

## D-0805 航空レーザ測量を用いた景観生態学図の作成と生物多様性データベース構築への応用

## (3) 里山環境における景観生態学図の生物多様性評価への応用に関する研究

鳥取大学 農学部生物資源環境学科国際環境科学講座

長澤 良太

日置 佳之

平成20～22年度累計予算額 17,919千円（うち、平成22年度予算額 5,725千円）

上記の予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本研究では、里山的な環境を呈する地域の代表例として中国山地を取り上げ、鉄穴流し跡の地形と植生について両者の関係を明らかにする景観生態学図を作成し、人間による干渉行為が野生生物の生息環境に与える影響について検討を行った。

中国山地は、古くから砂鉄を原料とした「たたら製鉄」が盛んに営まれ、江戸末期には我が国最大の鉄生産地帯であった。今日、鉄穴流しによる砂鉄の採取が終息してからすでに長い年月が経過し、その跡地の大部分は森林植生で覆われているために、空中写真判読では詳細な地形を把握するのは困難である。また、広域にわたって網羅的に地上測量を行うことにも限界があると考えられる。そこで、本研究では樹木に覆われた地盤高データを高密度かつ広域に取得可能な航空機レーザ計測を行うことで、鉄穴流し跡地の詳細な地形を明らかにし、鉄穴流し跡地形の特徴抽出を試みた。さらに植生情報との統合により、鉄穴流し跡地の地形と植生環境の関係について検討を行った。その結果、2時期の航空機レーザ計測データから高精度で取得されたDEMを用いて地形分類を行うことで、地形の特徴を可視化し鉄穴流し跡地を特定することができた。微地形分類図と相観植生区分図をクロス集計した結果、鉄穴流しが生み出した複雑な微地形が植生に影響を与え、オニグルミ林が形成されていると推測することができた。これらの解析手法を用いることで、効率的に地形や植生の高精度な情報を抽出できることから、詳細な景観生態学図の作成が可能であることが実証された。

[キーワード] 里山環境、景観生態学図、生物多様性、航空機レーザ測量、植生三次元構造

## 1. はじめに

中国山地では、たたら製鉄が古来より広く営まれてきた。砂鉄の採集のため行われた鉄穴流しは、あらかじめ上流をせき止めておいた谷川に、山腹のマサ土を堀り崩して運び込むことから始め、その土砂をせき止めておいた水で押し流し、流れの中で、軽い土砂と重い砂鉄をより分け、徐々に純粋な砂鉄を取り出すという作業だった。また、大量の木炭を必要としたため、山の単位面積あたりに1箇所炭焼き釜を作り、木を切り、炭を焼き、また次のところで釜をつくりというように炭が生産され、たたら操業に使われていた。そのため、たたら製鉄が行われた地域では、木炭製造で木を伐採、鉄穴流しで山の斜面を崩している為、森林も、原生林ではなく、二次的な再生林である。

このように過去に人為的に行われた地形改変などが影響を与え、現在でも特異な地形や植生を呈している。その為、これまでも鉄穴流しによる地形改変などに関する研究が数多く報告されている。貞方(1996)<sup>1)</sup>は空中写真判読および現地測量により鉄穴流し跡地の地形、分布、廃土量の見積もりを地域別に整理しており、中国地方における鉄穴流し研究に大きな足跡を残した。

しかしながら鉄穴流しによる砂鉄採取が終息してから既に長い年月が経過している。現在では跡地の大部分が森林に覆われており、空中写真判読のみでは詳細な地形の把握が難しく、現地測量を網羅的に行うことには限界がある。また、空中写真判読には多大な時間や労力および職人的技術を必要とするため、広範囲な森林地域の情報把握に対して効率的とは言えず、情報の更新も容易ではない。一方、衛星画像を用いると広域性や周期性の利点はあるものの、空中写真に比べて分解能が低いために、詳細な森林情報や地形情報の抽出は困難であった。

近年では、空中写真に匹敵する分解能を持つ衛星画像として、IKONOSやQuickBirdといった高分解能の商業衛星が打ち上げられ、多くの場面で利用されている。さらに、航空機からレーザを放射して三次元情報を取得する、LIDAR(Laser Imaging Detection and Ranging)技術も出現し、防災分野や都市計画分野を始め、様々な分野で利用されている。このような新しい高精度の三次元計測技術の出現により、森林分野でも広域かつ高精度での情報取得への期待が高まっており、多くの研究がなされてきている。

これまでの高分解能リモートセンシング技術を利用した森林分野の研究では、研究対象地を狭い範囲に限定していたり、単一樹種で構成される林分を対象にしていたりと実験的な研究が多く見られた。特に近年では、LIDAR計測でも高密度のデータを用いてより高精度の情報を取得する研究が盛んに行われている。しかしながら、高密度のLIDARデータの取得には多大なコストがかかるため「植生情報と航空レーザデータと組み合わせて植生の三次元データ等の情報を取得し、生物多様性評価の視点から関係性を明らかにする。」といった応用的な研究は森林分野では特定の事例地域でしか行われていないのが現状である。

## 2. 研究目的

本サブテーマの研究では、新たに取得した高密度・高解像度な航空機LIDARデータ、高解像度衛星画像、高解像度2時期オルソ空中写真などからの解析、周到な現地植生調査を行うことで、過去に人間の手によって大きく改変された鉄穴流し跡地の詳細な微地形の特徴を明らかにし、鉄穴流し跡地の地形の特徴抽出を試みた。これを植生情報と統合することにより、鉄穴流し跡地の地形と植生の関係を明らかにすることを目的とした。このために、高密度・高精度で地表面の詳

細なデータを取得できる航空機LIDARを用いることで植生の三次元構造を抽出できると考えた。また、それと同時に、既存のデータとの比較を行い、どの程度の高密度・高解像度データが解析に必要であるかの評価・検討も行った。

### 3. 研究方法

#### (1) 解析の流れ

本研究での調査手法は実に多岐に渡っているため、詳細な調査手法については各論のなかで記載し、ここではおおまかな解析の流れを示す。

1. 着葉期と落葉期に撮影されたオルソ空中写真より相観植生判読を行った。補助的にRPC(画像を取得した際の衛星の姿勢データ)とGCP(地上基準点：Ground Control Point)で補正したIKONOS画像のフォールスカラーを参考にして植生判読を行った。
2. LIDARデータについては、フィルタリング処理によって地表面をとらえたポイントのみを抽出し、抽出した表層のポイントデータからDSM(Digital Surface Model)を、地表面のポイントデータからDEM(Digital Elevation Model)を、それぞれ補間により作成した。
3. 落葉期LIDARデータから作成したDEMデータから傾斜、テクスチャ、凹凸の3指標を算出し微地形の分類を行った。
4. 既存のDEMデータからも傾斜、テクスチャ、凹凸の3指標を算出し微地形の分類を行い、LIDAR - DEMとの比較を行った。
5. 着葉期LIDARデータからDSMを作成し、落葉期LIDAR - DEMと合わせてDHM(Digital Height Model)、植生三次元構造データを作成した。
6. 以上の1.~5.の手順で作成されたデータから鉄穴流し跡地の微地形と植生の関係の検討を行った。さらに、生物多様性評価のための基盤情報としての利用可能性について評価した。

#### (2) 使用したデータ

- ・ 航空機LIDAR計測データ
  - 着葉期(2009年8月取得)：国土地理院
  - 落葉期(2009年11月取得)：アジア航測株式会社
- ・ 1m分解能IKONOSパンシャープン画像(2007年11月撮影)：日本スペースイメージング
- ・ オルソ空中写真
  - 着葉期(2009年8月取得)：国土地理院
  - 落葉期(2009年11月取得)：アジア航測株式会社
- ・ GISMAP Terrain：北海道地図株式会社
- ・ 基盤地図情報 - 10mDEM：国土地理院
- ・ 数値地図 25000：国土地理院
- ・ 基準点成果：国土地理院

#### 4. 結果・考察

##### (1) 空中写真とIKONOS画像を用いた相観植生判読図の作成

本来、衛星画像は高高度からの撮影であるため、空中写真のように地形の起伏による歪みの影響を受けることは少ない。したがって、一般的には衛星画像オルソ補正の必要性は生じない。しかしながら高分解能衛星画像は高高度からの撮影ではあるものの、空中写真に匹敵する分解能を持つため、地形の起伏の影響や樹木の倒れこみが見られ、高精度の幾何補正が求められる。

IKONOS画像には、IKONOSカメラモデルや軌道情報に基づき算出したパラメータを格納したRPC(Rational Polynomial camera)ファイルを有料で付属させることができる。RPCファイルのパラメータを用いることで、自動的に内部標定を行うことが可能である。しかしながら、パラメータ算出に用いられる外部標定要素の計測誤差のために、RPCモデルで計測を実施した場合、相対的な誤差に比べて絶対的な計測精度は悪化するという特徴がある(山川ほか、2002)<sup>2)</sup>。画像と地上との正確な関係を構築するうえで必要な要素は、地上基準点(GCP ; Ground Control Point)である。本研究ではGCPをレーザ測量時に同時に撮影したデジタルオルソ空中写真より取得した。

今回取得した使用したGCPは15Point、使用した垂直方向の高さデータは最も精度の高い航空機LIDAR計測により取得したデータから作成したDSMを使用した。補正した結果、RMSEは0.7677120 Pixels(X : 0.6729511、Y:0.8519978)と1m以内の誤差であり、今後の解析に使用する際に問題がないと判断した。

また、GCPを取得せずRPCファイルのみでの自動補正も行った。しかしながら全体としては大きなずれはないものの、本研究対象地域は山腹斜面に位置しており、くぼ地、斜面下部などでは大きな誤差が見られた。本研究は大変微細な地形・植生を対象としているのでRPCファイルのみでの補正は精度が不十分であり不適であると判断した。

図3-1にIKONOS画像、図3-2にオルソ空中写真を示す。判読には、ERDAS Imagine9.3を使用した。判読作業は、最も解像度の高い落葉期オルソ空中写真から判読を行った。補助的に、IKONOS画像を使用し、RGBの赤に近赤外バンド、緑に赤バンド、青に緑バンドを割り当てたフォールスカラーで判読を実行した。

##### ○判読基準

空中写真とIKONOS画像により画像判読を行うとき、大きさ、形、陰影、色調などを判読基準とした。

大きさ：画像の縮尺を知っていれば、画像の大きさによって、樹冠の大きさなどがわかりどのような物体であるかがわかる。

形：オルソ空中写真や衛星画像は地表の物体を真上から撮影しているため、対象物の平面の形を知ることによって、画像の中の対象物が何であるかを判読する。

陰影：物体には必ず影があり、その影によって何であるか判断できる場合がある。例えば、樹木の陰の先端が「尖っているか」「丸みを帯びているか」で針葉樹か落葉樹かを知る手がかりになる。

キメ：色調とあいまって滑らかに見えたり、ざらざらして見えたりする目の粗さ等、こうしたきめが判読の手がかりとなる。例えば、きめの違いによって樹種を知る手がかりになる。

模様：対象物の規則的な配列によって形成される模様。線状、点在、短冊状、規則的配列、

平行状といったパターンがある。

**色彩** : 今回使用した空中写真は超高解像度のため、樹種の違いによる色彩の違いが明らかである。また、IKONOS画像は4バンドのデータを持っているのでバンドの組み合わせを変化させことでさまざまな色で対象物を表現させることができる。対象物に対して一番良いと考えられるバンドの組み合わせで判読を行う。例えば植生は、トゥールカラーでなくフォールスカラーで判読することで非植生との区分がしやすくなる。

**色調** : 色調は明度の変化を利用して判読する。例えば針葉樹は広葉樹に比べて一般的に色調は暗く、草や芝生は明るく写る。物体や地表が乾いている状態では白く、湿っている状態では黒っぽい色調になる。

**季節変化** : 時系列の空中写真を利用することによって、植生の季節フェノロジーを利用することができる。異なる時期の空中写真を見比べることで変化を知ることができる。例えば、着葉期の空中写真では広葉樹は、すべて着葉しているが、落葉期の空中写真では同じ場所で葉が落葉していることを見ることができる。

#### ○判読項目

判読項目と判読の基本資料となった落葉期オルソ空中写真、補助的にIKONOSフォールスカラー画像、着葉期オルソ空中写真の見え方について説明する。後の説明では凡例ごとに図を示す。

**針葉樹** : スギやヒノキ等の針葉樹が植林された場所。

濃く暗い色をしており樹冠がシャープな形をして相観で見るときめ細かく見える。規則的に整列していることがある。

影を判読資料とする場合は影の樹冠は円錐形のように見える。

フォールスカラーによる色彩は、黒に近い色で表現されている。

季節変化は、通年を通して濃い緑色を呈している。IKONOSフォールスカラーでは11月でも赤く見える。

単木で捉えることも可能である。

**オニグルミ** : 落葉高木のオニグルミが分布している場所。

樹幹は他の広葉樹より平滑なキメを呈し、やや緑色が薄い。

季節変化は、着葉期には他の広葉樹よりも薄い緑色を呈しているが落葉期(11月)には他の広葉樹よりも先に落葉していることが確認できる。

**その他広葉樹** : 研究対象地域は標高が高いため落葉広葉樹が分布している場所。

オニグルミと違う点は樹幹がよりモコモコしており、針葉樹よりは薄い、濃い緑色を呈している。

季節変化は着葉期にはオニグルミとの違いは大きくは確認できないが、落葉期(11月)になるとオニグルミは落葉し、その他広葉樹は黄色く紅葉しているため判読が容易である。

**草地** : 布を覆ったような滑らかな感じであり、全体的にサラサラしている。

**道路・林道・その他** : 色は、灰色がほとんどであるが林道は舗装されていないため、土が露出した状態や砂利敷きとなっているが、植生とは大きく異なるため、判読は容易である。

図3-3はオルソ空中写真、IKONOS画像を使用して作成した相観植生図である。面積はその他広葉樹が最も大きく、72%(643.0741 ha)を占める。次に針葉樹が22%(195.6174 ha)、草地が3%(30.4081 ha)、オニグルミが2%(20.1567 ha)、道路その他が1%(5.3077 ha)となっている。

分布の特徴は、斜面上部の山頂付近には広くササ等の草草が広がっている。道後山は1,268.40mと標高が高く、山頂付近は風衝地となっているためである。広島県側では現在も放牧が行われているが、鳥取県側では過去の放牧の跡として杭などが残っている。山腹斜面は落葉広葉樹が占め、道路の近くなどの比較的手入れしやすいと思われる場所に針葉樹が分布している。しかしながら研究対象地域(約10km<sup>2</sup>)の斜面下部のみの1km<sup>2</sup>に範囲を限定すると、その他広葉樹の面積が70%(75.1043 ha)と最も大きいことに変化はないが、次に面積が大きいのは19%(19.8216 ha)オニグルミとなる。斜面下部にはオニグルミが面的に分布しているが、山腹斜面にオニグルミが面的に分布していることは珍しい。

## (2) 航空機 LIDAR データを用いた地形情報の抽出

航空機LIDAR計測は、広範囲にわたり高密度な三次元計測座標のデジタルデータを取得することが可能であるが、その高密度のデータ内には地表面に存在する様々な地物が含まれている。このような高密度なデータを使用する場合に、地表面のデータを取得するため、構造物や植生に当たっているLIDAR計測データを取り除き、地表面で反射したデータのみを抽出する処理をフィルタリングと呼んでいる。

実際のフィルタリング処理の場合、1回の自動処理では実際に多種多様な地物を完全に分けることは難しい。このため、自動処理によるフィルタリングを行った後、処理結果の等高線図や陰影図などを用いて不具合をチェックし、不適切な部分については、設定値などの変更を行ったのちに再度自動フィルタリングを行う。さらに、利用目的に応じて要求される品質を満足するDTMデータを作成するために、実際には手作業によるフィルタリングが必要となる。なお、自動フィルタリングと同様に、手動フィルタリングでも利用目的に応じた要求品質に満たない場合には、再度、処理を繰り返す。このように、フィルタリングは機械的な作業のみと思われがちだが、実際は取得されたLIDAR計測データの地形的特性や計測時期、利用目的などに対応した処理が必要となる。但し、これはデータを取得(提供)する側の問題であろう。

フィルタリング前後のLIDAR画像を図3-4に示す。フィルタリング後のデータの標高地の絶対精度を検証するために、研究対象地域の近辺に存在する三角点の基準点成果を使用した。LIDAR計測データの範囲内(研究対象地域外も含む)に含まれるものを選択し、5点の三角点を使用することにした。検証に使用する三角点は「稲積」「出石」「仏平」「小屋平」「道後山」である。「道後山」は一等三角点、「稲積」「出石」は三等三角点、「仏平」「小屋平」は四等三角点である。この5点のうち、10km<sup>2</sup>内の研究対象地域内に存在するのは「道後山」のみである。検証結果を表6-1に示す。フィルタリングにより作成したDEMはどの点でも1m以上の誤差はなく三角点の記に示された標高と一致している。三角点における誤差で最大のもは「稲積」の0.52mであり、最小値は「仏平」の0.09mである。誤差の平均値は0.278mとDEMの精度が全体的に高く、正確に地表面をとらえていることがわかる。

従来、地形解析作業は主に空中写真の判読等で行われ、専門的知識や熟練された技術を必要とし、作業内容によっては非常に時間がかかり、また、結果に個人差が大きい。地形調査の基本である地形分類作業はその典型である。地形分類作業は主に空中写真の実体視による判読と、現地調査によって行われている。

従来、地形分類作業は“定性的”な要素と“定量的”な要素が入り混じっているということから、コ

ンピュータによる作業が難しいと考えられてきた。なぜなら、山地・丘陵・台地といった大きなカテゴリーを定性的に区分し、さらにそれぞれを起伏量・傾斜量・高度などによって定量的に区分するという複合した作業であるからである。定性的な部分も実際はある規則に基づいてある程度定量的に行われているが、「どこまでなら丘陵とみなすか」というような区切りの値が人によって、あるいは作業地域によって異なる。

岩橋(1994)<sup>3)</sup>は前述した地形分類の問題点を改善すべく、コンピュータを用いた機械的な区分を用い、作業者の負担を軽減、地形分類の普遍化を検討している。コンピュータを用いた機械的区分にはDEMが役立つ。DEMを用いた地形解析は大きな配列の演算が機械の進歩により高速に行われるようになったため、傾斜解析・水系線の抽出・流域面積の計測など従来手で行っていた作業の効率化に寄与するようになった。それらと地形分類作業は定性的な部分が多く含まれるという点で異なるが、DEMを利用して地表形態の概要を表示することは可能であり、地形分類作業にもDEMを利用することで省力化することができる。岩橋(1994)<sup>3)</sup>は「簡便さ」と「再現性」を留意し、DEMを画像化し、数種類の画像処理を行った結果を組み合わせることで地表形態を分類している。

本研究もこの手法を参考とし、落葉期の航空機LIDAR計測データを使用し地形分類を進めた。今回、地形分類のために用いた指標は、1) 傾斜指標、2) 凹凸指標、3) テクスチャ指標である(図3-5、3-6、3-7)。その後、これら3つの指標画像を2値化してオーバーレイし、そのマトリックスから8クラスの地形分類図を作成した(図3-8)。

以上の過程を経て作成した微地形分類図の特徴について解説する。面積をそれぞれの項目ごとに整理し、面積が広い順番に以下に示す。急・細・凸斜面で1,406,299m<sup>2</sup>、次にほぼ同じ広さで急・細・凹斜面が1,384,278m<sup>2</sup>、次に緩・粗・凹斜面が1,268,952 m<sup>2</sup>、緩・細・凸斜面が1,148,608m<sup>2</sup>、急・粗・凹斜面が1,111,608m<sup>2</sup>、緩・細・凹斜面が995,637m<sup>2</sup>、緩・粗・凸斜面が 873,959m<sup>2</sup>、急・粗・凸斜面が753,538m<sup>2</sup>となっている。

分布の特徴としては、斜面中部の山腹は急斜面であり、このことから、研究対象地域全域では、急傾斜の面積が広がっていると考えられる。また、山頂付近は緩傾斜・細かい斜面が広がっており、標高800mあたりを境にして斜面下部には広範囲に緩傾斜・粗い斜面が広がっている。よって斜面下部の広範囲に広がっている「緩傾斜・粗い斜面」は鉄穴流しの影響を受けているものと考えられる。

そこで、微地形分類図の解析箇所を斜面下部の1km<sup>2</sup>に限定した。その結果、斜面全域では3番目であった「緩・粗・凹」斜面の面積が斜面下部の鉄穴流し跡地と考えられる場所では他のクラスよりも広い面積となった(図3-9)。

### (3) 航空機 LIDAR データを用いた植生三次元情報の抽出

航空機LIDARデータは、着葉期(2009年8月)、落葉期(2008年11月)の2時期に撮影されたものを使用した。落葉期の計測は植生が疎になっているため、正確に地表面(DEM)データを取得することができ、着葉期の計測は落葉期よりも高密度にレーザパルス照射し、植生情報を密に取得した。このことから、三次元情報を抽出する際には、DSMには着葉期LIDARデータを、DEMには落葉期LIDARデータを使用し、着葉期のLIDARデータの取得範囲(図3-10)2km<sup>2</sup>で解析をおこなった。最初に、航空機LIDARデータを使用した樹高情報の抽出手法について検討を行った。LIDARデータから樹高情報を抽出する場合、DSMとDTMの差分を用いて地上被覆物の高さを求め、樹高

情報とするのが一般的である。

本研究においても、同様の方法でDHM (Digital Height Model) を作成し、樹高情報の抽出を試みた。DHMは着床期DSMと落葉期DEMの差分から求めた、地上の被覆物の高さを表すデータである。DCHM (Digital Canopy Height Model) と呼ばれる。DHMは、それぞれのピクセルにおけるDSMとDEMとの差分を表したデータであるため、値が高くなるほどそのピクセルにおける被覆物の高さが高いということになる。

スギを例に模式的に考えると、樹木の場合、樹冠は円錐状であり、樹冠の中央部がもっとも高く、周囲にいくにつれて高さは低くなる。DHM画像上では、値が高いピクセルを値が低いピクセルが取り囲んでいるようなとき、その範囲は樹冠を表している、と解釈することができる。実際には、樹木が単木で見えるような箇所は少なく、樹冠と樹冠が接しているような箇所が多い。そのような場合には、樹冠と樹冠とが接する境界で高さが相対的に低くなるため、これにより樹冠形状を把握することができる。

DHMはDSMとDTMの差分を求めることで算出される。本研究では、画像解析ソフトであるEADAS IMAGINEの指数演算機能を用いて計算し、DHMを求めた。作成したDHM画像を図3-11に示す。DSMとDTMの差が大きいほど、すなわち、樹高が高いほど白く表示してある。大きく見ると、林分によって、色調が落ち着いている箇所や、白黒のつぶつぶが顕著に見られる箇所など、特徴を表した画像となっている。以下に、相観判読区分ごとにDHMの詳細を示し、それぞれの特徴を述べる。

針葉樹林：比較的高木が多くDHMも高い値を示している。樹冠形状が円錐形であるため、樹冠をはっきりと確認することができる。特に林道の沿いでは、それほど密ではない箇所であるので、樹木の単木を認識できるほどはっきりした樹冠形状を読み取ることができる。樹冠が密であり、樹高もそれほど高くないが、それでも樹木の頂点が高い値を、樹冠縁が若干の低い値を示すという傾向が顕著に見られ、スギやヒノキの樹木特性を表しているといえる。

広葉樹林：樹冠が密な箇所におけるDHM画像である。樹幹が密となっているところは尾根部に多く、画像の中央部の地形的影響(谷)によると推察されるDHM値の低い箇所を除き、全体的に樹冠が接しあっており樹冠形状は認識できない。同じように密であった針葉樹林と比較すると、密な林分ではあるが、至る所に小さな黒い点が見られ、局所的にDHM値が落ち込んでいる様子がわかる。密な広葉樹林は成長著しい弱齢林であると考えられる。このため樹冠形状も不整であり、密ながらも小さな隙間が多く存在するために、このような画像を示すと予想される。

オニグルミ林：オニグルミは樹冠が密であるため、単木単位で認識することはできない。しかしながら、その他の広葉樹と異なる点は、DHMの画像の色彩がほぼ一様となっているということである。オニグルミの樹冠形状が円錐形ではなく、横に広がった形をしているためだと考えられる。

従来の研究でよく用いられてきた樹冠形状の表示方法は、DSMとDEMを用いてある場所の横断面を線状に取り、グラフを線的に表現するものであった。それにより、針葉樹はギザギザしている、広葉樹は丸みを帯びているなどで樹種の樹冠の特徴を把握していた。しかしながら樹冠は縦・横に幅、さらには厚みを持って存在し、決して線状、面状で存在していない。

そこで、LIDAR計測データのオリジナルデータ(すべてのパルスを含む点群データ)を用い、ある一定の幅(10m)を持たせて、存在する点群全ての解析を帯状で行った。

点群データの処理方法を以下に記す。

1. 着葉期 LIDAR 計測のオリジナル点群データを 200m×10m の帯状で抽出する。
2. 抽出したオリジナル点群データと落葉期 LIDAR 計測データより作成した DEM を重ねあわせ、点群データに ArcGIS のラスタ to ポイント機能を使い地表面データを追加する。
3. 完成したオリジナル点群データの属性情報(Z 値と地盤高(DEM))を利用し散布図を作成し、樹冠の三次元情報を把握する。

図3-12、図3-13、図3-14にそれぞれオニグルミ、コナラ・その他広葉樹、針葉樹の樹冠厚の抽出結果の詳細を示し、それぞれの特徴を述べる。

オニグルミ：200×10mの帯状で点群データを抽出した結果、オニグルミは約5m幅で樹冠厚が抽出された。オニグルミの約5mの樹冠厚は他の樹種の樹冠厚に比べ明らかに薄い。そして、樹冠の形はモコモコしておらず、ほぼ平らな樹冠形状をしている。これはオニグルミの羽状複葉で葉が比較的薄く、樹冠が横に広がり、樹冠厚も薄いという特徴を航空機LIDAR計測でも抽出できたと推察される。しかしながら単木レベルで樹冠を確認することはできない。

コナラ・その他広葉樹：コナラ・その他広葉樹は約10mの幅で樹冠厚が抽出された。

そして、樹冠の形はモコモコしており、広葉樹の特徴をよく捉えていると推察される。また、点群はオニグルミと比べ、散乱しており、オニグルミのように横に広がった樹冠形状ではなく樹頂から地表に向けて膨らんだ円錐形であると推察される。しかしながら、オニグルミと同様に単木レベルで明確な樹冠を確認することはできない。

針葉樹：針葉樹は10mの幅で樹冠厚が抽出された。コナラ・その他広葉樹とほぼ同じ程度の樹冠厚ではあるが、明らかに樹冠の形状が異なっている。針葉樹の樹幹形状は綺麗な円錐形をしており、所々密度が疎なところでは単木単位で認識することができる。

以上のように、線状ではなく幅を持った帯状にレーザパルス个点ごとに解析することで、植生の三次元情報を把握することができた。また、DHMのみやDEMとDSMを組み合わせた断面図では抽出することができなかった樹冠厚を読み取ること、形状やキメなどから、樹冠形状などの特徴を読み取ること、さらには樹種ごとの違いをDHM以上に明瞭に識別することが可能であった。

#### (4) 鉄穴流し跡地の微地形と植生の関係

本研究では、出立山のオニグルミ林植生と地形の関係を明らかにし、それに基づいて鉄穴流しの植生への影響を明らかにすることを目的とした。そのため、特に植物群落の階層別に植生図を作成し、各階層と地形の対応関係を解析した。この目的のために、以下のような方法を採用した。

調査は全て2009年に行った。①植生：高木層・低木層・草本層それぞれにおいて、群落高を一边の長さの基準とした方形区を設置し、Braun-Blanquetの植物社会学的手法により植生調査を行った。なお、高木層と低木層は夏季に1回、草本層は春季・秋季の2回調査した。②土壌水分：10月に土壌水分計（大起理工業株式会社 FDR土壌センサ）を用い、各植生調査プロットで3回測定した。③文献：既存文献により、鉄穴流し跡地の特徴的地形を調べた。

解析方法としては、①植生：植生調査から得られた植物種の在・不在データを用い、TWINSPAN (PC-ORD4.0) により群落を区分した。その際、草本層については春と秋の植生調査結果を統合したデータを使用した。TWINSPANにより区分した後、INSPAN (PC-ORD4.0) により指標種を明らかにし、群落凡例名とした。凡例の決定後、高木層については航空写真と落葉期の

DSM-DEMの差分図の判読を行うことにより、低木層及び草本層については現地にて目視による識別及び、DGPS（SOKIA社 GIR1600）を用いた群落の測位により階層別植生図を作成した。さらに高木層・低木層・草本層の3層の階層別植生図をオーバーレイし、全層植生図を作成した。植生図は全て2m×2mのグリッドで図示した。

②地形：LIDAR計測から得られた1m×1mのDEMデータを使用し、GISソフト（Arc Map9.0）及びVisual Basic 5.01 CCEを用いて、尾根谷度図（L=100）と傾斜角区分図を作成した。また鉄穴流し跡地の特徴的地形を、尾根谷度図及び傾斜角区分図から抽出し、その範囲を図示した。以下、結果について記載する。

全層植生図：図3-15に全層植生図を示した。3層の植生図を重ね合わせたところ、計56の組み合わせができた。そのうち全体に占める面積の割合が上位25の組み合わせに水域を加えた計26の組み合わせを凡例とした。

土壌水分：高木層ではオニグルミ群落がいヌシデ・クリ群落より、低木層ではミツバウツギが他の群落より、草本層ではミゾソバ群落がササノハスゲ群落、イヌトウバナ群落及び植被率5%以下の場所より、それぞれ有意（有意水準<1%）に土壌水分が高かった（表3-1）。

文献調査：文献調査の結果、鉄穴流し跡地の特徴的地形は以下の4つにまとめられた。①10m（高さ）を超える崖が連なる地形、②採掘の最小単位となった馬蹄形の堀跡が幾つも存在する地形、③削り残された部分が小突起、又は馬の背状の地形（以下、鉄穴残丘）、④侵食平坦面。

地形解析：尾根谷度図を図3-16に、傾斜角区分図を図3-17に示した。また文献調査から明らかになった鉄穴流し跡地の特徴的地形である鉄穴残丘及び侵食平坦面を、この両図中に示した。その際、鉄穴残丘を尾根谷度が6以上、面積が0.008ha以下、侵食平坦面を尾根谷度が-2~2、傾斜角が0~10度の場所と定義した。これに該当したのは、調査地内で、鉄穴残丘が合計0.4ha、侵食平坦面が合計3.6haであった。

鉄穴残丘及び侵食平坦面上に成立している群落の特化度をそれぞれ求め、表3-2に示した。特化度は値が1より大きい場合、群落と立地単位の対応関係が相対的に強いと判断できる指標である。鉄穴残丘上では7つの群落の特化度の値が1を超えた。しかし、特化度の値が1を超える群落が数多く存在することから、鉄穴流しと特別強く結びついた群落があるとはいえない。一方、侵食平坦面では3つの群落の特化度の値が1を超えた。このうち、オニグルミーミツバウツギーイヌトウバナは特化度が6.5と突出していることから、この群落は侵食平坦面に特徴的な群落といえる。侵食平坦面は地形上、土壌水分が高い環境となっていることから、湿性を好むオニグルミ群落ーミツバウツギ群落が優占したと考えられる。

結論として、LIDAR計測から得たDEMデータを用いて鉄穴流し跡地の特徴的地形を抽出したところ、鉄穴残丘には特徴的な植生は存在しなかったが、侵食平坦面ではオニグルミーミツバウツギーイヌトウバナが特徴的に成立していることが明らかになった。

#### （5）毎木調査とそれを用いた群落構造の解析

小規模な尾根と谷を含むよう、30m×70mの方形区を設定し、毎木調査を行った。調査は2009年から2010年にかけて行った。方形区内で確認できた種は34種であった。図3-18に中低木、図3-19に高木の樹種別個体数を示した。階層別に個体数を見ると、樹高が2mから10mの中低木ではミツバウツギが最も多く、全体の16%を占めていた。樹高が10m以上の高木ではクリが最も多く23個

体あり、28%を占め、次いでオニグルミ (*Juglans mandshurica Maxim. var sieboldiana*) が12個体、14%を占めていた。本調査地でクリが優占していた要因として、昭和初期までクリが枕木として出荷するために植えられていたことが考えられる。

図3-20に中低木、図3-21に高木の樹種別胸高断面積を示した。樹種別胸高断面積は、中低木では枯死木の割合が最も高く、次に高木層構成種が多かった。高木では、胸高断面積合計ではイヌシデが最も優占していた。

図3-22に、高木の樹高と葉群厚の関係を、図3-23に樹種別の葉群厚を示した。葉群厚は、樹高から生枝下高を引いて算出した。クリ、オニグルミ、ミズキ、コナラ、イヌシデのいずれの樹種でも、樹高と葉群厚の間に正の相関が見られた。また、オニグルミは他の樹種に比べ葉群厚が薄く、標準偏差の値も小さかった。クリ、ミズキ、コナラは標準偏差の値に大きな差はなかったが、クリは最大値と最小値の値の差が最も大きく、ミズキは平均値が最も小さかった。このことから、ミズキとオニグルミでは葉群厚が薄く、また、オニグルミでは比較的、葉群厚のバラつきが小さいことがわかる。

道後山北麓（出立山）の地形と植生配分について、以下に検討する。まず、作成した等高線図を見ると、道後山北麓（出立山）には、不規則な小丘が数多く見られる。また、沢の傾斜が変換して緩くなった地点には、小扇状地状に土砂が堆積した場所がいくつかあるが、それら小扇状地の規模は、河川の最上流部にあつては比較的大きなものである。これらの場所には、ほぼ例外なくオニグルミが優占する樹林が成立している。オニグルミは、通常、河川の中流から下流にかけて点在するように生育するので、このように河川最上流部にまとまった林分が成立するのは珍しい。本研究対象地のオニグルミ林は、鉄穴流しによって発生した土砂が、通常はV字状になる谷を埋めて堆積して緩やかで幅の広い谷を形成し、その湿生立地に成立したものと推定される。オニグルミの下層、亜高木層にはゴマギが多く、また、低木層には、ゴマギ、ミツバウツギ、ミヤマイボタなどが多い。草本層には、オシダ、ジュウモンジシダなどのシダ類のほか、ネコノメソウ類のような湿生立地を好む、数多くの草本が生育しており、種の多様性が高い林分となっている。このオニグルミ林は、植物社会学的には、ジュウモンジシダ-サワグルミ群集ヤマトキホコリ亜群集オニグルミ変群集 (*Polysticho-Pterocaryetum Subass. of Elatostema laetevirens Variante of Juglans ailanthiopters*) に同定された。

小丘の成因は、鉄穴流しで地形の切り崩しが行われ、切残されたものか、残土を積み上げた盛土かのどちらかと考えられ、その両タイプが存在する可能性もある。小丘上には、コナラ、ミズナラ、クリ、クマシデ、イヌシデ、スギなどが生育している。多くは二次林として自然に成立したものと推定されるが、スギについては植栽起源の可能性もある。これらの樹木の中には、胸高直径が数十cm程度の大きなものもあるが、たたら製鉄の放棄が、ほぼ100年前であることを考えると、このような大径木が生育してもおかしくはない。今後、生長錐を用いた樹齢の測定などをする必要がある。

谷と谷に挟まれた尾根には、クリ、クマシデ、コナラ、ミズナラを主体とする二次林が広く成立している。林床は多くの場合、ササに被われている。毎木調査を行った方形区では、本数はクリがもっとも多く、BA（胸高断面積）合計は、シデ類がもっとも大きかった。通常優占種となるコナラ属（コナラ、ミズナラ）よりも、これらの樹種の割合が多いことが特徴である。

上記のように、本研究地では、地形と植生の対応関係がかなり明確であり、また、その地形は

鉄穴流しという人為によって成立したと考えられる。中国山地に広く分布する鉄穴流し跡の地形ではあるが、このように植生が、鉄穴流し跡を明確に示すフィールドは稀有であろう。

#### (6) 小動物のグラントトゥルス調査

動物の生息環境を図化するうえで、エコトープ図（景観生態学図）が有効であることが以前から指摘されている（例えば日置ほか1998）<sup>4)</sup>。特定の環境との結びつきが強く、かつ極めて行動範囲が狭い動物種の場合には、単一のエコトープで生活環境が完結している場合もあるが、多くの種は複数のエコトープを利用して生活している。エコトープと動物種の対応関係が明らかになれば、その種の保全にとって有益な情報となる。

本研究では、水辺と樹林内を生息地とするヤマアカガエル（*Rana ornativentris*）を対象種とした（図3-24）。ヤマアカガエルは両生綱無尾目アカガエル科アカガエル属で、本州（佐渡島を除く）・四国・九州の丘陵地と山間森林内、特に標高1900m以上の森林周辺に生息する。繁殖場所としては、池沼、小川、湿地、水田などの、日当たりがよく浅い止水域が選ばれる。本種の体長は35～78mmで、メスが大きい。体色は黄土色から赤褐色まで様々である。背面には筋状の隆起があり、鼓膜の上部で一度外側へ曲がり鼓膜の後部でまた内側に曲がる。咽頭部には明瞭な黒い斑点が入る個体が多い。

本種の成体は昆虫類や節足動物、貝類、ミミズ等を食べ、幼生は雑食で落ち葉や水草、水生昆虫、動物の死骸を食べる。繁殖行動は、2～3月に多いが、温暖な地域や高緯度・標高地ではこれを1ヶ月ほど前後する。産卵数は1,000～1,900個で、粘着性のある寒天質に包まれた卵を年1回生む。オタマジャクシは4～5ヶ月で最大60mmに成長し、変態して上陸する。

本種は、良質な水質の指標となる。また、成体は森林の林床で生活することから、水辺と森林が接していることが本種の生息にとって必須である。

調査方法としては、2010年10月14日に、超小型発信機（BD-2:HOLOHIL社；図3-25）を、ヤマアカガエル8個体に糸で固定・装着した（図3-26）。糸はカエルの腹側、尻側に回した。追跡調査は2010年10月14日～11月14日に、週1回行った。

追跡には、八木アンテナ状の受信機（TRX-1000:WILDLIFE MATERIALS社；図3-27）を用い、フォックス・ハンティング法により行った。フォックス・ハンティング法とは、発信機から一定の周波数帯域で発信される電波信号を、受信機で受信感度や測定電波強度の強弱で方角・距離を推測、搜索または追跡する方法である（図3-28）。今回は、ある一定の範囲の測定電波強度が得られた場所から、電波の受信方角を記録し、受信場所の位置情報をDGPS（GIR1600:SOKKIA社）で記録した。その後、測量ソフト（Gio Line）を用いて、発信機の位置を推定し、GISソフト（ArcMap10:ESRI社）を用いて図化した。

ヤマアカガエルの分布図を図3-29に、移動距離の一覧表を表3-3に示した。発信機装着個体のうち、番号620は10月22日の位置確認が最後となり、それ以降追跡が不可能となった。動物に捕食されるなどして、発信器が受信可能範囲外へと移動した可能性がある。同様に、番号613は10月28日まで、614と615は11月5日までしか確認できなかった。11月14日には残る4個体の発信機を、位置確認後に回収した。

各個体の累積移動距離を見ると、最後まで追跡できた4個体のうち、最長は番号618の103.4m、最短は番号617の46.0mで、4個体の累積移動距離の平均値は76.9mであった。また、すべての追跡

個体について1日当たりの平均移動距離を算出すると、最長は番号618の3.3m、最短は番号617の1.5mで、全個体の1日当たりの平均移動距離は2.6mとなった。

各個体がどのエコトープを利用していたかを見るために、ヤマアカガエルの分布図と景観生態学図のB図をオーバーレイして、その出現凡例を一覧表にしたのが表3-4、この表をもとにB図の各凡例にヤマアカガエルが出現した頻度をグラフ化したものが図3-30である。

ヤマアカガエルは、オニグルミ－緩中傾斜・凹型（人工改変の可能性あり）のエコトープに最多の14回、次いでオニグルミ－緩中傾斜・凸型（人工改変の可能性あり）に6回出現していた。この2つを合わせると20回で、全34回の59%を占めていた。また、クリ・イヌシデ群落－緩中傾斜・凹型（人工改変の可能性あり）のエコトープに4回、クリ・イヌシデ群落－緩中傾斜・凸型（人工改変の可能性あり）に3回出現しており、これを合わせると、人工改変の可能性ありとされたエコトープに出現した回数は、全体の79%を占めていた。

ヤマアカガエルの出現頻度に占めるエコトープの割合は、植生はオニグルミが高木層で優占し、地形は緩中傾斜で人工改変の可能性とされたエコトープで約60%を占めていた。特に、オニグルミ－緩中傾斜・凹型（人工改変の可能性あり）エコトープでは浅い水たまりが形成されているものが多くあり、産卵に適した環境となっている。そのため、このタイプのエコトープでヤマアカガエルの出現回数が多かった可能性がある。また、ヤマアカガエルは水底で冬眠することから、冬眠期が近づいた今回の調査で、浅水域のあるエコトープで出現回数が多かったものと考えられる。しかし、今回の調査は非繁殖期に行ったものであり、産卵期に卵塊調査や再度の移動追跡調査を行う必要がある。

クリ・イヌシデ群落－緩中傾斜・凹型または凸型（人工改変の可能性あり）のエコトープにも比較的多く出現したのは、これらが、オニグルミが優占するエコトープと近接しているためと考えられる。これを合わせると、鉄穴流しによって改変されたために形成された可能性があるエコトープにヤマアカガエルが出現した回数は、全体の約80%を占めていた。ヤマアカガエルは、平地から丘陵地にかけての里山で水田と山林が接する地域に多く分布する。また、高標高地に分布することもあるが、それは亜高山帯・高山帯の池沼とその周囲であり、本研究地のような奥山の河川源流部に出現することは少ない。その理由は主として、奥山では通常、溪谷がV字谷状になり、ヤマアカガエルの産卵に適した浅水域が形成されにくいためと考えられる。ところが、本研究地では、鉄穴流しの地形改変によって、奥山でありながら緩傾斜の凹地が広く形成されている。さらに、本研究地の植生は、主に緩中傾斜の谷部ではオニグルミが優占し、それに接しながらクリ・イヌシデ群落が広く分布している。これらはいずれも落葉広葉樹林であり、ヤマアカガエルの食性に適した餌環境が形成されていることも、本研究地が生育に適している理由であろう。

以上から、本研究地では、鉄穴流しによる地形改変によって、里山における水辺-落葉樹林モザイクと類似した環境が奥山に形成されたことが、ヤマアカガエルの生育に好適な環境となった要因と考えられる。このことは、本研究地にオニグルミが優占していることとも通じる現象である。鉄穴流しという一大環境改変は、植生だけでなく動物相にも影響を与え、通常とは異なる生態系を形成することによって、奥山での生物多様性を高める作用をした可能性がある。

### (7) 景観生態学図による生物多様性評価

一般に、生物多様性は、遺伝子、種、生態系の3レベルで評価される。これに景観の多様性を加えて4レベルで評価が行われる場合もある。本研究では、これらのうち種レベルでの多様性評価を行う。種レベルでの多様性は3つの異なる空間レベルで評価される。ある生態系内における種の多様性は $\alpha$ 多様性と呼ばれる。ここでいう生態系とは、地質・地形・土壌・植生など生態系を構成する諸要素が比較的均質な空間のことであり、エコトープと同義である。本研究で作成した景観生態学図は、このエコトープの空間的配分を地図にした主題図である。

一般に、特定の種類の生態系における $\alpha$ 多様性は面積とともに増加するが、一定の面積になると種数の増加が鈍化してやがて頭打ちとなる。また、森林生態系の $\alpha$ 多様性は熱帯では高く、高緯度・寒冷地になるほど低くなる傾向にある。同一の緯度であれば、構造が複雑な生態系ほど多くの種から構成されており $\alpha$ 多様性が高い。また、森林群落のいずれかの階層で単一種が優占したり、階層そのものが欠落したりするとその階層の種多様性は低くなり、群落全体の $\alpha$ 多様性の低下にもつながる。日本では、森林群落の林床におけるササ類の優占やシカの食害が、草本層から低木層の多様性を低下させる主要因となっている。また、これらの要因によって、高木層・亜高木層構成種の実生が生育せず、更新ができないという問題も生じている。

$\beta$ 多様性は、生態系の多様性である。景観生態学図を用いるならば、その凡例数、すなわちエコトープの数と行うことができる。異なる生態系(エコトープ)では、それを構成する生物群集も異なる。そのため、 $\beta$ 多様性が高くなる(すなわち生態系・エコトープの数が増える)と、その景観域全体の種数である $\gamma$ 多様性も高くなる。ここで問題になるのはエコトープ相互の構成種からみた独立性である。もし、異なるエコトープでも、同じ種が多数含まれていれば、 $\beta$ 多様性が高くても $\gamma$ 多様性はあまり高くはならない。

$\beta$ 多様性の多寡に影響を与える最大の要因は、植生の基盤となる地形の多様性と人為による植生の改変である。平坦な地形の場所では植生の多様性は高くないが、起伏に富んだ複雑な地形や水辺の存在する地域では、さまざまな植生が出現する。また、人為の影響で極相群落だけでなく、さまざまな遷移段階の植生が存在する地域では、植生の多様性は高くなる。しかし、人為的影響が強すぎる場合には逆に植生の多様性は低くなる。

2010年の植生調査データを用いて各植物群落の多様度指数を算出した。植生調査は階層別に行ったので、階層別に多様度指数を算出した。ここで算出した多様度指数は、各群落の種の多様性、すなわち上記の $\alpha$ 多様性の指標値であると言える。

種多様性(species diversity)は群集の中の種の豊かさ(species richnessまたはvariety of species)と、種間における優占度の均等性(evennessまたはequitability)とを統合した1つの統計量である。多様度指数には、Simpsonの単純度指数(式1)とShannon関数(式2)を用いた。

$$D = 1 - \sum p_i^2 \quad (\text{式1}) \quad \text{ただし、} 0 \leq D \leq 1$$

$$H' = - \sum_i p_i \log p_i \quad (\text{式2}) \quad \text{ただし、} 0 \leq H'$$

$p_i$ は相対優先度、対数の底は10を用いた。

Simpsonの単純度指数は相対優先度の高い種が指数値に大きく影響するのに対し(それ故に単

純度といわれる)、Shannon関数は相対優占度の中間的な種の貢献度が大きい。したがって、Shannon関数は種の豊かさよりも均等性を、特に中間種の均等性を反映する指数といえる。

検討の結果、階層別の多様度指数を表3-5に示した。高木層ではクリ・イヌシデ群落 ( $D=0.62$ 、 $H'=1.04$ )、低木層はクロモジ群落 ( $D=0.55$ 、 $H'=1.12$ )、草本層ではミゾソバ群落 ( $D=0.70$ 、 $H'=1.65$ ) が、各々Simpsonの単純度指数、Shannon関数ともに値が最も大きかった。

全階層中、最も多様度指数が大きかったのは草本層のミゾソバ群落 ( $D=0.70$ 、 $H'=1.65$ )、次いで、低木層のクロモジ群落 ( $D=0.55$ 、 $H'=1.12$ )、草本層のイヌトウバナ群落 ( $D=0.52$ 、 $H'=1.07$ ) であった。

全層群落での多様度指数を求めるため、Simpsonの単純度指数については3階層の平均値を、Shannon関数については合計値をそれぞれ求めた。また、その値を、Simpsonの単純度指数図については図3-31に、Shannon関数図については図3-32に各々示した。

Shannon関数の合計値が3.0以上であったのは、クリ・イヌシデ・クロモジ・ササノハスゲ群落 (3.18)、クリ・イヌシデ・チシマザサ・ミゾソバ群落 (3.37)、クリ・イヌシデ・ミツバウツギ・ミゾソバ群落 (3.29)、オニグルミ・スギ・ミツバウツギ・ミゾソバ群落 (3.12) であった。高木層でクリ・イヌシデ、草本層でミゾソバが優占する群落で種多様性が高かった。

$\alpha$ 多様性の指標値としての多様度指数が高かったのは、草本層がミゾソバ群落となっている各群落であった。ミゾソバ群落は湿性草本群落で、出現種数が他草本層の群落と比較して際立って多いことがその要因である。また、多様な樹種が混交するクリ・イヌシデ群落は多様度指数が高いため、高木層がクリ・イヌシデ群落である各群落で、高木層がほぼオニグルミ1種に限定されているオニグルミ群落に比べて多様度指数が高かった。

鉄穴流しによる地形改変と生物多様性の関係についてみると、まず鉄穴流しによる地形改変は、本研究地における生物多様性に対してプラスに働いたのか、それともマイナスに働いたのが問題となってくる。上述のように、本研究地では鉄穴流しによる地形改変によって広くオニグルミ群落が発達したと考えられる。図3-33は、地形分類図とレーザ植生図をオーバーレイしたものである。人工改変の可能性がある緩中傾斜の凹型または凸型斜面においてオニグルミ群落の面積割合がもっとも高くなっている。本来は、山地源流部に立地しないオニグルミ群落が発達した地形で成立していることは、本研究地で群落数すなわち $\beta$ 多様性を高める方向で作用したものと考えることができる。しかし、高木層でオニグルミが優占する群落の $\alpha$ 多様性は、必ずしも高くないため、オニグルミ群落の成立が、本研究地全体の種多様性 ( $\gamma$ 多様性) を高めたとは必ずしも言えない可能性がある。

研究対象地は、比婆道後帝釈国定公園の第2種特別地域に指定されている。2009年の自然公園法改正で、同法第一条の目的に「この法律は、優れた自然の風景地を保護するとともに、その利用の増進を図ることにより、国民の保健、休養及び教化に資するとともに、生物の多様性の確保に寄与することを目的とする。」と生物多様性に関する文言が明記された。自然公園の一部である本研究地も、当然、生物多様性の確保の一翼を担うことが今後期待される。しかし、今回の研究の結果、ここは通常とはかなり異なり、過去におけるかなり強度の人為攪乱がかえって生物多様性の増大に寄与した可能性がある区域であることが明らかになった。このような事例は既往研究ではあまり報告がなく、珍しい事例と言える。生物多様性の保全を考える場合、まず原生的な生態系の保護が、次いで人為で維持されてきた二次的自然が頭に浮かぶ。しかし、本研究地は、そ

のどちらとも異なり、かつて強度の人為が加わり、その後、長期間放置されてきたために成立した生態系が存在する。このような事例は、古くから開発が進み、強弱さまざまな人為が長期間に渡って自然環境に加えられた中国山地ならではの現象であると解釈することもできよう。今後、さらにこの点を深く研究し、生物多様性と人為の関係をより詳細に明らかにするとともに、過去の人為で成立した生態系をどのように維持していくべきか、また、その手法はどのようにあるべきかを考究していく必要がある。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究の科学的意義は、以下のように整理できる。

第一は、航空機レーザ測量データを用いることにより、地形と植生を極めて詳細に、把握・解析・図化できることを明らかにした点である。リモートセンシングを用いた地形・植生の図化等の研究はこれまでも多くみられるが、本研究のような詳細スケールでの研究は、まだ多くない。特に、植生の三次元構造の図化に道を開いた点は、本研究の特筆すべき成果である。これまでの植生図は、植物社会学的現存植生図では種組成が凡例の属性情報の主体であり、群落構造に関する情報は極めて大雑把にしか示されてこなかった。このことは、相観植生図でも同様であった。然るに、本研究の方法では、高木層、低木層、草本層など各階層の高さや植被率が面的に把握できるため、群落構造に関する情報の精度が飛躍的に向上した。本研究により、縮尺1/1,000～1/5,000程度以上の詳細植生図で、構造の詳細な情報を伴った「三次元植生図」の作成に道が開けたわけであり、その環境技術開発上の意義は大きい。

第二は、たたら製鉄・鉄穴流しによる人為改変地にオニグルミ林が成立したことを実証した点である。本文中にも記したとように、オニグルミ林は、通常、河川の中・下流域に小規模なパッチ状に成立しており、河川上流域に大規模な群落が存在することは稀である。本研究フィールドでは、鉄穴流しによって谷底面に比較的緩傾斜の土地が形成され、そこが湿潤立地であるためにオニグルミ林が成立した。それにより、結果的にはあるが、河川上流部の植生の多様性が高まる結果となった。これは、環境史の分野でもこれまで報告されていない興味深い現象であり、人為と生態系の関係を考究する上で新しい視座を提供したものと考えられる。

### (2) 環境政策への貢献

本研究は、環境政策に対して以下のように貢献できるものと考えられる。

第一は、本研究で開発された、地形・植生等の図化技術が、生物多様性センターが行う自然環境保全基礎調査（緑の国勢調査）等の精度向上・効率化に寄与し得る点である。特に、現存植生図の図化技術向上にとって、本研究の貢献は大きいと考えられる。また、近日中に導入が予定されている戦略的環境影響評価においても、基盤情報の効率的図化が必須の技術的課題であり、ここでも本研究の成果は威力を発揮するものと期待される。現在、まだ、航空レーザ測量が高価なことが、技術普及上の障害ではあるが、航空レーザ測量の一般化に伴って、価格が低下し、本研究で示した方法での環境図化技術の普及が進んでいくものと予想される。

第二は、本研究が、生物多様性評価と自然再生に新しい視座を提供する点である。ミレニアム生態系評価と、それに続く里山サブグローバルアセスメントは、日本の里地里山の伝統的土地利

用が、持続可能な資源利用と中規模攪乱による生物多様性の維持・向上に貢献してきたことを明らかにした。しかし、そこで取り上げられた人為は、薪炭林における萌芽更新や二次草原の火入れといった、定期的に繰り返される可逆的攪乱であった。本研究で扱った、たたら製鉄・鉄穴流しは、強度で不可逆的な環境改変である。にもかかわらず、本研究フィールドでは、80～100年という長年月がかかったとはいえ、発達した生態系が形成され、人為なしでは形成されない立地ができたことで、結果的にではあるが植生の多様性が向上したことが明らかにされた。見方を変えれば、本研究フィールドは、受動型の自然再生の実験地と見なすことができる。現在、我が国の国土には、数多くの強度で不可逆的な人為改変地が存在しており、そうした場所でどのような自然再生の指針が適切かは未知である。本研究の知見は、いわゆる置き替え型（replacement、もと存在した生態系とは異なる生態系を再生目標とする）自然再生事業における目標設定や再生に要する期間の見積もり等に新しい視点を提供し、環境政策の巾を広げることに寄与することが期待される。

## 6. 引用文献

- 1) 貞方昇（1996）中国地方における鉄穴流しによる地形環境変貌． 溪水社， 広島， p. 309.
- 2) 山川毅・Clive S. Fraser・Harry B. Hanley（2002）高解像度 IKONOS 画像を用いた精密 3次元計測． 写真測量とリモートセンシング， 41(2), 36-43.
- 3) 岩橋純子（1994）数値地形モデルを用いた地形分類手法の開発． 京都大学防災研究所年報， 37(B-1), 141-156.
- 4) 日置佳之・田中隆・須田真一・梅原徹・裏戸秀幸・宮畑貴之・星野順子・松林健一・大原正之・箕輪隆一・小俣信一郎・村井英紀・川上寛人・越水麻子・長田光世（1998）環境ユニットモデルを用いた谷戸のミティゲーション計画～国営ひたち海浜公園・常陸那珂港沢田遊水地における生物多様性保全の試み～． 保全生態学研究， 3(1), 9-35.

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

## 8. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

なし

### （2）口頭発表（学会）

- 1) 伊藤史彦・畠周平・小荒井衛・長澤良太・司馬愛美子：日本地理学会2009年秋季学術大会（2009）  
「航空レーザ計測データを用いた中国山地における鉄穴流し跡地の地形解析」
- 2) 日置佳之・長澤良太・司馬愛美子・中山詩織：日本地理学会2010年春季学術大会（2010）  
「中国山地における鉄穴流し跡地に成立したオニグルミ林植生」

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない

### （4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

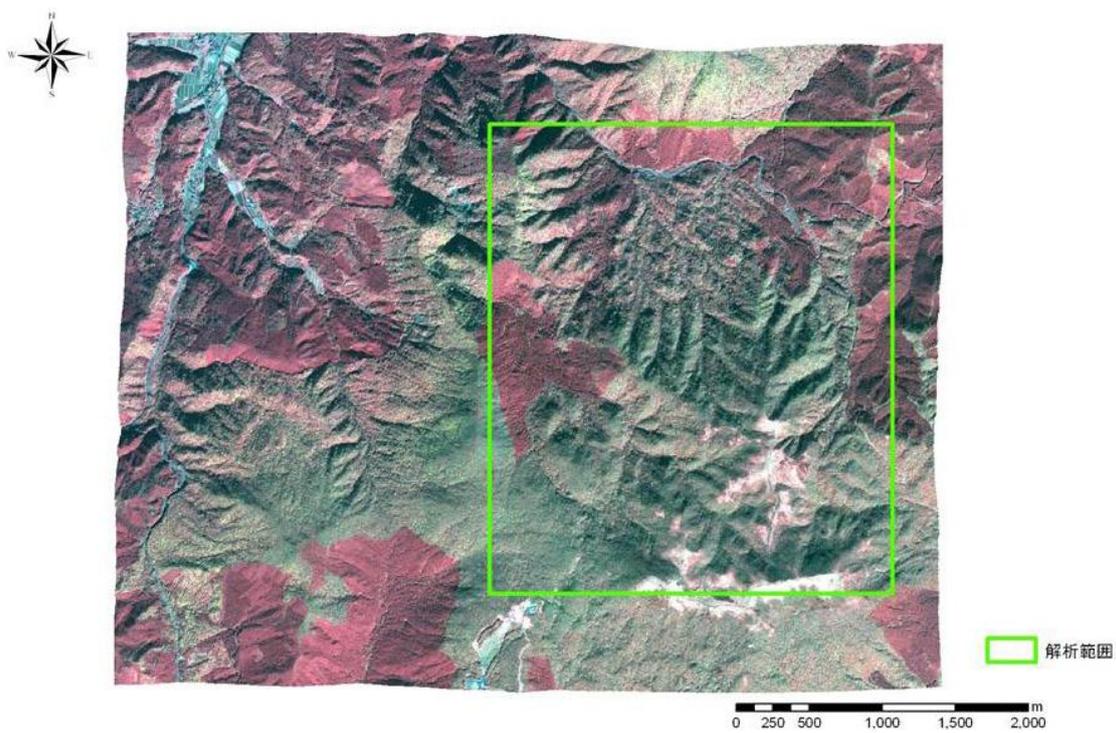


図3-1 使用したIKONOS画像

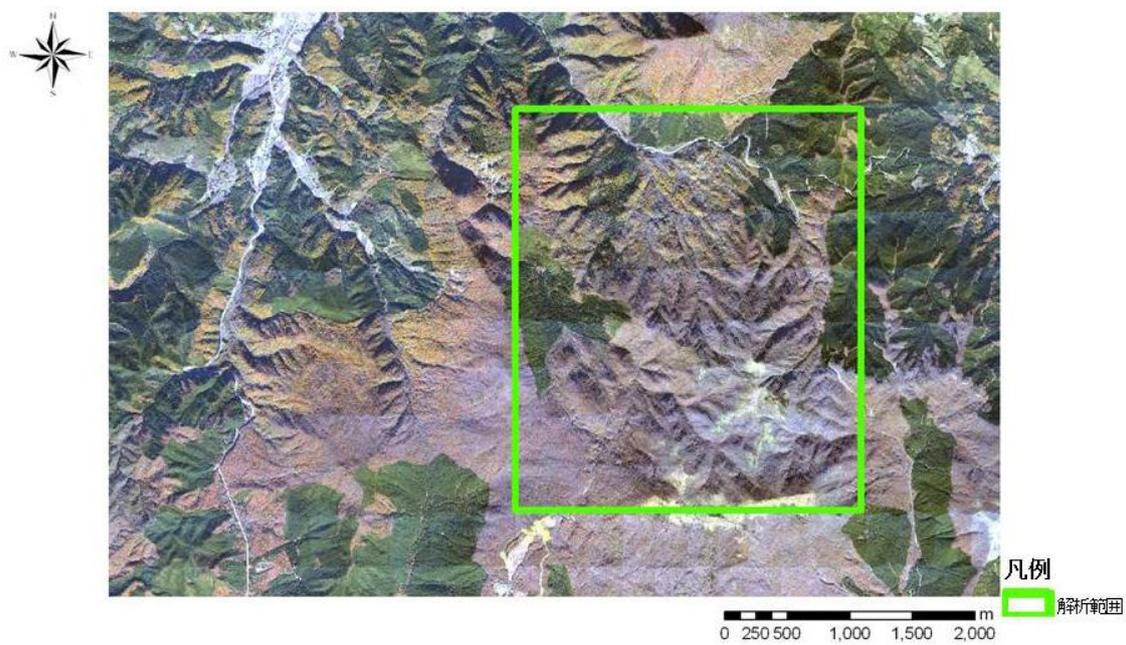


図3-2 使用したオルソ空中写真画像（11月）

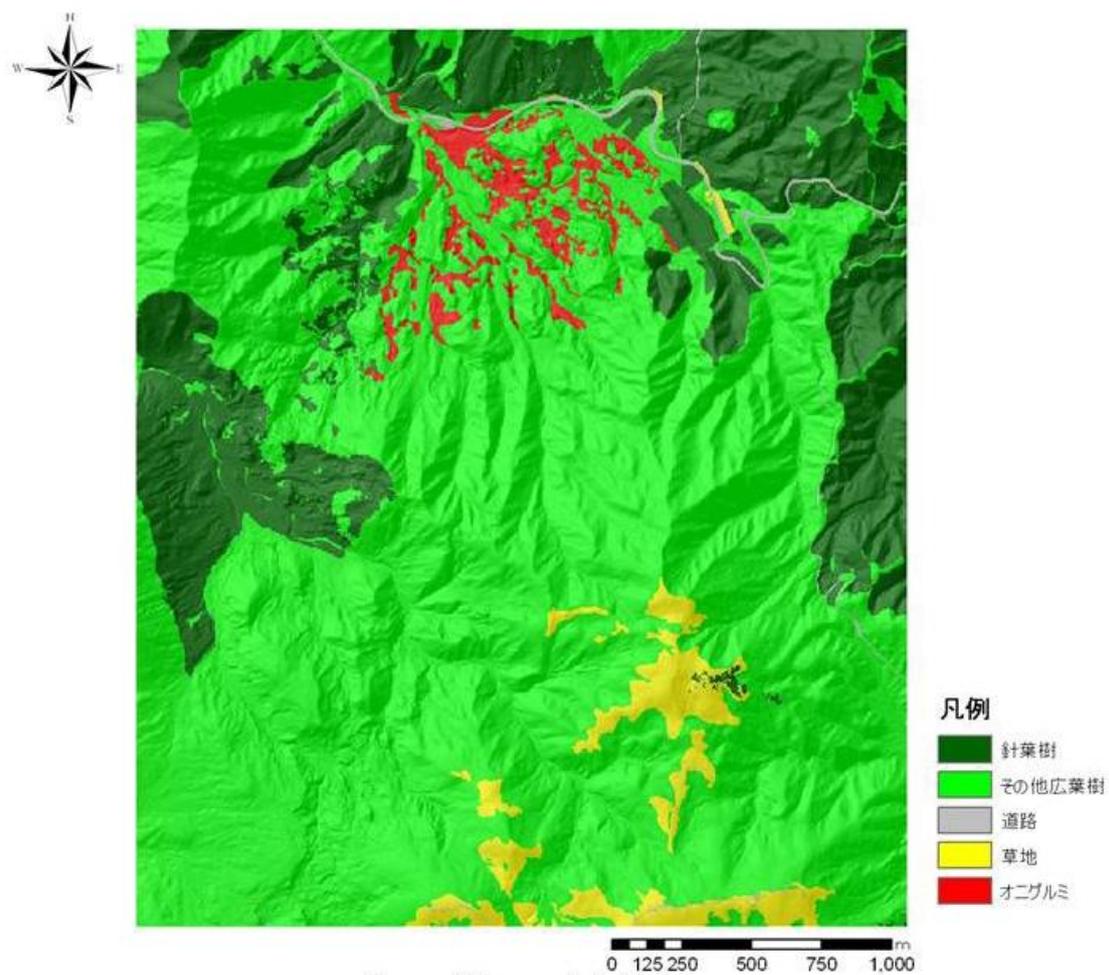


図3-3 相観植生判読図

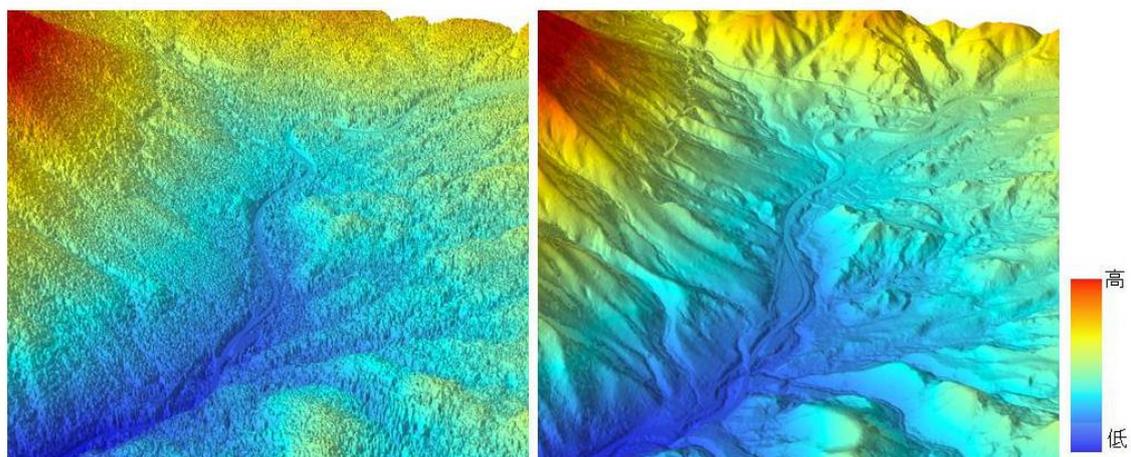


図3-4 フィルタリング前後の段彩鳥瞰図  
(左：フィルタリング前 右：フィルタリング後)

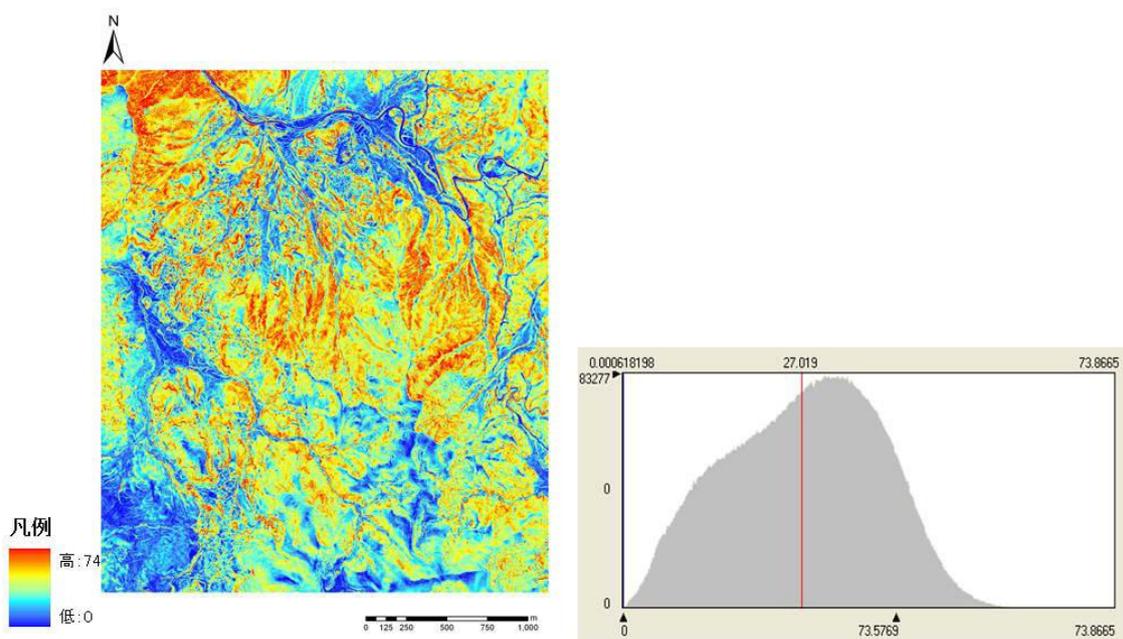


図3-5 LIDARデータより作成した傾斜度とヒストグラム

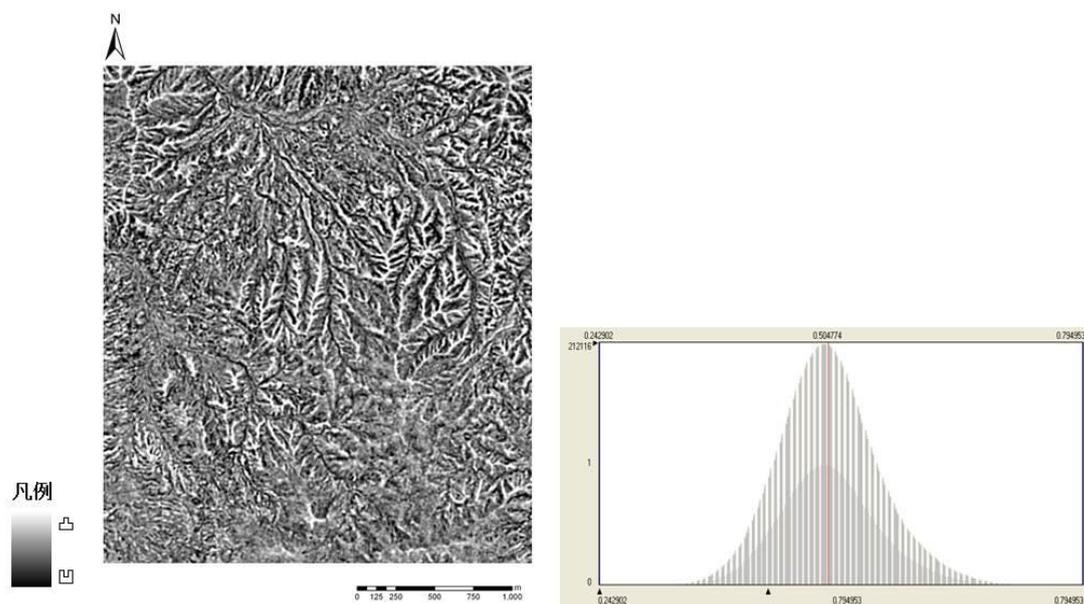


図3-6 LIDARデータより作成した凹凸度とヒストグラム

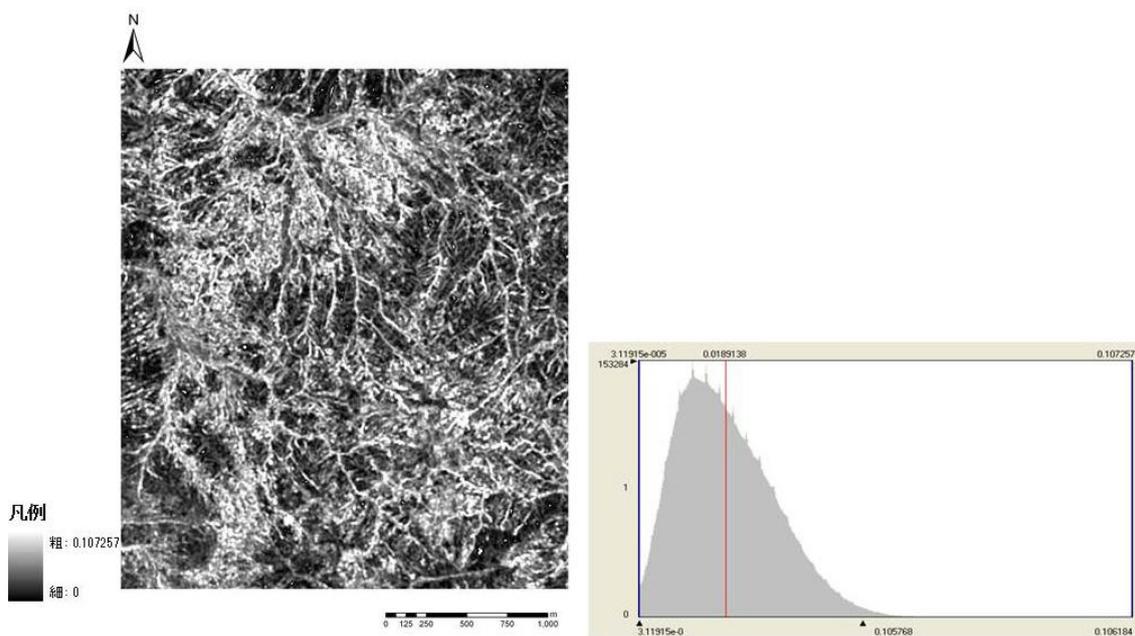


図3-7 LIDARデータより作成したテクスチャ度

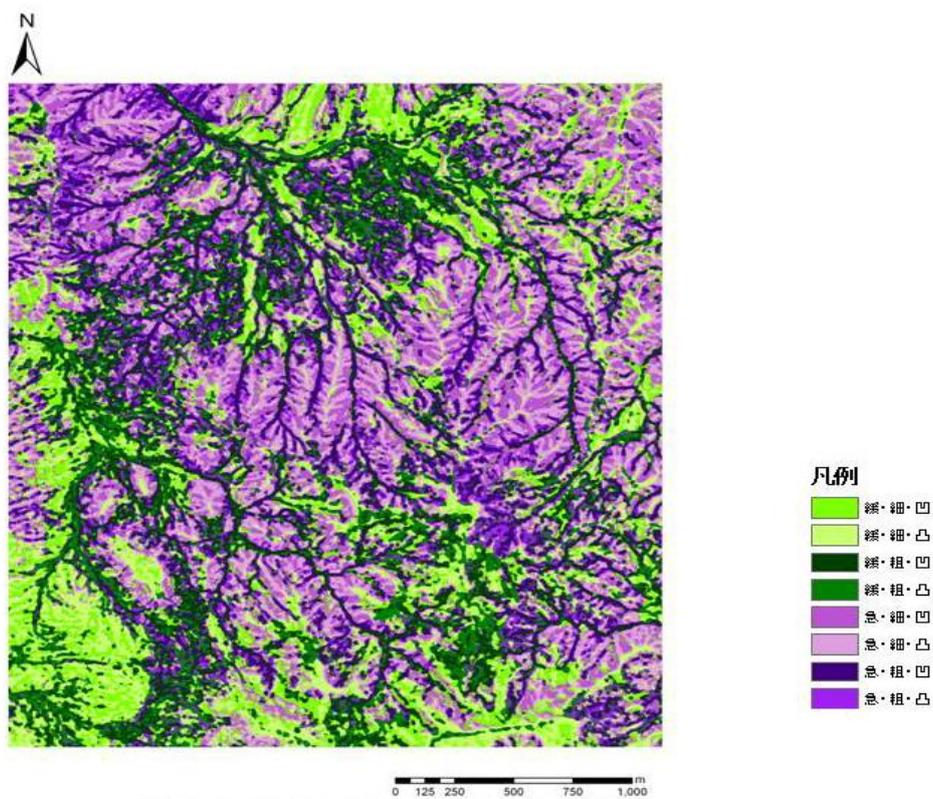


図3-8 LIDARデータより作成した地形分類図

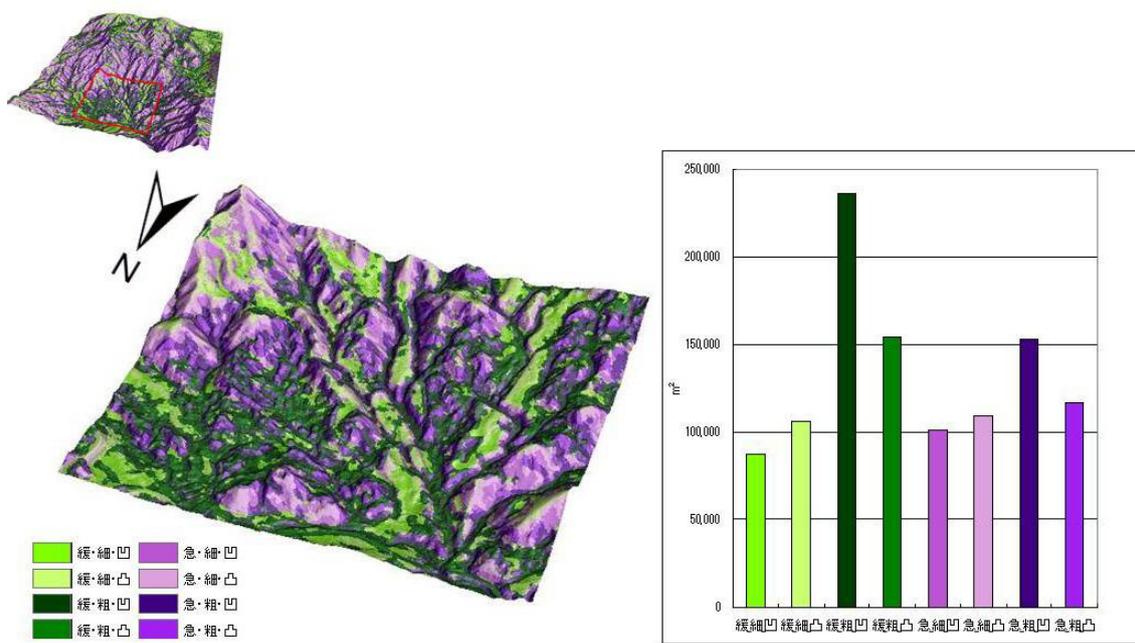


図3-9 斜面下部における地形分類と面積占有率



図3-10 LIDARデータの取得範囲

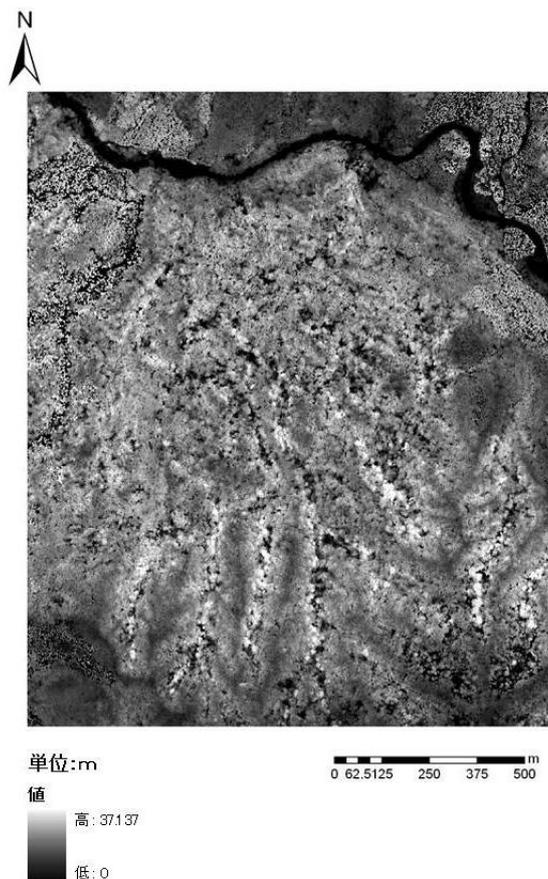


図3-11 DHM画像

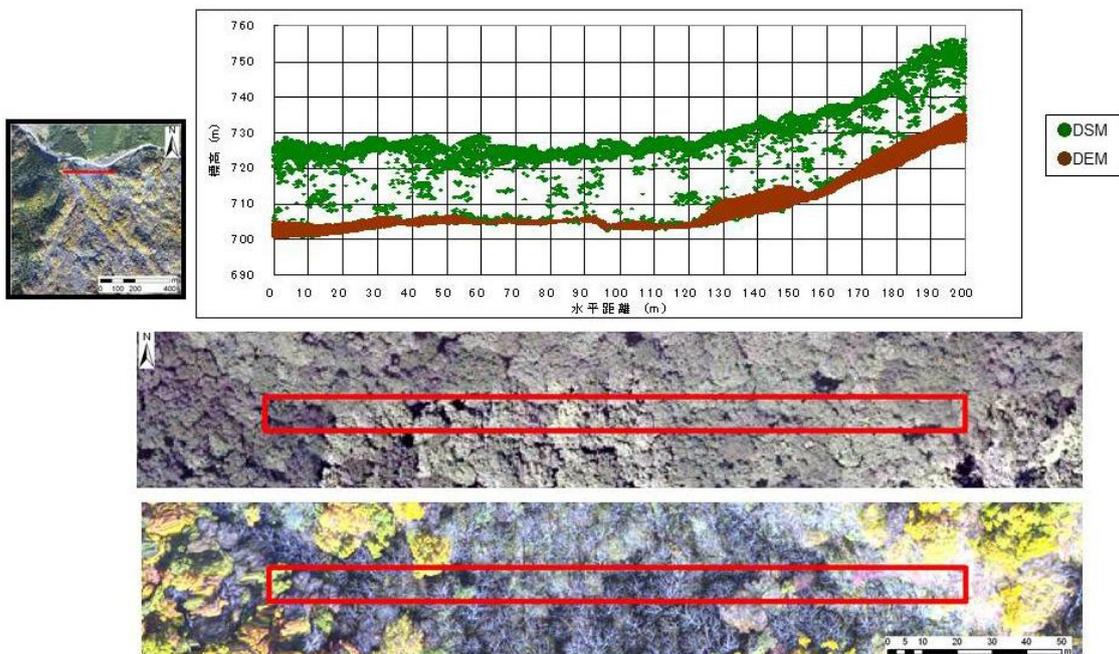


図3-12 オニグルミにおける植生三次元構造

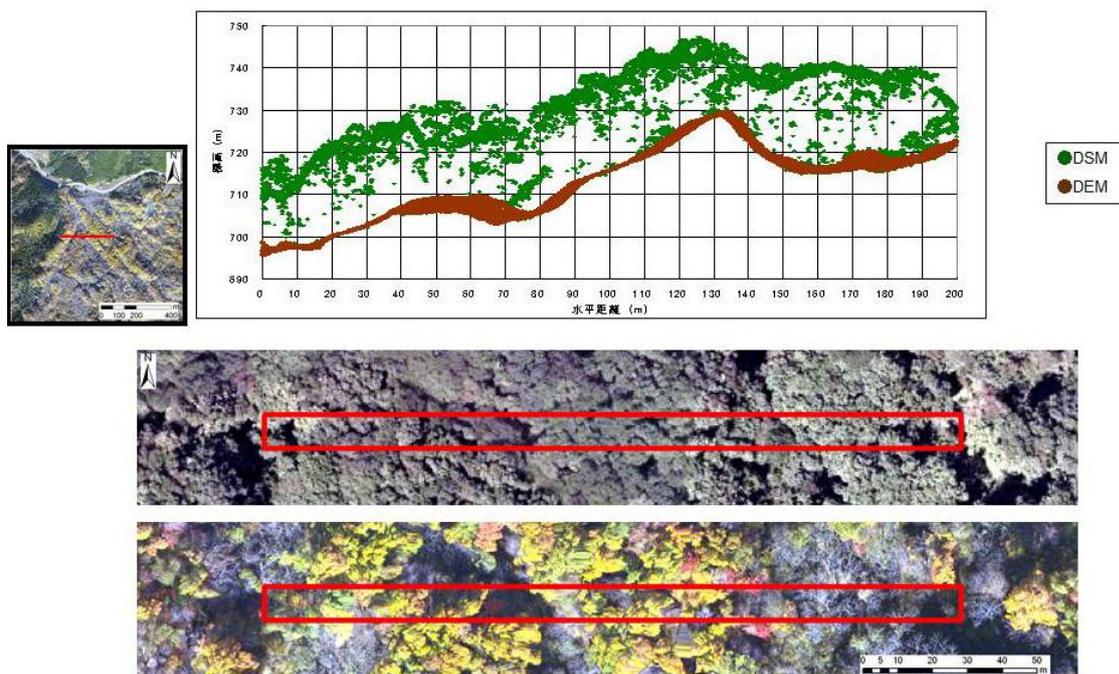


図3-13 コナラその他広葉樹における植生三次元構造

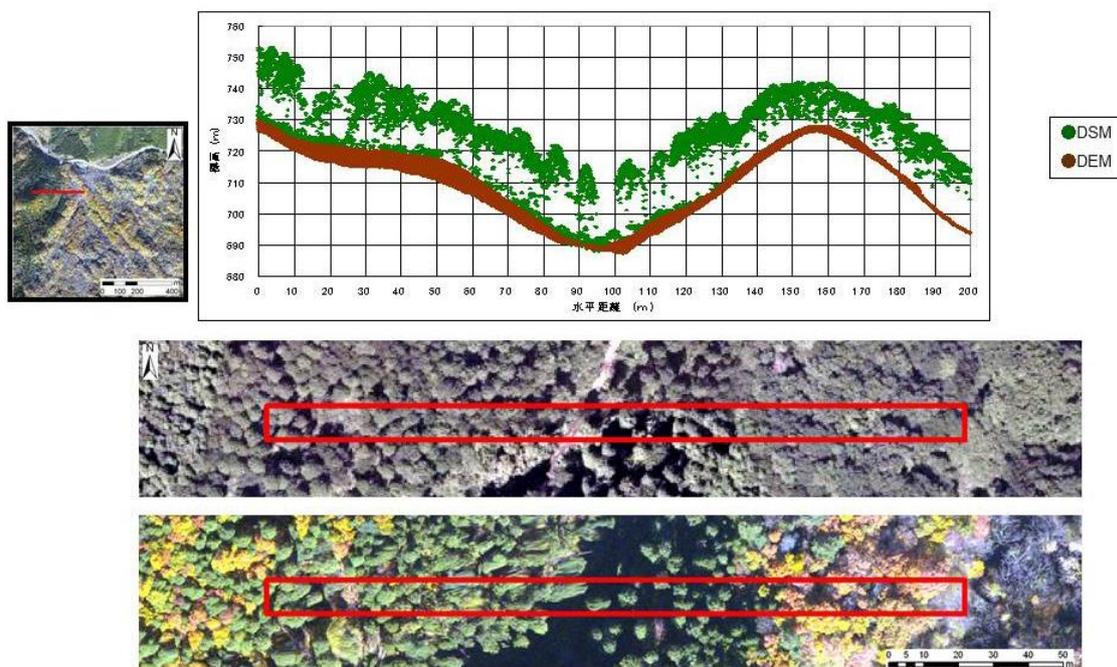


図3-14 針葉樹における植生三次元構造

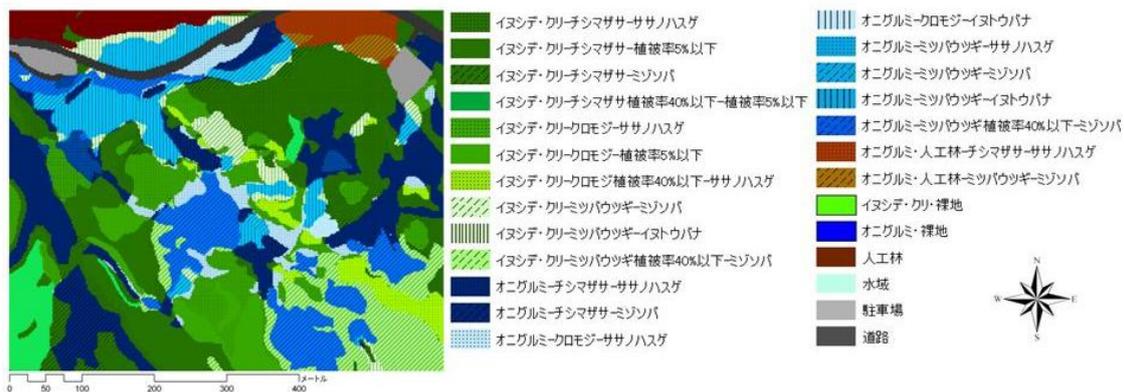


図3-15 出立山全層植生図（2009年）

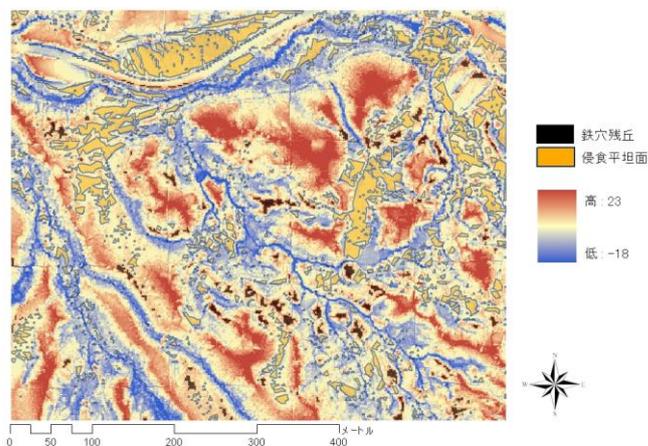


図3-16 出立山尾根谷度図（2009年）

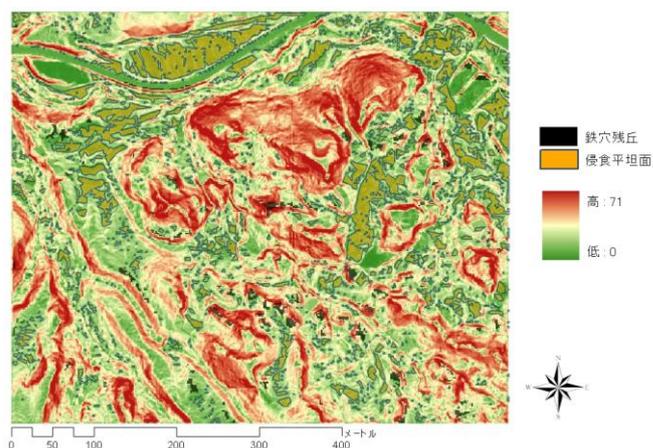


図3-17 出立山傾斜角区分図（2009年）

表3-1 各群落の土壌水分

階層	群落	平均±標準偏差	最大値	最小値	変動幅	多重比較検定 (Scheffe法)
			(Max)	(Min)	(Max-Min)	
高木層	オニグルミ	0.39±0.11	0.57	0.23	0.34	a
	イヌシデ・クリ	0.25±0.05	0.34	0.16	0.18	b
	クロモジ	0.21±0.06	0.4	0.15	0.25	c
低木層	チシマザサ	0.27±0.07	0.39	0.13	0.26	c
	ミツバウツギ	0.37±0.11	0.59	0.17	0.42	d
	植被率5%以下	0.27±0.07	0.43	0.13	0.3	e
草本層	ササノハスゲ	0.30±0.04	0.37	0.22	0.15	e
	ミゾソバ	0.44±0.12	0.6	0.21	0.39	f
	イストウバナ	0.26±0.07	0.39	0.13	0.26	e

※異なるアルファベットは1%の有意水準を表す

表3-2 群落別特化度

群落	鉄穴残丘	侵食平坦面
クリ-チシマザサ-ササノハスゲ	0.9	0.4
クリ-チシマザサ-植被率5%以下	1.6	0.1
クリ-チシマザサ-ミゾソバ	0.5	0.0
クリ-チシマザサ-植被率40%以下-植被率5%以下	0.5	0.0
クリ-クロモジ-ササノハスゲ	3.6	0.4
クリ-クロモジ-植被率5%以下	0.8	0.4
クリ-クロモジ-植被率40%以下-ササノハスゲ	1.1	0.0
クリ-ミツバウツギ-ミゾソバ	1.8	0.2
クリ-ミツバウツギ-イストウバナ	1.0	1.2
クリ-ミツバウツギ-植被率40%以下-ミゾソバ	2.2	0.3
オニグルミ-チシマザサ-ササノハスゲ	1.1	1.5
オニグルミ-チシマザサ-ミゾソバ	0.0	0.0
オニグルミ-チシマザサ-イストウバナ	0.0	0.4
オニグルミ-クロモジ-ササノハスゲ	0.0	0.8
オニグルミ-ミツバウツギ-ササノハスゲ	0.0	0.7
オニグルミ-ミツバウツギ-ミゾソバ	0.4	0.8
オニグルミ-ミツバウツギ-イストウバナ	0.5	6.5
オニグルミ-ミツバウツギ-植被率40%以下-ミゾソバ	0.4	0.6

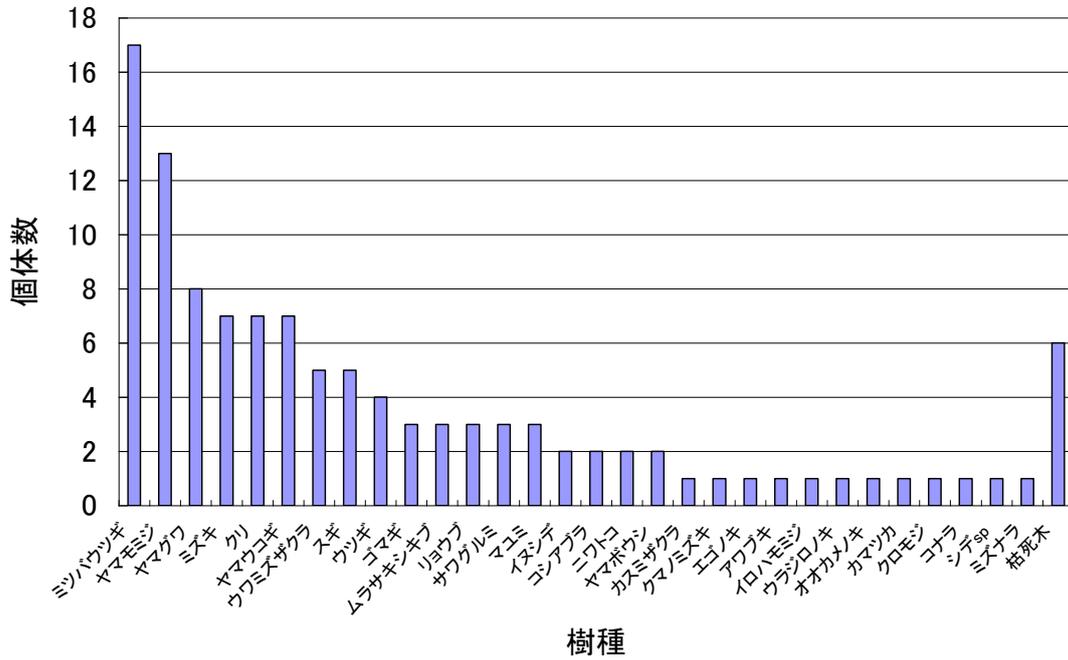


図3-18 中低木の樹種別個体数 2m<H<10m

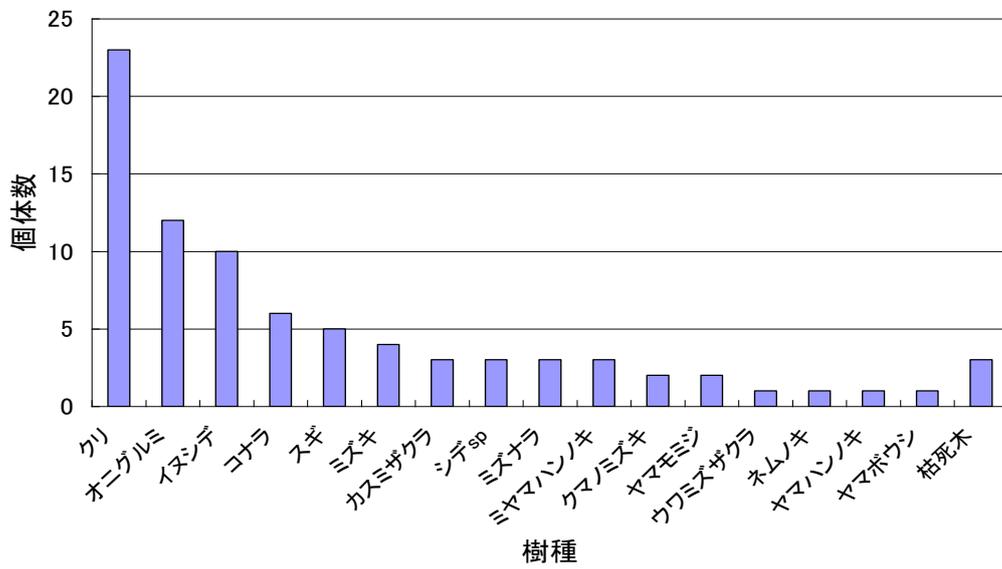


図3-19 高木の樹種別個体数 10m<H

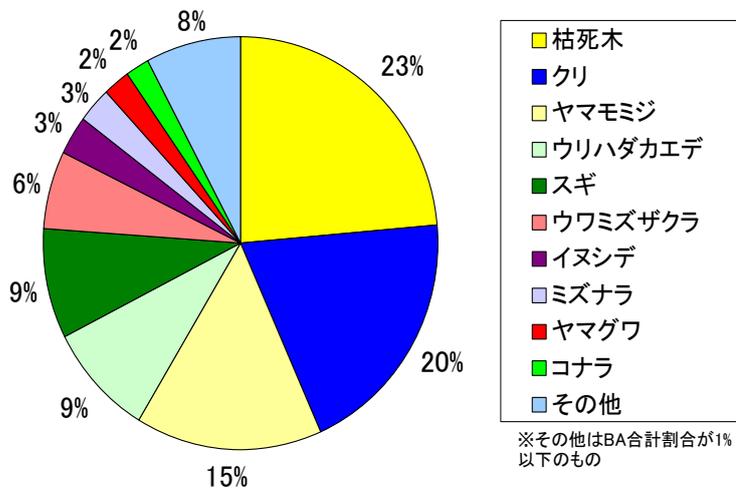


図3-20 胸高断面積(BA)合計割合 2m<H<10m

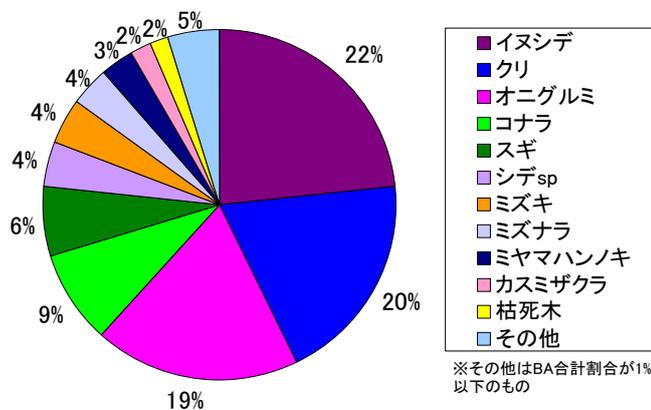


図3-21 胸高断面積(BA)合計割合 10m<H

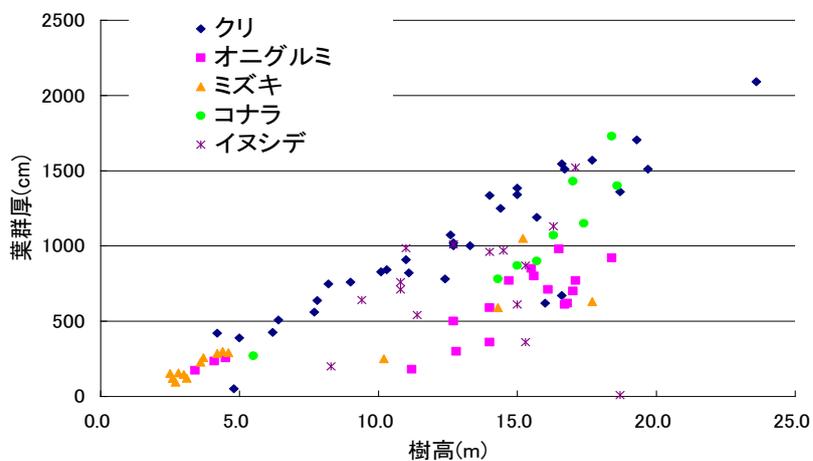


図3-22 樹種別葉群厚分布

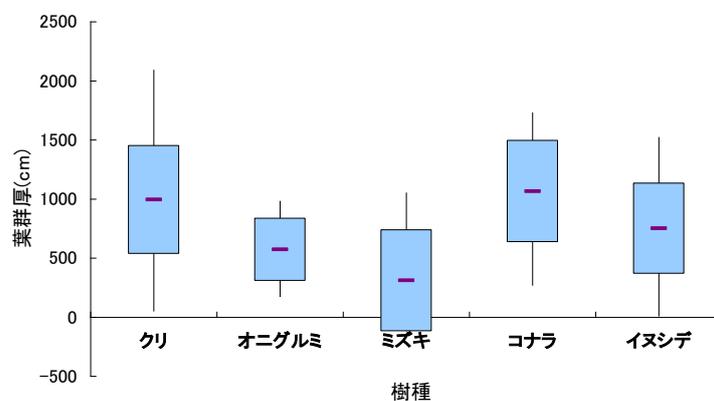


図3-23 樹種別葉群厚箱ひげ図



図3-24 ヤマアカガエル (*Rana ornativentris*)



図3-25 発信機 (BD-2:HOLOHIL社)



図3-26 発信機装着図



図3-27 受信機 (TRX-1000:WILDLIFE MATERIALS社)

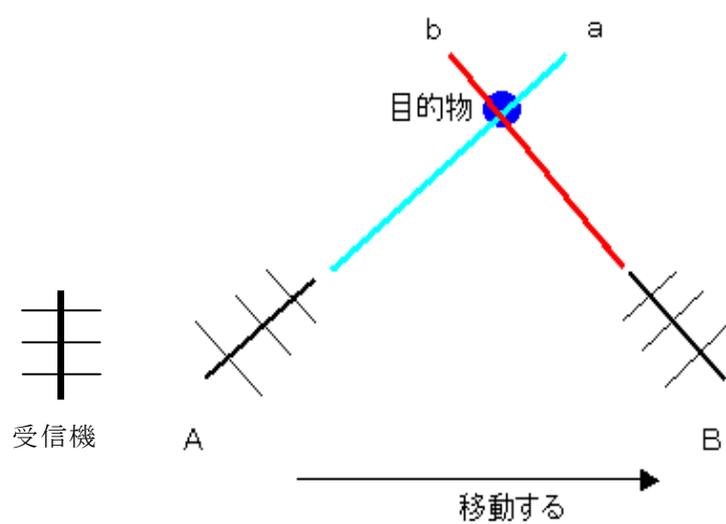


図3-28 フォックス・ハンティング法 概念図

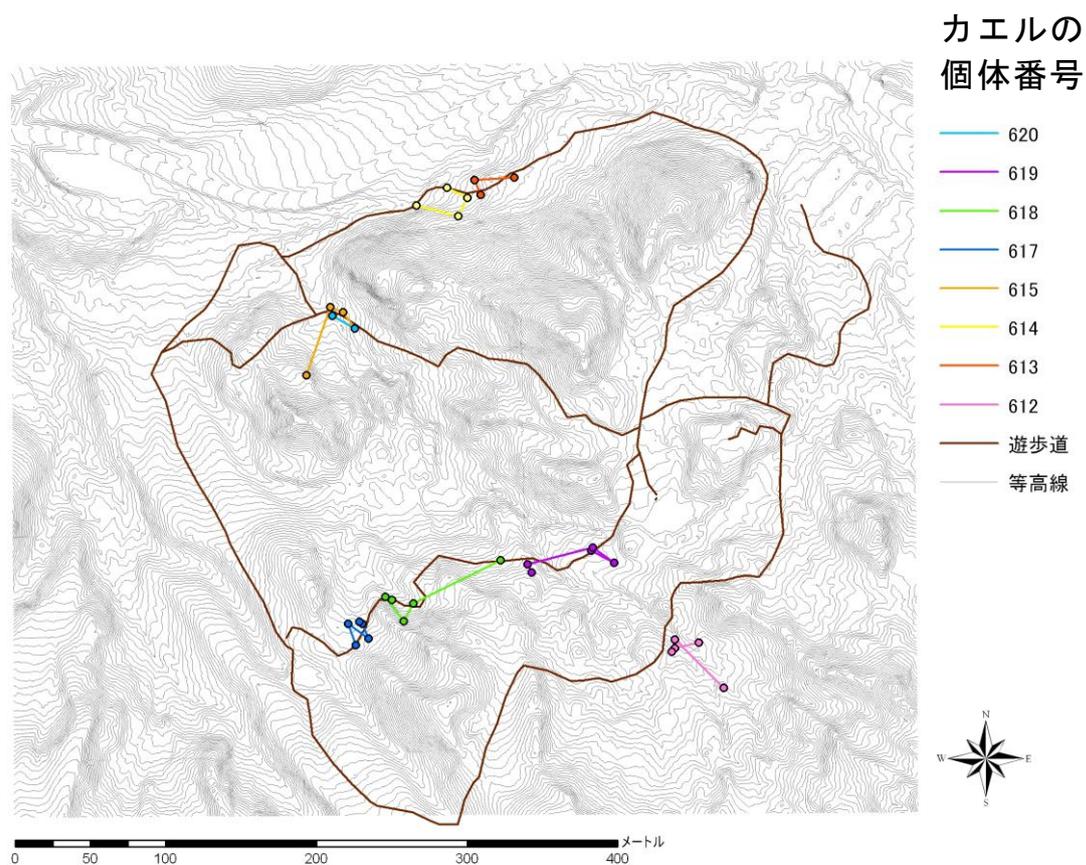


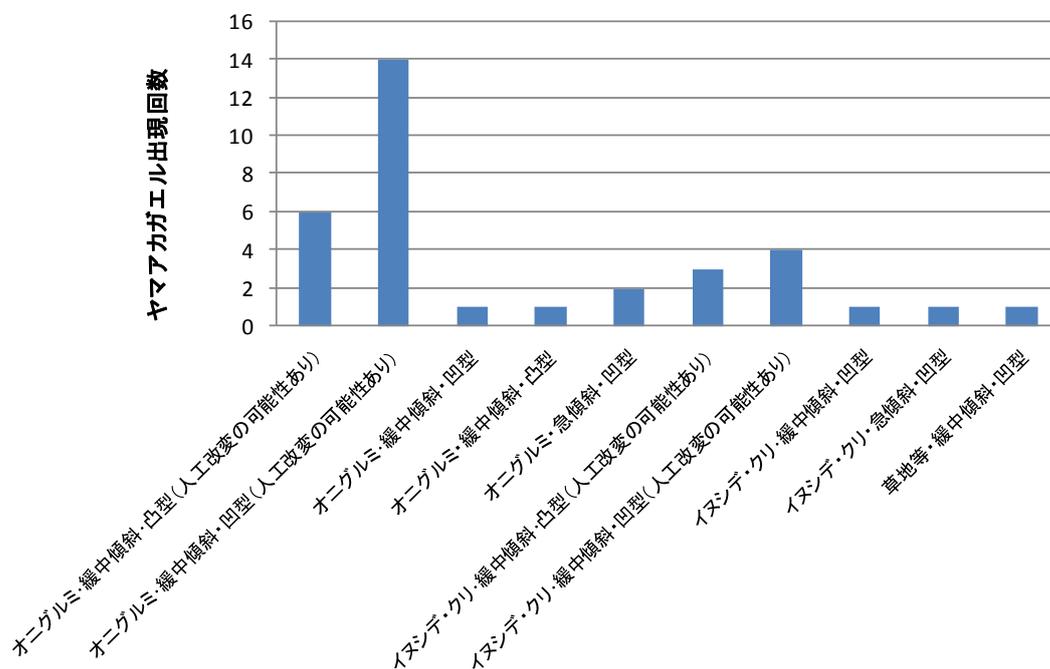
図3-29 ヤマアカガエルの分布図

表3-3 ヤマアカガエルの移動距離(m)

個体番号	10月22日	10月28日	11月5日	11月14日	累積移動距離	1日平均移動距離
612	15.5	3.2	8.2	46.0	72.9	2.4
613	10.8	26.3			37.0	2.6
614	29.1	13.9	14.5		57.5	2.6
615	13.5	9.3	48.3		71.1	3.2
617	15.2	17.1	11.2	2.5	46.0	1.5
618	64.5	13.5	20.7	4.7	103.4	3.3
619	17.1	17.6	44.7	6.0	85.4	2.8
620	17.3				17.3	2.2
平均移動距離	22.9	14.4	24.6	14.8	61.3	2.6

表3-4 ヤマアカガエルの分布していた景観生態学図の凡例名

個体番号	図	10/14	10/22	10/28	11/5	11/14
612	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	急傾斜・凹型	緩中傾斜・凸型
613	植生	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)		
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)		
614	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	急傾斜・凹型	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	
615	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m未満)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	
617	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)
618	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m未満)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型	急傾斜・凹型	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)
619	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、複層)	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m未満)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、単層)	落葉樹(クリミズナラ群集)(樹冠高10m以上、複層)
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凹型	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)
620	植生	落葉樹(ジウモンジスターサワグルミ群集)(樹冠高10m以上、単層)	草地等			
	地形	緩中傾斜・凹型 (人工改変の可能性あり)	緩中傾斜・凸型 (人工改変の可能性あり)			



景観生態学凡例名

図3-30 ヤマアカガエルと景観生態学図の凡例の出現頻度

表3-5 階層別多様性指数

階層	群落	Simpsonの単純度	Shannon関数
高木層	クリ・イヌシデ (A)	0.62	1.04
	オニグルミ (B)	0.28	0.47
	オニグルミ・スギ (C)	0.86	0.60
低木層	クロモジ (a)	0.55	1.12
	チシマザサ (b)	0.38	0.68
	ミツバウツギ (c)	0.38	0.68
草本層	イヌトウバナ (1)	0.52	1.07
	ミゾソバ (2)	0.70	1.65
	ササノハスゲ (3)	0.47	1.03
	植被率5%以下 (4)	0.30	0.52

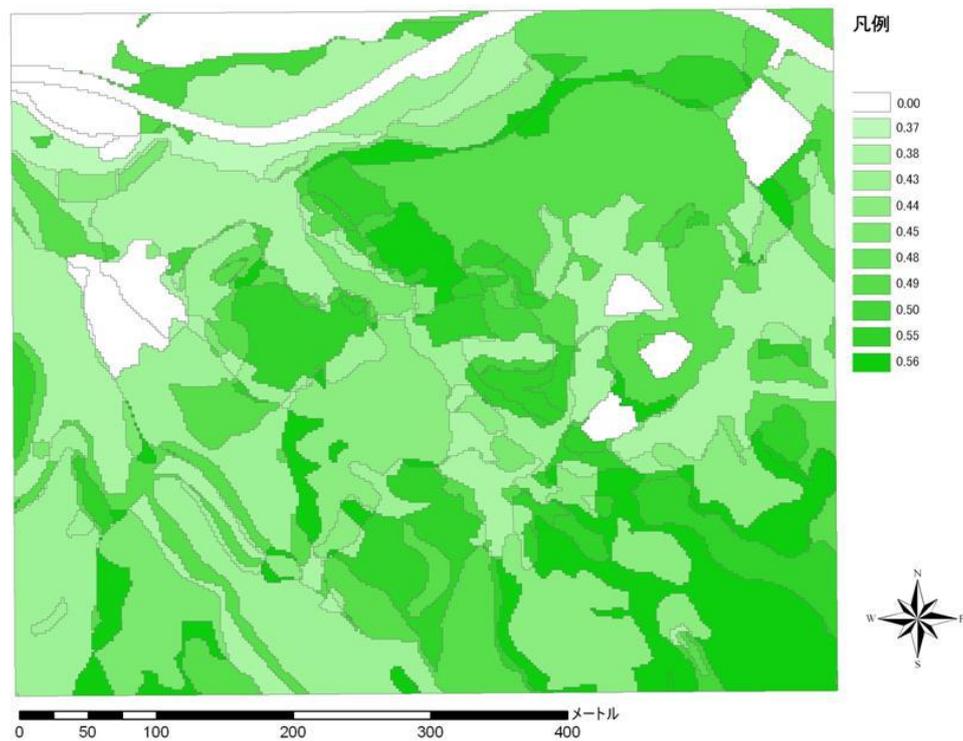


図3-31 全層植生図におけるSimpsonの単純度図

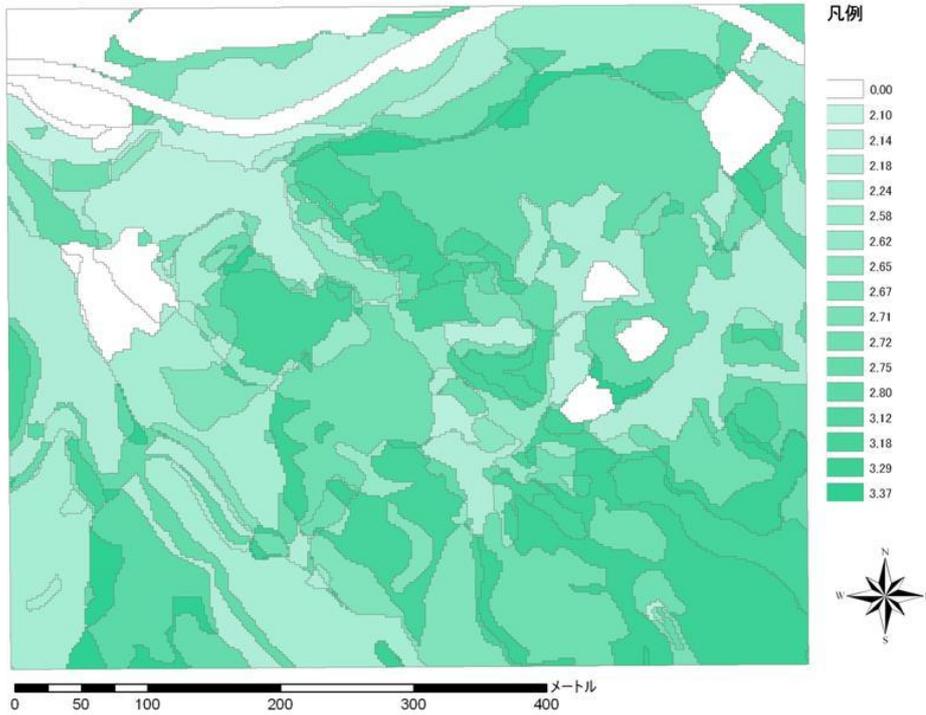


図3-32 全層植生図におけるShannon関数図

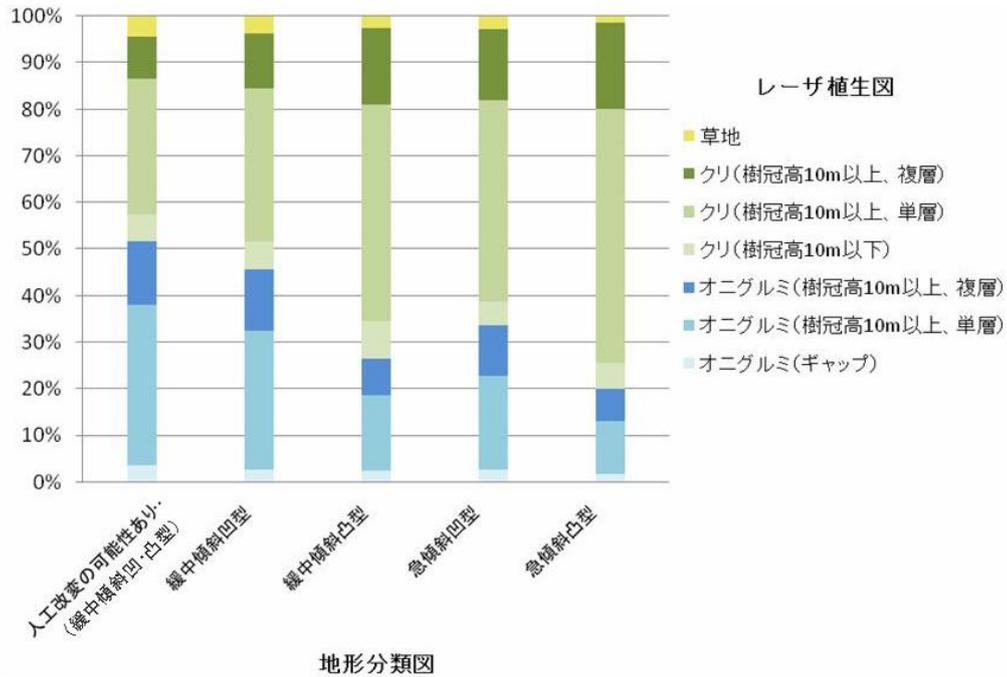


図3-33 地形分類図とレーザ植生図のクロス集計