

## 表層崩壊予測モデルを用いた森林の崩壊抑制機能評価の試み — 広葉樹林のデジタルツインモデルの活用事例 —

国際航業株式会社：○笠原拓造，小泉和也，西方大翔，初見 慧  
神戸市立工業高等専門学校：鳥居宣之  
株式会社アーバンクリエイト：玉利正人

### 1. はじめに

近年，UAV を用いた測量技術の進展により，広域かつ高密度な 3D 点群データの取得が容易となり，実務レベルでの活用が一般化しつつある。

本稿では，高密度 3D 点群データから抽出した全数調査に基づく樹木情報と，従来のサンプリング調査による情報を比較し，それらの差異が斜面安定解析に及ぼす影響について，試行的に樹木自重および根系の緊縛力を斜面安定解析モデルに組み込み評価した事例を報告する。

### 2. 調査地点

調査地は，兵庫県神戸市に位置する南向きの流域面積約 4.8ha，標高差約 200m の山腹斜面である。地質は花崗岩で表層は風化の進んだ砂質土からなる（図-1 参照）。流域には，谷出口に砂防堰堤 2 基（兵庫県）のほか数基の石積みの床固工（所管不明）や支川に流路工（所管不明）が整備されている。また，航空レーザ測量成果による DEM や DSM 等の 3 次元データが公開されているほか，兵庫県土木部砂防課により，10m のメッシュサイズで土砂災害の危険度を予測する箇所別土砂災害危険度予測システムの運用<sup>1)</sup>が行われている。流域の植生は，アラカシを主体とする常緑照葉樹からなり，昭和 42 年（1967 年）7 月の豪雨時に小規模な崩壊や溪床の洗堀が発生しているが，昭和 21 年（1946 年）撮影の空中写真以降，約 80 年間の樹木の成長の他には山腹斜面に大きな変化は見られない（図-2 参照）。なお，当該流域は六甲山系グリーンベルト整備地内に位置する。

### 3. 広葉樹林のデジタルツインモデル

UAV レーザ測量は，令和 7 年（2025 年）7 月と令和 8 年（2026 年）1 月の 2 時期実施した。飛行コースは，図-1 に示すとおりの様々な角度からレーザを照射できるように格子状に設定した。対地高度約 100m，秒速約 3.5m の速度で計測を行い，夏季は約 4,000 点/m<sup>2</sup> 以上，冬季は約 6,000 点/m<sup>2</sup> 以上の密度の点群データを取得した。このうち，夏季は約 4%，冬季は約 28% の点が樹冠（地表から 5m 以上を想定）を抜けて地表や樹幹に到達していた（図-3 参照）。

冬季の高密度点群データを用いることで，従来の航空レーザ測量（数点～数十点/m<sup>2</sup> 程度）では困難であった広葉樹の単木情報（位置，樹高，幹径など）を室内作業で高精度に抽出できることが確認された（図-4 左図参照）。

### 4. 森林の崩壊抑制機能評価の試み

#### (1) 樹木の計測

図-1 の赤枠で囲った斜面（面積 0.187ha）について，UAV レーザ測量による点群データより単木毎に位置座標・樹高・幹径をコンピュータ上で計測した。一方，従来のサンプリング調査として，下流右岸斜面の調査箇所（図-1 参照）における現地調査結果

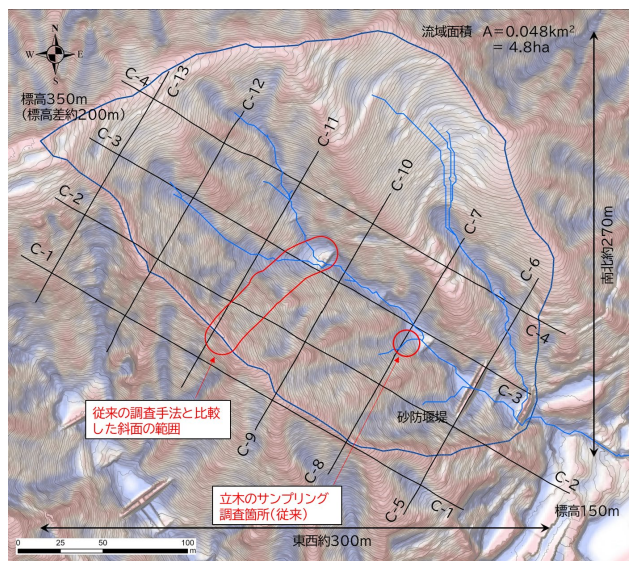


図-1 調査範囲（CS 立体図，UAV 飛行コース）

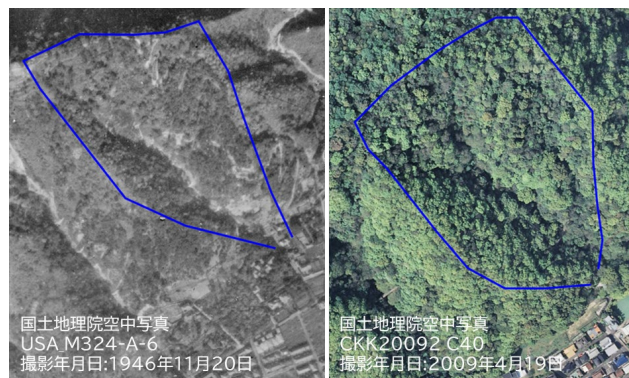


図-2 調査地の斜面被覆状況

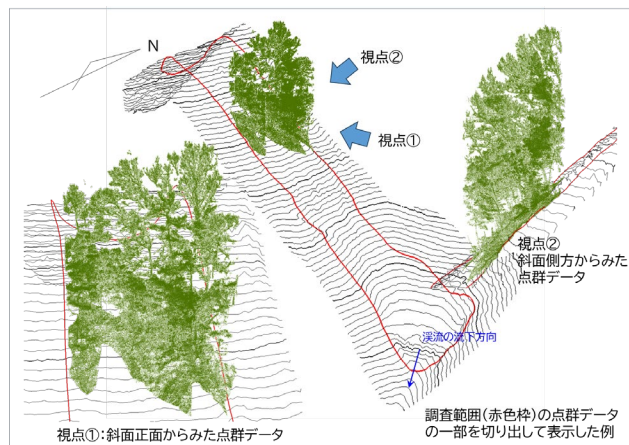


図-3 デジタルツインモデルの表示例

から，樹木密度や樹高と胸高直径の関係性を整理し，同上の赤枠範囲内の単木を推定した。その結果，樹木本数（密度）や樹高，胸高直径のいずれにおいても差が生じた（図-4 右表参照）。

(2)斜面安定解析 (試行)

樹木の自重および根系の緊縛力を算定し、無限長斜面安定解析モデルにより安全率1未満となる地下水位を求め、全数調査と従来のサンプリング調査とを比較した。

樹木の自重は、材積量に比重 0.98 を乗じて算定した。根系の緊縛力については、水平根によるネット効果として根系による水平方向の粘着力増分を算定した(式-1 参照)。垂直根による杭効果については、根の深度が不明なため見込まなかった。斜面安定解析は、森林を考慮した表層崩壊予測モデル(式-2参照)により、安全率1未満となる地下水位を逆算的に求めた。解析の単位は、樹木毎にティーセン法により分割した範囲とした。算定した地下水位は降水量に換算(表土層の空隙率 0.35 と想定)し、降雨により崩壊発生が予測される斜面として図示した(図-5 参照)。

UAV レーザによる全数調査の結果、従来のサンプリング調査と比較して、立木密度は4.6倍、平均樹高は0.75倍、平均径は0.45倍と大きな乖離が認められた。一方で、安全率1未満となる降雨条件における危険箇所の分布傾向は、両手法で類似した結果となった。これは、サンプリング箇所が低密度・大径木であったのに対し、対象地全体は高密度・小径木が主体であり、樹木荷重と根系の緊縛力という相反する二つの要因が相殺し合ったことで類似した結果となったと推察される。詳細に比較すると300mm以上の分布面積は全数調査が145m<sup>2</sup>、従来調査の92m<sup>2</sup>の1.6倍となっており、データの精緻化による差異は確認できる。

5. まとめ

本試行の結果、UAV レーザ計測による高密度3D点群データ(山地斜面のデジタルツイン)は、広葉樹の単木情報を比較的広域かつ詳細に取得できることが確認された。これは、森林の崩壊抑制機能の定量的な評価を可能にする精度を備えており、今後の斜面安定解析における有効な基盤情報となることが示唆された。また、山地斜面のデジタルツインは、森林および砂防といった領域横断的な研究成果を集約し、議論を深めるための共通基盤(プラットフォーム)として有用性が高いと考えられる。これは、複雑な山地斜面の評価において、専門分野の垣根を越えた連携を促進する新たな技術基盤として期待される。また、本溪流では、雨量計(林外・林内)や地下水位計、土壌水分センサ、地表面流量の観察機器(TimeLaps カメラ等)も設置しており、今後これらの観測成果もふまえて、土砂災害のリスク評価等の検討を進めていきたい。

謝辞

兵庫県土木部砂防課より、調査地の使用承諾や基礎情報を提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 沖村孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則(2011): 豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築, 新砂防, 63(6), pp. 4-12.

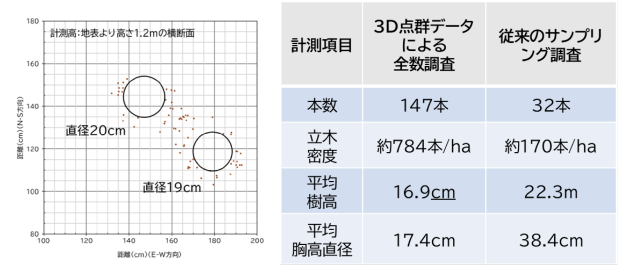


図-4 胸高直径の計測事例と計測結果 (図-1の赤枠囲い斜面)

指数関数による樹根別抵抗力 $\Delta C$ の式:

$$\Delta C = a \times \exp(b \times L / DBH)$$

$\Delta C$ : 根の引張抵抗力 [kN/m<sup>2</sup>]  
 $L$ : 樹木からの水平距離 [m]  
 $DBH$ : 胸高直径 [m]  
 $a, b$ : 樹種別の回帰係数

遠藤崇・遠坂潤宏・土屋賢(2010): 胸高直径を用いたヒノキ水平根の分布範囲の推定, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, p. 536-537  
 樹種別の回帰係数は平成24年度六甲山系グリーンベルト樹木根系調査業務報告書(国土交通省近畿地方整備局六甲防事務所)より, aは20.540, bは-0.1072(アラカシ)と想定した  
 林野庁(2015)平成26年度土砂流出防止のための森林施業方法に関する調査委託事業報告書より

式-1 根系による水平方向の粘着力増分の算定方法

樹木を考慮した表層崩壊モデル(無限長斜面安定解析モデル)

$$F_s(t) = \frac{c + c_{ps} + A(t) \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi + c_{rn}}{B(t) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{c_{rn}}{B(t) \cdot \sin \beta}$$

$$A(t) = q_0 + \gamma_s \cdot (H - h(t)) + (\gamma_{sat} - \gamma_{water}) \cdot (h(t) - z)$$

$$B(t) = q_0 + \gamma_s \cdot (H - h(t)) + \gamma_{sat} \cdot (h(t) - z)$$

表土層(H) ----- 一律0.8mと想定  
 すり面の勾配( $\beta$ ) ----- 地表面傾斜とした  
 土の飽和単位体積重量( $\gamma_{sat}$ ) ----- 1.7[kN/m<sup>3</sup>]と想定(風化花崗岩) ※試算的な検討  
 飽和土の水中単位体積重量( $\gamma$ ) ----- 19[kN/m<sup>3</sup>]と想定(風化花崗岩) 先に樹木の影響を決めてし  
 土の粘着力( $c$ ) ----- 逆算により設定 まい逆算で粘着力を推定  
 土の内部摩擦角( $\phi$ ) ----- 31[度]と想定(風化花崗岩) } 土の強度定数  
 +  
 地下水 地下水位( $h$ ) ----- 安全率が1未満となる地下水位を逆算で求めた  
 +  
 樹木 樹木による上載荷重( $q_0$ ) ----- 立木の荷重(材積量×木の密度(0.98)と想定)  
 根系による粘着力の増分( $c_{ps}$ ) ----- (水平根によるネット効果)立木の粘着力増分として考慮  
 根系による粘着力の増分( $c_{rn}$ ) ----- (垂直根による杭効果)今回は考慮なし  
 水平根系の侵入深さ( $L$ ) ----- 表土層厚と同じ程度と想定

式-2 森林を考慮した表層崩壊予測モデル

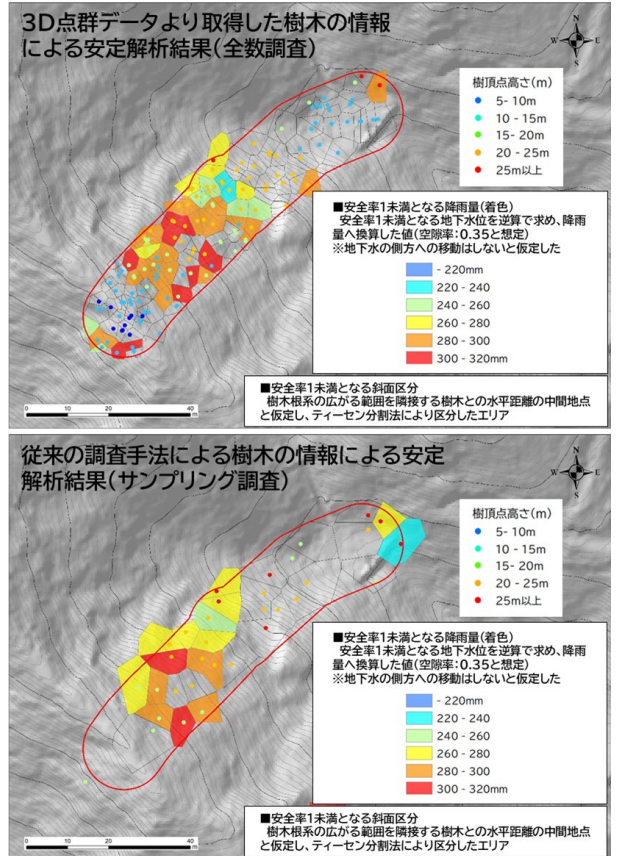


図-5 安全率1未満となる降雨量分布(斜面安定解析試算結果) [樹木全数調査とサンプリング調査(従来)の比較]