

# 森林を対象とした航空レーザ計測のための レーザ照射シミュレーションの基礎研究

小暮 利雄（株式会社パスコ）

## 1. はじめに

航空レーザ計測は、大規模な土砂災害発生時の基礎資料となる高精度かつ高密度な標高データの作成や災害発生時の地形変化の抽出などに活用されている。標高データの安定した精度を確保するためには、レーザの照射が地表面に均一な密度で到達することが望ましい。しかし、傾斜が急な複雑な地形で、かつ、樹木が繁茂している地域では、レーザの照射が地表面まで到達できずに、均一な計測が大変難しい。実際の計測では、到達するレーザの点密度を高めるために、コース間のラップ率、往復観測、地形に沿ったコンターフライト等の撮影時の工夫が行われている。一方、レーザ計測の研究では、平田らが航空レーザス

キャナによる森林計測とその動向<sup>1)</sup>をまとめ、樹種の違いにより、レーザの地表面への到達率が明らかになってきた。そこで、森林に関する情報（森林計画図・森林簿）が入手できれば、その情報から、最適な計測計画を作成することができると考えられる。

本研究では、傾斜が急な複雑な地形で、かつ、樹木が繁茂している地域をレーザ計測のために、最適な撮影計画を自動的に作成することを最終目標として、まず、樹種及び樹齢ごとに、地表面へのレーザの到達率を推定する。また、その有効性を確認するために、実際の航空レーザ計測の結果と比較検証する。

## 2. 研究方法

### 2.1 樹種及び樹齢ごとの地表面のレーザの到達率の算出方法

図1は、地表面のレーザの到達率の算出のフローである。本研究では、東京大学生産技術研究所で開発されたLiDARシミュレーションシステム<sup>2)</sup>を利用する。

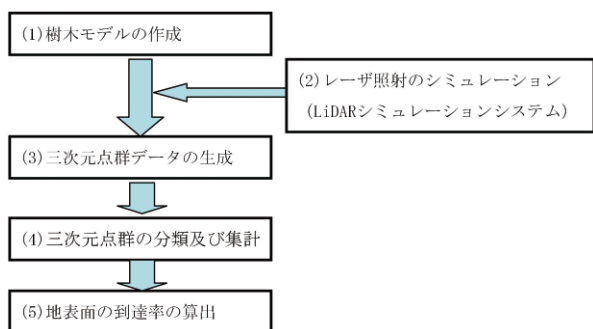


図1 地表面のレーザの到達率の算出フロー

### (1) 樹木モデルの作成

樹木モデルは、樹木作成ソフトウェア

(Nat FX: バイオナティックス社製)を用いて、植物成長モデル理論に基づいて三次元樹木ポリゴンを生成する。ソフトウェアでは、スギやヒノキなどの樹種、樹齢及び季節が入力パラメーターである。本研究では、針葉樹(スギ)、常緑広葉

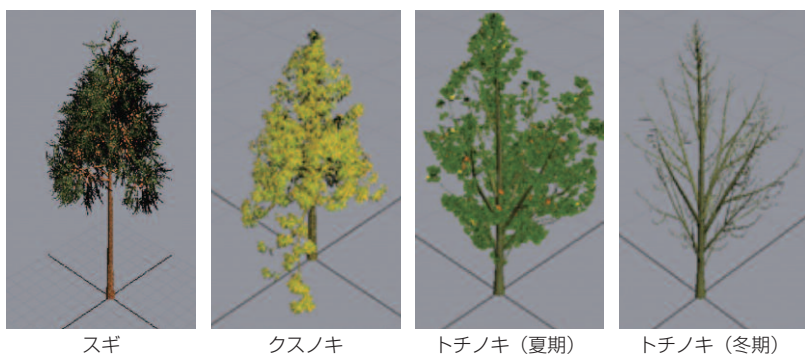
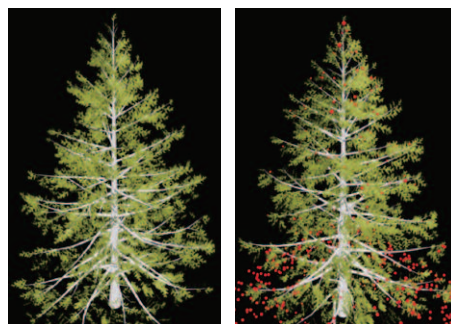


図2 樹木モデルの作成事例(スギ、クスノキ、トチノキ)



(A) レーザ照射前 (B) レーザ照射後  
図3 レーザ照射のシミュレーション結果

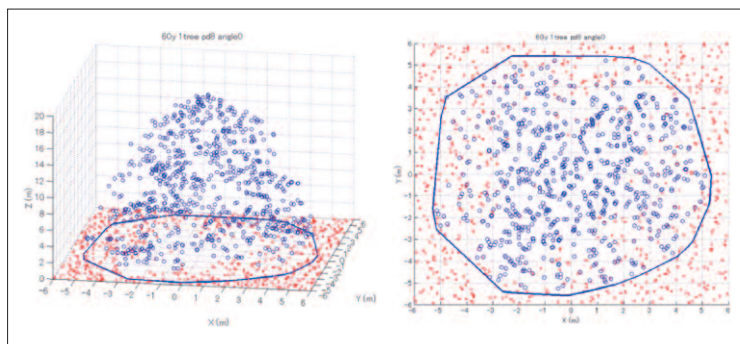


図4 三次元点群データの生成結果

樹（クスノキ）、落葉広葉樹（クスノキ）の3種の樹木に対して、樹齢を10年、25年、35年、45年とした。また、落葉広葉樹は、夏季と冬季の2時期を設定した。図2に樹木モデルの一例を示す。

## (2) レーザ照射のシミュレーション

レーザ照射のシミュレーションでは、LiDAR シミュレーションシステムを利用した。本システムは、三次元樹木ポリゴンに対して、レーザを照射し、レーザパルスが反射した箇所の三次元の座標を求めるものである。照射したレーザパルスが、三次元樹木ポリゴンの葉、枝及び地表面に到達する状況を視覚的に確認することができる。また、LiDAR シミュレーションシステムのレーザの照射は、航空レーザ計測と同様に、レーザ発射数、照射角度、フットプリントサイズなどの計測諸元を任意に変更できる。

本研究では、照射したレーザは、4パルスのリターンパルスを検知し、パルス間の検知距離を3mとした。また、レーザの照射角度は、樹木モデルの真上からとして、フットプリントサイズを20cmに設定した。さらに、計測密度を1㎡あたり1、2、4、8点の4ケースを実施した。

図3には、レーザ照射のシミュレーション結果を示す。図3(A)は、レーザ照射前の三次元樹木ポリゴンであり、図3(B)は、

前述の設定でレーザを照射した結果である。赤色で表示した点群は、レーザ照射が三次元樹木ポリゴン上にかかった点である。

## (3) 三次元点群データの生成

三次元点群データは、レーザ照射のシミュレーション結果から三次元樹木ポリゴンを取り除くことで生成される。図4は、三次元点群データの生成結果の一例を示す。

青色で表示した点は、樹冠表面及び樹木の内部（葉、枝、幹等）で反射した点であり赤色で表示した点は、地面に到達した点である。また、青色のポリゴンは、樹冠の範囲を示す。

## (4) 三次元点群の分類及び集計

三次元点群データの地表面への到達率を求めるために、次のように、分類及び集計を行った。

- ・まず、樹木モデルの中心から0.5mピッチの同心円を作成する。
- ・次に、同心円ごとに地表面に到達した点群、地表面に到達していない点群を分類する。
- ・同心円ごとに、レーザ照射数、地表面に到達した点群の数、地表面に到達していない点群の数を集計する。

図5には、同心円と三次元点群の関係を示す。樹木モデルの中心からの同心円は、色

を変えて表示し、その上に、地表面の到達していない点を緑色の点で、地表面に到達した点群を赤色の点で表示した。

(5) 地表面の到達率の算出

(4) の結果をもとに、式 (1) に従って到達率を計算する。

$$a = u \div p \cdots (1)$$

$a$  : 地表面の到達率

$u$  : 0.5m の同心円内の地表面に到達した点群の数

$p$  : 0.5m の同心円内のレーザの照射数

2.2 検証用の航空レーザ計測データの地表面の到達率の算出方法

樹木モデルからの地表面への到達率の有効性を確認するために、実際の航空レーザの結果と比較検証する。航空レーザの到達率の算出は、2.1 項に示す方法と同様である。図 6 に

具体的なフローを示す。まず、航空レーザ計測と同時に捉えた画像及びレーザ計測データの高さをもとに、樹木の中心を視覚判読により検出する。検出した位置が樹木の中心であることを、三次元表示で確認する。次に、樹木の中心から 0.5m ピッチの同心円を作成する。同心円ごとに航空レーザの三次元点群の分類及び集計を行い、地表面への到達率を計算する。

3. 検証用の航空レーザ計測の撮影及び諸元

航空レーザ計測は、2006 年 8 月に山形県最上町を対象に実施した。山形県最上町の位置の概略図を図 7 に示す。また、レーザ計測の撮影諸元を表 1 に示す。フットプリントは 20 cm で、パルス密度は 1㎡あたり 4 点で計測した。これは、レーザ照射のシミュレーションの設定条件と同じである。また、同時期の森林計画図及び森林簿の情報を入手した。

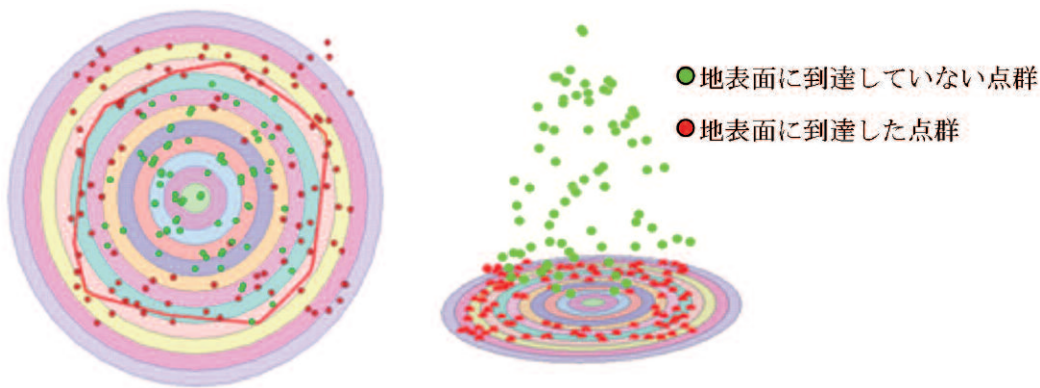


図 5 同心円と三次元点群の関係

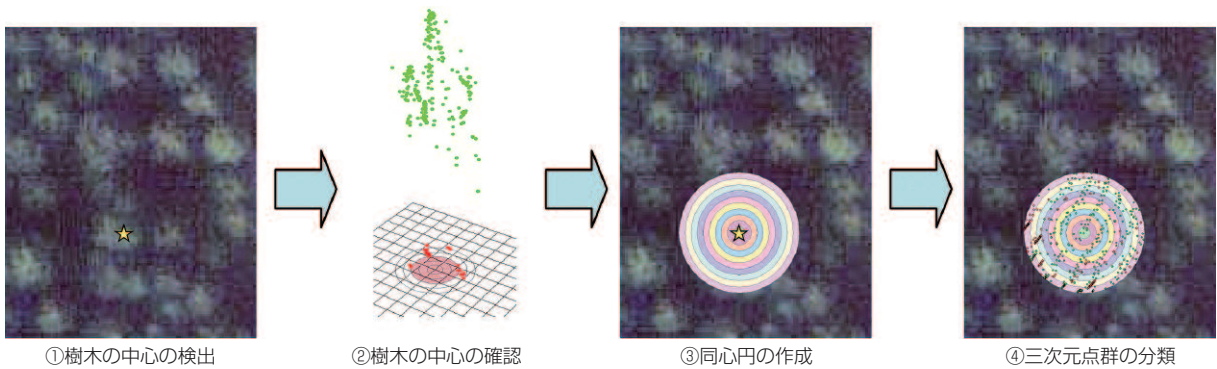


図 6 航空レーザ計測データの地表面の到達率の算出フロー

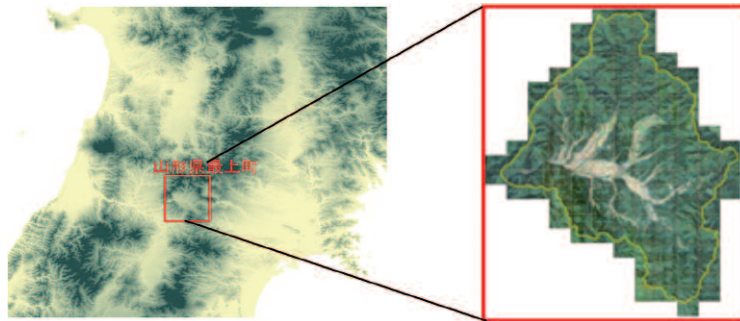


図 7 山形県最上町の位置の概略図

表 1 レーザ計測の撮影諸元

|            |                 |
|------------|-----------------|
| 調査日        | 2006年8月3日～9月21日 |
| 調査地域       | 山形県最上町          |
| 対地高度       | 1550m           |
| 対地速度       | 204km/h         |
| FOV        | 19 度            |
| スキャンレート    | 39.4Hz          |
| パルスレート     | 54,500Hz        |
| ラップ率       | 52%             |
| フットプリントサイズ | 20cm            |

表 2 針葉樹（スギ樹齢 35 年）のレーザ到達率

| レーザ照射密度       | 1㎡あたり 1 点 |         |          |      | 1㎡あたり 2 点 |         |          |      | 1㎡あたり 4 点 |         |          |      | 1㎡あたり 8 点 |         |          |      |
|---------------|-----------|---------|----------|------|-----------|---------|----------|------|-----------|---------|----------|------|-----------|---------|----------|------|
| 樹木の中心からの距離(m) | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  |
| 0.0           | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 0         | 0       | 0        | 0.0% |
| 0.5           | 3         | 3       | 0        | 0.0% | 4         | 5       | 0        | 0.0% | 12        | 16      | 0        | 0.0% | 23        | 33      | 0        | 0.0% |
| 1.0           | 3         | 3       | 0        | 0.0% | 6         | 7       | 0        | 0.0% | 16        | 20      | 0        | 0.0% | 27        | 39      | 0        | 0.0% |
| 1.5           | 6         | 7       | 0        | 0.0% | 14        | 18      | 0        | 0.0% | 29        | 40      | 0        | 0.0% | 59        | 86      | 0        | 0.0% |
| 2.0           | 13        | 20      | 0        | 0.0% | 23        | 31      | 0        | 0.0% | 54        | 76      | 0        | 0.0% | 103       | 149     | 0        | 0.0% |
| 2.5           | 18        | 27      | 0        | 0.0% | 44        | 57      | 1        | 2.3% | 73        | 105     | 1        | 1.4% | 156       | 221     | 2        | 1.3% |
| 3.0           | 30        | 41      | 2        | 6.7% | 58        | 76      | 3        | 5.2% | 115       | 160     | 5        | 4.3% | 228       | 316     | 10       | 4.4% |
| 3.5           | 39        | 52      | 2        | 5.1% | 80        | 109     | 4        | 5.0% | 157       | 206     | 11       | 7.0% | 320       | 437     | 21       | 6.6% |
| 4.0           | 49        | 62      | 4        | 8.2% | 102       | 137     | 6        | 5.9% | 204       | 272     | 13       | 6.4% | 409       | 551     | 25       | 6.1% |
| 平均到達率         | 6.6%      |         |          |      |           |         |          |      |           |         |          |      |           |         |          |      |

## 4. 研究結果及び検証

### 4.1 樹種及び樹齢ごとの地表面のレーザの到達率の結果

LiDAR シミュレーションシステムを用いて、樹種及び樹齢ごとの地表面へのレーザの到達率を算出した結果を整理した。ここでは、針葉樹の代表としてスギの樹齢 35 年、及び、常緑広葉樹の代表としてクスノキの樹齢 35 年の結果を示す。また、樹種、樹齢によるレーザの到達率の違いをまとめた。次に、検証用の航空レーザ計測の地表面への到達率を算出した結果を示し、シミュレーション結果との比較を考察した。

#### (1) 針葉樹（スギ樹齢 35 年）のレーザ到達率

表 2 は、スギ樹齢 35 年の樹木モデルに 1㎡あたり 1、2、4、8 点の密度で計測した場合のレーザ到達率をシミュレーションした結果である。また、図 8 は、樹木の中心から距離に対する到達率をグラフ化したものである。樹

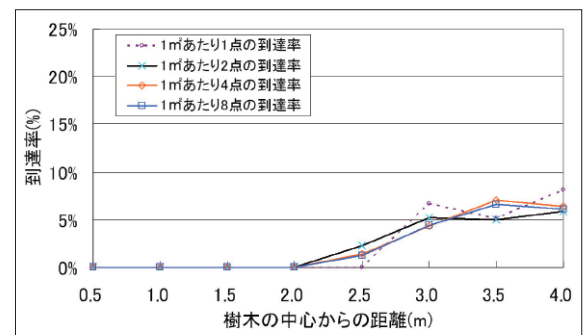


図 8 針葉樹（スギ樹齢 35 年）のレーザ到達率

木の中心から 2m 以内では、レーザ照射密度を上げて計測しても、レーザが地表面に到達していない。一方、樹木の中心から 2m 以上離れるに従ってレーザが地表面に到達していることが分る。樹冠内全体の到達率は、5.9～8.2%で、平均 6.6%となっており、レーザ照射密度を変えても、到達率はさほど変わらない。

#### (2) 常緑広葉樹（クスノキ樹齢 35 年）のレーザ到達率

表 3 は、クスノキ樹齢 35 年の樹木モデルに

表 3 常緑広葉樹（クスノキ樹齢 35 年）のレーザ到達率

| レーザ照射密度       | 1㎡あたり 1 点 |         |          |      | 1㎡あたり 2 点 |         |          |      | 1㎡あたり 4 点 |         |          |      | 1㎡あたり 8 点 |         |          |      |
|---------------|-----------|---------|----------|------|-----------|---------|----------|------|-----------|---------|----------|------|-----------|---------|----------|------|
| 樹木の中心からの距離(m) | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数     | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  |
| 0.0           | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 0         | 0       | 0        | 0.0% |
| 0.5           | 0         | 0       | 0        | 0.0% | 1         | 1       | 0        | 0.0% | 3         | 3       | 0        | 0.0% | 8         | 8       | 0        | 0.0% |
| 1.0           | 4         | 5       | 0        | 0.0% | 7         | 8       | 0        | 0.0% | 11        | 12      | 0        | 0.0% | 28        | 30      | 0        | 0.0% |
| 1.5           | 8         | 9       | 0        | 0.0% | 12        | 15      | 0        | 0.0% | 32        | 35      | 0        | 0.0% | 56        | 68      | 0        | 0.0% |
| 2.0           | 13        | 17      | 0        | 0.0% | 26        | 30      | 0        | 0.0% | 49        | 55      | 0        | 0.0% | 104       | 129     | 0        | 0.0% |
| 2.5           | 20        | 26      | 0        | 0.0% | 40        | 50      | 1        | 2.5% | 77        | 93      | 0        | 0.0% | 156       | 196     | 1        | 0.6% |
| 3.0           | 31        | 38      | 0        | 0.0% | 59        | 69      | 1        | 1.7% | 114       | 135     | 0        | 0.0% | 225       | 271     | 1        | 0.4% |
| 3.5           | 38        | 48      | 0        | 0.0% | 75        | 89      | 1        | 1.3% | 153       | 177     | 1        | 0.7% | 307       | 366     | 2        | 0.7% |
| 4.0           | 50        | 61      | 1        | 2.0% | 96        | 113     | 2        | 2.1% | 207       | 233     | 4        | 1.9% | 408       | 469     | 9        | 2.2% |
| 平均到達率         | 2.1%      |         |          |      |           |         |          |      |           |         |          |      |           |         |          |      |

1㎡あたり 1、2、4、8 点の密度で計測した場合のレーザ到達率をシミュレーションした結果である。また、図 9 は、樹木からの中心から距離に対する到達率をグラフ化したものである。樹木の中心から 2m 以内では、スギと同様にレーザ照射密度を上げて計測しても、レーザが地表面へ到達していない。また、樹木の中心から 2m 以上離れてもスギほど地表面に到達していない。樹冠内全体の到達率は、1.9～2.2%で、平均 2.1%となっており、レーザが地表面に到達しにくい傾向にある。

### (3) シミュレーション結果のまとめ

表 4 は、樹種、樹齢によるレーザの平均到達率の結果である。また、樹齢 35 年の樹種の三次元点群の分類結果を図 10 に示す。

以上の結果より、下記のようなことが言える。

- 1) 針葉樹（スギ）の樹齢 35 年、45 年では、レーザ到達率が低い。また、常緑広葉樹（クスノキ）の樹齢 25 年、35 年、45 年も同じである。
- 2) 針葉樹（スギ）と常緑広葉樹（クスノキ）は、樹冠の中心部分は、全く地表面にレーザが到達していない。樹冠の端では、常緑広葉樹（クスノキ）より針葉樹（スギ）はレーザ到達率が高くなっている。
- 3) 落葉広葉樹（トチノキ）は、樹齢に依

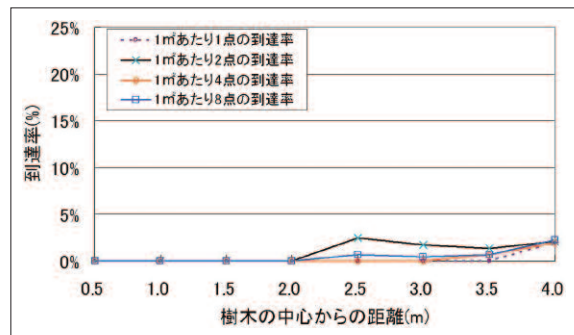


図 9 常緑広葉樹（クスノキ樹齢 35 年）のレーザ到達率

表 4 樹種、樹齢によるレーザの平均到達率

| 樹種区分：樹種（樹齢）          | レーザ到達率(%) | 樹木の中心からの距離(m) |
|----------------------|-----------|---------------|
| 針葉樹：スギ（10 年）         | 14.7      | 2.5           |
| 針葉樹：スギ（25 年）         | 22.3      | 3.5           |
| 針葉樹：スギ（35 年）         | 6.6       | 4.0           |
| 針葉樹：スギ（45 年）         | 7.6       | 4.5           |
| 常緑広葉樹：クスノキ（10 年）     | 15.3      | 1.5           |
| 常緑広葉樹：クスノキ（25 年）     | 2.7       | 3.0           |
| 常緑広葉樹：クスノキ（35 年）     | 2.1       | 4.0           |
| 常緑広葉樹：クスノキ（45 年）     | 2.6       | 5.0           |
| 落葉広葉樹（夏季）：トチノキ（10 年） | 15.3      | 1.0           |
| 落葉広葉樹（夏季）：トチノキ（25 年） | 14.8      | 3.0           |
| 落葉広葉樹（夏季）：トチノキ（35 年） | 17.1      | 4.0           |
| 落葉広葉樹（夏季）：トチノキ（45 年） | 15.7      | 5.0           |
| 落葉広葉樹（冬季）：トチノキ（10 年） | 90.9      | 1.0           |
| 落葉広葉樹（冬季）：トチノキ（25 年） | 77.7      | 3.0           |
| 落葉広葉樹（冬季）：トチノキ（35 年） | 71.9      | 4.0           |
| 落葉広葉樹（冬季）：トチノキ（45 年） | 78.4      | 5.0           |

- 存することがなく、夏季の場合レーザ到達率は 15%から 17%程度である。また、樹冠内は、他の樹木に比べて、レーザが地表面に均一に到達している。
- 4) 落葉広葉樹（トチノキ）は、夏季より冬季が葉による影響が小さく、レーザ到達率が高い。

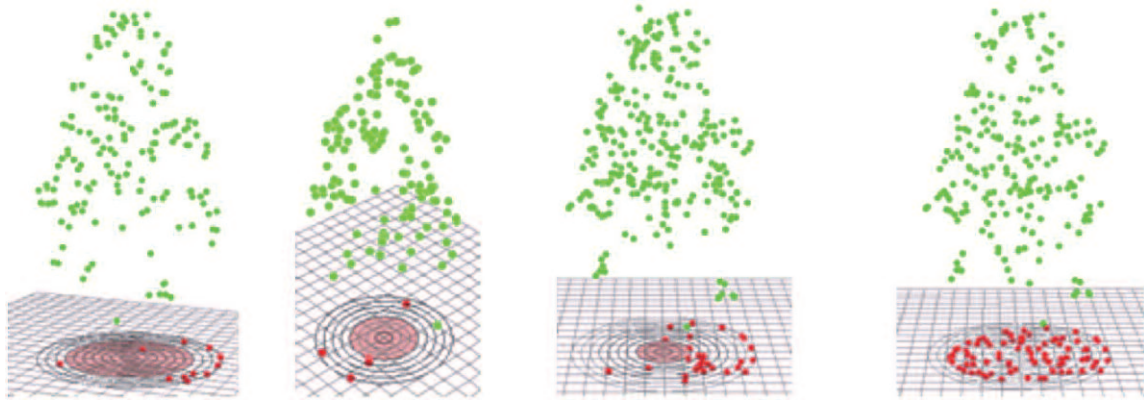


図 10 三次元点群の分類結果

表 5 針葉樹（スギ樹齢 35 年）のレーザ到達率

| 調査樹木       | No.1  |         |          |      | No.2  |         |          |      | No.3  |         |          |      | No.4  |         |          |      | No.5  |         |          |      |
|------------|-------|---------|----------|------|-------|---------|----------|------|-------|---------|----------|------|-------|---------|----------|------|-------|---------|----------|------|
| 樹木の中心からの距離 | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  |
| 0.0        | 0     | 0       | 0        | 0.0% | 0     | 0       | 0        | 0.0% | 0     | 0       | 0        | 0.0% | 0     | 0       | 0        | 0.0% | 0     | 0       | 0        | 0.0% |
| 0.5        | 5     | 5       | 0        | 0.0% | 22    | 22      | 0        | 0.0% | 11    | 11      | 0        | 0.0% | 9     | 9       | 0        | 0.0% | 6     | 6       | 0        | 0.0% |
| 1.0        | 12    | 74      | 0        | 0.0% | 42    | 237     | 0        | 0.0% | 34    | 210     | 0        | 0.0% | 33    | 209     | 0        | 0.0% | 25    | 161     | 0        | 0.0% |
| 1.5        | 25    | 25      | 0        | 0.0% | 95    | 95      | 1        | 1.1% | 70    | 70      | 0        | 0.0% | 72    | 73      | 5        | 6.9% | 59    | 60      | 0        | 0.0% |
| 2.0        | 48    | 48      | 2        | 4.2% | 165   | 161     | 6        | 3.6% | 128   | 136     | 2        | 1.6% | 122   | 128     | 9        | 7.4% | 109   | 109     | 3        | 2.8% |
| 2.5        | 72    | 74      | 5        | 6.9% | 245   | 237     | 13       | 5.3% | 194   | 210     | 8        | 4.1% | 203   | 209     | 16       | 7.9% | 164   | 161     | 7        | 4.3% |
| 平均到達率      | 5.7%  |         |          |      |       |         |          |      |       |         |          |      |       |         |          |      |       |         |          |      |

5) 針葉樹（スギ）や常緑広葉樹（クスノキ）では、地表面へのレーザの到達パルス数を高めるには、レーザの照射密度を上げる。

#### 4.2 航空レーザ計測の地表面の到達率

実際の航空レーザ計測データを用いて、樹種及び樹齢ごとの地表面のレーザの到達率を算出した結果を整理した。ここでは、スギの樹齢 35 年、及び、広葉樹（夏季）の結果を示す。

##### (1) 針葉樹（スギ樹齢 35 年）のレーザ到達率

レーザ到達率は、森林簿をもとにスギ樹齢 35 年の樹木を 5 本抽出し、樹木の中心から地表面の到達パルス数を求めた。樹木ごとの結果を表 5 に示す。また、樹木の中心から距離に対する到達率のグラフを図 11 に示す。樹木の中心から 1m 以内では、レーザが地表面へ到達していない。一方、樹木の中心から 1m 以上離れるに従って、レーザが地表面に到達し

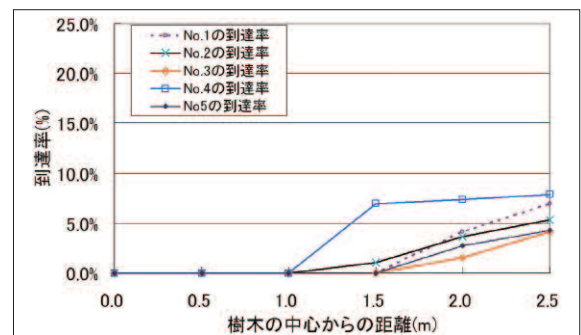


図 11 針葉樹（スギ樹齢 35 年）のレーザ到達率

ている。樹冠内全体の到達率は、4.1～7.9%で、平均 5.7%となった。

##### (2) 広葉樹（夏季）のレーザ到達率

レーザ到達率は、航空レーザ計測と同時に撮影した航空写真画像から常緑広葉樹（クスノキ樹齢 35 年）と樹冠の大きさが同規模な広葉樹を 5 本抽出し、樹木の中心から地表面の到達パルス数を求めた。広葉樹の樹種、樹齢は、森林簿や航空写真画像から判別できないため、抽出した樹木は、広葉樹（夏季）とし

表 6 広葉樹（夏季）のレーザ到達率

| 調査樹木       | No.1  |         |          |      | No.2  |         |          |      | No.3  |         |          |       | No.4  |         |          |       | No.5  |         |          |       |
|------------|-------|---------|----------|------|-------|---------|----------|------|-------|---------|----------|-------|-------|---------|----------|-------|-------|---------|----------|-------|
| 樹木の中心からの距離 | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率  | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率   | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率   | パルス総数 | 樹木での反射数 | 地表到達パルス数 | 到達率   |
| 0.0        | 0     | 0       | 0        | 0.0% | 0     | 0       | 0        | 0.0% | 0     | 0       | 0        | 0.0%  | 0     | 0       | 0        | 0.0%  | 0     | 0       | 0        | 0.0%  |
| 0.5        | 3     | 3       | 0        | 0.0% | 2     | 2       | 0        | 0.0% | 5     | 5       | 0        | 0.0%  | 2     | 2       | 0        | 0.0%  | 3     | 3       | 0        | 0.0%  |
| 1.0        | 9     | 9       | 0        | 0.0% | 6     | 6       | 0        | 0.0% | 11    | 11      | 0        | 0.0%  | 5     | 5       | 0        | 0.0%  | 8     | 8       | 0        | 0.0%  |
| 1.5        | 19    | 19      | 0        | 0.0% | 14    | 18      | 0        | 0.0% | 25    | 28      | 0        | 0.0%  | 18    | 18      | 0        | 0.0%  | 22    | 23      | 0        | 0.0%  |
| 2.0        | 38    | 39      | 0        | 0.0% | 27    | 32      | 0        | 0.0% | 60    | 65      | 0        | 0.0%  | 27    | 27      | 0        | 0.0%  | 40    | 41      | 0        | 0.0%  |
| 2.5        | 54    | 57      | 0        | 0.0% | 40    | 50      | 0        | 0.0% | 80    | 91      | 8        | 10.0% | 42    | 42      | 2        | 4.8%  | 62    | 69      | 1        | 1.6%  |
| 3.0        | 80    | 89      | 1        | 1.3% | 61    | 71      | 0        | 0.0% | 160   | 187     | 16       | 10.0% | 65    | 66      | 6        | 9.2%  | 96    | 105     | 3        | 3.1%  |
| 3.5        | 111   | 127     | 2        | 1.8% | 80    | 92      | 1        | 1.3% | 264   | 303     | 27       | 10.2% | 85    | 86      | 12       | 14.1% | 129   | 145     | 7        | 5.4%  |
| 4.0        | 140   | 160     | 4        | 2.9% | 107   | 120     | 4        | 3.7% | 361   | 415     | 39       | 10.8% | 108   | 111     | 20       | 18.5% | 166   | 181     | 23       | 13.9% |
| 平均到達率      | 10.0% |         |          |      |       |         |          |      |       |         |          |       |       |         |          |       |       |         |          |       |

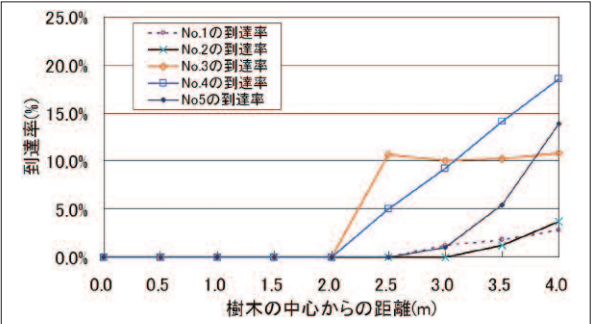


図 12 広葉樹（夏季）のレーザ到達率

表 7 航空レーザ計測の到達率

|              | レーザ到達率(%) | 樹木の中心からの距離(m) |
|--------------|-----------|---------------|
| 針葉樹：スギ（25 年） | 23.2      | 1.5           |
| 針葉樹：スギ（35 年） | 5.7       | 2.5           |
| 針葉樹：スギ（45 年） | 5.7       | 3.0           |
| 広葉樹（夏季）      | 10.0      | 4.0           |

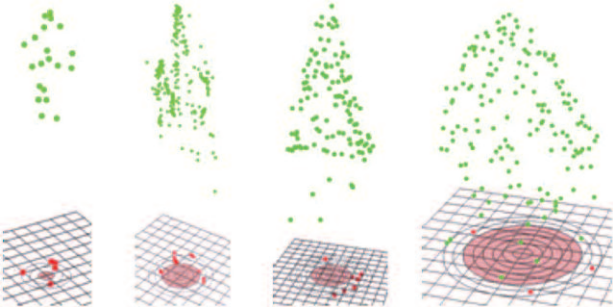


図 13 三次元点群の分類結果

表 8 シミュレーション結果とレーザ計測データを比較

| 計測分類     | 樹種           | レーザ到達率(%) | 樹木の中心からの距離(m) | 到着率の精度 |
|----------|--------------|-----------|---------------|--------|
| シミュレーション | 針葉樹：スギ（25 年） | 22.6      | 3.5           | 1.01   |
| レーザ計測    | 針葉樹：スギ（25 年） | 22.3      | 1.5           |        |
| シミュレーション | 針葉樹：スギ（35 年） | 6.6       | 4.0           | 1.16   |
| レーザ計測    | 針葉樹：スギ（35 年） | 5.7       | 2.5           |        |
| シミュレーション | 針葉樹：スギ（45 年） | 7.6       | 4.5           | 1.10   |
| レーザ計測    | 針葉樹：スギ（45 年） | 5.7       | 3.0           |        |
| シミュレーション | 広葉樹（夏季）      | 9.2       | 4.0           | 0.92   |
| レーザ計測    | 広葉樹（夏季）      | 10.0      | 4.0           |        |

た。広葉樹（撮影時期：夏季）のレーザ到達率は、表 6 に示す。また、樹木からの中心から距離に対する到達率のグラフを図 12 に示す。樹木の中心から 2m 以内では、レーザが地表面へ到達していない。一方、樹木の中心から 2m 以上離れるに従ってレーザ到達率が高くなる。樹冠内全体の到達率は、2.9～18.5%で、平均 10.0%となっており、調査した樹木によりレーザが地表面の到達率が大きく異なっている。

### （3）航空レーザ計測結果のまとめ

航空レーザ計測では、樹齢 25 年、35 年、45 年のスギ、及び、広葉樹のレーザ到達率の結果を表 7 に整理した。また、三次元点群の分類結果を図 13 に示す。

### 4.3 検証

レーザ到達率は、シミュレーション結果とレーザ計測データを比較し検証した。比較の対象は、樹齢 25、35、45 年のスギ、及び、広葉樹（夏季）である。広葉樹（夏季）のレーザ到達率は、樹齢 25、35、45 年のクスノキとトチノキ（夏季）のシミュレーション結果の平均値を用いた。レーザ到達率の比較表は、表 8 に示す。表 8（右段）の到達率の精度は、レーザ計測データに対してシミュレーションの到達率の比率を求めたものである。

- 1) 針葉樹(スギ)では、樹冠の大きさは異なるが、樹冠内の到達率は、1.0~1.2倍で、概ね同じような傾向を示している。
  - 2) 広葉樹(夏季)では、樹齢25年、35年、45年のクスノキとトチノキ(夏季)の平均値と比較したが、レーザの到達率は、0.9倍で、概ね同じ結果になった。
- 以上より、単木でのレーザ照射シミュレーションの有効性は確認できた。

## 5. まとめ

本研究では、傾斜が急な複雑な地形で、かつ、樹木が繁茂している地域のレーザ計測のために、最適な撮影計画を自動的に作成することを最終目標として、まず、樹種及び樹齢ごとに、地表面へのレーザの到達率を推定した。また、その有効性を確認するために、実際の航空レーザ計測の結果と比較検証した。

樹木モデルを用いたレーザ照射のシミュレーションでは、樹種及び樹齢ごとに、地表面のレーザの到達率を推定することができた。また、航空機レーザ計測データとの比較では、概ね同じ傾向を示した。

以上の結果より、複雑な地形で、かつ、樹木が繁茂している地域のレーザ計測のためには、事前に樹種、樹齢を把握することで、計測条件を設定するのに役に立つ可能性が見え

てきた。

今後、本研究で得た単木に対するシミュレーションをもとに、森林の立地の条件、例えば、傾斜角度、樹間等をパラメーターとしたシミュレーションの開発を行う予定である。

(発表日：2010年6月1日)

## ■謝辞

本研究を進めるにあたって、評価に使用した航空レーザ計測データ等は、山形県最上町よりご提供いただきました。また、東京大学の沢田研究室に大変お世話になりました。記して謝意の意を表します。

## ■参考文献

- 1) 平田泰雅、航空機レーザースキャナーによる森林計測とその動向、森林計画誌 VOL.41,NO.1、(pp.1-12)、2007
- 2) 遠藤貴宏、沢田治雄、森林計測のための LiDAR シミュレーションシステムの開発、生産研究 VOL. 62, NO.4、(pp.445-448)、2010

小暮 利雄 (こぐれ としお)  
株式会社パスコ 研究開発センター  
E-mail : teorsu8478@pasco.co.jp

