, 東京, 81p.
- 林野庁, 2002, 図説 森林・林業白書 平成 13 年度, 農林統計協会, 東京, 336p.
- Smith, J. A., Lin, T.L., and Ranson, K.J., 1980, The Lambertian assumption and Landsat data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.46, No.9, pp.1183-1189.
- 杉田久志, 1988, 多雪山地浅草岳における群落分布に関わる環境要因とその作用機構—ブナの生育状態に着目して—I. 積雪深と群落分布の関係, 日生態会誌, Vol.38, pp.217-227.
- 高木幹雄・下田陽久(監修), 1991, 画像解析ハンドブック, 東大出版会, 東京, 775p.
- 横井秀一・山口清, 2000, 積雪地帯におけるスギ人工林の成林に影響する立地要因, 日本森林学会誌, Vol.82, pp.15-19.

著者:

岐阜大学

栗屋善雄

第3節 空中写真を活用した効果的なマツ枯れ防除法

- ①目的または適応分野：森林管理、マツ枯れ対策、病害虫対策；
- ②プラットフォーム：航空機、UAV；
- ③キーワード：空中写真、立体視、GIS、林内ナビゲーション、無人ヘリコプタ

第1項 はじめに

最近は、マツ枯れによる被害を見ることが少なくなった。これまでの防除効果もあるが、かつての劇害によってマツの現存量が激減したことによるものとも言われている。その地に行くと、松林で遠望すらできなかった海岸が、見通しの良い風光明媚（？）な地に変わっている。また、斜面一面にマツが分布していたところは、いつしかマツのない植生に変わっている。しかし、マツ枯れ対策はいまだ全国的に毎年取り組んでいる最も重要な防除課題である。この難題な課題の仕組みと問題点を明らかにし、効果的な1解法として、空中写真を活用したピンポイント防除法を紹介する（中北 2009, 2014）。

第2項 マツ枯れの仕組み

マツ材線虫病はマツノマダラカミキリ成虫が健全木にマツノザイセンチュウを伝播することで、樹木を衰弱（樹脂流出の停止・発病）させる。その後、成熟したマツノマダラカミキリはマツの衰弱木を探知し、そこに産卵する。そこで、この幼虫の潜む被害木（要防除木）を確実に見つけ焼却や燻蒸処理をすることにより、翌春に羽化するマツノマダラカミキリを大幅に減らそうというものである。もし、要防除木を放置すると爆発的な被害の拡大につながり防除困難となるため、1本足りとも取りこぼさず処置しなければならないとされている。図4.3.1にその流れを示すが、仮に1本の要防除木が取りこぼされると、翌春にはおよそ100頭のマツノマダラカミキリが羽化し、周辺の数本～数十本が被害を受け、ネズミ算式に被害が拡大していくのである。

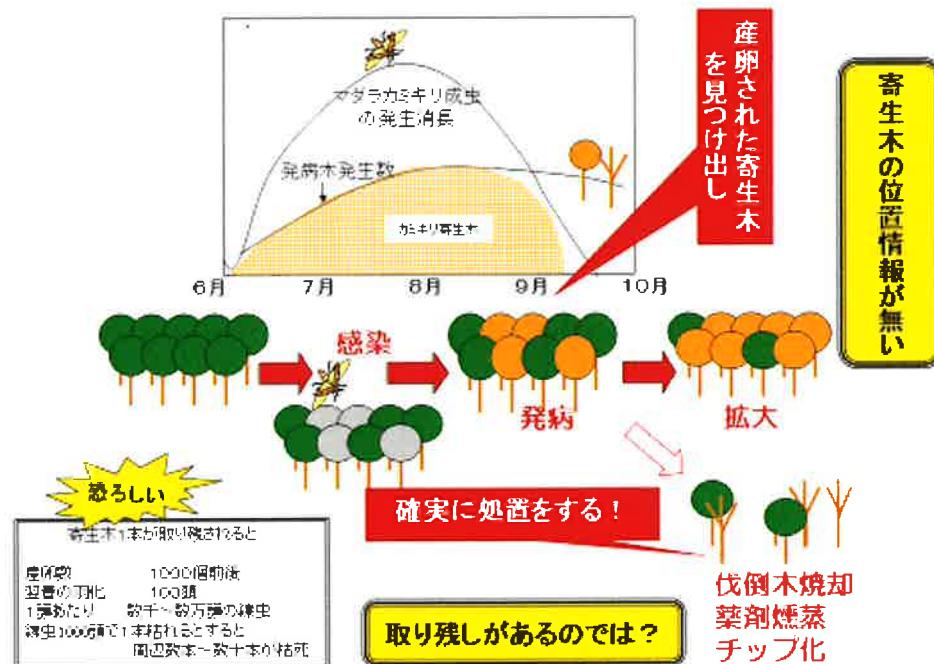


図4.3.1 マツ枯れの時間的な現象の流れ

第3項 何が難しいのか

広い林内に点在する要防除木、現在、その探査は基本的に人海戦術である。松枯れの被害地域は

ある程度限定されるものの、集団ではなく単木的に発生する。担当者が一人で広域の林内を探査することは容易ではなく限界がある。しかしそこでの探査情報が元になり、伐採駆除業者に伝達され駆除処理が行われる。すなわち、被害分布の状態が正確に把握されるかどうかがキーなのである。また、要防除木の処理は、単に樹幹だけではなく枝にも産卵されるため、枝を含めて完全に作業を行うことが求められる。限られた予算や期限内ではそれらの施業管理が十分に行き届かないのかもしれない。しかもマツ枯れ対策は、被害が確認されてから、現地探査→駆除計画→施業完了までを卵が羽化する翌年の早春までのおよそ半年間内に終了しなければならないのである。

第4項 効果的な方法とは

限られた期間に効果的な防除を行うには、①要防除木の位置を単木単位で正確に把握する；②被害の分布状態を早く把握する；③事前の現地調査を不要にし、駆除対策に重点を置く；④経年撮影により前年度の駆除施業の結果を確認することである。

4.3.4.1 どのように空中撮影するか

いつの時期に撮影された空中写真でも使えるのではない。樹木が衰弱し産卵対象となった当年枯れの樹木が赤く変色する時期の写真が適する。そこで7月にセンチュウを接種し個体が時間的に衰弱していく時の樹冠状態を撮影した（図4.3.2）。接種後約1カ月から樹冠全体が変色を開始し、2カ月頃から赤味が出てくる。9月末頃から樹冠全体が赤くなり、10月頃になるとさらに赤味が増して視認性が高くなる。

図4.3.3は、地上で詳細な毎木調査を実施し、毎月の変色木発生数を求めた。また、変色した個体における産卵痕と成虫発生数、被産卵木本数を調査した。その結果、いずれも10月から11月に



図4.3.2 接種試験によるマツ樹冠の色調変化（秋田県立大学）

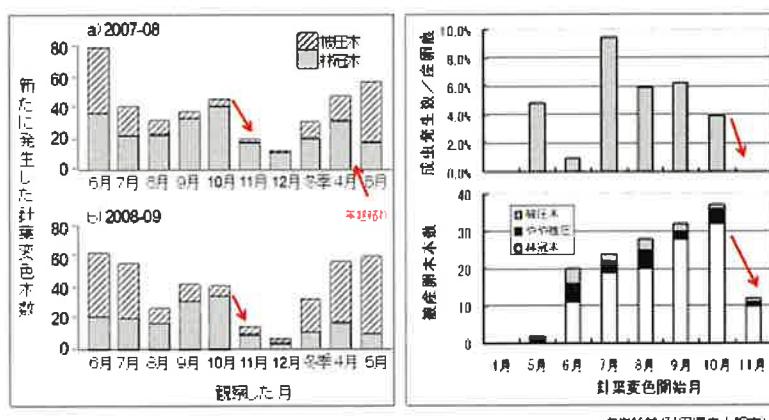


図4.3.3 月毎の毎木調査による変色発生数と産卵痕および成虫発生数

かけて大きく減少していた。これらから、撮影時期は赤く変色した当年枯れ個体がほぼ発現し、写真上でも確実に認められ、かつ冬季の荒れた天候になる前が好ましいと考え、その時期は、東北の秋田・盛岡での研究結果からは10月の中旬頃～11月上旬と判断した。地域によって多少の時期のずれはあるとは思えるが、大きな差にはならないと考える。ただ、この時期は広葉樹の紅葉とも重なる。マツの一斉林であると健全木の中に点在する赤く変色した当年枯れを判読するのは極めて容易であるが、針広混交林では判読が難しくなる場合もある。福島県飯舘村での事例では、紅葉したヤマザクラを当年枯れと誤判読したことがあった。

さて、上記のように撮影時期が特定された場合、上空からの映像として衛星画像があるが、定期的に飛来しているものの雲の影響を受け、晴天時と合致する機会が極めていつ撮影できるか確約できない。その点、航空機による空中撮影は、天候の合間を見て確実に撮影するため、本目的には最適な方法である。また、UAVによる方法もあるが、便利な反面、撮影範囲が狭く林分が限定される。限られた撮影時期内にある程度の広い範囲を均一に撮影することが望ましい。

次に、撮影の縮尺は、樹種や樹冠の状態を識別するため撮影縮尺1万分の1（解像度約16cm）を目安とする。また、写真判読には、リアルカラーに加え近赤外カラーも併用するとより効果的である。地域によっては、年越し枯れ（衰弱時期が遅れた樹木）も発生するが、晩秋にはカミキリムシの活動は減少しているため、冬季から翌春にかけて変色する個体は、翌年の当年枯れと同等に扱えばよいことも明らかとなっている。

4.3.4.2 解析事例

当時マツ枯れの最前線地域であった岩手県盛岡市の南部を対象に空中撮影を実施した。10月上旬から撮影依頼をかけ好天の時を狙って撮影を実施した。まず通常のカラーフィルムで撮影を行い、一度空港に戻り赤外線フィルムに交換して同日のうちに撮影を行った（図4.3.4）。撮影された画像は立体視しながら古い枯損木、当年枯れなどに分類して樹頂点を求めた（図4.3.5）。

リアルカラーおよび赤外カラーを比較することで判読精度はより向上する。計測された要防除木の分布位置をGoogleEarthの画像上に重ねたものが図4.3.6である。



図4.3.4 撮影縮尺1万分の1による空撮

図4.3.5 判読された枯損木や要防除木

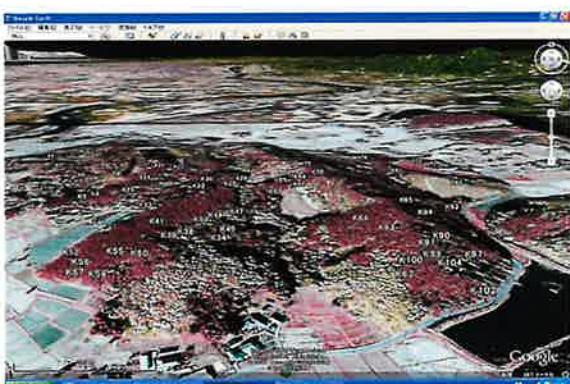


図4.3.6 写真判読した要防除木の位置をGoogleEarth上に表示、右は俯瞰にした状態



図 4.3.7 携帯端末を用いた林内ナビ

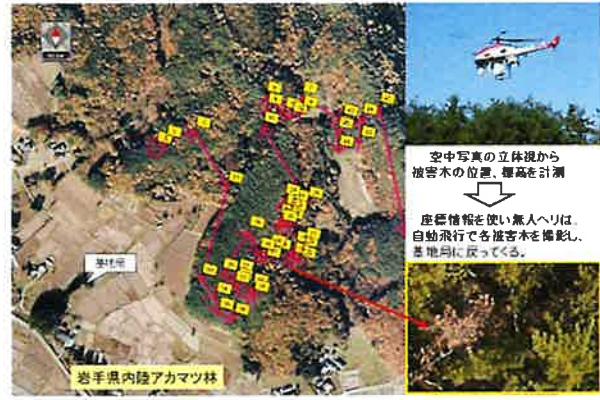


図 4.3.8 自律航行型無人ヘリコプタによる単木管理

予備調査をせずに、撮影から数週間で全体の被害状況や単木の位置が求められるため、速やかな駆除計画とその後の処理対策への対応が可能となる。さらに、この要防除木の位置情報は三次元情報であるため、次の2つの活用法を提示する。1つは、GPSを内蔵した小型の携帯用端末に地図情報、撮影された空中写真画像、判読された要防除木の位置データを入力すると、現地で要防除木へのナビゲーションとして利用できる（図4.3.7）。すなわち、事前（予備）調査をしなくとも、林に入る前にすでに要防除木の場所が把握できることになる。これは大変効果的な方法で時間や労力の省力化に繋がることである。もう1つは、立体視上で計測された要防除木の位置は、3次元の位置データである。このデータを自律航行型無人ヘリコプタに情報入力すると、ヘリコプタは自動的に各要防除木の上空に行き、空中停止して写真撮を行い、自動的に戻ってくることが可能となった（図4.3.8）。このように、判読で得られた情報を元に各枯損木の拡大写真が得られれば、実態状況の判断には大いに役立つのである。

第5項 マツ枯れ対策法を空撮に変更した岩手県

岩手県も他の自治体同様、地上調査で被害分布を把握していたが、H23年度より空中撮影を実施している。撮影範囲は、過去数カ年の被害発生地点の情報、マツノマダラカミキリの生息可能地域（積算温度図を参照）や地形的な特徴を検討した結果、範囲は極めて限定されることがわかった。H25年度は盛岡市南部の約80km²を撮影している（図4.3.9）。デジタル立体視装置での写真判読・分布計測の結果は、GISソフトQGISに取り込み、必要に応じ表示を変えながら枯死木を判読する（図4.3.10, 4.3.11）。空中写真を利用することで、事前の現地調査が不要になった。正確な被害分布が速やかに把握できるため、的確な対策計画が立てられ、費用対効果の高い防除に繋がっている。また、単木ごとの正確な位置が判明するため、GPSを持った作業員は現地で迷うことなく現場に



図 4.3.9 H25 年の撮影範囲

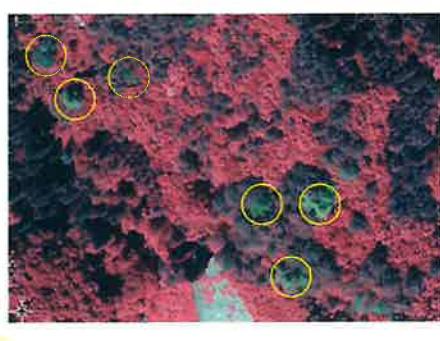


図 4.3.10 判読した当年枯れ

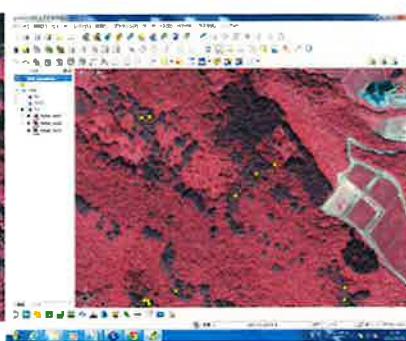


図 4.3.11 GIS 上に表示した

全体の分布状況

辿り着くため、現場作業が効率的になった。さらに、経年的に空中撮影を実施すれば、前年度の施業結果を写真上で確認することもできる（小澤 2013）。マツ枯れ以外の病害虫に対しても、対象とする樹木の色調の変化や、病状に応じて最適な撮影時期およびその期間、撮影条件について検討すれば応用のできる方法である。

引用文献

- 中北理, 2009, 航空写真と GIS を活用した松くい虫ピンポイント防除法の開発, 森林総合研究所, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/project/matsukuimushi.html>, (2018年12月13日アクセス)
- 中北理, 2014, 空中写真を活用した松くい虫ピンポイント探査, グリーンエージ, Vol. 5, pp.32-33.
- 小澤洋一, 2013, 空中写真によるマツ枯死木の判読(Ⅰ)(Ⅱ), 岩手県林業センター, 林業技術情報, No.51, p.52.

著者：元森林研究・整備機構 森林総合研究所

中北理

第4節 ナラ枯れ被害の抽出および拡大予測の手法について

- ①目的または適応分野：森林保全、森林防災；
- ②プラットフォーム：航空機レーザ、衛星画像；
- ③キーワード：ナラ枯れ、リモートセンシング

第1項 はじめに

ナラ枯れは、コナラやミズナラなどナラ類材内の道管の通水を阻害する病原菌を持つカシノナガキクイムシ（以下、「カシナガ」という）が、集団的にナラ類に穿入することで、材内にナラ菌を拡散させ、ナラ類を枯死させる伝染病である（図4.4.1）。近年、その被害は全国的に広がっており、集団枯死による土砂災害や景観破壊の被害拡大を防止するための防除対策が進められている。ナラ枯れに対処するには、被害木の特徴や位置を把握しておく必要がある。ここでは、過去に実施されたナラ枯れの被害抽出手法を紹介する。



図4.4.1 ナラ枯れ被害の例（左：近景、右：遠景）

第2項 ナラ枯れの抽出手法

ナラ枯れの被害を短期間に広範囲で抽出する手法として、リモートセンシングによる手法が有効である。これには、レーザ計測を用いる手法と航空写真や衛星画像を用いる手法がある。前者は、大径木がナラ枯れの被害にあいやすいという既往知見に基づき、レーザ計測によりコナラ林分の高さとDBHの相関から大径木を抽出する手法である。後者は、植物の分光反射特性を利用し、枯死した樹木（枯死木）を抽出する手法である。いずれの手法においても、現地調査の結果と比較し、抽出の精度を確認する必要がある。

4.4.2.1 レーザ計測による大径木の抽出

現地調査では、広大な山地を対象に大径木を探すことは困難である。そこでレーザ計測データを用いて広域の樹冠高（DCHM）を算出し、大径木を抽出する。なお、ナラ類が優占する林分は事前に林相区分図などで明確にしておく必要がある。

大径木の抽出には、樹冠高とDBHの相関を利用する。樹冠高は、レーザ計測データである表層モデル（DSM）と地表モデル（DEM）の差分から算出する。また、既往の研究よりコナラの樹高とDBHの間には相関関係があり、DBHが20 cm前後で樹高の上限値の15~20 mに達するとされる。このことから、樹冠高が15 m以上と算出された林分には、大径木が存在する可能性が高いと判断できる。この結果により、ナラ枯れの被害にあいやすい環境下にある林分を把握することができる。

4.4.2.2 衛星画像を用いたナラ枯れの抽出

2 m 以上の解像度をもつような高解像度の衛星画像は、枯死木を単木レベルで特定し、現地調査に代えて被害状況を把握するのに有効である。衛星画像は様々な波長帯の反射光を画像データとして記録できるため、健全木と枯死木の特性の違いからナラ枯れを抽出できる。健全な樹木は、緑葉の分光反射特性により、光の赤外線波長 (NIR) をよく反射し、赤色波長 (R) を吸収する。一方、枯死木は赤色波長を反射する。この違いによって、可視画像 (R) と近赤外画像 (NIR) から、NDVI を算出した画像（図 4.4.2）より、樹冠の枯死状況を判読する。使用する衛星画像は、Digital Glove の WorldView-2 とした（表 4.4.1）。なお、この手法では枯死前の被害木（カシノナガキクイムシが穿孔しているが、生存している樹木）は、葉に健全木との差が生じていないため、被害木を抽出できないことに留意する必要がある。

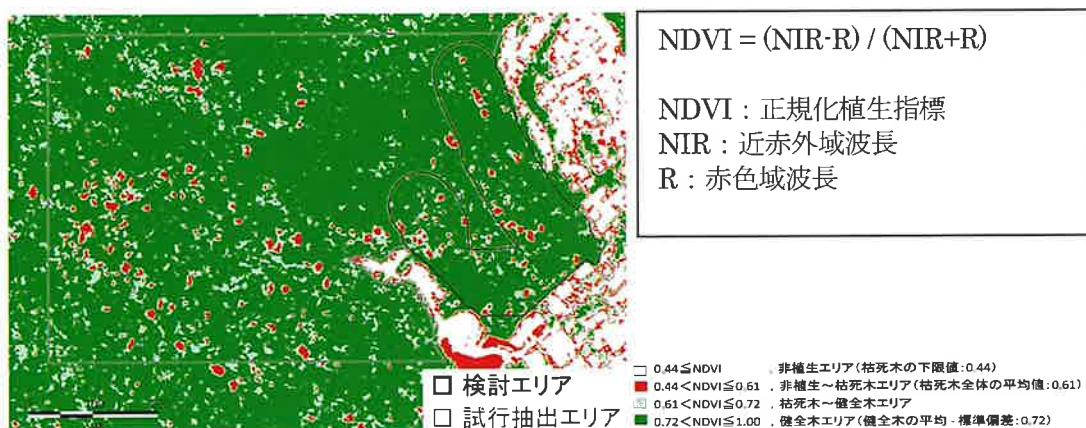


図 4.4.2 解析に用いる指標。植物の活性度を表現できる。

表 4.4.1 WorldView-2 の概要

衛星名（衛星運用者）	WorldView-2 (Digital Glove)
観測可能波長帯	近赤外域含む 9 バンド
分解能	0.46 m (パンクロマチック) 1.84 m (マルチスペクトル)
観測幅	17.7 km (直下視)
回帰日数	1.1 日

第 3 項 ナラ枯れの拡大予測手法

ナラ枯れ被害の拡大には、一定の傾向が認められることが、既存の調査結果により明らかになっている。

ナラ枯れ被害は、カシナガの穿入するコナラ等が分布する群落が存在し、標高 100~350 m で、林床が疎である場所で被害が集中する傾向がこれまでの調査で確認されている。さらに、道路や開地に近く（40 m 以内）林内が明るいという条件で被害が発生しやすい特徴がある（図 4.4.3）。このようなナラ枯れの被害を受けやすい場の条件を数値化し、「ナラ枯れ被害発生ポテンシャル【注 1】」として評価した。

ナラ枯れ被害は、ナラ枯れ被害発生ポテンシャルが高いエリアにおいて、前年度被害木がまとまつた箇所の周辺でより被害が拡大する傾向が確認されている。この傾向は、前年度被害木がまとまって発生した箇所を中心に、カシナガの繁殖コアエリア【注 2】を形成し、翌年に脱出した大量のカシナガが、周辺のナラ類に多数の穿孔被害をもたらすことが原因と考えられる（図 4.4.4）。これらの傾向とリモートセンシングで得た抽出結果から、ナラ枯れの拡大を予測できる。

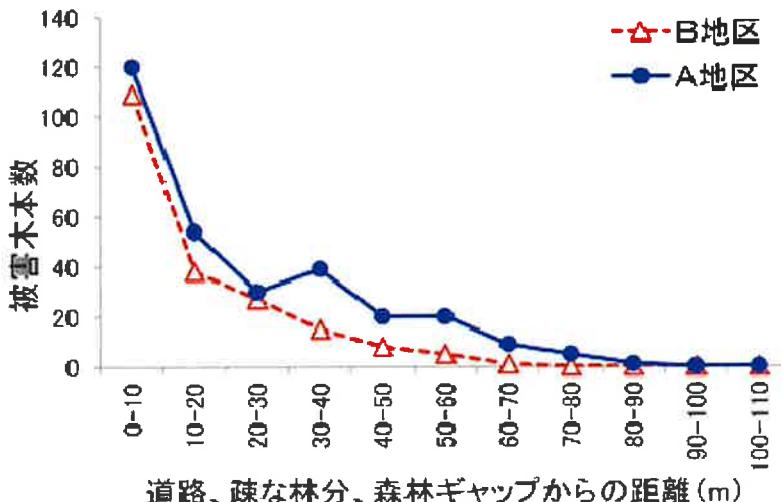


図 4.4.3 道路や疎な林分、森林ギャップからの距離

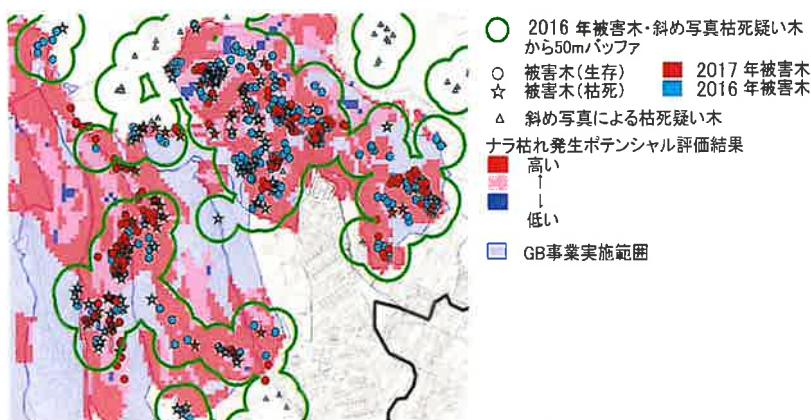


図 4.4.4 繁殖コアエリアの被害状況

第4項 おわりに

リモートセンシングを活用した手法では、林内の目立たない場所に発生した枯死木を効率よく見つけることができる。また、人が踏査できない場所や、被害初期の広域調査に有用である。

ナラ枯れ被害の激害化や深刻化は、様々な地方の山林などに共通する課題となっている。今後は、リモートセンシングを用いた手法をはじめとした、効率的かつ効果的なナラ枯れ被害の実態把握手法を検討していくことが重要である。

謝辞

本内容は国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所から受託した「六甲山系ナラ枯れ調査業務」で検討したものであります。ここに謝意を表します。

注釈

[注 1] ナラ枯れ被害の受けやすい場の条件を数値化し、「ナラ枯れ被害発生ポテンシャル」として事前に評価した指標。

[注 2] カシノナガキクイムシが繁殖している箇所。

参考文献

石塚忠範・明見章史・岸本昌之ほか, 2018, 衛星画像を用いたナラ枯れ被害状況の把握と防除対策の取り組み. 砂防学会研究発表会概要集, pp.797-798.

木下篤彦・神野忠広・服部保ほか, 2013, 六甲山系におけるナラ枯れの現状－被害把握におけるリモートセンシング活用への取組み－, 砂防学会誌, Vol. 66, No. 1, pp.58-61.

斎藤孝蔵, 1959, カシノナガキクイムシの大発生について, 森林防疫ニュース, Vol.8, No.6, pp.101-102.

生態工学会出版企画委員会編, 大政謙次・竹内俊郎・木部勢至朗・北宅善昭・船田良監修, 2015, 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック, アドスリー, 東京, pp. 379-380 (447p).

内田健・松尾正史, 1995, 天然生コナラ二次林における林分構造調査, 山口県農林総合技術センター研究報告, No. 9, pp.78-88.

宇宙技術開発 衛星画像データサービス, ワールドビュー2号(WorldView-2)衛星・センサの概要,
https://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_worldview2.html, (2019年5月28日アクセス)

著者 :

アジア航測

船越和也・金宗煥

第5節 山地災害状況の把握

- ①目的または適応分野：山地災害状況の把握；
- ②プラットフォーム：ドローン、航空機、衛星；
- ③キーワード：光学カメラ、SAR、航空レーザ

第1項 はじめに

2018年は、我が国が災害大国であることを改めて思い知らされた年だった。この年は、6月8日に大阪北部で発生した震度6弱の地震を始まりとして、7月には西日本に豪雨災害がもたらされ、9月には北海道胆振地方に大規模な地震災害が発生した。また2018年夏の異常気象は、夏の高温として「災害級の暑さ」という言葉を生み出し、同年の新語・流行語大賞トップテンに選出されたほどであり、6月から8月の東日本の平均気温は平年よりも1.7°C上昇し（1946年の統計開始以降最高）、西日本の平均気温は同1.1°Cまで上昇した（統計開始以降第2位）。夏の豪雨と高温をもたらした要因としては、日本付近が暖かい空気を伴った背の高い高気圧に覆われたことと、強い下降気流と晴天の持続による強い日射に伴う昇温によるものとされている（気象庁2018）。これは地球温暖化による全球的な気温上昇とは無関係でなく、地球温暖化の問題がすぐに解決するものではないことを考えると、異常気象による山地災害のリスクは今後も高まっていくことが容易に予測される。これまでの章で述べたように、リモートセンシングの計測手段には、ドローン、航空機、そして衛星といった様々なプラットフォームと、光学カメラ、SAR、そしてLIDARといった様々なセンサがあり、それぞれに広域性・迅速性・全天候性・画像計測・高さ計測などの特徴がある。山地災害発災時においては、これらの様々な手段を駆使して速やかに被災状況を把握する仕組みが必要である。

リモートセンシング技術は山地災害の初期情報を広域に把握する技術として有用である。災害時は、携帯電話やインターネットなどの通信網や現地への交通アクセスが制限されることが多く、地上調査のみによって被害の全容を素早く把握することは容易ではない。特に平常時においても通信・交通インフラが貧弱で情報収取に不利な山地地域では、人命救助や二次災害防止策を講じるための、初動情報を広域的に取得する手法としてリモートセンシングへの期待は高い。

本稿は、リモートセンシングによって実際の山地災害状況を把握した事例を紹介するとともに、そこで使われたリモートセンシングの技術について解説する。

第2項 平成20年 岩手・宮城内陸地震

2008年6月14日に岩手県内陸部で発生した「平成20年 岩手・宮城内陸地震」は、リモートセンシングによって山地災害状況把握が行われた事例としては比較的古いものとしてあげることができる。震源地は岩手県内陸南部であり、震源の深さは約8km、地震の規模はマグニチュード7.2（推定）とされている。この地震により、岩手県奥州市と宮城県栗原市で震度6強を、宮城県大崎市で震度6弱を記録すると共に、東北地方から関東地方の広い範囲で強い揺れを観測した。この地震では、独自の衛星TerraSAR-XのSARにより、2008年6月16日に被災地の撮影が行われている。TerraSAR-Xは、天候を問わず朝と夕方の2回、地上を撮影することができ、広域災害の情報をいち早く取得することができた。パスコ（2008）によると、TerraSAR-Xの撮影範囲は被災地の中心となる栗駒山の南東斜面約100km²を対象とし、荒砥沢ダム湖周辺の大規模地すべりや土石流被害を受けた駒の湯温泉を鮮明に捉えることができた。また、土石流の原因となった東栗駒山の山腹崩壊や土石流の流下経路も確実に捕捉しており、山地災害の被害把握に対してリモートセンシングが有効性であることが実証された。

図4.5.1は栗原市荒砥沢ダム湖北川で発生した大規模地滑りを撮影したTerraSAR-Xの後方散乱係数画像と、2008年6月14日に撮影された斜め航空写真画像である。後方散乱係数画像の濃淡は衛星から地表に対して送信された電磁波の地物による反射強度を示しており、衛星に対して正対す

る斜面は電磁波が強く反射されるため白く写り、衛星とは反対側の斜面は黒く写る。従って、後方散乱係数画像の濃淡は尾根・谷による凹凸を強調したようなパターンを示すが、赤丸で囲まれた領域は尾根・谷が崩壊しているため、周辺の地形とは異なる濃淡のパターンとなっている。斜め航空写真とあわせてみると、この領域は未固結の栗駒火山噴出物が地震の震動により滑動したものであり、さらに末端土砂がダム湖に流入していることがわかる。



図 4.5.1 栗原市荒砥沢ダムの大規模地すべりの撮影結果（パスコ 2008）。左は TerraSAR-X の後方散乱係数画像、右は同じ場所を撮影した斜め航空写真。後方散乱係数画像の赤枠内が大規模地滑りである。

第3項 平成25年台風第26号（東京都大島町）

2013年10月にマリアナ諸島付近で発生した台風26号は、発達しながら日本の南海上を北上し、15日から16日にかけて広い範囲で大雨をもたらした。特に伊豆諸島（大島町）では1時間に100ミリ以上の猛烈な雨が降り、24時間雨量が824ミリに達するなどの記録的な大雨となり、河川の増水や土石流による甚大な被害が発生した。土石流は、元町神達地区や元町三丁目といった集落にまで達し、内閣府（2013）と消防庁応急対策室（2013）によると、大島町では36人が死亡、22人が重軽傷、そして3人が行方不明と報告されている。

2013年10月27日に航空機によって撮影した斜め写真を図4.5.2に示す。撮影に使用した携帯型斜め写真撮影システムは、撮影と同時にカメラ位置と被写体の中心位置、撮影方向などが記録されるため、航空機が着陸後すぐにGIS等の情報システムに展開することができる。



図 4.5.2 斜め写真撮影システムによって撮影した大島町北部の表層崩壊（パスコ 2013）。左は泉津周辺で発生した表層崩壊、右は岡田周辺で発生した表層崩壊である。

図4.5.2に示した斜め写真には、カメラ位置、被写体の中心位置、そして撮影方向が記録されていることから、写真測量システムを用いて処理することによりモザイク写真を作成することができ

る（図 4.5.3 参照）。適切な重複率を設定して撮影した斜め写真から DSM やオルソ画像も作成することができることから、図 4.5.3 に示したモザイク写真とあわせて解析することにより、崩壊土砂量を計測することができる。

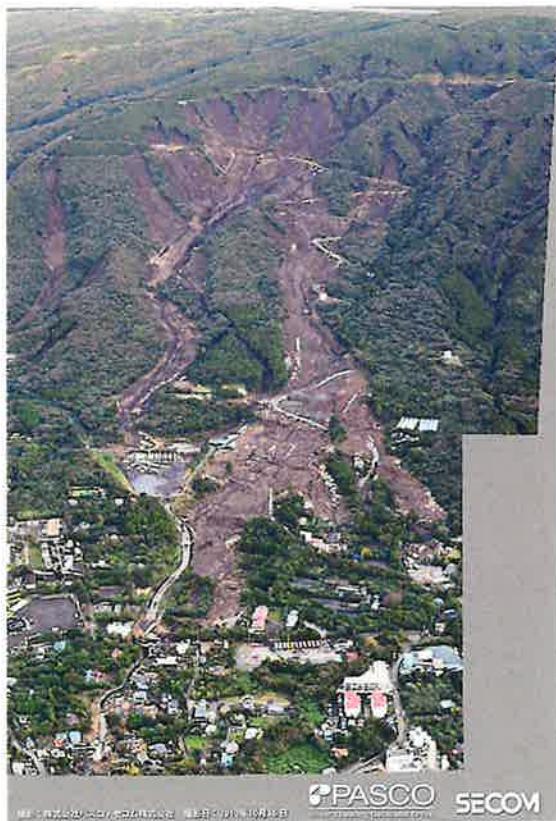


図 4.5.3 写真測量システムを用いて作成した斜め撮影写真のモザイク画像（パスコ 2013）。モザイク処理だけでなく、DSM やオルソ画像も作成することができる。



図 4.5.4 2018 年 6 月 18 日の SPOT 画像をもとに自動画像判読によって抽出した土砂移動痕跡（パスコ 2018）。裸地面を自動的に抽出し、1 km メッシュに含まれる裸地の多寡により移動痕跡面積の多少を表現している。

第 4 項 平成 30 年 7 月豪雨災害（広島県、岡山県、愛媛県等の中四国地方）

2018 年 6 月 28 日から北日本に停滞していた前線は、7 月 5 日に西日本まで南下し、その後も停滞した。また 6 月 29 日に発生した台風第 7 号は東シナ海を北上し、対馬海峡付近で進路を北東に変えた後、7 月 4 日に日本海で温帯低気圧に変わった。これらの前線や台風第 7 号の影響により、日本付近に暖かく非常に湿った空気が供給され続け、西日本を中心に広い範囲で記録的な大雨となった（内閣府非常対策本部 2018）。そして、7 月 7 日未明に発生した、岡山県倉敷市真備町の小田川と高馬川の堤防決壊や浸水被害を始まりとして、広島県や愛媛県の広域に土砂崩壊が発生した。

図 4.5.4 は仏国の衛星 SPOT の光学カメラで撮影した 2018 年 6 月 18 日の画像をもとに、自動画像判読によって裸地面を抽出し、1 km メッシュに含まれる裸地の多寡により移動痕跡面積の多少を表現したものである。図 4.5.4 は自動画像判読結果であることから、採石場や伐採跡地などの災害とは関係しない裸地面も含まれているが、広域の災害状況を迅速に把握するには有効な情報である。

図 4.5.5 は SPOT の 2018 年 6 月 18 日の軌道と撮影した領域（フットプリントという）を示している。SPOT は北から南に飛行している間に、撮影方向を合計 8 回変化させながら 8 シーンを撮影している。人工衛星が撮影方向を変える機能をポインティング機能といい、これは SPOT のような光学衛星を使った広域を撮影するときに用いられる機能である。

第5項 おわりに

ここで紹介したリモートセンシング技術は、山地災害状況の概要把握において有効な手段である。しかし、リモートセンシングだけで得られる情報は「一次被害把握」、「二次被害防止」、そして「災害復旧」には有効であるが、被災者を少なくするための事前の予測技術とするにはモニタリング計測が重要である。例えば、地すべりによる長期間の緩やかな地形変化を計測する技術として干渉 SAR 解析が

あるが、これらの技術を組み合わせることによって山地災害の「一次被害防止」から「災害復旧」までの情報を提供することができるようになるだろう。

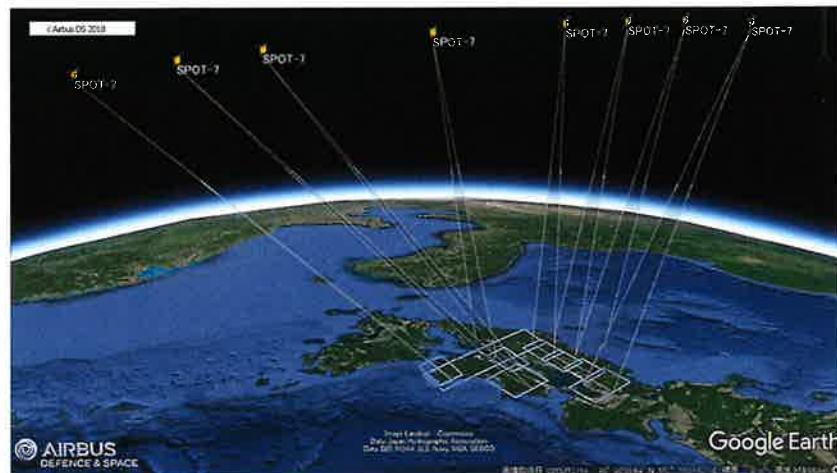


図 4.5.5 2018 年 7 月 16 日（月）10 時に撮像した SPOT 画像のプリント（洲濱ら 2018）。

引用文献

- 気象庁, 2018, 災害をもたらした気象事例 平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等),
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun_sokuji20180628-0708.pdf, (2019年6月17日アクセス)
- 内閣府, 2013, 平成25年台風第26号による被害状況等について(第30報),
http://www.bousai.go.jp/updates/h25typhoon26/pdf/h25typhoon26_30.pdf, (2019年6月17日アクセス)
- 内閣府非常災害対策本部, 2018, 平成30年7月豪雨による被害状況等について,
http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/300905_1700_h30typhoon7.pdf, (2019年6月17日アクセス)
- パスコ, 2008, 2008年6月 岩手・宮城内陸地震, https://www.pasco.co.jp/disaster_info/080614/, (2019年6月17日アクセス)
- パスコ, 2013, 2013年10月 台風26号豪雨災害(東京都大島町),
https://www.pasco.co.jp/disaster_info/131016/, (2019年6月17日アクセス)
- パスコ, 2018, 2018年7月 豪雨災害, https://www.pasco.co.jp/disaster_info/20180709/, (2019年6月17日アクセス)
- 消防庁応急対策室, 2013, 平成25年台風第26号による被害状況等について(第37報),
<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/assets/post729.pdf>, (2019年6月17日アクセス)
- 洲濱智幸・福島雄也・石垣昭寿・古藤智行・早川智洋, 2018, Airbus DS社およびMDA社による平成30年7月豪雨災害の観測対応, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 38, No. 5, pp. 431-434.

著者:

パスコ

洲濱智幸

第6節 治山施設の管理：デジタルカメラを用いた集水井工の維持管理

- ①目的または適応分野：治山施設点検；
- ②プラットフォーム：－；
- ③キーワード：リモート点検、シームレス展開写真、デジタルカメラ、3D モデル

第1項 維持管理の必要性

主要な地すべり防止施設の1つである集水井工は地すべり地内の地下水を排除しすべり面にかかる間隙水圧を低減させることで地すべり活動を抑制する施設である（図4.6.1）。この施設が老朽化すると孔の目詰まり等により集排水能力が低下し、地すべりの抑制効果が低下する恐れがある。また、補強リング（井筒の補強のために水平に設置される円形のH鋼）やライナープレート（井壁に使用される波付の金属板）等の金属部分が腐食すると施設自体の維持が困難となることも考えうる。こうした事態を未然に防止するため、集水井の点検を実施し状態を適切に把握することが重要となる。

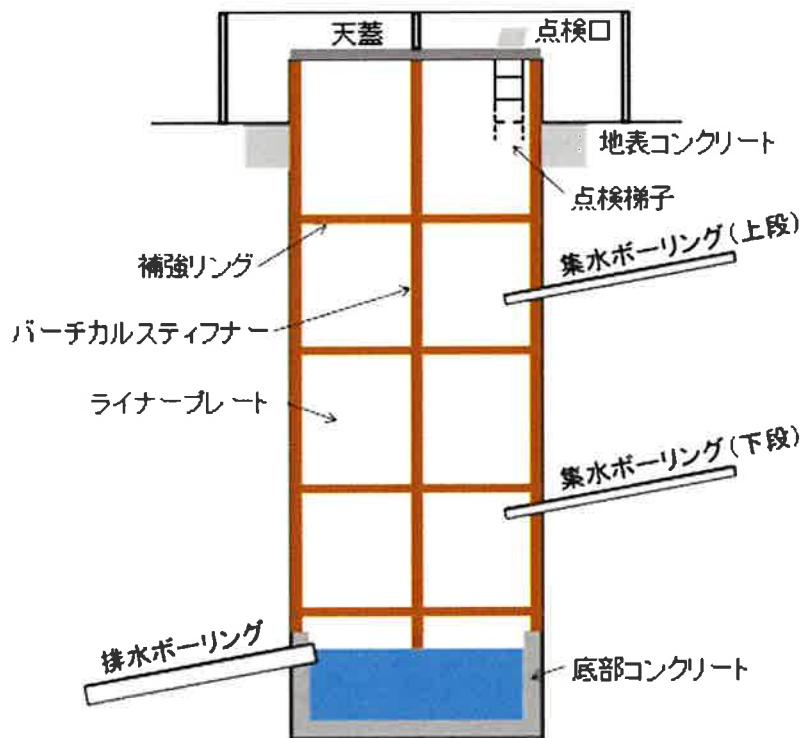


図4.6.1 集水井工の構造図（ライナープレート製）

第2項 維持管理の必要性と実施上の課題

集水井工は地すべり地内の地下水を排除しすべり面にかかる間隙水圧を低減することで地すべり活動を抑制することを目的とした施設である。しかし、施工後長期間が経過した集水井工では集排水ボーリングの目詰まり等によって排水能力の低下などが発生する恐れがある。たとえば、地すべり防止施設の機能保全の手引きでは集水井工に関わる機能低下の原因と影響について図4.6.2のように示している（農林水産省農村振興局農村環境課 2017）。

こうした事態を未然に防止するため、集水井工の状態を把握するための点検を定期的に行う必要がある。しかし、古くに施工された集水井工への立ち入り調査は、酸欠や有毒ガス中毒、転落事故の危険が伴うことがある。そのため、事前調査でこうした事態が危惧された場合は送風機やクレーンなどの大型機械、重機等を準備しなければならない。加えて、古くに施工された集水井などの場

合、既に作業道が失われて車両の進入が困難な箇所も見受けられる。このような箇所についてどのように効率的に点検を進めていくかが今後の課題として挙げられる。

工種		③ 集水井工		
地すべり防止対策工としての効果・機能		すべり面にかかる間隙水圧の低減（※比較的深い地下水を地すべり地外へ速やかに排除）		
施設の機能低下の種類		<ul style="list-style-type: none"> ・集水能力の低下 ・流下能力の低下 ・排出能力の低下 		
施設の機能低下を示す現象	項目	井筒本体の破損・欠損、変位・変形、腐食・劣化	集・排水管の孔口の閉塞や孔内部の目詰まり、破損・欠損	施設周辺に地盤の湿潤や湧水が発生
	内容	地すべり活動による破損や変形、部材の劣化や腐食（錆）等での変形	管の孔口の閉塞や孔内部の目詰まり、破損・欠損により集水・流下能力が低下	集水管の目詰まりや腐食・損傷等により集水・流下能力が低下し、地下水位が上昇
機能低下により想定される地すべり対策施設への影響		地下水を十分に集水・流下・排出できない、集水した水の漏出・再浸透が生じる。		
地すべりに与える影響		集水管の目詰まり等による集水能力の低下、排水管の目詰まりによる井筒内の異常湛水や底張コンクリートの亀裂等による漏出は、地下水位を上昇させる要因となり、地すべりの安定性の低下につながる。		

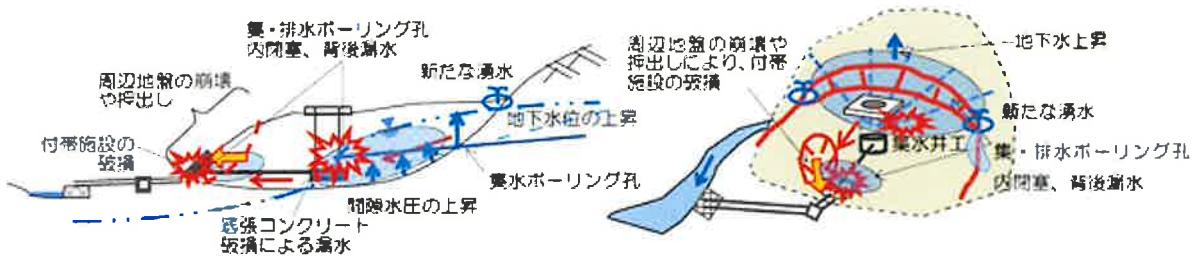


図 4.6.2 想定される原因・機能低下・地すべりへの影響例（農林水産省農村振興局農村環境課 2017）

第3項 近年の維持管理手法

こうした事情を受け、近年では集水井内に立ち入らずに外部から点検を行う手法について研究が進められている。特に天蓋上から井内に様々なカメラを吊り降ろす手法は数多く報告されている。表 4.6.1 に使用されるカメラの種類を示す。

このほか 3D レーザスキャナにより 3D モデルを作成する手法も報告されている（農研機構農村工学研究部門 2018）。こちらでも 3D モデルを作成できるが、地上からの測定の場合深度が深くなればなるほど空白が大きくなる、機器費用が高額、などの課題を有する。

表 4.6.1 井外からの点検に使用されるカメラの種類と特徴

	360 度カメラ	ビデオカメラ	デジタルカメラ
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 1台で全周撮影可能なため、使用機材が少ない 他と比べて画質が低い傾向がある。 画像が歪むため長さ、面積等の定量的な把握が難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> 高画質な映像を撮影可能 1台で1方向しか撮影できないため、全周を撮影するには複数台で、もしくは複数回撮影する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 高画質な静止画を撮影可能 1台で1方向しか撮影できないため、全周を撮影するには複数台で、もしくは複数回撮影する必要がある。
代表機種 イメージ	 KODAK 製 PIXPRO SP360K	 JVC 製 GZ-RX680	 RICOH 製 GR II
目視点検以外の応用例		<ul style="list-style-type: none"> 撮影映像を画像編集ソフトで加工して展開写真を作成（岩佐ほか 2014） 	<ul style="list-style-type: none"> 撮影画像を基に SfM 解析を行い、3D モデルと展開写真を作成（齊藤ほか 2017）

第 4 項 SfM 解析による集水井 3D モデル及び展開写真の作成事例

SfM とは異なる位置から撮影された多数の高画質静止画を基に撮影対象の 3D モデルを作成する技術である。今回はこの解析手法を集水井内に適用し、集水井の 3D モデル及び展開写真を作成した手法を紹介する。

4.6.4.1 高画質静止画の撮影

SfM 技術により 3D モデルを作成するためには対象とする構造物を隙間なく撮影した高画質静止画が大量に必要となる。本手法では安全かつ効率的に井内を撮影するため、天蓋に吊り下げた治具にカメラを固定し、治具を降ろしながら井内を撮影する（図 4.6.3）。なお、前述したとおり撮影対象となる集水井工は車両が進入できない位置にあるものも含まれる。そのため、機材は人力運搬可能なものののみを使用することとした（写真 4.6.1）。なお、移動距離などにもよるが、深さ 20 m 程度の井戸であれば 3 人 1 組で 1 日 4 基程度の撮影が可能である。



図 4.6.3 撮影イメージ



写真 4.6.1 撮影使用機材

4.6.4.2 3D モデル及び展開写真的作成

撮影した高画質静止画を基に SfM 解析を行い、3D モデルを作成する。作成した点群は集水井同様、筒状となるため、点群処理ソフトを用いて展開することでシームレスな展開写真的作成が可能となる（図 4.6.4）。

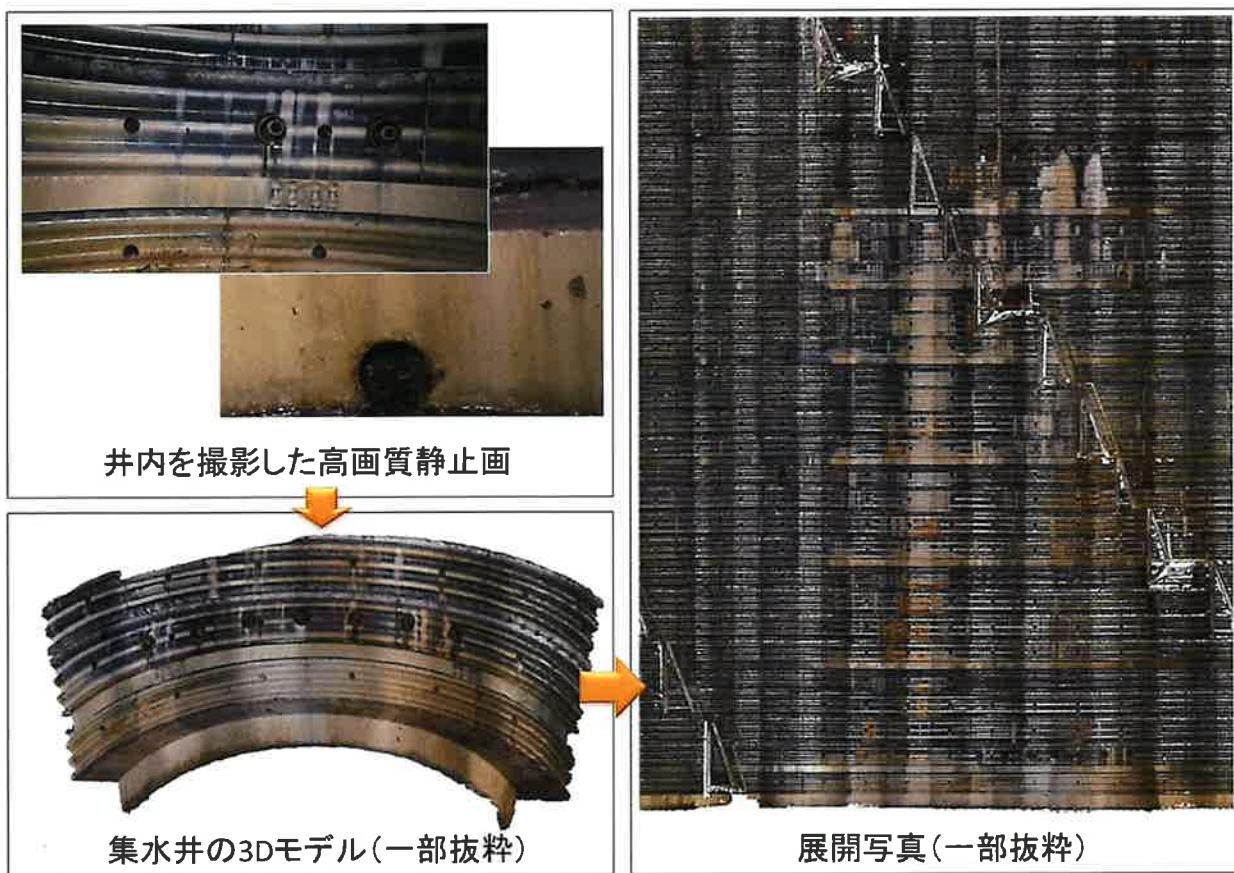


図 4.6.4 3D モデル及びシームレス展開写真的作成事例（齊藤ほか、2017）

4.6.4.3 従来の点検手法との比較

本手法を用いた場合の効果を従来の手法と点検項目毎に比較した（表 4.6.2）。これらの点検項目については同等以上の効果が得られることを確認できた。

表 4.6.2 従来の手法との効果の比較

点検項目	従来の点検方法	本手法の効果
集排水ボーリングの閉塞状況	<ul style="list-style-type: none"> 従来は井内に立ち入っての目視点検 	<ul style="list-style-type: none"> 撮影画像から集排水ボーリングの閉塞状況も確認可能 井内に立ち入らず安全に目視点検と同等の効果が得られる。
井筒の変形状況	<ul style="list-style-type: none"> 変状が発生した位置、変化量を直接もしくは測量等で測定して記録。 足場が不安定で、正確な記録を残すのは困難。 	<ul style="list-style-type: none"> 集水井全体の形状を 3D モデルとして作成。 定期的に作成すれば変形の程度を時系列で追うことが可能となる。
異常（発錆等）の位置、範囲等	<ul style="list-style-type: none"> 発錆位置、範囲をスケッチとして記録 作業者の技術力により成果品質が大きく左右される。 	<ul style="list-style-type: none"> 展開写真を作成 スケッチと比較して高画質。 作業者に寄らず均質な成果が得られる。

4.6.4.4 今後の展望

今後は 3D モデルの精密な精度検証を行うとともに、エキスパンドメタル以外の天蓋やセグメント式の井戸での検証を進め、より広い井戸で実施できるよう改良を進めていく予定である。

引用文献

- 岩佐直人ほか, 2014, ライナープレート集水井の腐食診断フローの提案. 第 53 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.104-105.
- 農研機構農村工学研究部門, 2018, 集水井の調査・診断マニュアル, <http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kanmin/pdf/kyowa-01.pdf>, (2019 年 5 月 8 日アクセス)
- 農林水産省農村振興局農村環境課, 2017, 地すべり防止施設の機能保全の手引き, http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/attach/pdf/index-80.pdf, (2019 年 5 月 8 日アクセス)
- 齊藤雅志ほか, 2017, 市販カメラを用いた既設集水井工の 3D モデルとシームレス展開写真の作成手法の開発. 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.756-757.

著者 :

国土防災技術

齊藤雅志

第7節 空中写真の立体視による森林境界管理

- ①目的または適応分野：森林管理、林地境界、土地利用遍歴；
- ②プラットフォーム：航空機、UAV；
- ③キーワード：空中写真、立体視、GIS、林分計測

第1項 はじめに（何が難しいのか）

山の境界が曖昧になっている。図面と現地が合わず判断のできないところが多い。現代社会は紙図面に書かれた線図が基本となっている。この図面の起源は江戸時代の「検地」で、縄と角度により紙面に筆で画かれた「絵図」、明治期には「地租改正」で地図が作成され公図の元ができた。そして、昭和期の「国土調査」で測量機器を用いた地籍図が作成されたが、これらは全国をすべて詳細に網羅しているものではなく、地域によってもその整備状況は様々である。森林の管理も同様で、簡易なポケットコンパスを用いて測量や作図が行われ、長年更新されて今日の図面に至っている。その結果、冒頭のような問題は認知されつつも、図面は図面、現地は現地とされ、人間（現場担当者）が両者のバッファとなってきた。紙の図面情報は現在ではパソコン上で管理されるものの、基本的な仕組みや精度は以前と何も変わっていないため図面情報そのものの信ぴょう性が問われている。図面の境界線分は定期的に更新されるが、いつ誰がどのような方法や精度で作成されたものか、その履歴は図面からは読み取れないのである。

この図面情報をより高めるには、現地に詳しい所有者や古老の情報が必須となるが、過疎化や世代交代による少子高齢化でその情報も得られず、情報がなければ「誰にも決められない」もどかしさなど「境界確定」をより複雑かつ悩ましい問題となっている。

第2項 今のことばよいか

現在、境界確定事業が全国的に実施されている。既存の図面情報を元に GPS を用いて現地を再踏査し、境界に杭を打設し図面情報を更新する内容である。紙図面情報より位置精度は改善されるものの、現行の方式でも「現地は現地、図面は図面」という根本的な課題は解消されず、将来、再び再測を余儀なくされるやり方ではないだろうか。その技術的な課題点をいくつか示すと、

- ・**図面の問題**：図面情報は地形図を元にしているが、もともと地形図の等高線は数 m の誤差を含んでいる。
- ・**オルソの問題**：客観的情報としてオルソ画像を背景に用いる場合がある。このオルソ画像も m 単位の誤差が含まれ修整された合成画像が使用されている。
- ・**GPS の問題**：GPS は位置情報を知る便利な道具である。しかし、あくまで衛星測位システムによる推定座標値で、地上のある 1 点を正確に永久に示すものではない。地震がある度にその点は移動しており、近傍地を示すだけの数値では再度杭を探し、もし見失えば再度検証が必要となる。
- ・**経費の問題**：所有者など関係者が立ち会い「境界に杭を打ち、それを測量」となっている。しかし、これを傾斜のある山地で全面的に行うことは大変な労力と時間と経費を要するものである。

第3項 効果的な方法とは

限られた情報を最大限に活かし、限られた予算で次世代に負担をかけない管理方法とは何か。図 4.7.1 には、叶えられる様々な事柄を列挙し 3 つに大別した。そこから 3 つの条件と 3 つの期待を示した。それは「事務所に居ながらにして、現地を手に取るように把握し、計測できること」である。可能な限り室内で行ない、現在の図面や過去の遍歴情報を一元的に対比でき、複数の人と確認や、いつでも再現できる方式である。現地で計測するのと同等かそれ以上の作業効率化が室内で行えればこれ以上の効率化はない。これらの「条件」や「期待」をすべて満たす唯一の方法が「空中写真の立体視化」である（中北 2018）。

5.4 現場作業を軽減する外業対応型GISへ

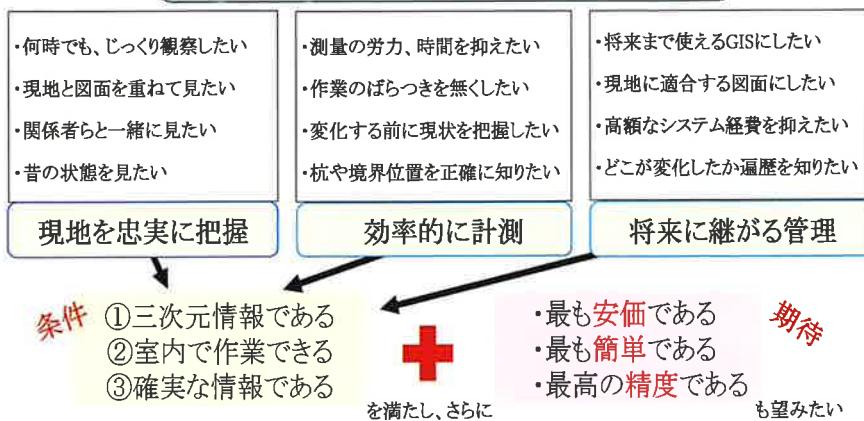
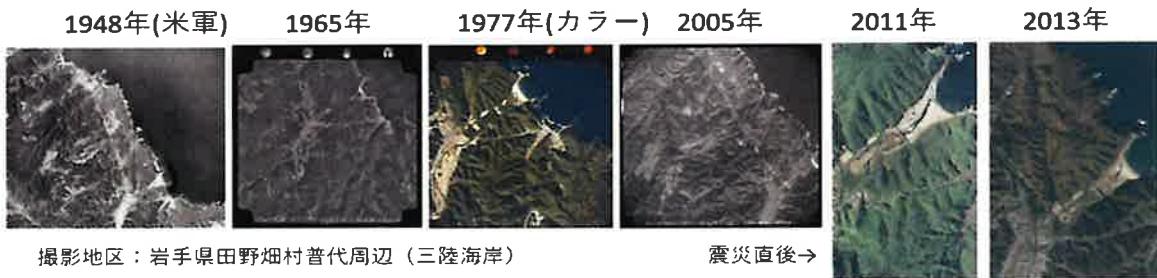


図 4.7.1 現在の課題と望むべき管理方法とは

4.7.3.1 空中写真を立体視して使う

映像情報は客観的である。我が国は終戦後から定期的に空中写真が撮影されているため、およそ60年間に及ぶ土地利用の変遷を捉えることができる（図4.7.2）。写真是2次元の画像のためそのままでは手に取るような把握にはならない。解像度を高く（より鮮明な）してもできないのは「高さ」情報がないからである。しかし、この2次元の写真を2枚使用し、立体視させると「高さ」が再現され（=三次元化）、眼前に忠実な現地のミニチュアモデル（日本流に言うならば箱庭）が現れるのである。この箱庭では傾斜を考慮して計測することもできるなど最も優れた再現法になる。かつて写真を立体視するには高額な専用機器が必要であったが近年、普通のパソコンとわずかな機器構成で容易に立体視できるようになった。



<----- フィルムカメラ -----> <= デジタルカメラ = >

図 4.7.2 戦後から定期的に空撮してきた空中写真の歴史

現地を手に取るように計測するには、現地に行くことが一番と思われるが、森林や山地では必ずしもそうではない。もし、箱庭が精巧で現地計測に匹敵する精度で計測できれば大幅な作業効率にも繋がる。境界確定では、所有者など関係者の方々と現地で測量するのと同等のことが箱庭上で（=室内で）実施できれば大きな省力化となる。各種の図面も箱庭上に表示できれば図面の問題点も明確となる。それが空中写真の立体視化で可能になるのである。

4.7.3.2 空中写真による境界線確定事例

時系列の空中写真画像と森林管理図面線図を対比させた事例（中北 2014）を、林班界（右列）と小班界（左列）について示す（図4.7.3）。空中写真是林野庁および国土地理院撮影のもので、2011年、2005年、1965年撮影の写真を用いた。図中に示す空中写真是いずれもオルソではなく空中写真そのものである。そこに3次元化した森林管理図の線情報（三次元shpファイル）を重ねている。（誌面では立体視が再現できないため片側画像だけで示す）。

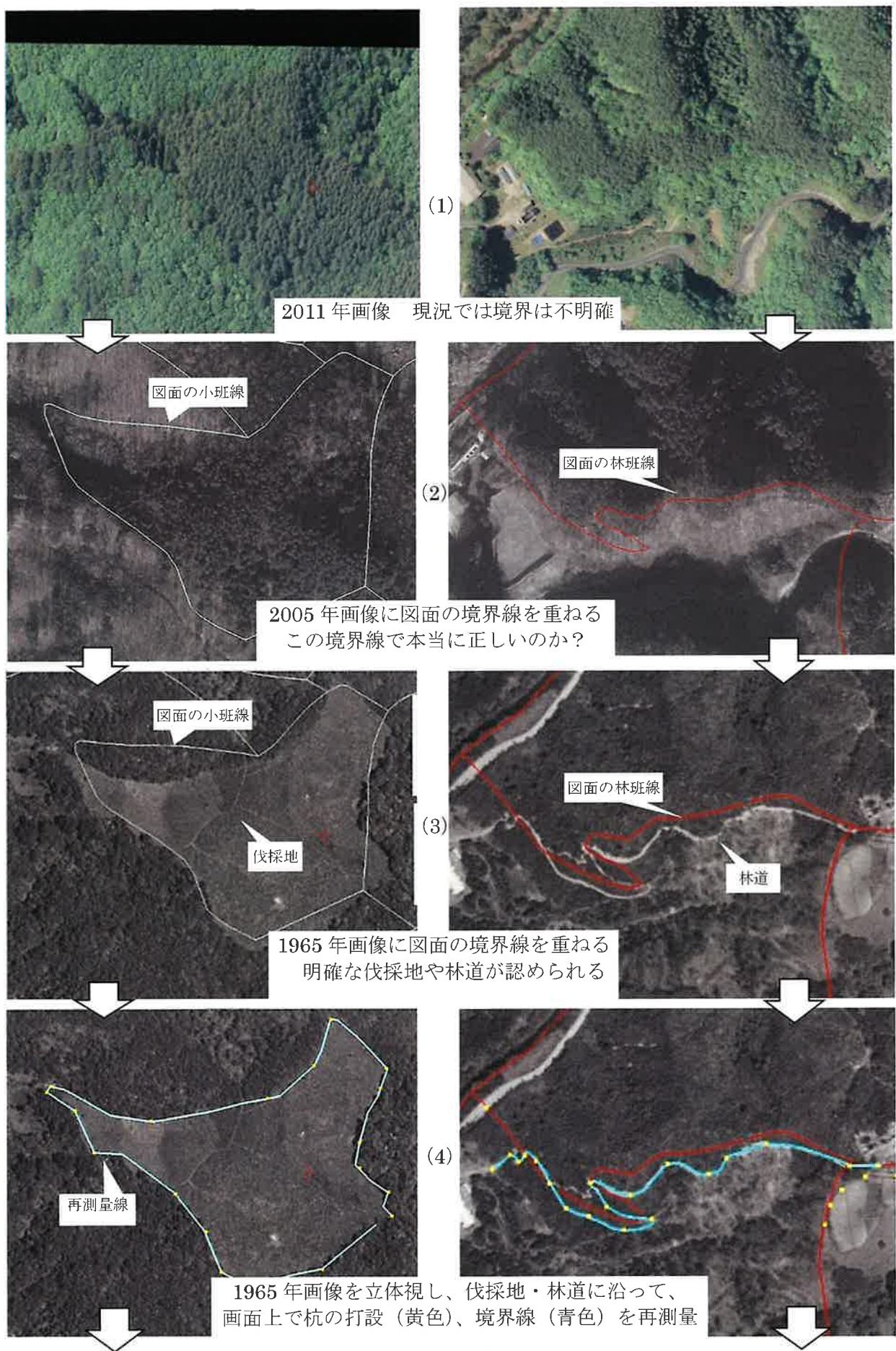


図 4.7.3 過去の空中写真を活用した境界線の再確認例

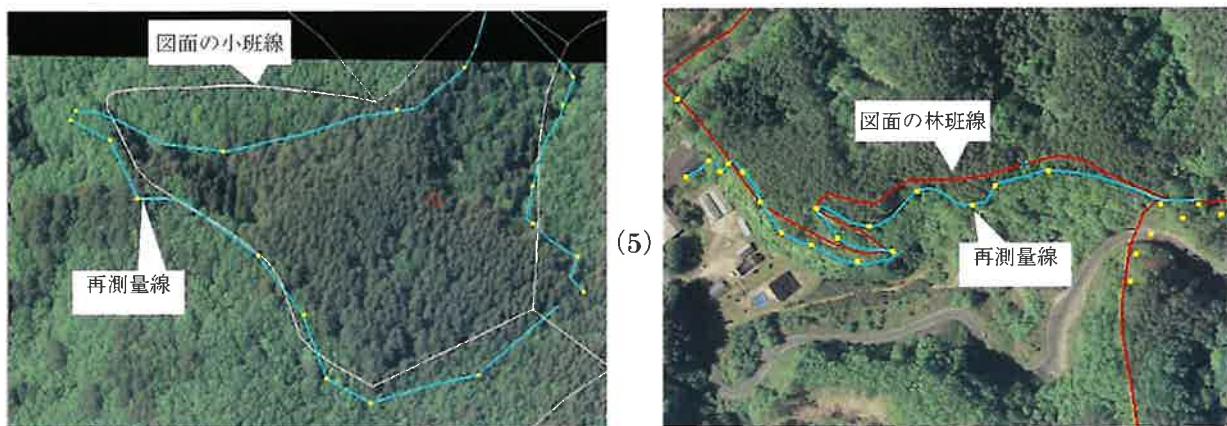


図 4.7.4 図面の境界線、1965 年再測量線を最新画像(2011 年)上に表示
再測量した杭も測量線も現況と良く適合している。

図 4.7.3(1)は、2011 年国土地理院撮影のデジタルカメラ画像である。左側の小班界例は尾根上にある 1 つの小班付近の状況である。右側の林班界線例は、画像中央部に横断する林班があると思われる地域である。両者ともその境は曖昧な状態である。図 4.7.3(2)は、2005 年林野庁撮影の白黒フィルム画像である。撮影が 12 月のため広葉樹が落葉し林床の状態も見やすくなっている。この画像に、管理図面上の小班線と林班線を重ねた。右側では林班線より少し下方に針葉樹と広葉樹の境に道のようなものがぼんやりと見えている。図 4.7.3(3)は、1965 年林野庁撮影の白黒フィルム画像である。小班はこの時期に伐採されていたことが明確にわかる。また、林班も明確な林道が見えている。推測になるが、いずれも当時の担当者や所有者が了解の上で作業が行われており、その現場状況を測量、図化してこれまで図面上で管理されてきたものと思われる。図 4.7.3(4)は、1965 年の立体画像上で、伐採地および林道に沿って、杭を打設(黄点)、境界線を新設(青色)した。図 4.7.4(5)は、2011 年のカラー画像上で、1965 年画像上で再測量した、杭と境界線を重ねた。さらに、図面上の線も重ねた。約 60 余年前の画像上で再測量した境界は、2011 年画像上でも現地としっかり適合していることが明確である。立体視画面上に打設した杭、境界線は、移動も紛失もしない。仮に、現地の状態が変わらうとも、永久にその場所を示すため、敢えて現地に「杭」を打つ必要はない。

第 4 項 外業対応型の GIS と活かす

4.7.3.2 の事例で示した図面の境界線や再測量した線は、立体視専用のファイルではなく、通常の GIS で使用している shp ファイルと同じである。図面の管理や業務の効率化に GIS (地理情報システム) が全国で導入されている。現在の GIS を表すと、図面情報と帳簿情報を同時に取り扱え、図面の更新や修正作業が迅速にでき、統計的な集計や計測が行え、さまざまな条件によるシミュレーションを行なって森林計画や施業管理業務に活用することを目的としている。しかしこれは、現地で計測してきたデータを「事務所内での作業（内業）でコンピュータ化する」いわば「内業型 GIS」である。この GIS を、野外で行う測量（面積、距離、傾斜など）や森林資源調査（位置、樹高、枯損木など）が GIS 上で行える（代替できる）、言いかえれば、外業にも対応した GIS にすることで境界確定への作業がより効果的行えるのである。外業がすべて不要とはならないものの、大幅な効率化を可能にさせるのが空中写真の立体視利用との併用である。では、現行の GIS で外業型に対応できないかというと、それは厳しい。なぜなら、GIS の基盤とするものが地形図のため、地形図の位置精度に依存するからである（図 4.7.5）。

GIS の背景画像として多用されるオルソフォトは、地形情報と合わせることで現地の概況を容易に把握できるものではある。しかし、オルソフォトは、写真から高さ情報を省き、地図に合わせるために修整（修正ではない）が行われた合成画像のため、位置精度としては曖昧な媒体である。オルソからは元画像にはもどらず、その作成方法も使用ソフトや時代により異なる。位置情報として用

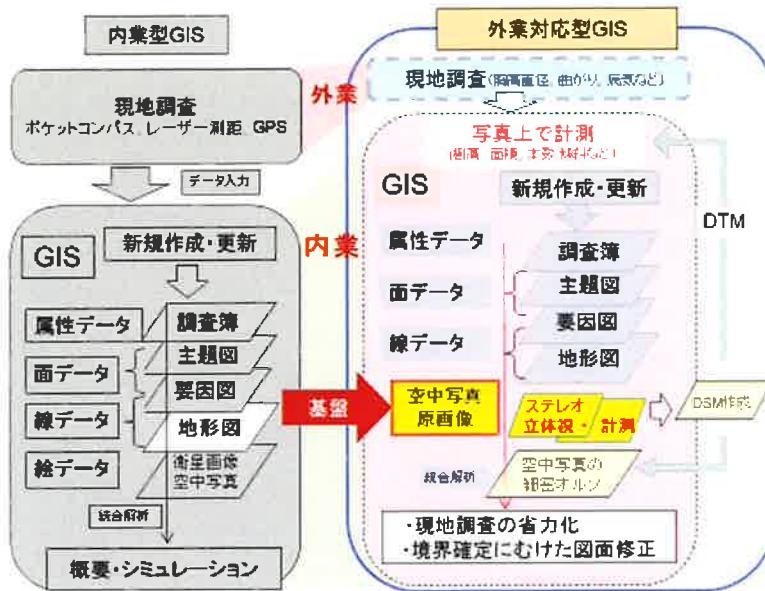


図 4.7.5 内業型 GIS から外業対応型の GIS へ

いる GPS も同様である。GPS は目的地の近くまで行く手段としては便利であるが、あくまで近傍点を推定する数値にすぎない。このように、曖昧な情報はいくら重ねても、シミュレーションには使用できるものの、現地測量の代替や境界確定など次世代に繋がる重要な課題には相応しくない。

現地を忠実に再現（箱庭）し、他の情報の検証にもなる搖るぎない再現能力を持つ情報を GIS の基盤に据えれば「外業対応型の GIS」に発展させられるのである。平地はもちろん傾斜のある山地でも「真」の現地をありのままに再現するレイヤを基盤とすることが必要で、それを実現でき、かつもっとも単純な方法が空中写真の立体視利用である。過去何十年およぶ現地の変遷を再現し、それを多人数で客観的に確認し、現地測量と同等の精度で測量が行える。既存の図面情報との違いも明確に示す。空中写真の「立体視利用」が最も効率的で費用対効果の高い方法になる理由である。

ここに示した方法は、これまでの約 60 年間の客観的な情報を最大限に活かす方法であるが、それは先人たちが定期的に空中写真を撮影してきたからである。現在最も危惧することは、空中写真の重要性が理解されず、近年、その定期撮影が途絶えていることである。将来の世代を考え今ある現状を正確に次世代に伝えるためには、立体視が可能な空中写真を定期的に撮影していくという百年の計を肝に据えることである。将来、衛星など他の媒体が空中写真の代替になる精度を有すれば、その時点で交代すればよいのであるが、それはまだ先である。

引用文献

- 中北理, 2011, 将来に活きる森林 GIS を目指して, 森林技術, No.337, pp.30-33.
 中北理・齋藤武史・中根貴雄・田代隼人, 2013, 東日本大震災における空中写真 3 次元計測の役割, 関東森林研究, Vol. 64, No. 2, pp.89-90.
 中北理, 2014, 空中写真のさらなる応用をめざせ, 森林技術, No.865, pp.30-32.
 中北理, 2018, 次世代につながる空中写真, 森林技術, No.911, 913, 915, 917, pp.24-25, No. 919, pp.24-25.

第5章 展望編：森林調査の将来

第1節 土砂移動現象とリモートセンシング技術

①目的または適応分野：土砂移動，土砂災害，SDGs（持続可能な開発目標）；

②プラットフォーム：－；

③キーワード：森林管理，斜面崩壊

第1項 土砂移動研究におけるリモートセンシング技術

リモートセンシング技術が斜面崩壊，地すべり，土石流等の土砂移動現象に関する調査・研究において，有効であることは論ずるまでもない事実であるが，土砂移動現象に関する調査・研究の目的を，大きく2つに区分すると以下のようになる。

目的1：土砂移動現象とその発生場・非発生場の把握

目的2：土砂移動現象の予知・予測

無論，ここで示した2つの目的は目的1と目的2が並列に存在するということではなく，目的1によって得られる土砂移動現象と発生場・非発生場の関係から目的2を達成することによって，土砂移動現象が人間社会に与える影響を将来にわたって評価・予測し，更にはそこから得られる結果を用いて持続的な社会の発展に資することが最終目標となる。この最終目標は，国連で国際合意に達した2016年から2030年までの世界の長期目標SDGs（Sustainable Development Goals，持続可能な開発目標）と対応することは論ずるまでもない。なおSDGsは17の持続可能な開発目標を掲げているが，そのうちの1つに「陸域生態系の保護，回復，持続可能な利用の推進，持続可能な森林の経営，砂漠化への対処，ならびに土地の劣化の阻止・回復及び生物多様性の損失を阻止する」（国際連合広報センター 2019）がある。言い換えれば目的1，2は最終目標を達成する為の手段であり，さらにリモートセンシング技術はこの手段を構築する道具の1つである。

道具としてのリモートセンシング技術の主たる有効性は，広域空間を対象に，地形，植生等の素因の空間分布の違い及び時間的変化を把握することによって得られた情報と土砂移動現象の関係を関連づけて検討できることにある。例えばYamakoshi and Suwa(2000)は，雲仙普賢岳を対象に，噴火前後の1994年から1999年にかけての植生変化がランドサットによる正規化植生指標（NDVI）と対応し，噴火終了後の植生回復がNDVIの増加として検出されることを示しているが，同地域のほぼ同期間を対象に土石流発生降雨特性の経年変化について検討した寺本ら(2003)による研究結果とあわせてみると，土石流発生の降雨閾値が増加している傾向にあることを示しており，Yamakoshi and Suwa(2000)が指摘したNDVIの時間変化と調和的に対応していることが分かる（図5.1.1参照）。

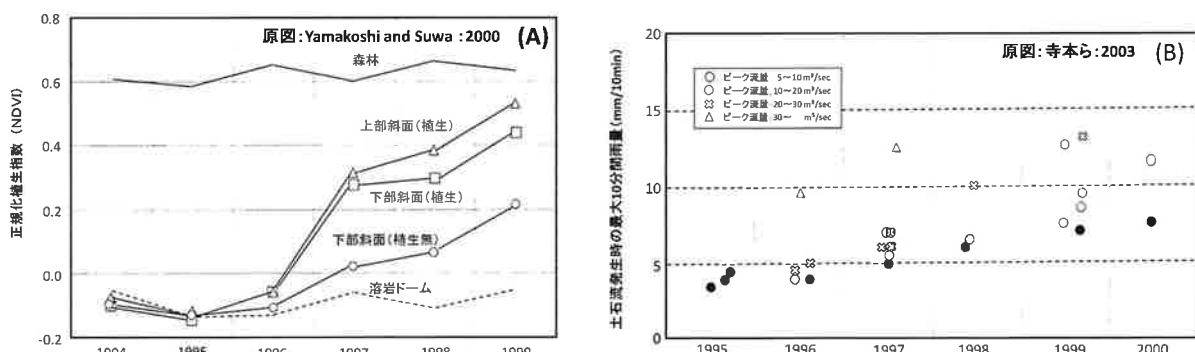


図5.1.1 雲仙普賢岳におけるNDVIの経年変化（A）及び土石流発生降雨特性の経年変化（B）
(A) :Yamakoshi and Suwa(2000)より改変引用，(B) :寺本ら(2003)より改変引用

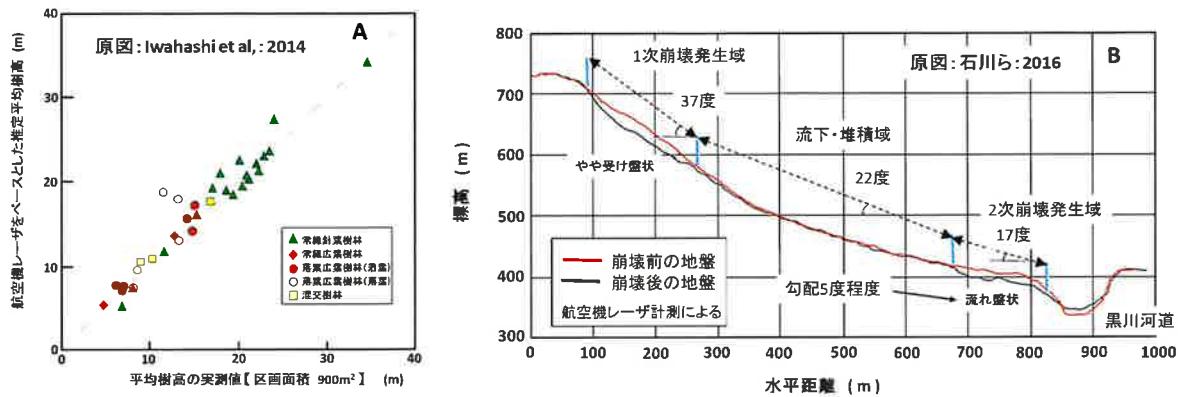


図 5.1.2 LiDAR 測量による森林調査 (A) および崩壊地調査 (B) の一例

(A) Iwahashi et al.(2014)より改変引用, (B) 石川ら(2016) より改変引用

ここでリモートセンシング技術の発展方向性を簡単に述べれば、対象範囲に対してより詳細な地形・植生の情報取得が可能になることを目指しているといえよう。例えばランドサットによるNDVIの空間分解能は約30 mであるのに対して、近年では空間分解能1m以下の情報取得が当然のように行われている。具体的には合成開口レーダ、LiDAR測量、多視点ステレオ写真測量等の技術発展によって、地形、植生、土砂移動範囲、あるいは土砂移動の経時変化等のより詳細な把握が可能となっている。例えば広域におけるSAR画像を用いた研究に関して、古田（2016）は地すべり性の変動であれば数cm単位で検出可能であること、林（2017）は数100km²の画像範囲から、半日程度で土砂移動範囲の絞込みが可能であることを指摘している。またLiDAR測量の技術発展によって、地上部植生量の直接的な把握や土砂移動範囲の詳細な検討が可能となっている。これらの点について、Iwahashiら(2014)は、森林調査の際に地上部植生量の代表値と見なせる平均樹高が取得可能であること（図5.1.2A参照）を指摘し、石川ら(2016)は2016年の熊本地震によって発生した阿蘇大橋付近の斜面崩壊についてその前後の地形断面変化から斜面崩壊が1次崩壊と2次崩壊の2つに区分されること（図5.1.2B参照）を示している。

以上のようにリモートセンシング技術は、地形・植生等の空間分布とその時間変化によって規定される環境要因の違いと土砂移動現象の対応関係を、より詳細な時空間スケールで検討できるよう観測精度の向上を1つの目的として発展してきたといえる。ここで環境要因の違いと土砂移動の対応関係を検討する際に用いられる手法についてモデル別に大きく2つに区分すると以下のようなになる。

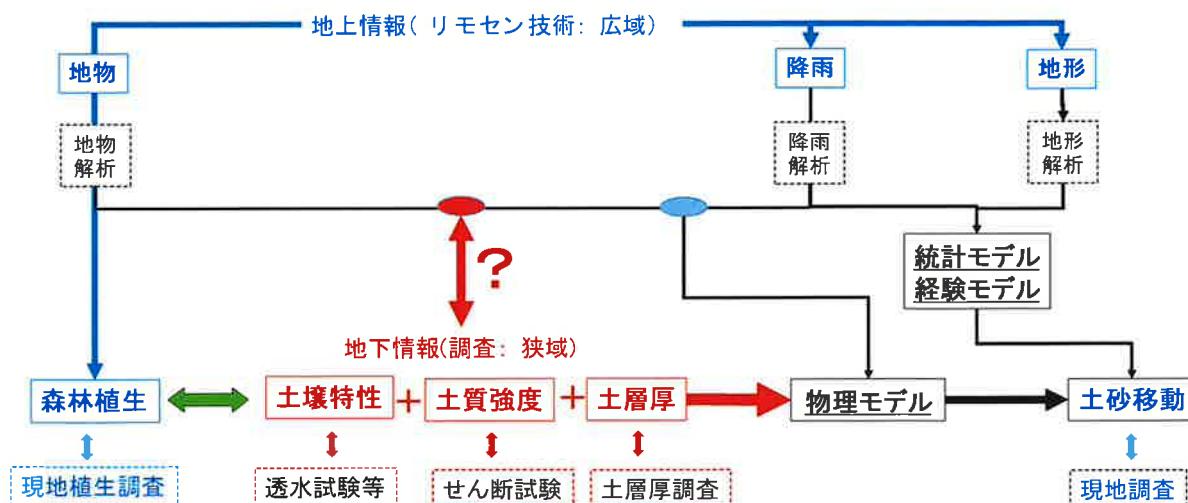


図 5.1.3 土砂移動と使用モデルの対応概略図

手法1：統計・経験モデルによるもの

手法2：物理モデルによるもの

両者の違いは、手法1が地形、植生、降雨等の要因が土砂移動に与える影響を統計的あるいは応答的な側面から検討することを主眼にするのに対して、手法2はその影響を土砂移動現象の物理的な機構の面から検討することを主眼にするものであるといえる。また手法1は数10 km²以上の広域における地表状態と土砂移動現象の関係性を検討する際に用いられることが多いのに対して、手法2は数km²以下あるいは個別斜面単位の狭域における両者の関係性を検討する際に用いられることが多い。これらのこと踏まえ、図5.1.3に土砂移動と使用モデルの対応概略図を示す。

図5.1.3に示すように統計・経験モデルを用いて検討する場合は勿論、物理モデルでは広域における降雨・地形・地物の地上情報を如何に精度よく取得するかが極めて重要となる。すなわち手法1において、リモートセンシング技術の発展そのものが土砂移動研究の進展に直接的に反映されやすい手法であるといえる。また実用的な側面からは広域範囲を対象としたハザードマップ等における精度の向上等が期待される。一方で手法2において必要とされる土層厚、土質強度等の地下情報をリモートセンシング技術によって直接的に取得することは不可能である。現状では地下情報は現地調査等が可能な限定された狭い空間範囲でしか得ることが出来ないため、手法2による研究成果を実用的な側面から手法1と同様に広域に対して適用するためには、リモートセンシング技術の発展によって取得することが可能となった情報と狭域で直接的に得られる情報との関係性を明らかにしていくことが重要となる(図5.1.3の?部分)。言い換えれば物理モデルのパラメータにリモートセンシング等の手段によって得られた広域情報をどのように組み込んでいくかが必要となる。

さらに、ここから得られた結果を、本節の序段で示したSDGsにつなげることを考慮すると、リモートセンシング技術等との対応関係は図5.1.4に示す様になる。本図は、空間的な違いが土砂移動現象に与える影響を検討する上では、単一時期の空間分布から検討可能であるが、それを将来の予測につなげるためには、その空間の時系列変化を用いて検討することが必要であることを示している。なお本図に示した土地利用区分において、植生の時系列変化あるいは空間的な違いが土砂移動現象に与える影響は大きいことは周知の事実である。特に森林は経験価値としての自然環境および交換価値としての経済的な資源の2つの価値を有していることから、その状態は社会の影響を受けて空間的にも時間的にも大きく変動する要素であるといえよう。この点について、森林植生の空間的な違い(図5.1.4の緑枠箇所)と時間的な違い(図5.1.4の赤枠箇所)が土砂移動現象の1つで

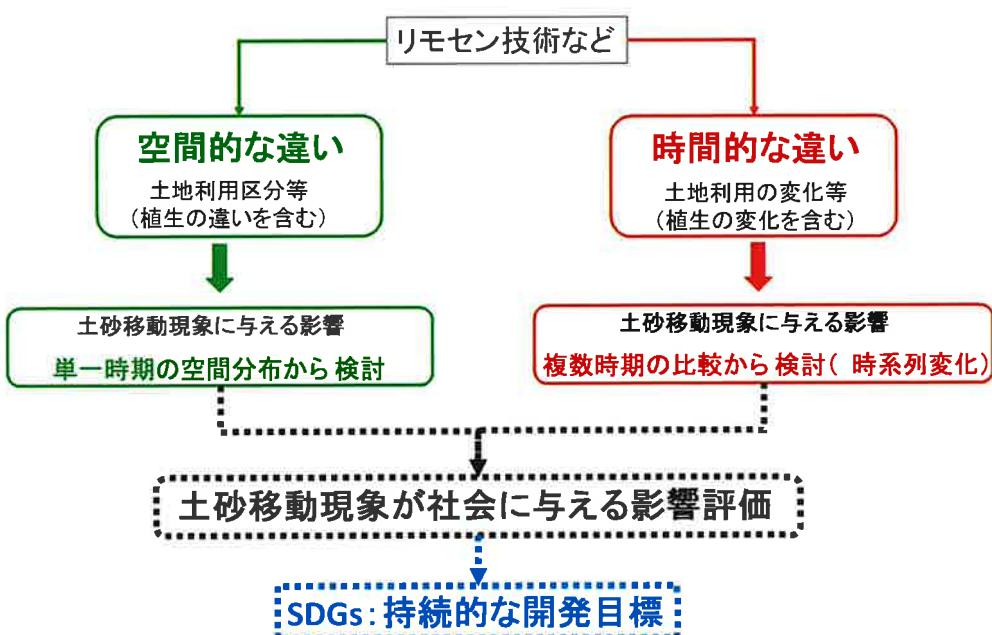


図5.1.4 リモートセンシング技術等と最終目標(SDGs)との対応関係

ある斜面崩壊に与える影響について簡単に検討した事例（執印ら 2013）を次節で紹介する。

第2項 森林植生の空間的および時間的な違いが斜面崩壊に与える影響についての簡単な検討事例

検討対象として、宇都宮大学船生（ふにゅう）演習林のヒノキ人工林を選定した。本演習林の総面積約 532 ha であり、ヒノキの人工林を主体として構成されている林分であり、解析期間は 1979 年から 2011 年の 33 年間である。本演習林内のヒノキ人工林分を解析対象地として選定した理由は、1) 森林管理のための基本情報である森林簿が整備されていること、2) 33 年間の対象期間の中で唯一 1998 年の 8 月末の台風 4 号による集中豪雨によって、解析対象地を中心とした 36 箇所の複数地点で表層崩壊が発生しており（宇都宮大学演習林研究部 1999），森林簿情報と照合可能な状態で整備されていること、3) 分布型崩壊モデルの適用に最低限必要な数値標高地形図が LiDAR 計測によって 10 m グリッドで整備されていること、以上の 3 点による。降雨データとして船生演習林近傍に設置されている気象庁塩谷アメダス観測点（北緯 36 度 45 分、東経 139 度 50 分、標高 225 m）の時間雨量データを使用した。適用モデルは、Okimura and Ichikawa (1985) によって提示された表面地形による地下水の飽和側方流動過程を考慮した分布型崩壊モデルを使用した。本モデルは、降雨-地下水変換過程、及び崩壊斜面抽出過程の 2 つの計算過程によって構成されている。計算にあたっては各降雨イベントにおける時間雨量をモデルへの入力とするが、表層崩壊が発生する可能性の高い条件、すなわち飽和側方流動が卓越した流域が十分に湿潤状態にある場合を想定していることから、極値解析の結果をもとに計算の開始条件として、降雨開始からの積算雨量が 146mm に達した時点から計算を開始している。

1998 年の 8 月末に発生した集中豪雨（福島県南部・那須豪雨）によって各地で被害が発生した。同演習林内においても本集中豪雨によって 36 箇所の地点で表層崩壊が確認されている（宇都宮大学演習林研究部 1999）ことを前述したが、崩壊が発生した地点におけるヒノキ林分の林齢とヒノキ林全体の林齢の頻度分布を示したもの（図 5.1.5）を示す。

本図から演習林ヒノキ林全体の林齢頻度分布のピークは 40 年付近にあるが、崩壊が発生した林齢の頻度分布は 20 年にあり、若齢側にシフトしていることが分かる。このことは、古くから指摘されているように樹木の成長に対応した地下部の根系量の違いによるものであり（北村・難波 1968），言い換えれば林齢の空間的な違いが 1998 年の斜面崩壊に影響を与えていたことを示している。また、1998 年時点における林齢分布は解析期間の 1979 年から 2011 年までの間に変化していることは自明である。次節では林齢の空間的な違いが斜面崩壊発生に与える影響について検討した結果を示す。これは図 5.1.4 に

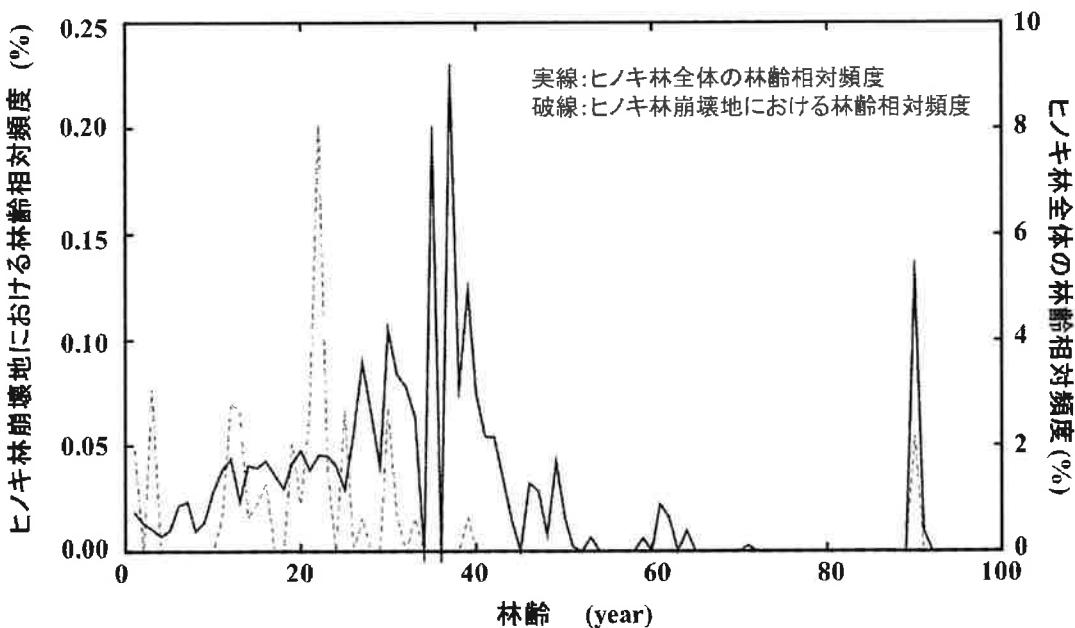


図 5.1.5 船生演習林ヒノキ林における崩壊地およびヒノキ林全体の林齢相対頻度分布

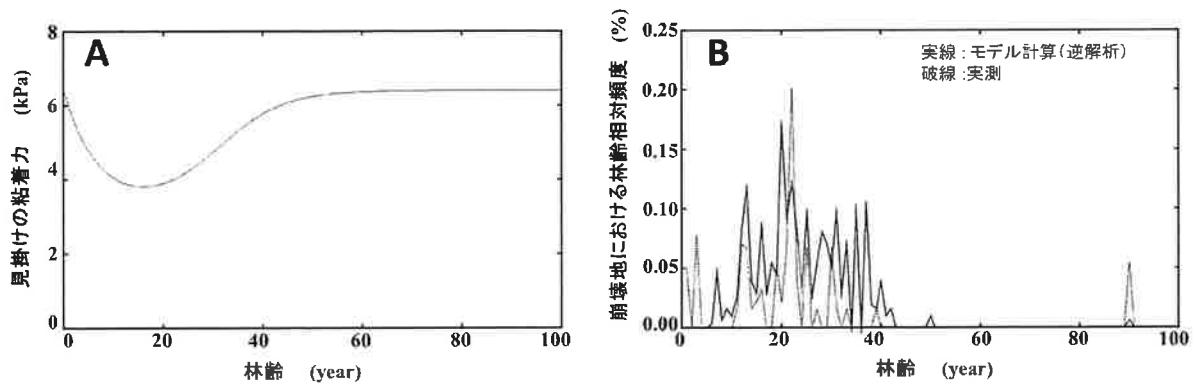


図 5.1.6 推定された林齢一見掛けの粘着力関係 (A) と実測との対応関係 (B)

示した緑枠の箇所および図 5.1.3 に示す地上情報から地下情報を推定する箇所に対応している。

5.1.2.1 林齢の空間的な違いが斜面崩壊発生に与える影響

図 5.1.5 に示した関係を再現するように分布型モデルを使用して地下情報の推定を行った。具体的には土質強度パラメータの 1 つである見かけの粘着力のみ（他の地下情報に関するパラメータはすべて固定された均一値を設定）を調整して実測で得られている林齢とみかけの粘着力の対応関係を逆解析によって再現することによって推定している。図 5.1.6A にその推定結果を図 5.1.6B に実測との対応関係を示す。図 5.1.6A は地上情報から得られる林齢一崩壊関係をもとに得られた結果である。なお崩壊が発生した 1998 年の的中率は約 5.3 % であり決して高いものではないが、林齢に関わらず一定の有効粘着力 (5.04 kPa) を与えた場合の的中率 (約 1.7%) と比較して向上していることを確認している。以上のこととは、図 5.1.3 に示した地下情報を直接的に取得せずとも、地上部の情報から広域の地下情報が推定できる可能性があることを示唆している。但しこれは崩壊発生年の 1998 年時点での林齢空間分布をもとに得られた結果であり、その時間的な違い（時系列の変化）の面を含めて、本結果の妥当性を示唆するものではないことは自明である。そこで解析期間の 1979 年から 2011 年の 33 年間における林齢空間分布の時間的な違いを含めて検討した結果（図 5.1.4 の赤枠箇所に対応）を次節に示す。

5.1.2.2 林齢空間分布の時間的な違いが斜面崩壊発生に与える影響

検討は 2 つの面から行った。1 つは 33 年間の降雨とその時の林齢の空間分布に対応した崩壊面積の時系列変化であり、もう 1 つは実際に崩壊が発生した 1998 年の豪雨を与えた時の各年における崩壊面積

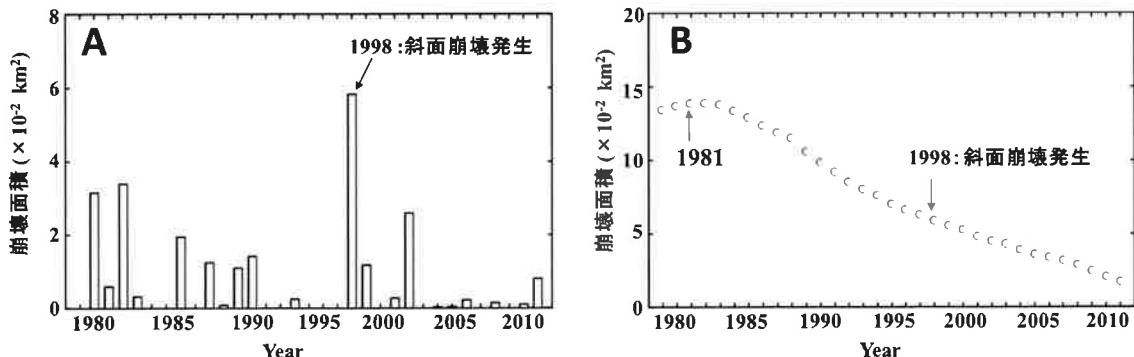


図 5.1.7 各年の降雨および林齢空間分布に対応した崩壊面積の時系列変化 (A) 及び 1998 年の降雨を入力値としたときの各年の林齢空間分布に対応した崩壊面積の時系列変化 (B)

の時系列変化である。なお崩壊面積はモデル計算から得られるものを使用し、林齢に対応したみかけの粘着力は前節で得られた結果を使用している。結果を図 5.1.7 に示す。

図 5.1.7A から実際に斜面崩壊が発生した年の 1998 年の崩壊面積が最大になっていることが分かる。仮にそれ以外の年が最大値を示したのであれば、前節で得られた結果の妥当性は担保されないことになるが、この結果は前節の結果のある程度までの妥当性を示唆している。図 5.1.7B は 1998 年の豪雨が他の年に発生した場合を仮定したものであるが、本図から林齢の時系列変化とともに崩壊面積が減少していくことが分かる。次に図 5.1.8 における 1981 年と 1998 年の林齢空間分布に対応した崩壊分布を図 5.1.8 に示す。本図より林齢の時空間分布の変化に伴って崩壊箇所（安全 1 未満と計算される領域）が変化することが確認される。以上のこととは施業等の人為の影響を強く受ける森林の時空間変化が斜面崩壊発生に与える影響を、本手法によって定量化できる可能性があることを示すものである。

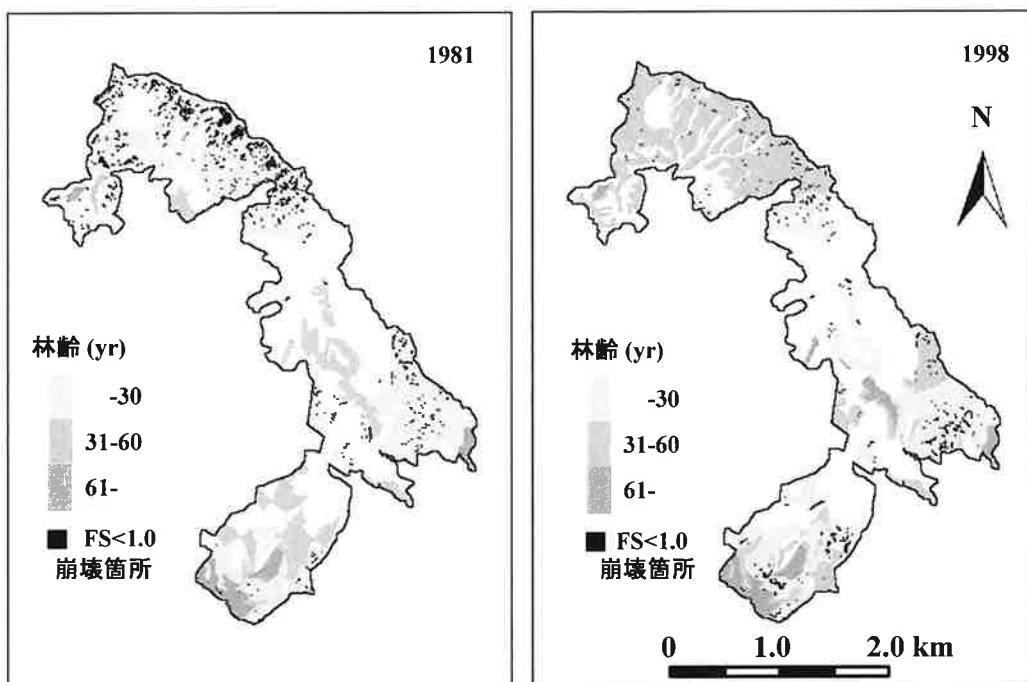


図 5.1.8 図 5.1.7B に対応した 1981 年および 1998 年の崩壊箇所の空間分布

第 3 項 おわりに

最初にリモートセンシング技術が SDGs に対応するものであることを示した。ただし SDGs は 2016 年から 2030 年の未来に対して定められたものであることから第 2 項に示した検討事例は直接的に最終目標に繋がるものではない。そのためには気候変動に伴う降雨の外力および社会状況の変化を含めた検討が必要であろう。ただし将来を予測するためには、過去における時空間変化が斜面崩壊に対してどのような影響を与えたかについて検討することが必要であるとの考えから第 2 項の検討事例を示した。

なお第 2 項の検討事例において使用した情報は、斜面崩壊発生の素因としての表面地形と林齢および誘因としての降雨情報の 3 つのみである。リモートセンシング技術との対応関係についてみると表面地形については LiDAR 測量による成果を用いているが、林齢については使用していない。図 5.1.6A に示した林齢一見掛けの粘着力関係は、同一林齢であれば樹木成長は同じであるとの極めて単純な仮定を用いることによって求めているが、実際には同一林齢であっても樹木成長は立地条件によって異なるため、当然の帰結として地下部の根系量は異なることとなる。先の図 5.1.2A にリモートセンシング技術の発展によって、より詳細かつ広域の森林調査が可能となっていることの一例を示したが、これらの情報を積極的に用いることによって物理モデルを用いた土砂移動研究が発展する可能性があると考える。

ただし時空間分解能は目的に応じて最適な時空間スケールが設定されるべきものである。したがって、本技術の発展によってより詳細に把握することが設定された目的に対してどのような意義があるのかを踏まえ研究開発を進めていく必要があることは言うまでもない。そのためには、リモートセンシング技術の研究開発の専門家と私のようなエンドユーザとしての非専門家の相互の意見交換が必要であろう。この事をあえて記述したのは、専門家と非専門家の双方が目指す目的地間の距離が離れてきているように個人的には感じているためである。勿論、個々の研究者が行う研究においては目指す目的地と同じにする必要は全くないが、SDGsのような大きな目的に対しても、両者の議論を通じてその距離を狭めていくことが、リモートセンシング技術を含む探査技術の更なる発展に繋がるのかもしれない。

引用文献

- 古田竜一, 2016, 土砂災害監視における衛星搭載型合成開口レーダーの利用可能性, 防災科学技術研究所研究資料, No. 405, pp. 33-37.
- 林真一郎, 2017, 広域土砂災害の被害状況把握手法に関する研究, 北海道大学博士学位論文, DOI: 10.14943/doctoral.r7035
- 石川芳治・他 45 名, 2016, 平成 28 年熊本地震による土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 69, No. 3, pp. 55-66.
- Iwahashi, J., Okatani, T., Nakano, T., Koarai, M., and Otoi, K., 2014, Landslide susceptibility analysis by terrain and vegetation attributes derived from pre-event LiDAR data: a case study of granitic mountain slopes in Hofu, Japan, *INTERPRAENENT2014 Proceedings*, <http://www.gsi.go.jp/common/000190061.pdf> (2018 年 5 月 1 日アクセス)
- 北村嘉一・難波宣士, 1968, 樹根の抵抗力に関する現地試験 (II) , 79 回日林論, pp.360-361.
- 国際連合広報センター, 2019, 持続可能な開発目標(SDGs)とは, https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/, (2019 年 4 月 28 日アクセス)
- Okimura, T. and Ichikawa, R., 1985, A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer, *Natural Disaster Sci.*, Vol. 11, pp. 41-51.
- 執印康裕・他 4 名, 2013, 降雨及び人工林における林齡空間分布の経時変化が表層崩壊発生に与える影響評価について, 緑化工学会誌, Vol. 39, No. 1, pp. 27-32.
- 寺本行芳・下川悦郎・地頭薦 隆, 2003, 雲仙普賢岳水無川流域における土石流の流出過程の経年変化, 砂防学会誌, Vol. 56, No. 3, pp. 3-11.
- 宇都宮大学演習林研究部, 1999, 平成 10 年 8 月末豪雨による船生演習林被害の記録, 宇都宮大学農学部演習林報告, Vol. 35, pp.119-123.
- Yamakoshi, T., and Suwa, H., 2000, Post-eruption characteristics of surface runoff and sediment discharge on the slopes of pyroclastic-flow deposits, Mount Unzen, Japan. Transactions, *Japanese Geomorphological Union*, Vol. 21, No. 4, pp.469-497.

著者 :

宇都宮大学

執印康裕

第2節 マルチスペクトルレーザ（先端レーザ）を使った森林調査

- ①目的または適応分野：森林資源状況の把握、樹木生育状況；
- ②プラットフォーム：航空機（固定翼、回転翼）；
- ③キーワード：レーザプロファイラ

第1項 マルチスペクトルレーザとは

オプテックのレーザ計測機器タイタンは2014年にリリースされた世界で初めてのマルチスペクトルレーザ機器である（図5.2.1）。タイタンは532 nm、1,064 nm、1,550 nmの3つの波長のレーザを照射することができる。ライカやオプテックのレーザ計測機器には1,064 nmの波長のレーザが使われ、また、リーグルでは1,550 nmの波長のレーザが使われたレーザ計測システムがあり、地形計測などに使われてきた。さらに、532 nmはグリーンレーザとも言われ、測深計測に用いられてきた。タイタンはこれらの異なる波長のレーザを照射して、1つのシステムとして運用することができる。



図5.2.1 世界初の多波長レーザセンサ「タイタン」（Teledyne Optech 2018）

衛星リモートセンシング技術では複数のスペクトル（バンド）情報を用いて地上観測されてきたが、同様にレーザの反射強度情報画像を地上観測に用いることができる可能性がある。532 nmは衛星リモートセンシングで使われるバンド2、1,064 nmは若干波長が長いがバンド4、1,550 nmはバンド5の代替として活用できる（図5.2.2）。衛星リモートセンシングではバンド3とバンド4を用いて正規化植生指数（NDVI）を植生の分類に用いることがあるが、同様に532 nmと1,064 nmの反射強度情報を用いて植生指数の代替として利用することが考えられる。

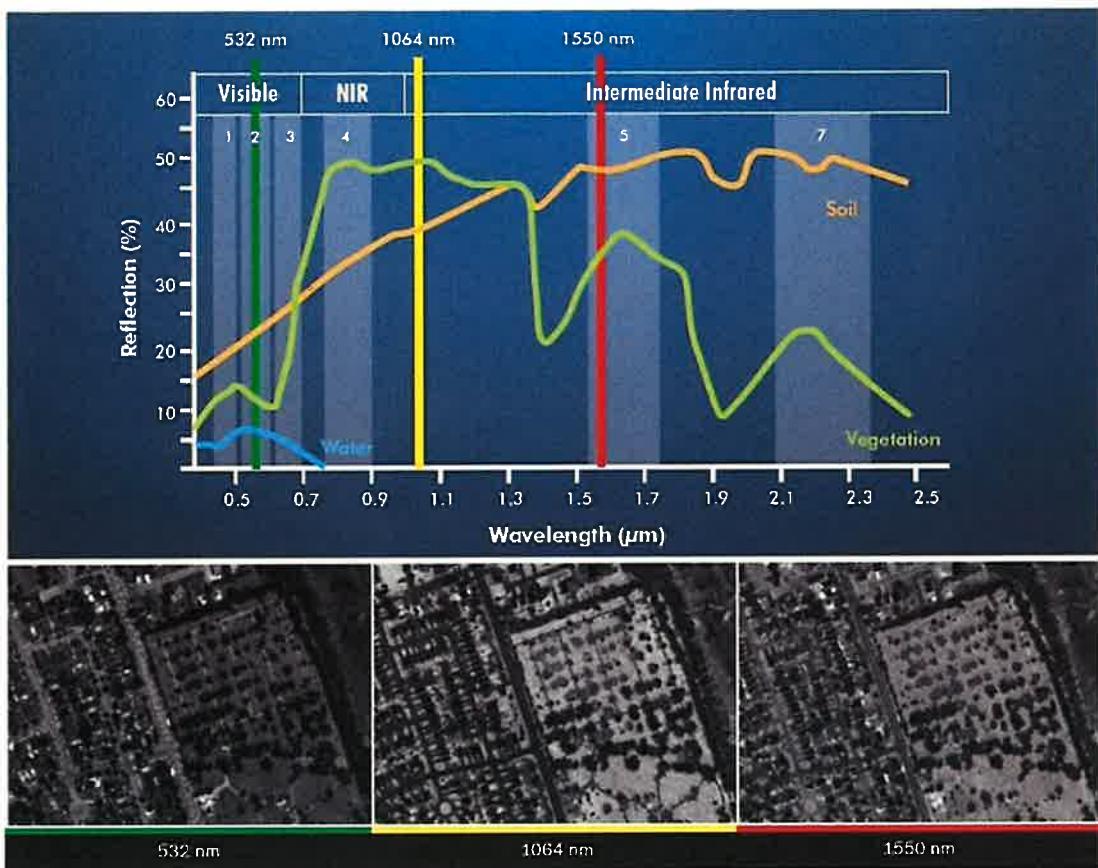


図 5.2.2 タイタンで使用している波長帯と取得反射強度画像 (Teledyne Optech 2018)

第2項 色調情報を加味した土地被覆分類

タイタンで取得される反射強度情報は画像にすることで、衛星リモートセンシングと同様にバンド合成画像を作成することができる。3つの反射強度画像をカラー合成した結果が図 5.2.3 である。これまで反射強度画像はグレースケールで表示することが一般的であったが、タイタンの取得反射強度を用いることで、フォールスカラーのような画像を作成することができる。これまでのグレースケールで表示される反射強度画像に比べて色調の情報量が多くなることから、3つの波長のレーザ反射強度の利用により土地被覆分類に有効な情報となると考えられる。

タイタンの反射強度を用いて土地被覆分類を行った研究では、草地、森林、宅地、商業地、道路の 5 つ項目を区分した事例が報告されている (Fernandez-Diaz *et al.* 2016)。この研究では、5 つの反射パルスの分布情報（反射パルスの平均高、最大最小との差分、反射パルス数、ファーストパルスの割合、照射パルス数）と 3 つの波長の反射強度をマハラノビス距離と最尤法に適用して分類を行っている。どちらの手法についても反射パルスの分布情報のみに比べて反射強度情報を加えることで Overall 精度が約 30% 向上し、約 90% の精度で分類できることを示した。また、Axelsson *et al.* (2018) は 9 つの樹種の分類をタイタンの反射強度などを用いて分類した事例を報告している。この研究では、反射パルスの垂直分布を示すパーセンタイルだけでなく、反射強度のパーセンタイルも用いて分類を行っている。高さのパーセンタイルと 7 つの反射強度のパーセンタイルを組み合わせて樹種分類することで、Overall 精度 76.5% で分類できることを報告している。この 3 つの波長を使用した事例の比較として、高さのパーセンタイルと 1,064 nm の反射強度のパーセンタイルを用いて分類した結果が示され、その結果は 66.5% であったことから、異なる波長を用いることで 10% の精度向上につながっている。

上記のように反射強度の情報が増えることにより分類精度の向上につながることが明らかになってきていることから、より詳細な樹種分類を可能にする手法として、今後マルチスペクトルレー

ザの活用が進む可能性がある。特に衛星画像や空中写真的情報とレーザ計測データを組み合わせて分類する手法ではセンサが異なるため、取得情報の位置精度に課題があったが、マルチスペクトルレーザでは反射パルスの高さ情報と反射強度の情報の取得される位置が一致するため、より正確に分類できるという利点がある。しかしながら、532 nm のレーザは 1,064 nm や 1,550 nm の波長のレーザに比べて照射エネルギーが小さいことから、照射距離が短く、その結果レーザ計測できる面積が狭くなるという課題がある。また、衛星リモートセンシングと同様に異なる時期に計測された情報では分類対象の樹木の状態（展葉期、着葉期、紅葉期、落葉期など）が異なる可能性があることから、計測時期に応じた分類方法を検討する必要がある。



図 5.2.3 タイタンで取得した反射強度情報の画像合成結果 (Morsy *et al.* 2017)

第3項 グリーンレーザを活用した測深計測

マルチスペクトルレーザの 1,064 nm と 1,550 nm の波長は、水面で反射することから、水面の高さは把握できるものの、水中の計測はできない。一方、532 nm の波長のレーザは水面を透過し、海底や河床から反射するため、海底や河床の地形情報を取得することができる。1,064 nm や 1,550 nm のレーザで取得した水面の高さと 532 nm のレーザで取得した海底や河床の高さ情報の差分から水深を計測することができる（図 5.2.4）。この計測により陸域から水域までシームレスな地図を作成することが可能となる。なお、532 nm のレーザで海底や河床を計測するためには静水面であり、透明度が高いことが求められ、透明度にもよるが十数 m の深さまで計測することができる。

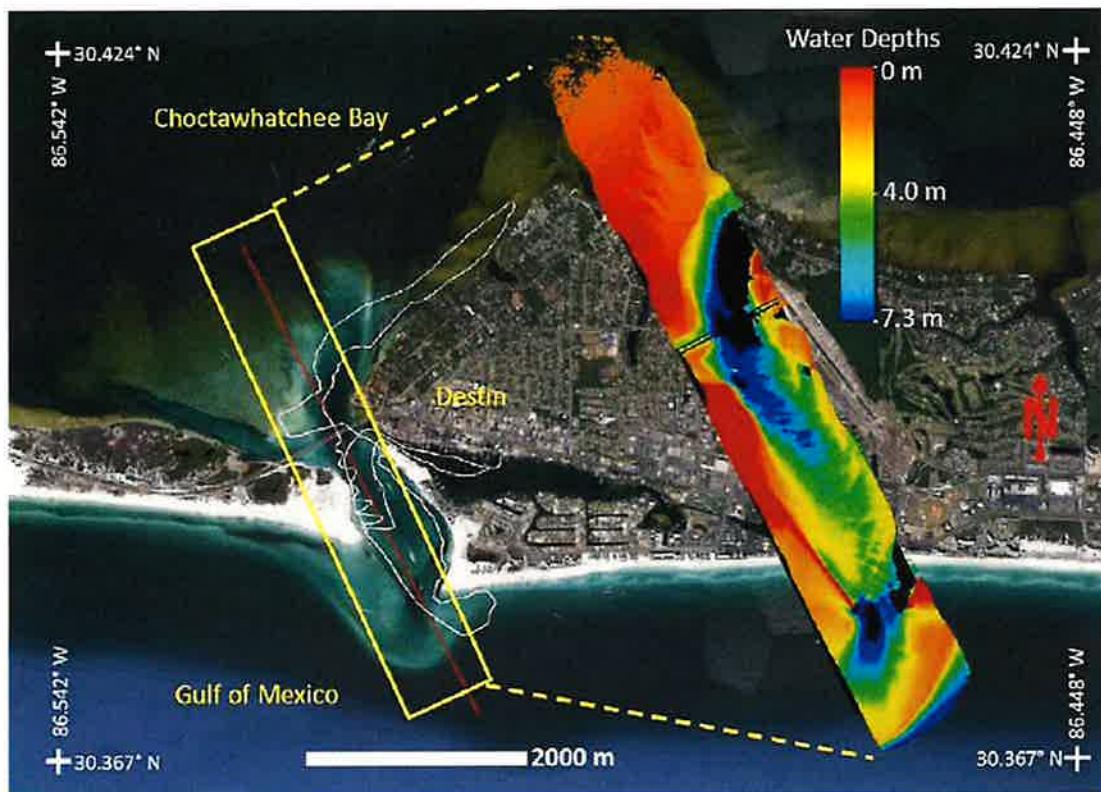


図 5.2.4 532 nm 波長レーザによる水深計測 (Fernandez-Diaz *et al.* 2016)

引用文献

- Axelsson, A., Lindberg, E., and Olsson, H., 2018, Exploring Multispectral ALS Data for Tree Species Classification, *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 2, 183.
- Fernandez-Diaz, J. C., Carter, W. E., Glennie, C., Shrestha, R. L., Pan, Z., Ekhtari, N., Singhania, A., Hauser, D., and Sartori, M., 2016, Capability Assessment and Performance Metrics for the Titan Multispectral Mapping Lidar, *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 11, 936.
- Morsy, S., Shaker, A., and El-Rabbany, A., 2017, Multispectral LiDAR Data for Land Cover Classification of Urban Areas, *Sensors*, Vol. 17, No. 5, 958.
- Teledyne Optech, 2018, Titan World's First Multispectral LiDAR, <https://www.teledyneoptech.com/en/products/airborne-survey/titan/> (2019年6月9日アクセス)

著者：

アジア航測

大野勝正

第3節 UAV を用いた森林調査

- ①目的または適応分野：森林資源、樹木生育状況、山地災害、林地境界；
- ②プラットフォーム：UAV；
- ③キーワード：小型無人機等飛行禁止法、飛行禁止区域、目視外飛行、SLAM、VTOL

第1項 はじめに

UAV（ドローン）はさまざまな分野で革新的技術として注目されており、取り巻く社会情勢は目まぐるしく変化している。

本節では、UAVを巡る最新動向を、主に制度的観点と技術的観点から概説するとともに、森林調査への適用に関する将来展望について述べる。

第2項 UAV の飛行ルールに関する動向

制度的観点では、UAVの飛行ルールに関する動向が挙げられる。UAVの飛行ルールは、「改正航空法（平成27年12月10日施行）」によって定められているが、その後もさまざまな議論が続々、規制強化と規制緩和の両面で変更が相次いでいる。ここでは、特に注目すべき点として、飛行禁止区域の拡大と目視外飛行の要件明確化について概説する。

5.3.2.1 飛行禁止区域の拡大（規制強化）

航空法改正の翌年に、「小型無人機等飛行禁止法（平成28年4月7日施行）」が制定され、UAVの重量に関わらず、国の重要な施設の周辺上空でのドローン飛行が規制された。“国の重要な施設”とは、国会議事堂内閣総理大臣官邸等、危機管理行政機関、最高裁判所庁舎、皇居・御所、政党事務所、外国公館等、原子力事業所である。

2019年5月に成立した、「小型無人機等飛行禁止法の一部を改正する法律（令和元年6月13日施行）」では、上記の施設に加え、防衛関係施設（自衛隊施設や米軍施設）が規制対象に追加された。併せて、「平成31年ラグビーワールドカップ大会特別措置法（ラグビー特措法）」、「平成32年東京オリンピック競技大会・東京パラリンピック競技大会特別措置法（オリパラ特措法）」の一部が改正され、ラグビーワールドカップ2019、2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会の関連施設上空でのUAV飛行が禁止された（警察庁2019）。

森林分野において“国の重要な施設”と隣接するケースは少ないと考えられるが、新たに追加された防衛関係施設と隣接する森林も存在するため、注意が必要である。

なお、イエローゾーン（周囲おおむね300mの上空）では、必要な手続きを講じることを条件に以下の3つの例外が認められている。

- ① 管理者またはその同意を得た者による飛行；
- ② 土地所有者や占有者、またはその同意を得た者による飛行；
- ③ 国や地方公共団体の業務のための飛行

5.3.2.2 目視外飛行の要件明確化（規制緩和）

「改正航空法（平成27年12月10日施行）」では、“目視（直接肉眼による）範囲内でUAVとその周囲を常時監視して飛行させること”と定められており、目視外飛行を行う場合には、あらかじめ地方航空局長の承認を受けるとともに、補助者を配置してUAVの監視や第三者の立ち入りがないこと等を監視しなければならないとされている。

自動操縦やFPV（First Person View：UAVのカメラで撮影した画像をリアルタイムでモニタに映し、その映像を使って操縦するもの）は目視外飛行と位置付けられるため、特に森林分野では視通が確保できる離発着場の設置が難しく、UAV普及の妨げとなっていた。

しかしながら、離島や山間部への荷物配送の実現に対する気運の高まりを受け、国土交通省は

2018年9月に「無人航空機の飛行に関する許可・承認の審査要項」を改正し、一定の条件を満たせば、飛行経路上にドローンを監視する補助者を置かずとも、「目視外飛行」が認められるようになった（国土交通省 2018）。

なお、目視外飛行を行う際の要件は、「無人航空機の飛行に関する許可・承認の審査要項」の5-4に細かく規定されており、これを遵守する必要がある。

主な要件を表5.3.1に示す。

表 5.3.1 UAV の目視外飛行を行う際の要件
（「無人航空機の飛行に関する許可・承認の審査要項」（国土交通省 2018）から抜粋）

(1)機体	<ul style="list-style-type: none"> ● 自動操縦システムを装備し、機体に設置されたカメラ等により機体の外の様子を監視できること ● 地上において、無人航空機の位置及び異常の有無を把握できること ● 不具合発生時に危機回避機能（フェールセーフ機能）が正常に作動すること ● 補助者を配置せずに飛行させる場合には、上記の基準に加え、次に掲げる基準にも適合すること ● 航空機からの視認をできるだけ容易にするため、灯火を装備すること又は飛行時に機体を認識しやすい塗色を行うこと ● 地上において、機体や地上に設置されたカメラ等により飛行経路全体の航空機の状況を常に確認できること ● 第三者に危害を加えないことを製造者等が証明した機能を有すること ● 地上において、無人航空機の針路、姿勢、高度、速度及び周辺の気象状況等を把握できること ● 地上において、計画上の飛行経路と飛行中の機体の位置の差を把握できること ● 想定される運用により、十分な飛行実績を有すること
(2)操縦者	<ul style="list-style-type: none"> ● モニタを見ながら、遠隔操作により、意図した飛行経路を維持しながら UAV を飛行させることができること及び飛行経路周辺において UAV を安全に着陸させることができること ● 補助者を配置せずに飛行させる場合には、上記に加えて、遠隔からの異常状態の把握、状況に応じた適切な判断及びこれに基づく操作等に関し座学・実技による教育訓練を少なくとも 10 時間以上受けていること ● 必要な能力を有していない場合には、無人航空機を飛行させる者又はその関係者の管理下にあって第三者が立ち入らないよう措置された場所において、目視外飛行の訓練を実施すること
(3)体制	<ul style="list-style-type: none"> ● 飛行させようとする経路及びその周辺を事前に確認し、適切な飛行経路を特定すること ● 補助者を配置せずに飛行させる場合には、次に掲げる基準に適合すること ● 飛行経路は第三者が存在する可能性が低い場所（山、海水域、河川・湖沼、森林、農用地、ゴルフ場など）を設定すること ● 全ての飛行経路において飛行中に不測の事態が発生した場合に、付近の適切な場所に安全に着陸させる等の緊急時の実施手順を定めるとともに、第三者及び物件に危害を与えることなく着陸ができる場所を予め選定すること ● 飛行前に、飛行させようとする経路及びその周辺について、不測の事態が発生した際に適切に安全上の措置を講じることができる状態であることを現場確認すること

第3項 UAVの技術革新に関する動向

UAVを取り巻く市場は年々拡大を続けており、2017年度の日本国内の市場規模は503億円と推測され、2016年度の353億円から150億円増加しており、2024年度には3,711億円（2017年度の約7倍）に達すると見込まれている（春原・中畑 2018）。そのため、機体の開発や改良、新たなデータ処理アルゴリズムなどの技術革新が凄まじい速さで進展している。

ここでは、特に注目すべき点として、非GPS環境での飛行制御技術と垂直離陸型UAV「VTOL」について概説する。

5.3.3.1 非GPS環境での飛行制御技術

大半のUAVは、機体にGPSシステムを搭載しており、GPSに基づく位置情報を元に安定した飛行や自動航行を実現している。しかし、上空視界が狭い場所ではGPSの受信状態が不安定で、UAVの正確な飛行や撮影の妨げや、事故の原因になる場合がある。

そのため、2016年頃から、非GPS環境下における安定飛行を実現すべく、さまざまなアイデアが搭載されたUAVや飛行制御システムが登場した。

中でも、SLAM技術を搭載したUAVに注目が集まっている。SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術は、各種センサから取得した情報に基づいて自己位置推定と地図作成を同時に使う手法で、搭載したカメラ画像から抽出した特徴点やレーザスキャナに基づく3次元点群データを利用し、室内、トンネル内部、森の中、橋脚の下など、GPSが届かない環境下でも自律飛行を可能とする技術である（図5.3.1）。

画像認識による自己位置推定は昨今のトレンドとなっており、この技術を搭載した機体が増え、UAVの活躍の場がさらに広がることが期待される。

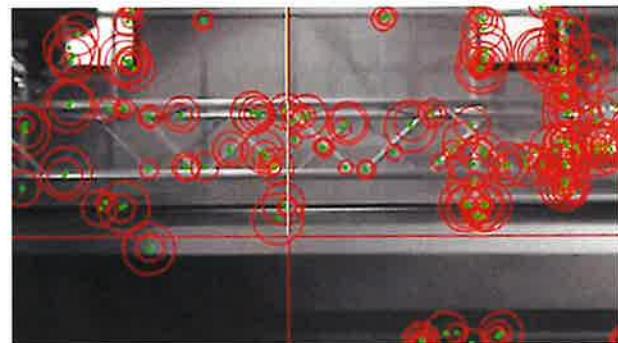


図5.3.1 SLAM技術(ACSL 2019)

5.3.3.2 垂直離陸型UAV「VTOL」

UAVの機体は「固定翼」と「回転翼」に分けられ、回転翼はヘリコプタ型の「シングルローター」と複数のプロペラを持つ「マルチローター」に分けられる。現在は、小型で低価格なマルチロータ型の回転翼機が最も普及している。

しかし、マルチロータ型の回転翼機は小型で低価格であるがゆえに、バッテリーの持続時間が數十分程度と短く、広範囲の撮影を行うためには離着陸を繰り返す必要がある。一方、固定翼型のUAVは航続時間が長いものの、滑走路を必要とするため山間地域での使用が難しい。

回転翼機と固定翼機の短所を補い、長所を生かす機体として現在注目されているのが、垂直離陸型UAV「VTOL」である（図5.3.2）。VTOL（Vertical Take-Off and Landing）タイプのUAVは、滑走路を必要とせずどこからでも離発着できる特徴を有する。機体のデザインはさまざまで、固



図5.3.2 VTOL型UAVの例(X CRAFT 2019)

定翼にマルチロータを取り付け、上空で姿勢を変える設計の機体や、荷物配送での利用を想定し、水平に姿勢を保ったまま離着陸できる機体などが開発されている。

第4項 UAVを用いた森林調査の将来展望

UAVによる森林調査は、①地上調査に比べ、立ち入りや地形上の制約が少ない、②有人機に比べ、機動的な計測が可能である 等の利点があり、研究段階から徐々に実用段階に移行しつつある。

しかしながら、従来は目視飛行が義務付けられており、地形の険しい山林では視通が確保できず、結果的に UAV を飛ばせないケースが多い。

また、山間地域は GPS の受信状態が不安定なため事故のリスクが高く、UAV の使用をためらうケースも多い。

さらに、最も普及しているマルチロータ型の回転翼機にはバッテリーの持続時間という制約があるため、数十 ha 程度の特定の施業地の森林調査には適しているが、市町村や都道府県全体といった広域では、有人機より非効率であった。

本稿で述べた「目視外飛行の要件明確化」、「非 GPS 環境での飛行制御技術」、「VTOL」は、上記の課題解決に繋がる制度改善、技術革新である。

将来は、小規模な施業地の森林調査から市町村や都道府県全体といった広域の森林調査まで幅広く UAV が活用され、人口減少社会における貴重な扱い手になることが期待される。

第5項 おわりに

UAV を取り巻く社会情勢は目まぐるしく変化しており、新しい技術や機体が次々と世に送り出されている。

本稿で述べた技術以外にも、ローバ型（陸上型）ドローンや水中ドローンなど新しいコンセプトの UAV が出現している。

UAV 市場はまだ導入期～成長期の段階であり、今後数年は目まぐるしい変化が継続すると考えられるため、森林調査への活用を念頭に、法制度の変更と技術革新に対する注視を続けることが重要である。

引用文献

- ACSL（自律制御システム研究所）, SLAM 非 GPS 環境での自律飛行制御, <https://www.acsl.co.jp/>,
(2019年6月26日アクセス)
- 警察庁, 2019, 小型無人機等飛行禁止法関係, <https://www.npa.go.jp/bureau/security/kogatamujiinki/index.html>, (2019年6月26日アクセス)
- 国土交通省, 2018, 無人航空機の飛行に関する許可・承認の審査要領, <http://www.mlit.go.jp/common/001254115.pdf>, (2019年6月26日アクセス)
- 春原久徳・中畑稔, 2018, ドローンビジネス調査報告書 2018, インプレス総合研究所, 東京, 418p.
- X CRAFT, x2Q, <https://xcraft.io/>, (2019年6月26日アクセス)

著者：

国際航業

今井靖晃

第4節 山地災害状況とリモートセンシング技術

- ①目的または適応分野：山地災害状況の把握；
- ②プラットフォーム：超小型衛星、高高度疑似衛星；
- ③キーワード：準リアルタイム観測、リアルタイム観測、進化型コーナーリフレクタ

第1項 はじめに

ICT（情報通信技術）の発達と利用拡大は、広域かつ様々な情報をネットワーク化することによって人々の暮らしや社会に大きな変革をもたらしてきた。情報ネットワークの果たす役割の重要性については災害にとっても同様であり、状況把握手段の代表であるリモートセンシングは、山地災害発生時において人命救助や二次災害防止策を講じるための、初動情報を広域的に取得する技術として期待される。

災害時に使える情報ネットワークインフラの代表には内閣府が主導する「戦略的イノベーション創造プログラム」（通称：SIP）の一環として、防災科学技術研究所と日立製作所が、2014年より共同で研究開発を進めてきたSIP4D（府省庁連携防災情報共有システム）がある（図5.4.1参照）。SIP4Dは、災害対応に必要とされる情報を多様な情報源から収集し、利用しやすい形式に変換して迅速に配信する機能を備えた、組織を越えた防災情報の相互流通を担う基盤的ネットワークシステムである（防災科学技術研究所 2019）。また2019年3月の開発期間終了にともない、SIP4Dを基本情報ネットワークインフラとして災害状況を迅速かつ体系的に把握するための「災害情報ハブ推進チーム」（ISUT）の活動が官民協力によって開始されている。さらに2018年度から開始した第二期SIPでは、「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」課題として、衛星データ等即時共有システムと被災状況解析・予測技術の開発が進められており、リモートセンシングへの期待はさらに高まっているといえる。

山地災害観測に用いられるセンサには、SAR、光学カメラ、そしてLIDARがあるが、これらセンサの基本技術はすでに確立されたものであり、革新的技術というよりも計測精度や分解能といった性能の向上が期待される。一方で、New Spaceと呼ばれる民間主導の宇宙開発が進んだ結果、多数の超小型衛星による準リアルタイム観測やソーラパネル搭載の無人航空機によるリアルタイム観測などが実現しつつある。本稿は、リモートセンシングでの利用が期待される新しいプラットフォームを中心に、山地災害観測の革新的技術を中心に将来展望について概説する。

第2項 超小型衛星による準リアルタイム観測

従来の政府の主導によって進められてきた宇宙開発とは異なり、ベンチャー企業や民間宇宙団体等の新興勢力によって進められる宇宙開発と、それによる新しいビジネスのことをNew Spaceという。New Spaceの代表的な企業として、ホリエモンこと堀江貴文氏が出資するインターテクノロジズがある。同社は、莫大な費用が掛かるロケット打ち上げコストを下げ、国内外民間企



図5.4.1 SIP4Dの機能概要（防災科学技術研究所 2019）。所掌業務が異なる多数の府省庁・関係機関等の間で、双方向の情報共有・利活用を実現する。

業が開発にしのぎを削る超小型衛星の打ち上げビジネスに参入することを目的として設立された、宇宙ベンチャーである。同社の観測ロケット MOMO3 号機は 2019 年 5 月に北海道大樹町の射場から打ち上げられ、最大高度 113.4 km に到達している。ここで超小型衛星とは重さ 1~100 kg の衛星のことであり、従来型地球観測衛星、気象衛星、そして放送衛星と比較して、開発費用が約 100 分の 1 で済み、短い期間で開発することができるものである。そして、多数の超小型衛星によって実現される協調観測システム（以下、コンステレーションという）は New Space の代表的なコンシューマ向け衛星ビジネスである（図 5.4.2 参照）。

特に地球観測分野においては、ハイスペックな従来型地球観測衛星ではできなかった準リアルタイム観測（例えば、同一地点を毎日観測すること）や動画撮影などの、新たな付加価値を創造することが期待されている。実際、すでに米国の Planet は 100 機以上の超小型の光学衛星によるコンステレーションを実現しており、全地球を常時撮影するサービスを開始している。我が国においても、東京大学発のベンチャーとして 2008 年に設立されたアクセラースペースが同様のシステム構築を目指しているほか、SAR 衛星に関しては、QPS とシンスペクティブがそれぞれ観測サービスを検討している。またコンステレーションは、携帯電話やインターネットなどの通信インフラが途絶した地域における代替通信手段としても期待が寄せられている。

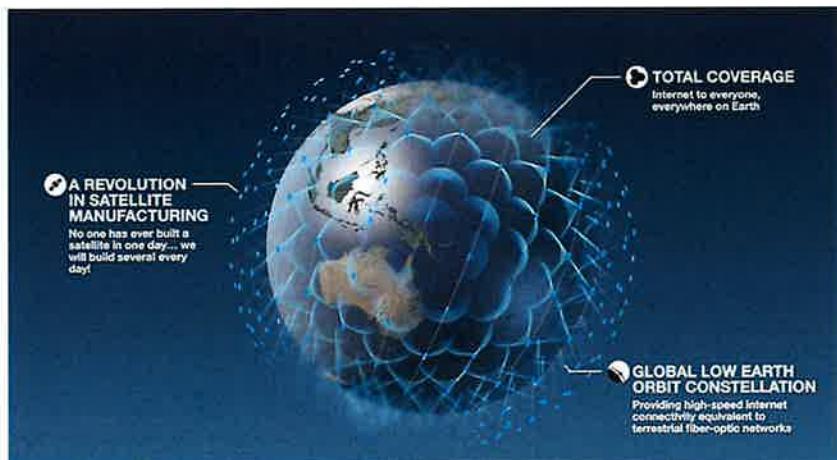


図 5.4.2 OneWeb のコンステレーションのイメージ (SPACE NEWS 2016)。

ひとつひとつの点が低高度超小型衛星であり、多数の超小型衛星ネットワークで全球をカバーしている。

第 3 項 高高度疑似衛星によるリアルタイム観測

コンステレーションによる準リアルタイム観測は山地災害時の状況把握の機会を格段に向上させることが期待されるが、コンステレーションに加えて無人の飛行船や航空機などを成層圏で飛行させる高高度疑似衛星はリモートセンシングの新たなプラットフォームとして期待されており、特にリアルタイム観測に優位性を持っている。

エアバスが開発した Zephyr は、ソーラパネルによる電力のみを利用して成層圏を数か月飛行し続ける高高度疑似衛星である（図 5.4.3）。Zephyr にはセンサ等のペイロードが異なる、翼長 25 m（重量 75 kg）の Zephyr S と翼長 33 m（重量 140 kg）の Zephyr T がある。Zephyr S のペイロードは 5 kg、そして Zephyr T のペイロードは 20 kg であり、OPAZ と呼ばれる専用の光学カメラが搭載される。Zephyr S のプロトタイプは 2018 年 8 月にアリゾナ州でテスト飛行が行われ、総滞空時間は 25 日 23 時間 57 分間を記録し、衛星を代替する新たなプラットフォームとして機能することが実証された。また、低速度で巡航する特徴を活かした同一地点の動画撮影や、僻地での携帯電話やインターネットサービスを使うことができるという、新たな付加価値を創出することが期待

される。また災害状況の把握だけでなく、災害によって通信インフラが途絶した地域における移動基地局としても期待が寄せられる。



図 5.4.3 エアバス Zephyr の飛行イメージ(左) と OPAZ によって撮影されたサンプル画像 (右)
(AIRBUS Defense and Space 2019a)

第4項 進化型コーナーリフレクタ

先の章で述べたように、干渉 SAR 解析は埋立地の沈下やトンネル工事における地山変動のほか、山地の地すべり現象を広域に把握する手法として注目されている。コンステレーションや高高度疑似衛星のようなプラットフォームではないが、最後に、SAR による地盤変動計測に有効な革新的技術について述べるものとする。

5.4.4.1 常時設置型コーナーリフレクタ

コンクリートと鉄板で構成される丈夫なコーナーリフレクタを複数位置に常時設置し(図 5.4.4 参照)、干渉 SAR 解析によってコーナーリフレクタの位置変動を高精度に計測し、地形変動を計測することができる。一般的なコーナーリフレクタは現場で組み立てられるように簡易な構造となっているが、図 5.4.4 のコーナーリフレクタは恒久的に設置できることから、地形変動を長期間にわたってモニタリングすることができる。

地形変動の計測結果を図 5.4.5 に示す。ここで CR-8 地点が大きく沈下している結果となつたが、現地測量によって同様の地形変動の傾向があったことが実証されている。



図 5.4.4 常時設置型コーナーリフレクタ(左) と設置例(右)(AIRBUS Defense and Space 2019b)。
波長が短い X バンド SAR (TerraSAR-X) 用に開発されたものであり、比較的小型だが重量は 100 kg 程度であり、恒久的に設置することができる。

5.4.4.2 アクティブコーナーリフレクタ

一般的なコーナーリフレクタは SAR 衛星から送信された電磁波をそのまま反射する受動的な反射体であるが、アクティブコーナーリフレクタは衛星から送信された電磁波を受信すると、受信電磁波の位相と強度を調整して、衛星に向かって能動的に送信するものである（図 5.4.6 参照）。アクティブコーナーリフレクタを SAR で観測すると、強く明瞭な散乱体（図 5.4.6 右図中の明るい画素）として画像に写しこむことができ、干渉 SAR 解析の精度を向上させることができる。例えば山間地の橋梁や高圧線鉄塔などの重要インフラに設置して、干渉 SAR によるインフラ監視に用いるなどの用途が考えられる。

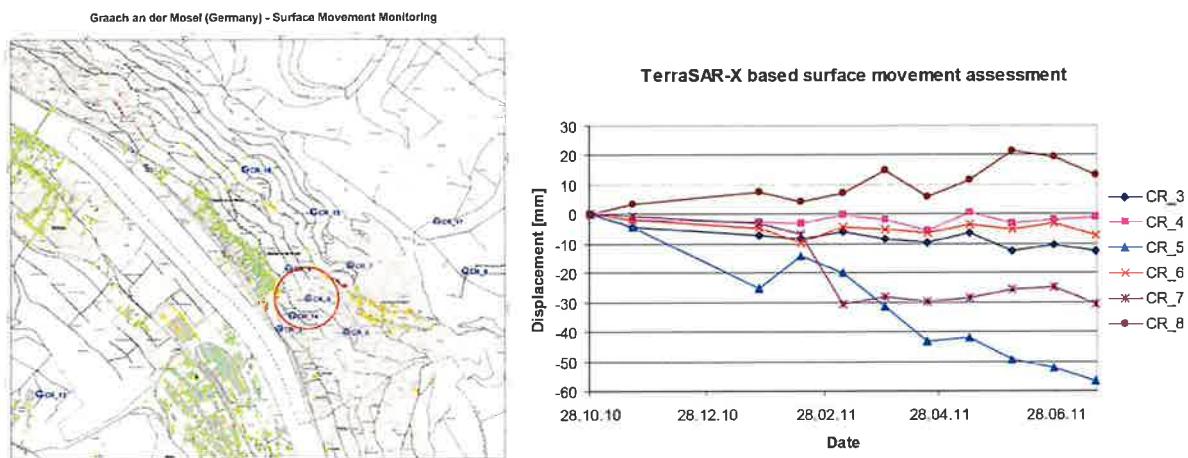


図 5.4.5 地形変動の計測結果（左）と各コーナーリフレクタの時系列変動量（右）（AIRBUS Defense and Space 2019b）。左図中の赤い地点は沈下、緑の地点は変化なし、青い地点は隆起していることを示す。

第5項 おわりに

超小型衛星コンステレーションと高高度疑似プラットフォームは、超高頻度災害観測だけでなく、通信インフラとしての利活用も期待される。さらに進化型コーナーリフレクタと新しいプラットフォームの組み合わせは、地表面の地形変化情報を高精度で常にモニタリングすることができる。高精度の地形変化情報は山地災害の監視だけでなく、森林変化や土地利用変化などに汎用的に使うことができる情報であり、ディープラーニング等で個別ビジネス用に加工することによって、様々な新サービスや新産業を創造する可能性がある。

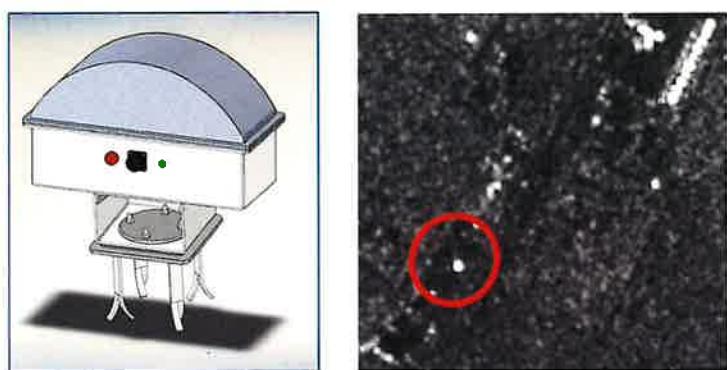


図 5.4.6 アクティブコーナーリフレクタ（左）と後方散乱係数画像（右）（SPACE ENGINEERING 2012）。右図中の赤い丸の明るい画素がアクティブコーナーリフレクタである。

引用文献

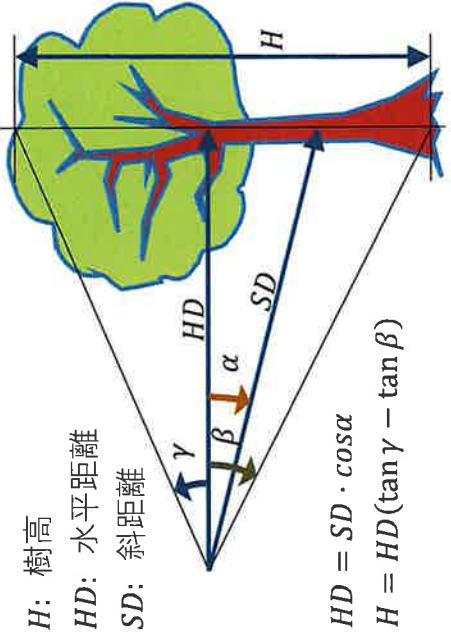
AIRBUS Defense and Space, 2019a, Zephyr Pioneering the Stratosphere,
<https://www.airbus.com/defence/uav/zephyr.html> (2019年6月17日アクセス)

AIRBUS Defense and Space, 2019b, Company brochure AIRBUS Defense and Space GmbH
2019, ドイツ.
防災科学技術研究所, 2019, SIP4D の機能, <https://www.sip4d.jp/outline/function/>, (2019年6月
17日アクセス)
SPACE ENGINEERING, 2012, COMPACT ACTIVE TRANSPONDER (CAT) ,
https://earth.esa.int/documents/10174/1566998/Mahapatra_Fringe_presentation.pdf, (2019
年6月17日アクセス)
SPACE NEWS, 2016, OneWeb Satellites to open factory in Florida with eyes on business
beyond ,<https://spacenews.com/oneweb-satellites-to-settle-in-exploration-park-florida-with-e>
[yes-on-business-beyond-oneweb/](https://spacenews.com/oneweb-satellites-to-settle-in-exploration-park-florida-with-e), (2019年6月17日アクセス)

著者：
パスコ 洲濱智幸

付表 測高器

直接計測と三角法による推定に使われる計測器の例を以下に示す。

方式	機器	概要	長所・短所	参考
<u>直接計測</u> 直接、対象木に物差しを当てて測る。	測高棒	伸縮式の測高棒を対象木の脇で地面から鉛直に伸ばし、梢端の高さに達したところで目盛りを読む。	○梢端が見えれば正確に計測できる ×枝葉が混んでいると測高棒の先端が樹冠を突き抜けず梢端に達しない場合がある ×測高棒は縮小しても長さが1m以上、重量も数kgある	×樹高10m程度までが実用上の限界
<u>三角法による推定</u> 対象木から離れた位置から、対象木までの距離と梢端・地際の高低角を計測し、三角関数により樹高を算出する(図a.1)。	+クリノメータ +距離計	離れた場所から対象木の梢端と地際の高低角を読む。別途、間縄またはレーザー距離計などにより対象木までの距離を求める。図a.1の計算式により樹高を求める。	○梢端と地際が見えれば樹高・対象木までの距離を間わない ○汎用の計測機器を組み合わせて計測できる ×樹高を計測値から計算する必要	 $HD = SD \cdot \cos \alpha$ $H = HD(\tan \gamma - \tan \beta)$

図a.1 三角法による樹高推定の原理

		<p>付属の距離標識を対象木の幹に取り付ける。離れた場所から本体の測距値を通して距離標識を覗き、測定位置を決める。そこから本体の照準器を対象木の梢端と地際にそれぞれ合わせ、表示された高低差から樹高を求める。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○梢端と地際が見えれば樹高を問わない、 ○電源不要 ×対象木までの距離は固定のため測定位置を自由に選べない、 ×林内が暗いと距離標識を見づらい、 ×斜面上での計測では距離標識の高低角により計測値に補正を加える必要 	http://leiss-berlin.com/index.php/en/ourproducts/altimeter
Carl Leiss Berlin Blume-Leiss	Haglof Vertex IV	<p>付属のトランスポンダーを対象木の幹に取り付ける。離れた場所から本体の照準器でトランスポンダーを覗き、測定位置を決める。そこから本体の照準器を対象木の梢端と地際にそれぞれ合わせると、樹高が表示される。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○梢端と地際が見えれば樹高・対象木までの距離を問わない(ただし距離は通常 30 m 以下) ○樹高が表示される ○測定結果を無線で転送できる ○音波測距のため下層植生など若干の障害物があつても測定位置を決められる ○軽量 ×音波測距のため降雨時に計測できなくなる場合がある ×複数台を近くで同時に使えない 	http://www.hagloftg.com/index.php/en/products/instruments/height/341-vertex-iv
	Laser Technology Inc. Tru Pulse	<p>離れた場所から本体の照準器で対象木の幹を覗き、測定位置を決める。対象木と測定位置との間に下層植生が繁茂するなどして幹を十分に見通せない場合、対象木の幹にプリズム等を取り付けたり測定位置を決める。そこから本体の照準器を対象木の梢端と地際にそれぞれ合わせると、樹高が表示される。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○梢端と地際が見えれば樹高・対象木までの距離を問わない、 ○樹高が表示される ○測定結果を有線・無線で転送できる ○対象木と測定位置の間に障害物がなく完全に見通せばプリズム等を使う必要がなく、したがって対象木に近寄る必要がない、 ×プリズム等を使わない場合、対象木を照準せず誤測定をしていることに気づかないことがある 	https://www.lasertech.com/TruPulse-200-Rangefinder.aspx

あとがき

本部会では、最初に、何のために森林調査を行うか、目的となる 6 分野を設定した。そして、単木測定から森林計測に至る調査の変遷を概観し、対象と同じか低い位置での測定から俯瞰しての測定まで、即ち、地上での測定から UAV による低高度での計測、飛行機による高高度での計測から人工衛星による超高高度観測までの調査方法を、基礎編として要素技術別に取りまとめた。次に、最近の新しい森林調査方法を用いた調査の事例を取りまとめ、今後のあり方について検討した。基礎編の不足部分を補い、応用事例と展望について議論した。

本調査研究のアウトリーチとして作成する報告書は、地方公共団体の林務担当者が読んで、実務に役立つものでなくてはならない。森林調査方法がアナログからデジタルへ、そして、地上での調査から空からの調査へ、それに伴って個別計測から全体計測へ、また、概略測定から高精度測定へ、という流れで発展してきたことがわかる構成にしたつもりである。それに向けて、基礎編を改訂するとともに、森林調査の目的別に応用事例を収集し、林務担当者が知りたい結果を得るためにには、どのように計測の要素技術を組み合わせて解析を進めていくのかわかるようにしたいというのが、検討委員と作業部会員の一致した思いである。例えば、要素技術を組み合わせて森林資源状況の把握、樹木生育状況の把握、病虫害被害状況の把握、山地災害被害状況の把握、治山施設の管理、森林境界の管理という森林調査の目的別に最新の事例を紹介した。

さらに、今までの技術発展を踏まえたうえで、今後の技術動向を展望した。土砂移動現象とりモートセンシング技術、先端レーザ関連、UAV の技術動向と応用分野、山地災害のリモートセンシング、生育状況や成長状況の推定に関して展望し、技術発展によって何が可能になるか、こういうことを明らかにするためには何を計測できるようにしたいか、というような将来の研究シーズも収集した。その果実が、作業の効率化、負荷の軽減、コスト削減、林業の発展につながれば幸いである。

【巻末資料】

資料 1：森林調査手法キーワード集

資料 2：森林調査手法事例一覧表

資料 3：森林調査方法部会 平成 29 年度第 1 回検討委員会討議事項メモ

資料 4：森林調査方法部会 平成 29 年度作業部会準備会討議事項メモ

資料 5：森林調査方法部会 平成 29 年度第 1 回作業部会討議事項メモ

資料 6：森林調査方法部会 平成 29 年度第 2 回検討委員会討議事項メモ

資料 7：森林調査方法部会 平成 30 年度第 1 回検討委員会討議事項メモ

資料 8：森林調査方法部会 平成 30 年度第 2 回検討委員会討議事項メモ

資料 1：森林調査手法キーワード集

表 a.1.1 森林調査手法キーワード

キーワード	
り	(平均) 流速
2	2次元断面
3	30分間降雨強度
3	30分間最大降雨強度
3	3次元(3D)情報
3	3次元測量
3	3次元地形
C	CCD(Charge Coupled Device: 固体撮像素子)
D	DBMS(データベース・マネージメント・システム)
D	DCHM(数値樹冠高モデル)
D	DEM(数値標高モデル)
D	DSM(数値表面高モデル)
I	ISP(インターネット接続業者)
M	MMS(モバイルマッピングシステム)
N	NDVI(Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指数)
N	N値
R	RGB(青波長、緑波長、赤波長)
R	RPC
S	SfM
U	UAV(Unmanned Aerial Vehicles: 無人航空機)
U	UAV飛行ルール
U	USLE
V	VARI(Visible Atmospherically Resistant Indices)
W	Webサーバ
W	Web型
W	Web配信
あ	アナログ・レコーダ
あ	アナログ空中写真
あ	アナログ撮影
あ	アナログ出力
あ	アンカーア
あ	アンテナ
い	インターネット
う	ウォッシュロード
う	うどんこ病被害
お	オリジナル点群
お	オルソフォト
お	オルソ画像
か	カラー画像

キーワード	
く	くさび損傷
く	クラウド・ストレージ
く	グラウンドアンカー工
く	クロスレンジ方向
く	クロロファイル
け	ゲートウェイ
さ	サウンディング調査
し	シカ
し	シングルローター
す	ステレオ計測
す	すべり面の深さ（厚さ）
そ	ソフト対策
て	データ・サーバ
て	データ配信
て	テクスチャ
て	デジタル・カメラ
て	デジタル・レコーダ
て	デジタルカメラ
て	デジタル空中写真
て	デジタル撮影
て	デジタル出力
て	デジタル分類
て	デジタル立体視
て	テレメータ方式
と	トレンチ調査
と	ドローン
の	ノイズ
は	バイオマス
は	ハイパースペクトル・カメラ
は	パイプひずみ計
は	バンド
ひ	ビデオ・カメラ
ふ	フィルタリング
ふ	フィルムカメラ
ふ	フォールスカラー合成
へ	ヘリコプター
ほ	ホーム・ページ
ほ	ボーリング調査
ま	マイクロ波センサ
ま	マルチスペクトルカメラ
ま	マルチローター
め	メッシュ
ら	ラップ率
り	リアルタイム

キーワード	
り	リター
り	リターの堆積
れ	レーザスキャナ (Laser Scanner、 LS)
れ	レーザ=プロファイラ=
れ	レーダセンサ
れ	レーダ干渉
れ	レンジ方向
ろ	ロガー
あ	安全対策
い	移動速度
い	移動量
い	移動量 (体積)
い	維持管理業務
い	一面せん断試験
い	一連続降雨
う	雨滴
う	雨滴侵食
う	雨量計
え	遠赤外
よ	横ボーリング工
お	温帯雨林
か	化学的性質
か	可視域
か	可視光
か	可搬型
か	河床勾配
か	河床面
か	荷重計
か	画像
か	解像度
か	回転翼
か	改正航空法
か	開空度
か	害虫被害木
か	崖崩れ
か	干渉SAR解析
み	幹太さ
か	観測データ
か	観測角
か	観測分解能
か	間隙水圧
か	間隙水圧計
か	含水比
か	岩盤

キーワード

き 器官バイオマス
き 幾何モデル
き 機械式計器
き 気温
き 気象観測值
き 急傾斜地崩壊
き 魚眼レンズ
き 境界調査
き 強度
き 胸高直径 (DBH)
き 近赤外線
き 近赤外波長
く 空中写真
く 空中写真測量
け 傾斜係数
け 携帯電話回線
け 溪岸
け 溪岸侵食
け 溪床
け 溪床侵食
け 溪床堆積物
け 溪流
け 経年変化
け 計器
け 警戒避難
け 減災技術
け 減衰体
け 現位置透水試験
け 現地調査
こ 固定翼
こ 後方散乱
こ 後方散乱画像
こ 光学
こ 光学センサ
こ 光学歪
こ 光合成
こ 光波
こ 勾配 (傾斜)
こ 孔内傾斜計
こ 構造的特微量
こ 構造物
こ 洪水
こ 洪水緩和機能
こ 洪水流量

キーワード	
こ	降雨エネルギー
こ	降雨係数
こ	降水量
こ	高さ
こ	高分解能
こ	合成開口アンテナ
こ	合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR)
こ	国電通仕第21号 (テレメータ装置標準仕様書)
ね	根
さ	砂防ダム
さ	砂防堰堤
さ	砂礫堆
さ	最大礫径
さ	最尤法
さ	災害リスク
さ	災害危険度
さ	材積量
さ	作物 (植被) 係数
さ	三軸圧縮試験
さ	山地災害
さ	山地斜面
さ	山腹
さ	散乱特性
し	紫外域
し	試験プロット
ち	治山ダム
ち	治山施設
し	自動観測
し	自動樹種分類
し	室内透水試験
し	実開口レーダ (Real Aperture Radar : RAR)
し	斜面の高さ
し	斜面長係数
し	斜面崩壊
し	車両設置
し	樹冠
し	樹冠高
し	樹冠遮断損失率
し	樹冠遮断損失量
し	樹冠通過雨
し	樹冠通過雨量
し	樹冠滴下雨
し	樹幹流
し	樹高

キーワード

し	樹種
し	樹種分類
し	樹種分類図
し	樹木直径
し	集水井
し	商用高分解能人工衛星
し	商用電源
し	衝撃力
し	上層木
し	情報通信技術 (Information and Communication Technology : ICT)
し	蒸発
し	植生調査
し	伸縮計
し	森林環境
し	森林現況パラメータ
し	森林資源量
し	森林簿データベース
し	人工衛星
し	人的被害
す	水位計
す	水収支
す	水路工
せ	生育量
せ	生産場所
せ	生息密度
せ	精度
せ	静止画
せ	積雪位相遅延
せ	積雪深
せ	赤外カラー
せ	赤色エッジ
せ	赤波長
せ	接触型センサ
せ	設計水量
せ	節理
せ	雪解け水
せ	川幅
せ	洗掘
せ	全球測位システム (Global Positioning System : GPS)
そ	粗度係数
そ	掃流
そ	掃流区間
そ	掃流砂
た	多層移動量計

キーワード	
た	太陽電池モジュール
た	堆積
た	単木計測
た	端末
た	弾性波探査
し	地すべり
し	地すべり観測
し	地すべり対策工
ち	地温
ち	地下水
ち	地下水位
ち	地下水調査
ち	地質形成過程
ち	地上型3Dレーザ
ち	地上設置
ち	地上調査
ち	地図情報レベル
し	地盤
し	地盤傾斜計
し	地盤高
し	地盤載荷試験
し	地盤伸縮計
ち	地表伸縮計
ち	地表水
ち	地表水調査
ち	地表水量
ち	地表面変位
ち	貯留変化量
て	定点観測
て	天空写真
て	天然ブナ林
て	天頂角
て	点群データ
て	電気式計器
て	電子メール
て	電話回線
と	土圧計
と	土砂移動形態
と	土砂移動現象
と	土砂災害
と	土砂生産
と	土砂生産現象
と	土砂流
と	土砂量

キーワード	
と	土質強度 (C、 ϕ)
と	土壤係数
と	土壤侵食
と	土壤侵食モデル
と	土壤水分量
と	土石流
と	土石流区間
と	土地被覆分類
と	土地被覆変化
と	土留工
と	土粒子
と	凍結融解
と	透水係数
と	動画
に	日射
に	日照
に	入射電磁波
ね	熱赤外カメラ
は	波長
は	排水量
は	半球
は	反射電磁波
ひ	非接触型センサ
ひ	飛行コース
ひ	飛行機
ひ	飛散作用
ひ	標定精度
ひ	病虫害被害木
ふ	布状侵食
ふ	浮流砂
ふ	風化度
ふ	風速
ふ	分解能
ふ	分光反射特性
へ	偏波
ほ	保全 (保全施設) 係数
ほ	崩壊危険区域
ほ	放射伝達モデル
み	密度
む	無線伝送方式
も	目視判読
ゆ	有線回線
ゆ	誘電率
ゆ	融雪期干渉SAR解析

キーワード	
ゆ	融雪量
よ	擁壁
よ	葉量／葉の量
よ	葉傾斜角分布
よ	葉面積指数
よ	葉面積密度
よ	抑止効果
ら	落下エネルギー
ら	落下速度
り	立体視
り	立木位置
り	立木個体形状
り	流体力
り	流動化
り	流木
り	流木量
り	流量
り	流量計
り	流路
り	粒径分布調査
り	粒度分布試験
り	力学的性質
り	林外雨量
り	林冠
り	林床植生（下層植生）
り	林内雨量
り	林分構造
り	林齡
ろ	露頭調査
ひ	歪水位計

著者：

東京農工大学名誉教授 石川 芳治
 國際航業 今井靖晃
 グリーン航業 後藤智哉
 パスコ 洲濱智幸
 国土防災技術 岡本勝男

編著：

岐阜大学 粟屋善雄

資料 2：森林調査手法事例一覧表

- ①目的または適応分野：森林調査；
- ②プラットフォーム：地上設置型、UAV、航空機、人工衛星；
- ③キーワード：実施主体、プラットフォーム、センサ、目的、対象地域、掲載誌

表 a.2.1 地上設置型森林リモートセンシング利用事例

実施主体・出典	プラットフォーム	センサ	目的	対象地域
国土交通省	地上設置	合成開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握	-
日本工営	地上設置	合成開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握	-
小澤・宮城	地上設置	合成開口レーダ、実開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握	-
総務省	地上設置	合成開口レーダ	治山施設経年変化把握	-
Makdessi <i>et al.</i>	地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、害虫被害木把握	-
Wang <i>et al.</i>	地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、害虫被害木把握	-
大政・細井	地上設置	3D レーザ・スキヤナ	森林計測(幹太さ、材積量)、生育量推定	-

表 a.2.2 地上設置型森林リモートセンシング装置

販売者・出典	プラットフォーム	センサ	目的	対象地域
エフティーエス	地上設置	合成開口レーダ	山地災害監視、治山施設経年変化把握	-
ケイエルブイ	携帯、地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、窒素含量、害虫被害木把握、生育量推定	-
アルゴ	携帯、地上設置	マルチスペクトル・カメラ、ハイパースペクトル・カメラ	樹種分類、窒素含量、害虫被害木把握、生育量推定	-
アルゴ	携帯、地上設置	3D レーザ・スキヤナ	森林計測(幹太さ、材積量)、生育量推定	-
ファロージャパン	携帯、地上設置	3D レーザ・スキヤナ	森林計測(幹太さ、材積量)、生育量推定	-

引用文献

アルゴ, 特殊カメラ・特殊センサ, <https://www.argocorp.com/spcamera.html>, (2018年4月18日アクセス)

- ファロージャパン, FARO Laser Scanner Focus, <https://www.faro.com/ja-jp/products/construction-bim/faro-laser-scanner-focus/>, (2018年4月18日アクセス)
- エフティーエス, 【地上設置型合成開口レーダー(GB-SAR)】IBIS-FM, <http://www.fts-web.jp/products/?id=1469522491&875178&mca=&ca=&sk=>, (2018年4月18日アクセス)
- ケイエルブイ, ハイパースペクトルカメラの製品一覧, https://www.klv.co.jp/product_types/hyperspectral_imaging/, (2018年4月18日アクセス)
- 国土交通省, 新技術提供システム 地上設置型合成開口レーダー(SAR)によるリアルタイム変位監視システム, http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KT-140106, (2018年4月18日アクセス)
- [13] Makdessi, N. A., Rabatel, G., Ecarnot, M., and Roumet, P., 2017, A Spectral Analysis Of Multiple Scattering Effects In Close Range Hyperspectral Imagery Of Vegetation Scenes: Application To Nitrogen Content Assessment. In *18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy (ICNIRS), held in Copenhagen, Denmark, on 11 - 15 June 2017*, DOI10.13140/RG.2.2.29686.29761, poster.
- [20] 日本工営, 地上型合成開口レーダーによる斜面や構造物の変形観測, <https://www.n-koei.co.jp/rd/rd-center/disaster-sand/pdf/2405aj.pdf>, (2018年4月18日アクセス)
- [22] 大政謙次・細井文樹, 2010, 地上型レーザースキャナの植物計測への応用. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 49, No. 4, pp.210-214.
- [23] 小澤拓・宮城洋介, 地上設置型レーダー干渉計による火山性地殻変動のモニタリングに向けて, <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/203220/1/27K-08-14.pdf>, (2018年4月18日アクセス)
- [32] 総務省, 17 GHz 帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討報告書, http://www.soumu.go.jp/main_content/000217150.pdf, (2018年4月18日アクセス)
- [35] Wang, Z., Wang, T., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Jones, S., Suarez, L., Woodgate, W., Heiden, U., Heurich, M., and Hearne, J., 2016, Vegetation Indices for Mapping Canopy Foliage Nitrogen in a Mixed Temperate Forest. *Remote Sensing*, www.mdpi.com/journal/remotesensing, Vol. 8, No. 491; doi:10.3390/rs8060491.

著者 :

国土防災技術

岡本勝男

資料3：森林調査方法部会 平成29年度第1回検討委員会討議事項メモ

開催日：平成30年2月7日（水） 14:00～17:00

開催場所：森林保全・管理技術研究所 5階会議室

【討議事項3-1】本研究部会で取り扱う森林調査の目的について

- (1) 森林資源状況の把握
- (2) 樹木生育状況
- (3) 病害虫侵食状況
- (4) 山地災害被害状況
- (5) 経年変化
- (6) 森林境界管理

【討議結果3-1】

R3-1-1. 検討委員会の都度、これでよいか話し合う。【栗屋】

R3-1-2. 上記(3)は「病虫害被害状況」。【栗屋】

R3-1-3. 上記(5) 経年変化は「治山施設の管理」。【弘中】【栗屋】

【参考意見】

c3-1-1. この他に新しい調査項目や対象を加えたい。【弘中】

c3-1-2. 原稿が集まらないのは削除してもよい。【榎田】

c3-1-3. 新しい調査項目はルーチン的に回せるようになるか。将来見込みの高いもの、技術進歩によってできるようになるもの、事例研究のみのものを分けた方が良い。【栗屋】

c3-1-4. 森林資源はレビューできる。生育状況は活力度やデータ取得の季節の組み合わせで推定結果が変わる。病虫害と一緒にしたらどうか。崩壊は国内より海外が多い。国内は地すべりが多い。【栗屋】

c3-1-5. 事務局案を見ながら考えたい。【栗屋】

【討議事項3-2】配付資料5、7に列挙されている森林調査項目について

【討議結果3-2】

R3-2-1. 第2回検討委員会までに追加・修正を上げてもらう。【岡本】

【討議事項4-1】報告書の目次案について。特に、第3～6章の内容について

代替案：本研究部会で取り扱う森林調査の目的別構成

【討議結果4-1】

R4-1-1. 規模（エリア、スケール）別に、対象（事象）、方法を書く（150～200ページ程度）。用語を統一する。【栗屋】

R4-1-2. 前半（目次案3～6章）に「基礎編」、その後に「応用編（事例）」「展望」「まとめ」とする。全10章だと20頁／章。【栗屋】

R4-1-3. 人工衛星は栗屋委員、航空機とUAVは大野委員、ICTは佐野委員か。応用編はオブザーバーを中心に全委員にも、展望は全委員に執筆してもらう。【栗屋】

R4-1-4. 既発表記事の再構成でもよい。【弘中】

R4-1-5. 原稿様式と用語を決めて執筆依頼する。【栗屋】

R4-1-6. 作業部会準備会で目次案と具体的内容を決める【榎田】

R4-1-7. 事務局で目次案を早く作って委員に送る。【栗屋】

【参考意見】

c4-1-1. 使う人が使いやすいようにしたい。基礎編は原案通り、応用編は何に使うか目的別が良い。

【石川】

c4-1-2. 使う人は分野別が良い。基礎編と応用編を分ける。【佐野】

c4-1-3. 基礎編と応用編を分ける。基礎編は技術ごと、応用編は目的別が良い。【榎田】

c4-1-4. ターゲットは県の林務担当者、入門者。【榎田】

c4-1-5. 報告書の配付先は、林野庁、都道府県、賛助会員。【弘中】

c4-1-6. 目的によってどのセンサを使うかのフローを作り、センサを選び、最初にセンサや手法を説明し、その後で事例紹介を載せるのが良い。【大野委員】

c4-1-7. 具体的数字を挙げるのは難しいが、方法論はよい。最先端のノウハウは出せない【大野】

c4-1-8. 一般論は書ける。【栗屋】

c4-1-9. パンフレット程度の方法は出せる。【淵田】

c4-1-10. 林野測量協会のようにパンフレット的なものはどうか。【淵田】

c4-1-11. どんな方法でどの程度の精度でわかる程度の内容でよい。あまり専門的でない方が良い。データ集が助かる。【石川】

c4-1-12. ボリュームが少ないなら資料編を入れる。過去の経緯をおさらいし、現状の技術、要望、将来を示すのが良い。新しい分野は事例がないなら、アイデアでよい。現状と展望は項目が一致しなくてもよい。【弘中】

c4-1-13. 森林保険センターが UAV を使っている。被害、松枯れ、花粉症関係の引き合いが多いが、期待した成果を上げるのが難しい。【佐野】

c4-1-14. 成果を上げるのが難しいのは、展望を書いてもらう。【栗屋】

c4-1-15. 情報提供窓口の許可がとれれば、積極的にこういうのに使いたいといふので良い。【弘中】

c4-1-16. 新しいのは PR 的に書いてもらえば良い。適用限界があるので、読者に試してもらえば良い。事例はあまり細かくなくてよい。【石川】

c4-1-17. どういう項目に発展性があるか話し合う必要がある。【栗屋】

c4-1-18. 作業部会資料をネタに、オブザーバーの得意分野や委員の専門を書く。原稿が集まってから各章、各節に振り分ければ良い。【榎田】

c4-1-19. 森林総研の若手研究者にも執筆を依頼することも可能。【弘中】

c4-1-20. 第2回検討委員会までに粗いレビューは書ける。【栗屋】

c4-1-21. 石川委員にこういう内容で書くという案を出してもらう。【栗屋】

【討議事項 5-1】 委員の執筆分担案について

【討議結果 5-1】

R5-1-1. 上記 R4-1-3 参照。

【討議事項 5-2】 オブザーバーの執筆分担案について

【討議結果 5-2】

R5-2-1. 基礎編と応用編の事例紹介を書けるものを書ける範囲で書いてもらう(上記 R4-1-3 参照)。

【討議事項 6-1】作業部会の設置について

【討議結果 6-1】

R6-1-1. 作業部会が必要。WG メンバはオブザーバーと事務局を想定。【栗屋】

R6-1-2. WG メンバになれるか検討して結果（担当者名、または不可）を事務局に連絡。【榎田】

R6-1-3. WG 設置可能か準備会を開く。設置可能なら、WG の内容、原稿をどう書くか検討する（2
月下旬～3月上旬）。【栗屋】【榎田】

R6-1-4. WG で報告書目次案を決める（～3月末）。【栗屋】

R6-1-5. 原稿依頼をする（4月初めか）。【栗屋】

（文中敬称略）

著者：

国土防災技術

榎田充哉・木内秀叙・岡本勝男

資料4：森林調査方法部会 平成29年度作業部会準備会討議事項メモ

開催日：平成30年3月13日（火） 14:00～17:00

開催場所：森林保全・管理技術研究所 5階会議室

【討議事項1】作業部会の設置について

【討議結果1】作業部会を設置する

【討議事項2】報告書目次案について

【討議結果2】報告書は基礎、技術動向、展望

R2-1. 基礎編と技術動向の一部を初年度報告書に入れる。

【参考意見】

c2-1. ターゲットは県の林務担当、入門者。2年の活動で意義のある（役に立つ）報告書を出したい。【榎田】

c2-2. 原理はあまりいらない。基礎的なことは必要。【大野】

c2-3. 針葉樹のモニタリング、高付加価値を付けられる。高齢木は高価格木を探すニーズはあるか？
【栗屋】

c2-4. 新しい森林の仕組みがH30から始まる。流域管理から入るか。広葉樹はどうするか。流木が出ない森林管理。【大野】

c2-5. プラットフォームによって内容が決まる。【栗屋】

c2-6. 林野庁、国交省がマニュアルを作っている。ここで作るのは補完するものか？【今井】

c2-7. 森林調査、境界管理、路網計画でどんなRSセンサが使えるかを林野庁がやろうとしている。
【大野】

c2-8. 林野庁の補足になれば良い。この研究会の報告から将来取り上げてもらえば良い。【榎田】

c2-9. 展望が肝になる。目次案だと重複しそう。【今井】

c2-10. 配付は教育もあった方が良い。リモート・センシングの底辺を広げたい。【渕田】

c2-11. 目的を広げたり、絞ったりした方が良い。【大野】

c2-12. 上がった原稿を見て決めたい。【榎田】

【討議事項3】報告書執筆分担について

【討議結果3】①基礎はWG事務局、②技術動向はWG+専門家、③展望は目的ごとに委員と書ける人探して依頼

R3-1. グリーン航業：航空機／写真とマルチスペクトル

R3-2. パスコ：衛星光学

R3-3. アジア航測：航空機レーザ

R3-4. 国際航業はUAV

R3-5. 國土防災技術：ICT

R3-6. 書く分量は、4～5ページが基本。

【参考意見】

c3-1. ①基礎はWG事務局、②技術動向はWG+専門家、③今後の在り方は目的ごとに委員と書ける人探して依頼。WGがどうとりまとめるか？【榎田】

c3-2. 人選を委員会でやって調整をWGでやるか、事務局でやるか？方針を決めて、あとは事務局

がコントロールする。【栗屋】

c3-3. PRなら書ける。森林クラウドはやっている。衛星はパスコがやっている。林野庁の地すべりをSARでやった。【渕田】

c3-4. 人工衛星、オルソ、林相区分、航空機、空中写真販売は書ける。【後藤】

c3-5. 防災関係、SARでやった。【今井】

c3-6. 航空機ハイパー入れるか？【渕田】

c3-7. 林野庁とあまり重ならないように。在り方の提言はできる。【大野】

c3-8. 地上から宇宙までを繋げて、新しい調査の在り方を提言できるかも。【栗屋】

c3-9. あまり目的を意識しすぎない方が良いが、念頭において書く。【渕田】

c3-10. 基礎編を書いている間に応用編の内容を考える。【栗屋】

c3-11. 執筆者名を入れる。【渕田】

c3-12. 地上設置センサを利用して、ここでこんなことをやっているという一覧表が欲しい。【栗屋】

← 残った課題

今後のスケジュール

R4-1. 第1回作業部会：4月下旬～5月上旬

→ 5月15日（火）14:00～17:00 国土防災技術（株）5階会議室

R4-2. 第2回検討委員会：5月下旬

→ 5月21日（月）14:00～17:00 森林保全・管理技術研究所5階会議室

R4-3. 原稿骨子：4月20日（金）岡本まで送付

R4-4. 原稿（初稿）：5月7日（月）岡本まで送付

（文中敬称略）

著者：

国土防災技術

渕田充哉・木内秀叙・岡本勝男

資料 5：森林調査方法部会 平成 29 年度第 1 回作業部会討議事項メモ

開催日：平成 30 年 5 月 15 日（火） 14:00～17:00

開催場所：国土防災技術 虎ノ門オフィス 5 階会議室

【討議事項 1】初年度報告書目次案

1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 土砂移動現象とリモート・センシング技術（執印康裕）
 - 1.4 情報通信技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.5 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
2. 応用編：事例紹介と展望
 - 2.1 空中写真を利用した森林調査（後藤智哉）
 - 2.2 航空レーザを用いた森林計測（仮題）（大野勝正・北林拓）
 - 2.3 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）

【討議結果 1】

R1-1. 初年度報告書は全て基礎編とする

1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 情報通信技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.4 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
 - 1.5 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）
 - 1.6 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）
 - 1.7 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）
 - 1.8 土砂移動現象とリモート・センシング技術（執印康裕）

R1-2. 著者に「キーワード」を出してもらう（いくつでも挙げてもらう）

R1-3. 「用語」を揃える

R1-4. 略語の正式名称をどこかで明記する（事務局で）

R1-5. 用語の簡単な説明があると良い（事務局で）

【参考意見】

c1-1. 初年度報告書目次案は流れがない。流れが欲しい、切り方を変える。今井さんはわかりやすい、初步的ユーザ向き、専門的すぎないのが良い。【栗屋】

c1-2. 基礎編は都道府県の林務担当者にわかるように手を入れる。技術テキストより発注者が知るべき内容にする。基礎は「どういうパラメータ」、「測定値」がわかる、という内容にする。

【栗屋】

c1-3. 赤外カラーを紹介したい。立体視ソフトが今まで高かったが、北海道の会社が 10 万円ぐらいのを出した（Stereo Viewer Pro : フォテク）。【後藤】

【討議事項 2】最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補

【討議事項 3】最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補

【討議事項 4】最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補

最終報告書目次案

1. 基礎編
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 土砂移動現象とリモート・センシング技術（1.と 2.）（執印康裕）
 - 1.4 情報通信技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.5 UAV を用いた森林調査（1.～4.）（今井靖晃）
 - 1.6 空中写真を利用した森林調査（1.）（後藤智哉）
2. 応用編：技術動向と事例紹介
 - 2.1 空中写真を利用した森林調査（2.）（後藤智哉）
 - 2.2 航空レーザを用いた森林計測（仮題）（1.～3.）（大野勝正・北林拓）
 - 2.3 人工衛星を用いた森林調査（1.と 2.）（洲濱智幸）
3. 展望編
 - 3.1 土砂移動現象とリモート・センシング技術（3.をもう少し膨らませて）（執印康裕）
 - 3.2 UAV を用いた森林調査（5.をもう少し膨らませて）（今井靖晃）
 - 3.3 航空レーザを用いた森林計測（仮題）（4.をもう少し膨らませて）（大野勝正・北林拓）
 - 3.4 人工衛星計測の今後（人工衛星を用いた森林調査 3.）（洲濱智幸）

【討議結果 2, 3, 4】

- R2. 基礎編は初年度報告書に準ずる
- R3. 応用編は案の項目で内容を膨らませる、または、森林調査や生物多様性などの目的に沿って書いてもらう
- R4. 展望編は案の項目で内容を膨らませる、または／加えて、森林調査や生物多様性などの目的に沿って夢を語ってもらう。

【参考意見】

- c2-1. 基礎編と応用編の切り方が問題。ドローンで出せる所があるか？版権の問題がある。【栗屋】
- c2-2. 基礎編には発注するときに知っておいてもらいたいことを書く。【洲濱】
- c3-1. 応用編に「空中写真を利用した〇〇〇〇」というようなものを入れたい。今の技術で。【栗屋】
- c3-2. 応用編に砂防、森林計測で何か項目を立てる。マルチの解像度やセンサでやっている人は多くない。しかし、目的別の方が読んでもらいやすい。例えば、森林タイプの判別から、バイオマスの推定や林業に展開すると樹高よりも胸高直径が必要というような。斜面の計測から崩壊へつながる。生物多様性では、森林タイプやサイズ、階層構造が必要になる。【栗屋】
- c4-1. 展望編は今後の技術動向、どんなことができるか、どんなことを知りたいか、目に付いた論文を書く。【栗屋】
- c4-2. 展望編の内容は委員会で決めるべき、目的を見ながら。【大野】
- c4-3. 展望編は、こういう解析をやると階層構造がわかり、多様性がわかる、というものにしたい。【栗屋】
- c4-4. 展望編は、理想の話と現実の廉価版の話になりそう。森林管理については、〇〇〇〇がわかる、それを使って□□□□を出す、というようにしたい。【栗屋】
- c4-5. 森林管理については、〇〇〇〇がわかる、それを使って□□□□を出す、というようにしたい。【栗屋】

- c4-6. マルチスペクトル・レーザ（ライダ）というものがある。ALB（Airborne Laser Bathymetry：浅水域の水深測定）に使われている。【大野】
- c4-7. 展望編にマルチスペクトル・レーザ（ライダ）の展望を書いてもらいたい。SARで森林のギャップが出せないか。【栗屋】

【討議事項 5】森林リモート・センシングの利用と装置の事例リスト

【討議結果 5】研究レベルは除外して、実用レベルだけ載せる

【討議事項 6】本報告書への ISBN コード（出版者記号）の取得

【討議結果 6】事務局で検討する

【参考意見】

- c6-1. 内部報告書より公刊図書の方が大学や研究所では業績評価の点数が高い。執筆依頼したときに書いてもらいやすくなると思うので、取得してほしい。【岡本】

【その他】

- R7-1. 執筆要領は第 2 回検討委員会で了承を得る
- R7-2. キーワードは 5 月 18 日までに各著者から岡本に送付
- R7-3. 空中写真原稿は 5 月 25 日までに担当者から岡本に送付
- R7-4. 要約版は 6 月 1 日までに岡本から森林保全・管理技術研究所に送付
- R7-5. 要約版には、全体計画、目的、部会開催状況、調査の方向性、来年度の予定、初年度報告書の要約を書く。それに初年度報告書を足し、CD-ROM に焼いて納品する。

（文中敬称略）

著者：

国土防災技術

榎田充哉・木内秀叙・岡本勝男

資料 6：森林調査方法部会 平成 29 年度第 2 回検討委員会討議事項メモ

開催日：平成 30 年 5 月 21 日（月） 14:00～17:00

開催場所：森林保全・管理技術研究所 5 階会議室

【討議事項 1】初年度報告書目次案

1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 デジタル技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.4 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
 - 1.5 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）
 - 1.6 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）
 - 1.7 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）
 - 1.8 土砂移動現象とリモート・センシング技術（執印康裕）

【討議結果 1】

- R1-1. 提案通り初年度報告書は全て基礎編とする
- R1-2. 著者に「キーワード」を出してもらう（いくつでも挙げてもらう）
- R1-3. 「用語」を統一する
- R1-4. 専門用語一覧が必要
- R1-5. 用語は原則として本文中で説明する

【参考意見】

- c1-1. 都道府県の人が読んでアナログからデジタルへという流れ（今までの調査方法（アナログ）→デジタル → 空からの調査）が分かる書き方か、理解できる単語が使われているか？【栗屋】
- c1-2. 概略を計る→詳しく計る 調査の仕方。生態学的見方と材積を知る方法で計り方が違う。【執印】
- c1-3. バーテックスはセミが鳴いていたり、川の音が大きかったりすると測れない。こういうことを書いて欲しい。【洲濱】
- c1-4. 索引が必要ではないか。【鷹尾】

【討議事項 2】最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補

【討議結果 2】

- R2-1. 初年度報告書が出た後で追加する
- R2-2. 前書きを入れる
- R2-3. 森林調査全体の目的を頭につける

【参考意見】

- c2-1. 委員会構成、議論してきたこと、前半で検討したこと、基礎編は第 3 章になる。【榎田】
- c2-2. 森林調査の目的は〇〇だった → 初期は直径や高さを測った → デジタル化で精度が上がった → 最近は UAV 等で空から見て全体、複雑に測ってきた、という文章が欲しい。【栗屋】
- c2-3. 応用編とのつながりのため基礎編はもう少しわかりやすく。目的に対応する項目を上げるか？【栗屋】

【討議事項 3】最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補

2. 応用編：技術動向と事例紹介

- 2.1 空中写真を利用した森林調査（2.）（後藤智哉）
- 2.2 航空レーザを用いた森林調査（1.～3.）（大野勝正・北林拓）
- 2.3 人工衛星を用いた森林調査（1.と2.）（洲濱智幸）
- 初年度報告書原稿の上記の節の内容を膨らませる、または／加えて、
- 森林調査や生物多様性などの目的に沿って執筆依頼

【討議結果 3】

R3-1. 応用編に入る分野と事例、著者候補

- (1) 森林資源状況の把握 →大野勝正
- (2) 樹木生育状況の把握 →栗屋善雄
- (3) 病虫害被害状況の把握 →ナラ枯れ、マツ枯れ（中北理@森林総研）
- (4) 山地災害被害状況の把握 →洲濱智幸
- (5) 治山施設の管理 →図面→GISへ 維持管理は？（担当者未定）
- (6) 森林境界の管理 →日林協の誰か

★(1)、(3)～(6)事務局から依頼

★(3)と(5)人選は事務局

【参考意見】

- c3-1. 要素技術を組み合わせて、例えば病虫害把握をする、という話が欲しい。【鷹尾】
- c3-2. 逆引き事典的なものもありか。調査方法があまり具体的に書いてない。【栗屋】
- c3-3. 利用者にとって知りたいことが分かるように応用編は目的別にした方が良い。【志水】
- c3-4. 林野庁の予算は病虫害、路網整備、花粉症対策、山村整備等、全部は出来ない。あと1年でどこまで書けるか選ぶのが良い。山地災害は各県でやっている。病虫害も注目されているのでは？プラス、治山施設管理への応用か。【榎田】
- c3-5. 森林境界は管理法で重要。使えるものを書いて欲しい。【鷹尾】
- c3-6. 応用編は今の技術の事例。【栗屋】

【討議事項 4】最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補

3. 展望編

- 3.1 土砂移動現象とリモート・センシング技術（3.）（執印康裕）
- 3.2 UAV を用いた森林調査（5.）（今井靖晃）
- 3.3 航空レーザを用いた森林調査（4.）（大野勝正・北林拓）
- 3.4 人工衛星計測の今後（人工衛星を用いた森林調査 3.）（洲濱智幸）
- 3.5 マルチスペクトル・レーザを用いた森林調査（大野勝正？）
- 3.6 森林クラウド「羅森盤」（住友林業の岡田さん？）
- 初年度報告書原稿の上記の節の内容を膨らませる、または／加えて、
- 森林調査や生物多様性などの目的に沿った夢を執筆依頼

【討議結果 4】

R4-1. 展望編に入る分野と事例、著者候補

- (1) 土砂移動現象とリモート・センシング技術（3.）→執印康裕
- (2) 先端レーザを使った〇〇 →大野勝正
- (3) UAV →今井靖晃
- (4) 山地災害 →洲濱智幸
- (5) 生育状況か生長 →栗屋善雄

【参考意見】

c4-1. 精度の話は？【執印】

【確認事項 1】森林調査の目的

【確認結果 1】

Rc1-1. (2)～(4)「の把握」を追加

- (1) 森林資源状況の把握
- (2) 樹木生育状況の把握
- (3) 病虫害被害状況の把握
- (4) 山地災害被害状況の把握
- (5) 治山施設の管理
- (6) 森林境界の管理

Rc1-2. 「次年度は」「検討を行う」にする

【確認事項 2】原稿執筆要領

【確認結果 2】引用は番号ではなく（著者名 年）にする

【確認事項 3】森林リモート・センシングの利用と装置の事例リスト

【確認結果 3】

Rc3-1. 鷹尾さんに「測高器、地上レーザ」を書いてもらう

Rc3-2. 実用レベルを載せる

【確認事項 4】本報告書への ISBN コード（出版者記号）の取得

【確認結果 4】

Rc4-1. 緑水に伺い中

【参考意見】

cc4-1. 図や写真の著作権確認が必要。【執印】

【その他】

Rm-1. 空中写真原稿は 5 月 25 日までに担当者から岡本に送付

Rm-2. 要約版は 6 月 1 日までに岡本から森林保全・管理技術研究所に送付

Rm-3. 要約版には、全体計画、目的、部会開催状況、調査の方向性、来年度の予定、初年度報告書の要約を書く。それに初年度報告書を足し、CD-ROM に焼いて納品する。

(文中敬称略)

著者：

国土防災技術

榎田充哉・木内秀叙・岡本勝男

資料 7：森林調査方法部会 平成 30 年度第 1 回検討委員会討議事項メモ

開催日：平成 30 年 12 月 10 日（月）～平成 31 年 1 月 8 日（火）

開催場所：インターネット上

【討議事項 1】最終報告書目次案

1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 デジタル技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.4 モバイル GIS を用いた森林調査（国土防災技術）
 - 1.5 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
 - 1.6 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）
 - 1.7 空中写真の立体視を用いた森林調査（中北理）
 - 1.8 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）
 - 1.9 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）
 - 1.10 土砂移動現象とリモート・センシング技術（執印康裕）
2. 応用編：森林調査の事例
 - 2.1 森林資源状況の把握（大野勝正）
 - 2.2 樹木生育状況の把握（栗屋善雄）
 - 2.3 病虫害被害状況の把握（マツ枯れ）（中北理）
 - 2.4 病虫害被害状況の把握（ナラ枯れ）（アジア航測）
 - 2.5 山地災害被害状況の把握（洲濱智幸）
 - 2.6 治山施設の管理：デジタルカメラを用いた集水井の維持管理（国土防災技術）
 - 2.7 森林境界の管理（中北理）
3. 展望編：森林調査の将来
 - 3.1 土砂移動現象とリモートセンシング技術（執印康裕）
 - 3.2 先端レーザを使った森林調査（大野勝正）
 - 3.3 UAV を使った森林調査（今井靖晃）
 - 3.4 山地災害とリモートセンシング技術（洲濱智幸）
 - 3.5 生育状況／生長の把握におけるリモートセンシング技術（栗屋善雄）

【討議結果 1】

1.9 は提出された原稿を見て、基礎編と展望編に振り分けるか、基礎編に入れるか、展望編に入れるか決定する。それ以外は、提案通り了承された。

【討議事項 2】最終報告書の基礎編に入る項目、著者候補について

内容については、上記討議事項 1 参照

【討議結果 2】

提案通り了承された。

【討議事項 3】最終報告書の応用編に入る分野と事例、著者候補について

内容については、上記討議事項 1 参照

【討議結果 3】

提案通り了承された。

【討議事項 4】最終報告書の展望に入る分野と事例、著者候補について

内容については、上記討議事項 1 参照

【討議結果 4】

提案通り了承された。

【討議事項 5】第1回検討委員会後のスケジュールについて

【討議結果 5】

報告書の原稿が出そろった時点で第2回検討委員会を開催する

(文中敬称略)

著者：

国土防災技術

榎田充哉・木内秀叙・岡本勝男

資料 8：森林調査方法部会 平成 30 年度第 2 回検討委員会討議事項メモ

開催日：平成 31 年 5 月 17 日（金）～平成 31 年 6 月 14 日（金）

開催場所：インターネット上

【討議事項 1】最終報告書内容

1. 基礎編：森林調査の基礎と技術動向
 - 1.1 森林調査および調査方法の変遷（木内秀叙）
 - 1.2 森林における土砂流出調査技術（石川芳治）
 - 1.3 デジタル技術を用いた森林調査（岡本勝男）
 - 1.4 モバイル GIS を用いた森林調査（龍見栄臣・竹村文・高田香・岡本勝男）
 - 1.5 UAV を用いた森林調査（今井靖晃）
 - 1.6 空中写真を用いた森林調査（後藤智哉）
 - 1.7 航空レーザを用いた森林調査（大野勝正・北林拓）
 - 1.8 人工衛星を用いた森林調査（洲濱智幸）
2. 応用編：森林調査の事例
 - 2.1 森林資源状況の把握（大野勝正）
 - 2.2 造林木の生育状況の把握：人工衛星データによる常緑針葉樹人工林の生長評価（栗屋善雄）
 - 2.3 空中写真を活用した効果的なマツ枯れ防除法（中北理）
 - 2.4 ナラ枯れの被害の抽出および拡大予測の手法について（船越和也・金宗煥）
 - 2.5 山地災害被害状況の把握（洲濱智幸）
 - 2.6 治山施設の管理：デジタルカメラを用いた集水井の維持管理（齊藤雅志）
 - 2.7 空中写真の立体視による森林境界管理（中北理）
3. 展望編：森林調査の将来
 - 3.1 土砂移動現象とリモートセンシング技術（執印康裕）
 - 3.2 先端レーザを使った森林調査（大野勝正）
 - 3.3 UAV を使った森林調査（今井靖晃）
 - 3.4 山地災害とリモートセンシング技術（洲濱智幸）

付表 測高器と地上レーザ（鷹尾元）

【討議結果 1】

提出された報告書原稿を逐次回覧し、修正意見や疑義は出されなかった

【討議事項 2】研究部会報告会としての研修会

内容や開催日時は今後詰める

【討議結果 2】

たたき台が出た時点で第 3 回検討委員会を開催する

（文中敬称略）

著者：

国土防災技術

榎田充哉・木内秀叙・岡本勝男

令和元年 6 月 30 日 発行

編集・発行 公益社団法人 森林・自然環境技術教育研究センター

郵便番号 102-0085

住 所 東京都千代田区六番町 7 番地 日林協会館

T E L 03-5212-8148

F A X 03-6737-1237

E-mail office@jafee.or.jp

U R L <http://www.jafee.or.jp/>