

平成 25 年度 課程博士学位請求論文

LIDAR データを用いた丘陵地における  
微地形と植生の関係評価手法に関する研究

立正大学大学院地球環境科学研究科

環境システム学専攻

平春

# Abstract

The objective of this study is to develop the information to be provided for natural regeneration by investigating the relationship between Micro-Landform and vegetation in hilly area of Higashi-matsuyama City in Saitama Pref. The Micro-Landform was classified based on the conversion line of the slope angle derived from DEM (digital elevation model) generated from LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging). Furthermore, we summarized the classification situation of each Micro-Landform by every tree measurement. Finally, the relationship between vegetation and Micro-Landform in the study area was detected by analyzing the relationship between the summarized situation of Micro-Landform and the woody life type corresponding to the Micro-Landform classification using TWINSpan.

(1) In chapter one, the background, orientation, objection, previous studies and characteristics of this research were described. This research is designed to obtain the direction of the subject of natural regeneration.

(2) In chapter two, the characteristics of the study area and the data used in this study were described. We summarized the topographic conditions and vegetation conditions of the study area and performed field survey for the area that not undergoing vegetation management in Iwadono Forest Park. The LIDAR data and radio control helicopter aerial photography that used as research data were also demonstrated.

(3) In chapter three, the accuracy assessment of LIDAR data was performed. In order to derive the DEM data from LIDAR data, the laser pulse data was filtered, and the laser pulse that regarded as ground surface was then extracted to interpolate. Based on the filtering algorithm proposed by Kraus, while taking the individual features of target data into consideration, we used the Quad-Tree method to utilize the final hierarchical data model that generated by dividing the satisfied grid into quarters repeatedly. The error between the measured elevation data and filtering results was calculated, which has a good agreement

with accuracy assessed area.

(4) In chapter four, we investigated the possibility of applying the radio control helicopter aerial photography for analyzing vegetation and terrain as well as assessed the accuracy. We examined the relationship between the degree of the sky opening of the forest and the spatial distribution of the laser pulse LIDAR data for both the area under Weeding work and the area that not under Weeding work as a corresponding to vegetation management activities. The degree of sky opening of the forest was calculated by using the classification result of forest crown and between the crown from aerial photographs of radio control helicopter. The result shows that, in the managed area, much more last pulse are reflected from the space between crowns, which has a low average error by comparing with field measured data. However, there was a contrary result in the area without management. Based on the distance between the laser pulse and ground surface, we create a distribution map of tree height. Then by investigating spatial distribution of the laser pulse and its permeability, the vertical distribution of the forest was obtained.

(5) In chapter five, the Micro-Landform classification was performed based on topographical survey, field observation, and geological and soil survey. Field observation is to observe the position of particular converted point and the shape of plane at a slope as well as the condition of collapsed terrain. Topographical survey is to capture the conversion point at a slope by using the reference points that used to validate the accuracy of the LIDAR data filtering by the tool of TS. Soil survey is to investigate the change of Micro-Landform at a slope due to different soil layers, because the water erosion could cause thickness of accumulated sediment often change. According to the result, the local Micro-Landform could be classified as Lower sideslope, Crestslope, Upper sideslope, Headhollow and lower sideslope.

(6) In chapter six, The Micro-Landform was classified by using conversion line of the inclination angle from DEM generated from LIDAR data. This result was compared with the Micro-Landform classified by the field measurement data, and the result indicated that

two classification data were consistent with high accuracy.

(7) In chapter seven, the life type of the trees in hilly area was investigated by summarizing the situation of the Micro-Landform classification after measurement of every tree in the study area. Finally, the relationship between vegetation type and Micro-Landform in the study area was revealed by analyzing the relationship between the Micro-Landform classified in this study and woody life type corresponds to the Micro-Landform classification using TWINSpan.

(8) In chapter eight, summary of the main results.

## 要旨

本論文は、埼玉県東松山市に位置する岩殿丘陵を対象とし、丘陵地における微地形と植生の関係を評価し、自然再生に供する情報を推定することを目的とした。微地形の区分には LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging) から生成した DEM を使用した。この DEM から傾斜角の変換線を抽出し、微地形の区分を行った。対象地域における毎木調査を行い、微地形区分に対応する木本植生生活型との関係を解析し、対象地域研究地域の植生と微地形の関係の評価手法につき検討した。

本論文は 8 章から構成される。

1 章では研究背景と位置づけ、研究目的、既往の研究、及び研究特徴について述べた。すなわち、自然再生という課題に注目し、微地形と植生の関係を評価することよりその方向性を把握することである。

2 章では研究対象地域の特徴、使用データについて述べた。対象地域の地形概況と植生概況をまとめた。研究調査地は、比企丘陵自然公園に位置する下草刈り管理を行っている場所としていない場所、二つの小流域で設置した。研究使用データである LIDAR データとラジコンヘリデータについて簡単な説明をした。

3 章では、ラジコンヘリにより撮影した空中写真を使用して、LIDAR データの植生と地形解析に応用する可能性、精度などを検討した。植生管理に応じて分別された下草刈り作業を行っている場所としていない場所で、LIDAR データのレーザーパルスの空間分布と森林の開空度との関係を調べた。森林の開空度はラジコンヘリによる空中写真より樹冠と樹冠の間と分類した結果を使用した。この結果、管理されている場所では樹冠の間から反射するラストパルスが多く、現地測量データと比較した平均誤差が低い。管理されていない場所ではこの結果が逆だった。また、レーザーパルスの地表面からの距離より樹高分布図を作成し、そのレーザーパルスの空間分布を調べ、その透過性から森林の垂直分布状況を把握できた。

4 章では、LIDAR データにより DEM を作成し、現地測量データと比較しその精度を検証した。レーザーパルスデータをフィルタリング処理し、地表面と考えられるレーザーパルスを抽出し、それを補間し DEM

を作成した。フィルタリング処理手法は、Kraus らが開発したフィルタリングアルゴリズムに基づき、四分木 (Quad-Tree) 法を用いて、解析対象データの局部特徴を配慮しながら、一定な条件を満たす格子に限り、該当格子を繰返し四等分割し、最終的に階層的なデータモデルを利用した。フィルタリング結果を現地測量による標高データとの誤差を計算し、その精度を検証したところよく一致した。

5 章では、現地観察と地形測量、地質調査と土壌調査手法により微地形分類を行った。現地観測には斜面の特等的な傾斜変換点や平面の形状 (凹凸型) などの位置と崩壊地形の状態を調査した。地形測量には、トータルステーションを使用し、LIDAR データのフィルタリング精度検証に使用した基準点を利用して、斜面の傾斜変換点を捉え測量を行った。土壌調査では、水の浸食作用で運ばれる堆積物の厚さが変わり、それより斜面微地形の土壌層が違うためその変換を調査した。この結果現地の微地形を頂部斜面、上部谷壁斜面、谷頭凹地、下部谷壁斜面などに区分できた。

6 章では、LIDAR データのフィルタリング処理より作成した DEM を利用し、斜面微地形分類を行った。この DEM より傾斜角を計算し、断面図を作成し、断面上の傾斜の変換点を抽出した。その傾斜変換点をつなげ、傾斜変換線を作成し、斜面微地形の分類を行った。また、現地測量による微地形分類図を比較し、LIDAR DEM による分類した微地形分類図の精度を検討した結果、よく一致した。

7 章では、研究地域における植生と地形の関係評価を行った。まず、研究地域における毎木調査を行い、樹種、DBH、樹木の位置、樹高を測定した。次に、樹種と樹木の位置情報を利用し、その対応の地形条件を調べ、微地形ごとに分類した。そのあと、各樹種の植生生活型を調べ、TWINSpan (Two-Way Indicator Species Analysis) を用いて微地形と樹木植生生活型の関係性を評価し、研究地域における植生と微地形の関係を明らかにした。

8 章では、本論文における成果をまとめた。

# 目次

Abstract.....	i
要旨 .....	iv
第 1 章 序論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 自然再生の必要性.....	1
1.1.2 植生と地形 .....	2
1.2 研究目的と特徴.....	3
1.3 研究方法 .....	4
1.4 本論文の構成 .....	5
第 2 章 研究対象地域の概況 .....	7
2.1 対象地域 .....	7
2.1.1 地形概況 .....	7
2.1.2 地質概況 .....	9
2.1.3 植生概況 .....	11
第 3 章 LIDAR データの空間分布特性と精度検証 .....	13
3.1 既往の研究 .....	13
3.2 使用データ .....	15
3.2.1 LIDAR データ .....	15
3.2.2 ラジコンヘリによる空中写真 .....	17
3.2.3 現地測量データ .....	19
3.2.4 その他のデータ .....	25
3.3 LIDAR データの空間分布特性と透過性を解析手法 .....	26
3.3.1 LIDAR データの空間分布特性 .....	26
3.3.2 空中写真による樹冠と樹冠間の解析 .....	27
3.3.3 LIDAR データの透過性の検討 .....	28
3.3.4 LIDAR データの精度検討.....	29
3.4 LIDAR データの空間分布特性と透過性.....	29
3.4.1 LIDAR データの空間分布特性 .....	29
3.4.2 樹冠と樹冠間の解析結果 .....	37

3.4.3 LIDAR データの透過性の検討 .....	39
3.4.4 LIDAR データの精度評価 .....	39
3.6 考察とまとめ .....	42
第 4 章 LIDAR データのフィルタリングと精度検証 .....	45
4.1 LIDAR データのフィルタリング .....	45
4.1.1 フィルタリング処理の必要性 .....	45
4.1.2 既往の研究 .....	46
4.2 フィルタリング方法と精度検証 .....	47
4.2.1 フィルタリング方法 .....	47
4.2.2 フィルタリング処理の精度検証 .....	51
4.3 フィルタリング処理と精度検証結果 .....	52
4.3.1 フィルタリング処理の結果 .....	52
4.3.2 フィルタリング精度評価結果 .....	56
4.3 考察とまとめ .....	59
第 5 章 現地測量による微地形分類 .....	60
5.1 丘陵地の自然環境 .....	60
5.1.1 丘陵地の自然環境 .....	60
5.1.2 丘陵地の地形分類 .....	60
5.2 微地形分類方法 .....	64
5.2.1 現地測量 .....	64
5.2.2 土壌調査 .....	66
5.3 微地形分類結果 .....	67
5.3.1 微地形分類結果 .....	67
5.3.2 土壌調査結果 .....	69
5.4 考察とまとめ .....	70
第 6 章 LIDAR データによる微地形分類 .....	72
6.1 既往の研究 .....	72
6.2 LIDAR データによる微地形分類方法 .....	73
6.2.1 条件検索方法による微地形分類 .....	73
6.2.2 断面図の解析による微地形分類 .....	74
6.3 LIDAR データによる微地形分類結果 .....	76
6.3.1 条件検索方法による微地形分類結果 .....	76
6.3.2 断面図解析による微地形分類結果 .....	76
6.4 考察とまとめ .....	78

6.4.1 条件検索方法の考察 .....	78
6.4.2 現地測量による微地形分類結果との比較 .....	78
6.4.3 LIDAR DEM による地形表現と地形図との比較 .....	80
6.4.4 まとめ .....	80
第 7 章 微地形と植生の関係解析 .....	82
7.1 既往の研究 .....	82
7.2 微地形と植生の関係評価方法 .....	82
7.2.1 植生調査 .....	82
7.2.2 植生生活型の分類 .....	83
7.2.3 微地形と植生の関係解析 .....	85
7.3 微地形と植生の関係評価結果 .....	87
7.3.1 植生調査結果 .....	87
7.3.3 微地形と植生の関係解析 .....	89
7.4 考察とまとめ .....	93
第 8 章 結論 .....	95
謝辞 .....	97
参考文献 .....	98

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 自然再生の必要性

人間が行ってきた自然の再生産能力を超えた自然資源の過度な利用などの行為により，自然環境の悪化が進んできた。その結果，生物多様性は減少し，人間生存の基盤である有限な自然環境が損なわれ，生態系は衰弱している。自然に対する人為の働きかけによって維持されてきた里地里山等における二次的な自然環境の質も，生活・生産様式の変化，人口の減少など，社会経済の変化に伴い，その働きかけが縮小撤退することにより変化している。このように，直接間接を問わず，様々な人間活動，人為の影響等によって，自然海岸や干潟，湿原などが減少しているほか，人工林や二次林の手入れ不足，耕作放棄地の拡大等により，日本の生態系の質の劣化が進んでおり，身近な野生生物の絶滅のおそれが高まるなど，自然環境は大きく変化している。

このような過去に損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すことを目的とした自然再生推進法が，平成 15 年 1 月 1 日より施行されている。この法律では，生物多様性の保全にとって重要な役割を担うものであり，行政機関，地域住民，NPO，専門家など様々な方の参加により行われ，河川，湿原，干潟，藻場，里山，里地，森林，サンゴ礁などの自然環境を保全，再生，創出，又は維持管理することを求めている（環境省，2003）。この自然再生事業は都市公園・緑地事業，河川事業，港湾事業等の所管事業を通じて，湿地の再生，蛇行河川の復元，干潟・藻場の保全・再生，樹林地や里山の保全・再生など様々な自然再生に関する取組を地域の多様な主体の参画を得て進めている（国土交通省，2003）。

この場所のほとんどが二次的自然であり，人間の手より本来の生態系が変わっている。では，自然再生事業ではこの二次的自然を元に戻したらよいのか？現存の状態を保全したほうがよいのか？など方向性を決める必要がある。この問題が二次林管理，里山再生などに関わり，環境を回復するにはどこまで回復すればよいのか？現存植生を残すのか？，潜在植生を取り戻すのかといった点を把握する必要がある。以上の課題には，

現存植生と立地環境の関係を解析し、関係性が高いものを残し、関係性が低いものを計画することにより、生態系の再生と保全の方向性と決める必要がある。

### 1.1.2 植生と地形

現存植生と立地環境の関係解析の一つ目として、現存植生状況を把握するために環境省から自然環境保全基礎調査を実施され全国の1/2.5万の植生図のデータ整備をしている。植生調査においては、作成年度が異なる植生調査情報を比較することで、全国の植生概況の変遷を把握することができている。植生調査結果の集計に当たっては、全国の現存植生図を基準地域メッシュ単位で小円選択法により群落コード化し、全国現存植生図（1 Km<sup>2</sup>メッシュ単位）、主要群落の全国分布図等の作成、植生自然度別の集計等を行っている。ここで「植生自然度」とは、植物社会学的な観点から、群落の自然性がどの程度残されているかを示す一つの指標として導入されるものである。植生自然度は、10ランクに区分されている（環境省，生物多様性調査センター，1998）。しかしながら、自然再生事業では、植生自然度が高い植生を保全し、自然度が低い植生を廃棄し、潜在植生に取り戻した方が良いとは言い難い。そのため、現存の植生調査を行うと伴に、現地の地形をベースとした立地環境の調査を行い、植生と地形の関係を評価する必要がある。この評価より関係が強い種類を保全し、弱い種類を計画することにより、自然再生事業の方向性を決めることが重要である。

現存植生と立地環境の関係解析の二つ目として、立地環境は、地表に起伏があることから導き出され、大きな起伏から生まれる高度差から、植生帯の垂直分布が出現する。起伏があればこそ斜面が現出し、斜面の方位、傾斜の別が生まれ、それらの違いは日射や風あたり、積雪・残雪・土壌水分などの差を生みだし、それぞれ特有の植生が成立される。植生の分布に対する直接的な要因は、気候条件や土壌条件であるが、地形はそれらの条件を生み出す背景であり、植生に対する要因としては間接的条件である。ここでいう地形の起伏は微地形、小地形、亜小地形、あるいはさらに大きい地形スケールの起伏のことを指し、起伏を生み出した地形形成作用が、現に生きている植生に大きな影響を与えている。大きいスケールの植生の分布は気象条件や土壌条件の影響は決定的作用があり、大きいスケールの地形条件に対応しているが、小さいスケールの植

生分布には微地形の作用が大きい。そのため、細かい自然再生事業の計画，里山再生をするには微地形の分類を行い，現地の植生を調べ，地形と植生の関係の評価する必要があると考えられる。

## 1.2 研究目的と特徴

本研究では，自然再生事業，里山再生などに代表される自然と共生する社会を実現する重要な課題に着目し，土地と環境要素の関係を定量的に評価し，土地のもつポテンシャルと環境要素との関係の強さを見積もり，関係が強い要素を保全し，自然再生事業のあり方を決定する必要があるものとする。以上の背景から，本研究では，植生と丘陵地における微地形構造との関係を定量化に評価することを目的とした。微地形について，従来の方法を改良し，最も高精度化するために，LIDAR データを使用した。植生の生活型を調べ，TWINSpan (Two-Way Indicator Species Analysis) を用いて地形と植生の関係の評価する手法を提案し，現地観測結果を踏まえて実証的に検証する。

微地形と植生の関係評価手法に関して，既往の研究では定性的な評価手法が多く，定量的に評価する手法を開発する必要がある。また，既往の方法による微地形は現地観測や空中写真判読より分類していたが，現場に立ち入る事が出来ない，空中写真判読の精度の限界があり，森林の下での地形を見にくいことがある。広い範囲の微地形を把握することや，森林下の地形を計測するために，LIDAR パルスの中でも森林を通り地面から反射するパルスを利用して DEM を作成することでできれば，さらに数値地図から微地形の判読が可能になると考えられる（土支田ほか，2007，大野ほか，2008）。本研究では LIDAR データを利用して丘陵地の微地形を把握する方法を開発し，その精度を検討した。

また，微地形と植生の関係を定量的に評価するため，植生の生活型を調べ，TWINSpan を用いて微地形との関係の評価した。生活形は植物の外部形態を典型的にとらえたものをいう。生物の生理的な機能と外部形態，構造は周囲の環境との長い年月にわたる相互作用のもとにつくりだされたものであるため，生活型は環境条件を反映していると考えられる。

### 1.3 研究方法

本研究の目的と設置した，丘陵地における微地形と植生の関係性を評価することを目指し，既往の研究を調査および考察することで，LIDARデータのフィルタリング処理によりDEMを生成し，さらに微地形の分類を行い，その結果を現地調査による微地形分類結果を比較検討し，植生の生活型との関係性を評価するための方法論と流れを図1-1に提示する。

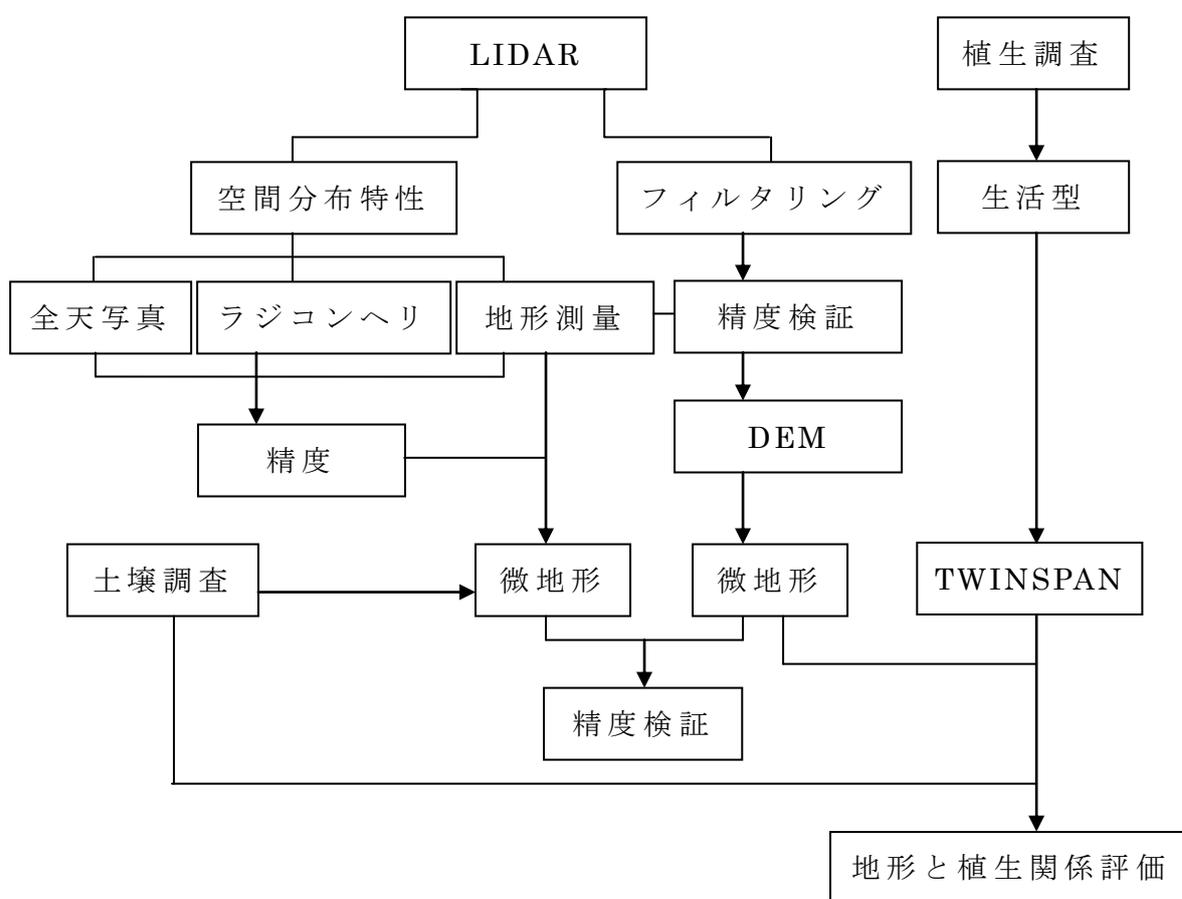


図 1-1 研究フロー

## 1.4 本論文の構成

本論文は本章を含めて全8章から構成される。その構成は1.2で示している研究目的の流れに準拠している。

第1章では本研究の背景，研究目的，本研究の特徴と構成を説明する。

第2章では本研究の対象地域の概況と研究方法を説明する。概況では地形概況，植生概況と植生管理の概況を紹介する。

第3章では，ラジコンヘリ空中写真を使用して，LIDAR データの植生と地形解析に応用する可能性，精度などを検討する。具体的に植生管理に応じて分別された下草刈り作業行っている場所としていない場所で，LIDAR データのレーザーパルスの空間分布と森林の開空度との関係を調べる。ここで森林の開空度はラジコンヘリによる空中写真より樹冠と樹冠の間と分類した結果を使用する。

第4章では LIDAR データのフィルタリング処理の流れとその結果の精度検証を紹介する。まず，フィルタリング処理の既往の研究事例をまとめ，自分のフィルタリング手法を開発し，実現する。次に，その結果を検証するため，トータルステーション（Total Station；以下 TS と称する）を使用し，国家基準点からトラバース測量を行い，対象地域周辺に測量基準点を設置し，地表面標高測量を行う。このデータを使用し LIDAR データのフィルタリング精度を検討する。

第5章では，現地観察と地形測量，地質調査と土壌調査手法における微地形分類手法とその結果を紹介する。現地観測には斜面の特等的な傾斜変換点や平面の形状（凹凸型）などの位置と崩壊地形の状態を調査する。地形測量には，TS を使用して LIDAR データのフィルタリング精度検証に使用した基準点を利用して，斜面の傾斜変換点を捉え測量を行う。土壌調査では，水の浸食作用で運ばれる堆積物の厚さが変わり，それより斜面微地形の土壌層が違うためその変換を調査する。

第6章では，LIDAR データのフィルタリング処理より作成した DEM（以下 LIDAR DEM と称する）を利用し，斜面微地形分類手法とその結果を紹介する。この LIDAR DEM より傾斜角を計算し，断面図を作成し，断面上の傾斜の変換点を抽出し，その傾斜変換点をつなげ，傾斜変換線を作成し，斜面微地形の分類を行う。また，現地第5章で作成した微地形分類図を比較し，LIDAR DEM による分類した微地形分類図の精度を検討する。

第7章では，植生と地形の関係評価を行う。まず，植生調査の結果を

まとめ、植生生活型（詳しい説明は第7章より）を調べる。その結果を利用し、第6章で分類された微地形分類図を使用し、TWINSpan で植生と微地形の関係評価を行う。

第8章では、総括として全体のまとめを行うとともに、今後の課題および展開を述べる。

## 第 2 章 研究対象地域の概況

### 2.1 対象地域

本研究では、埼玉県東松山市岩殿観音付近に位置する比企丘陵自然公園で研究対象地域を設置した。研究対象地域内に植生管理状況が異なる小流域，駐車場に調査地域を設置した。

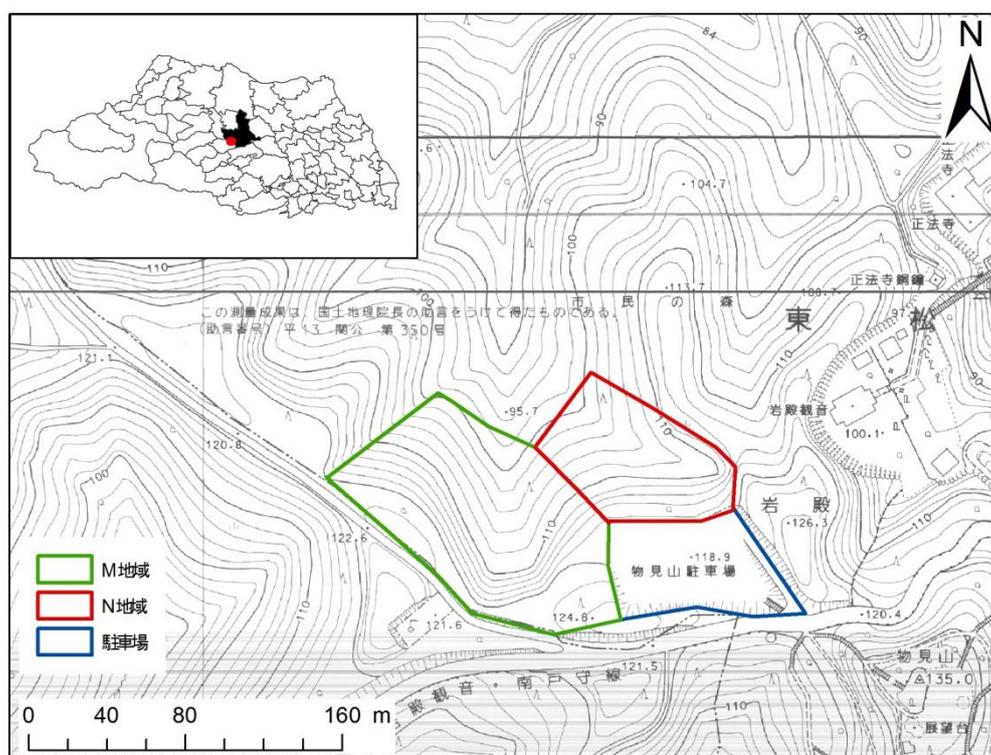


図 2-1 研究対象地域

#### 2.1.1 地形概況

研究対象地域が位置する岩殿丘陵は、埼玉県東松山市の比企郡鳩山町・嵐山町・ときがわ町・入間郡毛呂山町，越生町に広がる丘陵地であり，関東山地東北縁の比企丘陵と接しているため，「比企丘陵」や「比企南丘陵」とも呼ばれる。また最高点に物見山という地名があることから『物見山丘陵』とも呼ばれている（図 2-2）。岩殿丘陵は，南北に荒川の支流である越辺川と都幾川の沖積低地が広がり，東には高坂台地が位置する，東西約 9.5km，南北の約 8km の丘陵地である。その標高は 70

～140m で、同じ埼玉県内でも南に位置する狭山丘陵や加治丘陵と比べると低い（埼玉県農林部林務課，1999）。

調査地は、岩殿丘陵の北東部に位置する、東西に並んだ2つの小流域に設定した。2つの小流域のうち西側に位置する流域では、幅・深さともに約1mの水路が存在し、普段は水流が見られないものの、降雨のあった翌日などには水流が見られる。これに対し、東側の流域は、上流部には水路が存在せず、下流部では、水路は存在するものの西側の流域に比べ浅く、水流はまとまった降水後に見られる程度である。調査地ないには、谷になっているため傾斜が急になっているところが多く、地すべりが起きた形跡なども見られる。

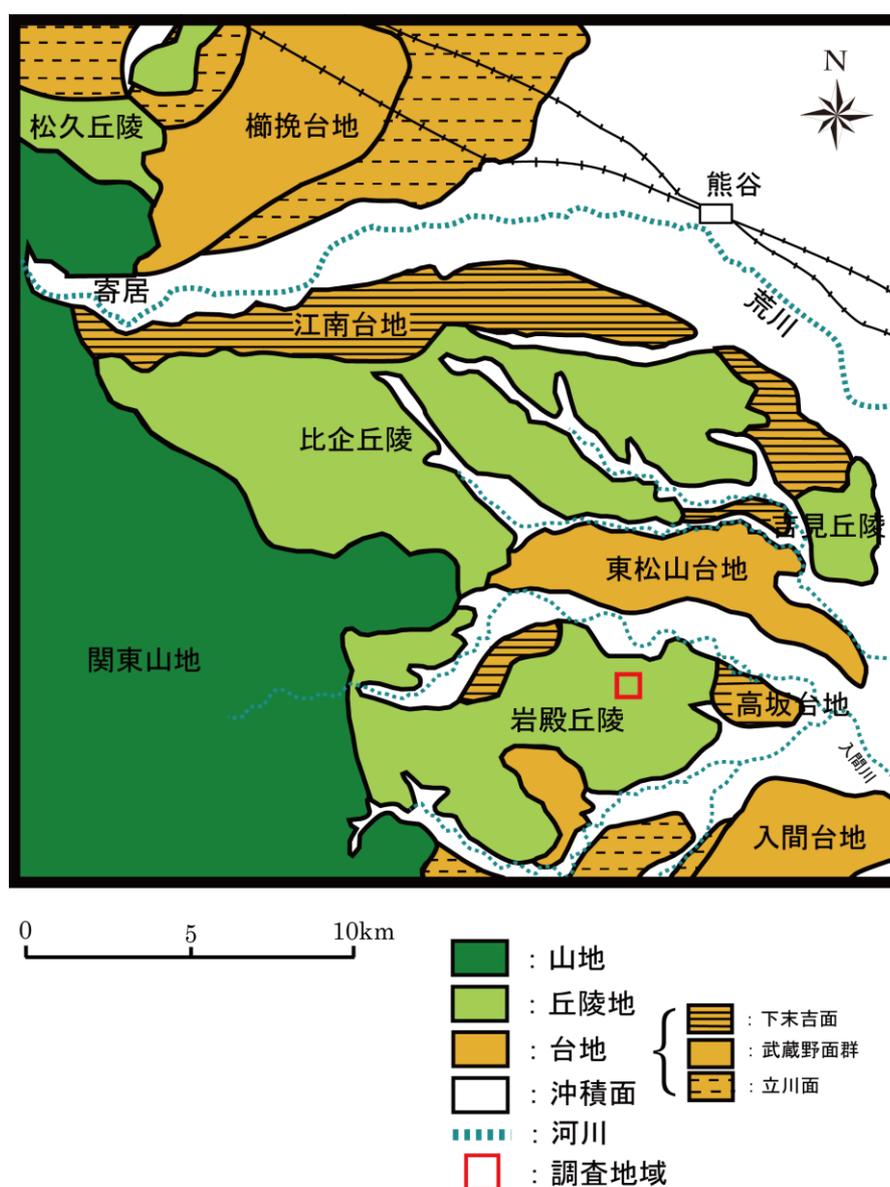


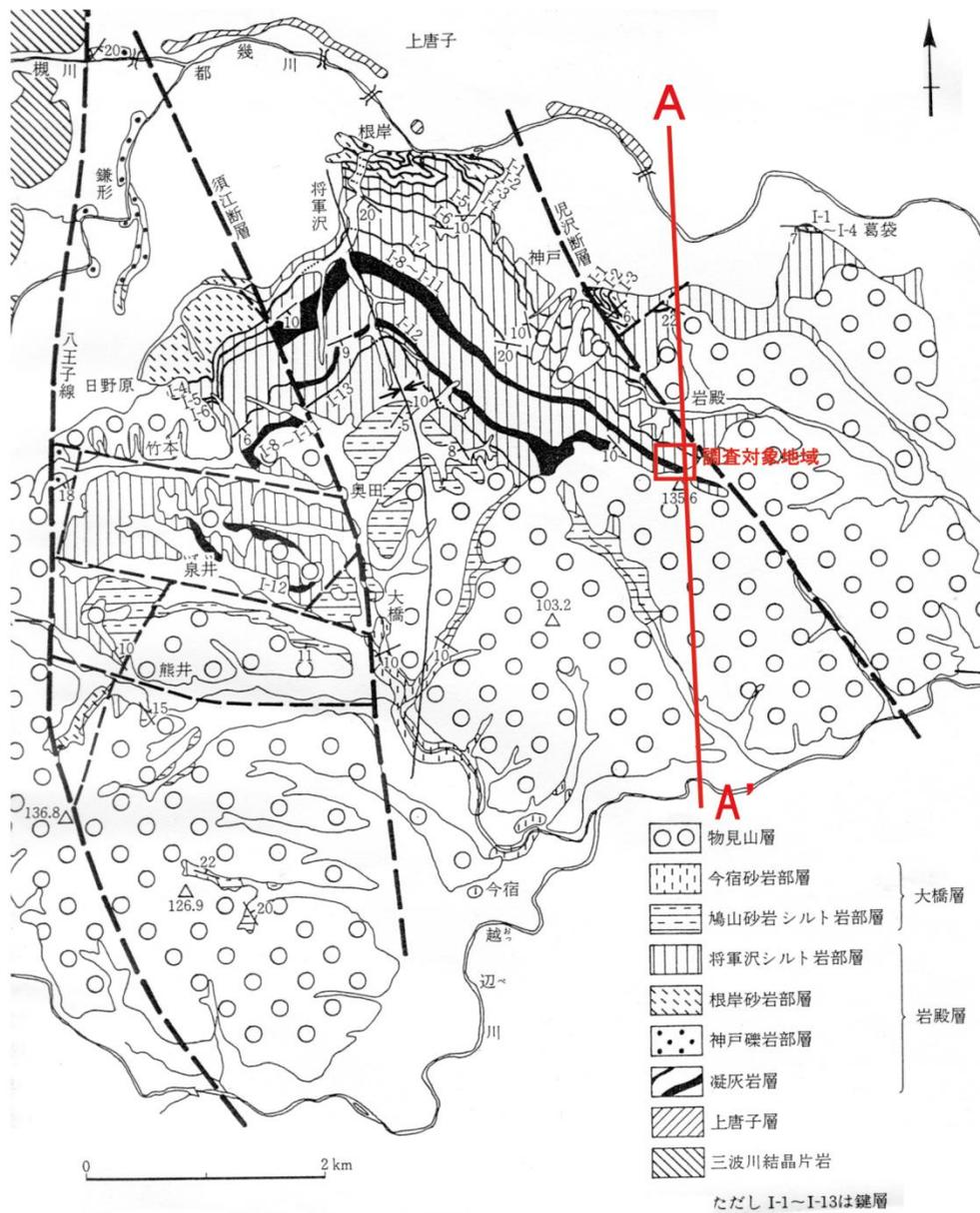
図 2-2 岩殿丘陵周辺の概観（久保，2000）

### 2.1.2 地質概況

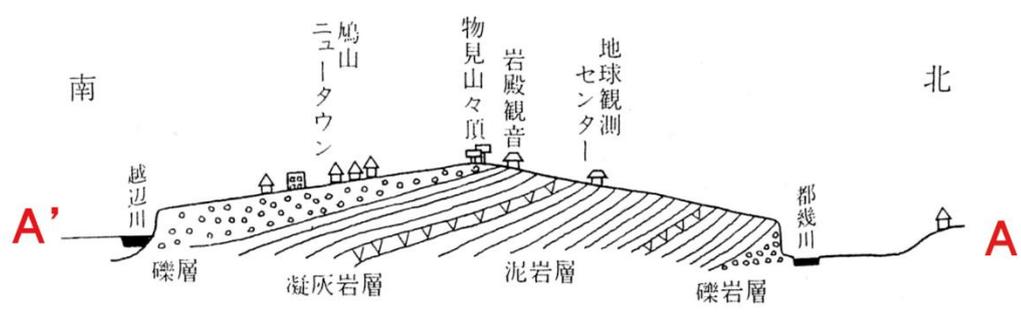
岩殿丘陵では、丘陵地南部の谷間および物見山山頂から北側斜面にかけて、中期中新世（1580万～1100万年前）の地層が分布している。この地層は、礫岩・砂岩の互層を主とする松山層群の鎌形層や凝灰質砂岩を主とする神戸層から構成されている（小池ほか，1985，図2-3）。南側斜面には、層厚50～60cmの礫層（物見山礫層）が分布している（図2-3）。この礫層は、北側斜面に分布する中期中新世の地層を不整合に被っており、前期更新世（75万～175万年前）に扇状地を形成したと考えられる。この礫層に含まれるチャートや砂岩などの礫は、荒川水系起源の亜円～円礫が多く、直径数～10cmで、20cmを超えるものも見られる（西川，1992，埼玉県立自然史博物館，2004）。

また、丘陵の北部に分布する中新統は下位から、上唐子層（シルト岩）、岩殿層の神戸礫岩部層（礫岩，砂質礫岩）、根岸砂岩部層（塊状のシルト質中粒～細粒砂岩）、將軍沢シルト岩部層（塊状砂質シルト岩）、鳩山砂岩・シルト岩部層（中粒～粗粒砂岩とシルト質細粒砂岩～砂質シルト岩の互層）、今宿砂岩部層（中粒～粗粒砂岩）に区分され、上唐子層と神戸礫岩層間のみ不整合の関係にある（小池ほか，1985）。その上位に不整合で物見山礫層が丘陵の南部に分布している。物見山礫層は層厚約50～60m、前～中期更新世頃に堆積した扇状地性の河成礫層であると考えられているが、詳しい堆積年代はわかっていない。物見山礫層の分布は岩殿丘陵に限定され、その層相は亜円～亜角礫のチャート、砂岩、泥岩、緑色岩、閃緑岩などであるが、圧倒的に風化に強いチャートが多く、場所によって礫の風化程度が異なるが平均して半分程がクサリ礫化している（中井ほか，2006）。

本研究の対象地域周辺では將軍沢シルト岩部層と物見山礫層が分布している（図2-4）。將軍沢シルト岩部層は『岩殿観音（巖殿山正法寺）』の裏手の崖にみることができ、2枚の凝灰岩を挟んだ灰緑色のシルト岩層からなる高さ10m程の露頭を観察できる（図2-4）。その上位にある物見山礫層は、物見山山頂より北西方向の物見山駐車場にある高さ4m程の露頭で観察できる。チャートが多く、半分以上くさり礫化しており、円～亜角の礫径平均2～5cm程、礫径最大のものでは30cm程である。



岩殿丘陵の地質図 小池ほか(1985)より



地質断面図 西川(1992)より

図 2-3 研究対象地域周辺の地質概況

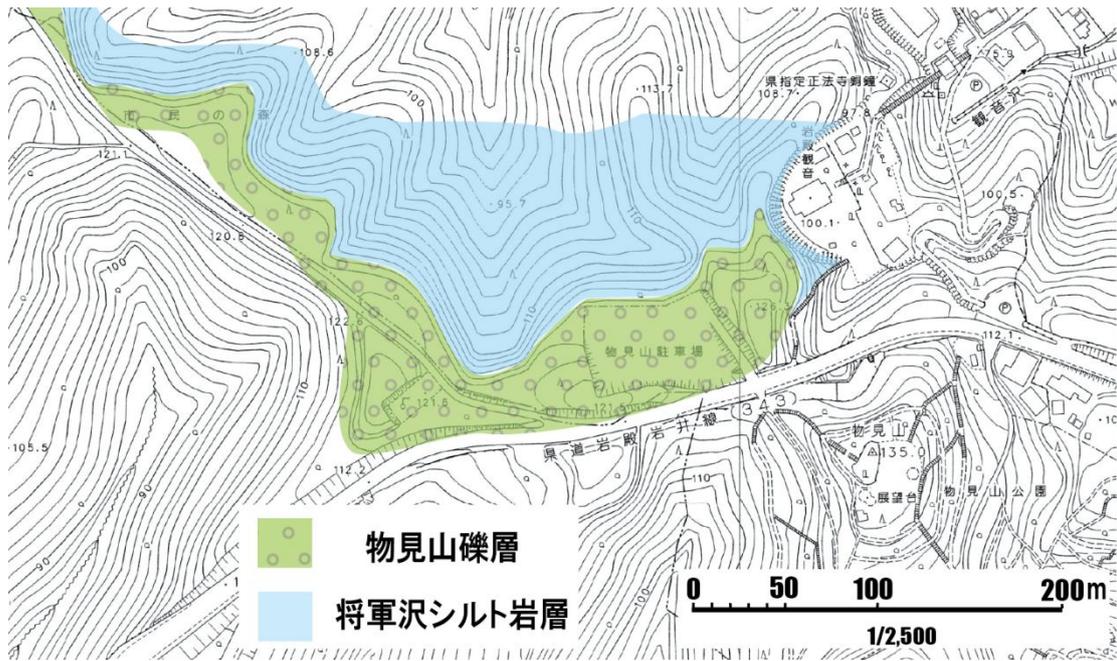


図 2-4 研究対象地域の地質概況（佐藤，2012）

### 2.1.3 植生概況

調査地として選んだ小流域は、アカマツやコナラ、ヤマザクラが主となる二次林であり、両流域の下流部と東側流域の谷頭の上部には、スギが点在している。そのうち、M 地域上流部は、東松山市により「市民の森」として、定期的な管理がなされている範囲内に位置する（図 2-5-a）。

「市民の森」は、東松山市の南西部、鳩山町との市境に位置する公有林で、1986 年（昭和 61 年）に国有林の払い下げにより東松山市が 32ha を買い上げ、管理している。現在、「市民の森」の植生管理については、東松山市は造園業者に委託しており、「市民の森」で行われている植生管理は、主に下草刈りで、樹木については倒木処理を行うのみである。最近は、「市民の森」全体を 6 つのブロックに分け、毎年 1 箇所ずつ下草刈りを行っているが、それ以前からも管理自体は行っていた。また、遊歩道周辺 10m についてのみ、毎年、下草刈りが行われている。下草刈りは、秋に行われており、斜面上部を中心に、林床を一様に刈り取る。

これに対して N 流域では、M 流域のように定期的な管理が行われておらず、常緑低木や背の高いアズマネザサが茂っている。しかし、二次林が成立していることや、萌芽したコナラが見られることから、以前は管理が行われており、その後、放棄されたと思われる（図 2-5-b）。

また、研究対象地域では、宮下（2007）により、植生調査を行っている。この結果によると、M 地域では、定期的な下草刈り作業が行われ、低木層がほとんど形成されていない状態であり、樹木の高さが約 15m 以上の高木層とそれ以下の亜高木から形成された森林構造であると報告されている。N 地域では、定期的な下草刈り管理が行われていないため、高さが約 15m 以上の高木層、8～15m の亜高層、1.5～6m の低木層から形成された森林構造を持っている。



(a) M 地域



(b) N 地域

図 2-5 研究対象地域の林床概況

## 第 3 章 LIDAR データの空間分布特性と精度検証

### 3.1 既往の研究

航空機搭載型のレーザー計測 (LIDAR: Light Detection and Ranging) は、上空からレーザー光線を発射し、地表面との距離を直接測定するもので、航空機の位置と姿勢を GPS と IMU (慣性計測装置) で同時に測定することにより、高精度の地形データを取得する方法である (図 3-1)。反射したレーザーには最初に受信されるファストパルス (First Pulse) と最後に受信されるラストパルス (Last Pulse) があり、森林ではその 2 つが樹冠と地面を示し、森林の階層構造を表示できる (図 3-2)。

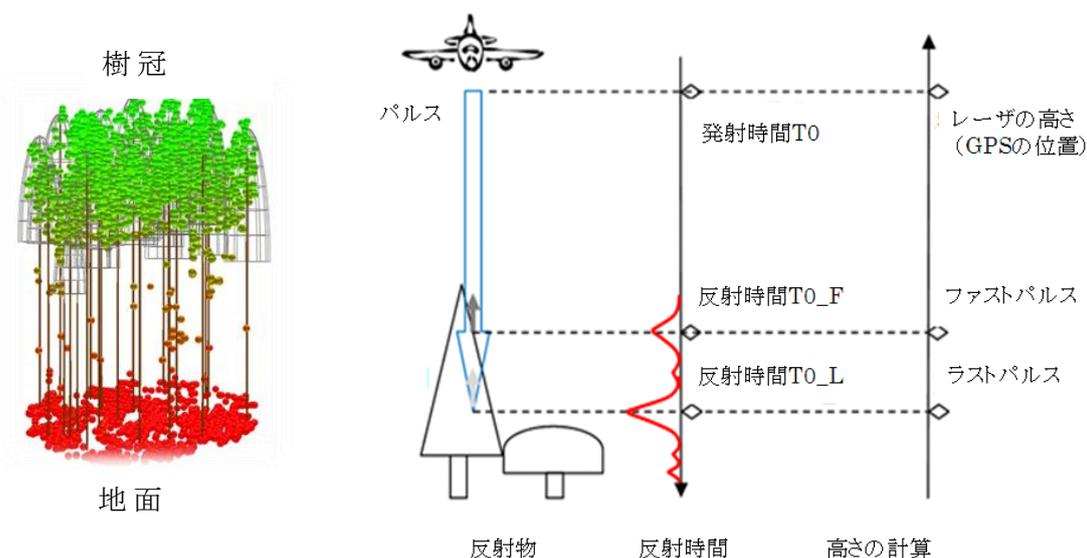


図 3-1 LIDAR 計測システムの説明図

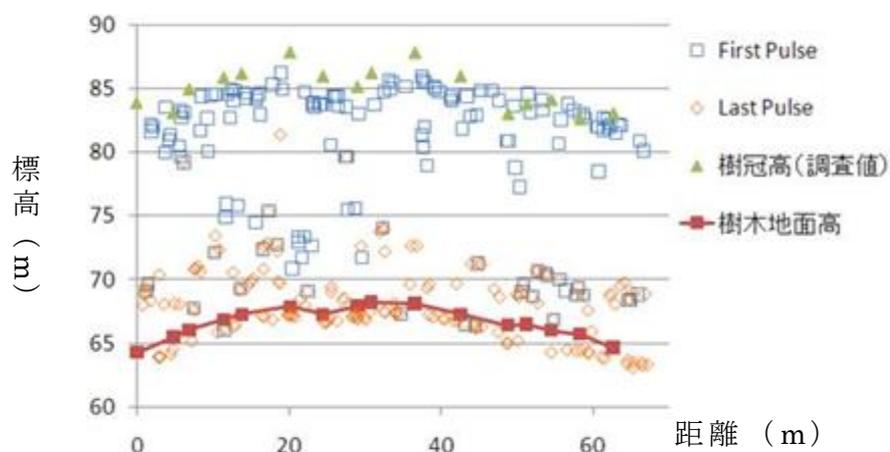


図 3-2 LIDAR データの断面図

この構造により、樹冠部の高さや地面の高さを区別できる。初期反射パルスから作成するもの DSM (Digital Surface Model: 被覆物の表層メッシュデータ) は、樹林地帯では樹冠部の高度分布を意味する。DEM (Digital Elevation Model: 地盤高のメッシュデータ) は、樹木の隙間を通過して地表面に達した最終反射パルスを使用し、さらに人工構造物などの除去処理を加えて作成された地形モデルを作成することができる。これより、LIDAR データは森林計測や地形判読、地形分類研究に多く使用されるようになった。

LIDAR データを用いた森林計測は、森林の三次元構造、毎木位置や高さ、樹冠など単木単位で森林構造のパラメータを取得が可能であると期待されている (瀬戸島ら, 2001; 加藤ら, 2004)。LIDAR データを用いて、樹木の高さを推定する (田村ら, 2000, 蔡ら 2006, Takahashi *et al.* 2005), 樹冠量の推定 (伊藤ら, 2008), 材積・炭素量の推定 (米ら, 2002), 森林バイオマスを計算する (Mariano García *et al.* 2010, R. Nelson *et al.* 2012) など研究が行われている。その LIDAR データの精度については、佐藤ほか (2004) は LIDAR データによる DEM の高さ方向誤差が 1 m 以下であることを確認し、従来の写真測量で得た等高線データと比べて精度が高いことを明らかにした。しかしながら、森林中では LIDAR のパルスが地面に到達しているかどうかにより、LIDAR の精度が変わってくると推定される。

森林構造の計測結果を利用するためには LIDAR の精度を検討する必要がある。森林域での LIDAR の精度は LIDAR パルスの地表面への透過性と大きな関係があると考えられる (平春, 2012, 2013)。本章では、現地測量により得た DEM から LIDAR パルスの距離の分布図を作成し、LIDAR の垂直分布特性を明らかにした。その特性を、ラジコンヘリを用いて、開空度が異なる二つの調査域で LIDAR の透過性と比較した。また、LIDAR データと現地測量データとの誤差を計算し、その精度を検討した。地表面とレーザーパルスの距離の差を樹高とし、樹高の分布図を作成し、管理によって異なる森林垂直分布を調べ、LIDAR データの空間分布から推定される森林構造の状況を把握した。

## 3.2 使用データ

### 3.2.1 LIDAR データ

朝日航洋から提供された LIDAR データを使用した。このデータは、セスナ機搭載型（図 3-3）に搭載された航空レーザースキャナ Laica/ALS50 計測機材（図 3-4）を用いて 2006 年 12 月 25 日に計測された。計画された計測密度の設定は 1 点/4m<sup>2</sup> 以上であり、計測仕様を表 3-1 に示す。

表 3-1 計測仕様

項目	計測仕様
計画計測密度	約 4.0m <sup>2</sup> に一点
実質計測密度	約 1.0m <sup>2</sup> に一点
レーザーパルス頻度	65, 000Hz
スキャン角度	±18 度
スキャン頻度	45Hz
レーザービーム径	0.3mrad（対地高度 1200m 時地上で 40cm 程度）
測定時飛行対地高度	約 1200m（地表面の凹凸による）
測定時飛行速度	252km/h
計測コース間ラップ率	40%
計測コース間隔	180m
測定プラットフォーム	固定翼 セスナ 404 タイタン（JA5257）



図 3-3 計測機器搭載機 (セスナ 404Titan)



図 3-4 計測機器 (Laica/ALS50)

(左上：レーザースキャナ，左下コントローラ，右下：電源・データ収録装置)

### 3.2.2 ラジコンヘリによる空中写真

本研究では、イメージワン会社から提供したラジコンヘリ MD-200 を使用して、2011年8月3日に研究対象地域の空中写真を撮影した(図3-5)。このラジコンヘリは重さ200gのカメラを載せることができ、バッテリー使用時間約20分、電波距離は1Kmであり、撮影ルートをあらかじめプログラムで作成してコントロールすることができる。またリアルタイムで下向きのカメラの映像とカメラ中心点の高さ(GPSによる)をチェックしながら写真を撮ることができる。



図 3-5 本研究で使用したラジコンヘリ

空中写真を撮影するには、物見山駐車場からラジコンヘリを飛ばし図3-6の撮影位置における空中写真を撮影した。その日の観測条件は表3-2の通りである。撮影高さは約100m、地上分解能は2.5cmぐらい、オーバーラップは60%、サイドラップは30%である。同じ地点で2枚の写真撮影し、同時にGPSのタイム、位置情報、方位角などパラメータを記録した(表3-3)。

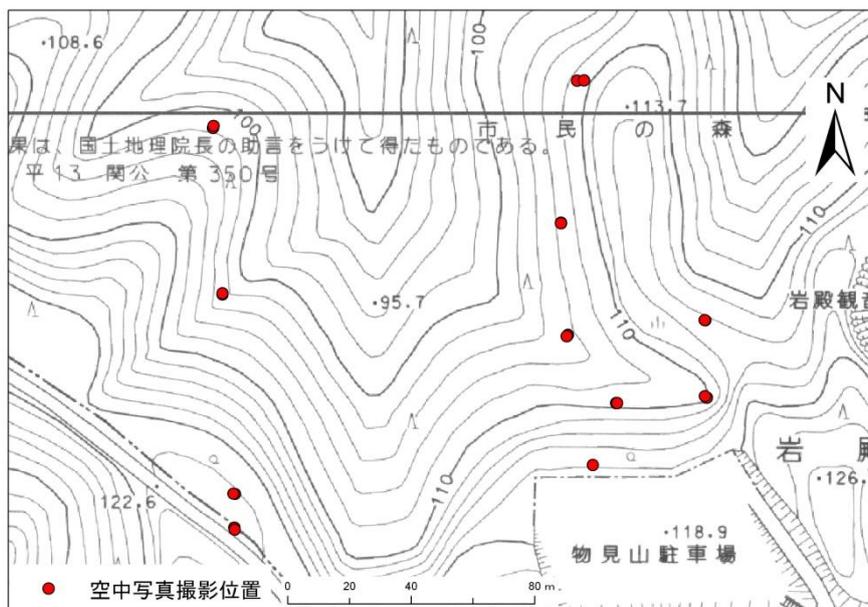


図 3-6 空中写真を撮影した位置

表 3-2 ラジコンヘリの撮影仕様

項目	仕様	項目	仕様
写真縮尺	5882.35	横方向の実距離 (m)	76.47
カメラの焦点距離	1.7	縦方向の実距離 (m)	101.76
飛行高度 (m)	100	撮影面積 (m <sup>2</sup> )	7782.0
地上解像度 (cm)	2.52	ステレオ有効面積 (m <sup>2</sup> )	2178.9
オーバーラップ	60%	論理平面位置 (cm)	2.52
サイドラップ	30%	論理標高 (cm)	8.26
撮影基線長 (m)	30.58	横方向 (cm)	1.30
コース間隔 (m)	71.23	縦方向 (cm)	1.73

表 3-3 空中写真を撮影パラメータ

ID	GPS Time	Timecode	Latitude	Longitude	GPS-A	Height	Roll	Pitch	Yaw	Cam. servo
1	5:23:33	308.22	36.00088	139.3612	300.4	136.1	-14.4	9.5	-131	9.9
2	5:28:08	583.698	36.00069	139.3599	299.6	135.7	6	-0.5	-3.3	23.4
3	5:28:12	587.964	36.00069	139.3599	300.3	137.4	6.1	2.7	-5.2	20.7
4	5:29:42	677.723	36.00079	139.3599	260.3	99.6	4.8	1.6	-4.3	21.6
5	5:29:46	681.461	36.00079	139.3599	260.9	100	6.9	2.9	-4.6	19.8
6	5:30:09	704.724	36.00138	139.3598	259.7	99.3	9	-3.3	-3.5	27
7	5:30:12	707.95	36.00138	139.3598	260.9	100	8.9	5.2	-4.9	18
8	5:30:33	728.212	36.00187	139.3598	259	98.7	10.1	-1.5	-3	24.3
9	5:30:36	731.721	36.00188	139.3598	260.1	99.5	8.7	5.4	-2.9	18
10	5:31:36	791.964	36.00201	139.3611	260.6	99.2	20.6	0.7	-2.7	22.5
11	5:31:41	796.715	36.00202	139.3611	257.7	97.5	8	1.4	-1.8	21.6
12	5:32:28	843.212	36.0016	139.361	258.8	98.2	10	3.9	-2.8	18.9
13	5:32:31	846.957	36.00159	139.361	258.2	97.9	9.3	1.8	-3.5	20.7
14	5:32:53	868.447	36.00127	139.3611	259.7	98.9	8.9	6.4	-3.9	16.2
15	5:32:57	872.951	36.00126	139.3611	259	98.5	10.2	2	-2.7	20.7
16	5:33:23	898.715	36.00107	139.3612	257.5	97.8	7.4	5.8	-2.4	17.1
17	5:33:27	902.218	36.00107	139.3613	258	97.9	7.9	3.2	-1.7	19.8
18	5:34:08	943.225	36.00108	139.3616	259.8	98.2	2.5	-3.1	3.3	26.1
19	5:34:12	947.966	36.00109	139.3616	262.1	100	4	3.9	2.6	18.9
20	5:34:29	964.966	36.00131	139.3616	259.3	98.6	8.2	1	1.4	22.5
21	5:34:33	968.206	36.00131	139.3616	259.3	98.6	7.8	1.6	1.4	21.6

\* 高さは駐車所からの高さ

### 3.2.3 現地測量データ

LIDAR データの精度を検証するために、研究域におけるトータルステーション（以下 TS とする、ニコン制 NST-305Cr, 図 3-7）を使用し、地盤測量を行った。測量するには、物見山に設置している国家三角点（図 3-8, 図 3-9）からトラバース測量を行い、調査域周辺に基準点を設置した（図 3-10）。ここでは、平面直角座標系 JGD2000 第 9 系を使用した。TS を用いて測量する場合、機械を設置する基準点と後視点あるいは北方向が必要である。つまり、精確な位置情報を持っている二つの点が必要である。今回、機械設置用の基準点は国家三角点を利用し、後視点を国家基準点から約 10m の場所で設置し、リアルタイムキネマティック GPS (Real Time Kinematic GPS) を用いて測量した。RTK GPS は Trimble 5700 を使用した。RTK GPS 測量の精度を確かめるため、国家基準点での測量も行った。この測量は 2009 年 7 月 10 日において、二つの点（国家基準点と後視点）で 4 時間ぐらい GPS 受信し（図 3-11）、

そのデータを電子基準点情報（国土地理院）により補正した。国家基準点での RTK 測量結果によると，XYZ 方向の誤差はそれぞれ 0.189m，0.14m，0.713m だった。高さ方向の誤差が大きいため，設置した後視点の Z（標高）を国家基準点からオートレベル（NIKON AS-2）を用いて測量した（図 3-12）。トラバース測量用基準点の座標と研究対象地域周辺に設置した基準点の座標を表 3-3 と 3-4 に示す。

研究対象地域周辺に設置した基準点から TS を用いてランダムで標高測量を行った（図 3-10，約 600 点）。LIDAR 計測システムの高さ方向の誤差を検討するため，物見山駐車所の標高測量を行った。駐車所では山地と違って，傾斜角による発生する高さ方向の誤差は少ないため，LIDAR 計測システムの誤差を検討する。



図 3-7 NTS-305Cr



図 3-8 国家三角点（物見山・石坂）

20万分の1地勢図名	東京
5万分の1地勢図名	川越
成果区分	世界測地系(測地成果2011)
北緯	36°00'00".4290
東経	139°21'45".8623
標高(m)	134.96
ジオイド高(m)	40.56
アンテナ高(m)	
平面直角座標系(番号)	9
平面直角座標(X)(m)	115.635
平面直角座標(Y)(m)	-42426.314
真北方向角(計算値)	0°16'35".80
縮尺係数(計算値)	0.999922
作業内容	改算(パラメータによる)
作業年月日	20111031

図 3-9 国家基準点の情報

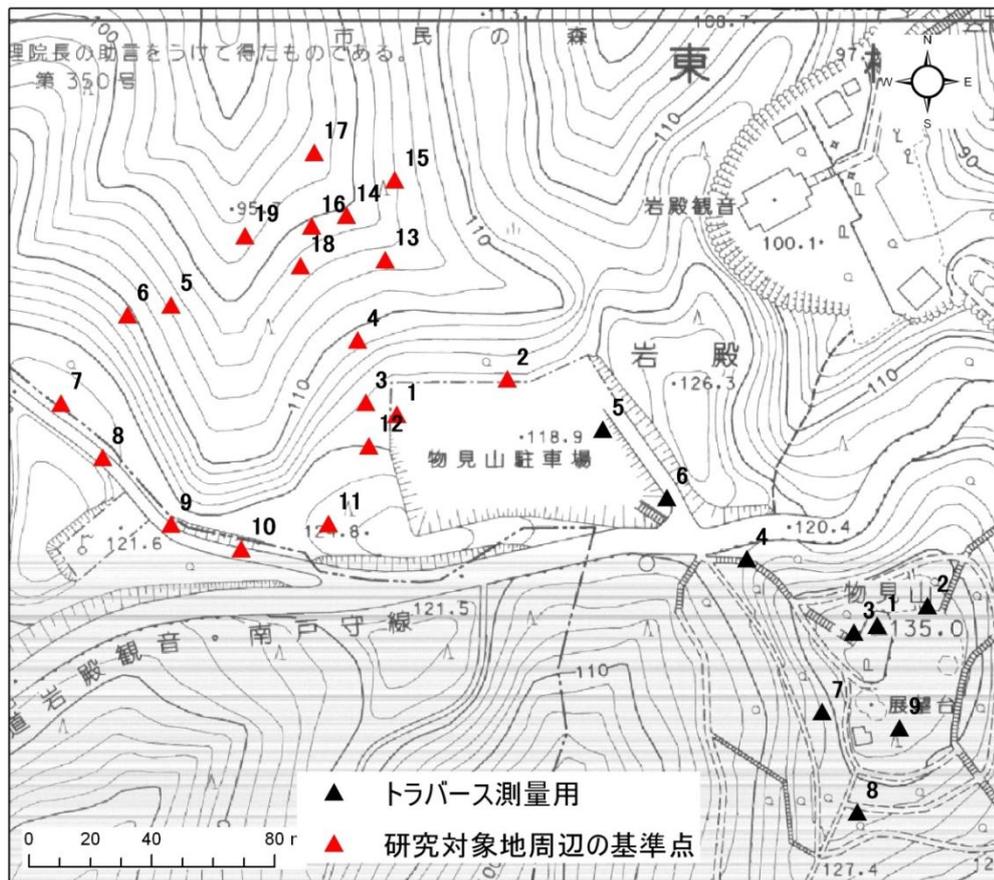


図 3-10 研究対象地域に設置した基準点



図 3-11 RTK GPS 測量（左：国家基準点，右：後視点）

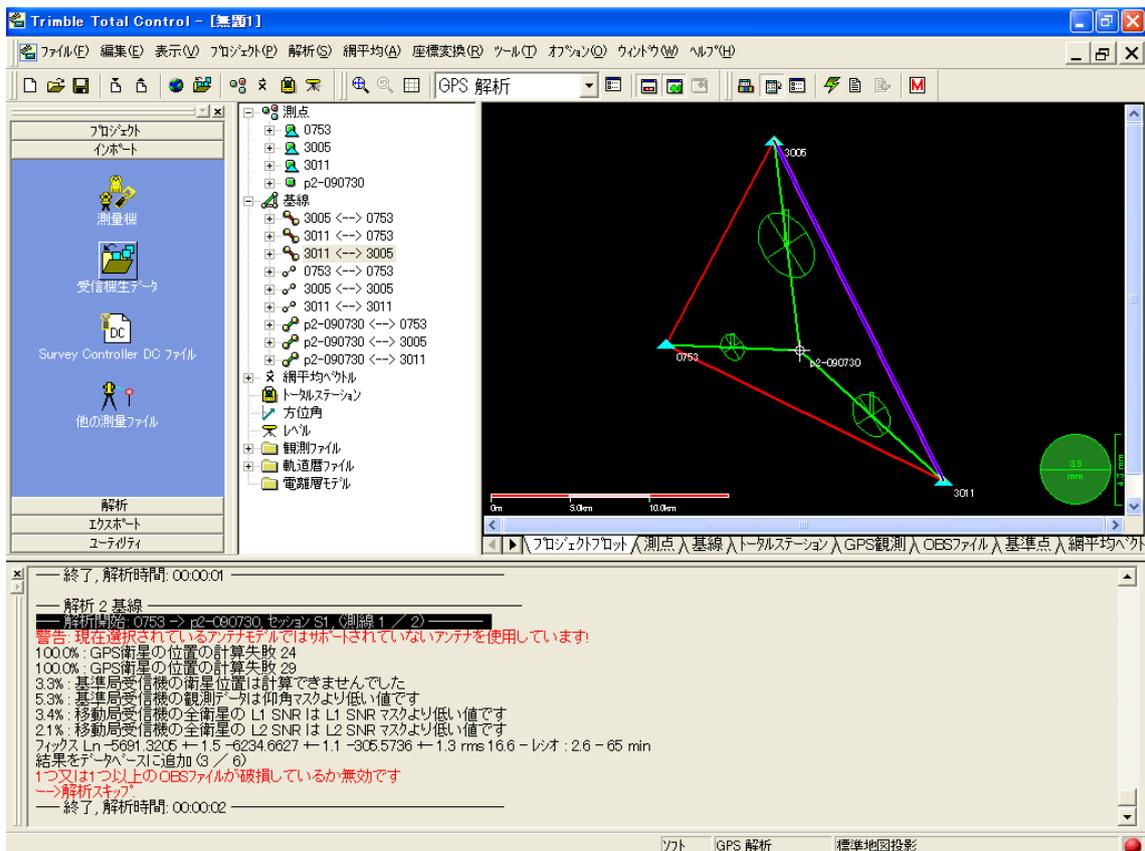


図 3-12 電子基準点による RTK 測量の補正

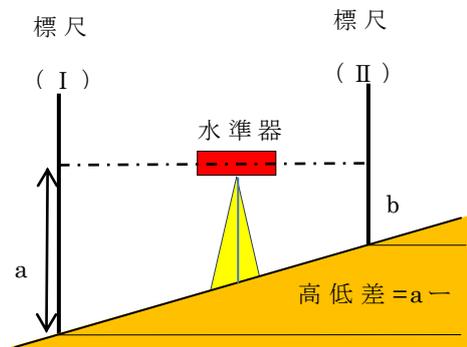


図 3-13 オートレベル (NIKON AS-2) と水準測量

表 3-3 トラバース測量用基準点の座標

ID	x	y	z
1	-42428.175	117.539	175.520
2	-42411.788	124.052	177.050
3	-42435.866	115.355	177.050
4	-42470.761	139.432	168.414
5	-42517.578	181.890	160.923
8	-42496.731	159.490	163.672
9	-42446.106	89.309	170.322
10	-42434.727	56.337	172.702
11	-42420.934	83.989	175.542

表 3-4 現地測量用基準点の座標

ID	X	Y	Z
1	-42584.767	186.789	118.995
2	-42548.723	198.405	118.826
3	-42594.861	190.732	118.377
4	-42597.491	211.165	113.907
5	-42658.311	222.705	106.963
6	-42672.425	219.441	115.108
7	-42694.168	190.501	125.693
8	-42680.583	172.579	122.235
9	-42658.379	150.712	121.278
10	-42635.436	142.714	120.901
11	-42607.066	150.934	121.202
12	-42593.821	176.480	120.478
13	-42588.603	237.559	102.169
14	-42601.160	252.087	95.179
15	-42585.412	263.704	90.885
16	-42612.521	248.569	94.768
17	-42611.655	272.679	91.448
18	-42616.081	235.505	98.999
19	-42634.274	245.407	96.433



図 3-14 TS による現地測量結果

### 3.2.4 その他のデータ

その他のデータとして 1/2500 の国土基本図を使用した。このデータの等高線の間隔は 2m であり、市販の地形図のうち斜面の地形を表現する精度が高く、比較的の良いものである（図 3-11 の背景図）。

また LIDAR データの透過性を検討するため、魚眼レンズ（NIKON fisheye converter fc-e9 0.2x）を用いて、全天写真を撮影した（図 3-16）。全天写真の撮影位置は TS で測量した（図 3-15）。

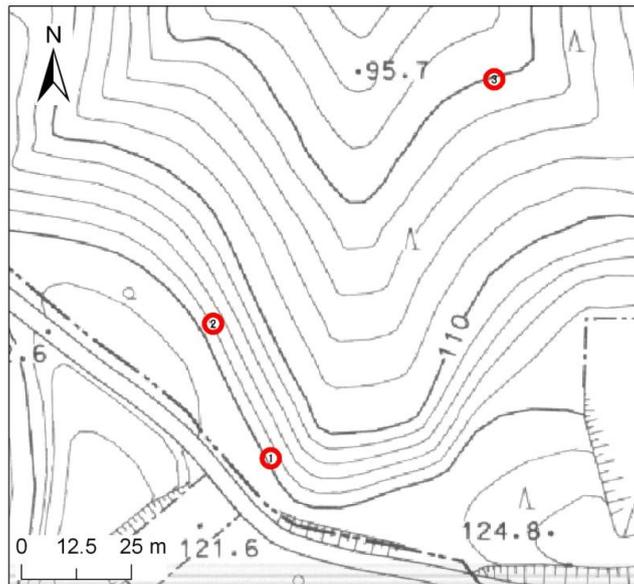


図 3-15 全天写真の撮影場所



図 3-16 全天写真（左から地点 1，地点 2，地点 3）

### 3.3 LIDAR データの空間分布特性と透過性を解析手法

#### 3.3.1 LIDAR データの空間分布特性

LIDAR データの垂直分布特性を調べるために同じ向きを持つ二つの小流域（図 3-17）における断面図を作成し、レーザーパルスの分布特性を調べた。また、現地測量により作成した地表面データ（ポイントデータ）から TIN を作成し、さらに DEM（解像度 0.6m）を作成した。重なり合うファーストパルスとラストパルスを、ファーストパルスからラストパルスの距離によって 5 つの区間に分類した。距離は 20~30m, 15~20m, 10~15m, 5~10m, 0~5m の 5 つのレベルに分けた。これによって、LIDAR データの垂直分布特性を調べることができた。レーザーのパルスは、0~5m は下層植生から、5m~10m は低木から、10m~15m は亜高木から、15m 以上は高木から反射したものと想定した。また、調査地における現地観測を行い、植生状況を確認し、LIDAR による樹高分布と比較した。

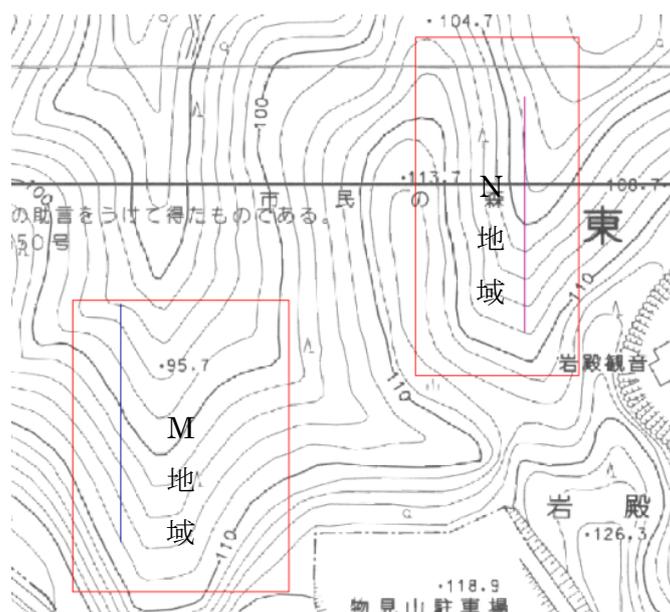


図 3-17 両流域の断面図

### 3.3.2 空中写真による樹冠と樹冠間の解析

ラジコンヘリにより撮影した空中写真は位置情報を持っていないため、幾何補正をする必要がある。本研究では空中写真で判読できる地上物を GCP (Ground Control Point) とし、幾何補正した。その地上物は物見山駐車所の囲いの角と看板、電波塔のフェンスの角などを利用し、基準点から TS で測量した (図 3-17)。測量結果を表 3-5 に表示している。GCP を空中写真から判読し、位置を約 1 ピクセル (約 5cm) まで合わせた。モザイク処理は、写真の中心点の GPS データと方位角を利用し写真を回転させ、同じ地上物を判読し、対応のピクセルを合わせた。幾何補正した空中写真の輝度値の閾値を決め、2 値化分類し、樹冠と樹冠間を分類した。閾値は、RGB 空中写真の G バンドの輝度値のヒストグラムを作成し、最大値を用いて決めた (図 3-18)。



図 3-17 GCP 測量地点図

表 3-5 GCP の座標

Id	Y	X
1	153.013	-42676.388
2	151.129	-42675.169
3	149.245	-42673.876
4	147.435	-42672.768
5	148.662	-42681.449
6	145.928	-42682.742
7	202.473	-42530.105
8	199.305	-42537.472
9	197.348	-42541.601
10	196.280	-42573.276
11	196.351	-42575.198

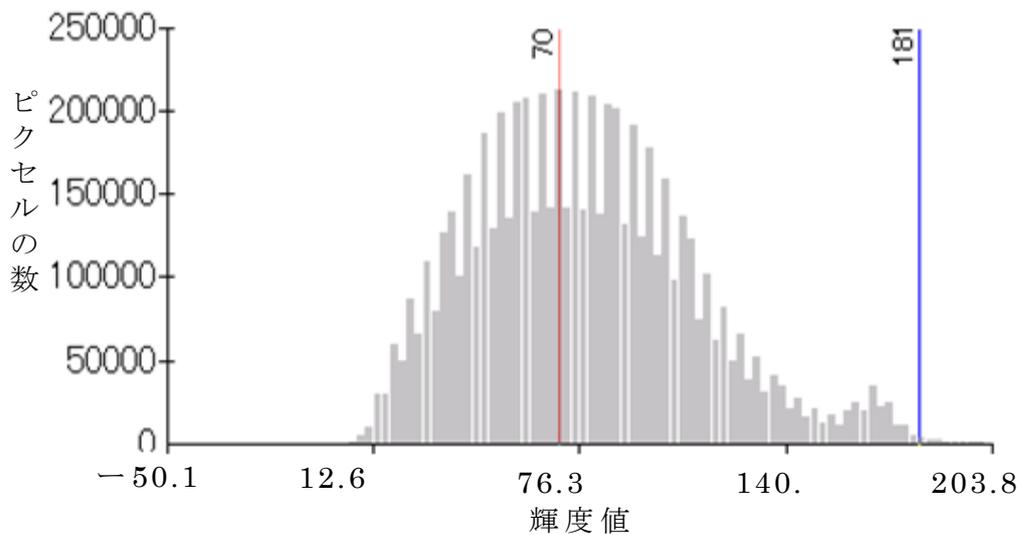


図 3-18 輝度値のヒストグラム

### 3.3.3 LIDAR データの透過性の検討

本研究では、3.3.2において樹冠と樹冠間とを分類した結果を用い、M地域とN地域におけるレーザーのパルスの透過性を検討した。樹冠間に位置するレーザーパルスは地面に到達していると考えられるので、樹冠間から反射しているレーザーパルスの割合を計算した。本研究で使用したLIDARのビーム幅は約40cmであるため、レーザーパルスのポイントデータより20cmのバッファを作成し、樹冠間から反射しているか

どうかを確認した。確認された精度を確かめるため、魚眼により撮影した全天写真から開空度を計算し、空中写真から計算された樹冠の割合と比較した。

### 3.3.4 LIDAR データの精度検討

本研究では、物見山駐車場の TS による地表面標高データを利用して LIDAR 計測システムの誤差を検証した。LIDAR データのラストパルスが正しく地表面を表しているかを調べるために、TS による現地調査データから作成した DEM（解像度 1m）と比較した。この DEM は、TS 測量ランダムなデータから TIN を生成し、さらにラスターデータ（DEM）に変換したものである。空中写真で分類した樹冠間から反射しているパルスデータとこの DEM との差分を計算し、開空度が異なる M 地域と N 地域での LIDAR データの精度と透過性を検討した。

## 3.4 LIDAR データの空間分布特性と透過性

### 3.4.1 LIDAR データの空間分布特性

M 地域の LIDAR データの分布図（図 3-19）は、X 軸で 250m 以上の部分から管理が行き届いていない部分に入ってしまった。グラフ左半分の管理されている森林の断面を見ると、ラストパルスが地表面までたどりついているものと、樹冠で止まってしまっているものの 2 つにわかれている。反対に、右半分の管理されていない森林では、樹冠で止まっているラストパルスは少ないが、地表面まで届かずに樹冠と地表面の間に表示されているラストパルスが多く見られる。

次に、N 地域の LIDAR データの分布図（図 3-20）だが、M 地域も N 地域のグラフの右半分に見られたのと同じように、ラストパルスが地表面と樹冠の間に多く表示されている。この地表面から離れたラストパルスはほとんどが地表面から 3m 程度までの距離に収まっていることもわかる。また、ファーストパルスに関しても、N 地域に比べて M 地域のほうが上下のばらつきが大きいように思われる。

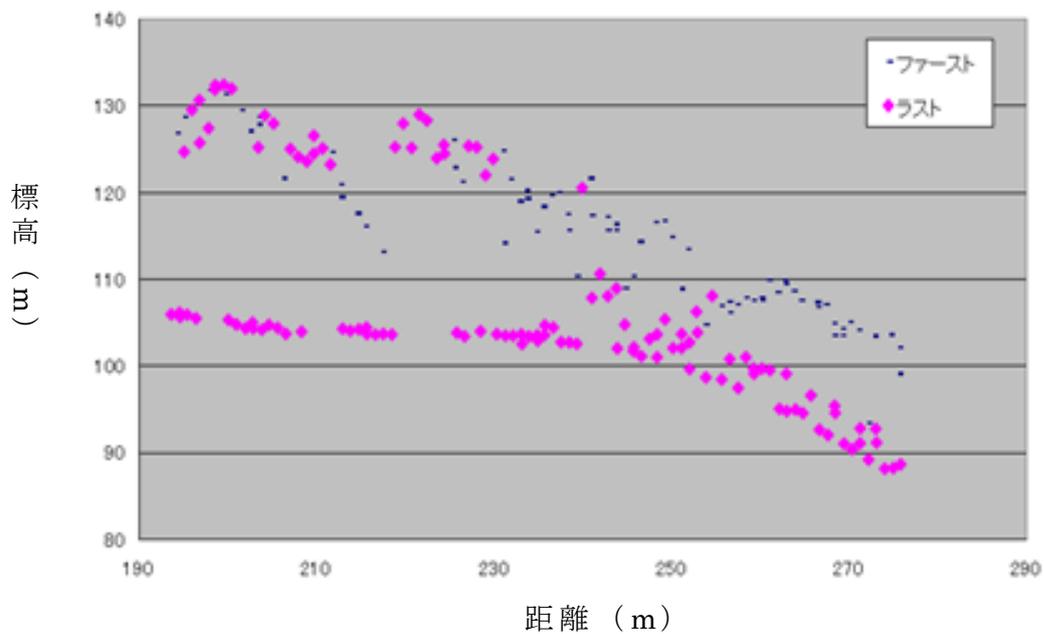


図 3-19 M 地域の LiDAR データの分布図

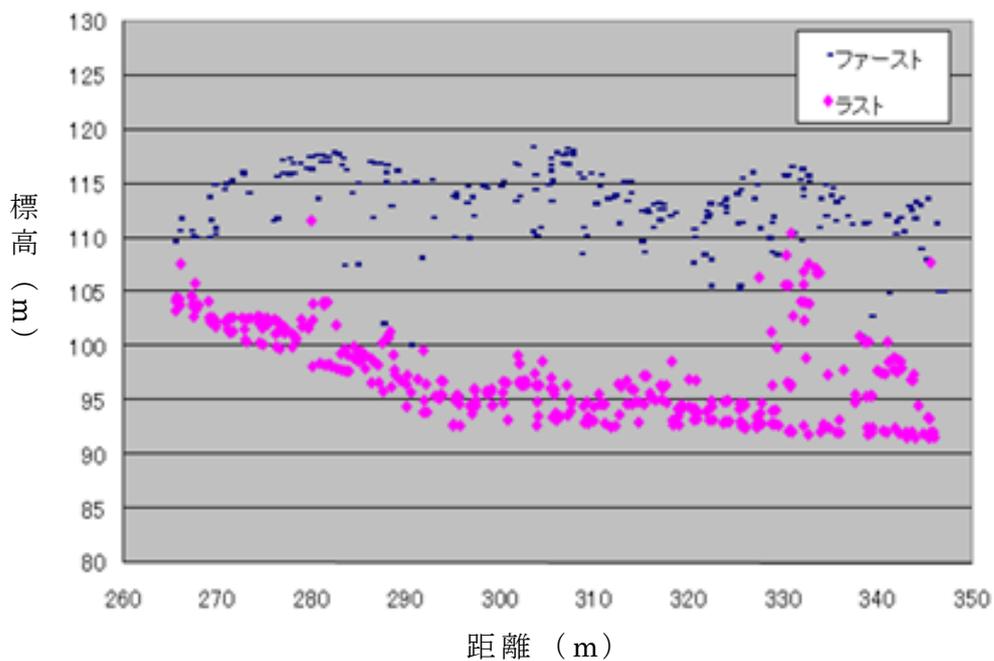


図 3-20 N 地域の LiDAR データの分布図

LIDAR データの垂直分布特性を明らかにするため、各距離帯 20~30 m (図 3-21), 15~20m (図 3-22), 10~15m (図 3-23), 5~10 m (図 3-24), 0~5m (図 3-20) の分布を示す。特徴的な結果としては、距離が 20m~30m 離れているところは谷になっているところが多かったこと、10m~15m と 5m~10m のところでは M 地域周辺にあまり分

布が見られないこと、0m～5mのところではM地域周辺に多く分布しており、逆にN地域周辺にはあまり見られないことなどが言える。

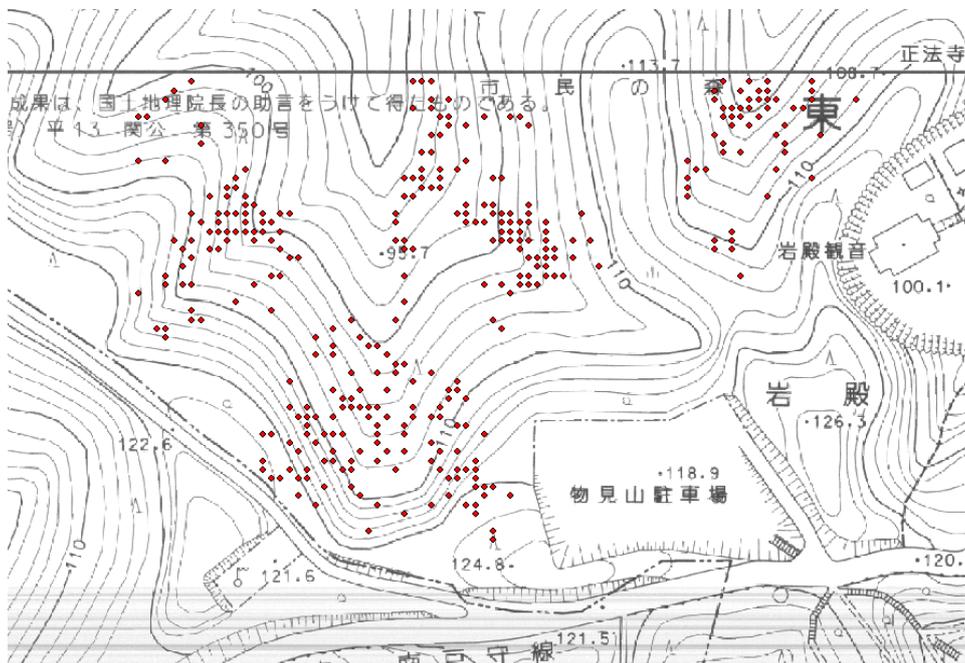


図 3-21 ファーストパルスからラストパルスの距離が 20m～30m 地点

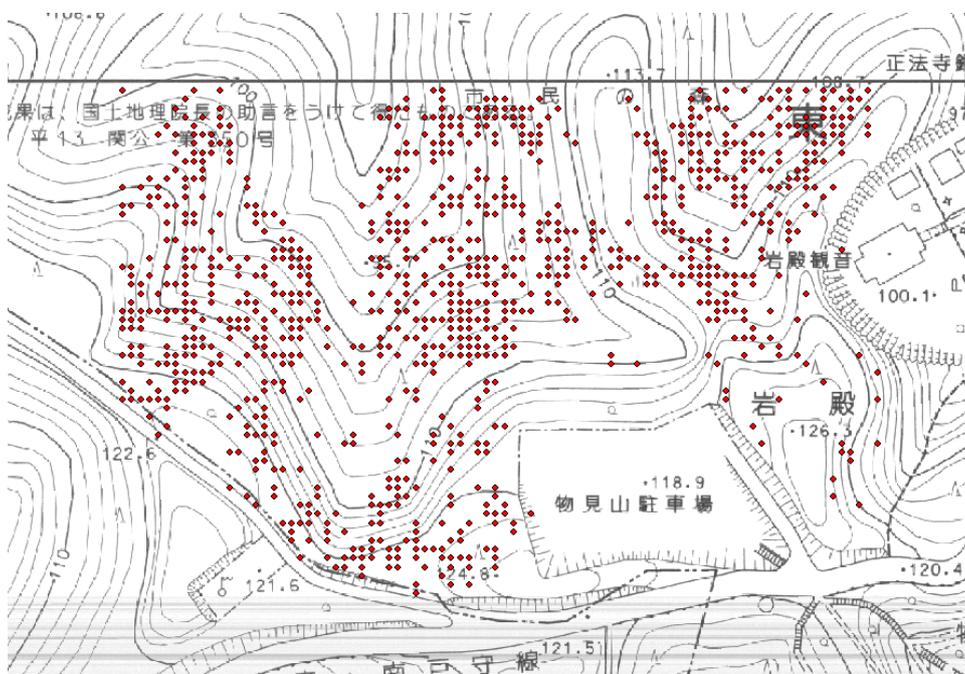


図 3-22 ファーストパルスからラストパルスの距離が 15m～20m の地点

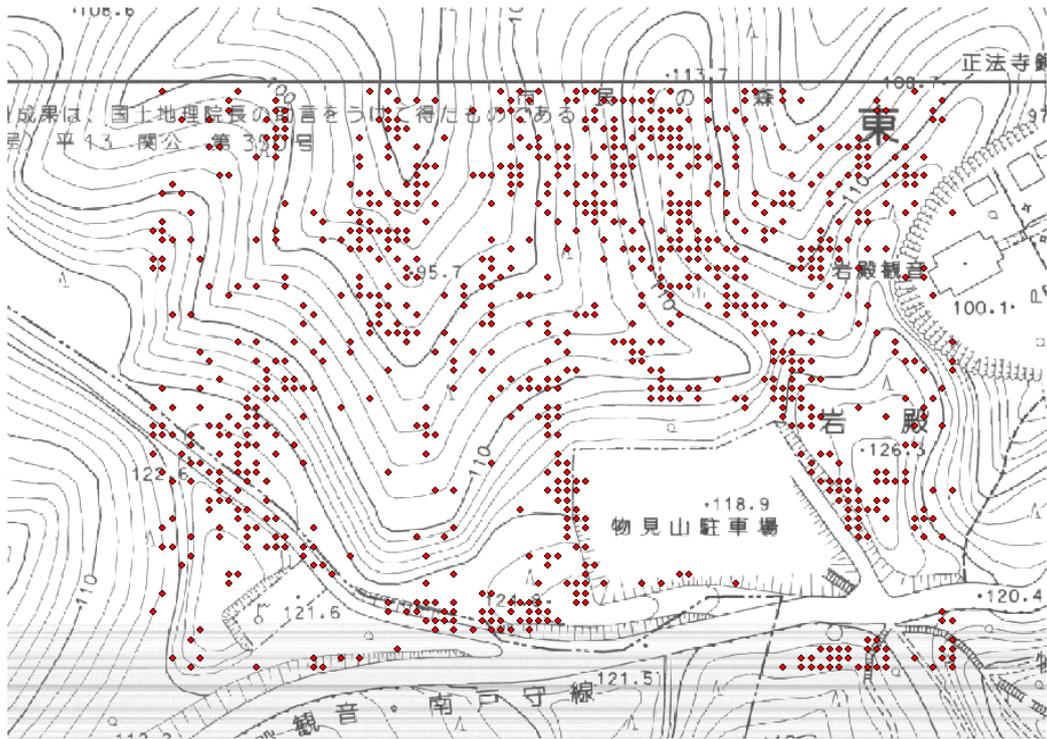


図 3-23 ファーストパルスからラストパルスの  
距離が 10m~15m の地点

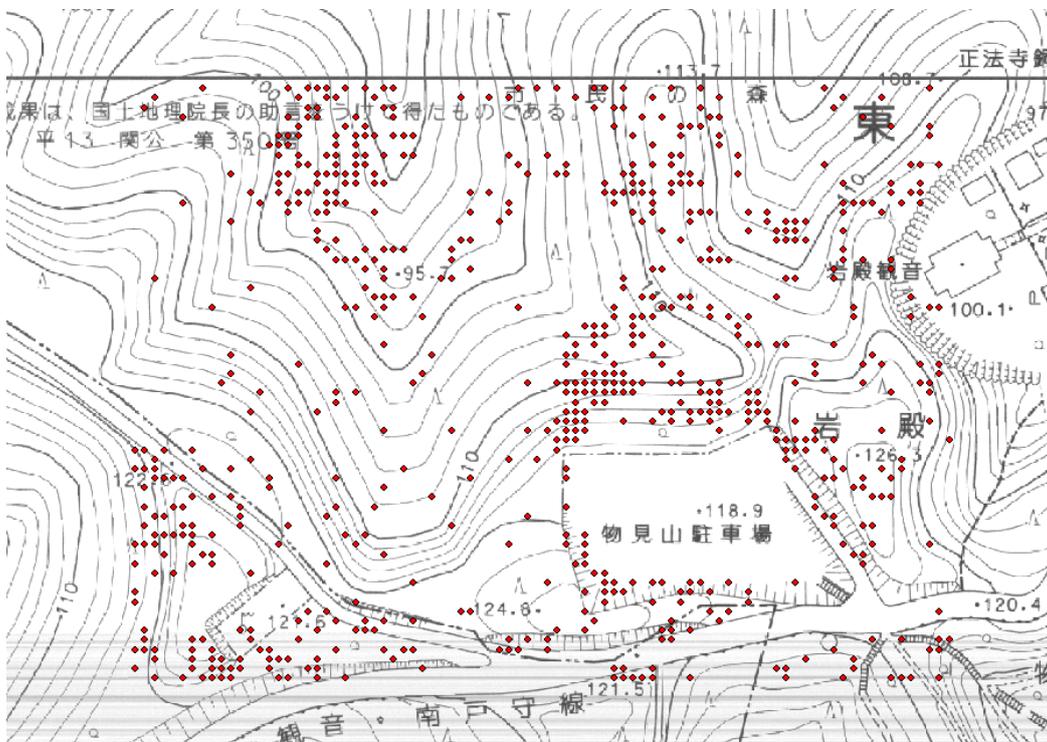


図 3-24 ファーストパルスからラストパルスの  
距離が 5m~10m の地点

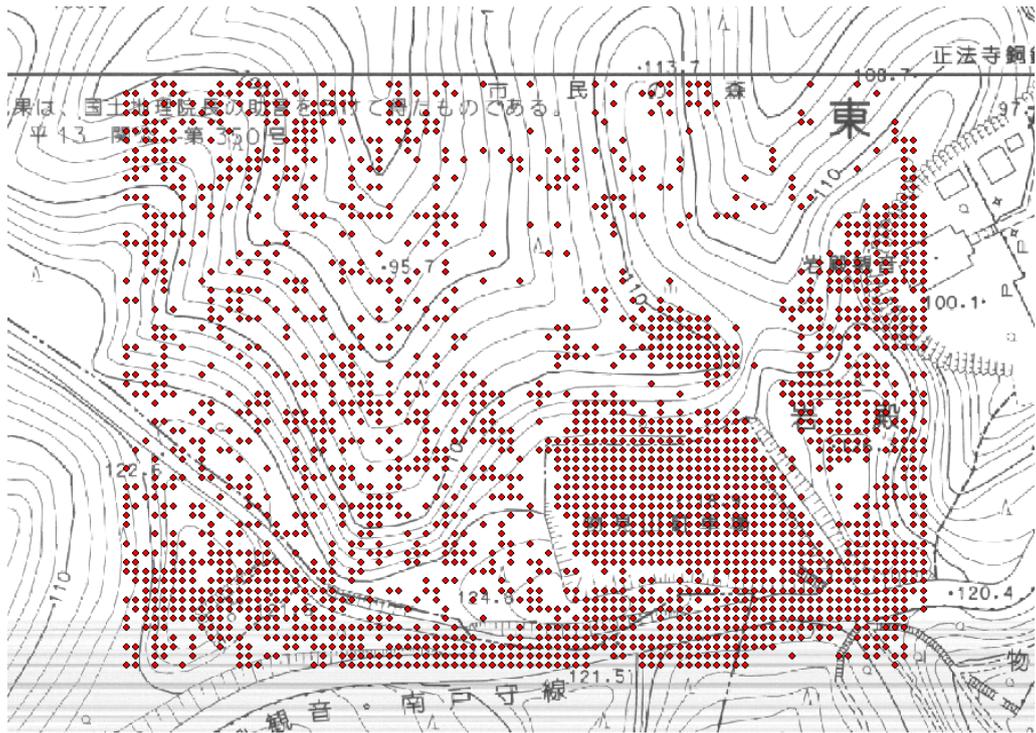


図 3-25 ファーストパルスからラストパルスの距離が 0m～5m の地点

LIDAR データのファーストパルスは樹冠の上から反射していることを想定し、そのパルスデータから TIN を作成し、さらに DSM を作成した。LIDAR データのラストパルスにより作成した DEM と LIDAR から作成した DSM との差分を計算し、樹高分布図を作成した。この樹高分布図を、1m～5m、5m～10m、10m～15m、15m～20m、20～、五つの樹高ランクに分けて表示した（図 3-26）。樹高分布図によると、N 地域では 1m～5m の低木と、5m～10m の垂高木、樹高 10m 以上高木が分布し、M 地域では、主に樹高 10m の高木が分布している。これが、3.4.1 で作成したファーストパルスからラストパルスの距離の分布図（図 3-21～図 3-25）とよく一致した。

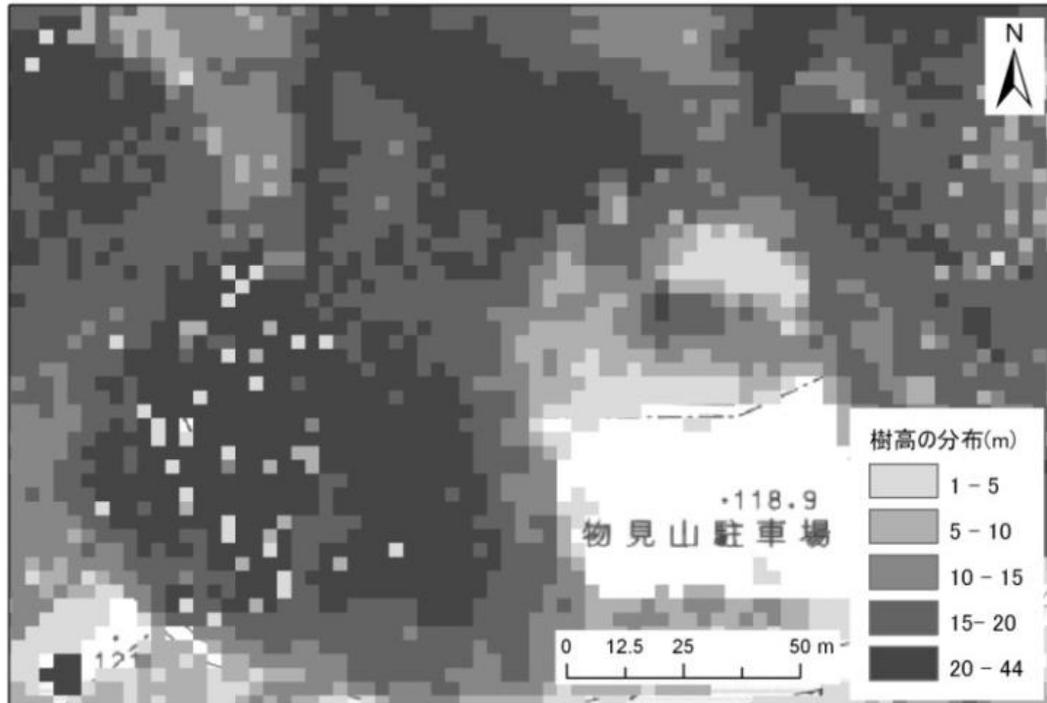


図 3-26 樹高分布図

また、現地観測によると、M地域の植生は、木本類はアカマツが最も多く、次いでヤマザクラやコナラが多い。流域内の木本はほぼこの3種で占められている。アオキなどの低木はほとんど見られず、5m以下の木本は、成長途中のコナラなどが少し見られる程度である。草本類はアズマネザサが優先しており、ほぼ一面アズマネザサが生えているが、間隙を縫うようにシダ類やジャノヒゲなども見られる。一番背の高い草本はアズマネザサであり、一番高いもので約30cmほどである(図3-23, 図3-24)。

N地域の植生は、木本類はコナラやシラカシ、マルバアオダモなどの落葉広葉樹や常緑広葉樹が多く、M地域で最も多かったアカマツはN地域では少なく、生育場所も尾根を中心とした狭い範囲に限られていた。低木に関しては、斜面ではヒサカキ、谷底付近ではアオキがほぼ一面を覆っていた。ヒサカキとアオキは平均して2m程度の全長だった。その他には、立ち枯れの木がN地域より多く見られた。草本類は、ヒサカキやアオキが光りをほとんど遮ってしまっているため、ほぼアズマネザサしか見られず、ところどころに30cm~100cm程度のアズマネザサが群生していた(図3-27, 図3-28)。



図 3-27 M 地域の相観



図 3-28 M 地域の下層植生



図 3-29 N 地域の相観



図 3-30 N 地域の下層植生

### 3.4.2 樹冠と樹冠間の解析結果

空中写真から作成した樹冠と樹冠間の図は 3-31 に示す。この図では白色は樹冠、黒色が樹冠間を表し、赤いポイントは LIDAR データである。結果によると、下草刈り管理が行っている M 地域では、樹冠間の面積が大きく、N 地域では逆だった。

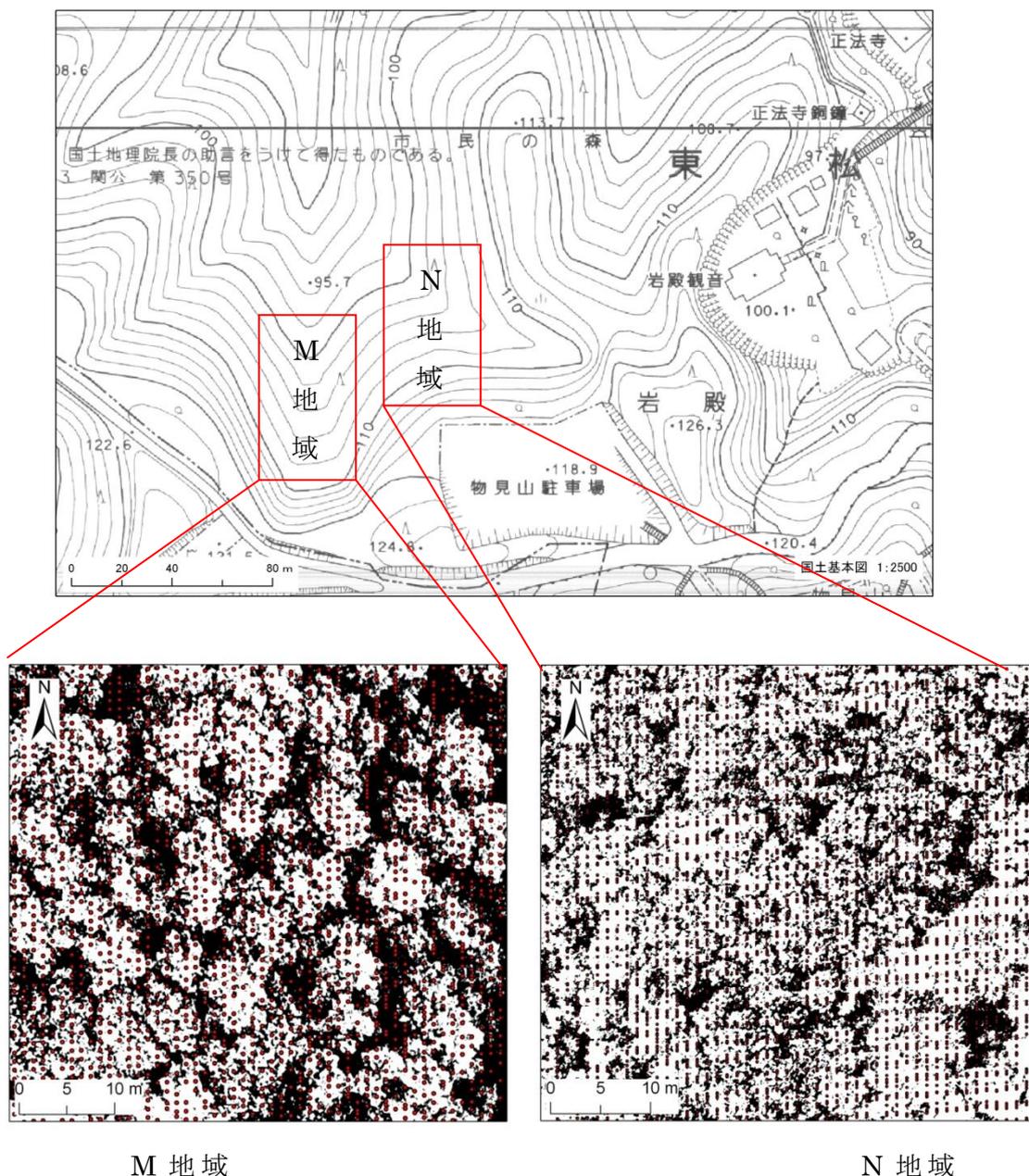


図 3-31 樹冠と樹冠間の分類図

空中写真による樹冠とその間の分類結果を検証するため、全天写真を解析し、開空度を計算した結果と比較した。全天写真の撮影地点の位置情報を TS 測量で測り、その地点から一定距離のバッファ（本研究では 2m）を作成し、その範囲中の空中写真を用いて解析した樹冠の割合を計算した（図 3-32、図 3-33、図 3-34）。

本研究では CanopOn 2 を利用し，閾値を 0.5, 0.198, 0.802 に設定し解析した（表 3-6）。その結果，地点 2 が最も開空度が高く，次いで地点 1 が高かった。三か所中唯一 N 域で撮影した地点 3 は，地点 1，地点 2 よりも開空度が低かった。また，閾値を上下してもそれぞれの地点の関係はほとんど変わらなかった。ラジコンヘリの空中写真の開空度は M 域では高く，N 域では低い結果とほとんど一致している。

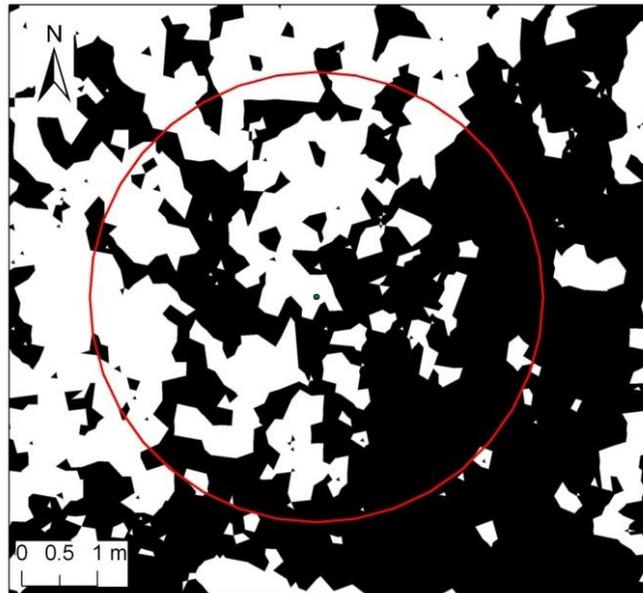


図 3-32 地点 1 の樹冠と樹冠間

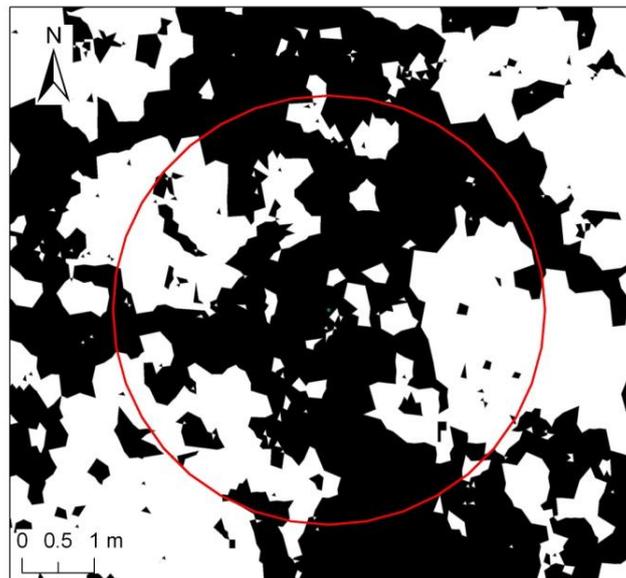


図 3-33 地点 2 の樹冠と樹冠間

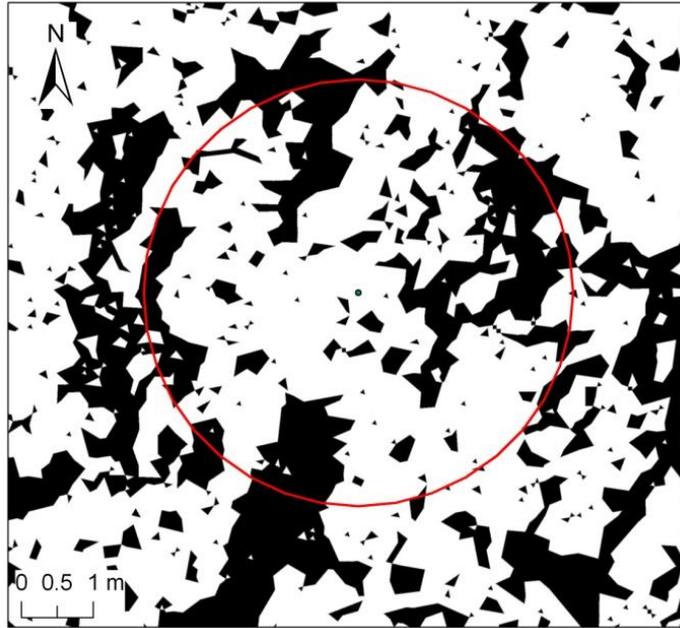


図 3-34 地点 3 の樹冠と樹冠間

表 3-6 各地点の開空度 (%)

閾値	0.5	0.2	0.8
地点 1	17.9	35.2	11.6
地点 2	19.9	42.8	13.4
地点 3	12.0	30.4	8.4

### 3.4.3 LIDAR データの透過性の検討

LIDAR データのラストパルスは地面から反射すると考えられる樹冠間から反射するラストパルスの割合は M 域と N 域でそれぞれ 52.62% と 25.47% であった。この結果によると、誤差が大きいところであった N 域では開空度が悪い、ラストパルスが樹冠から反射することが多かった。M 域では逆であって、開空度が高い、ラストパルスが樹冠間から反射するのは多かった。

### 3.4.4 LIDAR データの精度評価

物見山駐車所の TS による地表面標高データを利用して LIDAR 計測システムの誤差は 0.326m であることがわかった。

谷、尾根、窪地の場所で作成した LIDAR データの断面図は図 3-35, 図 3-36, 図 3-37, 図 3-38 に示す。それらの図では、Last パルスは地表面と考えられる場所から反射する割合が大きく、First パルスは樹冠と考えられる場所から反射することが多い。地形図 DEM (1/2000) では詳細な地形を表現できていないのに対して、Last パルスは最も細かい地形を表現できていることがわかる。

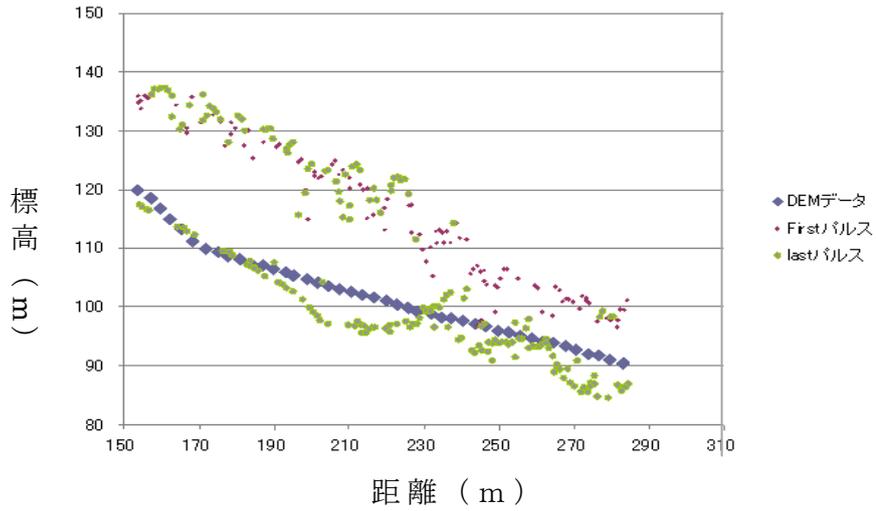


図 3-35 谷の断面図

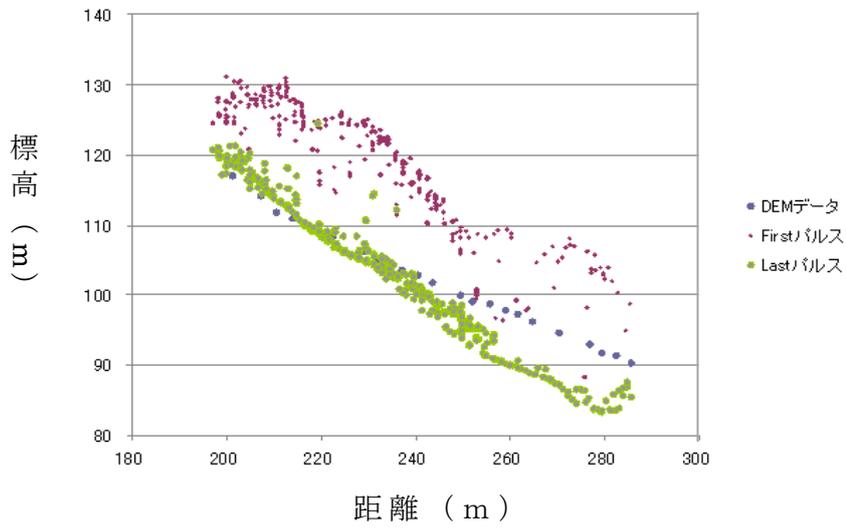


図 3-36 尾根の断面図

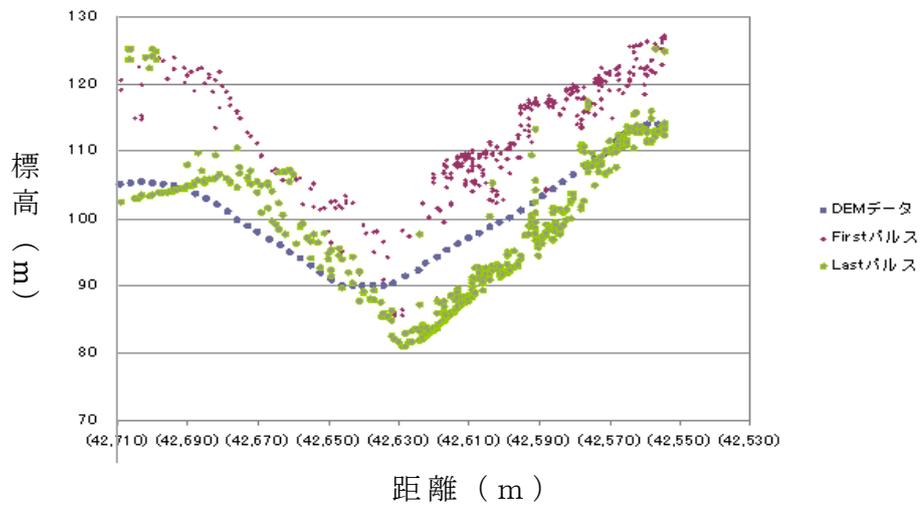


図 3-37 窪地の断面図

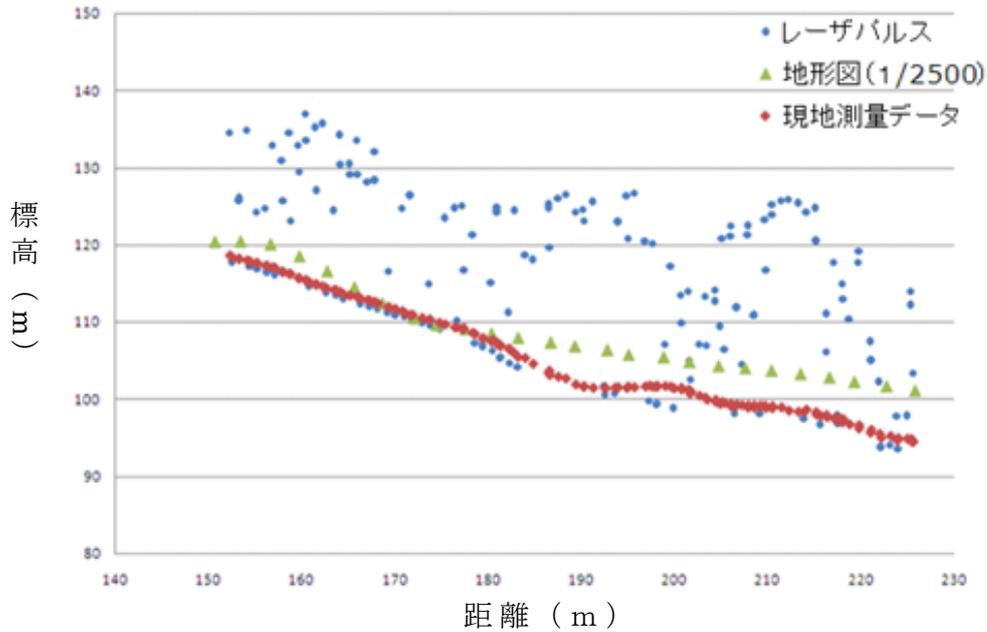


図 3-38 LIDAR データの断面図 (現地測量と比較)

M 地域では樹冠の間から反射するラストパルスは 52.62%であり、それを現地測量データと比較した平均誤差は 0.413mである (図 3-39)。N 地域では樹冠の間から反射するラストパルスは 25.47%であり、それを現地測量データと比較した平均誤差は 0.629mである (図 3-40)。この結果によると、誤差が大きい場所 N 域では開空度が低く、ラストパルスは樹冠から反射していると判断された。一方、M 域では、開空度が高く、ラストパルスが樹冠間から反射していると判断された。

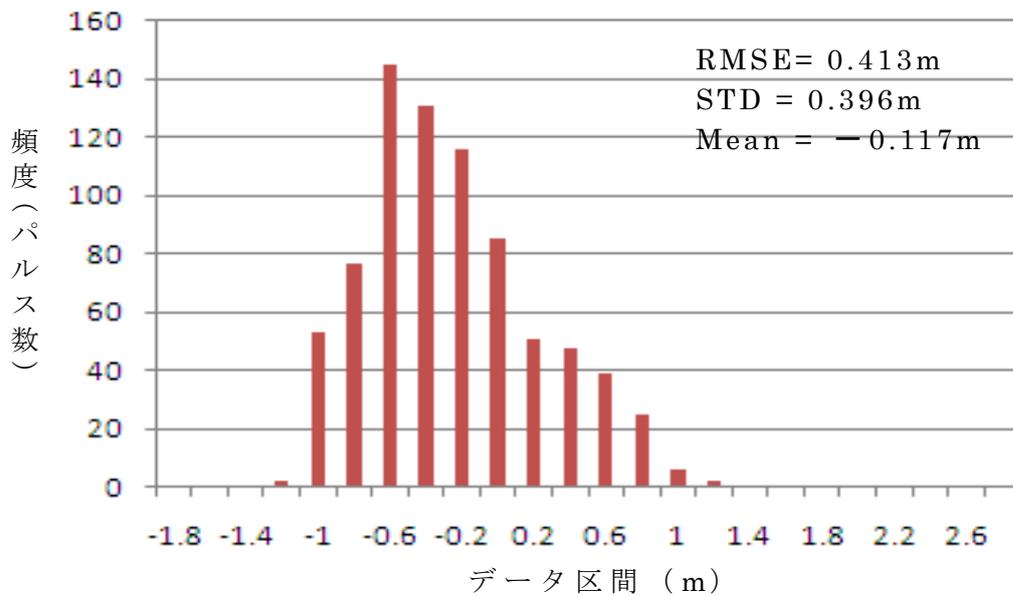


図 3-39 M 地域の LIDAR の誤差

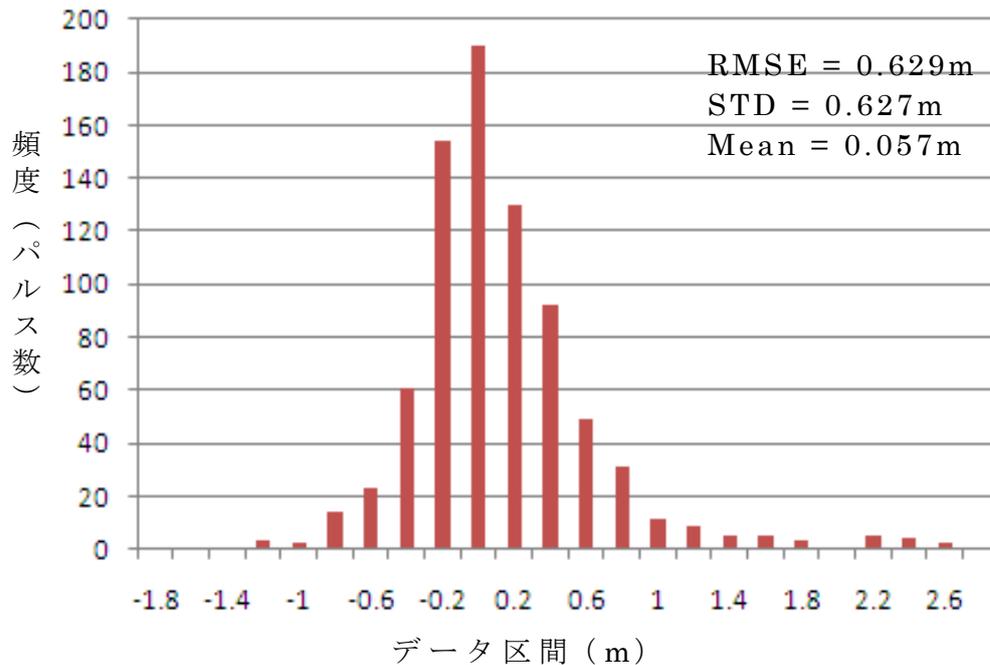


図 3-40 N 地域の LIDAR の誤差

### 3.6 考察とまとめ

本章は、異なる開空度の森林中に調査地を設置し LIDAR データの透過性とその精度を検討した。その結果、開空度が 50% 以上の森林では LIDAR の標高誤差が 50cm 以下であり、樹冠下の微細な地形を把握できることがわかった。

また、LIDAR データから樹高分布図を作成し、森林垂直分布を調べた。その結果、管理により異なる森林の低木層、中木層、亜高木層高木層など特徴を把握することができた。LIDAR データの透過性を生かして森林構造を推定できる可能性を明らかにした。

本研究で明らかにしたことは以下の通りである。

一つめに、地表付近で LIDAR データのラストパルスのばらつきが発生するときは低木層が繁茂している可能性が高いということである。地表付近での LIDAR データのばらつきというのは、図 3-20 に見られるような、ラストパルスが帯状に分布している状態を指す。N 地域は、現地観測でほぼ全域をヒサカキやアオキなどの低木が覆っていることを確認している。その低木層の高さがおおよそ 2m~3m であり、ラストパルスのばらつきも約 3m の中に収まっていることから、ラストパルスのばらつきは低木層によって引き起こされていると考えられる。また、図 6 の左半分のようにラストパルスが一本の線のような分布を示しているところでは、低木層はほとんど確認されなかった。

二つ目に、ラストパルスが樹冠で止まる地点は、森林を構成する樹種が要因になっているのではないかということである。図 3-19 の左半分に見られるように、ラストパルスの多くが樹冠で止まってしまっているところは、管理されている森林に多かった。この理由として、最初は森

林内の開度が影響を与えているのではないかと考えた。開空度が低ければ、その分パルスが地表面まで届くのを阻害されると考えたからである。しかし、結果は、管理されている森林では開空度が高く、管理されていない森林では開空度が低かった。さらに、管理されている森林の中でも、ラストパルスが樹冠で止まっていない地点より、ラストパルスが樹冠で止まっている地点のほうの開空度が高く、事前の予想とは正反対の結果が出た。最も開空度が低かったのは N 地域内で撮影した画像であり、N 地域内ではラストパルスが樹冠で止まることはほとんど見られないため、開空度はほとんど影響を与えていないということになる。

別の原因として考えられるのは、植生の違いである。図 3-20 を見てみると、樹高 20m を超える樹木が M 地域の南側に多く生えていることがわかる。これは、N 地域の管理されている部分とほぼ一致する。また、図 3-21 ではファーストパルスからラストパルスの距離が 0m~5m の点を表示しているが、これは、ラストパルスが樹冠で止まっているか、ファーストパルスが地表面まで届いている点を表した図ということになる。このことから、ラストパルスが樹冠で止まる地点では樹高の高い樹木の割合が高く、M 地域に多いということは現地観測の結果から該当する樹種はアカマツである。ラストパルスが樹冠で止まるという現象には、針葉樹や広葉樹などといったような樹種が影響していると考えられる。

三つ目に、ファーストパルスが地表面まで届いている点は、樹木の密度が低いのではないかとということである。上でも説明した通り、図 3-19 は、ラストパルスが樹冠で止まっているか、ファーストパルスが地表面まで届いている点を表した図である。管理されている M 地域に多く分布しているのがわかる。全天写真を見ると、N 地域で撮影した地点 3 に比べて、M 地域で撮影した地点 1, 2 のほうが開空度の値が大きくなっている。このことから、開空度が高い森林は、ファーストパルスが地表面まで降りてくる割合が高いと考えられる。

四つ目に、ラストパルスを断面的に見たときに、各地点で一番低いところを取っている点は、地形を表している可能性が高いということである。

図 3-25 を見ると、測量した地形の形と、ラストパルスの最も低い値はほとんど同じ軌道を描いている。このことから、ラストパルスの全てを DEM として考えてしまうとかなりのノイズが発生するが、上手く樹冠や樹冠と地表面の間に止まってしまった点だけを取り除くことが出来れば、かなり高精度な数値地形モデルを作ることが可能になると思われる。しかし、樹冠で止まってしまうラストパルスが集中している地点や、低木が生い茂り地表面まであまり届いていない地点などでは、管理が行き届いている地点に比べて精度に差が発生してしまう可能性がある。

以上のことから、LIDAR データのラストパルスには、草本や低木の密度というかたちで森林の管理の有無による違いが表れることがわかった。ラストパルスの地表面付近でのばらつきは、背の高い下層植生や低木の状況などを写し出すので、ラストパルスの状態を見ることによって、下草刈りの必要性の検討や、作業を行うにあたっての優先順位を事前につ

けることなどが可能になると思われる。また、ファーストパルスについては、ファーストパルスが地表面までどの程度届いているかを調べれば、そこに生えている樹木の密度を知ることができる。これが間伐や枝打ちを行うにあたって、必要なパラメータと言える。さらに、LIDARデータの垂直分布特性をもちいて、森林の三次元構造を明らかにすることにより、樹冠の直径、樹冠間距離など分布特性をとらえることができると考えられる。

## 第 4 章 LIDAR データのフィルタリングと精度検証

### 4.1 LIDAR データのフィルタリング

#### 4.1.1 フィルタリング処理の必要性

LIDAR データでは、地表面や建物、樹木等の地物からなる表面の形状が、高密度の点群の 3 次元座標データとして取得することができる。このような地表面と地物を合わせた表面形状を DSM (Digital Surface Model) というが、一般の利用においてはこの DSM から地物を取り除いた地表面の標高データ DTM (Digital Terrain Model) あるいは DEM (Digital Elevation Model) が必要なことが多い。DSM から DTM を得るために、建物や樹木の部分をあたかもフィルターにかけるように取り除いて地表面の標高データに置き換える処理をフィルタリング (Filtering) と呼んでいる (図 4-1)。LIDAR データによる建物や樹木の形状データも、利用目的によっては重要であり、都市の 3 次元モデル構築のためには DSM から建物形状をモデル化することが課題となる。しかし、このためには最初のステップとして建物形状を表しているデータの部分、地表面を含む DSM から抽出しなければならない。DSM から建物や樹木を抽出した残りが地表面のデータとなるから、DSM からの建物・樹木等の抽出はフィルタリングとは同じ技術の表裏の関係にある。このように、フィルタリングはレーザースキャナーで得られた点群データを地表面のものと地物表面のものに選り分ける処理である。

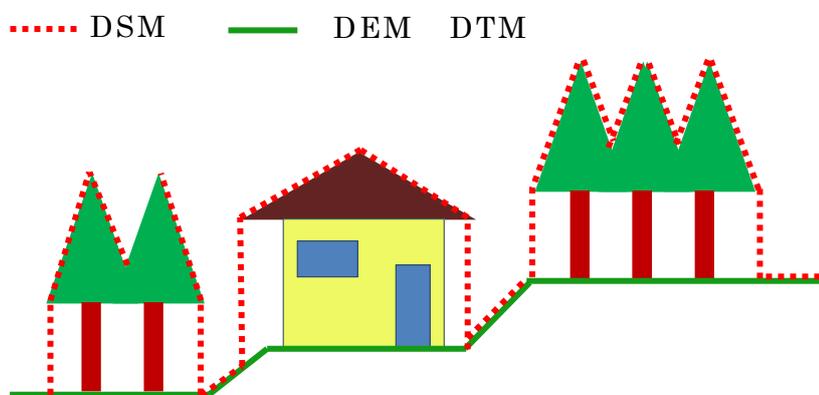


図 4-1 DSM と DTM の概観図

#### 4.1.2 既往の研究

LIDAR データを自動フィルタリング処理するために色んな研究が行われてきた。このフィルタリング処理手法を以下のように分類されている。

##### ① 標高較差によるフィルタリング

この手法では、建物や樹木周囲の地表面に対して標高値が高い、標高差があることを利用する (Kilian *et al*, 1996; Keqi Zhang *et al*, 2003)。具体的には、あるセルサイズのグリッドに区分し、その中の最低標高値のレーザー計測点を抽出し、これらの点から内挿補間して地表面の最初の推定を得る。そしてこの面からの標高値の差が一定の閾値以内の点は地表面の計測データであるとして地表面の推定面を更新していく。最初のグリッドは最大の大きさの建物よりも大きくしグリッド内に必ず地上の計測点が含まれるようにする必要がある。この方法は平坦な市街地には概ね有効である。しかし、地表面の初期推定がグリッド内の最低標高値に依存するため、地下トンネルへの開口部があると地表面の推定が大きく歪むという問題 (政春ほか, 2001) や、傾斜地にはそのまま適用できない問題 (大坪ほか, 2002) があり、それらへの対処が必要である。

##### ② 最小二乗補間によるフィルタリング

この手法では、レーザー計測点群から統計的にこれを近似する曲面として地表面を求める (Kraus and Pfeifer, 1998)。具体的には、最初はすべての計測点に同じ重みを与えて傾向面を求め、次にこの面から上方に外れた点の重みは小さくして、最小二乗法により面の推定を繰り返すという処理を行う。彼らはウィーン市郊外の丘陵地であるウィーンの森のレーザースキャナーデータに適用して植生を取り除いた地形の推定を得ることに成功している。このようにこの方法は植生のある丘陵地でその有効性を発揮している。しかし、この手法では、①より面の推定を繰り返す処理するのは計算量が多い、計算時間が長い。②研究全域のデータから近似する曲面を作成しているため、一部の地形や植生の空間分布特徴を反映できず、繰り返す処理する時に次の曲面を得ることができない。③全体データによる処理では細かい地形の傾斜変換特徴が粗くなり、地形分類する時には境界線を判読にくくなる。

##### ③ 傾斜角の閾値を用いたフィルタリング

Vosselman (2000) は LIDAR 点群データに対して、補間処理し、隣接点との角度を計算し、角度の閾値を決め、この点が地表面かどうかを

区別する手法を開発した。この手法では、研究対象地域の地形によって閾値を主観的に決める必要がある。そのため、個人の経験により閾値が変わり、フィルタリング精度が低く、誤差が大きくなることがある。

#### ④ TIN によるフィルタリング

Axelsson (2000) は不規則三角網 (TIN, triangulated irregular network) によるフィルタリング処理手法を開発した。この手法では以下の手順でフィルタリング処理を行っている。① LIDAR 点群データに対して、あるグリッド内の初期地表面と考えられる点から TIN を作成する。② それ以外の LIDAR 点と初期地表面との距離と角度を計算する。③ 距離と角度の閾値より、その LIDAR 点は地表面かどうかを判断する。地表面と判断されたら LIDAR 点を加えて、新しい地表面と考えられる初期地表面を作成する。④ 他の LIDAR 点と③で得た初期地表面との距離と角度を計算し、閾値より地表面かどうかを判断し、重複処理を行う。この手法は、計算量が膨大なため、大面積のデータ処理には不便である。

以上のフィルタリング手法は、局所的な標高最低点を地表点として取得するもの、統計的に傾向面の曲面を推定するもの、計測点群をそのままによりによってセグメントに分割し地表面を表すセグメントを抽出するものなどがある。標高較差によるフィルタリングでは、地表面の初期推定がグリッド内の最低標高値に依存するため、地下トンネルへの開口部があると地表面の推定が大きく歪むという問題がある。この手法は、計算量が膨大なため、大面積のデータ処理には不便である。最小二乗補間手法では、細かい地形の傾斜変換特徴が粗くなり、傾斜角によるフィルタリング処理では主観的閾値の個人差によりフィルタリング精度が違ふ、TIN フィルタリング手法では計算量が膨大なため、大面積のデータ処理には不便である。既往のフィルタリング手法については以上の問題があり、計算機の計算に適した、フィルタリング精度が高い手法を開発する必要がある。

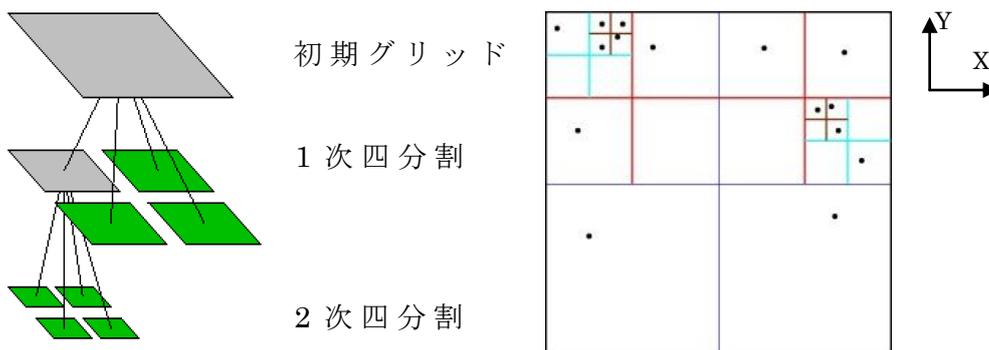
## 4.2 フィルタリング方法と精度検証

### 4.2.1 フィルタリング方法

本研究では、既往のフィルタリング手法の有効点を利用し、弱点を改良することを考え、四分木 (Quadtree, Finkel, 1974) 手法を用いた最小二乗補間フィルタリング手法 (Kraus and Pfeifer, 1998) を開発し

た（平春，2010，范，2010）。もとの Kraus 式フィルタリング処理では，全域のパルスデータを分割せずに処理することにより，次のような欠点が生じると考えられる。局所的な地形特徴の抽出は困難となり，大縮尺の DEM の作成精度基準を十分に満たせない。また，広域なパルスデータを処理する際に，CPU 計算量は莫大になり，実応用性に欠ける。即ち，LIDAR パルスデータから地面反射パルスデータをより正確かつ効率的に抽出し大縮尺の DEM を作成するためには，全域のパルスデータを面的に細分化する必要がある。四分木手法により分割された領域別にフィルタリング処理を行うことにより，パルスデータ全体処理の CPU 計算量を有効に抑えると考えられる。

本研究で用いられた四分木方法は，解析対象データの局部特徴を配慮しながら，一定な条件を満たす格子に限り，該当格子を繰返し四等分割し，最終的に階層的なデータモデルを構築する（図 4-2）。



(a) 四分木により分割したデータの構造 (b) 四分木手法の 2 次元構造

図 4-2 四分木手法の説明図

本研究で解析した四分木手法を用いたフィルタリング処理の流れは以下の図である（図 4-3）。

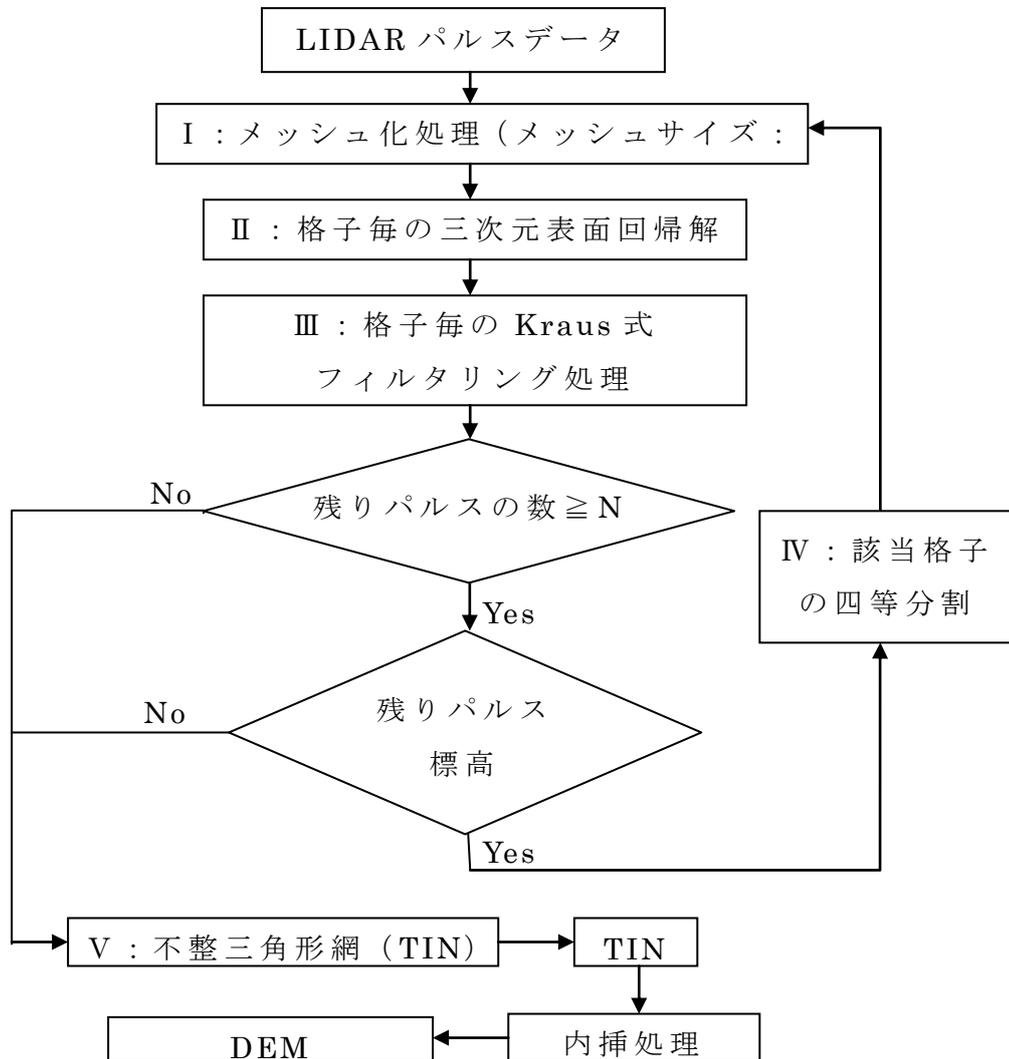


図 4-3 四分木手法を用いたフィルタリング手法の流れ

本研究では、四分木方法を用いたパルスデータのフィルタリング処理を行った（図 4-4）。

- ① X-Y 平面座標系において、パルスデータ全体をメッシュ化処理。
- ② 格子ごとに、（フィルタリング処理後に残った）パルスデータの二次曲面回帰或いは平面回帰解析を行い、三次元表面方程式を求める。
- ③ 格子ごとに、Kraus 式フィルタリング処理を行い、上記の三次元表面から一定距離値以上離れたパルスデータを除去する。
- ④ 下記の条件 A と B を全て満たす格子は、次のステップ⑤に進める。条

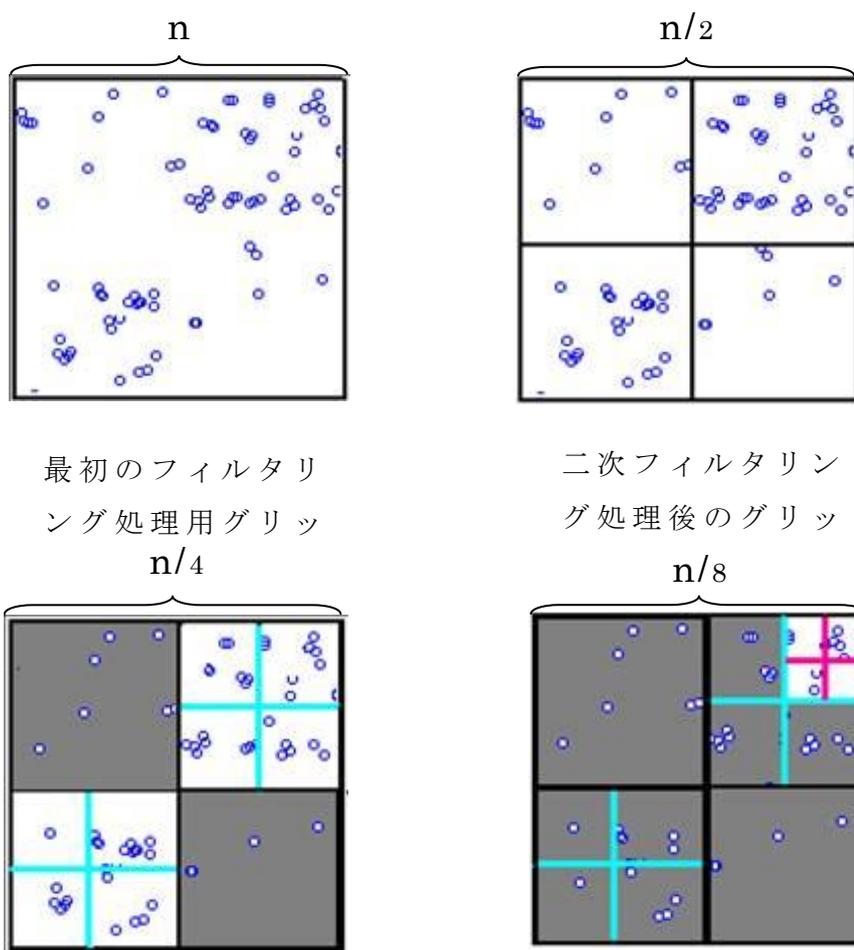
件 A と B の何れかを満たせない格子は，ステップ②に移す。

条件 A：格子内（フィルタリング処理後に残った）パルスデータの数は一定数（閾値 N）以上。

条件 B：格子内（フィルタリング処理後に残った）パルスデータと求めた三次元表面との標高方向の残差平均値は一定数（閾値 S）以上。

該当格子を四等分割し，各サブ格子において，上記の②と③を繰り返し実施する。

⑤ 該当格子の四分木分割処理を完了させる。



最初のフィルタリング処理用グリッ  
 $n/4$

二次フィルタリング処理後のグリッ

三次のフィルタリング処理用グリッ

四次フィルタリング処理後のグリッ

図 4-4 四分木式フィルタリング手法の説明図

また，全域の四分木分割処理は完了してから，各格子に残されたパルスデータを用いて，調査地の地面三次元形状を表す不整三角形網 (TIN) を作成する。最後に，その TIN データの内挿処理により DEM を作成した。

## 4.2.2 フィルタリング処理の精度検証

### 4.2.2.1 誤差の計算方法

本研究では、フィルタリング後に得た LIDAR データと TS 測量データとの差分を計算し精度評価を行った。この二つのデータセットは点群データであるため、同じ位置で比較することはできない。そのため、フィルタリング後の LIDAR データから内挿処理により DEM を作成し、TS 測量データと比較し、LIDAR データの精度を検証した。その検証方法を図 4-5 に示す。ここで示した三次元座標系において、LIDAR DEM の局部表面 1-2-3-4 と TS 測量点 PTS 間の差を計算するには、まず PTS を通る垂直線と三次元曲面 1-2-3-4 との交点  $p$  を求める。次に、交点  $p$  と PTS の直線距離を計算する。この距離値が TS 測量点 PTS における LIDAR DEM の誤差値とする。

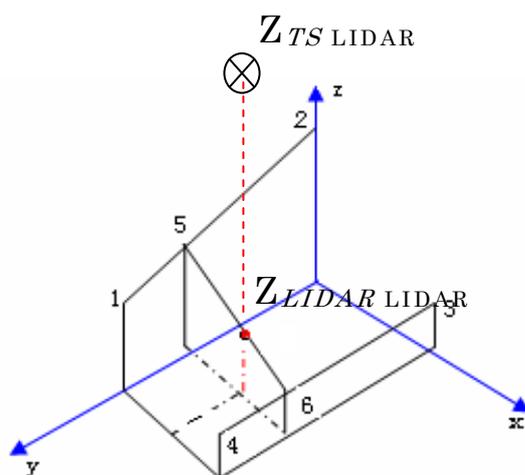


図 4-5 DEM の誤差の計算方法

### 4.2.2.2 最適 DEM グリッドサイズの選択

本研究では、あるグリッドサイズの DEM と TS 測量データの距離を計算し、LIDAR DEM の作成にあたっては、最適な DEM メッシュサイズの選定が必要がある。本研究では、現地測量による TS 測量データ（図 3-14）を主体に、前述の精度評価方法（図 4-5）で各点の実測値と LIDAR DEM の差を式 (1) により求めた。なお、異なったメッシュサイズで作成した LIDAR DEM の精度を求め比較した結果、最小誤差値のメッシュサイズを確認できた（図 4-6）。この結果によると、メッシュサイズが 1m の時の誤差が 0.413m であり、それを最適なメッシュサイ

ズと選択した。

$$\sigma_{DEM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Z_{LIDAR(k)} - Z_{TS(k)})^2} \quad (1)$$

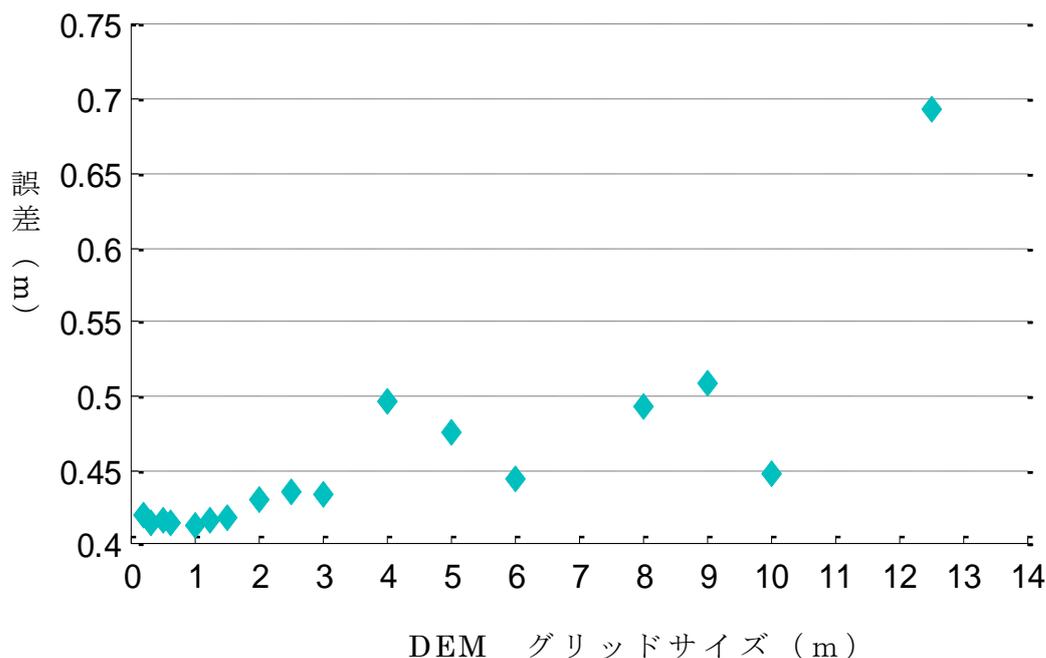


図 4-6 LIDAR DEM グリッドサイズと誤差の分布図

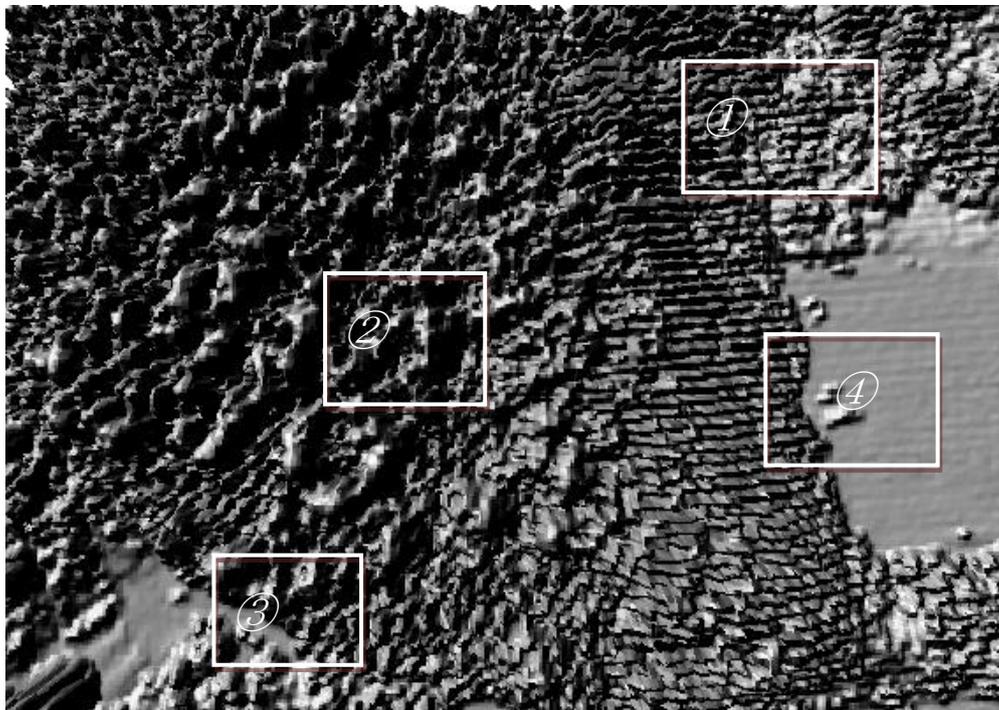
### 4.3 フィルタリング処理と精度検証結果

#### 4.3.1 フィルタリング処理の結果

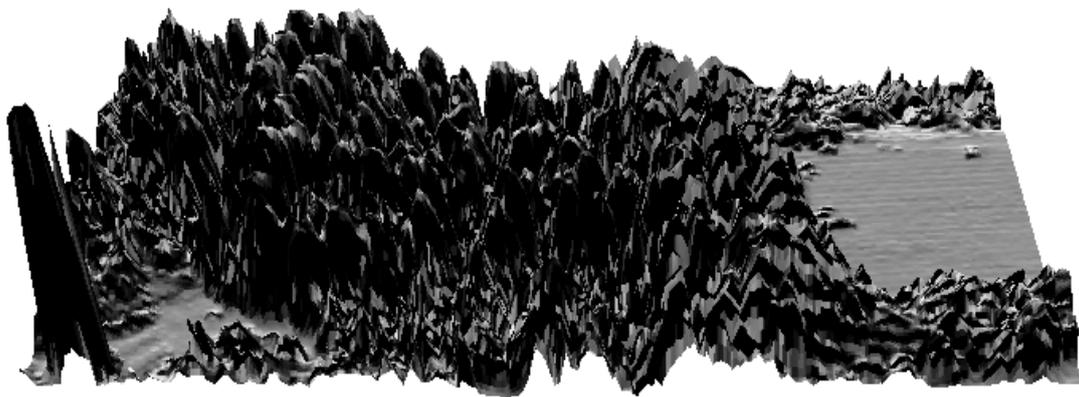
四分木式フィルタリング方法を適用したパルスデータ処理効果—フィルタリング処理前及び繰り返し処理後の残りパルスデータ全体の上表面の陰影図と鳥瞰図を示す。なお、最終回フィルタリング処理後に残ったパルスデータは地面反射パルスデータと見なされ、後述の LIDAR DEM の作成に採用した。

フィルタリング処理前の陰影図と鳥瞰図によると、場所①では、林床植生が繁茂であり、低木、亜高木などが多い。場所②では、高木が多く、林床植生や低木が少ない。場所③では、半分樹冠に隠された林道が見え

る。場所④の駐車場では、撮影の時止まっていた車と思われるものが見える（図 4-7）。



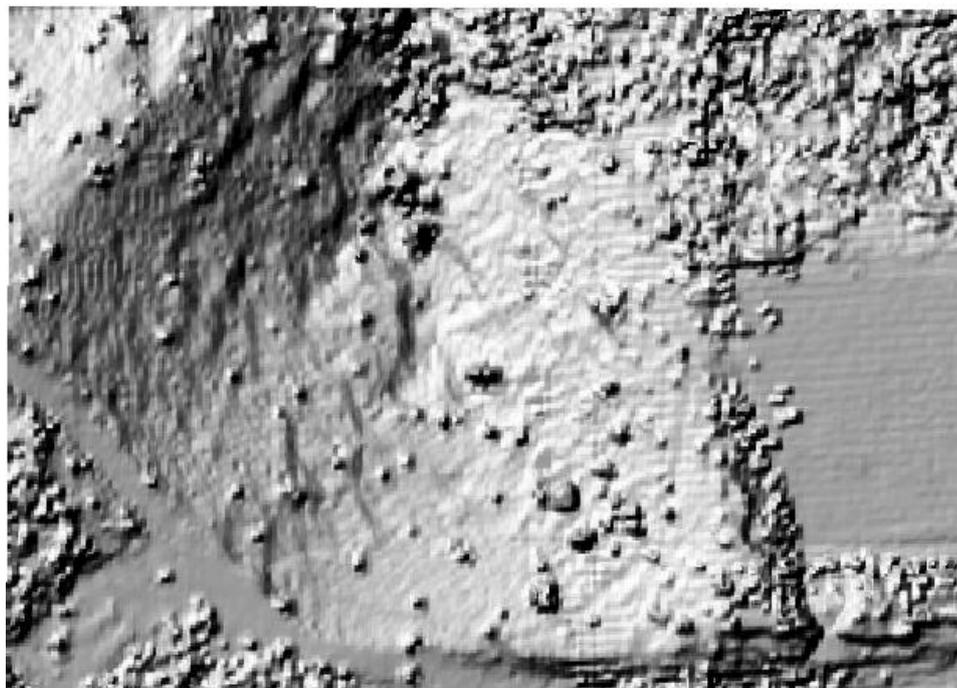
(a) 処理前の陰影図



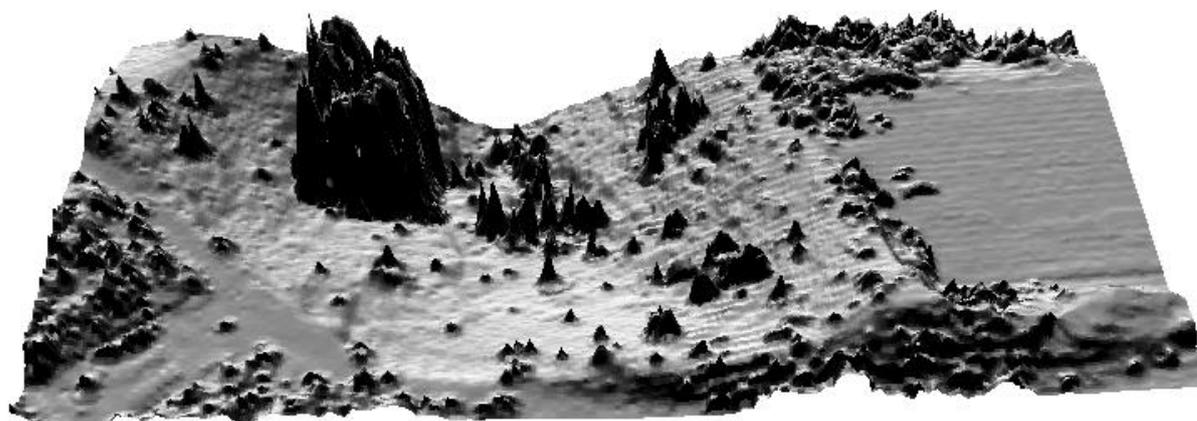
(b) 処理前の鳥瞰図

図 4-7 フィルタリング処理前の陰影図と鳥瞰図

一回目のフィルタリング処理した結果によると、ほとんどの樹木がノイズとして処理され、林道がはっきり見えているが、高木、駐車所の車がまだ残っていることが分かる（図 4-8）。



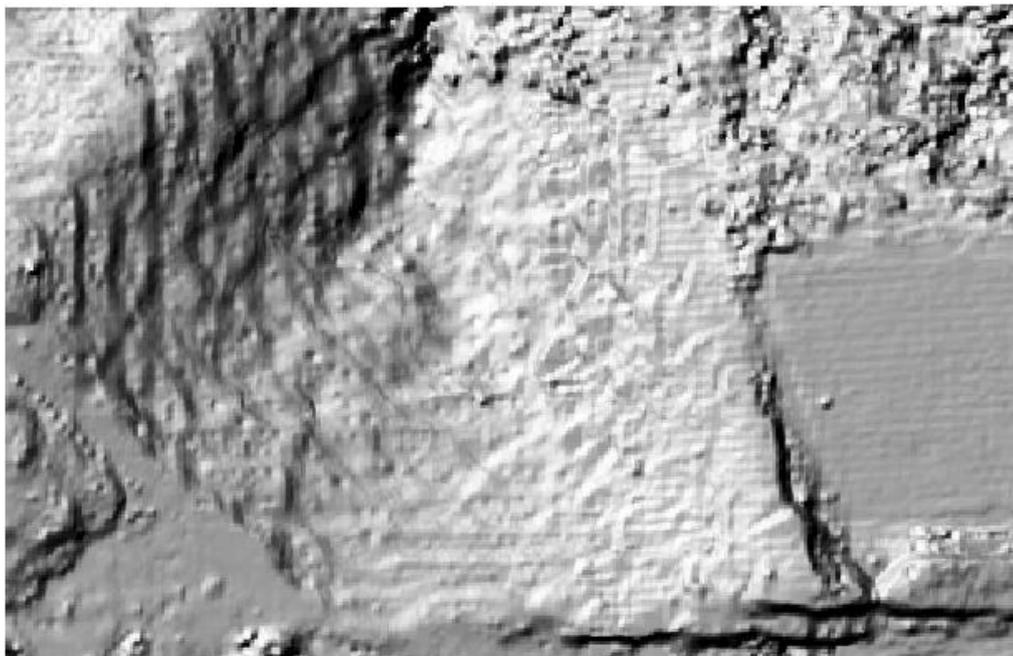
(a) 陰影図



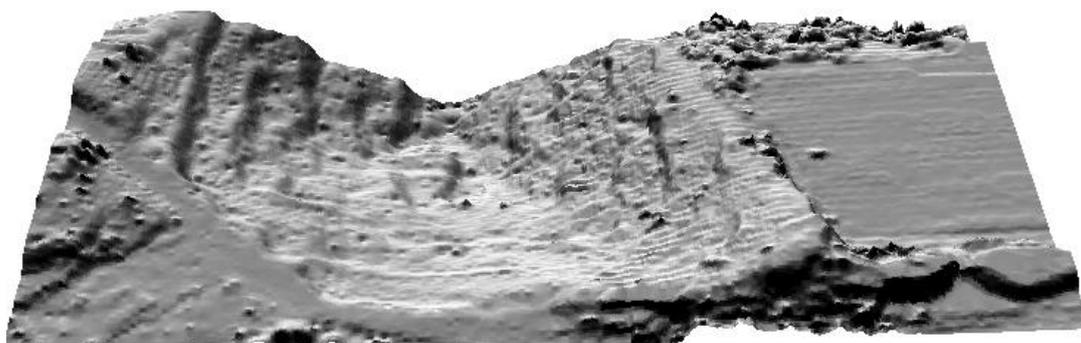
(b) 鳥瞰図

図 4-8 一回目フィルタリング処理結果

二回目フィルタリング処理結果によると，一回目で処理できなかった樹木と見られるノイズが処理され，地表面及び地表面に近い表面が滑らかに見えることが分かる（図 4-9）。ただ，駐車所には車が残され，森林域でも樹木と思われるものが残されている。



(a) 陰影図



(b) 鳥瞰図

図 4-9 二回目フィルタリング処理結果

最終処理結果を図 4-10 に示す。この陰影図から、二回目フィルタリング処理で残されていた駐車場の車と、森林域に残されていた樹木のノイズが処理されていることが分かる。

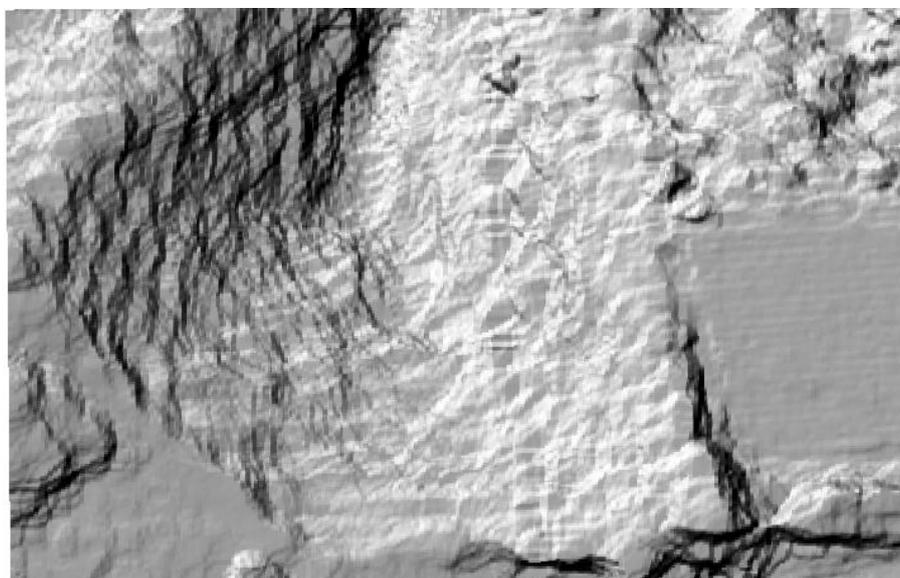


図 4-10 最終フィルタリング処理後の陰影図

#### 4.3.2 フィルタリング精度評価結果

本研究では、内挿処理で作成した LIDAR DEM の精度を検証するため、断面ライン aa' と bb' (図 4-11) による LIDAR データと LIDAR DEM の断面図を作成した (4-12, 4-13)。この図では、LIDAR DEM (ground point) と LIDAR データの地表面と考えられるレーザーパルスはほぼ一致していることが分かる。この結果から、フィルタリング後の LIDAR から作成した LIDAR DEM の内挿処理の精度が良いことが考えられる。

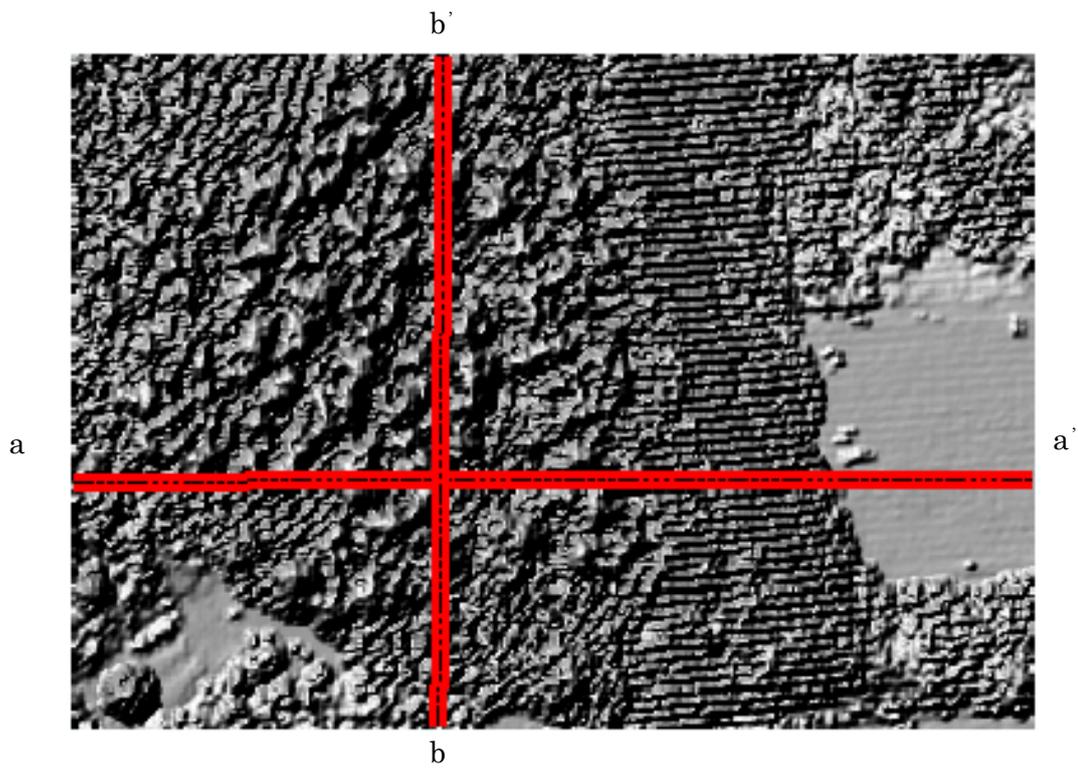


図 4-11 断面ラインの説明図

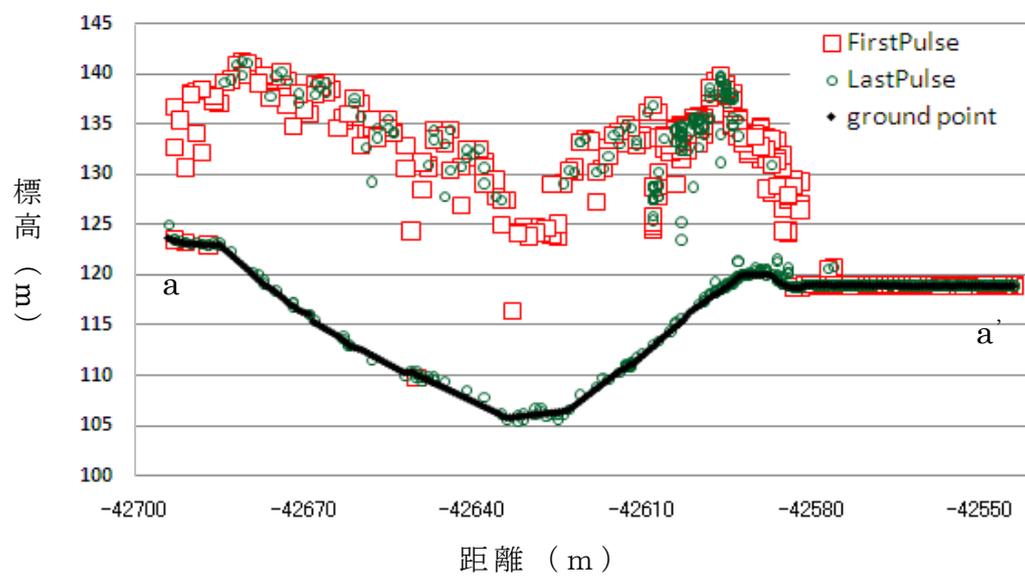


図 4-12 aa'断面図

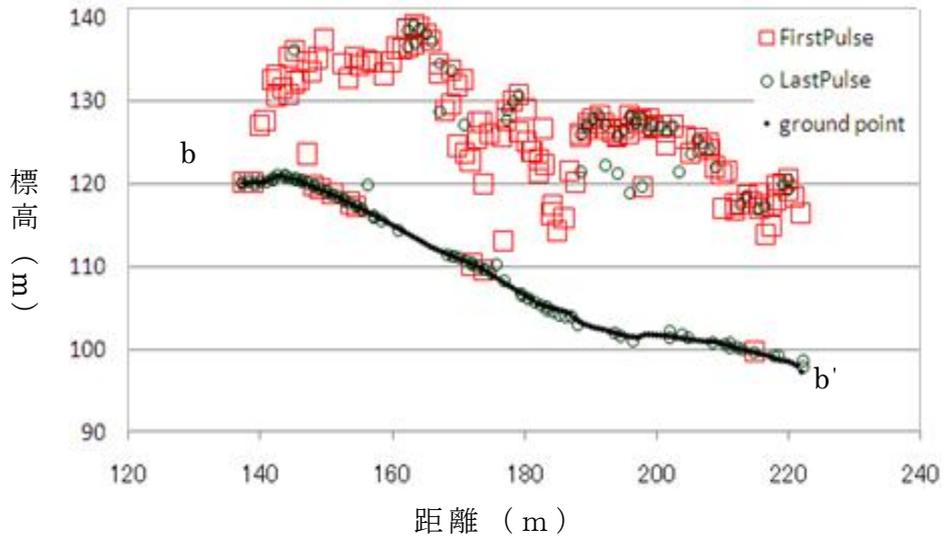


図 4-13 bb'断面図

TS 測量データ（約 600 点）の標高と LIDAR DEM の差分を計算し誤差とし、誤差ヒストグラムを作成した。DEM のグリッドサイズは 4.2.2 で解析した結果 1m で作成した。この結果を図 4-14 により示す。

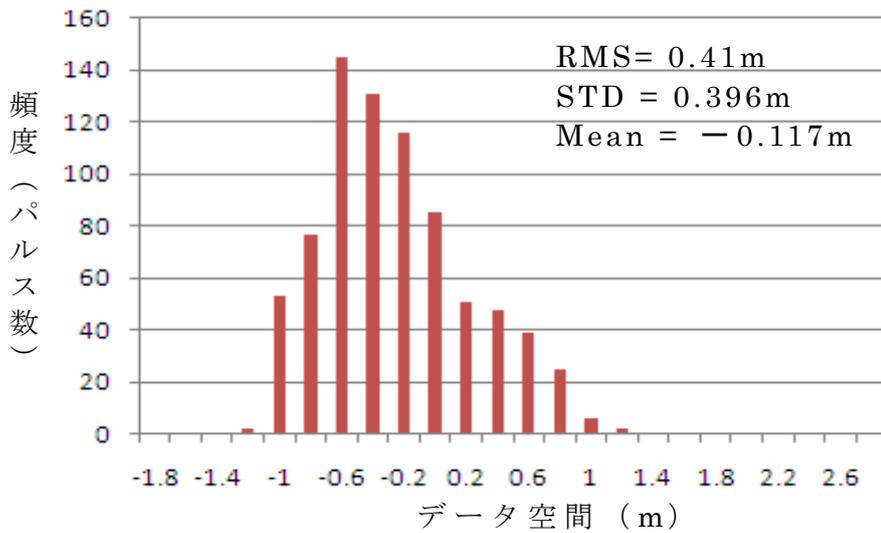


図 4-14 LIDAR DEM の誤差ヒストグラム

### 4.3 考察とまとめ

本章では、LIDAR データのフィルタリング処理について、既往の研究事例を考察した上で、独自のフィルタリング処理手法を開発し、精度検証を行った。開発された四分木フィルタリング手法は最小二乗方法とくらべより速い計算スピードでよい高精度な DEM を抽出することができた（表 3-5）。これが、最小二乗方法では全域のデータを利用しているが、四分木方法では全域をメッシュ化し、一回フィルタリング処理した後に、さらにメッシュを四分割し第 2 回フィルタリングする。このような往復処理により計算スピードを速くする同時にフィルタリングの精度もアップすることができた。この結果により、航空機 LIDAR データからは高精度な DEM 作成できる可能性を明らかにした。

表 3-5 フィルタリング方法の比較

比較	四分木方法	最小二乗方法
CPU 計算時間 (s)	59.22	88.87
平均誤差 (m)	0.413	1.7034

四分木方法により作成された DEM の精度は 0.41m であり、これが、第 3 章では確認された精度のほぼ一致することから、正しい地表面の標高データを作成する目的に到達したと考えられる。また、本章で得た DEM を用いて微地形分類を行うことは最終目的である。第 5 章の現地観測によると DEM から判断しにくい水路の幅は 1~1.5m ぐらいであり、0.41m の高精度な DEM では識別できると判断される。

## 第 5 章 現地測量による微地形分類

### 5.1 丘陵地の自然環境

#### 5.1.1 丘陵地の自然環境

微地形を構成する各自然環境要素は、それぞれが一定の等質的な広がりをもっている。同時に、そうした等質的な単位は相互に関連しあいながら全体として、結節的なシステムを構成し、それがさらに高次の単位になっている。自然環境要素の集合をしてとらえられる土地自然全体にしても、そうした関係が認められ、より基本的な単位は自然立地単位 Land unit, それが集めたより複合的なものは土地自然システム Land system とよばれている (Christian and Stewart, 1968 ; 井手・武内, 1985)。丘陵地の場合、頂部斜面や谷壁斜面といった地形単位とそれと対応した土壌単位は、それぞれ関連しあいながら、いくつかの均質な自然立地単位を構成している。またそうした自然立地単位は、例えば丘陵地内の小流域といった枠組みの中で、一定の法則性のもとで組み合わせられて、結節的な土地自然システムを形づくっている。

自然立地単位と土地自然システムには、空間的な階層性がある。しかも階層が変わるにしたがって、等質性と結節性が交互に強調される。地形を例にとると、等質的の微地形単位は結節的な小流域を構成し、小流域の集合が等質的な丘陵地になる。この丘陵地は、山地—丘陵地—台地—低地といった結節的な空間構成の一部になっている。その空間構成により、等質的な大地形単位が区別される。こういった土地自然システムの類型として丘陵地の自然環境類型を、マクロとミクロの 2 つの空間レベルで行っている。マクロは、日本列島全体を概観した時の類型化であり、それぞれの丘陵地の全国スケールの性格づけを行うものである。ミクロとは、個々の丘陵地の内部にみられる自然環境要素の特徴的な配列、組合せから、自然立地単位と土地システムの類型化を行いものである。

#### 5.1.2 丘陵地の地形分類

丘陵地における傾斜の急変部に注目して多くの単位斜面に区分し図示する系統的な方法として、Waters (1958) の morphological mapping

がある。これは傾斜変換線を垂直断面形によって凸型（遷急線）と凹型（遷緩線）に分け、さらに両者とも急変するものと漸変するものに分ける。そしてこれらで境された単位斜面を、その垂直断面形により、凸状、直線状、凹状に区分し、さらに傾斜方向とおよその傾斜度を重ねて、比較的大縮尺の図に示すのである。この方法は、英国のような概して穏やかな波状の起伏が連なる地域において、野外で地形の形態的特徴を迅速・適確に認識し記載するために考案されたものである。さらに Savigear (1965) などによって改良・普及がなされ、斜面形変化あるいは斜面上の物質移動の研究や土壌図作成などにあたっての基礎的手法の一つとなった。このような方法による傾斜変換線・斜面形態単位の系統的記載と土壌断面観察に基づいて斜面の成因に関する議論を展開している一例は、Dalrymple *et al* (1968) の **nine unit landsurface model** である。上記の方法を利用し、丘陵地の傾斜変換線の性状や成因の分類する必要がある。

中スケールで見た丘陵地の地形・地質特性は、丘頂面の原形の成因と年代と基岩の年代と岩質によって分類される。小地形スケールでみると、丘陵地は、丘頂平坦面あるいは丘頂緩斜面、丘腹斜面、段丘面、丘麓緩斜面、谷底低地などから構成される。この小地形スケールの特徴よりさらに細かい地形の差異に注目し、丘陵地に発達する谷の最上流付近には、次のような微地形単位を識別できている (Tamura, 1969; 田村, 1987)。各微地形単位は相対位置、地表の微細な形態、土壌形態などで特徴づけられ、さまざまな程度の明瞭さをもつ傾斜変換線で区別される (図 5-1)。

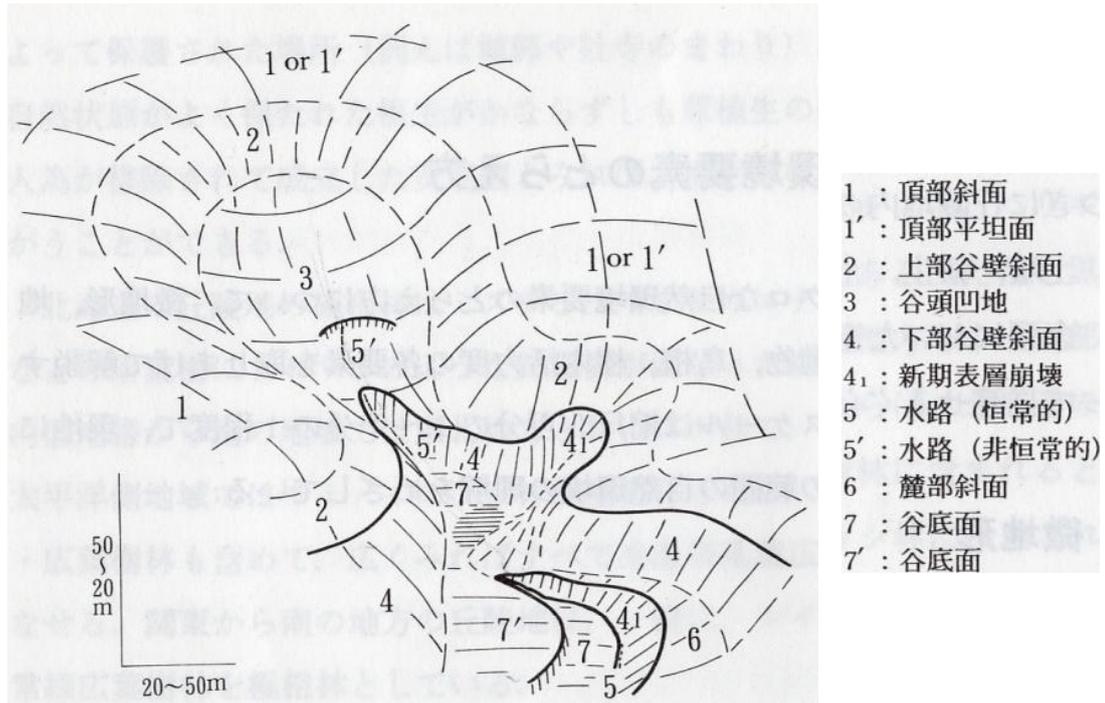


図 5-1 丘陵地谷頭部を構成する微地形単位 (田村, 1987)

#### ① 頂部斜面

稜線上 (横断面, 縦断面の最高所) にふつうみられる。比較的 緩 傾 斜の部分 を さす。やや凹型の断面形を示すことが多い。傾斜は特に 25°程度に達するが, 多くは 15°以下である。下段を凹型の傾斜変換線 (遷急線) で区別される。浸食性のものと堆積面起源のものがある。この堆積物は明らかに頂部平坦面が浸食され縮小したものとみられる。土壌は浸食のところで薄く, 乾燥している。

#### ② 頂部平坦面

稜線上にある極めて平坦な地形 (傾斜は数度以下, 幅が数十 m 以上) で, その平坦さで, 頂部斜面からとくに区別されている。堆積面起源の丘頂部によくみられるが, 侵食性のものも, 基岩の岩質・構造によっては出現する。土壌は, 堆積面起源の部分や火山灰被覆のあるところで厚いこともあるが, それ以外は一般に薄い。

#### ③ 上部谷壁斜面

頂部斜面 (あるいは頂部平坦面) の下面に連なる。平面形がほぼ直線状の部分である。断面形は直線状ないしやや凹型で, 傾斜は頂部斜面より急であるが, つぎに述べる下部谷壁斜面より緩やかである。すなわちこの微地形単位は上・下端も凹型傾斜変換線 (遷急線) で区別される。母

材の如何を問わず截頭された土壌断面がみられることが多いが、その上位に薄い匍行成土層が載っていることがある。上部谷壁斜面のうち、谷頭凹地の上流端に位置する、平面形が半円状の急斜面を、特に谷頭急斜面 **Headmost wall** と呼ぶ。その断面形はほぼ直線状、傾斜はときに  $50^\circ$  を超える。おそらく過去のやや大規模な表層崩壊から発達したものと考えられる。下部谷壁斜面と同様、現在も地表物質移動が活発である。しかし、薄いながらも腐植層のある A/C 型土壌面を持つことが多い。

#### ④下部谷壁斜面

上部谷壁斜面と麓部斜面、谷底面、水路あるいは谷頭凹地との間に出現し、丘陵斜面中で最も急傾斜の部分となっている。傾斜はしばしば  $30^\circ$  を超える。断面形はふつう直線状でところによりわずかに凹型を示す。上・下端をそれぞれ遷急線・遷緩線で区別され、両者とも（とくに前者は）明瞭なことが多い。土壌は、ふつう匍行成母材からなり、薄い、基岩が露出するまでに至っているのは、小崩壊跡や樹木の根返り跡など、一部に限られる。丘陵斜面のうちで地形変化（表層崩壊であることが多い）がもっとも活発な部分である。

#### ⑤谷頭凹地

谷頭急斜面の直下には、明らかに谷型の地形でありながら明瞭な水路を欠く部分がある。水面断面形も横断面形も凹型を示す。この奥部の谷底あるいは凹んだ谷壁を谷頭凹地とよぶ。頂部斜面（あるいは丘頂平坦面）との比高が小さいところでは、これら丘頂部の微地形単位から、谷頭急斜面を隔てず直接連続的に谷頭凹地に移り変わる。谷頭凹地の下流側半分が谷頭平低 **Head floor** とよばれることがある。これは、横断面の最低部に横断型が平坦な（下流側のみに傾く）部分をもつ点で、上流側半分のいわば谷頭凹地プロパーと区別される。谷頭凹地（谷頭平低を含む）の下流方向への傾斜は、数度から  $30^\circ$  まで多様である。

この微地形単位では土壌の発達が比較的よく、B 層、C 層あわせて厚さが  $1\text{m}$  を超えることもある。どの多くは匍行・崩壊性母材からなるもので、かつての A 層が埋没していることがある。また、頂部斜面や上部谷壁斜面の土壌より一般に湿っている。なお、この微地形の下流端付近では匍行・崩壊の土壌が再び崩壊を起している例がしばしばみられる。

#### ⑥水路

水路は、谷頭凹地の下流端付近に、数十 cm の幅および深さで突然出現

することが多い，水路が始まった地点の付近では，その両側に急な下部谷壁斜面が迫り，V字谷状の横断面を示す。幅数  $m$  以上の谷底面が出現するのは，水路頭部からの匍行・崩壊物質が再崩壊・堆積した土壤がみられることもあり，それがさらに侵食。除去されて基岩が露出していることもある。水路底に恒常的な水流があるとは限らない。

#### ⑦ 麓部斜面

下部谷壁斜面の脚部が，遷緩線を境に，直接谷底面に移行せず，わずかに凹型の断面形をもつ緩傾斜の面が付着することがある。それを麓部斜面と呼ぶ。それには，小支流から水流で運ばれてきた物質が堆積した崖錐性のもの，および谷斜面の後退によると思われる削剥性のものなどが含まれる。麓部斜面の土壤は，概して累積性で，しばしば埋没 A 層をはさみ，厚いことが多い。

#### ⑧ 谷底面

横断面の最低所を占める水路の両側あるいは片側に出現する。少なくとも横断方向には平坦な微地形単位で，明らかに流水の侵食・堆積によって形成されたものである。土壤は湿っていることが多く，ところによってはグライ土が出現する。やや大きな谷沿いでは，段丘化したかつての谷底面と，最近も冠水される場合がある。

また，谷頭部斜面発達史や谷頭凹地そのものの地形学・水文学・気候学的研究の知見から田村（2007，2009）では，谷頭凹地は谷頭凹地そのものを構成する旧期埋積層とその下流端部の埋没した溝状部のような新时期埋積層から構成されるという『Subhollow』とが，多重構造を呈しているとした。それは空間的には浸透水を集中させる機能をもち，地表への浸透水の流出発生を時間的に遅らせているとし，またこのような構造は，崩積成土砂の埋積と水路の伸張に伴う谷頭凹地の部分的掘削（ようするに埋没溝状部の掘削）が繰り返すことで形成され，その周期は数百～数千年程度であることを示唆している。

## 5.2 微地形分類方法

### 5.2.1 現地測量

微地形の分類は，微地形の動的，水文的な意味をもった要素に区分す

ることによって、その発達について実用的な観点を与えてくれる。

国土地理院が発行している 1/25,000 地形図や、市や町が発行している 1/2,500 地形図の等高線、または航空写真から読み取る写真判読などの手法では、丘陵地などの谷頭部の微細な地形を読みとることは困難である。そのため調査対象の微地形分類を行うにあたって TS (図 3-7) を用いて地形測量を行った。地形測量には 3.2.3. 次いで基準点より谷筋に沿って縦断測量を行った (図 5-2)。縦断測量は原則として水路頭から尾根までを測定し、斜面の傾斜変換点や谷筋方向の変換点などを捉え、また微細な段差などは直接折れ尺で測定し測線に補って行った。そのあと縦断測量点又は基準点より尾根に向かって横断測量を行った。横断測線は谷頭部の傾斜変換線を意識して最大傾斜方向と対応させ、その中のいくつかは 1~2m 間隔で測点を設け、より詳細な横断測線を測定した。このような縦断測量により傾斜変換線をとらえやすくなり、横断測量により斜面の凹型 (谷型, 集水) と凸型 (尾根型, 散水) を識別できる。

斜面の縦断、平面の形状 (凸型, 直線型, 凹型,) の特徴や微細な傾斜変換線の位置、崩壊地形の状態を調査した結果により、田村 (1974, 1996) の微地形分類に従って微地形分類図を作成した (平春, 2010)。

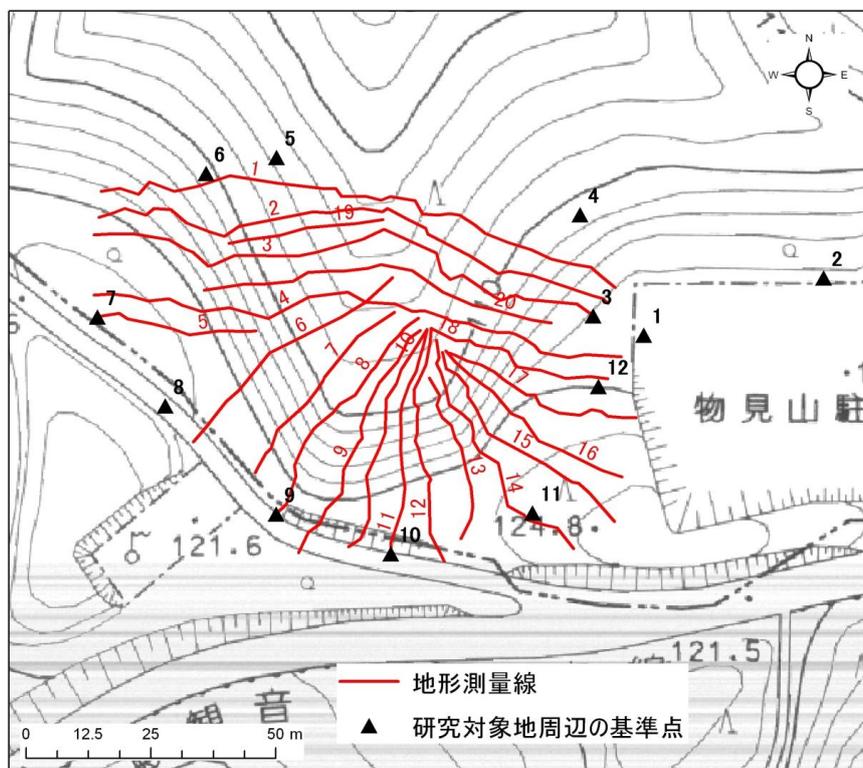


図 5-2 微地形測量用縦断測線

### 5.2.2 土壌調査

調査対象の土壌特性を把握するために、各微地形分類ごとに土壌調査を行った。

土壌断面の記載は、土壌断面の模式的スケッチ、土壌層位の区分、層界の状態、土壌の色調（土色）、土壌構造、石礫の状態、土性、水湿状態、根の有無、堅密度、パイプ孔の位置を記載し行った。

#### ・土壌層位の区分

層位は、土色、土の粒度、石礫の含量、指で押したときの抵抗などの違いによって分類した。層位の種類としては、落葉・落枝などの未分解または分解した植物遺体からなる有機質層である O 層。表層周辺に生成された無機質層である A 層。岩石や堆積物の風化層である B 層。二次堆積物、またはその風化層である BC 層。岩石の物理的風化層、非固結堆積物層である C 層。土壌の下の基盤層である R 層である。

#### ・層界の状態

層界はその深度、形状（平坦、波状）、明瞭度（明瞭、漸移）によって判定した。

#### ・土色

標準土色帖を用いて土壌の色相、彩度、明度を判定した。また何色か色が混在しているときは、その混ざり具合と、それぞれの色調を記載した。

#### ・土壌構造

土壌構成粒子の発達形状を記載した。

#### ・石礫の状態

土壌に含まれる礫（直径 2 mm 以上）鉱物質粒子を細土と区分し、円磨度、礫径平均値、礫径最大値、面積割合での含有量を記載した。

#### ・土性

土塊を指の間でこねて、砂の感触の程度、粘り具合、どのくらい長く細く伸ばせるかなどによって判定した。

#### ・水湿状態

土塊を手で握った時の掌の湿り具合によって判定した。

#### ・根

おおよそ 10 cm 四方の面積あたりに現れた細根の本数で判定した。

#### ・堅密度

プッシュコーン（山中式土壌硬度計）を用いて各層位ごとに 1～5 回計測した。またプッシュコーンの使用が困難な場合、指で土塊を捏ねて崩

れる具合から判定した。

### 5.3 微地形分類結果

#### 5.3.1 微地形分類結果

丘陵地では地表物質の移動つまり地形の更新に深く関わる因子として傾斜とならんで傾斜変換点に注目することが重要であるため、この傾斜変換線が斜面地形を区分する境界線とした。この境界線のもとに、調査地における微地形は斜面上部より、頂部斜面(Crestslope: Cs)、上部谷壁斜面(Upper sideslope: Us)、下部谷壁斜面(Lower sideslope: Ls)、谷頭斜面(Head sideslope: Hs)、谷頭凹地(Head hollow: Hh)、水路(Channelway)、麓部斜面(Footslope: Fs))に区分ができた(平春, 2012, 図 5-3)。

頂部斜面は、尾根線に沿って分布し、幅 1m程の遊歩道が通っており、きわめて軽微な地形改変が行われている。垂直・水平断面形はともに凸型を示し、平均傾斜約 10°の非常に緩い斜面である。

上部谷壁斜面の垂直・水平断面形はともに凹型を示し、平均傾斜角は20°ぐらい、上方の頂部斜面とは明瞭な遷急線で区分される。東側の上部谷壁斜面は、西側よりやや広く、両方とも傾斜角が同じぐらい。

谷頭斜面は上部谷壁斜面に囲まれており、傾斜角は20°~30°ぐらい、断面形は凹型を示し、やや不明瞭な傾斜変換線によって区切られている。

谷頭斜面の下に三つの谷頭凹地がみられ、5m程の小規模な崩壊地の滑落崖がみられ、谷頭斜面と明瞭な傾斜変換線で区分されている。この場所では、水の侵食作用が激しくなり、傾斜角が50°を超える急斜面もみられる(図5-4, 図5-5)。

上部谷壁斜面と谷頭凹地の下方には明瞭な遷急線を境にして下部谷壁斜面が位置する。下部谷壁斜面の断面形は直線型またはやや凹型を呈し、平均傾斜 30°以上と急傾斜な斜面である。また 10m程の崩壊地の滑落崖が低位遷急線に沿って分布していることや、その下方に幅、深さともに 1~2m程の水路と接していることから、崩壊や侵食の影響を最も受けやすい非常に不安定な斜面である。

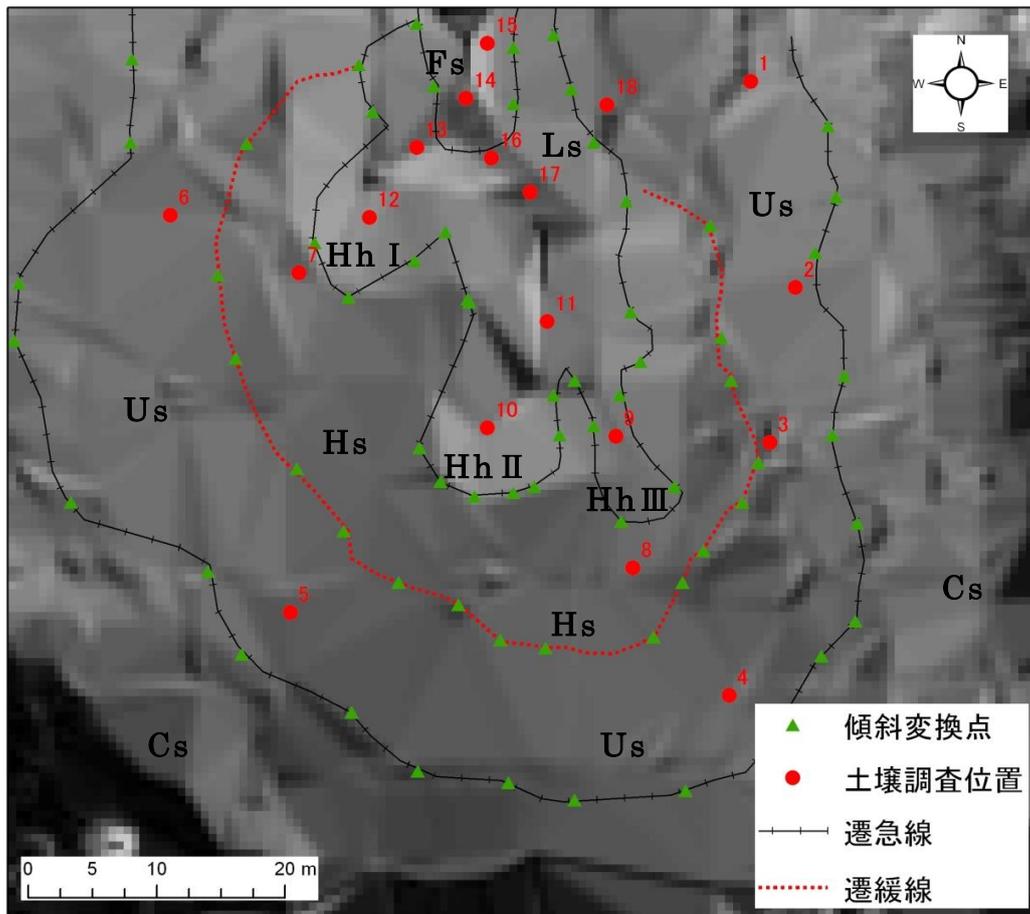


图 5-3 微地形分類図



图 5-4 谷頭凹地 (Hh I)



図 5-5 谷頭凹地 (Hh II)

### 5.3.2 土壌調査結果

調査地域の上部谷壁斜面で 7 ヲ所，谷頭凹地で 2 ヲ所，下部谷壁斜面（ガリー壁）で 1 ヲ所，水路付近では 8 ヲ所の計 18 ヲ所設けた（図 5-3）。調査地域の斜面上部のみ礫層が分布しているといった特有の地質分布より，斜面上部からの土砂の移動をみるために，特に礫に注目した土壌断面の観察を行った。その結果を，土壌調査結果によると頂部斜面では，物見山礫層を母材とする残積成の厚い B 層を持つ褐色森林土が形成され，B 層は比較的安定している。上部谷壁斜面の土壌は A 層 B 層に頂部斜面の B 層に起源を持つと考えられる礫が見られることと A 層が極めて薄いことから，斜面に沿って土壌物質の移動があると推定され，安定性が弱いと考えられる（図 5-6）。谷頭斜面では土壌層がもっと薄くなり，不安定性が増え，水の浸食作用による土壌物質の移動がより速くなっている（宮下，2007；平春，2012；佐藤，2012）。

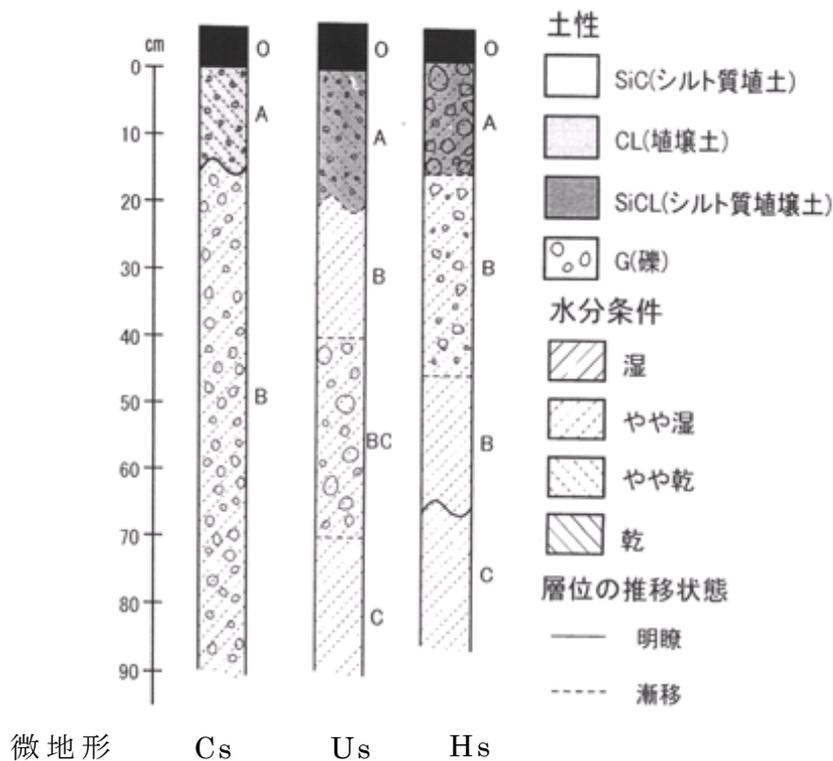


図 5-6 土壌調査結果

#### 5.4 考察とまとめ

本章では、現地測量方法により、傾斜の変換線を見つかり、微地形の区分を行った。土壌調査と微地形分類により以下何点を明らかにした。

頂部斜面は平均傾斜角が約 $10^{\circ}$ の比較的緩い斜面であり、礫層とシルト岩層の地質境界より礫層によって構成されている。物見山礫層を母材とする残積成の厚いB層を持つ褐色森林土が形成され、B層は比較的安定している。

上部谷壁斜面は、傾斜角が約 $20^{\circ}$ ぐらい、また、東側の上部谷壁斜面、西側の上部谷壁斜面に分けた場合、東側斜面がやや広く、傾斜角が $20^{\circ}$ ぐらいと同様な傾斜であった。面積は他の微地形に比べてやや広く、調査範囲外であるが谷頭部下流に向かってずっと続いている。土壌はA層B層に頂部斜面のB層に起源を持つと考えられる礫が見られることとA層が極めて薄いことから、斜面に沿って土壌物質の移動があると推定され、安定性が弱いと考えられる。

谷頭斜面は上部谷壁斜面に囲まれ、谷頭凹地の上部に位置し、傾

斜変換線で区分されている。この土壌は、上方の上部谷壁斜面に比べて礫の含有量が多いことが特徴で、それぞれ深度90cm, 57cmまで観察を行ったがシルト岩の基盤層、その風化層などはみられなかった。A層は比較的厚く、土層全体に礫が出現し、その量も上部谷壁斜面などの礫の含まれている層と比べて多かった。

谷頭凹地は、谷頭斜面の下に位置し、下部谷壁斜面とつながっている。ここで、傾斜角が60°を超える急斜面もみられ、水の侵食が激しいことがわかった。ここ土壌は、侵食が激したため、土壌層が薄く、A層は10cm未満、BC層には礫などみられる。

下部谷壁斜面は、平均傾斜30°以上と非常に急峻で、他の微地形の中でも比率が小さい。水路に沿って、上部谷壁斜面、谷頭凹地との境界線である低位遷急線が分布している。西側斜面での低位遷急線上方には小規模な地すべりの滑落崖と移動体が見られ、その移動体を切るようにして低位遷急線が分布している。また調査範囲外であるが下流より遷急線を伸ばしてくるとこの地すべり滑落崖の上端にぶつかり、このことからこの地すべりは遷急線に沿った滑落崖として滑ったものと想像がつく。土壌は、それぞれ深度7cm, 17cmに基盤岩層、C層が出現し、ともにB層はみられず非常に浅い土層であることが考えられる。平均傾斜30°以上と急峻であること、古低位遷急線に沿う地すべり滑落崖、東側の下部谷壁斜面の土層においてB層がなく土層が非常に薄いことなどから、不安定な斜面であることが分かった。

## 第 6 章 LIDAR データによる微地形分類

### 6.1 既往の研究

地表の形態を精確に把握することは地形学の基礎データとして重要である。以前は紙の地形図が重要な情報源であったが、測量技術やコンピュータ技術の発達により、DEM を使用し地表面の地形をデジタル化して表現し、データを扱う事が多くなってきた。DEM は写真測量などリモートセンシング技術により作成できるため、現場に入りにくいなど現調査や測量できない場所の地形を把握することができる。また、DEM を利用して地形の形態を正確に表現すると共に、傾斜角の計算、傾斜方位の計算、陰影起伏の表現、凹凸度の計算、地すべりの移動量、崩壊量など地形パラメータの計算ができるため、DEM を利用して地形の分類を行うことができ便利である。数百～数十 m 程度の解像度の DEM 地形解析に利用されてきたが（野上，1999），小起伏の地形を把握するために、さらに詳細な解像度の DEM が求められている。つまり、国土地理院からは、全国の 10m 解像度の DEM と一部の地域では 5m の DEM が無償で提供されているが、詳細な微地形を把握するために、さらに高解像度の DEM が必要である。

DEM は現地測量により作成できるが、広域の DEM を作成するには不利であるため、リモートセンシング方法は有効である。写真測量法による地形把握については、林舟ほか（2002）により詳しくレビューされている。写真測量法は主に空中写真や高分解能衛星写真を使用され、森林地域では、樹冠のところを見ているため、精度が落ちることがある。LIDAR データによって取得されたデータから LIDAR DEM を作成することができ、それをを用いた地形解析の研究例も増えつつある（McKean and Roering, 2004 ; Sato and Sekiguchi, 2005 ; Glenn *et al*, 2006）。LIDAR データはレーザーパルスの反射により地上物を測量しているため森林中で透過性があり、もとの写真測量よりもさらに精度が高いことが想定される。

LIDAR データを地形学的に応用するための精度を検討した研究事例として、佐藤ほか（2004）は LIDAR データによる DEM の誤差が 1 m 以下であり、従来のデータと比べて精度が高いという事を明らかにした。

このデータを地形解析に活用した研究事例として Schieidl *et al*(2008), 鈴木ほか (2009), 松岡ほか (2009), 吉野 (2010) は地形の変化量を評価した。従来現地観測が困難である, 植生に覆われている古い崩壊地は空中写真や地形図より判読を行っていたが (例えば, Chigira *et al*, 2004), この方法に比べて高い精度で崩壊地を抽出できることが示された (土支田ほか 2007, Chigira *et al*, 2009; Schuzl, 2007)。また, Booth *et al*(2004) は地すべり地を自動抽出し, Mckean and Roreing (2004), Glenn *et al* (2006), 笠井ほか (2008) の研究により地すべり地を活動度の観点から定量化している。

本章では, 第 4 章で作成した LIDAR DEM を用いて, M 地域 (図 2-1) における微地形分類手法の開発や高度化することを目的とした。この LIDAR DEM は独自のフィルタリング手法より作成され, 現地測量データにより精度検証を行っている。斜面の微地形の解析においては, 田村 (1974) の区分単位を参考し, 横断面の解析方法により傾斜変換線を抽出し, それをもとに微地形の分類を行った (平春, 2010)。

## 6.2 LIDAR データによる微地形分類方法

### 6.2.1 条件検索方法による微地形分類

田村 (田村 1974) の斜面微地形分類手法を参考し, 現地観測により微地形の判読条件をまとめた (表 6-1)。標高と傾斜角, 水路の位置を微地形の判断条件とした。ここで, 標高の閾値は第 5 章の微地形分類結果を参考し決めた。傾斜角の計算は, 以下の式により計算した。

$$s = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{1}{6d_x} \{(Z_{i-1,j+1} - Z_{i-1,j-1}) + (Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1}) + (Z_{i+1,j+1} - Z_{i+1,j-1})\}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{1}{6d_y} \{(Z_{i+1,j-1} - Z_{i-1,j-1}) + (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}) + (Z_{i+1,j+1} - Z_{i-1,j+1})\}$$

式 (1) で,  $S$  は傾斜角,  $Z_{ij}$  は DEM の任意ピクセル ( $i$  行  $j$  列) の標高,  $d_x$ ,  $d_y$  は  $x$ ,  $y$  方向のメッシュ間隔 (本研究では 1m) である。周囲

8つのピクセルの標高値を用いてその中央のピクセルの傾斜角を計算した。

表 6-1 グリッド解析条件

微地形単位	標高	傾斜角	水路
頂部斜面 (Cs)	$\geq 110\text{m}$	$[0^\circ, 10^\circ)$	なし
上部谷壁斜面 (Us)	$\geq 110\text{m}$	$[10^\circ, 20^\circ)$	なし
谷頭凹地 (Hh)	$[100 \sim 110\text{m})$	$[20^\circ, 30^\circ)$	なし
下部谷壁斜面 (Ls)	$\leq 100\text{m}$	$[30^\circ, 90^\circ)$	なし
麓部斜面 (Fs)	$\leq 110\text{m}$	$[30^\circ, 90^\circ)$	ある
水路 (C)	$\leq 110\text{m}$	$\geq 20^\circ$	ある

調査地域では、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 、 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 、 $6\text{m} \times 6\text{m}$ 、 $8\text{m} \times 8\text{m}$ のグリッドを作成し、その中の傾斜角の標準偏差値を統計した(図 6-1)。グリッドサイズが6mの傾斜角を用いて表 6-1の条件によりグリッド解析を行った。

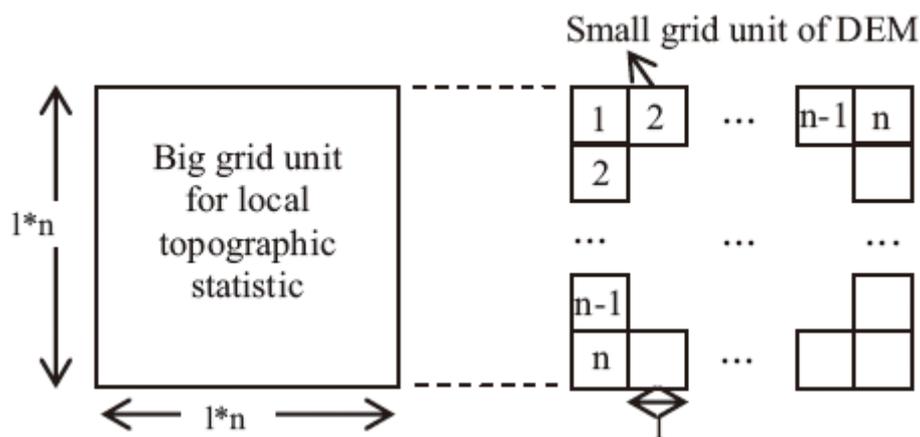


図 6-1 グリッド解析イメージ

### 6.2.2 断面図の解析による微地形分類

現地測量用の縦断測線(図 6-2)のもとに、標高と傾斜角を抽出し断面図を作成した。この縦断測線は水路を中心とし谷から尾根まで放射状に作成している。水路は水文解析より抽出した。この断面図から指定区間(Ri)の傾斜角の最大値と最小値の差を傾斜角移動差(MSD)とし、傾斜変換点を抽出した。計算式は式(2)となる。

$$MSD_{R_i} = Max(S_{R_i}) - Min(S_{R_i}) \quad (2)$$

ここで、 $MSD_{R_i}$  は区間  $R_i$  の傾斜角移動差、 $S_{R_i}$  は傾斜角、 $Max(S_{R_i})$  は空間  $R_i$  の最大傾斜角、 $Min(S_{R_i})$  は空間  $R_i$  の最小傾斜角である。

図 6-2 に示す断面図上の区間  $R$  の定義にあたっては、区間長さ  $L$  は 3~6m に設定した ( $I$  は 1m)。

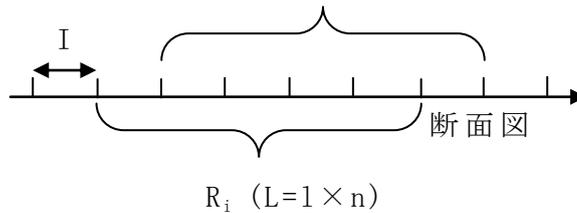


図 6-2 断面図上傾斜角移動差の定義方法

断面図の尾根から麓部に向かって傾斜が急に変わる地点を遷急点とし、急斜面が不連続的に緩く凹地になる地点を遷緩点と識別した。同じ標高区間帯の遷緩点や遷急点を繋ぎ、地形遷緩線又は遷急線を作成する。作成した遷緩線と遷急線を境回線とし、微地形区分を行った (Habura, 2010, 図 6-3)。

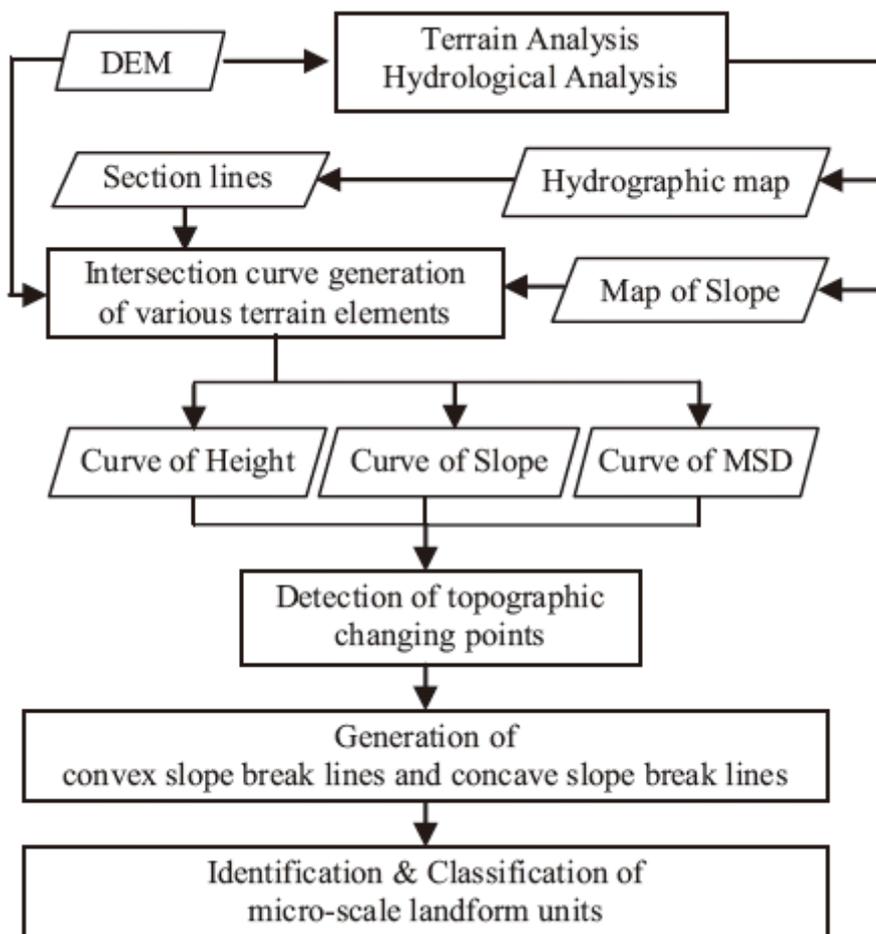


図 6-3 微地形分類フロー

## 6.3 LIDAR データによる微地形分類結果

### 6.3.1 条件検索方法による微地形分類結果

6.2.1 の条件検索方法による微地形分類により分類した微地形図を図 6-4 に示す。この図から、調査地における微地形は斜面上部より、頂部斜面 (Crestslope : Cs), 上部谷壁斜面 (Upper sideslope : Us), 谷頭凹地 (Head hollow : Hh), 下部谷壁斜面 (Lower sideslope : Ls), 水路 (Channelway) と判断した (図 6-4)。

### 6.3.2 断面図解析による微地形分類結果

断面図において計算された MSD の結果を図 6-5 に示す。MSD の変動が  $10^\circ$  を超える場所を傾斜変換点と抽出した。各傾斜変換点を水路から中心とし、近い点をつなげ、傾斜変換線を作成した。この傾斜変換

線を境界線とし微地形を分類した。その結果を図 6-6 に示す。調査地域の微地形は斜面上部より，頂部斜面（Crestslope：Cs），上部谷壁斜面（Upper sideslope：Us），下部谷壁斜面（Lower sideslope：Ls）谷頭斜面（Head sideslope：Hs），谷頭凹地（Head hollow：Hh），水路（Channelway），麓部斜面（Footslope：Fs）に区分ができた。

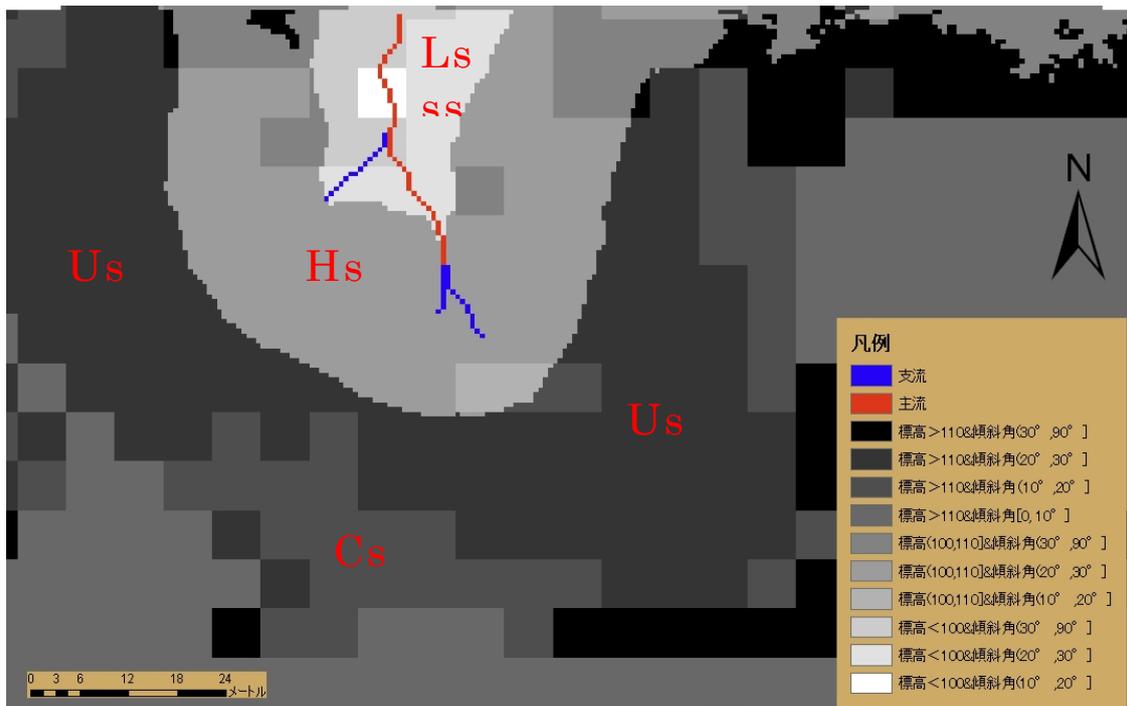


図 6-4 グリッド解析による微地形分類結果

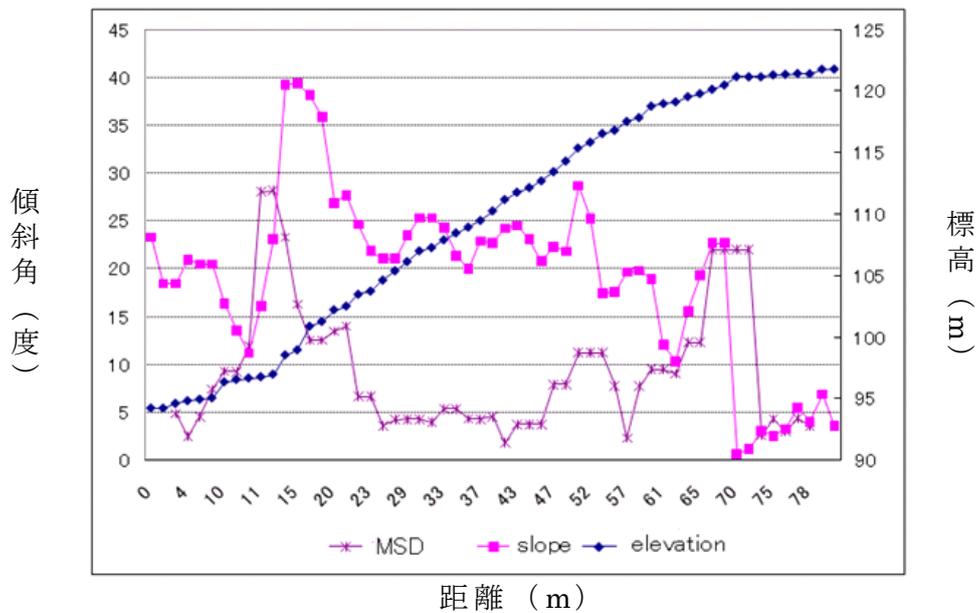


図 6-5 断面図

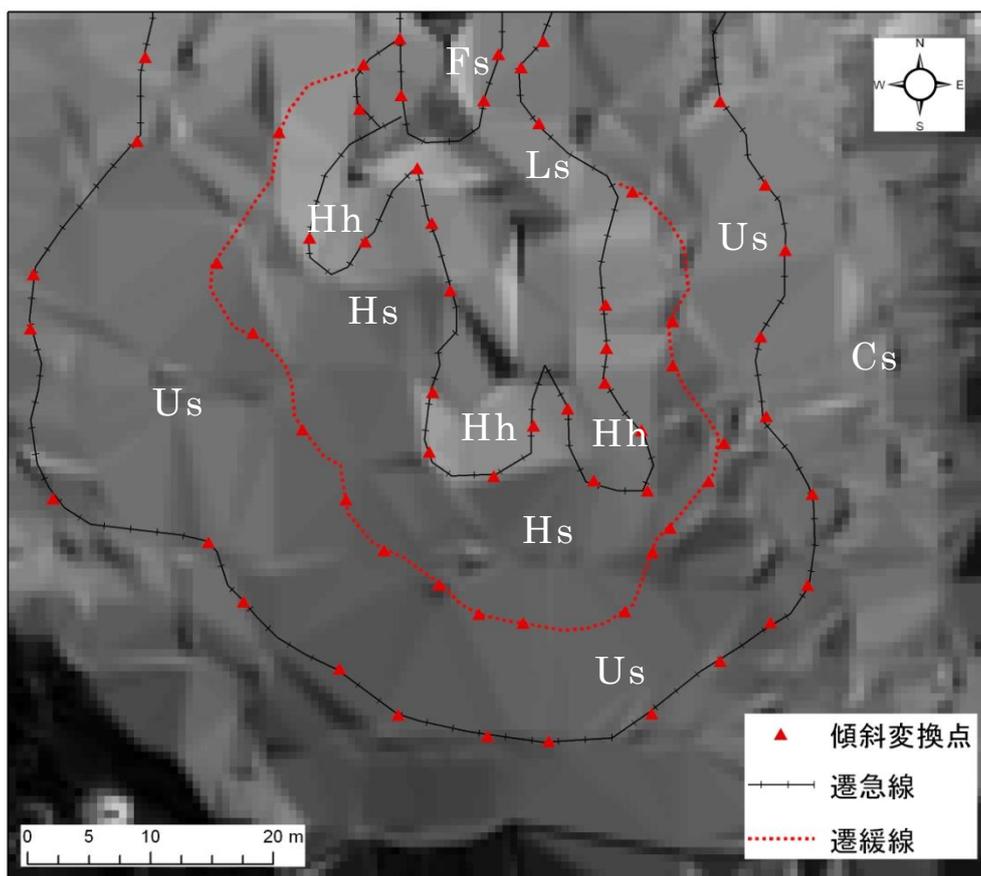


図 6-6 微地形分類図

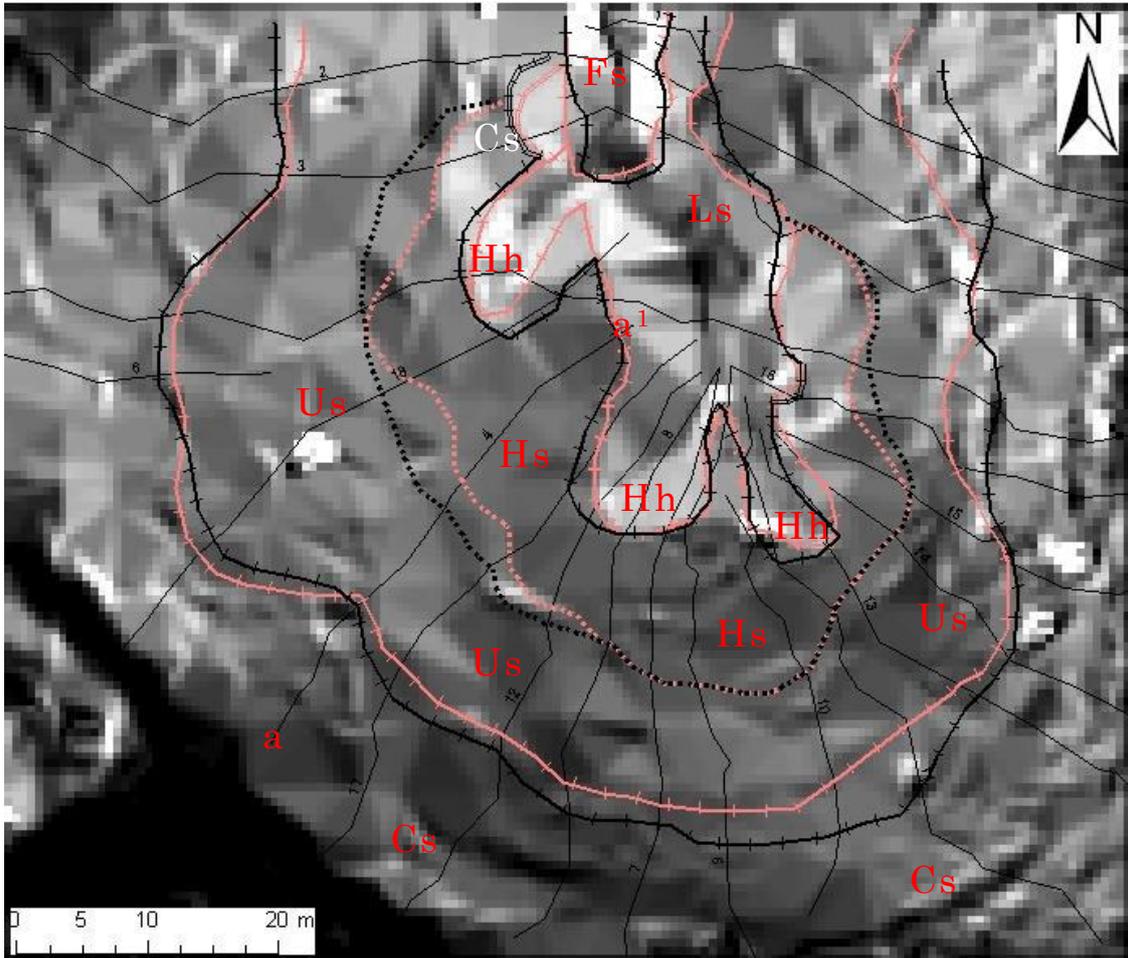
## 6.4 考察とまとめ

### 6.4.1 条件検索方法の考察

条件検索方法では、標高ランク（100m 等高線，110m 等高線）より、微地形の単位がある程度分かるが明瞭化しにくく、精確な境界線を抽出することができなかった。ピクセル単位の傾斜角ではノイズが多く、微地形の判断が難しいため、2m，4m，6m，8m のグリッドないに統計した結果，6m のときは現地測量による微地形と近い結果になった。しかし、この二つの条件より、詳細な微地形の区分することができなかった。

### 6.4.2 現地測量による微地形分類結果との比較

断面図解析により傾斜変換点を利用した遷急線と遷緩線を境界線とした区分した微地形と現地測量による微地形の比較を行った（図 6-7）。



- |       |       |          |
|-------|-------|----------|
| 凡例    | ——+   | 遷急線_DEM  |
| ..... | ——+   | 地すべり_DEM |
| ——+   | ..... | 遷緩線_DEM  |
| ——+   | ——    | 横断測線     |
| ..... | ..... | 遷緩線_TS   |
| ——+   | ——+   | 地すべり_TS  |
| ..... | ——+   | 遷急線_TS   |

図 6-7 現地測量による微地形と断面図解析による微地形の比較

図 6-7 によると、同じ縦断測線 (aa<sup>1</sup> 断面, 図 6-8) では、現地測量で得た傾斜変換点と断面解析で得た傾斜変換点の平面距離は 0.6~1.5m, LIDAR DEM の解像度よりやや大きい結果になった。傾斜変換線の位置と形状は似ていることより、断面図解析手法は微地形分類には有効と判断される。

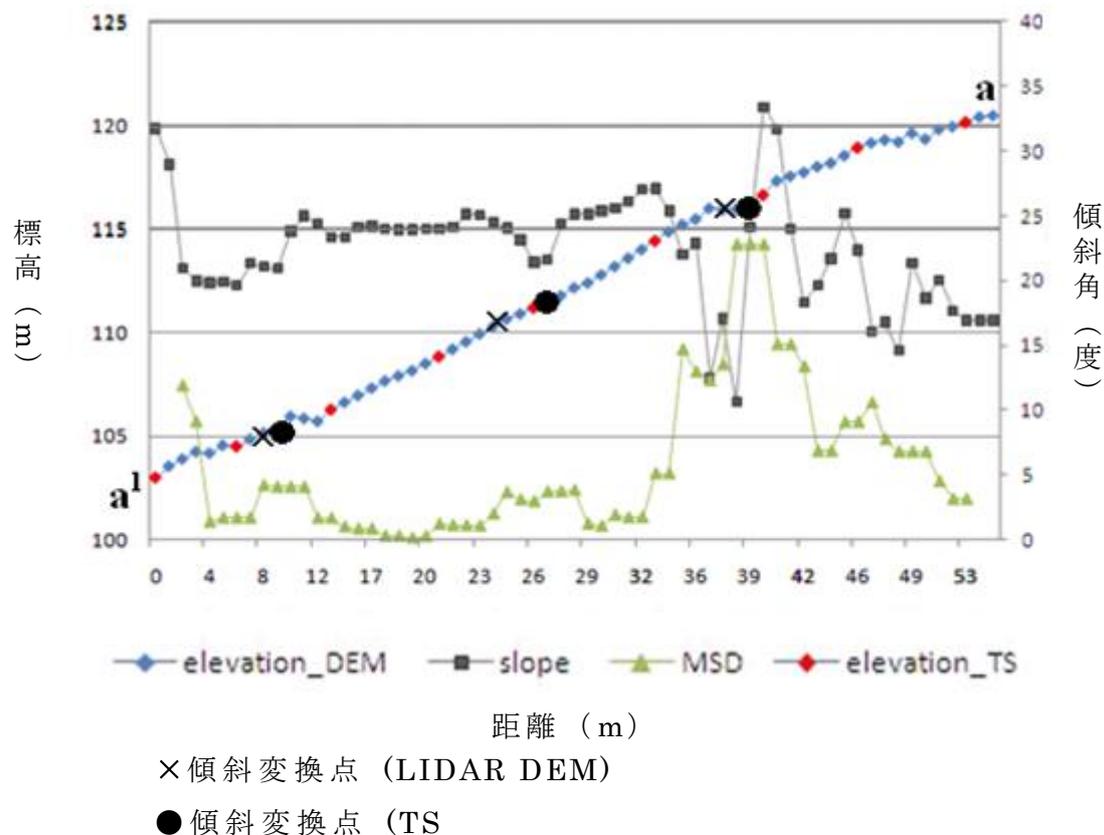


図 6-8 aa<sup>1</sup> 断面図

#### 6.4.3 LIDAR DEM による地形表現と地形図との比較

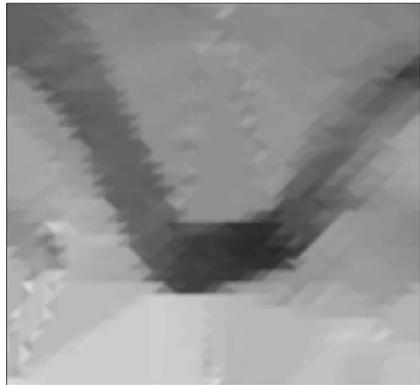
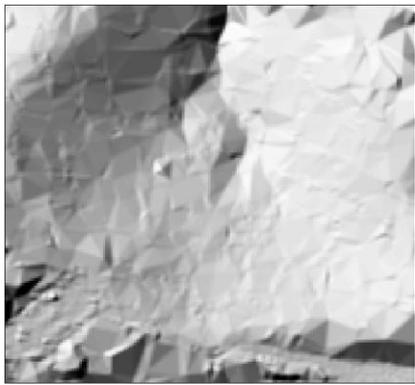
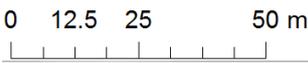
1/2000 の地形図から作成した DEM による等高線，陰影起伏図と傾斜角図と LIDAR DEM と比較した(表 6-2)。表 6-2 によると LIDAR DEM から計算された傾斜角，陰影起伏図など地形表現は 1/2000 の地形図より，詳細な地形を読み取れることがわかる。

#### 6.4.4 まとめ

本章では，第 4 章で作成した LIDAR DEM を用いて丘陵地における微地形分類する方法を検討した。その結果を現地測量による分類された微地形と比較し，ほぼ一致していることから，LIDAR データは詳細な微地形分類に適きであることがわかった。また，断面図解析方法による微地形分類結果が現地測量による結果と一致していることから，この方法は DEM から微地形分類するには有効であることを明らかにした。従来は現地測量や空中写真判読は微地形分類の主な手段であったが，本研究の

手法により，最も効率よく広域の微地形を分類できると考えられる。

表 6-2 地形図 DEM と LIDAR DEM の比較

	1/2500 の地形図による DEM	LIDAR DEM
等高線 等高線間 隔 2m		
陰影起伏 図 光源：北西 高さ：3 倍 強調		
傾斜角図	 0 12.5 25 50 m 	 0 12.5 25 50 m 

## 第 7 章 微地形と植生の関係解析

### 7.1 既往の研究

現在，過去に失われた自然を積極的に取り戻すことを通じて生態系の健全性を回復することを直接目的とした自然再生事業，里山再生などに代表される自然と共生する社会の実現は重要な課題となっている（環境省 2003）。しかも，その失った環境をどこまで回復したらいいのか，現存植生（二次林など）を保全するのか潜在植生に取り戻したほうがいいのかなど問題が上げられる。以上の問題を解決するには土地と環境要素の関係を定量的に評価し，土地のもつポテンシャルと環境要素との関係の強さを見積もり，関係が強い要素を保全し，自然再生事業のあり方を決定する必要があるものと考えられる。そこで本研究では植生と微地形の関係を調べ，土地のもつポテンシャルとした地形地質と環境要素とした植生との関係を評価することより，関係が強い要素を保全し，関係が弱い要素を計画する必要があると考えられる。

いままで多くの植生と微地形の関係評価に関する既往の研究が行われ（大久保ほか 2002; 北川ほか 2004; 澤田ほか 2005; 川西ほか 2006），主に微地形条件と土壌地質条件に対する植生の種組成と種多様性分布を調べた研究事例が多かった。同じ地形地質条件に対する植物は同じ生理特徴と生長特徴を持ち，それが植物の生活型であると考えられる。生活型は植物の外部形態を類型的にとらえたものであると言われ，生物の生理的な機能と外部形態，構造は周囲の環境との長い年月にわたる相互作用のもとにつくりだされたものであるため，生活型は環境条件を反映していると考えられる（沼田真 1947）。本研究では，M 地域における第 6 章で作成された微地形分類図と植生の関係評価をするには植物生活型を利用することにした（平春，2012）。

### 7.2 微地形と植生の関係評価方法

#### 7.2.1 植生調査

調査域中の植生を把握するために 2010 年 5 月 17 日に植生調査を行った。植生調査は調査域の片方斜面にコドラート(30m×60m)を設置して，

頂部から水路まで各微地形単位ごとに毎木調査を行い、樹種、胸高直径、樹高、位置を測定した（図 7-1）。樹木の位置は LIDAR データの精度検証用で設置した基準点を使用し、TS を利用して測量した。

### 7.2.2 植生生活型の分類

生活型とは植物の外部形態を類型的にとらえたものをいう。生物の生理的な機能と外部形態、構造は周囲の環境との長い年月にわたる相互作用のもとにつくりだされたものであるため、生活型は環境条件を反映していると考えられる。

各種の生活型の判定は基本的に図鑑（三上常夫 2009；茂木，2000；苅住昇，1987）をもとにして毎木調査で観測された樹種毎に以下の生活型について調査し、樹木の生態的特性した。各樹種の生活型は以下のとおりとなる。

- ・ 葉の生存葉節：常緑，夏緑
- ・ 植物体の形：高木，低木，亜高木，中高木，藤木
- ・ 受粉形式：虫媒，風媒
- ・ 種子散布：風散，鳥散，貯食散，重散，自散，水散
- ・ 種子形態：翼果，堅果，毬果，そう果，核果，液果，さく果，豆果
- ・ 根系の形態：水平型，斜出根型，垂下根型
- ・ 垂直分布：浅根型，中間型，深根型
- ・ 水平分布：分散型，集中型，中間型
- ・ 分岐：多岐型，疎放型，中間型
- ・ 細根の多さ：密生型，中間型，疎生型
- ・ 細根の太さ：繊細型，中間型，肥厚型
- ・ 根毛の多さ：密生型，疎生型，中間型
- ・ 稚苗：a 型，b 型，c 型
- ・ 植物体の形：高木 10m 以上，亜高木 5～10m，低木 5m 未満，藤本  
つる性の木本
- ・ 種子散布
- ・ 自散：自力で種子を飛ばすもの
- ・ 重散：重力による落下
- ・ 風散：風による散布一次のようなものも含む。翼や毛によって風に乗るもの。きわめて微細な種子。親固体が風にゆれて種子が放出されるもの

- ・ 食散：種実が動物に食べられて散布一次のものを含む
- ・ 貯食散：食べ残された種子で散布
- ・ 水散：淡水による散布
- ・ ・ 種子形態
- ・ 裂開果：熟すと一定の場所から裂けるもの
- ・ さく果：2心皮以上からなる果実で、心皮の数だけの果片に縦に裂けるもの
- ・ 豆果：1心皮からなる果実で、背腹で縦裂する。マメ科のほとんどがこれである
- ・ 閉果：果実が熟しても一定のところからは裂けないもの
- ・ 堅果：果皮が木質で、種子からよく離れるもの。いわゆるドングリ類がこれである
- ・ そう果：果皮が種皮と合着して分離しないもの。タケ・ササ類がこれに属する
- ・ 翼果：発達した果翼を持つ果実
- ・ 多肉果：中果皮に水分が多く、肉質または液質になるもの。すべて閉果である
- ・ 核果：内果皮がかたい石質（核）になるもの
- ・ 液果：内果皮が石質にならないもの
- ・ 毬果：胚珠は子房に包まれず、種鱗の内側に裸出してつく。胚珠が子房に包まれる被子植物の果実とは性質が異なる
- ・ ・ 根系の形態：根系の発達する部分によって、水平型、斜出根型、垂下根型に区分し、根系の太さ、生育型と組み合わせて形態型とした
- ・ ・ 垂直分布：根系の分布の深さによって根系分布が表層に偏るものを浅根型、やや深くに及ぶものを中間型、心土中に及ぶものを深根型とした
- ・ ・ 水平分布：根系分布の広がり大きいものを分散型、小さいものを集中型、中庸のものを中間型とした
- ・ ・ 分岐：根系の分岐性について多いものを多岐型、少ないものを疎放型、中庸のものを中間型とした
- ・ ・ 細根の多さ：細根の多さの程度によって密生型、中間型、疎生型とした
- ・ ・ 細根の太さ：細根の平均的な太さで平均直径 0.3mm 以下を繊細型、0.3~0.5mm を中間型、0.5mm 以上を肥厚型とした

- ・根毛の多さ:いちじるしく多いものを密生型,少ないものを疎生型.  
中庸の多さを中間型,きわめて少ないか不明のもの突起状のものをふくめて不明型とした
- ・稚苗:主根が細長く,側根がやや長いものを a 型,主根が太く,側根がきわめて短いものを b 型,主根が短く,側根が長いものを c 型とした

### 7.2.3 微地形と植生の関係解析

微地形と植生の関係解析には,微地形単位に対応する樹種の持つ生活型を明らかにすることが必要である。そのため,樹種にもつ同じ生活型を調べた結果をクラスに分ける必要がある。本研究では, TWINSPAN (two-way indicator species analysis, 二元指標分析) を用いて現地調査により調べた各樹種の生活型と微地形の関係解析を行った。TWINSPAN の FORTRAN プログラムが Hill (1979) によって与えられている。TWINSPAN は植物群落・生物群集の種組成の分析に使われ, クラスタ分析が個々の対象から出発して似たものを順にグループにしていくのと反対に, 全体を繰り返し分割してグループを作り出すという手順をとる。全体をうまく分割するために TWINSPAN では, 序列化手法の一つである反復平均法を利用している。序列化により, データ全体の傾向をもっともよく表わす傾向線(第一軸)を求め, サンプルとこの上に並べた上で, その中央で 2 分することで, サンプルを 2 つのグループに分ける, というのが基本の手順になる。

以下に TWINSPAN における計算手順を具体的に記す。

① 7.2.2 でまとめた出現した種のアバンダンス(出現数量, 個体数, 被度, 優占度, 総重量などで表される)をいくつかの階級に分けるための“pseudospecies cut level”を設定する。例えば, 調査結果が出現した種の個体数によって構成されていた場合, その個体数によっていくつかの階級に分ける。McCune & Meffod の初期設定では, cut levels は 0, 2, 5, 10, 20 に設定されている。この場合, 0, 0 を越えて 2 未満, 2 以上 5 未満, 5 以上 10 未満, 10 以上 20 未満, 20 以上, の 6 つの階級が用意される。③ 以下の計算では, この“pseudospecies cut level”が意味を持つ。pseudospecies について, ここで説明する。これは, アバンダンスが多い種を少ない種と区別するために使うもので, 1 つの種に対して低位から高位の pseudospecies を設定した上で, アバンダンスの少ない

種では低位の *pseudospecies* しか出現したことにしないが，アバンダンスの多い種では高位の *pseudospecies* まで出現したことにする，というシステムである。こうすることによって，「あるーなし」の形のデータによって，種のアバンダンスをある程度表現できることになる。デフォルトの場合，1つの種は最大で5つの *pseudospecies* によって記述される。例えば，鳥類の調査結果で，シジュウカラが25個体記録されたサンプルがあるとすると，このサンプルでは，シジュウカラ 1ーシジュウカラ 5までのすべての *pseudospecies* が出現したことになる。アオジが4個体出現したサンプルでは，アオジ 1，アオジ 2の2つの *pseudospecies* が出現したことになるが，アオジ 3ーアオジ 5の3つの *pseudospecies* については出現しなかったことになる。

②反復平均法を適用する。第1軸のサンプルスコアを用いてサンプルを序列化する。全てのサンプルのスコアの平均を計算し，個々のサンプルについて，サンプルスコアが平均より大か小かによってサンプルを2分する。

③どちらかのサンプルのグループに特徴的に出現する種（正確には *pseudospecies*，以下同様）を“*differential species*”と称し，この出現の状況に基づきサンプルの分割をやり直す。出現した種が *differential species* であるか否かは，*Preference score* により判断される。これは，種が，2つのグループのそれぞれに何回出現したかを数えた上でグループごとに出現頻度（出現回数／グループに含まれるサンプルの数）を計算し，グループ間で出現頻度にどれだけ開きがあるかを示すものである。一方のグループにおける出現頻度が他方のグループにおける頻度の3倍以上の種では，*Preference score* の絶対値が1になる（符号は，どちらのグループによく出現するかによって変わる）。また，一方のグループにおける出現頻度が他方のグループにおける頻度の2倍以上の種が *differential species* となる。*Differential species* だけを対象として *preference score* の平均値をサンプルごとに計算し，新たなサンプルスコアとする。

④③の段階で得られたサンプルスコアが正負のいずれであるかによりサンプルを2分する。この分割をできるだけ少ない数の種のあるなしで最もよく説明できるよう，*indicator species* を決定する。*Indicator species* は結果を解釈しやすくするためのもので，分類の結果には関係しない。

⑤得られたそれぞれのグループにおいて，グループのそれ以上の分割を禁止する条件が満たされていなければ，2) - 4) の作業を繰り返す。デフォルトの設定では，1つのグループに含まれるサンプルの数が5未満になると，グループの分割を停止する。

⑥サンプルの分類が終了した後，サンプルと種を入れ替えて同様の計算を行い，種の分類を行う。

⑦サンプルと種の分類の結果を二進木に表現したときの順序を元にしてデータ表の並べ換えを行う。データとして，Pseudospecies の階級の値を書き込んで，テーブルを完成させる。

TWINSpan の解析には PCORD ソフトを使用し以下のデフォルト設定を用いた。

Cut levels (分割基準) :

0.0000      2.0000      5.0000      10.0000      20.0000

Options:

Minimum group size for division = 3

Maximum number of indicators per division = 6

Maximum number of species in final table = 200

Maximum level of divisions = 5

## 7.3 微地形と植生の関係評価結果

### 7.3.1 植生調査結果

植生調査結果を位置情報により，微地形分類図と重ねることができた(図 7-1)。まとめた結果によると頂部斜面，上部谷壁斜面上部では主にヤマザクラ，コナラ，アカマツの高木層が構成し，ヒサカキ，アオハダ，トネリコの低木層が構成している。上部谷壁斜面下部では樹木の本数が比較的減っている。谷頭ではアオハダ，シロダモ，ウラゲエンコウカエデ樹種があり，下部谷壁斜面ではアオハダ，シラカシ，アラカシの樹種があった(図 7-2)。

### 7.3.2 植生生活型

7.3.1 の植生調査に表れた樹種に対して，7.2.2 で述べた植生生活型を調べた。その結果を表 7-1 に示す。

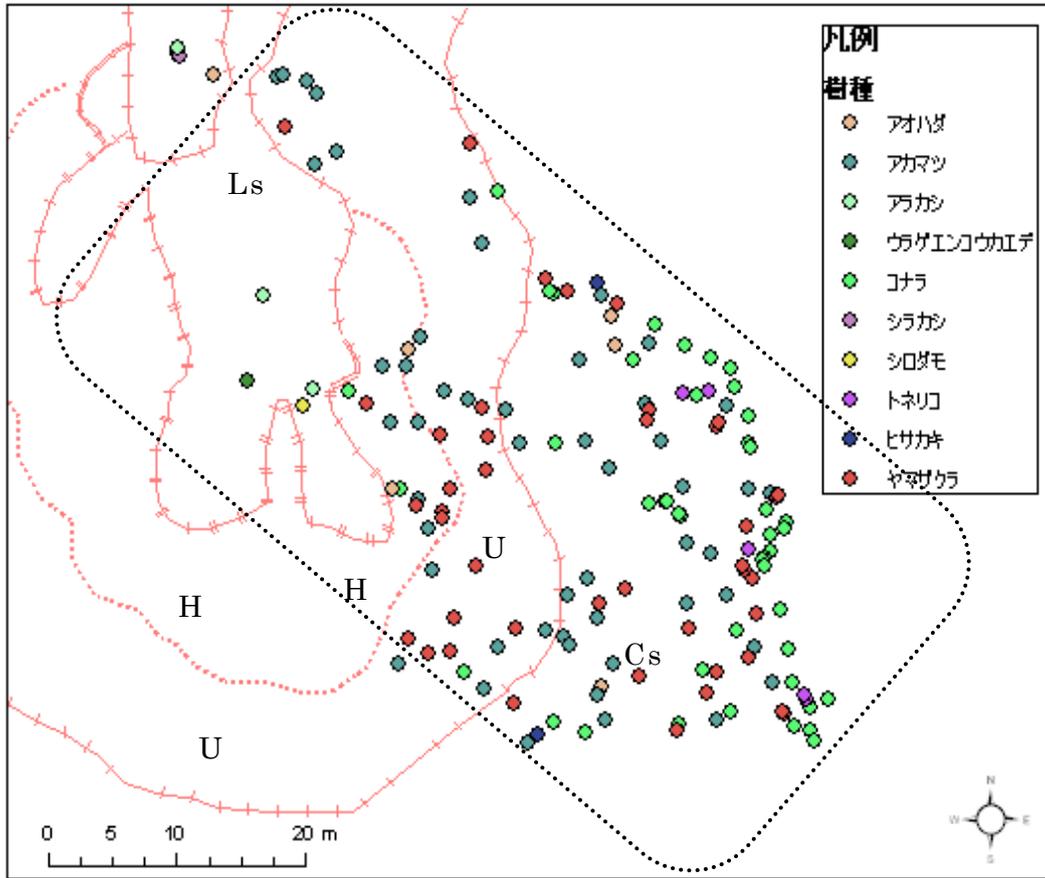


図 7-1 植生調査図

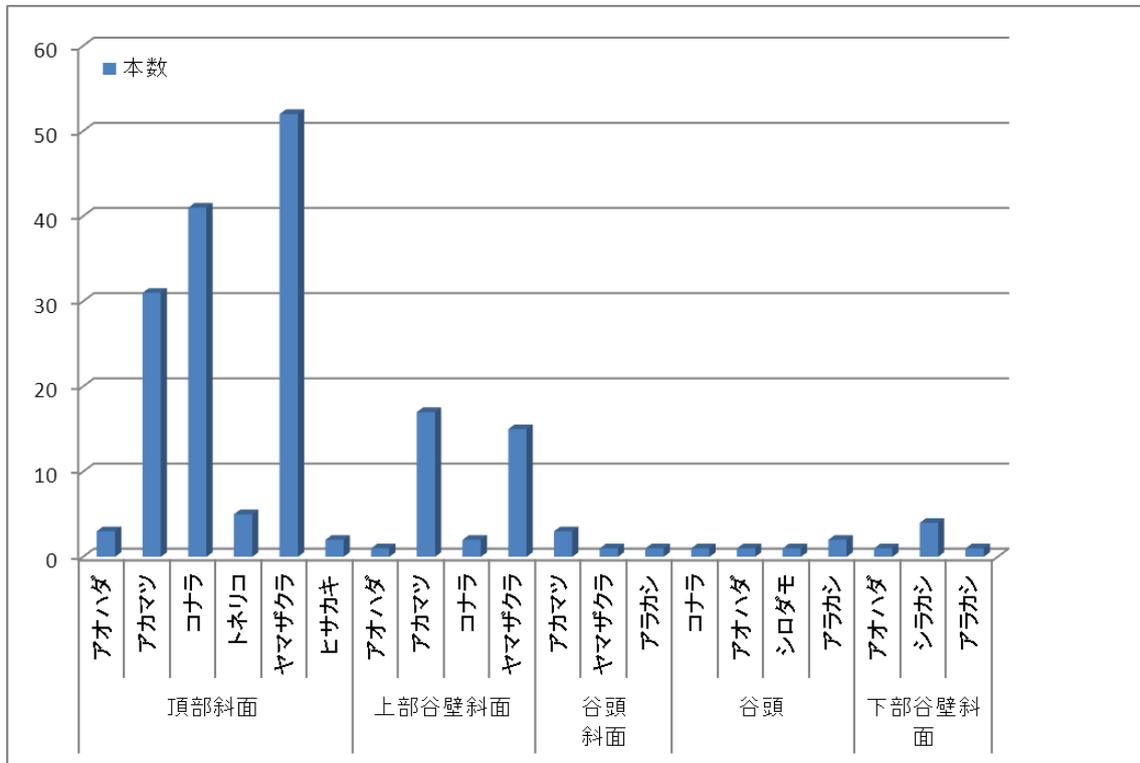


図 7-2 植生調査結果と微地形

表 7-1 植生生活型

	受粉形式	種子散布型	葉序	葉形	葉緑の形	葉の生存葉節	植物体の形	種子形態	根系型	稚苗
アオハダ	風媒	食散	互生	単葉	鋸歯	夏緑	高木	核果	ミズキーモチノキ型	b型
アカマツ	風媒	風散	互生	針葉	細鋸歯	常緑	高木	毬果	マツ-マツ型	a型
アラカシ	風媒	貯食散	互生	単葉	鋸歯縁	常緑	高木	堅果	アカガシ-アカガシ型	b型
コナラ	風媒	貯食散	互生	単葉	鋸歯	夏緑	高木	堅果	クヌギ-コナラ型	b型
シラカシ	風媒	貯食散	互生	単葉	鋸歯	常緑	高木	堅果	アカガシ-アカガシ型	b型
シロダモ	虫媒	食散	互生	単葉	全緑	常緑	高木	液果	アカガシ-タブノキ型	b型
トネリコ	風媒	風散	対生	単葉	鋸歯	夏緑	高木	翼果	カツラ-トネリコ型	c型
ヒサカキ	風媒	食散	互生	単葉	鋸歯	常緑	大低木	堅果	ヒサカキ-ヒサカキ型	c型
ヤマザクラ	風媒	食散	互生	単葉	鋸歯	夏緑	高木	堅果	サクラ-ソメイヨシノ型	a型

根系の形態	垂直分布	水平分布	分岐	細根の多さ	細根の太さ	根毛の太さ	根回しによる発根性	根系の支持力
中・大径・垂下根型	浅根型	集中型	中間型	密生型	中間型	不明型	良好	小
大径・垂下根型	深根型	分散型	疎放型	疎生型	肥厚型	密生型	つめて不良	大
中・大径・垂下根型	中間型	集中型	多岐型	疎生型	繊細型	密生型	つめて不良	大
中・大径・垂下根型	深根型	集中型	中間型	疎生型	繊細型	疎生型	良好	大
小・中径・垂下根型	中間型	集中型	多岐型	疎生型	繊細型	疎生型	不良	大
中・大径・垂下根型	中間型	中間型	疎生型	中間型	肥厚型	不明型	良好	小
中・大径・垂下根型	深根型	中間型	疎生型	密生型	繊細型	疎生型	つめて良好	大
小・中径・水平根型	浅根型	集中型	疎放型	密生型	繊細型	不明型	つめて良好	小
中・大径・斜出根型	中間型	中間型	中間型	中間型	肥厚型	疎生型	良好	中

### 7.3.3 微地形と植生の関係解析

植生生活型のまとめ表（表 7-1）を TWINSpan の入力データとしを表 7-2 のように整理した。このデータを使って、TWINSpan を用いて植生と微地形の関係評価を行った結果を表 7-3 に示す。第 5 章での土壌調査結果と微地形を図 7-4，表 7-4 にまとめた。その結果，頂部斜面とアカマツ，アオハダの樹木が同じグラフに分けられ，生活型が風媒，垂下根型，深根型，a 型といった特徴があった。垂下根型は浅い土壤では根系の十分な発達が発達して生長不良となるため，根系が発達できる土壤条件が必要である。第 5 章の対象地域における土壌調査によると，頂部斜面では土壌層が 1m ぐらいまで C 層が見られなかった。これは根型が垂下根型，深根型の樹木生長しやすい土壤条件と一致している。上部谷壁斜面まで B 層の厚さが段々少なくなり，90cm ぐらいの厚さで C 層が見られている。毎木調査によるとこの場所では樹木の本数が頂部斜面よりかなり少ない，主にヤマザクラ，コナラ，アカマツの高木層が構成し，ヒサカキ，アオハダ，トネリコの低木層が構成している。生活型が風媒，斜出根型貯食散であった。貯食散は種多様性の高い場所におい

て、効率よく種を維斜出根型持できるものであり、深い土壌層が必要である。この土壌条件が現地観測の結果とほとんど一致している。谷頭斜面ではシロダモ、ウラゲエンコウカエデアオハダ、シラカシ、アラカシの樹種があった。根型が斜出根型、中間型であり、土壌層が薄い（70cmのところからC層が現れている）、更新が早い不安定な土壌条件でも生存できる型である。また、水路の近い場所には2本（アラカシとアオハダ）樹木があったのは水の作用で谷頭御凹地から流れて来たか地すべりの作用で下部谷壁斜面から滑って入ってきたと考えられる。

表 7-2 TWINSPAN 入力データ

9 species 36 stand										
樹種	Q 高木	Q 低木	Q 大径	Q 中径	Q 小径	Q 水平根型	Q 斜出根型	Q 垂下根型	Q 浅根型	Q 中間型
アカマツ	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
コナラ	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
シラカシ	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
アラカシ	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
シロダモ	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
ヒサカキ	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
ヤマザクラ	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
アオハダ	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
トネリコ	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0

Q 深根型	Q 分散型	Q 集中型	Q 中間型	Q 多岐型	Q 疎放型	Q 中間型	Q 密生型	Q 中間型	Q 疎生型
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1	0	0	1

Q 繊細型	Q 肥厚型	Q 密生型	Q 疎生型	Q 不明型	Q きわめて良	Q 良好	Q 不良	Q きわめて不	Q 小
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0

Q 中	Q 大	Q きわめて大	Q a型	Q b型	Q c型
0	1	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0

表 7-3 TWINS PAN による解析結果

生活型	樹木種名NO.									
	1	8	2	3	5	4	6	7	9	
毬果	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0
分散型	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0
a型	1	1	-	-	-	-	-	-	-	0
堅果	-	1	1	1	1	-	-	-	-	1
多岐型	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1
疎生型	-	1	-	1	1	-	-	-	-	1
不良	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1
風媒	1	1	1	1	1	-	-	1	1	10
高木	1	1	1	1	1	1	-	-	-	10
貯食散	-	-	1	1	1	-	-	-	1	11
疎生型	1	-	1	1	1	-	1	-	-	11
斜出根型	-	1	1	1	1	1	-	1	-	100
深根型	1	-	-	1	-	-	1	-	-	100
中間型	-	1	-	1	-	-	-	1	-	100
集中型	-	-	1	1	1	-	-	1	1	1010
繊細型	-	-	1	1	1	-	1	-	1	1010
b型	-	-	1	1	1	1	-	1	-	1010
小径	-	-	-	-	1	-	-	-	1	1011
垂下根型	1	1	-	1	1	1	1	1	-	1011
中間型	-	-	1	-	1	1	1	-	-	1011
大径	1	1	1	1	-	1	1	1	-	110
中間型	-	1	-	-	-	1	-	-	-	110
密生型	1	-	1	-	-	-	1	1	-	110
肥厚型	1	1	-	-	-	1	-	-	-	111
風散	1	1	-	-	-	-	1	1	1	10
中径	-	-	1	1	1	1	1	1	1	10
良好	-	1	-	1	-	1	-	1	1	10
疎放型	1	-	-	-	-	1	-	-	1	110
虫媒	-	-	-	-	-	1	1	-	-	111
食散	-	-	-	-	-	1	-	-	-	111
中高木	-	-	-	-	-	-	1	-	-	111
低木	-	-	-	-	-	-	-	1	1	111
核果	-	-	-	-	-	-	1	1	1	111
液果	-	-	-	-	-	1	-	-	-	111
水平根型	-	-	-	-	-	-	-	-	1	111
浅根型	-	-	-	-	-	-	-	1	1	111
密生型	-	-	-	-	-	-	1	1	1	111
中間型	-	-	-	-	-	1	-	1	-	111
不明型	-	-	-	-	-	1	-	1	1	111
c型	-	-	-	-	-	-	1	-	1	111
	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
	0	0	1	1	1					

表 7-4 微地形と植生の関係

微地形	TWINSPAN により分類された 樹種と生活型		現地調査による樹種
	樹種	生活型	
頂部斜面	アカマツ アオハダ	風媒, 高木, 肥厚型 風散, 垂下根型, a 型	コナラ, トネリコ ヤマザクラ, ヒサカキ
上部谷壁斜面	コナラ シラカシ シロダム	風媒, 高木, 貯食散 疎生型, 斜出根型 繊細型, b 型	アオハダ, アカマツ ヤマザクラ
谷頭斜面 谷頭 下部谷壁斜面	アラカシ ヒサカキ ヤマザクラ トネリコ	斜出根型, 中間型 密生型, 低木, c 型	アカマツ, コナラ アオハダ, シロダム

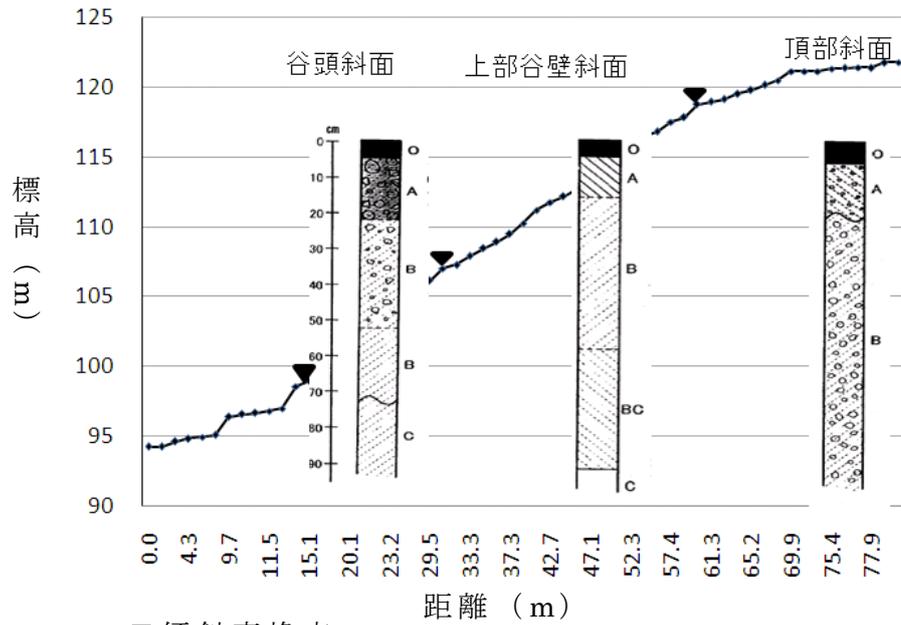


図 7-3 研究対象地域の微地形と土壌

## 7.4 考察とまとめ

本章では、研究地域における植生と地形の関係解析を行った。まず、研究地域における毎木調査を行い、樹種、DBH、樹木の位置、樹高を測定した。次に、樹種と樹木の位置情報を利用し、その対応の地形条件を調べ、微地形ごとに分類した。そのあと、各樹種の植生生活型を調べ、TWINSpanを用いてグループ化した。最後に、TWINSpanを用いて微地形と樹木植生生活型の関係性を評価し、研究地域における植生と微地形の関係を解析した（平春・後藤，2012）。

本研究で明らかにしたことは以下の通りである。

まず、木本植生の分布は、頂部斜面では本数が多く、標高が低くなるほど、水路に近づくほど本数が少なくなる傾向がある（図 7-2）。その原因は、水路付近では水による侵食が激しく、土壌層が薄くなり木本植物の生存が難しくなる。水路付近に見えた本数少ない樹木は上部谷壁斜面から移動してきた可能性もありうる。また、全体的に調査された樹種が少ないのは、下草刈り管理作業によって廃棄された可能性も考えられる。

次に、TWINSpanにより分類された木本植生の樹種、その樹種の持つ生活型と微地形の関係解析結果からは、微地形の関係性が強い樹種を抽出することができた。頂部斜面ではアオハダ、アカマツの微地形との関係性が強いであると判断された。現地調査によると頂部斜面ではこの樹種以外に表れたコナラ、トネリコ、ヤマザクラ、ヒサカキなどと比べて、微地形との関係性が強い。頂部斜面での植生生活型の特徴として、高木、やや深い土壌層を必要とする垂根型、稚苗の主根が細長く、側根がやや長いものを a 型に分類された。上部谷壁斜面ではやや深い土壌層を必要とする斜出根型、稚苗の主根が太く、側根がきわめて短いものを b 型が分類された。谷頭斜面、下部谷壁斜面では稚苗の主根が短く、側根が長いものを c 型が分類された。この分類特徴は土壌層の分布と一致していることを図 7-3 からわかる。

最後に、以上で述べた植生生活型と微地形との関係を解析することにより、立地環境との関係性が強い樹種を抽出することができ、それが自然再生事業で積極的に保全すべき樹種であることを明らかにした。従来の研究での微地形単位に対応する種組成の分類により解決できなかった立地環境と関係性が強い種を抽出することができた。今回の現地調査域を設置した場所では、下草刈り管理によって低木層が除去されたこと

で、調査された樹種が少なく、低木層と微地形の関係解析が反映されなかったが、植生の生活型特に根系型と土壌層厚さとの関連性を明らかにしたことで、植生と微地形の関係解析の目的に到達できたと考えられる。

残された課題として、下草刈りなど管理作業が行われていない森林での植生と微地形の関係性を解析することより本研究で提案された手法を汎用的に利用することを期待している。

## 第 8 章 結論

本論文は、埼玉県東松山市に位置する岩殿丘陵を対象とし、丘陵地における微地形と植生の関係性を評価し、自然再生に供する情報を推定することを目的とした。微地形の区分には LIDAR データから生成した DEM を使用した。この DEM から傾斜角の変換線を抽出し、微地形の区分を行った。さらに、対象地域における毎木調査を行い、各微地形項目ごとにまとめ、微地形区分に対応する木本植生生活型との関係を解析し、対象地域研究地域の植生と微地形の関係性の評価手法につき検討した。

2 章では研究対象地域の地形地質概況と植生概況を説明した。LIDAR データの透過性を検討するため、下層植生の下草刈り管理を行っている場所としていない場所、二つの小流域を調査地域に設置した。

3 章では、ラジコンヘリ空中写真、現地測量データを使用して、LIDAR データの植生と地形解析に応用する可能性、精度などを検討した。植生管理に応じて分別された下草刈り作業を行っている場所としていない場所で、LIDAR データのレーザーパルスの空間分布と森林の開空度との関係を調べた。森林の開空度はラジコンヘリによる空中写真より樹冠と樹冠の間を分類した結果を使用した。この結果、管理されている場所では樹冠の間から反射するラストパルスが多く、現地測量データと比較した平均誤差が低い。管理されていない場所ではこの結果が逆だった。また、レーザーパルスの地表面からの距離より樹高分布図を作成し、そのレーザーパルスの空間分布を調べ、その透過性から森林の垂直分布状況を把握できた。

4 章では LIDAR データによる DEM を作成するためフィルタリング処理とその精度検証を行った。フィルタリング処理手法は、Kraus らが開発したフィルタリングアルゴリズムに基づき、四分木 (Quad-Tree) 法を用いて、解析対象データの局部特徴を配慮しながら、一定な条件を満たす格子に限り、該当格子を繰返し四等分割し、最終的に階層的なデータモデルを利用した。フィルタリング結果を現地測量による標高データとの誤差を計算し、その精度を検証したところよく一致した。

5 章では現地観察と地形測量、地質調査と土壌調査手法より微地形分類を行った。現地観測には斜面の特等的な傾斜変換点や平面の形状 (凹凸型) などの位置と崩壊地形の状態を調査した。地形測量には、トータルステーションを使用して第 4 章の現地測量用の基準点を利用して、斜

面の傾斜変換点を捉え測量を行った。土壌調査では、水の浸食作用で運ばれる堆積物の厚さが変わり、それより斜面微地形の土壌層が違うためその変換を調査した。調査地域の微地形を頂部斜面、上部谷壁斜面、谷頭斜面、谷頭凹地、下部谷壁斜面などに区分できた。

6章では、第4章で作成したDEMにより微地形を分類する手法を開発し、第5章の結果と比較検討を行った。このDEMより傾斜角を計算し、断面図を作成し、断面上の傾斜の変換点を抽出し、その傾斜変換点をつなげ、傾斜変換線を作成し、斜面微地形の分類を行った。また、現地測量による微地形分類図と比較し、LIDAR DEMによる分類した微地形分類図の精度を検討した結果、よく一致した。

7章では研究地域における植生と地形の関係評価を行った。まず、研究地域における毎木調査を行い、樹種、DBH、樹木の位置、樹高を測定した。次に、樹種と樹木の位置情報を利用し、その対応の地形条件を調べ、微地形ごとに分類した。そのあと、各樹種の植生生活型を調べ、TWINSpanを用いてグループ化した。最後に、TWINSpanを用いて微地形と樹木植生生活型の関係の評価し、研究地域における植生と微地形の関係を明らかにした。

8章ではまとめを示した。LIDARデータで通常ノイズとして扱われてきた樹冠下の森林下部構造は、ラジコンヘリを用い観測した開空度50%以上の場所では下部構造を把握することができ、微地形分類が可能であることを示した。本研究で開発されたフィルタリング方法は、丘陵地における詳細な微地形を分類する精度に十分であることがわかった。毎木調査の結果を利用して植生の地形の関係を把握できる手法につき検討した。この植物と微地形の関係を利用すれば、平時においては、広域的に、管理すべき場所とそうでない場所の分類が可能であり、再生事業において保存すべき場所とそうでない場所を客観的に把握することができる可能性を示すことができた。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり，多くの方々の御助力を頂きました。

まず，立正大学地球環境科学部の後藤真太郎教授には，終始ご指導，ご助言を賜りました。研究指導だけではなく，長い留學生活にも支援してくれまして深く御礼を申し上げます。微地形解析に丁寧なご指導をして頂いた立正大学地球環境科学部環境システム学科の田村俊和教授には深く感謝を致します。論文の審査には，修正の意見とコメントを頂いた東京大学空間情報科学研究センターの小口高教授に感謝を申し上げます。

さらに，現地測量や LIDAR データのフィルタリング手法の開発にあたり，もと立正大学地球環境科学部の范海生講師ともと清華大学大学院の李劍巧に御助力を頂きました事，感謝申し上げます。現地調査やフィールドワークに補助してくれた佐藤佑輔，橋浦貴裕，服部雄次たちに深く御礼を申し上げます。

また，本論文の修正，発表会などにあたり，独立行政法人国立環境研究所の皆様には，多大なる御助力を頂きました。三枝信子博士と山形与志樹博士は，折りにふれ適切な御指導の他，同研究所では準特別研究員という素晴らしい機会を与えて下さいました。

本研究にあたり，LIDAR データを提供いただいた朝日航洋（株）とラジコンヘリ空中写真を提供して頂いたイメージワン（株）に御礼を申し上げます。また，立正大学学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンターの援助を頂き，御礼を申し上げます。

立正大学地球環境科学部・環境管理情報学研究室の酒井聡一先輩，ゼミ生の方々には，現地にて地形測量の手伝い，有益な議論をしていただきました。また，研究室の秘書丸山玲子氏にはたくさんの手伝いを頂いた。以上の方々に心から感謝を致します。

最後に，今日まで様々面で見守り支えて下さいました両親に，辛い時も力になってくれました妻に，娘に，友人たちに，心から感謝を致します。

## 参考文献

- 井手久登・武内和彦（1985）『自然立地的土地利用計画』，東京大学出版会，pp.227.
- 伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司（2008）航空機 LiDAR による森林資源量推定—スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討—，写真測量とリモートセンシング，47（1），pp.26-35.
- 岩橋純子・小荒井衛・横尾泰広・大石哲・向山栄（2008）山地斜面における DEM データの精度検証.日本写真測量学会平成 20 年度年次学術講演会発表論文集，pp.183-186.
- 加藤正人（2004）森林リモートセンシング，（株）日本林業調査会，東京.
- 笠井美青・池田学・藤澤和範・松田昌之・鈴木雄介（2008）航空レーザー測量データから作成された DEM の解析に基づく地すべり地形発達プロセスの推定，日本地すべり学会誌，Vol. 45 No. 2，pp118-124.
- 苅住昇（1987）『新装版樹木根系図説』，誠文堂新光社，pp.20-45.
- 環境省（1998）生物多様性情報システム．（<http://www.biodic.go.jp/J-IBIS.html>）（2009年6月1日参照）
- 環境省（2003）自然環境・生物多様性．（<http://www.env.go.jp/nature/saisei/law-saisei/>）（2009年5月20日参照）
- 亀山章・倉本宣・日置佳之（2009）自然再生，ソフトサイエンス社，東京，264pp.
- 久保純子（2000）「5-6(3)相模野台地と相模川低地」貝塚爽平・小池一之・遠藤邦彦・山崎晴雄・鈴木毅彦編，『日本の地形 4 関東・伊豆小笠原』東京大学出版会，pp.250-256.
- 国土交通省（2003）自然再生事業．（[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_fr\\_000100.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000100.html)）（2009年5月20日参照）
- 佐藤浩・関口辰夫・鴨茂郁・中島保（2004）現地測量の成果を用いた航空機レーザー測量 DEM の高さ方向の精度検証，写真測量とリモートセンシング，43（4），pp.13-21.
- 佐藤浩・関口辰夫・織茂郁・中島保（2004）現地測量の成果を用いた航

空レーザー測量 DTM 高さ方向の精度検証, 写真測量とリモートセンシング, 43 (4), pp.13-21.

佐藤佑輔 (2011) 関東平野西緑丘陵の谷頭部の微地形形成過程からみた水流発生条件の時空間的变化, 立正大学大学院地球環境科学研究科修士学位請求論文, pp.3-26.

斎藤和也 (2008) 図解航空レーザー計測・基礎から応用まで, 財団法人日本測量調査技術協会, pp.10-25.

埼玉県地質図編纂委員会編 (1999) 埼玉県地質図解説書, 埼玉県農林部林務課刊行, pp.242

三浦修・田村俊和・菊池多賀夫 (1990) 丘陵地の利用と二次的自然の形成, 丘陵地の自然環境—その特性と保全, 古今書院, pp.20-35.

三上常夫・川原田邦彦・吉澤信行 (2009) 日本の樹木 枝・葉で見分ける 540 種, 日本植木協会, 東京, pp.476.

松井健・武内和彦・田村俊和 (1990) 丘陵地の自然環境—その特性と保全—, 古今書院, pp.36-51, pp.47-54.

宮下香織 (2007) 関東地方中央部の丘陵地斜面における二次林の立地と植生管理, 立正大学大学院地球環境科学研究科修士学位請求論文, pp.5-35.

松岡暁・山越隆雄・田村圭司・長井義樹・丸山準・小竹利明・小川紀一朗・田方智・(2009) LiDAR データの差分処理による流域土砂動態把握の試み, 砂防学会誌, 62 (1), pp.60-65.

沼田真 (1947) On the reproductive type of plants, 生物 2, pp.121-123.

瀬戸島政博, 赤松幸生, 船橋学, (2001) 森林域での航空機レーザーキャナによる計測調査への可能性, 測量, 10月号, pp.21-25.

瀬戸島政博・今井靖晃・船橋学 (2002) 森林計測への航空機レーザーキャナの利用—落葉前後の航空機レーザーキャナデータを用いた地盤高・樹高の計測, 写真測量とリモートセンシング小特集「新しいエアボーンリモートセンサ」, 141 (5), pp.41-45.

瀬戸島政博・今井靖晃・天野正博 (2003) 落葉前後の航空機レーザーキャナデータを利用した林分構造の推定, 森林航測, 第 199 号, pp.6-11.

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ーキャナによる 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, Vol.44, No.2, pp.43-53.

政春尋志・大坪和幸・長谷川裕之 (2001) レーザーキャナデータの

フィルタリング手法の比較検討,日本写真測量学会平成 13 年度年次学術講演会発表論文集, pp.181-184.

西川 正巳 (1992) 比企南丘陵. 埼玉県地学教育研究会編『新版埼玉県 地学のガイドー埼玉県の地質とのおいたちー』, コロナ社, pp.97-103.

川西基博・崎尾均・久保満佐子・島野光司 (2006) 奥秩父大山沢における森林植生の種組成分化と生活形・種多様性に及ぼす微地形の影響, *vegetation science*, 23 (1), pp.13-24.

全天写真解析プログラム CanopOn 2 (2009)

(<http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>) (2010 年 5 月 21 日参照)  
大久保悟・神山麻子・北川淑子・武内和彦 (2003) 多摩丘陵におけるコナラ二次林および林縁の草本層種構成と微地形との対応, *ランドスケープ研究*, 66 (5), pp.537-542.

大坪和幸・政春尋志 (2002) レーザースキャナーデータフィルタリング手法の丘陵地への拡充,日本写真測量学会平成 14 年度秋期学術講演会発表論文集, pp.121-124.

大野博之・稲垣秀輝・大久保拓郎 (2008) 航空レーザー測量データから作成された DEM の解析に基づく地すべり地形発達プロセスの推定, *日本地すべり学会*, 45 (2), pp.118-124.

中井睦美・森岡俊郎・上野直樹・佐藤 瞳 (2006) いわゆる物見山層の礫組成と現河床礫との比較研究ー物見山礫層の起源についてー, *大東文化大学紀要*, 45, pp.17-27.

張馳・袁翀・史中超 (2008) 航空レーザーデータから数値標高データを作成するための高精度フィルタリング手法の開発.日本写真測量学会平成 20 年度年次学術講演会発表論文集, pp.175-178.

長嶺元二・大坂伊作・鈴木素之 (2010) 第三紀層地帯における DEM 地形解析による地すべり地形斜面の最頻傾斜角.日本地すべり学会, 47(1), pp.1-7.

田村俊和 (1974) 谷頭部の微地形構成, *東北地理*, 26 (4), pp.189-199.

田村正行・高槻幸枝 (2000) 航空機レーザーキャナーによる樹高計測, *写真測量とリモートセンシング*, 39 (2), pp.8-3.

土志田正二・千木良雅弘・中村剛 (2007) 航空レーザーキャナを用いた崩壊地形解析, 泥火山山体斜面を例として, *地形*, 28-1, p.23-39.

白石貴子 (2007) リモートセンシング画像を用いた林分構造の抽出に関する基礎的研究,立正大学大学院地球環境科学研究科博士学位請求論文,

pp.2-15.

武内和彦（1980）多摩丘陵の緑地現況に関する植生学の考察，総合都市研究，10，pp.59-68.

平春・後藤真太郎（2012a）ラジコンヘリと LIDAR データを用いた森林下部構造評価の基礎的研究，日本写真測量学会平成 24 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.29-32.

平春・後藤真太郎（2012b）LIDAR により抽出した微地形と木本植生生活型の関係評価，環境情報科学学術研究論文集，No.26，pp.381-386.

平春・後藤真太郎（2013）ラジコンヘリと LIDAR データを用いた森林構造把握の基礎的研究，地球環境研究，Vol.15，pp.29-35.

平春・後藤真太郎・田村俊和・范海生・佐藤佑輔（2010）LIDAR データによる微地形の傾斜変換線の抽出に関する研究，第 2 回 GIS Landslide 研究集会，pp.11.

平春・後藤真太郎・田村俊和・范海生・佐藤佑輔（2011）LIDAR データによる斜面微地形解析と地生態学への応用，日本写真測量学会平成 23 年度年次学術講演会発表論文集，pp.85-88.

平春・平沼竜一・後藤真太郎・范海生（2011）航空機 LIDAR データに含まれる森林構造の影響評価に関する研究，地球環境研究，Vol.13，pp.67-72.

平春・范海生・後藤真太郎・田村俊和（2010a）大縮尺地盤 DEM による微地形判読手法に関する研究，生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」第 19 回論文集，pp.7-10.

平春・范海生・後藤真太郎・田村俊和（2010b）大縮尺地盤 DEM による微地形判読手法に関する研究，日本写真測量学会平成 22 年度年次学術講演会発表論文集，pp.133-136.

米康充・小熊宏之・山形与志樹（2002）京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発— 航空機 LiDAR によるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証— .日本リモートセンシング学会誌，22(5)，pp.531-543.

北川淑子・大久保悟・山田晋・武内和彦（2004）丘陵地の谷津田に接する下部谷壁斜面下端の草本植生の種組成と種の豊かさ，ランドスケープ研究，Vol. 67 (2003) No. 5 ， pp. 551-554.

茂木透，・勝山輝男・太田和夫・崎尾 均・高橋秀男・石井英美・城川四郎・中川重年（2000）樹に咲く花—離弁花（1），山と溪谷社，東京，pp.719.

- 野上道男（1999）50m-DEM による地形計測値と地質の関係，地理学評論，72A，pp.23-29.
- 林舟・小口高（2002）地形学における写真測量法の応用－欧米の事例を中心に－，地形雑誌，111（1），pp.1-15.
- 澤田晴雄・大久保達弘・梶幹男・大村和也（2005）秩父山地山地帯天然林における植生型および樹種個体群の空間分布と地形依存性，日林誌，87（4），pp. 293-303.
- 范海生・李劍巧・平春・後藤真太郎（2010）航空機 LIDAR を用いた森林域の地盤標高モデル作成の試み.地球環境研究，Vol.12，pp.39-44.
- 蔡斌・秋山侃・魏宏（2006）航空機レーザー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），pp.4-11.
- Axelsson P.（2000）DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 33（B4/1），pp.110-117.
- Booth.A., Roering,J., and Perron ,T.（2009）Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data:Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon, Geomorphology 109, pp.132-147.
- Chigira,M. Duan, F., Yagi, H., and Faruya, T.（2004）Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assesment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics, Landslides 1, pp.203-209.
- Christian, C. S and Stewart, G. A.（1968）Methodology of integrated surveys. Areal surveys and itegrated studies, Proc. Toulouse Cong. 1964, UNESCO, Paris, pp.233-280.
- Dalrymole, J.B., Blong, R.J., and Conacher ,A.J.（1968）A hypothetical nine unit landsurface model. Z.Geomorphol., 12, pp.60-76.
- Finkel, R. A. and J. L. Bentley（1974）Quad Trees: A Data Structure for Retrieval on Composite Keys. Acta Informatica, 4（1），pp.1-9.
- Garcia, M., et al.（2010）."Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. Remote Sensing of Environment 114(4), pp816-830.

- Glenn, N. F., et al. (2006) Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity, *Geomorphology*, 73(1-2), pp.131-148.
- Habura BORJIGIN .Haisheng FAN. Shintaro GOTO (2010) Study on micro-scale landform analyzing method by using large scale DEM derived from airborne LIDAR data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan.
- Hill, M.O. (1979) TWINSpan—A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of individuals and attributes. Ithaca, New York: Cornell University. pp.90.
- J. McKean, J. Roering. (2004) Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, vol.57, pp.331-351.
- Keqi Zhang, Shu-Ching Chen. (2003) A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurement from LIDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (4) ,pp.872-882.
- Kilian, J., Haala, N., and Englich, M. (1996) Capture and evaluation of airborne laser scanner data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol.31, pp.383-388.
- Kraus, K, N. Pfeifer, (1998) , Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53, pp.193-203.
- R. Nelson, T. Gobakken, E. Næsset, T.G. Gregoire, G. Ståhl, S. Holm, J. Flewelling, (2012) LiDAR sampling - Using an airborne profiler to estimate forest biomass in Hedmark County, Norway, *Remote Sensing of Environment* 123, pp.563-578.
- Sato HP, Sekiguchi T. (2005) Landslide susceptibility mapping by using DTM from airborne LIDAR in the Kuchisakamoto area, central Japan, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 52, pp.23-35.
- Savigear, R.A.G. (1965) A technique of morphological mapping *Ann. Assoc. Amer. Geogr.* 55, pp.514-538.

- Scheidl, C., Rickenman, D., and Chiari, M. (2008) The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, pp.1113-1127.
- Schulz, W.H. (2007) Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington, *Engineering Geology*, 89, pp.67-87.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y., Tsuzuku, M. (2005) Estimating individual tree heights of sugi plantations in mountainous areas using small footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research*, 10 (2), pp.135-142 .
- Vosselman G. (2000) Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (B3) ,pp.935-942.
- Waters, R.S. (1958) Morphological mapping. *Geography* 43 (1) , pp.10-17.