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

加藤 顕^{*1)}・田村太彦²⁾・市橋 新³⁾・小林達明¹⁾・高橋輝昌¹⁾

1) 千葉大学大学院園芸学研究科 Graduate School of Horticulture, Chiba University

2) 日本工営株式会社 Nippon Koei Co., Ltd.

3) 東京都環境科学研究所 Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection

摘要: 森林の階層構造や植被率の把握は、生物多様性の指標や森林管理にとって重要である。しかし、目視による調査しか行われず、データの正確性や客観性には限界があった。本研究では、これまでの人による階層構造や植被率の判断を、地上レーザーによる3次元データによる手法に置き換えることで、より客観的で簡易的な手法を検討した。その結果、3次元データにボクセル法を適用することで、センサーから10 m以内を0.125 mのボクセルサイズで解析した結果が最も正確に植被率が把握でき、その垂直分布より自動で階層構造が把握できた。本解析手法は関東周辺温帯林で適用可能であったが、今後、様々な林分構造にも適用できる汎用性の高い手法としたい。

キーワード: レーザー, 植生図, 調査, ボクセル, 3次元, 森林構造

KATO, Akira, TAMURA, Taichi, ICHIHASHI, Arata, KOBAYASHI, Tatsuaki and TAKAHASHI, Terumasa: **An automatic method to estimate forest coverage and strata from terrestrial laser data**

Abstract: Forest cover and strata are important indicators in biodiversity and forest management. However, the ground assessment to obtain these indicators is limited by ocular estimation, which can be subjective. We introduced 3D data from terrestrial laser scanner to quantify forest structure. The 3D data is converted to voxels and different size of voxels is used for this study. The 0.125m of voxel size was the most accurate rate within 10 m radius to estimate forest cover. With this resolution, an automatic method to identify forest strata was established from the vertical distribution of the voxels for temperate forest.

Key words: laser, strata, canopy, voxel, 3D, forest structure

1. はじめに

森林管理や野生動物の生息域の多様性を示す指標として、森林構造の把握は重要である。例えば、生き物の生息空間となる植物群落内に階層が存在すると、生き物の生息空間は多様化し、生物多様性は高くなる^{2, 11)}。特に鳥類は森林内の階層が複雑化するほど群集の多様度が上がるとされている^{9, 30)}。また、各階層の植被率も鳥類の種数に関係することが報告されている⁸⁾。低木・ササ類の植被率は鳥類以外にも草本の出現種数や土壌節足動物、地上徘徊性昆虫の多様性にも影響を与えている^{4, 13, 18, 25)}。このように、植生構造と種の多様性が密接に関係していることはこれまでの研究からも明らかとなっている。そのため、森林の構造を正確に把握することは、動植物の生息域評価の精度向上等につなげることができる。生物多様性に関する国際的な危機意識の高まりなど、緑施策を取り巻く情勢が大きく変化したことから、行政においても緑施策を計画する上で、森林の構造に注目した施策の展開が期待されている。現在東京都では、5年おきに本土を対象に「みどり率」（緑が地表を覆う部分に公園区域・水面を加えた面積が、地域全体に占める割合）の調査を実施しているが、緑を平面的にしか捉えていない。そこで東京都は「緑

施策の新展開」という新たな政策を提案し、平面的な緑の量の確保に加え、生態系への評価など「緑の質」を向上する施策の方向性について検討している²⁶⁾。行政における定量的生態系評価手法の運用例としては、オーストラリアのビクトリア州ではハビタット・ヘクタール法¹⁹⁾という生態系の価値を植物群落の質から評価する手法がある。東京都でもハビタット・ヘクタール法にある「質（植生）×面積」の部分に適用し²⁴⁾、現存植生を10項目から点数化し、土地を開発する際の環境影響評価の点数として用いている（表-1）。しかし、その調査項目の中には目視による調査が含まれており、目視による調査は個人の経験や知識に左右されるため、データの正確性や客観性には限界があった。ハビタット・ヘクタール法の問題点として観測者による誤差が指摘されている¹⁰⁾。また継続調査が必要な場合は、多時期の調査が必要であるため、調査精度と再調査時の再現性に留意する必要がある²¹⁾。フィールド調査にはコストと時間がかかり、サンプルを取得できる範囲も制限される²⁸⁾ため、近年は航空機レーザー測量の技術を用いた3次元データを取得し、樹高や胸高直径^{14, 27)}、葉面積指数（LAI）²⁰⁾、樹冠量²²⁾などを計測する研究が植生調査のために多く行われている。しかし、航空機レーザー測量の場合、樹冠上部からの反射が多く、森林内部の把握が難し

* 連絡先著者（Corresponding author）：〒270-0092 千葉県松戸市松戸 648 E-mail : akiran@faculty.chiba-u.jp

表-1. ハビタット・ヘクタール法のスコアの重みづけ（東京都 2012²⁶⁾ より引用）Table 1. Score weighting for habitat hectare method (referenced from Tokyo metropolitan government report²⁶⁾)

評価項目	数値(%)
大径木の状況	10
樹冠の状況	5
群落の状況	
下層植生の状況	25
外来種の侵入状況	15
世代交代の状況	10
落葉の状況	5
落枝の状況	5
周辺環境	
隣接している植生群落の大きさ	10
周辺地域の在来植生の分布状況	10
最も近いコアエリアまでの距離	5
計	100

いことが課題である。そこで本研究では、森林の 3 次元データを取得するために地上レーザーを使用した。可搬性に優れ、森林内にセンサーを持ち込むことができるため、内部から直接データを取得でき、樹木の形状や構造を詳細に把握することができる^{7, 12, 29)}。表-1 に関係する植生調査項目には樹高や胸高直径といった様々な測定項目がある。本研究の目的は、その調査項目の中でも目視による計測に依存していた植被率と階層構造に注目し、地上レーザーによって得られた 3 次元点群データから客観的かつ正確に評価する手法を検討することとした。

2. 研究対象地

研究対象地は東京都武蔵村山市野山北・六道山公園と千葉県山武市日向の森である。2 つの対象地に樹種や立木密度、階層構造が異なるように調査区をそれぞれ 4 箇所ずつ設けた。東京都立野山北・六道山公園（以下、野山）は主にコナラ (*Quercus serrata* Thunb. ex Murray) やエゴノキ (*Styrax japonica* Sieb. et Zucc.)、アオハダ (*Ilex macropoda* Miq.) などの落葉広葉樹が多く生育しており、千葉県山武市日向の森（以下、山武）では、スギ (*Cryptomeria japonica* (L. fil.) D. Don) やヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) などの常緑針葉樹が多く生育している。地上レーザーによって得られた 3 次元データの正確性を検証するため、現地で毎木調査を行った。現地調査は山武で 2015 年 11 月～12 月に、野山で 2016 年 8 月に実施した。各調査区で 20 m×20 m の方形区を設け、方形区内の樹高が 1.3 m 以上の樹木の樹高、胸高直径、樹冠幅を計測した。樹冠幅は樹幹を中心に東西南北 4 方向で計測した。樹高の計測には Vertex 4 (Haglof 社) を用いた。また、樹木位置図を作成するために、トータルステーション (Ushikata 社製 TEO-RAY130) を用いて、トータルステーションから樹木及び方形区の四隅までの距離

表-2. 調査区概況

Table 2. Summary of study plot for this study

調査区	立木密度 (本/ha)	樹高 (m) ^{*1}	胸高直径 (cm) ^{*1}	階層構造 (草本層除く)	備考
野山・低木多	9375	5.0±4.2	5.4±6.5	3	低木多い
野山・針広	1450	8.9±8.6	15.6±20.4	3	針広混交林
野山・低密度	525	11.0±6.1	19.5±17.1	3	立木密度低い
野山・コナラ	2000	9.6±7.4	11.8±12.4	3	コナラ林
山武・広葉	1000	10.7±4.2	14.1±7.8	3	広葉樹林
山武・スギ単	2100	21.4±1.3	21.7±3.5	1	スギ単層林
山武・ササ多	350 ^{*2}	28.5±1.6 ^{*2}	50.4±6.9 ^{*2}	2	亜高木層なし、ササ多い
山武・二段	650 ^{*2}	24.2±7.3 ^{*2}	38.0±16.8 ^{*2}	3	スギ・ヒノキの二段林

^{*1} 平均±標準偏差 ^{*2} 低木層除く

と水平角を計測した。調査区の概況を表-2 に示す。

表-2 より野山・低木多は尾根部に位置し、低木層の植被率が高く、ヒサカキ (*Eurya japonica* Thunberg) が優占する。また、全調査区中最も立木密度が高い群落である。野山・針広は高木層に樹高が 25 m 前後と高いヒノキとコナラが混交する針広混交林である。野山・低密度は立木密度が全調査区の中で最も低く、低木層に樹木がほとんど生育していない調査区である。野山・コナラは斜面部に位置し、高木層にコナラが優占している落葉広葉樹林である。

山武・広葉は野山・コナラ同様、コナラが優占している落葉広葉樹林であるが、高木層の樹高が全調査区の中で最も低い。山武・スギ単はスギの単層林であり、低木層と亜高木層に樹木が見られない調査区である。山武・ササ多は山武・スギ単同様、高木層にスギが優占し、亜高木層に樹木がないが、低木層の植被率が高く、ササ類が混在している調査区である。山武・二段は高木層にスギが、亜高木層にヒノキが優占している二段林であり、低木層にはササ類が混在している。

3. 地上レーザーデータによる 3 次元データ取得方法

毎木調査と同時期に各調査区で地上レーザー測量による 3 次元データの取得を行った。レーザーによる計測は、センサーからレーザーが照射され、レーザーの速度と時間をかけることで物体の位置を把握する。レーザーを多数照射することで 3 次元の点群データが生成される (図-1)。調査区 1 箇所につき、調査区の中心を囲むようにセンサーを 3 地点設置した。レーザーセンサーは価格の安いセンサーである SICK LMS511 (SICK 社製) を用いた。SICK LMS511 自体にスキャナー機能がないため、センサーを縦置きにし、回転台を取り付けることで、3 次元レーザースキャナとした。レーザーの最長到達距離は約 40 m であり、センサーを設置した高さは 1.5 m で、計測時の水平・垂直角度分解能は 0.1667 度に設定した。1 回の計測時間は 360 度を 1 回転として 3 分程度である。なお、レーザーは垂直角 150 度 (+90 度/-60 度) の範囲に照射されるため、センサーを設置した場所の真上のデータも取得可能である。

図-1 3次元点群データ(上)とボクセルに変換後のデータ(左下: 0.5 mのボクセル, 右下: 0.25 mのボクセル)

Fig. 1 3D data point cloud (upper), 0.5 m voxel data (lower left), and 0.25 m voxel data (lower right)

4. 解析手法

本研究の解析手法は主に2段階で構成されている。最初に被植率とボクセルとの関係を明らかにし、最も正確に被植率が得られるボクセルの解像度や3次元データの取得条件を明らかにする。その上で、ボクセルの垂直分布から自動で階層構造を判別する解析手法を検討する。

地上レーザーから得られる3次元データの前処理として、3次元データから地面を抽出し、地形図を作成し、地形補正を行なった。レーザーは、センサーから近い距離にある樹木や下層植生からより多く反射するため、解析できる範囲に限られる。本研究では、センサー1箇所だけで取得したデータと3箇所から取得して、結合したデータと2種類のデータを用意した。結合したデータは、調査地中心から10 m以内に3箇所センサーを三角形になるように配置し、取得したデータはタイポイントを基準に結合した。1箇所だけで取得したデータはセンサーの設置場所を中心とし、3箇所の結合したデータは、データの中心(調査地中心)を計算し、中心から半径5 mと半径10 mでデータをそれぞれ切り出した。本研究の解析範囲は、使用したセンサーの出力特性を考慮し、半径10 mまでとした。

3次元点群データは円柱状に切り出され、その点群データにボクセル法⁵⁾を適用して解析した。ボクセル法とは、3次元空間を格子状に区切り、格子内に点群が存在する場合、その場所にボクセル(立方体)を生成する手法である。円柱状で切り出した3次元点群データの端に関しては、本来であればボクセルサイズに応じて抜き出す半径も調整する必要があるが、本研究では同じ3次元点群データから異なるサイズの

ボクセルを生成した。地上レーザーによって取得されるデータは、点群のまま用いると、点群密度が一定ではない。点群密度はセンサーからの距離に依存するため、ボクセルに変換することで、データ密度が一定のデータとなる。さらに、複数箇所から取得したデータは点群の重複を無くすることができるためデータ量を減らすことができる。本研究では、ボクセルの解像度を0.125 m, 0.25 m, 0.5 mの3段階設定し、植被率を解析する際の最適なボクセルサイズを検討した。

階層構造を分ける高さ区分は、統一した定義が存在しない。ボクセルに変換した3次元データから階層区分を判別する手法を作成するためにパーセンタイル値を本研究では用いた。ボクセルの99%点の高さ(99パーセンタイル値)が1 m~5 mが低木層、5 m~10 mが亜高木層、10 m~が高木層という区分で最高階層を定義した。最高階層が高木層であった際(10 m以上)、その高さから25%の高さまでを低木層(ササ類を含む)、50%までを亜高木層、それ以上を高木層と定義し、ボクセルを階層ごとに抜き出し、各層の水平面でのボクセルによる占有率を(地上レーザーデータから解析した)植被率とした。算出した植被率を検証するため、現地調査で計測したすべての幹に対し、東西南北4方向で樹冠幅を計測し、樹木位置図から階層ごとに樹冠投影図を作成した。樹冠投影図から植被率を計算したものをレーザーデータからの植被率と比較し、解析結果を検証した。階層数は専門家の指導の下、現地調査で目視判別した。なお、低木層にササ類が混在している場合(山武・ササ多及び山武・二段)、個別別に草本幅をすべて測定することは困難であったため、従来の目視判別による結果を低木層の植被率としている。

本研究ではボクセルを用いた解析の最適な条件を明らかにするため、高木層と低木層のみの結果を比較した。地上レーザーはセンサー周辺の高さ(低木層の高さ)でデータ取得が最適である。さらに、レーザー到達率を考慮し、高木層も正確に得られるか検討する必要がある。その結果、高木層と低木層のみで結果を検証することにした。地上レーザーによって取得されたボクセルと現地で詳細に把握した被植率との関係から、平面的にどの解析条件が被植率をより正確に把握できるかを検討した。その結果から、階層構造を把握するフローチャートを作成した。関東地域での温帯林群落では、一般的に草本層、低木層、亜高木層、高木層に分けられることが多い。樹木の構造上の違いは、ボクセルの垂直分布で表現されると考えられる。ボクセルの垂直分布を下から上へ0~100%にスケールし、5%毎のパーセンタイル値を抽出した。低木層における小さいピークをより判別できるように検討したところ、5%毎に区切ったデータが最適であったため、垂直分布を5%毎に区切ることにした。さらに、パーセンタイル値の五数要約(箱ひげ図、最高値・75%点・中央値50%点・25%点・最低値)を用いた。極端な外れ値を除去するために最高値は99%点とした。本手法では草本層は対象としないため、地面から1 m以上の高さのデータのみを解析対象とした。

表-3. すべての林分を対象に様々な解析条件によって得られた植被率の最小二乗誤差

Table 3. RMSE with various sensor setting and voxel resolution in vegetation cover of all plots

条件 ^{*1}	低木層 RMSE(%)	高木層 RMSE(%)
1-5-0.5	30.3	17.9
1-5-0.25	21.7	14.5
1-5-0.125	17.5	14.8
1-10-0.5	21.8	11.6
1-10-0.25	15.5	10.3
1-10-0.125	16.7	15.3
3-5-0.5	29.5	18.1
3-5-0.25	20.5	15.5
3-5-0.125	15.6	12.6
3-10-0.5	28.5	18.6
3-10-0.25	18.4	13.6
3-10-0.125	12.9	9.8

*1 センサー数-解析半径(m)-ボクセルサイズ(m)

5. 結果と考察

5.1 被植率

最適な解析条件を把握するため、現地調査のデータから作成した植被率(%)とレーザーからの解析結果との誤差を平均二乗誤差(Root Mean Square Error: RMSE)として結果を比較した。針葉樹から広葉樹まで様々な林分に対して低木層と高木層に分けて結果を比較した(表3)。表3ではデータの解析条件であるセンサーの設置数、データを切り出す範囲、ボクセルの解像度の3つの異なる組み合わせをRMSE(誤差)の値で示し、最も良い条件を明らかにした。

誤差が最も小さい結果は、低木層で12.9%、高木層で9.8%であった。最も正確性が高い解析条件の組み合わせは、3箇所からの結合したデータで、半径10mでデータを切り出し、ボクセルサイズを0.125mに設定とした結果であった。

表3の結果よりセンサーの設置数、解析範囲、ボクセル解像度について考察を行う。センサー3箇所からのデータを結合した場合に比べて、センサー1箇所のみのデータでは、解析範囲を広げると植被率が下がる傾向があった。1箇所だけ取得したデータでは幹等によってレーザーが遮られ計測できない場所があり、その解析範囲を広げると、影となる場所が大きくなるため3次元から把握できる被植率が下がると考えられる。ボクセル解像度に対しては、サイズを小さくなるほど地上レーザーによって計測された植被率が低くなった。ボクセルサイズが大きすぎると本来被植されていない場所までボクセルによって埋まるため、植被率が過大評価される。逆にボクセルサイズを小さくして0に近づけたとしても、解析精度が良くなるとは限らない。地上レーザーの場合、センサーの設置場所から距離が離れる程、レーザーの到達率が下がる。そのため、距離に応じたデータを均一化するために本研究ではボクセルに変換した。しかし、解像度が高く(ボクセルサイズを小さく)すると、センサーからの距離の影響(点

図-2. 各対象地別のボクセル垂直分布

Fig. 2 The voxel vertical distribution among different forest structure sites

密度の影響)を緩和するといったボクセルの効果がなくなる。そのためボクセルサイズを小さくし過ぎても意味がなくなる。その結果0.125mが本研究で用いたセンサーにとって最適な解像度であると考えられる。

データの取得効率を考慮すると、センサー1箇所のデータを半径5mで切り出し、ボクセルサイズを0.125mに設定した場合でも比較的低いRMSEで植被率を把握できた。この結果より、特に低木層の植被率がない単層な森林群落では、センサー1箇所でも正確性が高く解析できると考えられる。

5.2 階層構造

被植率との結果より、植被率をより正確に計測できる最適な解析条件の組み合わせがわかった上で、各調査地別にボクセルの垂直分布を図-2に示した。ボクセルの垂直分布の特徴から階層構造を判別するフローチャートを作成した(図-3)。

図-2より山武・スギ単のように低木層と亜高木層が存在しない単層林の場合は、ピークが1つの分布となるが、複層林ではピークが複数出現した。垂直分布におけるパーセンタイル値が、垂直分布を定量的に解析する上で有効な手法であると考えらる。

特に代表的なパーセンタイル値として箱ひげの箱の下限と上限である25%点の値と75%点の値に注目し、その差分(箱ひげ図の箱の長さ)に注目したところ、図-2より亜高木層が存在しない山武・ササ多は、その区間の長さが他の調査区に

比べ特に大きく、長さが重要な指標であることがわかった。

図-2 の様々階層構造の林分を比較した結果、階層構造の判定には 99%点での高さ (99 パーセンタイル値)、垂直分布のピーク数、外れ値、25%点と 75%点の差分値が特に注目すべき変数であることがわかった。99%点での高さとは垂直分布のピーク数に関しては、垂直分布の形状を表す直接的な指標であるが、外れ値と 25%点と 75%点の差分値に関しては有効な変数かどうか確認する必要がある。そのために独立性の検定を行った。25%点と 75%点の差分値は階層数に対して、外れ値の有無は低木層の有無に対して 5%棄却域のある χ^2 検定を行った。その結果、25%点と 75%点の差分値は階層数と、外れ値の有無は低木層の有無に対して関連性があることが統計的に検証できた。

これらの変数を用いて地上レーザーの点群から階層構造を把握するフローチャートを作成した (図-3)。大筋の流れを以下に示す。

- ① 99%点の値で最高階層を判定する。5 m 以下の場合には低木層、5~10 m の場合には亜高木層、10 m 以上の場合には高木層を最高階層とする。
- ② ①で 99%点の値が 10 m 以上の場合、外れ値の有無で低木層の有無を判定する。外れ値がある場合は低木層がないと判定する。
- ③ ②で外れ値がない場合、25%点と 75%点の差分値から亜高木層の有無を判定する。箱の長さが 0.5 以上の場合には亜高木層がないと判定する。
- ④ ①で 99%点の値が 5~10 m、または③で外れ値がある場合、各パーセンタイル値におけるボクセル数の推移から階層数を判定する。ピーク数が 1 の場合は単層林、それ以外の場合には複層林とする。

高木層を 10 m 以上と定義しているため、高木層の有無は 99%点の高さによって分けた。階層構造があまり発達していない最高階層が亜高木層以下 (高さが 10 m 以下) の場合、低木層の有無は、ピーク数から階層数を判別した (図-3 の上部)。最高階層が高木に達すると (図-3 の下部)、様々な条件で場合分けをする必要があった。

階層数が判別できたとしても、どここの階層が無いのか別途判別する必要があった。例えば、垂直分布のピーク数より 2 階層あると判別できても、ボクセルの垂直分布の形状が異なる。垂直分布形状の違いから「どの階層が存在しないのか」を 25%と 75%のパーセンタイルの差分 から判読できるようにした。さらに全ての選択が「NO」の場合 (最高階層が高木層に達しており、垂直分布で境界がわかりにくく、明らかなピークが見られない場合、3 階層全て (高木層・亜高木層・低木層あり) 存在すると判定した。

本研究では、関東周辺の温帯林のデータで階層構造の判別手法を検討した。今後はさらに複雑な森林群落 (熱帯林、亜寒帯林など) で取得された 3 次元データを用い、階層構造を明確に判別できる汎用性の高い解析手法を確立したい。

図-3 3次元データから階層構造を自動判定するフローチャート
Fig. 3 flowchart of an automatic method to identify forest strata from 3D data

本研究では草本層の判定は行っていない。レーザーを 3 次元データにマルチスペクトルの色情報を付加すれば、草本だけを 3 次元データから認識し、データを抽出することは可能であるが、草本層の判別には、より細かい形状把握が必要となるため、樹木とは別の評価手法を検討するべきである。

6. まとめ

これまでは個人の経験や知識による主観的な調査で森林の構造が把握されてきた。そのため、データの正確性や確実性に限界があった。そこで本研究では、目視による計測に依存していた植被率と階層構造を地上レーザーによって得られた 3 次元点群データから正確に評価する手法を検討した。針葉樹や広葉樹の様々な森林構造がある場所で 3 次元データを取得し、データをボクセルに変換し、階層構造の水平面での占有率である植被率を、垂直面での階層構造を把握した。その結果、植被率の計測にはセンサー 3 箇所によるデータ結合、半径 10 m 以内の解析範囲、ボクセルサイズを 0.125 m に設定した場合において正確性が高い結果を得た。階層構造はボクセルの垂直分布における 99%点での高さ、ピーク数、外れ

値, 25%点と 75%点の差分値より自動で階層構造が把握できた。今後, 様々な林分構造データを用い, 階層構造を 3 次元データから自動で把握できる汎用性の高い解析手法を確立したい。

引用文献

- 1) 朝香智仁・青山定敬・岩下圭之・工藤勝輝・藤井壽生 (2010) 小型 UAV が観測した空中写真による海岸クロマツ林の樹高推定. 海岸林学会誌, 9(2):91-96.
- 2) Gouveia, S.F., Villalobos, F., Dobrovolski, R., Beltrão-Mendes, R. and Ferrari, S.F. (2014) Forest structure drives global diversity of primates. *Journal of Animal Ecology*, 83:1523-1530.
- 3) 早川裕弐・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎 (2016) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的应用. 地形, 37(3):321-343.
- 4) 日野輝明・古澤仁美・伊藤宏樹・上田明良・高畑義啓・伊藤雅道 (2003) 大台ヶ原における生物間相互作用にもとづく森林生態系管理. 保全生態学研究, 8:145-158.
- 5) Hosoi, F., Omasa, K. (2006) Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44:3610-3618.
- 6) 伊藤秀三編 (1977) 植物生態学講座 2 群落の組成と構造. 朝倉書店.
- 7) 加藤 顕・沖津優麻・常松展充・本條 毅・小林達明・市橋 新 (2015) 森林の樹冠構造がヒートアイランド現象緩和機能に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌, 41(1):169-174.
- 8) 加藤和弘 (1996) 都市緑地内の樹林地における越冬期の鳥類と植生の構造の関係. ランドスケープ研究, 59(5):77-80.
- 9) MacArthur, R.H., MacArthur, J.W. (1961) On Bird Species Diversity. *Ecology*, 42(3):594-598.
- 10) McCarthy, M.A., Parris, K.M., van der Ree, R., McDonnell, M.J., Burgman, M.A., Williams, N.S.G., McLean, N., Harper, M.J., Meyer, R., Hahs, A. and Coates, T. (2004) The habitat hectares approach to vegetation assessment: An evaluation and suggestions for improvement. *Ecological Management & Restoration*, 5(1):24-27.
- 11) Müller, J., Stadler, J., Brandl, R. (2010) Composition versus physiognomy of vegetation as predictors of bird assemblages: The role of lidar. *Remote Sensing of Environment*, 114:490-495.
- 12) 中村彰浩・戸田健太郎・前中久行 (2009) 地上レーザースキャナを用いた天然記念物に指定されたソテツ (*Cycas revolute* Thunb.) の形状計測. 日本緑化工学会誌, 35(1):63-68.
- 13) Nakashizuka, T. (1987) Regeneration dynamics of beech forests in Japan. *Vegetatio*, 69:169-175.
- 14) 根本 光・加藤 顕・小林達明 (2012) 航空機レーザ測量を用いた異なるスケールアプローチでのスギ・ヒノキ林材積の推定. 日本緑化工学会誌, 38(1):79-84.
- 15) 日本生態学会・正木隆・相場慎一郎 (2011) 森林生態学. 共立出版.
- 16) 小花和宏之・早川裕弐・ゴメス クリストファー (2014) UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング. 地形, 35(3):283-294.
- 17) 小花和宏之・早川裕弐・齋藤 仁・ゴメス クリストファー (2014) UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング, 53(2):67-74.
- 18) Ogai, T., Tanaka, K. (2016) The effects of vegetation types and microhabitats on carabid beetle community composition in cooltemperate Japan. *Ecological Research*, 31:177-188.
- 19) Parkes, D., Newell, G. and Cheal, D. (2003) Assessing the quality of native vegetation: The 'habitat hectares' approach. *Ecological Management & Restoration*, 4:29-38.
- 20) 佐藤 浩・小荒井衛・江田敏幸・伊藤麻子 (2008) 新宿御苑における航空レーザ測量データを用いた樹林の葉面積指数(LAI)のマッピング. 写真測量とリモートセンシング, 47(3):37-47.
- 21) 森林立地調査法編集委員会編 (2002) 森林立地調査法. 博友社.
- 22) 田口 仁・遠藤貴宏・安岡義文 (2008) LiDAR 点群データを用いた樹冠形状モデルに基づく単木樹冠抽出および樹高の推定. 日本リモートセンシング学会誌, 28(4):331-341.
- 23) 田村太壱・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.
- 24) 田中 章 (2014) 環境アセスメントにおける生物多様性オフセットの論点. 日本環境共生学会第 17 回学術大会発表論文集:252-259.
- 25) Tews, J., Brose, U., Grimm, V., Tielbörger, K., Wichmann, M.C., Schwager, M. and Jeltsch, F. (2004) Animal species diversity driven by habitat heterogeneity / diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 31:79-92.
- 26) 東京都 (2012) 緑施策の新展開～生物多様性の保全に向けた基本戦略～.
- 27) 蔡 斌・秋山 侃・魏 宏 (2006) 航空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.
- 28) Xiao, Q., Ustin, S.L. and McPherson, E.G. (2004) Using AVIRIS data and multiple-masking techniques to map urban forest tree species. *International Journal of Remote Sensing*, 25(24):5637-5654.
- 29) 山岸 裕・松江正彦 (2011) 地上レーザースキャナを用いた樹木の形状及び堆積計測の試み. 日本緑化工学会誌, 37(1):241-244.
- 30) 由井正敏・石井信夫 (1994) 林業と野生鳥獣との共存に向けて. 日本林業調査会.

(2019年6月14日受理)