

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23380085

研究課題名(和文) 森林施業が人工林の炭素吸収・蓄積量に与える影響の客観的評価法の開発

研究課題名(英文) Developing objective methods for evaluating the effects of silvicultural treatments on carbon sequestration and stock in plantation forests

研究代表者

石井 弘明 (Ishii, Hiroaki)

神戸大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50346251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地上レーザーを用いて、森林の三次元構造を計測し、森林の生産量推定に必要な様々なデータを抽出することに成功した。地上レーザーの三次元データから樹木の形状を計測する解析手法として、ニューラルネットワークの手法を応用し、測定誤差2cm以内で幹直径を、誤差50cm以内で樹高を推定するアルゴリズムを開発した。幹の判別率は95%以上であった。これによって、人が現場で計測するのと同じ精度で地上レーザーによる計測ができるようになったため、観測者による誤差の少ない客観的な森林計測が可能となる。

研究成果の概要(英文)：We developed methods to obtain parameters for estimating stand productivity from 3D data obtained by ground-based LiDAR. To estimate tree dimensions from LiDAR data, we applied the neural network algorithm. We were able to estimate DBH with < 2m error and tree height with < 50cm error. The algorithm distinguished 95% of the stems in the stand, on average. This meant that error levels for ground-based LiDAR were similar to that of human workers. Thus, LiDAR could serve as a objective method for forest mensuration without introducing human error.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：森林構造

### 1. 研究開始当初の背景

わが国では京都議定書による二酸化炭素排出量の削減目標を達成するため、人工林では間伐や下刈りなどの森林管理を実施し森林の二酸化炭素吸収速度を促進する政策がすすめられている。しかし、森林の炭素吸収・蓄積量に対する森林管理の効果を定量的に把握するためには、多大な労力と時間を要する上に、現在の調査方法では測定者や測定方法、計算方法による誤差が生じるため、全国的に統一された客観的な評価方法の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は三次元レーザースキャナーを用いて、客観的かつ統一的な森林の炭素吸収・蓄積量を把握する手法を開発することである。本研究の成果を実用化すれば、だれでもとこでも三次元レーザースキャナーを使って、20分程度で森林構造を測定できるようになる。さらに、森林構造を映像化して市民に「見せる」ことによって、森林政策に役立つ有効なコミュニケーションツールとして活用することができる。

### 3. 研究の方法

人工林、広葉樹林二次林など様々なタイプの森林を対象に、三次元レーザースキャナーを用いた測定を行う。得られたデータから、単木に関する情報を(幹直径、樹高、材積、表面積など)を抽出するアルゴリズムを開発する。また、各森林タイプに適用可能なバイオマス推定アルゴリズムを開発し、林分成長・蓄積量の推定シミュレーションモデルの向上を目指す。

さらに、測定・解析データをもとに、森林の三次元映像(動画)を作成し、森林整備計画におけるコミュニケーションツールとして活用する。

### 4. 研究成果

レーザーによって3次元データから地形図である Digital Terrain Model (DTM) と Digital Surface Model (DSM) を作成した(図1)。DSM と DTM の差分から Digital Canopy Model (DCM) と呼ばれる樹冠高を表すデジタルデータを作成できれば、樹高計測ができる。DCM のピークを自動で判別し、そのピークを梢端と定義し、樹高計測を行うことが樹高計測に一番簡易な手法である。しかし、梢端の位置が幹元の位置と一致する訳ではないため、正確な樹木位置図を作成するには地上レーザーによる地上計測が優れていることがわかった。さらに、正確な幹の位置図ができれば、幹部の地上レーザーデータを自動で切り出し、様々な高さでの幹直径を3次元データから計測できるようになる。

地上レーザーの3次元データから幹を計測する解析手法として、ニューラルネットワークの手法を応用し、複雑な幹形状をそのまま

正確に計測できるアルゴリズムを開発した。開発した手法のおかげで、測定誤差を2cm以内で幹直径計測できるようになった。これまでの地上レーザーによるデータ解析実績から、胸高直径計測では2cm以内、樹高では50cm以内、幹の判別率は95%以上の正確性で直接計測できる。これらの結果は従来の円推定による手法よりも正確に幹形状把握ができる。よって、人が現場で計測するのと同じ精度で地上レーザーによって計測ができるようになった。さらに、樹冠、幹部などの複雑な3次元形状をコンピュータグラフィックの手法(ラッピング法)によりレーザーの点群から正確に樹冠形状を再現できる。他の手法として、ボクセル法という点群を3次元グリッドに変換して形状を把握する手法がある。ボクセル法では照射角度や照射範囲によってレーザーが到達できない場所があり、データの欠損を生じてしまうため、樹冠が占める体積を正確に把握できなかった。しかし、ラッピング法を用いることでラッピングによって囲われた空間を作成できるため、より正確に樹冠体積を計測できる。さらに、地上レーザーを取得する際、高精度GPSを林内に設置しても0.5~5mほどの位置ズレが生じてしまい、他の航空機データと位置合わせすることが難しかった。その位置ズレを補正するアルゴリズムを開発し、コンピュータ上で補正できるようにしたため、航空機レーザーデータと地上レーザーデータのデータ融合ができるようになった。この結果、地上レーザーデータ取得の際に、GPSを現地で正確に取得しなくても、後で位置合わせができる。3次元データによる森林調査は、森林計画ばかりでなく、森林生態学の分野でも重要である。ラッピング法により樹冠を利用する動物の生息域をより正確に算出することができ、さらには植物の光合成量に関係する樹冠表面積も算出できる。特に森林管理状況を示す林内の垂直構造を詳細に把握できれば、管理する場所をより正確に把握できる。航空機レーザーと地上レーザーの分解能を比較すると、地上レーザーの方がより詳細に林内状況を把握できるため、こうした地上レーザーデータを森林政策に有効活用できれば、生物多様性を保つ林内構造を維持した森林計画を立てていくことができる。

#### 広葉樹コナラ林の材積算出及び、詳細な形状把握

不定形な樹木を対象とした地上レーザーによる材積算出を行うために、優占種はコナラ(*Quercus serrata*)である東京都野山北六道山公園の里山林でレーザー計測を行った。広葉樹の樹木形状把握のために伐倒調査及び登攀によって計測を行い、レーザーによる材積評価結果の現地検証データを得た。材積算出のための従来の方法は、樹高と胸高直径の計測から推定してきた。本研究では、不定形な広葉樹に注目し、不定形な樹木形状

把握を自動で解析する手法の確立を行った。

樹高と胸高（地際から 1.3m）の計測には、正確な DTM を地上レーザーから自動で作成できなければならない。本研究では 50cm 解像度の DTM を作成するために、50cm グリッド内の地形図を作成し、さらにフィルタリングからノイズの少ない正確な DTM を作成することができた。

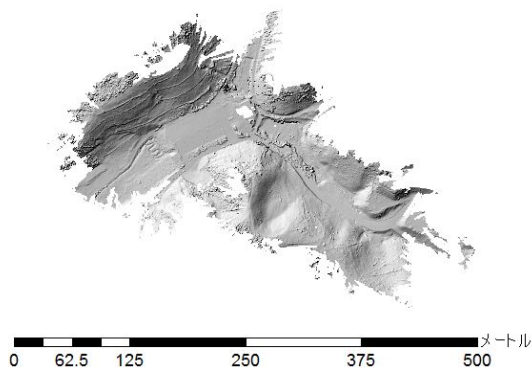


図 1. 地上レーザーデータから作成したノイズの少ない DTM

樹木位置図を地上レーザーデータから自動で作成した。レーザーセンサーを設置した場所から樹木位置を自動で把握する手法を確立し、幹部を中心とした樹木位置図を作成した。本手法により正確に立木密度を把握できるようになり、広域でも地上レーザーデータのみから材積評価を容易でできるようにした。航空レーザーデータによるこれまでの解析は樹冠頂の場所を中心とした樹木位置図であったが、幹部の位置を自動で把握できるようにしたことが本研究の特徴である。得られた樹木位置を基に、単木単位のレーザーデータを抽出し、材積評価を行った。レーザーからの材積の算出結果を登攀と伐倒調査から得られた材積評価の結果とを比較した（図 2）。図 2 は単幹での材積算出結果を比較したところ、ほぼ同じ結果を得ることができた。この結果より、レーザーによって広葉樹の幹形状を把握できることがわかる。しかし、広葉樹は複数の幹によって構成しているため、複数の幹を含めるとより多い材積となる。地上レーザーは実幹長を測定できるため、伐倒調査によって作成された材積式に近い値を得ることができたが、人が目視によって樹高計測する際の樹高は、レーザーによる実幹長の違いが誤差を生じやすい。実幹長を測定できる地上レーザーは、より正確な材積を測定できると考えられる。

#### カナダフォートスミスの一斉林での樹冠形状把握

2012 年夏期にカナダ フォートスミスで 5, 10, 25m の異なる樹高のある Jack Pine のプロットと 10, 15, 25m の異なる樹高のある Quaking Aspen のプロットでレーザー計測を行い、各プロットでの地形図、樹木位置図を

作成した（図 3）。さらに単木単位の樹木レーザーデータを抽出し、抽出したデータにラッピング法でラッピングした樹冠形状を作成した（図 4）。各樹木の樹冠形状から 3/2 乗則による樹木競争の影響を検討した。

#### 信州大学演習林での間伐影響把握の解析

2012 年夏に間伐前後で 2 回取得した地上レーザーデータを用いて間伐評価を行った。間伐前後での間伐状況をレーザーデータによって視覚化できるようにした（図 6、作成中）。樹木の間伐状況を地上レーザーデータによって把握でき、さらには間伐をシミュレーションできるソフトを開発し、その結果を間伐前後のレーザーデータを用いて検証できるようになった。

また、7 年生、4 4 年生、7 6 年生のヒノキ人工林を対象にバイオマスの推定モデルを構築した。さらに葉、枝・幹の表面積のスケールリングモデルを構築できた。また、3 5 0 年生のヒノキ天然生林で個体の水平分布の解析を行った。天然生ヒノキ個体群は集中分布を示しており、これは切り株等の樹木遺体を利用した更新を行ってきた結果と考えられた。一方で、集中斑内の隣接個体間で地下部資源をめぐる競争が行われていることが示唆された。

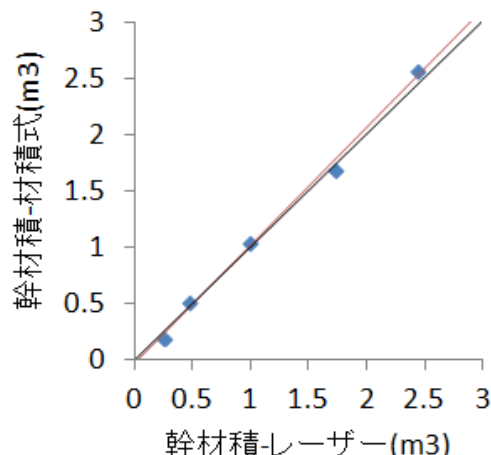


図 2. 単幹での材積算出結果の比較

#### 九州大学演習林での調査結果

九州に生育する高齢スギ人工林の地上部一次生産量 (ANPP) を測定し、施業の効果や二次林化が物質循環に及ぼす影響を検討した。

福岡県久山町に位置する九州大学福岡演習林内の約 140 年生のスギ人工林と、この造林が不成績に終わり天然更新した広葉樹が優占する二次林における ANPP に有意な差はなかったが、リターフォール量は人工林の方が多かった。

大分県玖珠郡九重町に位置する九州電力社有林内の 90 年生スギ人工林において、間伐強度の違いはバイオマス、成長量に影響を与えていなかったが、リターフォール量は強度間伐区で多かった。成長量リターフォール量とも林分内での値のばらつきは強度間伐

区で大きかった。

人工林では間伐に、二次林では天然更新に応じて形成された森林構造が、ANPP や物質循環の空間的な変異に大きな影響を与えたと考えられた。

また、LiDAR で取得した樹形データをもとに、樹木の光合成生産を計算することを目的として、樹木一次枝構造を基礎として樹木や森林を再現し、その中で一次枝・個体・森林の光合成を計算するコンピュータシミュレーションモデルを作成した。

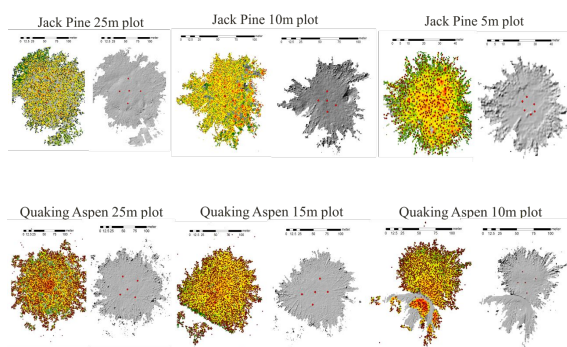


図 3. Jack Pine と Quaking Aspen の各プロットでの樹木位置図(左側)と地形図(右側)

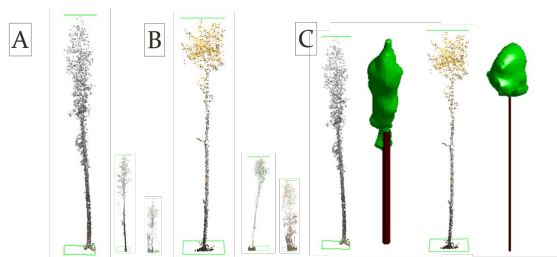


図 4. 単木単位での樹木レーザーデータ(A: Jack Pine B: Quaking Aspen)とラッピング法による樹冠形状把握(C: Jack Pine(左)、Quaking Aspen (右))

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

加藤顕・石井弘明・榎木勉・大澤晃・小林達明・梅木清・佐々木剛・松英恵吾 (2014)レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用。日本森林学会誌(印刷中) 査読有

加藤顕・戸倉千明・小林達明・野田佳慶・有村恒夫・福田聖一(2013)高速道路法面におけるレーザーを用いた葉面積指数の推定。日本緑化工学会誌 39: 194-197. 査読有

Enoki, T., Kusumoto, B., Igarashi, S., Tsuji, K (2014) Stand structure and plant species occurrence in forest edge habitat along different aged roads on Okinawa Island, southwestern Japan.

Journal of Forest Research 19: 97-104. 査読有

Ishii, H., Azuma, W., Nabeshima, E. (2013) The need for a canopy perspective to understand the importance of phenotypic plasticity for promoting species coexistence and light-use complementarity in forest ecosystems. Ecological Research 28:191-198. 査読有

Ishii, H., Hamada, Y., Utsugi, H. (2012) Variation in light-intercepting area and photosynthetic rate of sun and shade shoots of two Picea species in relation to the angle of incoming light. Tree Physiology 32: 1227-1236. 査読有

Enoki, T., Inoue, T., Tashiro, N., Ishii, H. (2011) Aboveground productivity of an unsuccessful 140-year-old Cryptomeria japonica plantation. Journal of Forest Research 16: 268-274. 査読有

[学会発表](計 10 件)

加藤顕・大萱直花・笹川裕史・小林達明・森林計測における様々な地上レーザーセンサーの制度比較。日本森林学会。2014.3.28 大宮

安藤祐樹・加藤顕・吉田俊也・梶原康司・簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法。日本森林学会 2014.3.28 大宮

Kato, A., Osawa, A., Ishii, H. Capturing boreal forest structure using terrestrial laser. 16<sup>th</sup> International Boreal Forest Research Association Conference. 2013.10.8. Alberta, Canada

Umeki, K., Kato, A. (2013) Terrestrial LiDAR-based tree/stand model that can simulate light interception and photosynthesis of branches, individuals and a stand. 7<sup>th</sup> International Conference on Functional Structural Plant Models. 2013.6.7. Saariselkä, Finland

Kato, A. Above-ground biomass estimation of trees using terrestrial laser. International Symposium on Remote Sensing. 2013.5.15. Tokyo.

東若菜・黒田慶子・石井弘明・Sillett, S.C. セコイアメスギの葉には高さに伴う水ストレスの影響を緩和する機能があるか? 日本木材学会. 2013.3.10 盛岡

東若菜・石井弘明・Sillett, S.C. (2013) 高木の樹冠における水ストレスと葉の水分生理特性: 樹上 100m のセコイアメスギに見られる調節メカニズム。日本生態学会 2013.3.5. 静岡

石井弘明・東若菜・犬房直樹・荻野宏之。森林の三次元構造計測: 技術と応用。日本森林学会. 2012.3.27. 宇都宮

城田徹央・北原和樹・石井弘明・安江恒・岡野哲郎．レーザー測量によるヒノキ人工林のバイオマス推定．日本森林学会 2012.3.27. 宇都宮

Ishii, H., Azuma, W., Sillett, S.C. (2012) Does within-crown plasticity increase stand productivity? 5<sup>th</sup> East Asian Federation of Ecological Societies Meeting. 2012.3.6.Ohtsu, Japan

〔図書〕(計 2件)

森章・石井弘明(2012)エコシステムマネジメント 概念と遍歴. Pp2-40. 森章(編).エコシステムマネジメント-包括的な生態系の保全と管理へ-. 共立出版.

Ishii, H. (2011) How do changes in leaf/shoot morphology and crown architecture affect growth and physiological function of tall trees?. pp. 215-232. In: Age-related changes in tree structure and function F.C. Meinzer, T.E. Dawson and B. G. Lachenbruch, eds. Springer, Berlin

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

石井 弘明 (ISHII Hiroaki)

神戸大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：50346251

(2)研究分担者

榎木 勉 (ENOKI Tsutomu)

九州大学・農学研究院・准教授

研究者番号：10305188

城田 徹央 (SHIROTA Tetsuo)

信州大学・農学部・助教

研究者番号：10374711

梅木 清 (UMEKI Kiyoshi)

千葉大学・大学院園芸学研究科・准教授

研究者番号：50376365

加藤 顕 (KATO Akira)

千葉大学・大学院園芸学研究科・助教

研究者番号：70543437

大澤 晃 (Ohsawa Akira)

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：90288647