

# 高解像度光学センサ衛星画像と LiDAR データを組み合わせた 森林域の冠雪害検出手法の開発

## Development of a Method for Forest Snow Damaged Area Detection Using the Combination of High Resolution Satellite Optical Sensor Imagery and LiDAR Data

田口仁 , 白田裕一郎 , 福井弘道 , 古川邦明

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 岐阜県森林科学研究所

**Abstract:** The forest snow damage is the disaster which is caused by load of the snow that adheres to a tree canopy, and results in fallen trees. When snow damages occur, an administration needs to identify damaged areas. However the current investigation method relies on a ground survey, which is difficult to grasp the conditions of wide areas. In this study, we developed a forest snow damaged area detection method using high resolution satellite optical sensor imagery and LiDAR data. The method consists of following procedures, (1) detection of damaged areas using satellite optical sensor imagery by a discreet choice model, (2) detection of gap areas using DSM and DEM generated by the LiDAR data, and (3) assimilation of (1) and (2). The assimilation of (1) and (2) enables the mutual complementation of each other's defects. The method was examined on the IKONOS multispectral imagery and the LiDAR data in the test area. Accuracy assessment was conducted from the aspect of omission and commission. From the aspect of omission, accuracy was evaluated by comparing the 50 randomly selected pixels of the result with aerial photograph interpretation. 47 pixels of 50 (94%) were correctly detected. From the aspect of commission, accuracy was evaluated by examining the result of (3) detection in 56 randomly selected pixels which damage was observed in aerial photography. 46 pixels of 56 (82.1%) were correctly detected. From these results, the method achieved high accuracy, and the effectiveness of the combination was demonstrated.

### 1. はじめに

冠雪害は、森林域で発生する自然災害の1つである。大雪のために、材木の枝や葉に付着した冠雪が肥大し、その重さで樹幹が大きく曲がり、幹折れや根返りなどによって致命的被害を招く(岩坪, 新田, 1984)。日本では、昔から冠雪害による被害が発生しており、特にスギやヒノキなどの針葉樹が多大な被害を受けてきた。最近では、間伐などの管理が十分に行き届いておらず、形状比が高い人工林が数多く存在しているため、林分が冠雪害に対して脆弱化しているという問題もある。

冠雪害が発生した場合、復旧作業や、森林保険の適用のため、被害箇所の正確な把握が求められる。現状では現地調査による被害箇所の把握が行われているが、冠雪害は樹種の分布や地形等に影響され、比較的分散して発生することから、現地調査のみでは網羅的な被害箇所の把握は困難である。また、幹折れや根返りなどの被害箇所は、調査に危険が伴うことが多く、安全な調査の方法が求められている。

森林域では、近年、高解像度リモートセンシングデータの利用が活発に行われている。特に、森林資源量の把握に着目した研究が多く、高解像度光学センサ衛星画像を用いて樹種分類を行った事例(たと

えば、河邑ら, 2005)のほか, 航空レーザ測量から得られる LiDAR データを用いて, 材積や樹高を推定する事例(例えば, 米ら, 2002)が見られる。冠雪害を検出する場合においても, これらの高解像度リモートセンシングデータを用いることで, 効率的かつ効果的な被害情報収集の可能性がある。従って本研究では, 高解像度リモートセンシングデータとして, 高解像度光学センサ衛星画像と LiDAR データを用いた, 冠雪害検出手法の開発を行った。

## 2. 冠雪害検出に有効なデータの検討

### 2.1. 高解像度光学センサ衛星画像

ここで光学センサ衛星画像とは, IKONOS や QuickBird 画像のような受動型の光学センサの衛星画像を指すこととする。冠雪害で幹折れや根返りが発生した箇所では, 土地被覆が周辺の森林と異なる様相を示す。そのため, 光学センサ衛星画像から, 幹や土壌に近い反射輝度を持つ画素を抽出することで, 冠雪害が検出可能である。冠雪害検出の方法としては, 明らかに冠雪害である箇所から教師データを取得し, 統計的手法を用いて, 「被害」, 「無被害」の判別を行う方法が考えられる。

光学センサ衛星画像から, 倒木被害を検出した事例は数多く存在し, 特に暴風による倒木被害の検出事例が見られ, 高解像度光学センサ衛星画像や航空機搭載型センサのデータを用いた事例がある(例えば, Schwarz et al, 2003; Jackson et al., 2000)。

光学センサ衛星画像の問題点としては, 倒木箇所が多様な土地被覆で構成される可能性があること, 他の土地被覆と間違えて検出される可能性があることが挙げられる。例えば, 倒木箇所は幹や土壌に近い反射輝度を示すため, 赤色系の反射が強まるが, 樹木が枯損している箇所においても, 葉が赤色系の反射が強まることから, 倒木箇所でない場合でも, 誤って被害箇所として検出される可能性が高い。

### 2.2. LiDAR データ

冠雪害で幹折れや根返りが発生した箇所は, 表面形状が凹となる。つまり, 高さは急に変化し, DSM と DEM の差が小さい箇所となる。Fig.1 に模式図を示す。

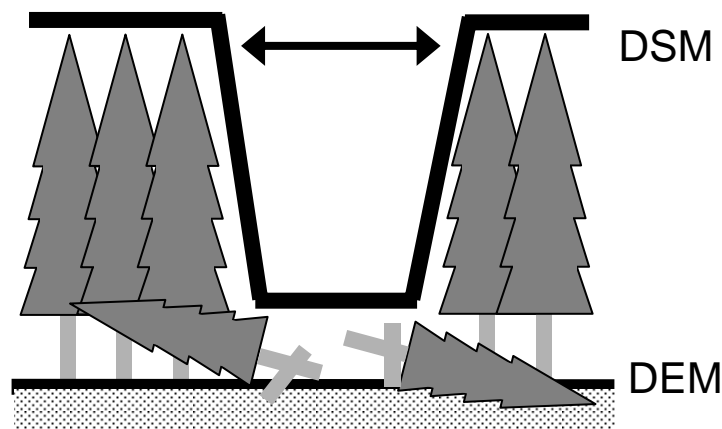


Fig.1 冠雪害発生箇所における DSM と DEM の模式図

表面形状が凹となる箇所は, ギャップと呼ばれており, 高さ情報から何らかの方法で抽出することで, 冠雪害の検出が可能である。表面形状である DSM は, ステレオペアの空中写真からも得られるが, LiDAR

データから作成される DSM は、直接的に表面形状を観測していることから、倒木箇所の抽出に適していると考えられる。しかし、従来の倒木箇所の検出に関する研究では、表面形状に着目した研究はみられない。DSM で冠雪害を検出する際の問題点は、ギャップの土地被覆が不明であるため、樹高が低いあるいは密度が疎な林小班などでは、誤検出となる可能性が挙げられる。

### 2.3. データの組み合わせの有効性

反射輝度に基づく光学センサ衛星画像及び表面形状に基づく LiDAR データは、冠雪害検出に有効と思われるが、それぞれに誤差要因を含んでいる。しかし、これらのデータがそれぞれに持つ欠点は、互いを補うことができる可能性がある。表面形状のデータからギャップ抽出の際の問題点は、ギャップの土地被覆が不明であることだが、光学センサの衛星画像を組み合わせることで、反射輝度から冠雪害であることを明確にできる。このように、2つのデータを組み合わせは、被害の検出精度を向上させる可能性がある。

### 3. 冠雪害検出手法の検討

本研究では、光学センサ衛星画像から被害箇所を検出し、LiDAR データからギャップを抽出した上で、これら2つのデータを組み合わせ、冠雪害を検出する手法を検討した。Fig.2 に、検討した冠雪害検出手法のフロー図を示す。

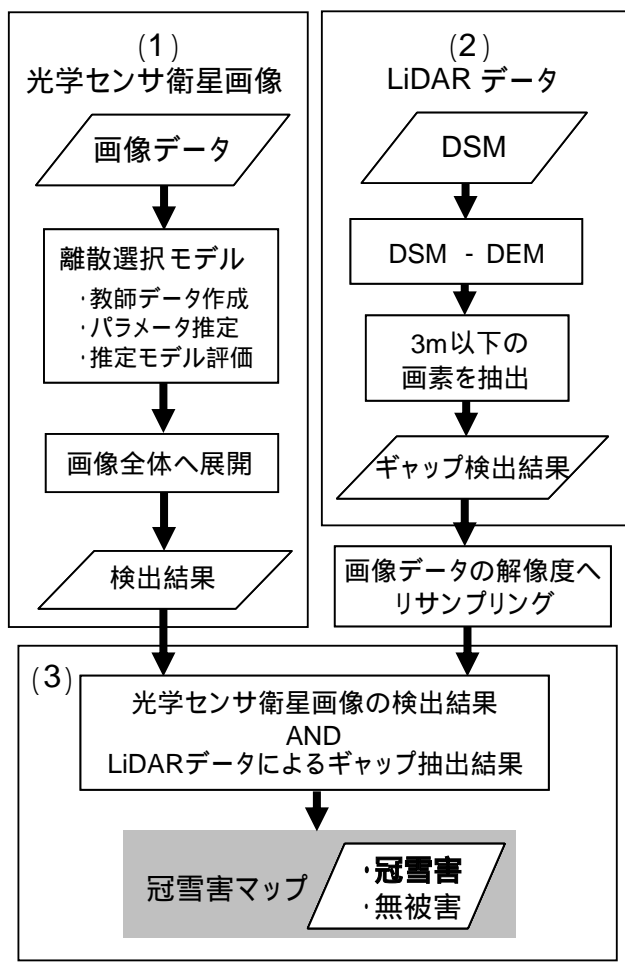


Fig.2 冠雪害検出フロー

## (1) 高解像度光学センサ衛星画像による冠雪害検出

被害箇所を検出には、いくつかの方法が考えられるが、本研究では Seto and Kaufmann(2005)が適用した、離散選択モデルの1つである Logit モデルを用いることにした。この事例では、Logit モデルを用いた分類で最尤法と同程度の分類精度が得られることが確認されている。

Logit モデルでは、その地点で観測されたデータを基に効用( $U$ )が最大となるように選択すると仮定する。また、観測された情報が誤差等の要因を考慮し、効用関数は確率変動すると仮定し、確率変数で表現する(土木学会土木計画学研究委員会編, 1997)。従って、被害・無被害の2つの選択は画素ごとに選択確率として表現され、確率の高い方がその画素の選択結果となる。

画素  $n$  における冠雪害の有無の選択肢を  $i$  ( $i=1$ : 有,  $i=0$ : 無)で表現すると、効用関数  $U_{in}$  は式(1)のように表される。

$$U_{in} = \beta_1 x_{1in} + \beta_2 x_{2in} + \dots + \beta_k x_{kin} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

$k$  は説明変数の数を表しており、 $x_{1in} \dots x_{kin}$  は画素値や輝度値などの観測可能な説明変数、 $\beta_1 \dots \beta_k$  はパラメータである。式(1)で、 $\varepsilon_{in}$  は観測不可能な要因により確率的に変動する確率項である。画素  $n$  における冠雪害による被害の発生( $i=1$ )を選択する確率  $P_{1n}$  は、ロジット変換によって、効用関数  $U_{in}$  との間に式(2)で表されるような関係が成り立つ。確率  $P_{1n}$  は 0.5 以上で冠雪害が発生したと判断する。

$$P_{1n} = \frac{1}{1 + e^{-U_{in}}} \quad (2)$$

パラメータ  $\beta$  は、最尤推定法を用いて、尤度関数を最大にすることで得られ、推定したモデルの当てはまりを評価するため、擬似決定係数(Pseudo  $R^2$ )を求める。

以上の流れに則り、本手法では、はじめに明らかに冠雪害である箇所を抽出し、無被害域、被害域を含めるように教師データを作成する。その教師データを基に Logit モデルのパラメータを推定し、各パラメータが常識的な結果であるかを係数の値や Z 値から判断し、擬似決定係数(Pseudo  $R^2$ )でモデルの適合度を判定する。また、教師データ自身で選択結果の検証を行い、推定モデルを対象地域全体へ適用可能かどうかを判断する。その後画像全体に適用し、被害箇所を検出した結果を得る。

## (2) LiDAR データによる冠雪害検出

LiDAR データからフィルタリング処理を施し、DSM と DEM を作成し、ギャップの抽出を行う。ギャップの抽出までの一連の流れについては、先行研究(Koukoulas and Blackburn, 2004)があり、この手法を適用することにした。

ギャップの抽出には DSM から DEM を差し引いて Digital Canopy Model を作成し、この値が 3m 以下の画素を抽出することで得られる。つまり、樹冠ではなく地表面に近い箇所を抽出することで、ギャップを抽出することが可能となる。本研究で基準として採用した 3m は、倒木や幹折れによって完全には地面が露出する場合だけではなく、周囲の樹木等に倒れ込み、完全に倒れきらない場合があることから基準とした。なお、この値は現地調査からも確認することができた。

## 4. 手法の評価

### 4.1. テストエリア及び使用したデータ

3で提案した手法について、実際にテストエリアにおいて適用した結果を基に、評価を行った。

テストエリアは、岐阜県郡上市美並町周辺の森林域で、縦 3000m、横 2600m の領域とした。この地域では、2002 年 1 月上旬に広範囲に冠雪害が発生したエリアである(茂木、横井, 2003)。光学センサ衛星画像としては 2003 年 5 月下旬に撮影された IKONOS マルチスペクトル画像(解像度 4m、以下 IKONOS 画像)を使用した。一方、LiDAR データとしては、2004 年春季から夏季にかけて岐阜全県で取得されたものを使用した。観測の仕様を Table.1 に示す。また、これらのデータの取得時期と被害発生時期にずれはあるが、その間は新たな冠雪害による被害は発生していないことが確認されている。Fig.3 にテストエリアの概略を示し、白枠には教師データを選定した箇所を示す。

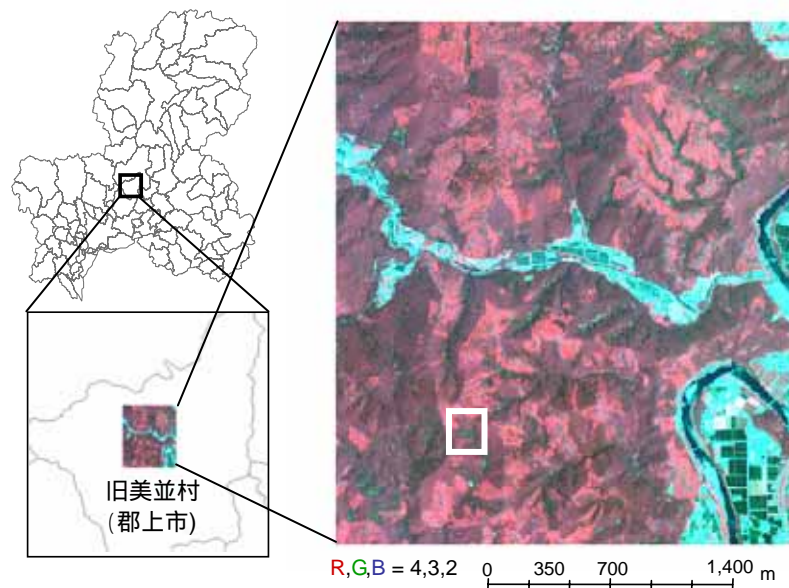


Fig.3 テストエリアの IKONOS 画像と、教師データ選定箇所(白枠内)

Table.1 LiDAR データの観測仕様

|             |                             |
|-------------|-----------------------------|
| 使用機器        | RAMS(Ener Quest Systems 社製) |
| 対地高度        | 2100m                       |
| スキャン角       | 22 度                        |
| パルスレート      | 15000Hz or 24000Hz          |
| パルスの精度 (公称) | 水平 ± 30cm                   |
|             | 垂直 ± 15cm                   |

対象地は 2 機体制で観測が行われた

この教師データは、 $44 \times 37$  の 1628 画素の領域を選定し、各画素に対して、冠雪害の発生前後で撮影された空中写真と現地調査を比較しながら、「被害」の教師データを 209 画素、「無被害」の教師データを 1419 画素選定した。教師データを Fig.4 に示す。

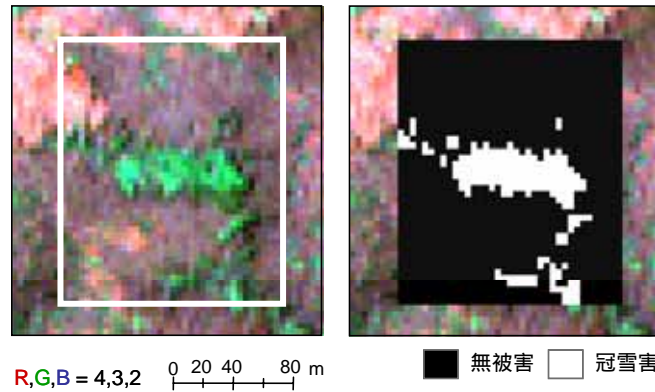


Fig.4 教師データとして選定した領域(左:IKONOS 画像, 右:教師データ)

IKONOS 画像は, Space Imaging 社が示した式(Space Imaging, 2001)を用いて, DN 値を絶対放射輝度に変換した。また, バンド 1, 2 は, 画像を表示させて確認したところ, 被害域と無被害域でスペクトルに大きな違いが確認できないため, バンド 3, 4 で分析を行うことにした。Fig.5 に冠雪害, 広葉樹, 針葉樹の各代表的な箇所の輝度値をプロットした。

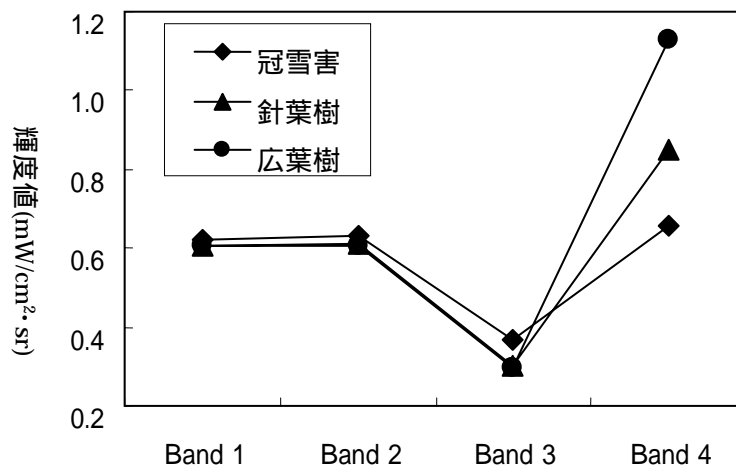


Fig.5 冠雪害, 針葉樹, 広葉樹の代表的な輝度値のプロット

ギャップを抽出するために使用する DEM は, 本研究で使用する LiDAR データを基にして作成され, 岐阜県全域で整備済みである DEM を使用した。なお, それぞれのデータは, 林小班や林道のベクターデータからマスキング処理を行い, 森林域のみを抽出して行った。

#### 4.2. 高解像度光学センサ衛星画像による冠雪害検出結果の評価

教師データを基に IKONOS 画像から Logit モデルのパラメータを推定した。推定結果を Table.2 に示す。推定パラメータは, バンド 3 で符号が正, バンド 4 で符号が負となっている。これは冠雪害の被害箇所の反射特性で効用が高くなることを表しており, 常識的なパラメータ推定結果が得られた。また, 推定パラメータの Z 値は, 0.001%水準で有意であり, 擬似決定係数(Pseudo R<sup>2</sup>)は 0.705 と, 適合度が高いことを表している。Table.3 に教師データ内での検出精度を検証した表を示し, Fig.6 には教師データ内での適用結果を示す。

Table.2 パラメータ推定結果

| パラメータ<br>(下段は Z 値) |          |
|--------------------|----------|
| 切片                 | -53.23   |
|                    | -10.71 * |
| バンド 3              | 252.28   |
|                    | 12.41 *  |
| バンド 4              | -29.05   |
|                    | -12.71 * |

\*0.001%水準で有意

Table.3 教師データ内の精度検証

|    |     | 選択結果 |     |        |
|----|-----|------|-----|--------|
|    |     | 無被害  | 被害  | 的中率    |
| 教師 | 無被害 | 1390 | 29  | 97.90% |
|    | 被害  | 47   | 162 | 77.50% |
|    | 総計  | 1437 | 191 |        |

全体的中率 : 95.3%



|    |     | 選択結果 |    |
|----|-----|------|----|
|    |     | 無被害  | 被害 |
| 教師 | 無被害 |      |    |
|    | 被害  |      |    |

Fig.6 教師データ内での選択結果の比較

全体的中率は 95.3%，教師データで被害とした画素のうち，77.5%が被害としての的中した。なお，冠雪害として抽出されなかった箇所は Fig.6 によると，まとまった被害域と無被害域の境界部分に多い。一方，周囲に散在して抽出された画素(Fig.6 で濃い灰色の画素)は，空中写真によると枯損被害であることが確認できたことから，枯損と倒木の反射が近いことで，一部が誤分類されたと推測される。このように，エラーは

散見されるが、被害の中心は確実に的中しているため、このモデルをテストエリア全体に適用することにした。検出結果の一部を Fig.7 に示す。検出箇所は白色で示されている。

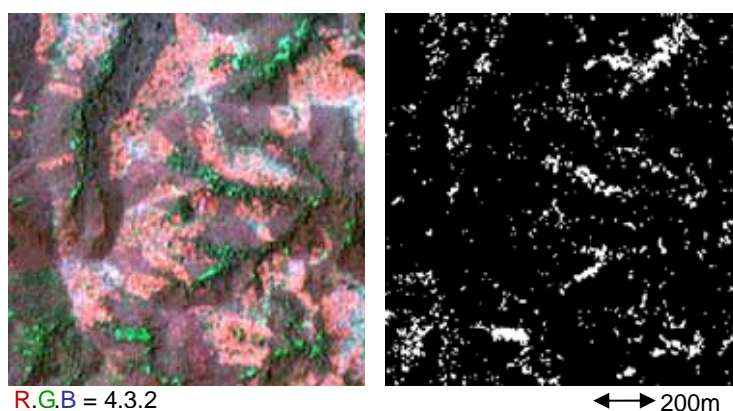


Fig.7 IKONOS 画像(左)と検出結果(右)

検出箇所の多くは R,G,B=4,3,2 の IKONOS 画像でも緑色系の箇所の多くが冠雪害被害域となっており、2.1 で先述した倒木箇所の反射特性と一致した。また、空中写真からも冠雪害被害域が概ね良好に検出されていることが確認できた。ただし、教師データでも確認できたように、枯損箇所では誤って冠雪害として検出される場合があった。Fig.8 に枯損と冠雪害が両方発生している箇所を示す。Fig.7 と同様に検出箇所は白色で示されている。

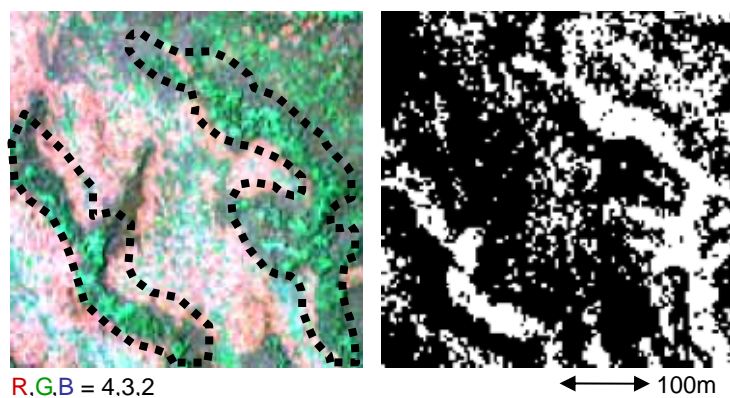


Fig.8 IKONOS 画像(左)と検出結果(右)  
(黒色の点線内は冠雪害発生箇所を示している)

左の合成画像で黒色の点線に囲まれた箇所は、空中写真の判読から示した冠雪害の領域である。しかし、図左上部を中心に、冠雪害ではない箇所も多く検出されてしまっており、この誤検出箇所はいずれも枯損箇所で発生している。この原因は、先述したとおり、冠雪害の被害箇所と枯損箇所の輝度値に大きな違いがないことにある。

#### 4.3. LiDAR データによる冠雪害検出結果の評価

DSM からギャップを抽出した結果の一部を Fig.9 に示す。左は DSM を白黒の濃淡で表し、右にギャップとして抽出された領域を白で示す。画像の中央部には規模の大きいギャップがあるが、良好に抽出されて

いることが確認できた。また、比較的規模の小さいギャップについてもギャップとして抽出されていた。

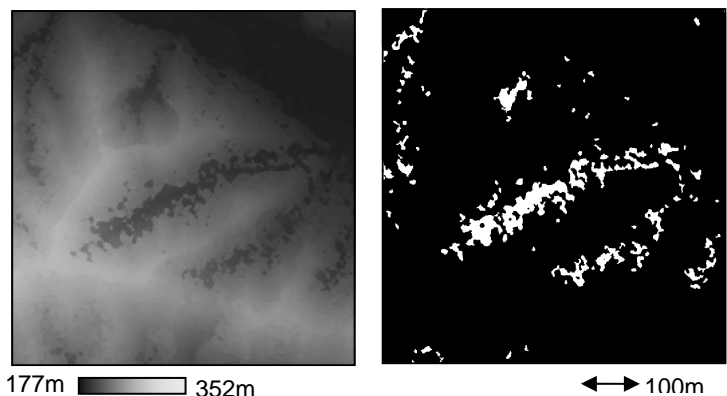


Fig.9 DSM(左)とギャップ抽出結果(右)

しかし、ギャップとして抽出された箇所の土地被覆によっては、実際には冠雪害ではない箇所が検出された場所があった。Fig.10 に、IKONOS 画像とギャップ抽出結果を重ねた例を示す。左は IKONOS 画像を示し、右にギャップとして抽出された領域を白で示す。

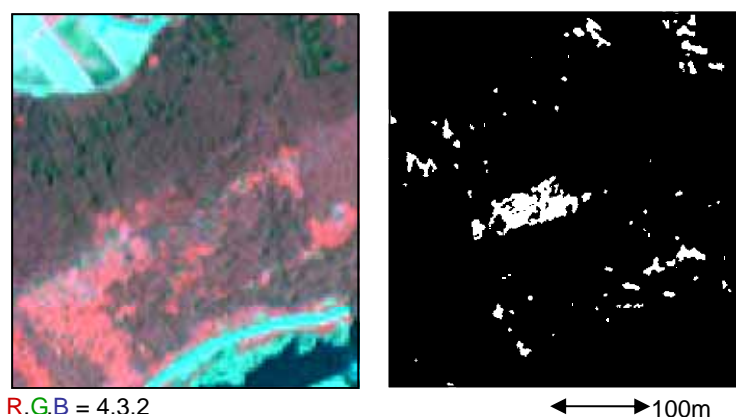


Fig.10 IKONOS 画像(左)とギャップ抽出結果(右)

この箇所では、ギャップとして抽出されているものの、IKONOS 画像から判断すると冠雪害ではないことが確認できる。この箇所を空中写真で詳細に確認したところ、樹齢が若く、樹高の低い箇所であることが確認できた。従って、このように樹高が低い箇所では、ギャップとして誤検出される可能性が高く、ギャップ抽出結果のみでは、除去することは困難である。このような箇所は、画像全体で数箇所確認できた。

#### 4.4. 2つのデータを組み合わせた冠雪害検出結果の精度評価

2つのデータを組み合わせて冠雪害を検出した結果を Fig.11 に示す。検出された画素は白で示している。また、Fig.11 において、点線で囲んだ箇所を拡大した図を Fig.12 と Fig.13 に示す。

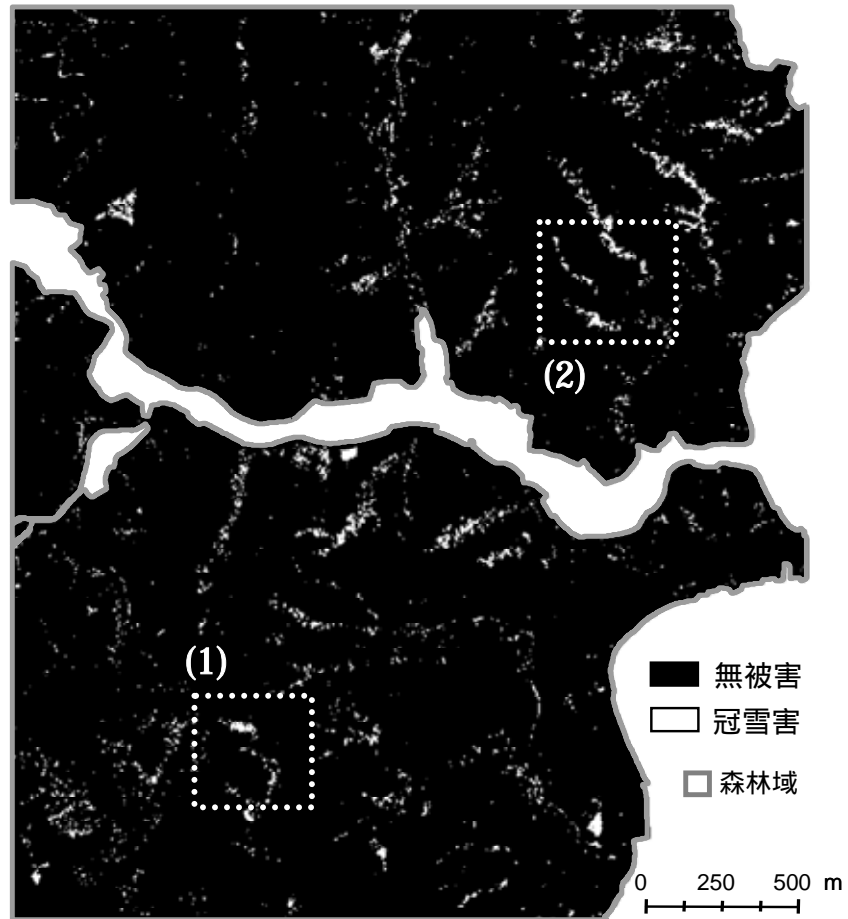


Fig.11 テストエリア全体の冠雪害検出結果

Fig.12 では、(c)ギャップ抽出結果に白色の点線で示した箇所があるが、これは冠雪害ではないにもかかわらず、ギャップとして抽出された箇所である。ただ、(b)IKONOS 画像からは冠雪害として検出されていないため、2つのデータを組み合わせた検出結果(d)では、冠雪害として検出されていない。

一方、Fig.13 は枯損箇所が多く分布している箇所である。(b)IKONOS 画像の検出結果では、枯損箇所と冠雪害の箇所は反射特性が近いため、両方検出されてしまったが、(c)ギャップ抽出結果と組み合わせた検出結果(d)によると、枯損箇所は除去することができる。

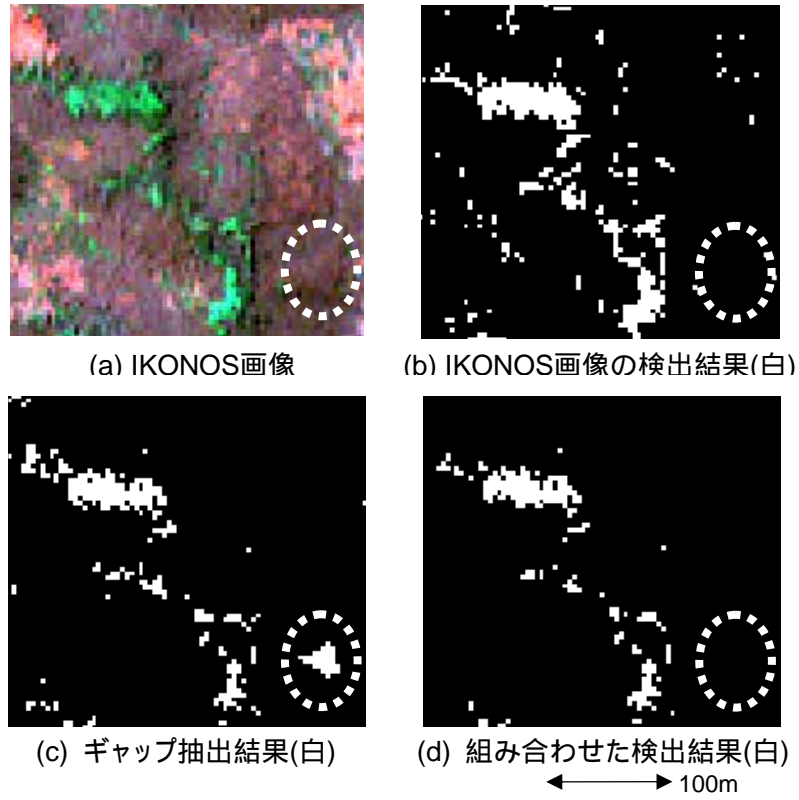


Fig.12 冠雪害検出結果(1)

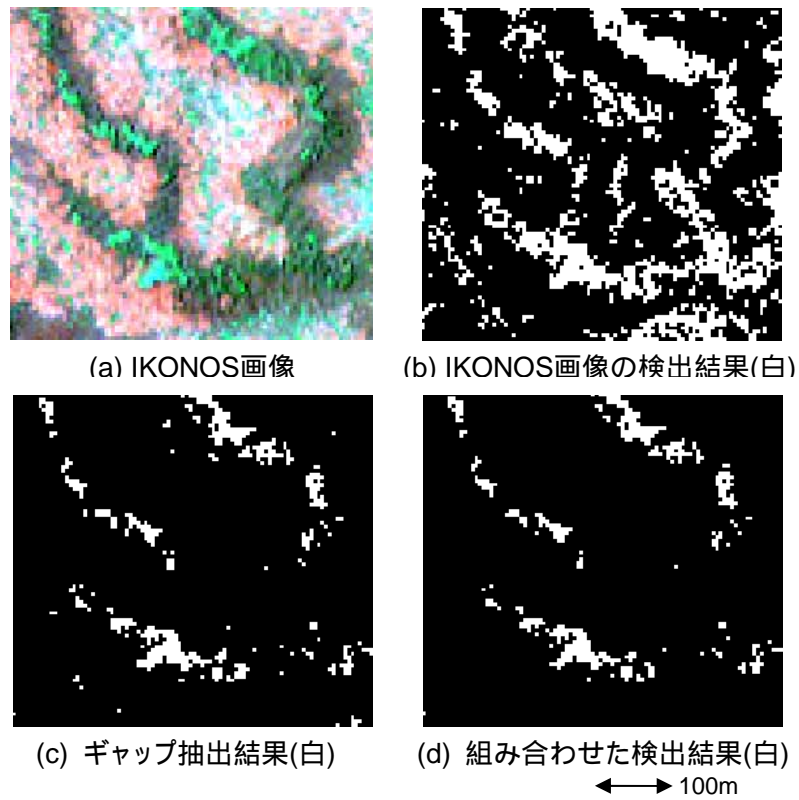


Fig.13 冠雪害検出結果(2)

次に、画像全体に適用した冠雪害検出結果の精度検証を行った。検証としては、検出結果の中で誤って検出する「空振り」と、実際の被害の中で、検出できない「見逃し」という2つの観点から行うことにした。

空振りは、被害として検出された画素からランダムに50画素を抽出し、空中写真の判読を基に正解が不正解を判定することでの的中率を求めた。その結果、47画素が的中した。空振りした箇所を観察すると、元から密度の低い林分であった。

見逃しは、無作為に抽出した被害箇所が、本研究で行った冠雪害検出結果によって、的中した割合を求めることで評価した。方法としては、画像全体に対してランダムに画素を選択し、空中写真を参照した上で、冠雪害が発生している画素を抽出する。このような画素が50画素を越えるように追加的に10画素ずつランダムに画素を抽出し、最終的に56画素の検証画素を作成した。この検証画素のうち、46画素が本研究で行った冠雪害検出手法で的中した。的中しなかった画素は、実際の被害面積が小さく、今回使用したデータの解像度で検出が難しい場合や、被害地と無被害地の境界付近で、データの解像度の影響によって無被害とされた場合があった。

以上の精度検証から、検出精度を空振りと見逃しという観点による的中率は、それぞれ94.0%、82.1%だった。見逃しが発生する割合は空振りよりも多かったが、被害面積の小さい箇所で見逃されている場合が多かった。しかし、いわゆる激害と呼ばれる、面積の大きい被害箇所は確実に検出されており、本研究で検討した手法の有効性を確認することができたといえる。

## 5. おわりに

本研究では、高解像度光学センサ衛星画像とLiDARデータを用いて冠雪害の検出手法の検討を行った。まず、冠雪害の検出には、光学センサ衛星画像による検出と、LiDARデータに着目したギャップ抽出が有効であることを示した。ただ、それぞれに短所があることから、2つのデータによる検出結果を組み合わせ、お互いの短所を補い、冠雪害の検出精度が向上する可能性があることを示した。また、テストエリアでの検出結果を評価したところ、それぞれの短所が除去され、組み合わせたことの有効性を確認した。次に、冠雪害の検出精度を「空振り」と「見逃し」という観点から定量的に検証した結果、的中率はそれぞれ94.0%、82.1%であった。被害面積が小さい箇所は検出できない箇所があったものの、まとまった被害箇所はほぼ確実に検出できており、本研究で検討した冠雪害検出手法は、高い精度で検出できることが明らかとなった。

本研究で提案した冠雪害検出手法の特徴は、(1)倒木する被害に対して、光学センサ衛星画像とLiDARデータを用いることが有効であることに着目した点、(2)被害・無被害を選択する統計モデルを適用した点、(3)光学センサ衛星画像による検出結果とLiDARデータによる検出結果を組み合わせ、冠雪害検出手法を提案した点が挙げられる。特に、2つのデータの組み合わせることで、それぞれのデータが個別に行った被害検出と比較して、精度が向上することが明らかとなった。

今回は、光学センサ衛星画像としてIKONOS画像を使用した。今後は航空機搭載型センサから得られた、より高精度な反射輝度データを適用し、有効性を評価したい。また、データの解像度が異なる場合における、2つのデータの組み合わせの最適な対処方法については、検討の余地がある。さらに、LiDARデータの他に、表面形状データを取得できるデータとして、従来から継続的に取得されてきた空中写真があるが、空中写真から作成するDSMを使って、冠雪害検出の可能性についても検討を行っていきたい。

森林域では、高解像度の光学センサ衛星画像およびLiDARデータの積極的な整備が期待されている。森林資源量の把握のみならず、森林管理を行う上で重要な情報である森林被害を把握する一手段として、今後はこのような高解像度リモートセンシングデータが活用されていくことを期待したい。

## 謝辞

本研究は、慶應義塾大学 SFC 研究所ジオインフォマティクスラボラトリと岐阜県森林科学研究所の共同研究「高解像度リモートセンシングと森林 GIS による森林管理システムの開発」の一環として行われたものである。

## 参考文献

- 岩坪五郎, 新田隆三, 1984. 気象災害 - 雪, 森林保護学(四手井綱英編), pp.42-52, 朝倉書店, 東京.
- 河呂眞, 辻野和彦, 辻子祐二, 2005. 高分解能衛星画像を用いたディジションツリー法に基づく 樹種分類法の開発, 写真測量とリモートセンシング, 44(2), pp.54-67.
- 米康充, 小熊宏之, 山形与志男, 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.
- Schwarz, M., Steinmeier, Ch., Holecz, F., Stebler, O. and Wagner, S., 2003. Detection of windthrow in mountainous regions with different remote sensing data and classification methods, Scandinavian Journal of Forest Research, 18(6), pp.525-536.
- Jackson, R.G., Foody, G.M. and Quine, C.P., 2000. Characterising wind thrown gaps from fire spatial resolution remotely sensed data. Forest Ecology and Management, 135, pp.253-260.
- Seto, K.C., and Kaufmann, R.K., 2005. Using logit models to classify land cover and land-cover change from Landsat Thematic Mapper, International Journal of Remote Sensing, 26(3), pp.563-577.
- Koukoulas, S., and Blackburn, G.A., 2004. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS, International Journal of Remote Sensing, 25(15), pp.3049-3071.
- 土木学会 土木計画学研究委員会編, 1997. 非集計行動モデルの理論と実際, 社団法人土木学会, 東京, 240p.
- 茂木靖和, 横井秀一, 渡邊仁志, 2003. 下呂実験林のスギ挿し木林分における冠雪害の発生状況と立木密度の関係, 岐阜県森林研報, 32, pp.21-26.
- Space Imaging, 2001. Space Imaging Document "IKONOS relative spectral response and radiometric calibration coefficients" <http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/spectral.htm> (accessed 10 Aug. 2005)

本論文を引用して下さる場合, 以下を引用元としてください。

田口仁, 臼田裕一郎, 福井弘道, 古川邦明, (2006)「高解像度光学センサ衛星画像と LiDAR データを組み合わせた森林域の冠雪害検出手法の開発」写真測量とリモートセンシング, Vol. 45, No. 1, pp. 14 - 21.