

波形記録式航空機 LiDAR データの反射強度を用いた樹冠密度分布把握手法の検討

環境システム工学専攻 修士2年 12330285 林 真那

1 研究背景

日本は、国土の66%が森林である。森林は治水機能や生態系の保全といった機能を持つ [1]。生態系の保全や、森林の治水機能などを維持するためには、定期的な森林の状況把握が不可欠である。これは水害の起こりやすい環境を作り出す箇所の特定にも役に立つ [2]。しかし、手入れのされていない森林は急峻で人の踏み入れない箇所もある。そのため、近年ではリモートセンシング技術を用いて上空から森林の状況把握を試みる研究が進んでいる。

現在、保安林整備や森林経営計画での間伐の基準には樹冠粗密度が用いられている (図1)。これは、成長時の樹冠投影面積を該当区域の面積で除して算出されるものである [3]。しかし、この指標には個々の樹冠の葉面積が反映されていない。樹冠内部の葉面積を反映するパラメータ (LAI: Leaf Area Index や LAD: Leaf Area Density など) は、森林の光環境の変化や光合成生産量の評価、雨水の遮断量や蒸発散量に関係し水資源解析の重要なパラメータとなっている [4]。そのため、樹冠内部状況を反映するパラメータを森林の管理に用いることが望ましい。

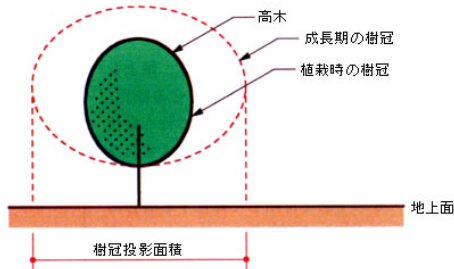


図1: 樹冠投影面積 [3]

2 研究目的

樹高や成長量など森林状況の把握は現地調査を中心として行われてきたが、近年では航空機 LiDAR (Laser Imaging Detection And Ranging) を用いた把握手法の研究が進められ [5]、森林の3次元構造を捉えるために有効な手段として期待されている [6]。

本研究では、LiDAR データの反射強度を用いた、水平方向の樹冠表層の樹冠密度分布の把握手法について検討した。

樹冠密度とは単位面積に占める葉や幹の地表投影面積の割合を表し、樹冠の鬱閉状況を表す指標である。UAV 空撮により得た葉面積率が樹冠表層での樹冠密度を反映していると考え、LiDAR データ

のファーストパルスの反射強度と比較し、LiDAR データの反射強度を用いた樹冠表層の樹冠密度分布の把握が可能か、さらにどういった解析が葉面の把握に有効か検討した。

3 用語の説明

3.1 樹木の部位の表記について

図2に本論文で用いる樹木の部位について示す。特に、本論文では「樹冠」を樹木の葉の茂る部分とし、樹木の表層部分については樹冠表層と表現している。

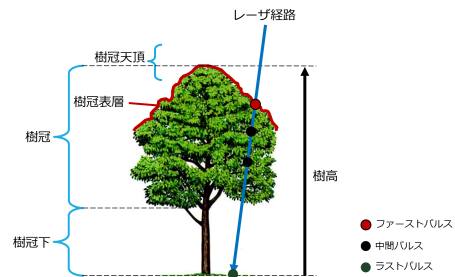


図2: 本論文で用いる樹木に関する語句について

3.2 使用センサと地表モデルについて

本研究では、波形記録式 LiDAR データを用いている。LiDAR とは、パルス状にレーザー光を発射し、反射して帰ってくるまでの時間を元に対象物の位置を特定するものである。本研究では、LiDAR データを用いて森林域の解析を行う際に DSM (Digital Surface Model) と DEM (Digital Elevation Model) という地表モデルを作成している。その概念図を図4に示す。図中の赤線部分の標高値を取得することで DEM・DSM が作成できる。

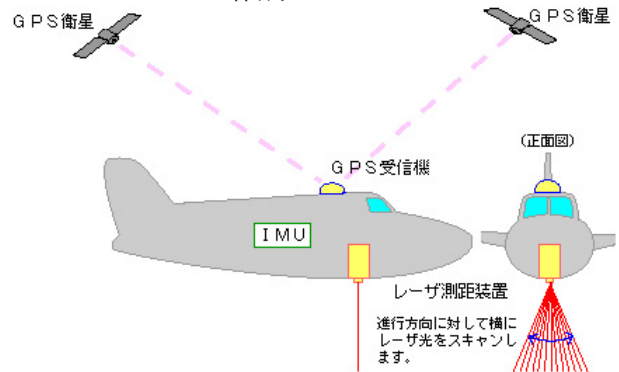


図3: LiDAR データ取得方法 [7]

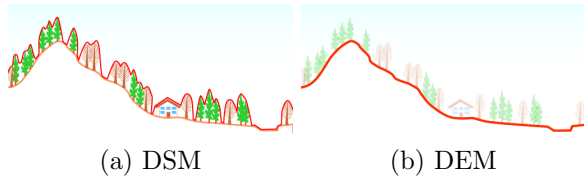


図 4: DSM と DEM の概念図 [7]

4 波形記録式 LiDAR データの反射強度を用いた森林内の葉面積の把握

本研究で使用した波形記録式 LiDAR データは、微弱なりターンパルスも反射点として記録でき、従来型よりも詳細なデータが取得可能である。従来の LiDAR データでは、レーザ経路一つにつき反射強度の高い4点までしか記録できなかった。波形記録式データでは、反射点のピーク時の反射強度、パルス幅などが記録され、理論上は無制限に反射点が記録できるとされている。

波形記録式 LiDAR データには、反射点ごとに反射強度が記載されている。今回用いた LiDAR データに記載されている反射強度は、LiDAR センサによって計測される反射パルスの相対的な強さであるため、単位を持たない。

反射強度に影響を与えるものとして、反射面の LiDAR の波長での反射特性や表面の滑らかさや荒さ、センサに対する反射面の向き、反射面の面積が挙げられる。今回は森林を対象としているため、反射面の多くは葉面であり、表面の滑らかさや荒さなどは均一であるとした。

以下の仮定を満足すれば、反射強度は反射面の面積と比例し、式 (1) が成り立つと考えた。

- スポットの広がりは無視できる
センサは航空機に搭載され、対地高度 500m の位置にあり、対象とする樹木は高くても 20m 程度で、航空機のほぼ直下に位置する。
- 透過光は一定であるとし無視できるとした
- 葉面の反射率は一定とする
- 葉面の傾斜角による影響は無視できる
 - － 葉面の傾きによってレーザに反射する光には強弱がでる。しかし、本研究で用いた LiDAR のスポット径は直径 25cm と対象区域に生息する樹種の葉面に比べ大きく、一つの反射点は複数枚の葉からの反射である [8] ため、葉面の傾斜角度による影響は平均化されて一定になると考え、無視できるとした。

$$I_i \propto RA_i \quad (1)$$

- I_i 反射点の反射率
- R 葉面の反射率
- A_i 反射面の反射面積

5 対象区域と使用したデータ

5.1 対象区域

今回対象としたのは、新潟県長岡市釜ヶ島付近の信濃川河道内の森林である。選定理由は既往研究にて現地調査の結果があること、対象区域の一部ではあるが地上 LiDAR の計測結果があること (本論文では言及していないが、航空機 LiDAR データや他のデータの位置の確認などに用いた) である。また、この地域で、河川の氾濫 (アメダスの気象状況 [9] と信濃川の水位の記録 [10] から確認した) や大規模な伐採などが、LiDAR データ取得時から現在まで起きていないことを確認した。

5.2 使用データ

本研究では、国土交通省信濃川河川事務所が中日本航空株式会社に業務委託し、2011 年 11 月に取得した波形記録式 LiDAR データを使用した。観測システムの諸元を表 1 に示す。

表 1: 計測システム緒元

センサ搭載航空機	AS350
計測システム	SAKURA1
波長帯	近赤外波長 (1550nm)
レーザパルス発射周波数	200kHz
スキャン角	±30degree
ビーム広がり角	0.5mrad
対地飛行速度	100km/h(27.8m/s)
対地飛行高度	500m
計測密度	最低 4 点/m ²

6 反射強度と葉面積率の相関関係

6.1 反射強度と葉面積率の解析方法

葉面積率は、樹冠表層での葉の充填率であり樹冠表層での樹冠密度分布を反映している。本章では LiDAR データのファーストパルスが樹冠表層で反射したものとし、その反射強度が樹冠密度分布を反映するか葉面積率と比較することで検証した。葉面積率は UAV 空撮写真より作成した点群データから求めた。UAV の撮影環境は表 2 の通りである。

表 2: UAV 空撮の緒元

計測システム	Phantom3
飛行高度	約 50m
撮影インターバル	約 30 フレーム/s(10 フレームごとに切り出した画像を使用)
撮影日時	2015 年 11 月下旬

6.1.1 選定箇所

LiDAR データと UAV データは取得時期が異なり、2 時期の間で樹冠の位置が大きく変化している箇所が見られた。そこで、LiDAR データと UAV データ双方で樹冠が確認できる箇所に絞って解析を行った。以下に選定基準を示す。

- 2011 年の航空写真と 2015 年の UAV 空撮によるモザイク画像の双方で樹冠が確認できること
- 2011 年から 2015 年で、樹冠の形に大きな差がないこと
- 樹冠が平面上で 10m 四方以上の大きさであること (選定区間で樹冠外の箇所がない)

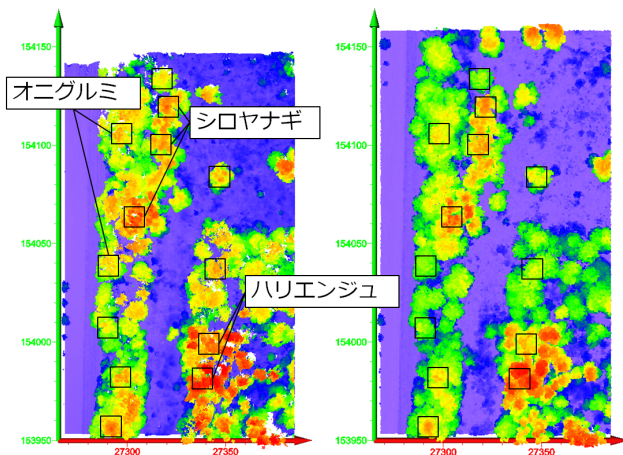


図 5: 選定箇所

6.1.2 地表高の把握

1m メッシュで、格子内の最低高度の点を地面点とし地表高の把握を行った。地表高が不自然に高い箇所 (上部の樹木でレーザーが遮られ、地面点まで到達しなかった箇所) については、周辺の平均値を与え平滑化を行った。

6.1.3 LiDAR データの解析方法

地表から 3m 以上の位置にある LiDAR データのファーストパルスの反射強度の平均値を、1m 四方のメッシュで求め、解析区域 (図 5) ごとにその平均を算出した。1m メッシュでの平均を算出したのは LiDAR データの測定点の粗密の影響をなくするためである。

6.1.4 UAV データ

UAV 空撮データを元に作成した点群データを用いて、葉面積率を算出する。

UAV はカメラを使って撮影されたものであるため、樹冠内部の葉面は反映されていない。さらに低高度からの撮影のため樹冠側面から観測している箇所が多く、撮影対象の形状によって反射点 (UAV によって観測された点) 数に粗密が見られる (図 6 参照、実際には UAV 空撮は複数の異なる角度から撮影を行っているため、樹冠天頂で反射点数が密になっている箇所がほとんどである)。そのため、反射点数による葉面積率の把握は適切ではない。そこで、ある微小区間内 (2cm 四方) で、地表からある一定の高さ (ここでは 3m) 以上に反射点があった場合、その箇所に葉面があるとし、単位面積内で葉面があると判断された微小区間の数と全体の微小区間の比を葉面積率とした。図 7 に葉面積率算出方法の模式図を、式 (2) に葉面積算出式を示す。

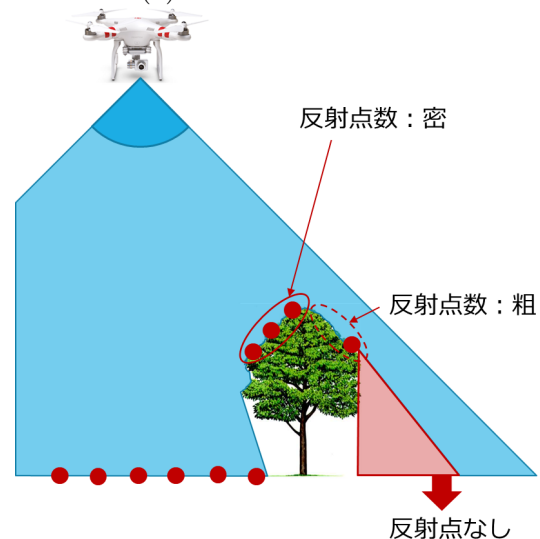


図 6: UAV 撮影の模式図

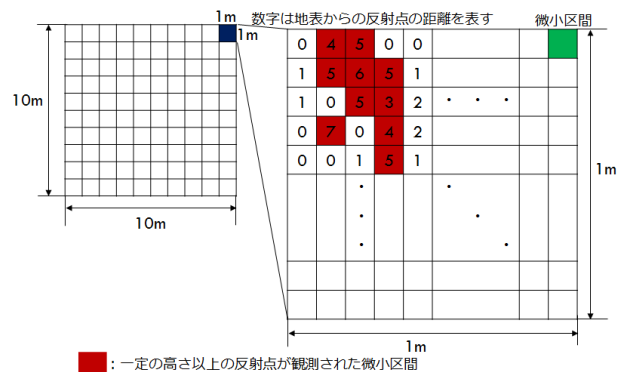


図 7: 葉面積率算出の模式図

$$r_l = \frac{n_l}{N} \quad (2)$$

- n_i 区間内で一定の高さ以上の反射点が観測された微小区間の数
- N 区間内の微小区間の数
- r_i ある区間の葉面積率

とんどが同一の樹木からの反射であると仮定し、式(5)を用いることで、前章でみられた樹木ごとの葉面状況の違いによる反射率の変化を緩和できるのではないかと考えた。

$$I_i \propto RA_i$$

$$\begin{aligned} \therefore S_{Vi} &= \frac{RA_i \alpha}{(RA_1 + RA_2 + \dots + RA_N) \alpha} \\ &= \frac{A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_N} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\therefore S_{Vi} = \frac{I_i}{\sum_{k=1}^N I_k} = \frac{A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_N} \quad (5)$$

- I_i ある反射点の反射強度
- R_i 反射面の反射率
- A_i 反射面積 (葉面積)
- S_{Vi} 反射面占有率
- α 比例定数

$A_1 + A_2 + \dots + A_N$ は定数 (スポット面積) である。反射点占有率 S_{Vi} はスポット面積に対する反射面面積の割合であるため、スポット面積を単位面積とした樹冠密度とすることができる。

7.2 結果

反射面占有率と葉面積率の比較結果を図9に示す。相関係数は0.72、シロヤナギを除くと0.93で、反射強度平均値よりも向上した。シロヤナギの相関は低いままとなっており、樹冠内部に別の樹木が混在している、樹冠内で葉面の反射率が異なるなどの原因が考えられる。

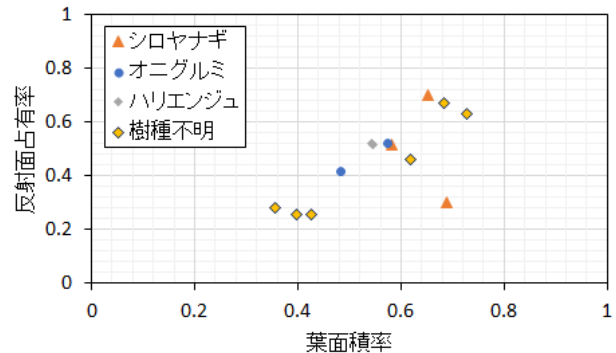


図9: 反射面占有率と葉面積率

6.2 解析結果

結果を図8に示す。葉面積率と反射強度平均値は高い相関があるものと思われる。相関係数は0.61であった。しかし、シロヤナギのみ葉面積率と反射強度の相関が低いため(シロヤナギを省くと相関係数は0.89)、樹種によっては反射強度には葉面積以外の要因も影響していると思われる。

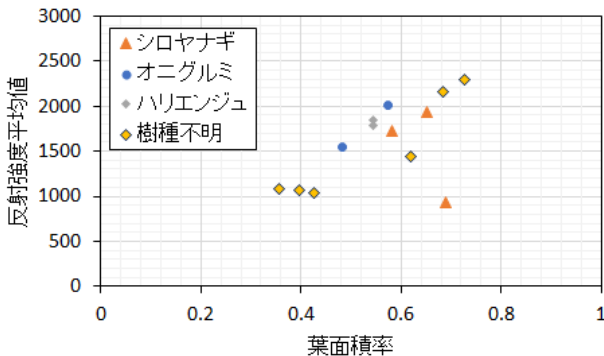


図8: 葉面積率と反射強度平均値の比較結果

シロヤナギは若葉に白い毛が生える特徴があるが、葉面積に対して反射強度平均値が低い樹冠にはそれが見られなかった(他のシロヤナギ樹冠はUAV空撮写真や、LiDARと同時期に撮影された航空写真では白っぽく映っていた)。葉面状態の違いによる葉面の反射率の違いが反射強度に影響したものと思われる。

7 樹木ごとの反射率を考慮した解析方法の検討

前章にて、葉面の反射率が葉面状況に左右され反射強度に影響が出ることが示唆された。ここでは樹木ごとの葉面の反射率の違いによる影響を考慮した解析を行う。

7.1 反射面占有率の算出方法

ここでは、以下の式を用いて反射面占有率 S_{Vi} を算出する。

$$S_{Vi} = \frac{I_i}{\sum_{k=1}^N I_k} \quad (3)$$

I_i は対象とするファーストパルスの反射強度、 $\sum_{k=1}^N I_k$ は、対象とするファーストパルスを含むレーザー経路上の全ての反射点の反射強度の総和を示す。なお、樹木の葉面の傾きによる反射率の変化はないものとし、レーザー経路上の反射面の反射率は一定と仮定している。レーザー経路は森林に対してほぼ真上から入射するため、レーザー経路上の反射点はほ

8 葉面以外の反射面を考慮した解析方法の検討

LiDAR データは葉面だけでなく幹や地面、下草などの反射点を含んでいる。反射強度は反射率と反射面面積に比例するため、反射率の高い地面などは反射強度が高くなる傾向にある。そのため、占有率をそのまま算出してしまうと反射率の低い反射面の

占有率が過小評価されることになる．ここでは反射率の高い箇所で反射した点を考慮した解析を行う．

8.1 地面の反射特性の把握

図 10 に、DEM 付近のオンリーパルス (レーザー経路上の反射点が 1 つのときの反射点) と、DSM から 0.2m 以内の高さにあるオンリーパルスのヒストグラムを示す．

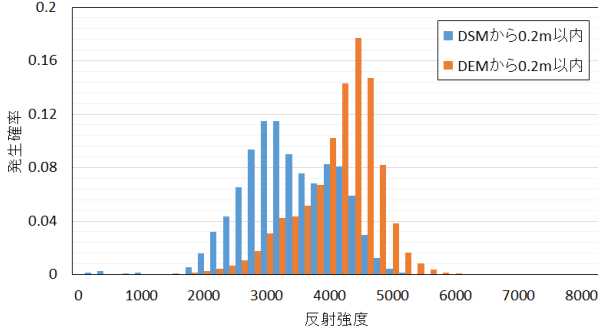


図 10: オンリーパルスの反射強度のヒストグラム

DEM 付近のオンリーパルスのヒストグラムには反射強度が 4400 の値付近でピークがある．これは地面を捉えたものと思われる．また、2000～4000 の値の発生確率も高い．DSM から 0.2m 以内の高さのオンリーパルスのヒストグラムでは 3000 の値付近と 4000 付近でピークが存在する．

図 11 は葉面や幹、地面の分光反射特性を示すグラフである．1550nm 付近の波長 (LiDAR の波長帯) では葉面が最も反射率が低く、次いで土壌、樹皮となっている．これを考慮すると、図 10 の DSM から 0.2m 以内の高さでのヒストグラムの 3000 付近のピークは葉面を、DEM 近くでの反射強度が 2000～4000 のオンリーパルスは下草を捉えたものと思われる．DSM から 0.2m 以内の反射強度 4000 付近のピークは、樹皮を捉えたものとも思われるが、図 10 では樹皮は地面よりも反射率は高い．樹幹は円形、地面は入射光に対してほぼ直交しており、反射面の形状による影響がでたのではないかとと思われる．

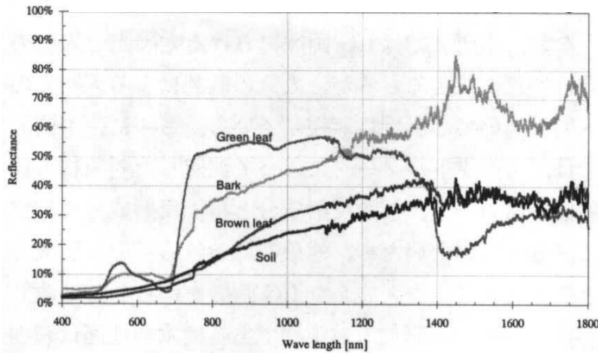


図 11: 分光反射特性 [13]

なお、図 8 の反射強度平均値と葉面積率の相関を調べたグラフにおいて、シロヤナギを除いて回帰式

を当てはめたところ、葉面積率が 1 を示すとき反射強度は 3054 になる．これは図 10 の葉面を捉えたと思われるヒストグラムのピークとほぼ同じである．

8.2 地面を考慮した反射面占有率の算出方法

地面は葉面よりも反射率が高い傾向があり、反射率 R が一定という仮定が成り立たない．そこで、地表近くでの反射点を地面での反射点、それ以外を葉面での反射点の 2 種類として、式 (4) を変更した．

$$S_{Vi}^l = \frac{R_l A_i^l}{R_l (A_1^l + \dots + A_m^l) + R_{gnd} (A_1^{gnd} + \dots + A_n^{gnd})}$$

$$S_{Vi}^{gnd} = \frac{R_{gnd} A_i^{gnd}}{R_l (A_1^l + \dots + A_m^l) + R_{gnd} (A_1^{gnd} + \dots + A_n^{gnd})} \quad (6)$$

R_l	葉面の反射率
R_{gnd}	地面の反射率
A_i^l	葉面で反射した反射点の面積
A_i^{gnd}	地面で反射した反射点の面積
I_i^l	葉面での反射点の反射強度
I_i^{gnd}	地面での反射点の反射強度
m	レーザー経路上で葉面で反射した反射点数
n	レーザー経路上で地面で反射した反射点数

ここで、地面付近でのオンリーパルスのヒストグラムから、スポットがすべて地面で反射した場合、反射強度は 4400 程度を示すため、地面に到達したスポットの割合は、

$$\sum_{i=1}^n S_{Vi}^{gnd} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i^{gnd}}{4400} \quad (7)$$

として算出される．残りが葉面で反射したとすると、

$$\sum_{i=1}^m S_{Vi}^l = 1 - \sum_{i=1}^n S_{Vi}^{gnd} \quad (8)$$

これより、ある反射点の反射面占有率は、葉面で反射したならば、

$$S_{Vi}^l = \frac{I_i^l}{\sum_{i=1}^m I_i^l} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n I_i^{gnd}}{4400} \right) \quad (9)$$

地面で反射したならば、

$$S_{Vi}^{gnd} = \frac{I_i^{gnd}}{4400} \quad (10)$$

として求められる．ここでは、DEM から 0.2m 以内にある反射点を地面に到達した反射点とし、上式を用いて解析を行った．

8.3 結果

地面を考慮して反射面占有率を求め葉面積率と比較した結果を図12に示す。相関係数は0.70と地面を考慮しない場合よりも低下した。一部の樹木では、樹冠が繁茂しすぎてレーザが地面まで到達せず、DEMが正しく把握できない箇所があった。これはその影響が出たものと思われる。なお、シロヤナギを除いた場合は相関係数が0.96となった(シロヤナギの選定箇所の一つは前記の理由によりDEMが正しく把握できなかった)。

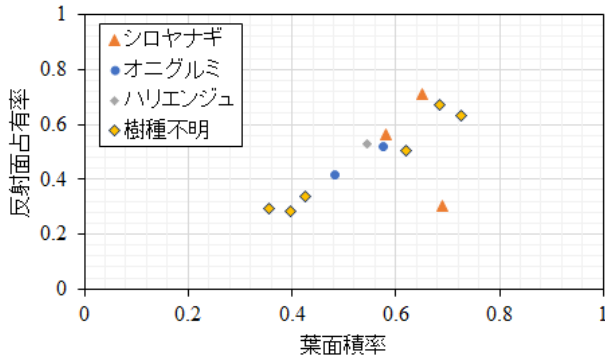


図 12: 地面の反射率を考慮した反射面占有率と葉面積率

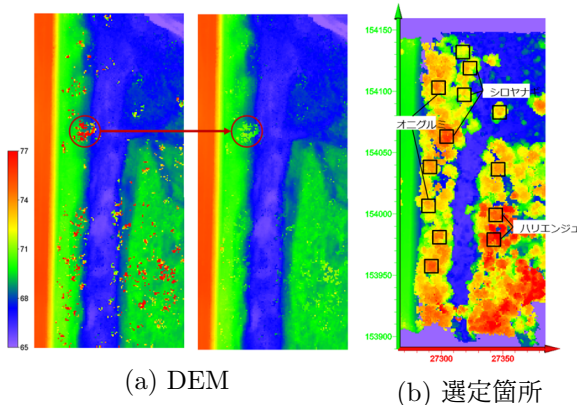


図 13: 抽出箇所とDEM

9 まとめ

UAV空撮によって得られた点群データを元に葉面積率を算出し、葉面積率と波形記録式LiDARデータの反射強度との相関関係を探った。葉面積率と反射強度平均値の相関は高く(相関係数は0.6前後)、反射強度が葉面積を反映しており、樹種によっては反射強度から樹冠密度分布の把握が可能であると思われる。

ファーストパルスの反射強度を、そのレーザ経路上の反射点の反射強度の総和で除することで反射面占有率を求めたところ、葉面積との相関は反射強度平均値よりも向上した(相関係数は0.7程度)。レーザ経路上の反射点がすべて同じ樹木の葉面からの反射と仮定し、反射面占有率を算出することで樹木ご

との反射率の違いによる葉面積率との相関係数の低下は抑えられると考えたが、大きな改善は見られなかった。

地表付近でのオンリーパルスのヒストグラムを参考に、地面点の反射率の違いを考慮した解析を行った。DEMが正しく把握できなかった箇所では、反射面占有率と葉面積率の相関は、地面点を考慮しなかった場合の反射面占有率よりも低下した。それ以外の箇所での解析では、葉面積率との相関は地面点を考慮しなかった場合の反射面占有率よりも向上した。実際には地面点のほかに幹などでも葉面と反射率は異なる。補正を正しく行うために、今後は落葉期のデータなどを用いてDEMや幹の位置、反射強度を把握することが望ましい。

参考文献

- [1] 財団法人リバーフロントセンター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，2000.6
- [2] 加藤 正人編：森林リモートセンシング 第3版，日本林業調査会，2010.4，pp.16-17
- [3] 林野庁：森林総合監理士（フォレスター）基本テキスト，2016年3月10日アクセス確認，http://www.rinya.maff.go.jp/j/ken_sidou/forester/
- [4] 端野 道夫・田村 隆雄・田淵 昌之・富士川 洋：森林流域における遮断蒸発・蒸散量と流域地中保水量の分離・評価法，水工学論文集，第48巻，2004年2月
- [5] 加藤 顕・石井 弘明・榎木 勉・大澤 晃・小林 達明・梅木 清・佐々木 剛・松栄 恵吾：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 Vol.96(2014) pp.168-181
- [6] 世古口 竜一・石井 将史・吉田 剛・高橋 孝和：航空レーザデータを用いた河道内樹木の3次元分布評価手法の検討，日本写真測量学会平成26年度年次講演会発表論文集 pp.25-26
- [7] 国土地理院：航空レーザ測量，2016年3月10日アクセス確認，http://www1.gsi.go.jp/geowww/Laser_HP/senmon.html
- [8] 田子 彰大：航空レーザスキャナ計測による波形記録情報を用いた森林構造の把握に関する検討，長岡技術科学大学 平成25年度修士論文
- [9] 気象庁：過去の気象データ，2016年3月10日アクセス確認，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [10] 国土交通省：水門水質データベース，2016年3月10日アクセス確認，<http://www1.river.go.jp/>
- [11] 沖 一雄・上田 哲也・稲村 實：リモートセンシングによる植生環境評価のための計測シミュレーション，日本リモートセンシング学会誌 Vol.20(2000) No.3 pp.94-102