森林調査手法の今とこれから

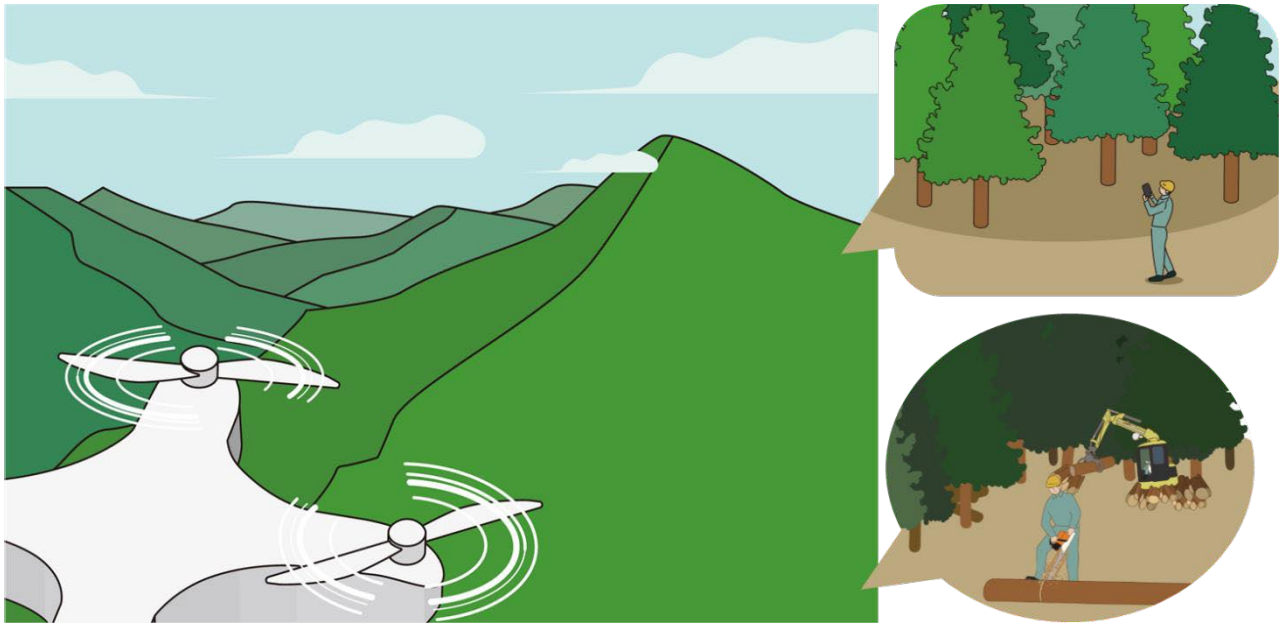
①山地災害（衛星データ）

②森林資源と病虫害（航空レーザ、衛星データ）

③UAVを用いた森林管理

④業務を支える空中写真のデジタル立体視
現地を詳細に把握する高効率で最安価な管理法

⑤治山施設管理
ICTを用いて点検を安全に、自動・時短・一元管理



本パンフレットは、公益社団法人・自然環境技術教育研究センター（JAFEE）が実施している、地球温暖化防止、生物多様性保全等の課題に対応しつつ、異常気象による山地災害発生状況の変化にも対応できる森林保全・管理技術の研究開発事業の一環として、学識経験者、森林コンサルタント会社、航測会社等のメンバーで構成される「森林調査手法部会」において、平成29年度から平成30年度にかけて実施された、人工衛星、UAV、ICTを利用した衛星画像分析、レーザ計測等についての研究開発「森林調査手法の現状と今後のあり方」の報告書に基づいて作成されたものです。現場で活躍されている森林技術者の皆様に活用いただければ幸いです。

検討委員会名簿

粟屋善雄　　岐阜大学　流域圏科学研究センター　教授　（座長）

佐野真琴　　森林総合研究所　森林管理研究領域　領域長（平成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（平成30年4月より）

石川芳治　　東京農工大学　名誉教授

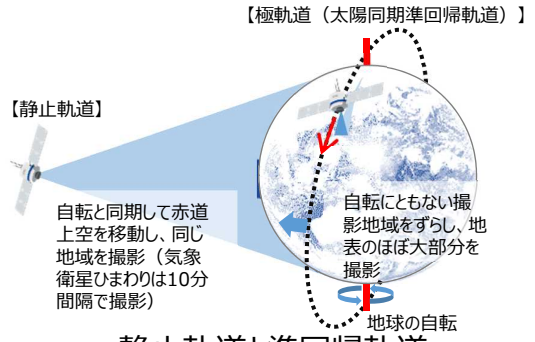
執印康裕　　宇都宮大学　学術院　森林科学科　教授

大野勝正　　アジア航測、鹿児島大学　客員講師

山地災害（衛星データ）

1. 人工衛星の軌道

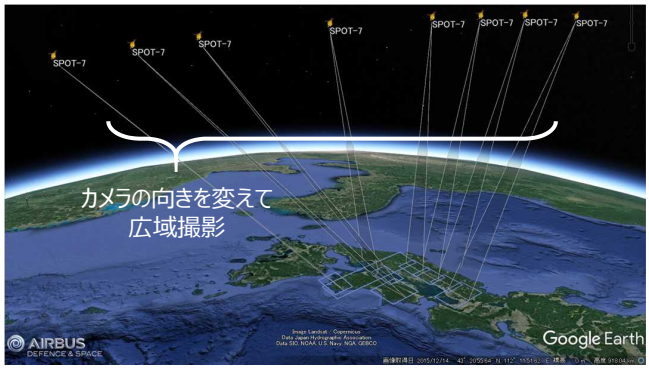
人工衛星が移動する道筋を軌道といいます。リモートセンシングで使われる主な人工衛星は準回帰軌道で周回しながら、地球表面のほとんどの領域を撮影します。最近では、数100機の超小型衛星によって地球全体を毎日撮影することができるほか、太陽電池を使って高々度を無人で飛行する航空機の開発も進んでいます。



静止軌道と準回帰軌道

2. 斜め撮影

人工衛星のなかには撮影しながらカメラの向きを変える機能を持っているものもあるため、撮影方向を変えながら一度に広い面積を撮影することや、少し離れた軌道から斜めに撮影することができます。この機能は発災時の緊急撮影をするときに有効です。

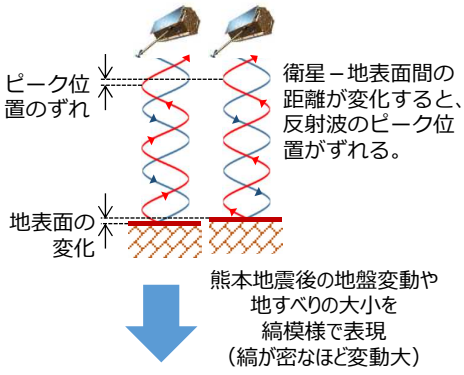


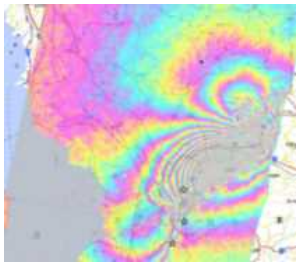
同一軌道からの広域撮影

3. 人工衛星の優位性

人工衛星に搭載される撮影機材は普通の写真を撮影する光学カメラだけではありません。地表面温度画像を撮影する熱赤外線カメラや、電波を計測する合成開口レーダ（SAR）などの様々な機材があり、これらを総称してセンサと呼んでいます。多様な撮影方法とセンサによって、人工衛星は空中写真にない優位性があります。

【空中写真に対する人工衛星の優位性】
広域同時性　：季節変化の影響を受けやすい森林を同時かつ広域撮影可能。
広域均質性　：広域撮影でも観測角等変動による画像内・画像間の不均質が生じにくい。
多波長性　　：人間の眼では見えない情報を捉えることができる。
経済性　　：一般的に人工衛星画像撮影のコストは低い。



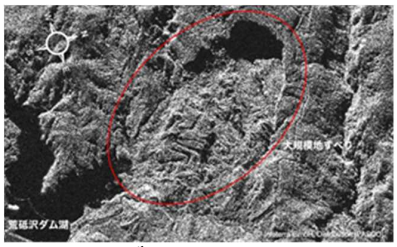


人間の眼で見えない情報計測の例
－　干渉SAR解析　－

4. 災害観測　岩手・宮城内陸地震

2018年6月14日に岩手県内陸南部を震源地として、マグニチュード7.2の地震が発生しました。地震発生から2日後の2008年6月16日に、ドイツのSAR衛星TerraSAR-Xにより被災地が撮影され、荒砥沢ダム湖周辺の大規模地すべりを鮮明に捉えることができました。左のSAR画像の濃淡は電波の反射強度を示しており、地形の凹凸が大きな領域は明るく表現されています。右の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ります。

SAR衛星は天候に左右されにくく、確実に撮影できるので、発災直後の被災状況把握に有効です。



荒砥沢ダム湖のSAR画像

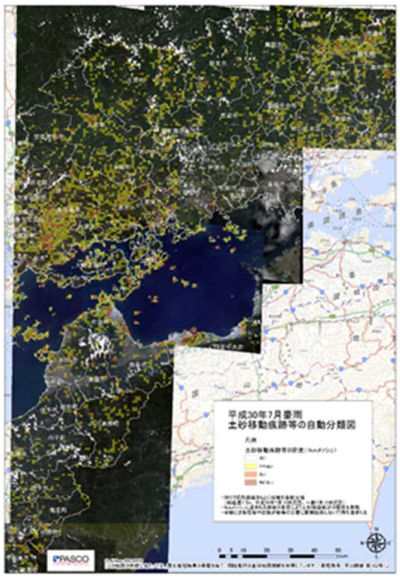
同地点の斜め空中写真

5. 災害観測　平成30年7月豪雨災害

2018年6月後半から7月の前線の活動や台風第7号の影響により、西日本を中心に広い範囲で記録的な大雨となり、岡山県、広島県、そして愛媛県の広域にわたって土砂崩壊が発生しました。

左の画像はフランスのSPOT衛星で撮影された広島県呉市の土砂崩壊箇所を示しています。ここで明るい茶色は裸地面を表しています。右の画像は自動判読によって広域の裸地面を抽出し、1km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す。自動判読結果であることから、右図には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ますが、広域の災害状況を迅速に把握するために有効な情報となるでしょう。

広島県呉市で発生した土砂崩壊の画像

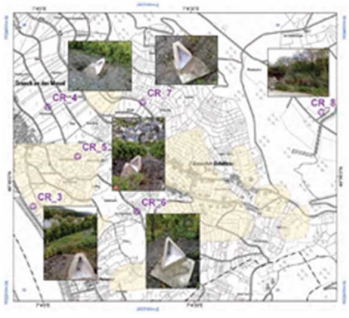


土砂崩壊発生量の広域分布

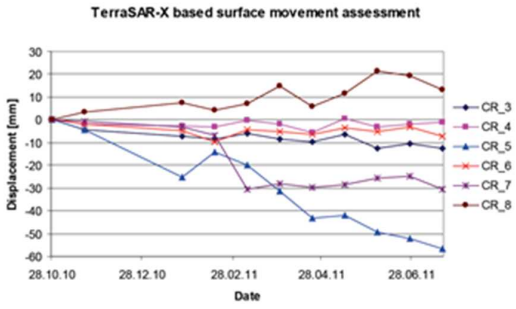
6. 将来的な技術

干渉SAR解析などの地形計測精度を向上するための技術開発が進んでいます。コーナーリフレクタ（以下、CRという）はSAR衛星の電波を効率的に反射するための機材であり、SAR衛星撮影における対空標識のようなものです。航空測量と同様に、CRも必要に応じて一時的に設置することが一般的ですが、地すべり斜面などに恒久的に設置することによって地形変動の長期モニタリングをすることができます。右のグラフは対象地に設置したCRごとの移動量を時系列で示しています。このようにミリメートル単位の地盤変動を長期にわたってモニタリングすることができます。

据置型CR



対象地へのCR設置状況

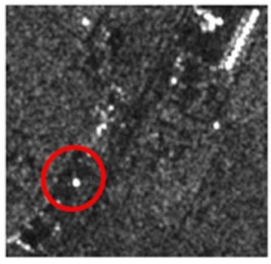


地形変動の時間推移

SAR衛星による計測をさらに高精度化するための技術に、アクティブCRがあります。これはSAR衛星からの電波を受信すると、受信電磁波の位相と強度を調整してSAR衛星に返信するもので、SAR画像では明るい散乱体として撮影されます。

アクティブCRが小型化され、治山施設や山間地のインフラ施設に簡単に設置できるようになれば、奥山の発災地など通信手段が確保できないような条件下においても、インフラの状態を監視することができるようになるでしょう。

アクティブCR



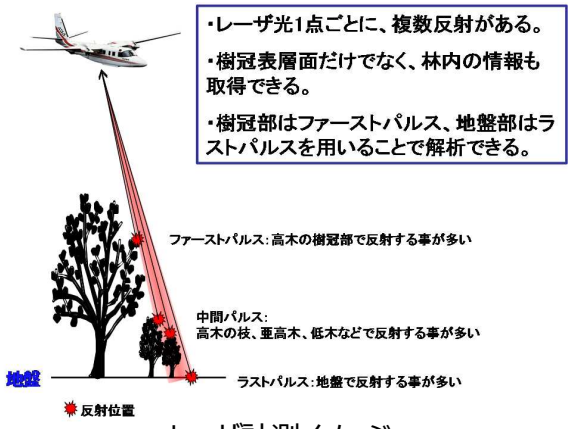
SAR衛星で観測したアクティブCR（図中赤丸）

株式会社パスコ　洲濱智幸

森林資源と病虫害（航空レーザ、衛星データ）

1. 航空レーザ計測について

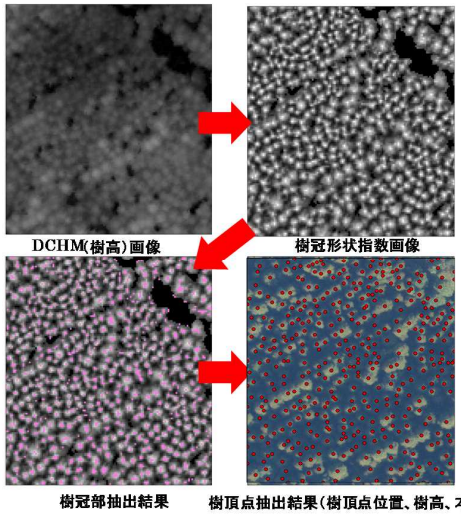
航空レーザ計測は航空機をプラットフォームとして、センサはレーザ計測システムを搭載し、上空から地上物の三次元情報を取得する技術で、樹冠表層高（DSM：Digital Surface Model）と地盤高（DEM：Digital Elevation Model）のデータを同時に取得することができます。これら樹冠表層と地盤高の差分により樹冠高（DCHM：Digital Canopy Height Model）を取得することができます。この樹冠高は森林資源情報を解析するための基礎情報となります。

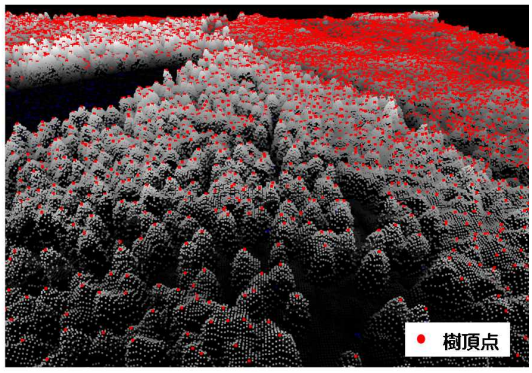


レーザ計測イメージ

2. 森林資源の把握

近年の航空レーザ計測を用いた森林資源把握は単木レベルの情報を取得することができます。単木解析は樹冠高の凹凸から樹木の樹頂点を抽出する手法です。抽出した樹頂点は樹冠高から樹高を取得できます。さらに、樹高や樹冠の大きさなどと胸高直径との相関を利用し、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ことができ、現地調査の代替情報となります。単木解析では樹冠の凹凸により一本の樹木がわかる必要があるため、主な対象樹種は針葉樹です。この単木情報は立木本数、立木密度や収量比数や相対幹距比など疎密度の評価にも役立てられています。

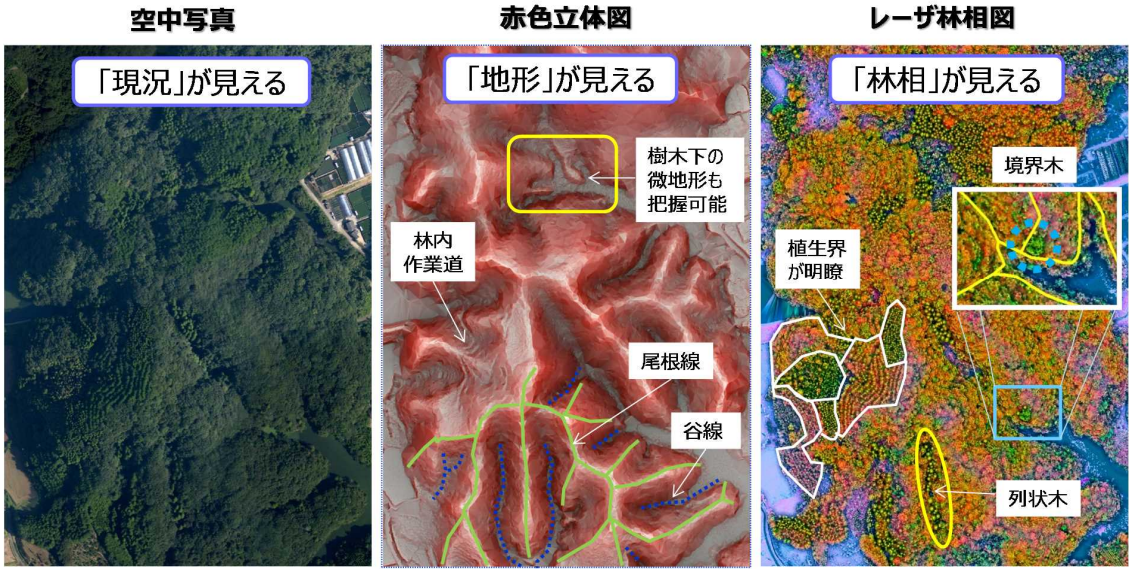




単木解析による樹頂点抽出事例

3. 森林の境界確認

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で所有界を決めていました。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りました。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ます。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境界の根拠資料として活用し、合意形成が図りやすくなりました。



航空レーザ計測を活用した森林の境界管理

4. ナラ枯れの抽出手法

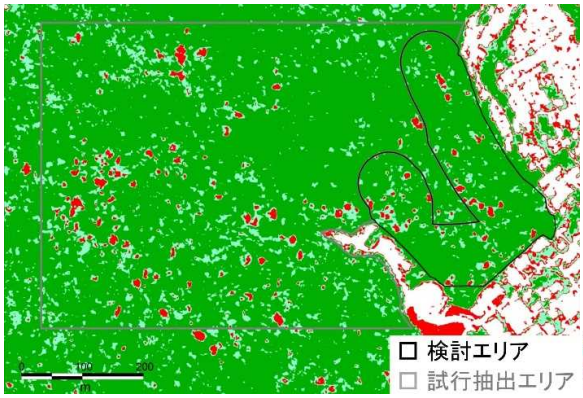
ナラ枯れの被害を短期間に広範囲で抽出する手法として、リモートセンシングによる手法が有効です。これには、レーザ計測を用いる手法と航空写真や衛星画像を用いる手法があります。前者は、大径木がナラ枯れの被害にあいやすいという既往知見に基づき、レーザ計測によりコナラ林分の高さと胸高直径の相関から大径木を抽出する手法です。後者は、植物の分光反射特性を利用し、枯死した樹木（枯死木）を抽出する手法です。いずれの手法においても、現地調査の結果と比較し、抽出の精度を確認する必要があります。

5. 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す。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、大径木を抽出します。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ります。大径木の抽出には、樹冠高と胸高直径の相関を利用します。コナラの樹高と胸高直径の間には相関関係があり、胸高直径が 20cm 前後で樹高の上限値の 15～20m に達すると言われています。このことから、樹冠高が 15m 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ます。この結果を用いて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ます。

6. 衛星画像を用いたナラ枯れの抽出

2m 以上の高解像度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す。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ます。健全な樹木の緑葉は分光反射特性により、光の近赤外波長（NIR）をよく反射し、赤色波長（R）を吸収します。一方、枯死木は赤色波長を反射します。この違いにより、可視画像（R）と近赤外画像（NIR）から、NDVI を算出した画像で樹冠の枯死状況を判読します。衛星画像は、Digital Globe 社の WorldView-2 を使用しました。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、被害木を抽出できませんでした。



NDVI = (NIR-R) / (NIR+R)

NDVI：正規化植生指標
NIR：近赤外域波長
R：赤色域波長

NDVI の算出結果により枯死木の抽出が可能

WorldView-2 の概要

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

7. 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ます。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 100～350m 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ます。さらに、道路や伐開地に近く（40m 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ります。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として評価することができます。

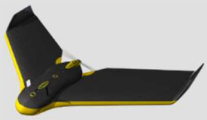
ナラ枯れ被害の傾向として、前年度被害木がまとまった箇所の周辺でより被害が拡大することが確認されています。この傾向は前年度被害木がまとまって発生した箇所を中心にカシナガの繁殖コアエリアを形成し、翌年に脱出した大量のカシナガが、周辺のナラ類に多数の穿孔被害をもたらすことが原因と考えられています。これらの傾向とリモートセンシングで得た抽出結果から、ナラ枯れの拡大を予測できる可能性があります。リモートセンシングを活用した手法では林内の目立たない場所に発生した枯死木を効率よく見つけることができます。また、人が踏査できない場所や被害初期の広域調査に有用です。

アジア航測株式会社　大野勝正

UAVを用いた森林管理

1．UAVについて

・UAV（**U**nmanned **A**erial **V**ehicle）
「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
・UAV機体の種類と特徴

タイプ	特徴	代表的な機体
固定翼	・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社） UX5（Trimble社） 
回転翼 （シングルローター）	・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社） PDH-03（PRODRONE社）
回転翼 （マルチローター）	・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社） Matriceシリーズ（DJI社） Zionシリーズ（エンルート社） SPIDERシリーズ（ルーチェサーチ社）

※現在最も普及しているのは、マルチローター型の回転翼機

・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	α5000（SONY社） EOS（Canon社） HERO5（GoPro社）
レーザスキャナ	三次元点群データ	VUX-1（Riegl社） VLP-16（Velodyne社） Surveyor（YellowScan社）
熱赤外カメラ	温度画像	FLIR duo（FLIR Systems社）
マルチスペクトルカメラ	多波長画像	Sequoia（MicaSense社） RedEdge（MicaSense社） Yubaflex（BIZWORKS社）

2．UAVのメリット／デメリット

UAVのメリット
- 地上調査に比べ、立ち入りや地形上の制約が少ない
- 数十ha程度の特定の施業地では、効率的な計測が可能
- 雲の下を飛ぶことができるため、有人機に比べて計測機会が多く、機動的な計測が可能

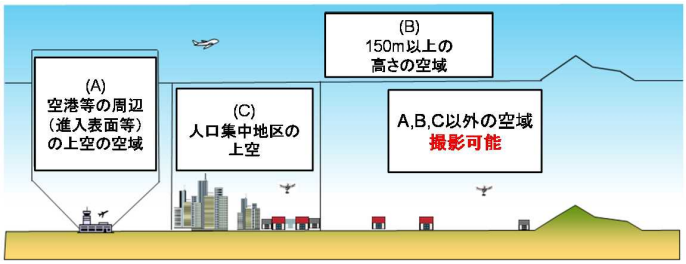
UAVのデメリット
- 数千ha以上の広域に対しては、有人機より非効率
- **事故のリスクが高い**
- 法規制や安全対策などに十分注意を払う必要

作成者：国際航業株式会社　今井靖晃
問合せ先：yasuteru_imai@kk-grp.jp

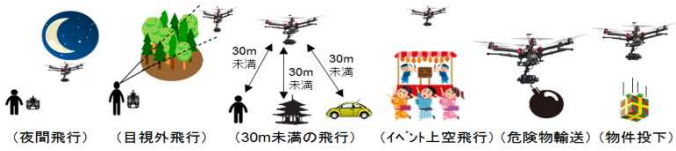
UAVを用いた森林管理

3．UAVによる森林調査の注意事項

・改正航空法等で定められた飛行禁止区域、飛行ルールをよく理解しておく



A～Cの空域は、国土交通大臣の許可が必要
（200g未満の機体は対象外）



改正航空法における禁止事項

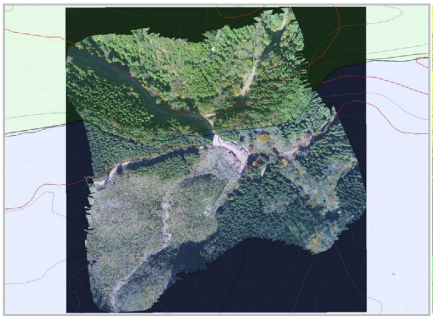
空港近傍の森林、都市近郊の森林、防衛関係施設と隣接する森林、送電線周辺は要注意

4．UAVによって得られる情報

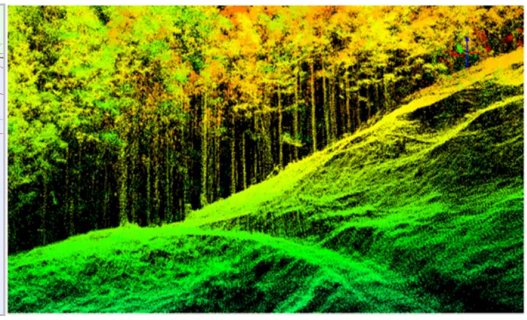
・デジタルカメラとレーザスキャナの比較

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。	△	○

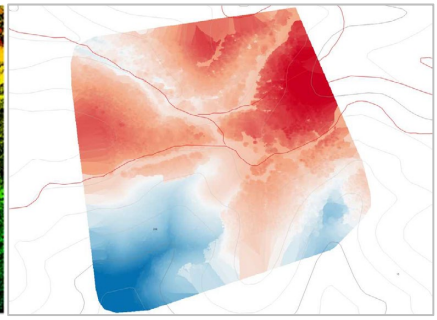
森林・林業分野では、DSMとDEMの差から求められるDCHM（Digital Canopy Height Model：デジタル樹冠高モデル）やオルソフォトを用いて、林相、立木本数、樹高、胸高直径、樹冠投影面積、材積等の森林資源情報を把握することができます。



オルソフォト



オリジナル点群



DSM

5．将来展望

・「空の産業革命に向けたロードマップ2020」

①2022年度に有人地帯での目視外飛行（レベル4）実現へ
②2022年度までに、全都道府県・全森林管理局で森林被害把握等にUAV利用

・技術革新

①非GNSS環境での飛行制御
②垂直離陸型UAV「VTOL」

作成者：国際航業株式会社　今井靖晃
問合せ先：yasuteru_imai@kk-grp.jp

活用事例：病害虫

少子高齢化時代にむけ

業務を支える空中写真のデジタル立体視

ー現地を詳細に把握する高効率で最安価な管理法ー

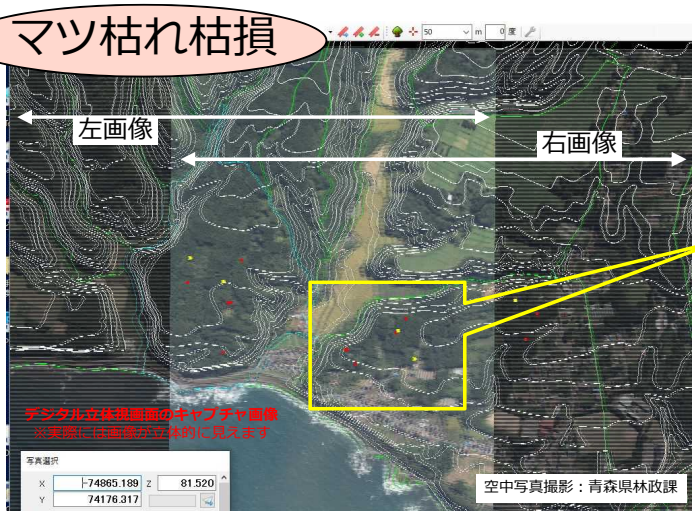
●問題点●

オルソ画像から枯損木を抽出しても**誤判読が多く、**結果的に現地調査が必要です。
現地に行かずに状況を把握できるようにしたい。

【ポイント】

オルソは高さ情報のない加工された合成画像です。写真が持つ情報を最大限に活かすには、写真をそのまま使い『**立体視化**』させることです。立体視すると現地を見ているように把握でき、樹木の形状や地形の凹凸も計測できます。現地を忠実に再現しているため、**業務の大幅な軽減に結び付く**のです。デジタル立体視が効果的です。

マツ枯れ枯損



拡大画像

赤丸、黄丸は、立体視判読した枯損木です。
（単写真での表示状態です）

枯損木の拡大

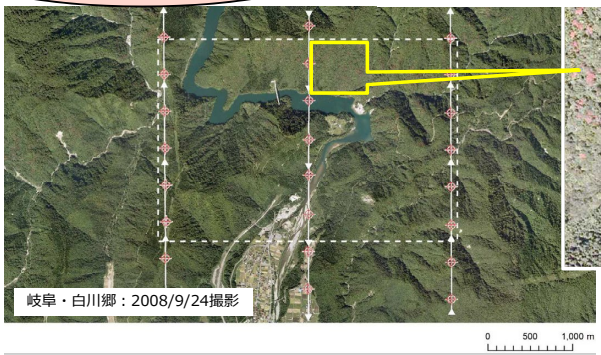
2次元画像では大凡の枯損推定ですが、**立体視では立木状態での枯損形態まで把握できます。**

上図　空中写真２枚によるデジタル立体視の表示画面

右画像と左画像が重なる明るい範囲が立体視範囲です。立体視上に等高線(白)、林班(緑）、道路(青）を重ねました。マツ枯れは単木単位で点在しますが、適切な時期に撮影した空中写真を使えば広範囲の地域でも1日で的確に把握できます。

ナラ枯れ枯損

空中写真はドローンより広域を把握できるので効率的です。



時系列の変化

時期を変えて撮影すると枯損経過の把握も容易です。

左図：広域から単木まで均一精度で把握　　中図：１斜面の拡大　　右図：単木単位での判読

（白縦線：３飛行コース、破線枠：1撮影範囲、　赤丸：撮影点）

ナラは樹冠が大きいため判読が容易です。適切な時期に撮影すると一瞬で広域を的確に把握できるので非常に効率的です。

★ 三次元モデルやオルソは正射投影で便利ですが、処理過程で写真情報が劣化します。
写真を最大限に活かすには原画像（中心投影）のまま使い、図面の線や位置（正射投影）を中心投影に逆に変換して使う方法です。原画像を基盤としています。

●問題点●

● 森林管理図面は、昔、測量した情報が長い間引き継がれたものです。今はGIS化されても製図精度は過去の曖昧のままです。現地を知る方々も少なくなり図面が唯一の情報源です。山に入り再調査するにも大変な労力と時間を要し現実的ではありません。

【ポイント】

空中写真を使うと約60年間の土地利用の遍歴を客観的に確認できます。その空中写真を立体視化すると当時の現地が忠実に再現でき、既存の図面情報などを重ねるとあたかも現地に線が引かれたように確認ができます。

この立体画面上では測量もできるため、過去の遍歴を元に再測量を行い、結果を最新画像上で比較することも容易にできるのです。

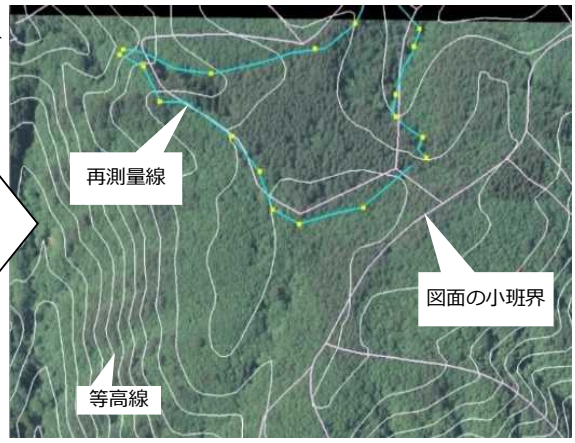
60年間の空中写真を用いた森林境界確定

画像は全て原画像です

2011年画像　林分の境界は曖昧です。

1965年画像　植林後のため林分の境が明確です。管理図面の白線とは大きく異なります。

1965年の伐採地に沿い立体視上で再測量（青線）



2011年画像で検証

1965年で再測量したものを2011年画像に重ね、それに等高線や管理図面の線も重ね表示させた。

★ GPSは推定の位置で**常に変動**しています。しかし、**画像上の杭(ポイント)や線(ライン)は**例え現地が変化しても**永遠に同一地点**を示します。　**現地の杭の代わりになります。**

★ ドローン画像も空中写真と同様、**立体視化**させて利用することができます。
林分単位や流域単位にはドローンより**空中写真の方が効率的でコスト的にも優れます。**

❖空中写真の大きな利点❖

- **雲がない。**
- 衛星のように**斜め撮影がない**
- 森林管理に**適切な広域**を1枚で
- **撮影時期を指定**できる。
- **約60年間の蓄積**がある。
- 既存写真(林野)は2500円～と**安価**
- 重ね撮影のため**高さ情報**がある。
- **高解像度**（約16cm～）で鮮明
- **長期管理に優れている。**

元森林総合研究所：中北理、 グリーン航業株式会社

治山施設管理 ICTを用いて集水井の点検を安全に

集水井点検時の懸念

× 集水井内部は危険

- 点検に時間がかかる
- 部材の腐食による落下
- 有害ガスの発生
- 酸欠のおそれ

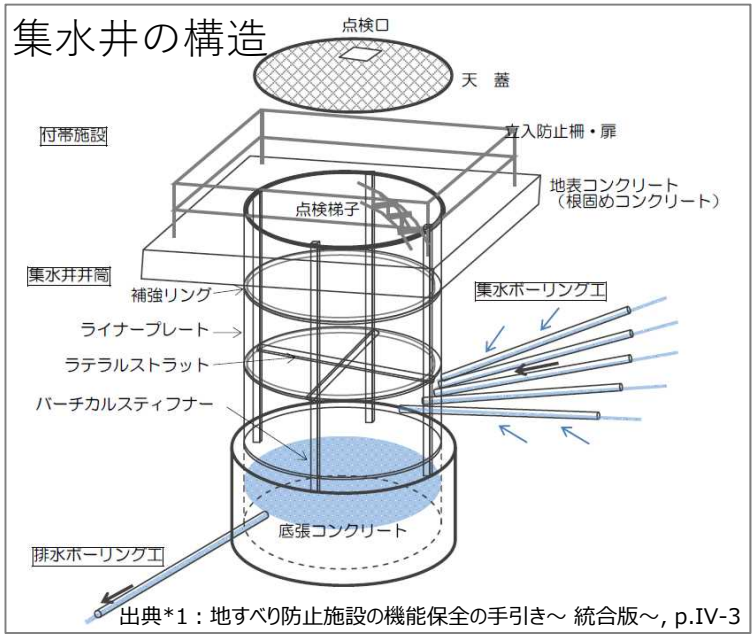
集水井を取り巻く現状

- 施設建設開始から60年超
- 全国で推定11,000基以上
- 老朽化による集排水機能低下・腐食 etc…

× 集水井点検作業・整理の負担大

- 調査用紙への記録
- 数値・写真・文字データの入力
- 位置情報の付与
- 帳票作成

集水井の構造



出典*1：地すべり防止施設の機能保全の手引き～ 統合版～, p.IV-3

集水井内に入らず写真撮影

SfM (*3)技術を活用したシームレス展開写真

安全で効率的な集水井の維持管理

□ **集水井内の点検 → 集水井カメラ**

既設集水井工の3D モデル化
シームレス展開写真の作成

□ **集水井点検結果の整理 → モバイルGIS**

モバイルGIS (*2)による点検データの収集・管理
点検結果の帳票化

集水井カメラを使用するメリット

✓ 危険な集水井内の点検負担の低減
✓ 腐食、植生侵入など井内の様子が一目で分かる
✓ ３Dモデルで集水井の形状・変状を記録
✓ 作業者の技量による品質のばらつきを防止

→ ICTを利用した効率的な治山施設管理

*1 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～ 統合版～, 農林水産省, 209p.
*2 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（Geographical Information System：地理情報システム）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）
*3 SfM (Structure from Motion)は、異なる位置から撮影された多数の高画質静止画増を基に撮影対象の3Dモデルを作成する技術

治山施設管理　ICTで自動・時短・一元管理

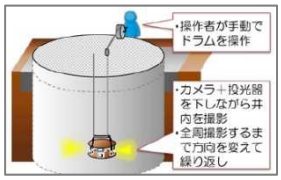
従来の調査とモバイルGISを使った調査の違い

野帳を使った調査　　モバイルGISを使った調査

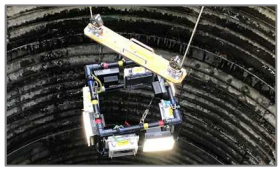
ICTを使った集水井の維持管理手順

集水井カメラ

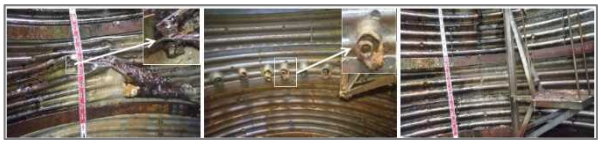
①天蓋にロープを固定し専用の治具を吊るす



②市販のデジタルカメラと照明を治具に固定する



③インターバル撮影しながら治具を降下させ、静水槽に達したら引き上げる



井壁の変形、発錆　　集水ボーリングの目詰まり　　補強リングの裏、点検梯子の井壁接合部

④1回の昇降で4方向、計3回で12方向を撮影（20m級の集水井1基で静止画2000枚程度）

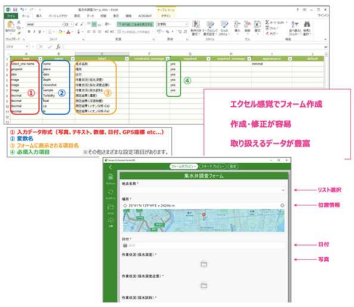
⑤撮影した静止画をSfM解析し、3Dモデルを作成

⑥3Dモデルを点群データの編集ソフトにより展開し、井壁の展開写真を作成

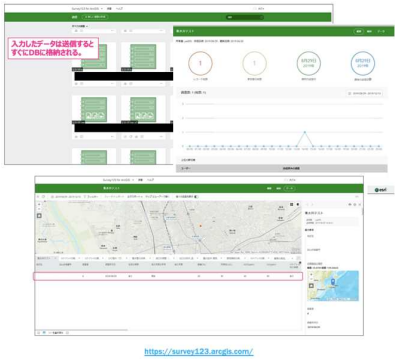
モバイルGIS (Survey123 Connect for ArcGIS)

①フォーム作成

②XLS上でフォームに入力する項目を定義して入力



③入力データのリアルタイム集計



④集計結果をCSV、EXCEL等に書き出しマクロ等で帳票化

モバイルGISを使用するメリット

- ✓ 作業量軽減（データをその場で送信～集計）
- ✓ データの一元管理
- ✓ 入力フォームの変更が容易

ICTを利用した効率的な治山施設管理

国土防災技術株式会社
岡本勝男・齊藤雅志・白井大介

「森林調査手法の現状と今後のあり方」報告書目次

森林調査の基礎と技術動向

森林調査および調査方法の変遷

森林における土砂流出調査技術

デジタル技術を用いた森林調査

モバイルGISを用いた森林調査

UAVを用いた森林調査

空中写真を利用した森林調査

航空レーザを用いた森林調査

人工衛星を用いた森林調査

応用編：森林調査の事例

森林資源状況の把握

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

空中写真を活用した効率的なマツ枯れ防除法

ナラ枯れ被害の抽出および拡大予測の手法について

山地災害の状況の把握

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

空中写真の立体視による森林境界管理

展望編：森林調査の将来

土砂移動現象とリモートセンシング技術

マルチスペクトルレーザ（先端レーザ）を使った森林調査

UAVを用いた森林調査

山地災害状況とリモートセンシング技術

本研究開発は、公益社団法人国土緑化推進機構「緑と水の森林ファンド」の助成により実施されました。

報告書は森林・自然環境技術教育研究センターのウェブサイトで公開しています。

令和3年7月23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　102-0074
住　　所　　東京都千代田区九段南4－8－30アルス市ヶ谷103
Ｔ Ｅ Ｌ　　03-5212-8148
Ｆ Ａ Ｘ　　03-5212-8021
E-mail　　office@jafee.or.jp
Ｕ Ｒ Ｌ　　http//www.jafee.or.jp/

パンフレット執筆者/社

洲濱智幸　　パスコ　中央事業部

https://www.pasco.co.jp/

大野勝正　　アジア航測、鹿児島大学

https://www.ajiko.co.jp/

今井靖晃　　国際航業　LBSセンシング事業部

https://www.kkc.co.jp/

中北　理　　元森林総合研究所

後藤智哉　　グリーン航業　事業部

http://www.grnk.co.jp/

岡本勝男　　国土防災技術　技術本部

https://www.jce.co.jp/