

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
林, 2020 ³¹	レビュー				衛星光学センサ、衛星LiDAR、SAR

※1 バイオマス資源量の推定

through analysis of 25-m ALOS/PALSAR mosaic data. Forest Ecology and Management, 389, 199-210.

³¹ 林真智. (2020). 森林バイオマス推定のリモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, 40(1), 2-12.

b) 空中写真

空中写真による森林資源量の推定は、立体視等を活用して 1980 年代から盛んに取り組まれている。空中写真上での林型区分、立体視による樹高の判読、本数・樹冠直径の判読など机上での分析と現地調査を組み合わせた手法により蓄積が推定される。広葉樹においては北海道を中心に材積推定が実施され、誤差率は 10~20%程度であった（小木 1989, 飯塚・松平 1989, 鷹尾ら 2000）。

目視での判読を伴う点で判読者の技術力が求められるというハードルがあったが、近年は空中写真の自動分析ソフトを活用した自動分析（大萱 2015）や、航空レーザ計測と組合わせた手法（寺園ら 2018）等が開発され、適用性が高まっている。

曲がり等を含めた用材としての資源量推定は報告がない。

表 3-8 空中写真を用いた森林資源量把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
小木, 1989 ³²	広葉樹※ ²	北海道		誤差率 13.4%	空中写真
飯塚・松平, 1989 ³³	針葉樹、広葉樹※ ²	北海道	1ha	針葉樹誤差 6.1%, 広葉樹誤差 25.9%	空中写真
鷹尾ら, 2000 ³⁴	トドマツ、エゾマツ、広葉樹※ ²	北海道	10755ha	平均蓄積 195±23m ³ /ha	空中写真
大萱, 2015 ³⁵	※ ²			材積誤差率 20%程度	空中写真、もりったい
寺園ら, 2018 ³⁶	広葉樹※ ²	沖縄県	8000m × 6000m	材積精度 84%	空中写真、航空レーザ

※² 蓄積・材積量の推定

³² 小木和彦. (1989). 空中写真による広葉樹二次林の蓄積推定（会員研究発表論文）. 日本林学会北海道支部論文集, 37, 226-228.

³³ 飯塚修, & 松平昇. (1989). 針・広葉樹別空中写真材積表による天然林の材積推定（会員研究発表論文）. 日本林学会北海道支部論文集, 37, 223-225.

³⁴ 鷹尾元, 小木和彦, 石橋聡, & 石原康宏. (2000). 空中写真による天然林の林型区分（会員研究発表論文）. 日本林学会北海道支部論文集, 48, 178-180.

³⁵ 大萱直花. (2015). 空中写真を利用した材積推定. 森林科学, 74, 15-19.

³⁶ 寺園隆一, 新垣拓也, & 鷺崎恭子. (2018). デジタル空中写真および航空レーザ計測データを活用した森林蓄積量の推定手法の検討.

c) 航空レーザ

航空レーザにより森林資源量の解析は主に針葉樹について実施されているが、広葉樹についても資源量を求めることが可能である。高橋ら（2005）は、1点/m²と比較的点密度の低いレーザデータを用いて、樹高と樹冠体積を推定し、広葉樹の蓄積を推定した。蔡ら（2006）は同様に樹冠高から広葉樹林の樹高・樹冠面積を求めた。大野・佐々木（2015）では収穫調査を航空レーザ計測データで代替することを目的とし、現地調査データとの相関式を作成して広葉樹の蓄積を推定し、現地比で115%の精度を得た。

海外の事例においても、2点/m²と比較的低密度のレーザデータで広葉樹混交林のバイオマスを推定し比較的良好な結果を得られた例（Montagnoli et al., 2015）、フルウェーブフォーム方式のレーザデータを点群方式に変換し、針葉樹、広葉樹、混交林のいずれも良好な結果を得た例（Cao et al., 2014）が報告されている。曲がり等を含めた用材としての資源量推定は報告がない。

表 3-9 航空レーザを用いた森林資源量把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
高橋ら, 2005 ³⁷	トドマツ、エゾマツ、 広葉樹※ ²	北海道			航空レーザ
蔡ら, 2006 ³⁸	落葉広葉樹※ ³	岐阜県	1ha	本数抽出で1割過 大評価	航空レーザ
大野・佐々木, 2015 ³⁹	カラマツ、広葉樹※ ²	北海道	1500ha	収穫調査と比較し精 度 115%(広葉樹)	航空レーザ
Cao et al., 2014 ⁴⁰	針葉樹、広葉樹、混 交林※ ¹	China	1103ha	R ² =0.88~0.93(針葉 樹)、0.84(広葉樹)、 0.75~0.81(混交林)	航空レーザ
Montagnoli et al., 2015 ⁴¹	広葉樹、混交林※ ¹	Italy	4km ²	R ² =0.76	航空レーザ

※¹ バイオマス資源量の推定 ※² 蓄積・材積量の推定 ※³ 樹高等の推定のみ

³⁷ 高橋廣行, 高木健太郎, 野村睦, 北條元, 小塚力, 浪花彰彦, ... & 米康光. (2005). 航空機 LIDAR による森林の計測. 北方森林保全技術, 1-4.

³⁸ 蔡斌, 秋山侃, & 魏宏. (2006). 航空機レーザ計測による広葉樹林の樹高, 樹冠面積の抽出. 写真測量とリモートセンシング, 45(3), 4-11.

³⁹ 大野勝正, & 佐々木貢. (2015). 北海道国有林における航空機レーザ森林解析.

⁴⁰ Cao, L., Coops, N. C., Hermosilla, T., Innes, J., Dai, J., & She, G. (2014). Using small-footprint discrete and full-waveform airborne LiDAR metrics to estimate total biomass and biomass components in subtropical forests. Remote Sensing, 6(8), 7110-7135.

⁴¹ Montagnoli, A., Fusco, S., Terzaghi, M., Kirschbaum, A., Pflugmacher, D., Cohen, W. B., ... & Chiatante, D. (2015). Estimating forest aboveground biomass by low density lidar data in mixed broad-leaved forests in the Italian Pre-Alps. Forest Ecosystems, 2(1), 1-9.

d) UAV 写真

UAV 写真を用いた森林資源量の把握では SfM (Structure from motion) 技術を用いた 3 次元データの取得、DSM の作成、といった手法が用いられている。Dandois and Ellis (2013)では 6 時期の空撮画像から SfM ソフトで点群を発生させ、樹冠高、地盤高、地上部バイオマスを推定している。落葉時の画像を用いることで地盤高 (DTM) の作成が可能となっている。また、田村ら(2015)は 9 月～10 月に撮影した UAV 写真から SfM により 3 次元データを取得し、樹高の推定を行った。DTM の取得には落葉時期、DSM の作成には展葉時期の UAV 写真が適していると報告されている。

針葉樹林での例となるが、UAV 写真と地上レーザを組み合わせた資源量把握の試みもある。Mikita et al. (2016)では地上レーザを活用して DTM を取得し、DBH、樹高を推定した。室井・井 (2019) は DBH・樹高を地上レーザにより取得し、本数を UAV 写真から判読する手法を用いている。

現状、国内では UAV 写真を用いて広葉樹の材積を求めた例がなく、研究段階の技術といえる。曲がり等を含めた用材としての資源量推定は報告がない。

表 3-10 UAV 写真を用いた森林資源量把握に関する文献 (着色した文献は針葉樹のみ)

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
Dandois and Ellis, 2013 ⁴²	落葉広葉樹 ^{※1}	USA	6.25ha	地上部バイオマス誤差 31-36%	UAV 写真
田村ら, 2015 ⁴³	落葉広葉樹、針広混交林 ^{※3}	北海道	3ha, 1.3ha	樹高の平均二乗誤差 (針葉樹 0.97~1.38m, 広葉樹 1.49~2.33m)	UAV 写真
酒井ら, 2016 ⁴⁴	カラマツ人工林 ^{※3}	山梨県	9000m2		UAV 写真
Mikita et al., 2016 ⁴⁵	トウヒ林 ^{※3}	Czech	0.8ha	RMSE DBH1cm 未満、樹高 1m 未満	UAV 写真、地上レーザ
室木・井, 2019 ⁴⁶	スギ人工林 ^{※2}	宮崎県	0.167ha	林分材積現地比 86.1%~88.4%	UAV 写真、地上レーザ

※1 バイオマス資源量の推定 ※2 蓄積・材積量の推定 ※3 樹高等の推定のみ

⁴² Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259-276.

⁴³ 田村太彦, 加藤顕, 小花和宏之, & 吉田俊也. (2015). 小型 UAV による空撮と SfM を用いた樹高計測. *日本緑化工学会誌*, 41(1), 163-168.

⁴⁴ 酒井健吾, 山本遼介, 長谷川宏一, 泉岳樹, & 松山洋. (2016). 小型 UAV から撮影された直下視画像と斜め視画像を用いた森林樹冠の DSM 作成.

⁴⁵ Mikita, T., Janata, P., & Surový, P. (2016). Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*, 7(8), 165.

⁴⁶ 室木直樹, & 井崇行. (2019). UAV 空撮画像と地上レーザスキャナを併用した林分材積の推定. *森林計画学会誌*, 52(2), 83-88.

e) UAV レーザ

広葉樹について UAV レーザを用いて資源量を推定した報告はほとんどない。Brede et al (2019)は UAV レーザで地上レーザを代替できるか検討している。地上レーザに比べ、UAV レーザの方が点群の取得効率がよく、成熟した樹木サイズの大きい森林では比較的精度よく推定ができていた。しかし、過密林分では推定精度が下がってしまうため、UAV の計測方向や角度を変えた複数回の計測が必要と報告している。また、竹中ら(2021)は着葉期と落葉期の 2 時期で計測を行い、現地調査データと合わせて広葉樹資源量を推定した。

UAV レーザによる広葉樹資源量の把握は報告事例も少なく研究段階の技術といえる。なお、曲がり等を含めた用材としての資源量推定は報告がない。

表 3-11 UAV レーザを用いた森林資源量把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
Brede et al., 2019 ⁴⁷	広葉樹、針葉樹※2	Netherlands		RMSE 材積 6.59m3	UAV レーザ、地上レーザ
竹中ら,2021 ⁴⁸	広葉樹※2	長野県	33.14ha, 8.49ha	RMSE 材積 1.66m3	UAV レーザ

※2 蓄積・材積量の推定

⁴⁷ Brede, B., Calders, K., Lau, A., Raunonen, P., Bartholomeus, H. M., Herold, M., & Kooistra, L. (2019). Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LIDAR. Remote Sensing of Environment, 233, 111355.

⁴⁸ 竹中悠輝, 加藤正人, 長澤幸一, & 増井僚. (2021). 3 種類のドローンによる広葉樹林森林資源情報解析-長野県大町市と下諏訪町を事例として. 森林計画学会誌, 55(1), 39-42.

f) 林内（地上、UAV）レーザ

林内レーザによる森林資源量把握では、地上レーザを用いた報告が近年は増えている。広葉樹を対象とした報告についても、地上レーザによって測定した樹高の誤差を検証した戸田ら（2009）、地上レーザにより毎木調査が代替できるか検証した加藤ら（2014）、広葉樹二次林を対象に直径、樹高、材積を地上レーザにより計測した Aruga et al.(2017)などがある。これらの報告では、地上レーザの計測距離や角度、立木密度等が計測精度に影響するとされている。Aruga et al.(2017)は幹の曲がり具合についても検証を行い、全体として過大評価傾向であり、樹高が高くなる程その傾向が強くなることを報告した。針葉樹と比較すると誤差は大きくなる傾向にあった。また、4000 本/ha と高密度なヤマハンノキ二次林での樹高計測について検証した嶋田・長嶋（2020）では幹の曲がり精度の悪化要因になると報告されている。He et al.(2013)では広域のバイオマス推定を行うために、地上レーザで計測した都市部樹木の 3D データと SPOT5 の衛星画像を組み合わせた事例を報告している。

林内飛行 UAV レーザについては Hyypa et al.(2020)などが報告されており、バックパック型レーザや上空 UAV レーザとの精度比較が実施されているが、北欧の比較的疎な林分での検証であり、その他の地域での報告例は見当たらない。

表 3-12 林内（地上、UAV）レーザを用いた森林資源量把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
戸田ら, 2009 ⁴⁹	植栽花木、落葉広葉樹 ^{※3}	兵庫県	0.5ha	樹高平均誤差 0.23m	地上レーザ
He et al., 2013 ⁵⁰	広葉樹、針葉樹 ^{※1}	China		バイオマス現地比 85%	地上レーザ, 衛星画像(SPOT5)
加藤ら, 2014 ⁵¹	針葉樹、ダケカンバ林、針広混交林 ^{※3}	北海道	半径 10m プロット 22 地点	半径 10m 以内で樹高 1.2m 以内、DBH4cm 以内の誤差	地上レーザ
Aruga et al., 2017 ⁵²	広葉樹 ^{※2}	栃木県	15×20m プロット 10 地点	RMSE DBH1.91cm, 樹高 2.26m, 材積 0.061m ³ (誤差 14.3%)	地上レーザ

⁴⁹ 戸田健太郎, 中村彰宏, 大藪崇司, & 前中久行. (2009). 地上型レーザスキャナを用いた 3 次元環境計測における樹高の推定. 日本緑化工学会誌, 35(1), 69-74.

⁵⁰ He, C., Convertino, M., Feng, Z., & Zhang, S. (2013). Using LiDAR data to measure the 3D green biomass of Beijing urban forest in China. PLoS One, 8(10), e75920.

⁵¹ 加藤顕, 安藤祐樹, 吉田俊也, 梶原康司, 本多嘉明, & 小林達明. (2014). 簡易型地上レーザを用いた毎木調査法. 日本緑化工学会誌, 40(1), 136-141.

⁵² Aruga, K., Yanagihara, E., Yamamoto, T., Ishiguri, F., FURUSAWA, T., & Akira, K. A. T. O. (2017). Application of portable terrestrial laser scanner to a secondary broad-leaved forest. European Journal of Forest Engineering, 3(1), 7-15.

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
鳶田・長島, 2020 ⁵³	ヤマハンノキ※ ₃	岐阜県	10m×10m プロット4地点	RMSE 樹高 3.39m~3.68m	地上レーザ
Hyypä et al., 2020 ⁵⁴	針広混交林※ ₂	Finland	32m×32m プロット2か所	林内 UAV RMSE DBH2-8%, 材積 9-15%	林内 UAV レーザ、 地上レーザ、上空 UAV レーザ等

※₁ バイオマス資源量の推定 ※₂ 蓄積・材積量の推定 ※₃ 樹高等の推定のみ

⁵³ 鳶田知帆, & 長島啓子. (2020). ヤマハンノキの一斉林における地上型レーザースキャナを使用した樹高推定. 森林計画学会誌, 54(1), 31-36.

⁵⁴ Hyypä, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hakala, T., Kukko, A., Vastaranta, M., & Hyypä, J. (2020). Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. Remote Sensing, 12(20), 3327.

(3) 病虫害・気象害把握（ナラ枯れ、風雪害等）

a) 衛星画像

衛星画像を用いた病虫害の把握として、Komura et al.(2005)では IKONOS 衛星画像を用いたナラ枯れの抽出について報告している。RGB バンドを HSI データに変換し、H,S 及び NDVI についてそれぞれ閾値を設定し枯死木を抽出する方法を用いた。過抽出があるものの、枯死木の見落としは無かった。また、Johnson et al.(2013)は QuickBird 衛星画像からパンシャープン画像を作成し、オブジェクトベース分類により被害木を抽出した結果、9 割以上の高い精度が得られた。

気象害について、田口ら（2006）は高解像度光学センサ衛星画像と航空レーザデータを組み合わせた冠雪害検出手法の開発に取り組んだ。衛星画像の反射輝度から被害地を検出する方法と、航空レーザデータからギャップを抽出する方法を組み合わせることにより両者の欠点を補うことができ、検出精度が向上する可能性を示した。また、針葉樹林での例となるが、菅野・阿部（2020）は無償で利用できる LANDSAT8 の画像を用いて最尤法による教師付き分類を実施し、風倒被害地を抽出した。分解能の低い（30m）衛星画像でも、被害面積の大きい箇所であれば抽出可能であることが示された。

表 3-13 衛星画像を用いた病虫害・気象害把握に関する文献（着色した文献は針葉樹のみ）

著者・発表 年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
Komura et al., 2005 ⁵⁵	広葉樹	石川県	240m × 180m		IKONOS
田口ら, 2006 ⁵⁶		岐阜県	3000m × 2600m	冠雪害の的中率: 見逃しの観点 82.1%, 誤検出の観点 94.0%	IKONOS, 航空レーザ
Johnson et al., 2013 ⁵⁷	広葉樹、針葉樹	山形県		user's accuracy 96.6%, producer's accuracy 92.5%	QuickBird
菅野・阿部, 2020 ⁵⁸	人工林	北海道	6700ha	被害面積 71.71ha 中 49ha(68%)抽出	LANDSAT8

⁵⁵ Komura, R., Kamata, N., Kubo, M., & Muramoto, K. I. (2005, July). Identification of dead tree of Japanese oak wilt (JOW) using high spatial resolution satellite imagery. In Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. (Vol. 6, pp. 4351-4354). IEEE.

⁵⁶ 田口仁, 臼田裕一郎, 福井弘道, & 古川邦明. (2006). 高解像度光学センサ衛星画像と LiDAR データを組み合わせた森林域の冠雪害検出手法の開発. 写真測量とリモートセンシング, 45(1), 14-21.

⁵⁷ Johnson, B. A., Tateishi, R., & Hoan, N. T. (2013). A hybrid pansharpening approach and multiscale object-based image analysis for mapping diseased pine and oak trees. International journal of remote sensing, 34(20), 6969-6982.

⁵⁸ 菅野正人, & 阿部友幸. (2020). LANDSAT8 衛星画像による道有林の風倒被害解析と被害把握への活用. 日本リモートセンシング学会誌, 40(1), 32-37.

b) 空中写真

空中写真を用いた病虫害被害の把握について、青木ら（2006）は近赤外波長を含むカラー赤外面像を用いたナラ枯れ被害地の抽出について報告している。ナラ枯れ被害地は衛星画像解析の手法を用いて教師付き分類を行った。現地調査プロットにおけるナラ枯れ被害位置をピクセルでカウントした結果と、今回の分類結果を比較すると、8割以上の抽出率となった。また、宇都ら（2010）はクレーン及び航空機に搭載したハイパースペクトルセンサを用いて、ナラ枯れ葉を検出する指標である NWI を提案した。分類器の検出精度を評価するための解析の一種である ROC 解析による評価の結果、ROC 曲線を定量的に評価する指標である Az 値で 0.95（最大 1）と高い精度が得られた。木下ら（2013）は、衛星画像、空中写真、航空レーザを組み合わせ、ナラ枯れ被害地の特徴を考察した。空中写真で得られた NWI はあまり有効でなく、NDVI 及び RVI（非植生指標）が枯死木抽出に有効であったと報告している。

気象害の把握に関して、菱沼(1989)は台風の塩風害による葉の変色被害について空中写真を用いて調査を行った。空中写真の判読により変色の程度を区分し、調査地の 83%が変色被害を受けていたことを明らかにした。また、田口ら(2009)は 1964 年から 2004 年までの 8 時期の空中写真を用いて時系列の樹冠高（DCM）を作成し、森林キャノピーモニタリングの適用性を検証した。その中で、樹木成長や施業モニタリングのほかギャップの抽出により冠雪害被害地の抽出が可能であることを示した。

表 3-14 空中写真を用いた病虫害・気象害把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
菱沼, 1989 ⁵⁹	天然林、人工林	北海道	2637ha		空中写真
青木ら, 2006 ⁶⁰	広葉樹	新潟県		ナラ枯れ被害ピクセルの抽出率 85.95%	空中写真(近赤外線含む)
田口ら, 2009 ⁶¹	スギ、ヒノキ、広葉樹	岐阜県			空中写真
宇都ら, 2010 ⁶²	広葉樹	山形県、神奈川県		ROC 解析の評価値(Az 値):0.95	ハイパースペクトルセンサ

⁵⁹菱沼勇之助. (1989). 台風による苫小牧地方演習林の塩風害: 空中写真判読による解析. 北海道大学農学部 演習林研究報告, 46(1), 111-124.

⁶⁰青木孝宏, 布川耕市, & 保科孝且. (2006). 赤外デジタル画像を用いた衛星画像解析手法によるナラ枯れ被害の抽出.

⁶¹田口仁, 古川邦明, 遠藤貴宏, 沢田治雄, & 安岡善文. (2009). 多時期の空中写真から作成した Digital Canopy Model による森林キャノピーのモニタリング. 写真測量とリモートセンシング, 48(1), 4-14.

⁶²宇都有昭, 小杉幸夫, 尾方俊成, & 小田川信哉. (2010). 可視/近赤外ハイパースペクトルデータに基づくナラ枯れ指標 NWI に関する研究. 写真測量とリモートセンシング, 49(5), 294-309.

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
木下ら, 2013 ⁶³	広葉樹	兵庫県			空中写真、衛星画像、航空レーザ

c) 航空レーザ

航空レーザを用いた気象害把握に関する文献としては、台風前後での風倒木調査に関する事例がみられた。鷹尾ら（2005）は、台風前後の航空レーザ計測データから、それぞれの樹冠高（DCHM）を計算し、被害林冠を抽出した。台風前のデータから求めた地上バイオマス分布と組み合わせれば現地調査を経ずに迅速に被害量を推定できる可能性を示した。また、高橋ら（2009）は鷹尾らが調査を行った2年後に再度レーザ計測を行い、植生の回復過程が把握可能となることを示した。鈴木ら（2008）の事例は針葉樹林となるものの、航空レーザで抽出した台風被害による樹木の消失エリアを空中写真で目視確認する過程を追加している。

病虫害に関する文献は収集できなかった。

表 3-15 航空レーザを用いた病虫害・気象害把握に関する文献（着色した文献は針葉樹のみ）

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
鷹尾ら, 2005 ⁶⁴	落葉広葉樹二次林	北海道	97ha		航空レーザ
鈴木ら, 2008 ⁶⁵	針葉樹	京都府	12km ²		航空レーザ、空中写真
高橋ら, 2009 ⁶⁶	落葉広葉樹二次林	北海道	97ha		航空レーザ

⁶³ 木下篤彦, 神野忠広, 服部保, 岩間基巳, 金宗煥, 細見温子, & 鈴木淳司. (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, 66(1), 58-61.

⁶⁴ 鷹尾元, 宇都木玄, 佐々木尚三, 飯田滋生, 阿部真, & 飛田博順. (2005). LIDAR による落葉広葉樹林の風倒害の評価. 写真測量とリモートセンシング, 44(6), 18-21.

⁶⁵ 鈴木浩二, 松村和樹, & 松岡滋治. (2008). 航空レーザを用いた風倒木の判別. 砂防学会誌, 61(1), 39-42.

⁶⁶ 高橋正義, 宇都木玄, 石橋聡, & 鷹尾元. (2009). LIDAR データを用いた風害被害林の経年変化 (会員研究発表論文). 日本森林学会北海道支部論文集, 57, 73-75.

d) UAV 写真

UAV 写真を用いた気象害把握については、台風前後で UAV 撮影を行い、風倒木を調査する事例がみられた。田嶋ら（2006）はラジコンヘリにより撮影を行い、台風後の風倒木を目視で判読した。また Inoue et al.(2014)では UAV 撮影により同じく目視で判読を行った結果、直径・樹高が大きい立木については 8 割以上の精度で検出できたが、それ以下のサイズでは精度が低かった。生存木の樹冠に隠れていることがあるため、異なる方向からの画像も併用することで精度を高められる可能性があると報告している。丹羽（2019）は台風前後の UAV 写真からそれぞれの DSM を作成し、2 時期の DSM の差分から風倒木ギャップを抽出している。ギャップ面積と現地調査により得られた倒木胸高断面積合計に相関がみられたが、2 時期の DSM の差と胸高断面積合計の決定係数は 0.36 と低かった。ギャップ形状が複雑な箇所を除くと 0.64 に向上した。

病虫害に関する文献は収集できなかった。

表 3-16 UAV 写真を用いた病虫害・気象害把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
田嶋ら, 2006 ⁶⁷	広葉樹(河畔林)	北海道	約 4 万 m ² を 2 か所		ラジコンヘリ、空中写真
Inoue et al., 2014 ⁶⁸	広葉樹	茨城県	300m × 200m	DBH 30cm 以上、樹高 10m 以上の本数抽出 80%~90%	UAV 写真
丹羽, 2019 ⁶⁹	広葉樹	大阪府		倒木胸高断面積合計 R ² =0.364~0.636	UAV 写真

⁶⁷田嶋憲一郎, 工藤昇, & 板垣恒夫. (2006). ラジコンヘリコプター空撮写真による河畔林風倒木調査 (会員研究発表論文). 日本森林学会北海道支部論文集, 54, 101-103.

⁶⁸ Inoue, T., Nagai, S., Yamashita, S., Fadaei, H., Ishii, R., Okabe, K., ... & Suzuki, R. (2014). Unmanned aerial survey of fallen trees in a deciduous broadleaved forest in eastern Japan. PLoS one, 9(10), e109881.

⁶⁹丹羽英之. (2019). UAV により台風前後に撮影されたデータを用いた風倒木ギャップの抽出. 日本緑化工学会誌, 44(4), 591-595.

e) UAV レーザ

UAV レーザを用いた病虫害・気象害把握に関する研究はまだあまり進んでいない。朝香ら（2021）は UAV レーザとマルチスペクトルカメラを併用し、台風前後の都市公園内樹木を計測した。UAV レーザにより得られた DSM の差分から被災箇所を特定し、マルチスペクトル画像を用いて被災状況を数値化する試みが報告された。

病虫害に関する文献は収集できなかった。

表 3-17 UAV レーザを用いた病虫害・気象害把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
朝香ら, 2021 ⁷⁰	広葉樹	千葉県	2 万 m ²		UAV レーザ+マルチスペクトル画像

f) 林内（地上、UAV）レーザ

林内レーザを用いた病虫害・気象害把握に関する文献は収集できなかった。

⁷⁰朝香智仁, 古田尚輝, 鈴木良, 中島英敬, 野中崇志, & 杉村俊郎. (2021). 台風前後に観測した UAV による都市公園内の樹木の被災状況調査. 日本リモートセンシング学会誌, 41(1), 2-12.

(4) 森林更新可能性把握（林床植生および低中層広葉樹）

a) 衛星画像

衛星画像を用いた森林更新可能性把握に関する報告として、小出（2008）は、SPOT 衛星画像を用いて紅葉期から落葉期の NDVI の変化パターンから森林の下層植生状態が推定できるか試みている。NDVI は樹冠の背景（土壌など）に強く影響を受けることが知られており、その特徴を用いて林床状態の違いを捉えられるか検討した結果、紅葉期から落葉期の NDVI の変化パターン及び変化量が有効な情報であると結論づけられている。植生状態の推定は定性的な評価にとどまっており、さらなる検討が望まれる。

表 3-18 衛星画像を用いた森林更新可能性把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
小出, 2008 ⁷¹	常緑針葉樹、落葉広葉樹	岐阜県	25km ²		SPOT 衛星画像

b) 空中写真

空中写真による森林更新可能性の把握に取り組んだ事例として、広葉樹を対象としたものではないが、ヒノキの天然更新施業林におけるササ抑制処理の効果を空中写真から検証した森澤ら（2010）の例がある。この事例の対象地では天然更新の阻害要因となるササの繁茂を抑制するため、過去に除草剤の散布等によるササ抑制処理を行った処理区と対照区を設定している。過去の空中写真を用いてササの判読を行ったところ、処理によるササ抑制効果は 3 年程度持続すること、処理区では更新木の樹冠面積比率が増加し成立本数も多かったことが確認できている。

表 3-19 空中写真を用いた森林更新可能性把握に関する文献（着色した文献は針葉樹のみ）

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
森澤ら, 2010 ⁷²	ヒノキ	長野県	16ha		空中写真

⁷¹小出馨. (2008). 植生フェノロジーの変化に着目した多時期衛星データによる林相区分の精度向上と森林の下層植生状態の推定. 写真測量とリモートセンシング, 47(6), 4-12.

⁷² 森澤猛, 杉田久志, 橋本良二, & 赤井龍男. (2010). 空中写真から解析した木曽地方三浦実験林のヒノキ帯状皆伐天然更新試験地におけるササおよび更新木樹冠被覆の 36 年間の変遷. 日本森林学会誌, 92(1), 22-28.

c) 航空レーザ

航空レーザを用いた森林更新可能性把握に関する取り組みとしては、落葉時期に計測した航空レーザデータを用いて落葉広葉樹林下の低木層・亜高木層を把握する事例がある。瀬戸島ら（2005）は落葉前後に観測したレーザデータで DSM の変化量を解析し、上層が落葉広葉樹で低木層・亜高木層に常緑広葉樹がある林分の把握を試みた。低木層・亜高木層の有無に応じて植生タイプを分類することができる可能性が認められた。また、范ら（2010）は落葉期に計測した航空レーザデータから林分構造の特徴を捉え、自然度という指標として表現する方法を検討した。航空レーザの高さ別のパルス頻度から自然度を分類した結果、分類精度は 22.7% 程度と低かったが、自然度をある程度まとめた場合、分類精度が 83.9% まで向上した。

表 3-20 航空レーザを用いた森林更新可能性把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
瀬戸島ら, 2005 ⁷³	落葉広葉樹	東京都	1.94ha, 0.72ha		航空レーザ
范ら, 2010 ⁷⁴	広葉樹二次林	埼玉県		自然度の分類精度: 22.7%~83.9%(評価方法による)	航空レーザ

d) UAV 写真

UAV 写真による森林更新可能性の把握に取り組んだ事例として、広葉樹を対象としたものではないが、海岸クロマツ林の林床の光環境について推定が可能か検証した佐々木ら（2017）の例がある。UAV 画像から SfM 技術により 0.1m メッシュの林冠高モデルを作成し、現地調査で得られた開空度との関係性を解析した結果、決定係数 0.7 程度で開空度を推定できることが報告されている。

表 3-21 UAV 写真を用いた森林更新可能性把握に関する文献（着色した文献は針葉樹のみ）

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
佐々木ら, 2017 ⁷⁵	クロマツ	徳島県	26ha	開空度: R2=0.7 程度	UAV 写真

⁷³瀬戸島政博, 今井靖晃, & 天野正博. (2005). 落葉前後に観測した航空機レーザスキャナによる DSM を用いた落葉広葉樹林内の階層構造の把握. 写真測量とリモートセンシング, 44(2), 43-53.

⁷⁴范海生, 後藤真太郎, & 白石貴子. (2010). 航空機 LIDAR を用いた森林植生管理パターン把握の試み. 写真測量とリモートセンシング, 49(3), 140-148.

⁷⁵佐々木剛, 丹羽英之, 朝波史香, & 鎌田磨人. (2017). 小型 UAV を用いた海岸マツ林の林床光環境の推定. 日本緑化工学会誌, 43(1), 51-55.

e) UAV レーザ

UAV レーザを用いた森林更新可能性把握に関する文献は収集できなかった。

f) 林内（地上、UAV）レーザ

加藤ら（2019）は、広葉樹・針葉樹林を対象に地上レーザ計測を行い、林内の植被率および階層構造を推定できるか検証を行っている。3次元データにボクセル法を適用した上で、解析半径やボクセルサイズの検証の結果、センサーから 10m 以内について 0.125m のボクセルを適用し、低木層の植被率を誤差 12.9%で推定ができた。

表 3-22 林内レーザを用いた森林更新可能性把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
加藤ら, 2019 ⁷⁶	広葉樹、針葉樹	東京都・千葉県	400m ² × 2か所	植被率誤差: 低木層 12.9%, 高木層 9.8%	地上レーザ

⁷⁶加藤顕, 田村太彦, 市橋新, 小林達明, & 高橋輝昌. (2019). 地上レーザーを用いた階層構造と植被率の自動解析手法. 日本緑化工学会誌, 45(1), 121-126.

3.1.3 成果のまとめ

収集・整理した情報を元に、広葉樹林分についてそれぞれの目的に応じて適用可能な技術を表 3-23 に整理した。判定基準としては以下のとおりとした。

- 実務に適用可能（◎）：精度 80%以上の文献が 5 つ以上ある
- 実務に適用の可能性がある（○）：精度 80%以上の文献が 1 つ以上ある
- 現状では実務への適用が難しい（△）：精度 80%以上の文献がない
- 収集できず（×）：関連する研究事例が入手できなかった

判定の結果、精度 80%以上の文献が 5 つ以上となる「適用可能」とされた項目はなかった。

「適用の可能性がある」と判定された項目は、樹種判定で 5 個、バイオマス量・材積量の把握で 4 個、病虫害・気象害把握で 3 個、森林更新可能性把握で 1 個だった。いずれも適用の可能性はあるものの、他の地域で適用可能かどうかについてはデータの蓄積が必要であり、実務に適用するにはまだ課題が残っていると言える。

また、森林資源量把握のうち品等区分に関する報告は林内レーザによる事例に限られる。また、精度評価が十分になされていないため、可能性はあるものの現状では適用が難しいと考えられる。

森林更新可能性把握に関しては、航空レーザによる低中層広葉樹の把握のみ「実務への適用の可能性はある」と判定され、他の計測方法では適用が難しい、または収集できずと判定された。

なお、収集できなかった項目についても、あくまで今回の文献収集において調査した限りでは収集できなかったものであり、まだ論文となっていない研究成果も多数あることが予想される。技術的には適用の可能性が十分あると想定される項目もあることに留意が必要である。

表 3-23 広葉樹林分における調査内容に応じた各計測技術の適用可能性

計測方法 / 調査内容	森林分布	森林資源量把握		病虫害・気象害	森林更新	
	樹種判定	バイオマス量・材積量	品等区分（曲がり等）	ナラ枯れ等早期発見	林床植生	低中層広葉樹
衛星画像	○	○	×	○	△	×
空中写真	○	○	×	○	△	×
航空レーザ	○	○	×	△	×	○
UAV 写真	○	△	×	○	△	×
UAV レーザ	○	△	×	△	×	×
林内（地上、UAV）レーザ	×	○	△	×	×	△

※◎：適用可能、○：適用の可能性がある、△：現状では適用が難しい、×：収集できず

3.1.4 今後の課題

全体を通して、実務への適用を進めるためにはまだ広葉樹林についての研究事例が足りていないことがわかった。

今回は、広葉樹についての研究状況を概観するため、幅広い観点で文献収集を行ったが、今後は国有林野事業での具体的な課題・ニーズに応じた情報収集が必要と考えられる。目的の明確化を行ったうえで、それに応じたアプローチを検討していく必要がある。

今後、具体的な検討を行っていく上では、広葉樹については測樹方法としてまだ確立していない部分もあることに留意が必要である。樹幹形状も多様であるため、従来の調査手法では評価が難しかったところであるが、レーザ計測技術により新たに評価が可能となることも期待されている。また、樹種により大きく性質が異なる場合もあるため、精度評価や汎用性の評価では針葉樹の場合よりも慎重な検討が必要である。

技術面では、それぞれの樹種特有のスペクトルを計測できるカメラなどの開発が期待されており、今後の技術開発により広葉樹の樹種分類がより容易になる可能性があることから、継続した情報収集が必要である。

さらなる研究の進展が望まれると同時に、国有林をフィールドとした調査・研究も進めることでデータの蓄積、適用可能性の検証に資することが望ましい。

3.2 委員の意見聴取

上述した整理・分析については「2.3 委員の意見聴取」と同様、技術的指導及び助言を得るために昨年度事業において設置した検討委員会の各委員の意見を聴取した。

ヒアリングにおける各委員の主な意見は以下の通り。

【加藤委員】

- 樹種判定については、従来のピクセルベースでの分類から単木樹冠の抽出、高解像度衛星の利用といった動向も含めて記載するのが良い。さらに、航空レーザ計測で高さの情報もとれるようになり、UAV や地上レーザの普及で身近に使えるツールが出てきている。
- 平成 30 年に整理した表については情報の更新があるはずなので参考に留めるのが良い。
- 用材については資源量というよりも用材の品質区分という表現が良い。また、バイオマス資源量だけでなく材積量の区分も追加するのが良い。
- 病虫害の区分には気象害等の事例も含めるのが良い。

【瀧委員】

- 病虫害などについて従来の研究では衛星画像を使うものがほとんどで、UAV を使った研究はここ最近のもの。研究例が少ないのは予想に反していない。
- 樹種別に特有の葉のスペクトルがあるので、それをとらえられるカメラの開発が課題。

【松英委員】

- 広葉樹の何を何のために知りたいのか、目的による整理も必要。広葉樹は樹幹形状も多様で、目的次第でアプローチが異なる。国有林で広葉樹の情報をどう使いたいのか、目的の明確化が必要。
- 広葉樹はそもそもの測樹の部分でも未整理のところが多い。レーザを使って、今までできなかった評価をどのように評価していくか、新たに定義することも可能となると思う。
- 精度の評価についても、何と比較しているか、汎用性はどれくらいあるかについて注意が必要。

【村上委員】

- 広葉樹に関する文献にも、広葉樹とひとまとまりで扱っているものもあれば、広葉樹の細分化に取り組んでいるものもある。現状では文献も限られるので事例研究にとどまる。特に収集文献に不足はないと思う。
- 文献が収集できなくても、技術的に不可能というわけではない。広葉樹のニーズは近年増してきたものであるので、まだ論文化されていない面もある。航空レーザによる林床植生の把握などは技術的には可能性がある。
- 収集できず、という評価については、今回調べた限りでは収集できず、ということで注釈するのがよい。