

## 審査の結果の要旨

氏名 ジャトウカ サデーパ

異齢林は同齢林に比べて林分構造が複雑かつ不均一であり、その管理計画策定に際しては、精細で正確な森林情報の取得が欠かせない。近年、広域の森林情報を低コストで収集するための技術として、無人航空機 (UAV) が世界的に注目を集めている。なかでも固定翼型の UAV は、高速飛行が可能で飛行時間も長く、より広範囲の森林を効率的に空撮できるため、森林管理への応用において高い優位性を持つ。しかし、固定翼 UAV を異齢林管理に適用した研究例は未だ少ない。そこで本論文では、針葉樹と広葉樹が混交する北日本 (北海道) の異齢林管理計画における固定翼 UAV の利用可能性に関して、1) 林冠構造指標の算出と精度評価、2) 森林資源量の推定、3) 林冠構造に基づく森林タイプ区分、の観点から検討するとともに、4) 実際の異齢林管理計画への適用を行った。

本論文では第 1 に、異齢混交林における固定翼 UAV を用いた写真測量 (UAV-SfM) の精度評価を行った。東京大学北海道演習林 (北演) の 45・48 林班を対象に、固定翼 UAV で撮影したステレオ画像から三次元点群とデジタル林冠高モデル (UAV-SfM<sub>CHM</sub>) を生成し、航空機レーザー計測 (LiDAR) によるデジタル林冠高モデル (LiDAR<sub>CHM</sub>) と比較した。各 CHM から林冠高とその変動、樹冠被覆を表す指標値 (説明変数) を算出し、一般化線形モデル (GLM) により上層高 ( $h_{dom}$ )、胸高断面積合計 (BA)、平均胸高直径 ( $D_q$ ) を推定した。その結果、いずれも推定値の二乗平均平方根誤差 (RMSE) は両者間で差がみられず、UAV-SfM が LiDAR とほぼ同等の精度を持つことが実証された。一方、UAV-SfM により生成した点群では、樹頂や小さな林冠ギャップを正確に復元できない場合があり、また林冠構造の複雑性が高いほど推定値の精度は低くなる傾向がみられた。

第 2 に、UAV-SfM によって異齢混交林の資源量を推定し、LiDAR との比較により精度評価を行った。前章で算出した各指標値を用いて、一般化線形混合モデル (GLMM) により林分材積 (V) および樹木バイオマスの炭素ストック量 (CST) を推定した。その結果、いずれも林冠高とその変動、樹冠密度を固定効果に含むモデルが選択された。UAV-SfM による推定値の RMSE は、LiDAR

に比べてやや大きくなったが、オルソモザイク画像から算出した広葉樹被覆率を固定効果に加えることで差は小さくなり、LiDAR とほぼ同等の精度を持つことが示された。

第 3 に、林冠構造指標に基づく異齡混交林のタイプ区分を行った。UAV-SfM、LiDAR、地上計測の各データから算出した計 22 の構造指標に対して、主成分分析 (PCA) とプロクラステス分析を適用した結果、林冠構造の垂直的、水平的変動を最もよく表す UAV-SfM 指標の組み合わせとして、平均林冠高 (MeanH)、林冠高の標準偏差 (SDH)、樹冠密度 (CC) が選択された。これら 3 つの指標に広葉樹被覆率を加えた 4 因子による PCA とクラスター分析 (k-means 法) を行った結果、調査地を 5 つの林冠構造タイプに分類できた。さらに、多項ロジスティック回帰分析により調査地全域のタイプ分類を行い、林冠構造タイプ別の分布図を作成した。

第 4 に、UVA-SfM により取得した森林情報の異齡林管理計画への利用可能性について、北演の林分施業法に基づく異齡林管理計画を対象にケーススタディを行った。はじめに、林分施業法の林種区分への利用を想定し、UAV-SfM による計 12 の林冠構造指標と広葉樹被覆率を用いて、決定木分析により調査地 (45 林班) の林種判別を行った。その結果、広葉樹択伐林 (BDM) や広葉樹若齡林 (YB)、疎生林 (SF) では高い精度で判別できた。一方、UVA-SfM では林冠下層の更新状況が把握困難なため、更新木の多寡を区分基準に含む針葉樹択伐林 (CDM) と針葉樹択伐林 (更新少) (CDM-PR) では判別精度が低くなった。次に、前章で構築した統計モデル (GLM、GLMM) を用いて、調査地の BA、 $D_q$ 、V、CST をそれぞれ推定した。その結果、いずれも推定値は地上計測による算出値とよく適合した。さらに、回帰モデルの適用によって調査地全域の V と CST の総量推定や空間分布図作成が可能であり、異齡林の収穫・修復計画策定や炭素管理に利用可能であることを示した。

以上のように本論文は、固定翼 UAV が正確かつ詳細で空間明示的な森林情報の収集を可能にする革新的な技術であり、異齡林管理の効率化と省力化、および精密林業の実現に役立つものであることを具体的に示したものである。これらの研究成果は、学術上応用上寄与するところが少なくない。よって、審査委員一同は本論文が博士 (農学) の学位論文として価値あるものと認めた。