

論文

高分解能衛星画像と森林GISを用いた2000年東海豪雨による土砂崩壊の特性分析

河邑 眞*・辻野 和彦**・辻子 裕二**

Characteristic Analysis of Sediment Failure due to the 2000 Tokai Heavy Rainfall by Using High Resolution Satellite Images and Forest GIS

Makoto KAWAMURA*, Kazuhiko TSUJINO** and Yuji TSUJIKO**

Abstract

The heavy rainfall from September 11 to 12 in 2000 caused the floods at the plain areas of Tokai district in Japan and sediment failures were induced at the mountain areas. In this study the slope failures and the debris flows at the mountain areas were detected by analyzing the IKONOS pan sharpen fine true color image for the upstream of the Yahagi River. The detection was succeeded for the small failure areas less than 100 m² and more than 85 % of the failure sites were exactly detected. It is recognized that the analyzed image is useful as the hazard record map for the sediment failure.

Using the hazard record map, forest planning maps and 125 attributes of the forest register of Gifu Prefecture, the forest GIS was developed to analyze the characteristics of the sediment failure in the mountain areas. Relations between the failure zone and the topography, vegetation type, age of trees and so on are clarified by the analysis. The results of the analysis, the hazard record maps and the forest GIS were applied to estimate the risks for the sediment failure in the mountain areas. It is also acknowledged that the application of the hazard record map by the high-resolution satellite image and the GIS for the forest are effective to analyze the characteristics of sediment failure.

キーワード：2000年東海豪雨，IKONOS データ，土砂崩壊，土石流，森林 GIS

Key words : the 2000 Tokai Heavy Rainfall, IKONOS data, sediment failure, debris flow, forest GIS

* 豊橋技術科学大学建設工学系
Department of Architecture and Civil Engineering,
Toyohashi University of Technology
** 福井工業高等専門学校環境都市工学科
Department of Civil Engineering, Fukui National College
of Technology

本論文に対する討論は平成 17 年 2 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

地震や集中豪雨、急速な融雪の際に発生する土砂崩壊の特性分析にあたっては、広域に点在する土砂崩壊地点を特定する精密な地図と、土砂崩壊地点の特性を示す属性データが必要となる。ここで土砂崩壊とは、土石流と滑動の両者を総称したものである。

土砂崩壊地点が広域に点在する場合には、航空写真から崩壊箇所を判読し、1:5,000程度の紙地図にプロットして崩壊箇所の分布図を作成するのが一般的である。これらの地図は住民に対する被災状況の説明や災害記録を保存する手段としても利用されている。このような方法は、信頼性は高いものの、費用面、判読に要する時間、図面の処理が煩雑となることなどの問題点を有している。また、崩壊箇所に関する情報が紙ベースで管理されているため、必要な情報を迅速かつ正確に抽出するなどが要求される場面では、効率的な処理が困難となる。

このような問題を解決するためには、広域を同時に解析し、デジタルデータとして結果を保存することが可能な衛星画像を利用し、デジタルの災害記録を作成する手法の開発が望まれる。

筆者らは、LANDSAT TM データ（空間分解能：約 30 m）、複数の中分解能センサーの衛星画像、高分解能衛星画像を用いて土砂崩壊地点の形状・形態・面積を推定する手法を提案してきた¹⁾⁴⁾。本研究では、高分解能衛星画像を用いて陰影部を含む土砂崩壊箇所を検出する手法を2000年東海豪雨災害に適用し、検出結果の精度、信頼性を吟味し、デジタルの正確な広域災害記録作成の可能性について検討した。

一方、災害記録を利用し、土砂崩壊の特性を分析するためには、崩壊地点についての地形、地質、植生などの属性データの整備が必要となる。一般的には山間部は都市域と比較して詳細なデータベースが整備されていないため、主として縮尺1:50,000程度の地形図や植生図、地質図が利用されることが多い。

山地において植生状況などの属性データを取得し、崩壊特性を分析するには、しばしば衛星画像

が用いられる。大林ら^{5),6)}は斜面崩壊前のLANDSAT TM データから得られる被覆特性、植生指標と地形、地質データとを用いて崩壊特性を数量化理論Ⅱ類により分析している。島ら^{7),8)}は、集中豪雨により生じた斜面崩壊について、LANDSAT TM データや SPOT HRV-XS データ（空間分解能：約 20 m）から作成した風化度指標や植生指標と、地形情報とを用いて崩壊地の特性を求めている。

また、柴山ら⁹⁾は、1999年ベネズエラ豪雨災害で生じた斜面崩壊について、IKONOS パンクロマチック画像を用いて崩壊箇所の判読を行い、崩壊分布特性を求め、データベースにより崩壊の発生しやすい地形、地質要因を分析している。筆者らは、兵庫県南部地震とその後の降雨を誘因とする斜面崩壊に関して、LANDSAT TM データを利用して崩壊分布特性を求めるとともに、地形、地質などのデータを用いて崩壊地を予測している¹⁰⁾。

しかしながら、これらの崩壊特性を分析した研究では、1:500,000の地質図やLANDSAT TM データを利用しているため、細密な植生や地質についての情報が得られていない。このため崩壊特性を正確に分析することが困難である。

土砂崩壊の特性を正確に分析するためには、詳細な崩壊履歴データの蓄積と細密な植生、地質のデータベースが必要である。また、これらのデータを有効に解析するGISの開発が望まれる。本研究では、山間部の詳細なデータベースとして、行政が整備している森林簿を利用し、土砂崩壊の特性分析のための森林GISを構築した。

この論文では、高分解能衛星画像を用いて精度の高い土砂崩壊記録を作成することの可能性を検討するとともに、細密なデータベースをもつ森林GISにより崩壊箇所の特性を分析することを研究の目的とした。本研究では、高分解能衛星画像としてIKONOS パンシャープントゥルーカラー画像データ（以下、IKONOS データ）を用いた。2000年9月に発生した東海豪雨による土砂崩壊を対象として崩壊箇所の検出と崩壊特性の分析を行った。また、一考察として、災害特性の分析結果を用いて森林GISにより対象領域の崩壊危険度

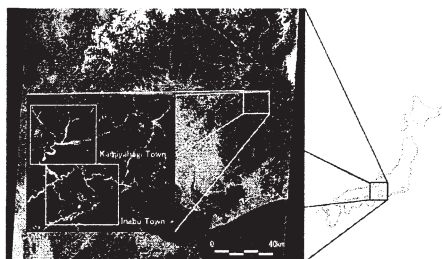
の推定を試みた。

2. IKONOS データを用いた土砂崩壊記録の作成

2.1 2000 年東海豪雨の概要と使用データ

2000 年 9 月 11 日から 12 日にかけて、名古屋市を中心とした東海地方が、台風 14 号の影響により活発化した停滞前線による集中的な豪雨に見舞われた。2 日間の累積雨量は、多いところで 600 mm 前後に上った。愛知県と岐阜県の 17 市町には、災害救助法が適用された。名古屋市周辺の浸水被害以外の目立った被害として、矢作川上流域の岐阜県恵那郡上矢作町、愛知県北設楽郡稲武町、長野県下伊那根羽村などでの河川災害や斜面崩壊などが報告されている¹¹⁾⁻¹³⁾。

本研究では、山間部の土砂崩壊に着目し、解析対象地域を Fig. 1 に示す領域に設定した。同図に示す四角で囲まれる領域は、上矢作町と稲武町の IKONOS データの撮影範囲に対応する。土砂崩壊検出の解析には Table 1 に示すデータを使用した。



上矢作町 (ULX,ULY)=(E137° 27 34.10",N35° 20 11.26")
 7673m×6786m (LRX,LR Y)=(E137° 32 36.94",N35° 16 30.22")
 稲武町 (ULX,ULY)=(E137° 28 52.64",N35° 16 26.19")
 9718m×7657m (LRX,LR Y)=(E137° 35 15.91",N35° 12 16.55")
 背景:LANDSAT TM データ(2000年9月27日観測)

Fig.1 解析対象地域

Table 1 土砂崩壊検出に用いたデータ

リモートセンシングデータ	IKONOS パンシャープントゥールカラー画像 観測日時:2000年9月27日13時36分
標高データ	国土地理院発行数値地図 50m メッシュ(標高)を内挿処理と平滑化フィルタにより1mメッシュに変換
土砂崩壊データ	航空写真:中日本航空株式会社(平成12年9月15日~19日撮影)より作成
精度検証データ	航空写真:中日本航空株式会社(平成12年9月15日~19日撮影)より作成

地球観測衛星 IKONOS には、パンクロマチック (0.45~0.90 μm)、可視域青 (0.45~0.52 μm)、可視域緑 (0.52~0.60 μm)、可視域赤 (0.63~0.69 μm) および近赤外域 (0.76~0.90 μm) のセンサーが搭載されており、空間分解能は、パンクロマチックで約 1 m、マルチスペクトルで約 4 m である。本研究では、高分解能のパンクロマチック画像と低分解能のマルチスペクトル画像を合成して得られるパンシャープン画像(高分解能のマルチスペクトル画像)を用いた。

2.2 IKONOS データを用いた土砂崩壊検出法の処理の流れ

筆者らは、IKONOS データを用いて、土砂崩壊を検出する方法を検討し、2000 年東海豪雨を誘因とする土砂崩壊に対して適用した例を示した。提案した手法では、崩壊域陰影部の問題点を克服する一手段として、明らかに崩壊域として抽出された領域から崩壊域陰影部を推定する方法を示している。検出手法の詳細に関しては、参考文献⁴⁾を参照されたい。この研究では、土砂崩壊を滑動と沢に沿っての流動をとまなう土石流に分けて検出した。

Fig. 2 に、この方法の処理の流れを示す。解析に用いるパラメータとしては、崩壊域採光部検出のためのしきい値、太陽方位角、太陽光入射角、樹木の高さを用いた。パラメータの値としては、Fig. 2 中に下線を付けた。

とくに、崩壊域陰影部の推定には仮定する樹木の高さが重要となる。筆者らが行った現地調査の結果、崩壊箇所周辺の樹木高さの平均は約 22 m であった。樹木の頂点付近が鋭角になっていること、場所によっては低い樹木が存在する可能性があることなどを考慮し、本研究では 20 m と仮定した。

2.3 検出結果の災害記録としての利用の可能性

(1) 検証データ

検出精度を求めるための検証データは、デジタル化された航空写真を判読して崩壊域であると

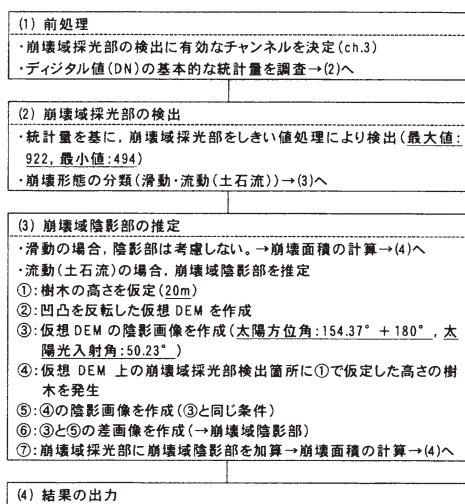


Fig.2 土砂崩壊検出法のフローチャート

判断できる領域を写真画像上にプロットした。土石流の発生により崩壊が蛇行している場所では、実際には崩壊が繋がっているとも考えられるが、陰影部の影響から全てが繋がっていると判断するのは難しかった。したがって、本研究における崩壊箇所数は連続性が確実に判読できた崩壊箇所を意味する。

崩壊箇所をプロットした画像を UTM 座標系に変換し、IKONOS データの領域と重ね合わせて検証データを作成した。検証データを形態別 (括弧内は規模別) に分類すると、滑動の場合が 124 箇所 (1 m^2 以上 10 m^2 未満: 2 箇所, 10 m^2 以上 100 m^2 未満: 43 箇所, 100 m^2 以上 1000 m^2 未満: 64 箇所, 1000 m^2 以上 10000 m^2 未満: 15 箇所), 土石流の場合が 141 箇所 (10 m^2 以上 100 m^2 未満: 4 箇所, 100 m^2 以上 1000 m^2 未満: 93 箇所, 1000 m^2 以上 10000 m^2 未満: 42 箇所, 10000 m^2 以上: 2 箇所) であった。

(2) 東海豪雨による土砂崩壊の検出結果

対象地域全体において検出された結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の背景は IKONOS データであり、Fig. 1 の上矢作町の図郭に対応する。同図中、黄色は滑動の検出結果 (崩壊堆積域を含む)、紫色は流動 (土石流) 採光部の検出結果、水色は、流動 (土石流) 陰影部の検出結果である。IKONOS デー

タを用いた土砂崩壊の検出結果は、航空写真の判読結果と比較して遜色の無いものである。また、航空写真を用いた場合と比較して、モザイク処理などが不要な点、一連の処理により短時間で検出ができる点を考慮すると、検出結果は災害情報の第一報としての利用が考えられる。

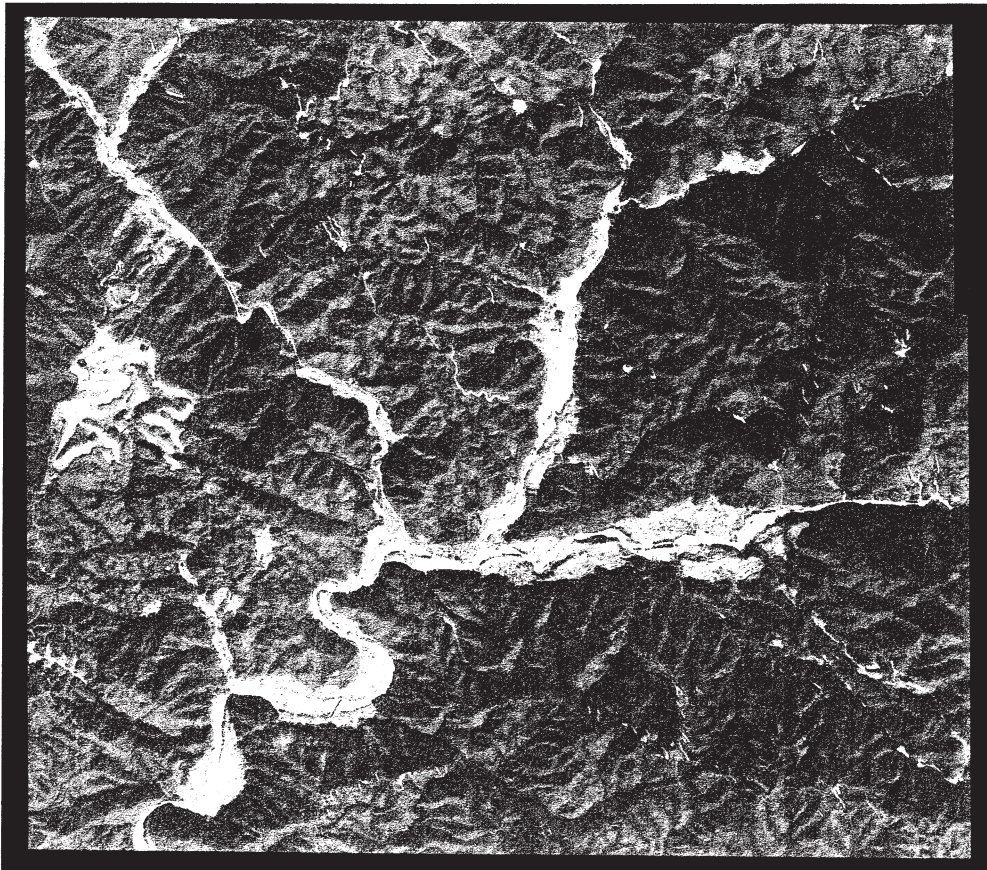
検出結果の一例を Fig. 4 に示す。Site 1, Site 2 の 2 つの例は滑動の崩壊形態 (縦 200 画素, 横 200 画素), Site 3, Site 4 の 2 つの例は流動 (土石流) の崩壊形態 (縦 400 画素, 横 200 画素) である。(a), (c) と (e), (g) は検証データ, (b), (d) と (f), (h) は検出結果である。検証データの背景は、IKONOS データであり、地表面の状態を観察できるように検証データにおける崩壊の輪郭を描いた。また、崩壊方向を矢印で示した。検出結果では、崩壊域の採光部を白で示している。検証データの形状と比較するために、検出結果にも検証データにおける崩壊の輪郭をポリゴンで描いた。

Site 1 は、上矢作町小笹原南西山間部の小規模な崩壊である。小規模な崩壊にもかかわらず、しきい値処理を用いるだけで良好な結果が得られている。Site 2 は、上矢作町仏供田南側の崩壊である。崩壊域全域が陰影部であり検出が不可能であった一例である。滑動の形態を有する崩壊に対しては、陰影部の処理が不要であり、崩壊域全てが陰影部の場合は、検出が困難であった。

Site 3 は、上矢作町東部の達原における国道 418 号を寸断した大規模な崩壊である。推定崩壊面積が若干大きくなってはいるが、陰影部の処理を加えることにより、しきい値処理だけの場合と比較して形状がうまく捉えられている。Site 4 は、Site 3 の東側に発生した崩壊である。この崩壊では、中央付近に陰影部しか存在しない部分があるため、検出結果がとぎれた形になっている。崩壊面積は、とぎれた部分の面積だけ小さくなっている。いずれの結果からも、陰影部を加算することで、崩壊域全体の推定精度が向上することが確認された。

(3) 精度評価と災害記録としての利用

Table 2 は、実際の崩壊地点の数に対して検出された崩壊地点の数と検出精度を崩壊面積別に示



□ 滑動 (崩壊の堆積域を含む), □ 流動(土石流)の崩壊域採光部, □ 流動(土石流)の崩壊域陰影部, 背景: IKONOS データ

Fig.3 検出結果(上矢作町)

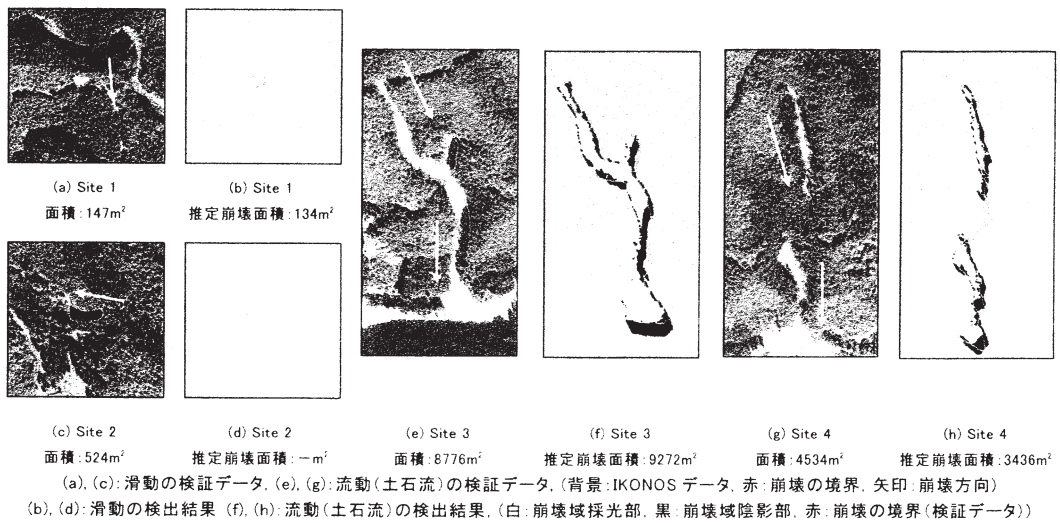


Fig.4 検出結果の一例

Table 2 検出精度

土砂崩壊面積 (m ²)		≤10 ¹	≤10 ²	≤10 ³	≤10 ⁴	10 ⁵ <
滑 動	検出数	2	40	49	13	
	実際の数	2	43	64	15	0
	検出精度 (%)	100	93.0	76.6	86.6	
土 石 流	検出数		2	82	35	2
	実際の数	0	4	93	42	2
	検出精度 (%)		50.0	88.2	83.3	100

したものである。滑動の形態の場合、中分解能衛星画像を用いたこれまでの研究における検出限界は100 m²から200 m²であった²⁾が、100 m²以下の崩壊でも検出が可能であることが示された。

これに対して、崩壊面積が100 m²以上でも、検出できていない箇所が40箇所あった。これらの40箇所は、斜面の向きや樹木の陰と崩壊の幅との関係によって、崩壊域全てが陰影部となる崩壊であった。

したがって、条件付きではあるが崩壊箇所数では約85%が検出可能であった点を考慮すると、IKONOSデータを用いた土砂崩壊検出結果は、災害記録作成の有力な支援データとして利用可能であると考えられる。

3. 森林GISを用いた土砂崩壊の特性分析

3.1 森林GISの構築

本研究では、山間部における詳細なデータベースとして森林基本図、森林計画図、森林簿を利用して土砂崩壊の特性分析のための森林GISを構築した。なお、森林GISに用いたデータベースは岐阜県農山村整備局森林課から提供を受けた。

森林基本図は、ラスター型の地形図(TIFF形式)であり、縮尺は1:5,000である。幾何補正後、森林基本図から河川、溪流、国道、林道、過去の崩壊履歴をデジタル化した。

森林計画図には、林班や小班などの形状がポリライン(DXF形式)により記録されていた。林班数は228、小班数は22,437である。林班とは、尾根や河川など変わりにくい自然の地形や行政上の字界などの固定的で半永久的な区画である。また、小班とは、林班の中を所有者ごと、樹種や林齢な

ど林況の違いなどにより、必要性に応じて細分された区画である。

森林簿は、森林の小班ごとの林況や地況などの性質を記録した公式の帳簿であり、森林情報に関する最も基本的な台帳である。提供を受けた森林簿には、平成13年3月末現在における、各小班に対する位置や地形、地質、樹種、材積などに関する合計125種類の属性データがテキスト形式で保存されている。なお、自治体の扱う森林簿には、所有者などの個人データも含まれるが、個人データを削除した形で提供を受けた。この125種類の属性データを森林計画図に付与し、森林基本図を用いて作成した崩壊履歴や林道などをレイヤーとして加えることで土砂崩壊の特性分析のための森林GISを構築した。

土砂崩壊記録の特性分析に使用した属性データをTable 3に示す。本研究では、大分類として植生、地質、地形に着目し、合計18項目の属性データを使用した。

なお、この研究では、衛星画像データおよび標高データを用いて土石流の発生域、流送・堆積域を明確に区分することはできなかった。また森林簿のデータは小班単位で整備されたものであり、発生域、流送・堆積域のそれぞれに対してデータを与えるものではない。そこで、本研究では流送・堆積域を含めた崩壊域を対象として、小班単位での崩壊特性について分析した。

3.2 2000年東海豪雨による土砂崩壊の特性分析

(1) 植生に関する土砂崩壊の特性分析

植生と土砂崩壊箇所との関係をFig. 5からFig. 13に示す。これらの図では、(a)に対象域全体の面積(合計、約810,730 ha)に対する各カテゴリーの頻度分布(面積比を%で表示)、(b)に崩壊の確認された小班の全面積(合計、約35,617 ha)に対する各カテゴリーの頻度分布、(c)に崩壊割合を棒グラフで表した。ここで、崩壊割合は、(a)の各カテゴリーの面積に対する(b)の各カテゴリーの面積の割合とした。

前述のように、森林簿には小班単位で林種、針

Table 3 土砂崩壊の特性分析に使用した属性データ

分類	素 因	カテゴリー
植生	第一林種, 第二林種, 第三林種	人工林, 天然林, 未立木地, 竹林
	第一針広別, 第二針広別, 第三針広別	針葉樹, 広葉樹
	第一樹種, 第二樹種, 第三樹種	スギ, ヒノキ, カラマツ, アカマツ, クロマツ, その他針葉樹, クリ, トチ, ケヤキ, コナラ, その他広葉樹, 人工林伐採地, 天然林伐採地, 草生地, 崩壊地, 荒地, 岩石他, その他未立木地, タケ
	第一齢級, 第二齢級, 第三齢級	齢級 0 から齢級 67 (ただし, 齢級の 1 は 5 年を意味する。)
	上層粗密度, 下層粗密度	0 から 10 まで 11 段階(値が大きくなるにしたがい密を意味する。)
	間伐実施年度	間伐が行われた西暦
地質	地質型	未固結堆積物, 礫・粘土(第三紀), 花崗岩(中生代), 結晶片岩類
	土壌型	褐色森林土(BB, BC, BD, BD DRY, BE, BF), 黒色土(BLD), 受触土(Er), 未熟土(lm)
地形	斜面傾斜角	DEM の周辺 8 画素から計算

広別, 樹種, 齢級などに関する情報が含まれているが, これらのカテゴリーについては第一から第三の区別がある。樹種を例にとった場合, 樹種のカテゴリーにはスギ, ヒノキ, アカマツ, その他広葉樹などがあり, これらの面積比が小班ごとに記録されている。このとき, 各小班について面積比が最も大きなものを, その小班の第一樹種, 二番目に大きなものを第二樹種, 三番目に大きいものを第三樹種と呼んでいる。同様に, 林種, 針広別, 齢級もカテゴリーの面積比によって第一から第三までの区別がなされている。

Fig. 5 は, 土砂崩壊と第一林種との関係, Fig. 6 は土砂崩壊と第二林種との関係を示している。林種とは, 人工林, 天然林, 未立木地, 竹林などの区別である。第一林種に着目した場合, (a) の対象域全体では人工林が 64.8 % 占めるのに対して, (b) の崩壊地では人工林が 67.1 % を占めていた。対象域全体に対する各カテゴリーの頻度分布は崩壊を含む小班の全面積に対する頻度分布とほぼ同じ傾向を示している。また, Fig. 5 (c) では未立木地において崩壊割合が大きい。Fig. 6 (c) では, 人工林において崩壊割合が大きい。

Fig. 7 は, 土砂崩壊と第一針広別との関係, Fig. 8 は土砂崩壊と第二針広別との関係を示したものである。第一針広別とは, 第一樹種が針葉樹か広葉樹かで決定される。第二針広別については, 第二樹種で決定される。両図の (a) (b) を見ると第一針広別, 第二針広別の両方で針葉樹が多く分布していることが分かる。また, 崩壊割合についても, 第一針広別, 第二針広別ともに針葉樹の方

が大きい。

Fig. 9 は, 土砂崩壊箇所と第一樹種との関係, Fig. 10 は土砂崩壊と第二樹種との関係を示したものである。対象域全域においては, Table 3 に示すように, 12 種類の樹種と 7 種類の被覆状態が存在するが, カラマツ, クロマツ, その他針葉樹, クリ, トチ, ケヤキ, コナラ, タケ, 人工林伐採地, 天然林伐採地, 荒地, 岩石他, その他未立木地に関しては, 面積が小さく特性評価に対する影響が少ないため, 紙面からは割愛した。

第一樹種について (a), (b) とともにヒノキが, 多く分布している。崩壊を含む小班全体のカテゴリー分布は, スギが 21.4 %, ヒノキが 45.5 %, その他広葉樹が 14.7 % である。

Fig. 11 は, 土砂崩壊と第一齢級との関係を示している。第一齢級とは, 第一樹種の齢級を意味する。また, 第二齢級は, 第二樹種で決定される。ここで, 齢級 0 とは, 林齢 0~4 年に対応し, 齢級が 1 増えるにしたがい林齢が 5 年増えることを意味する。(b) に着目すると, 齢級 6 (25~29 年) が 13.5 %, である。なお, 第二齢級については, 紙面から割愛した。

Fig. 12 は, 土砂崩壊と間伐実施からの経過年数の関係を示している。管理が行き届いていない林は崩壊が発生し易いと考えられる。間伐実施からの経過年数を調べたところ, 17 年前に間伐が行われた場所において崩壊割合が最も大きい。また, 20 年以上間伐がされていない場合については, 森林簿には記録されていなかった。また, 間伐実施年度が保存されていない小班が多く存在した。し

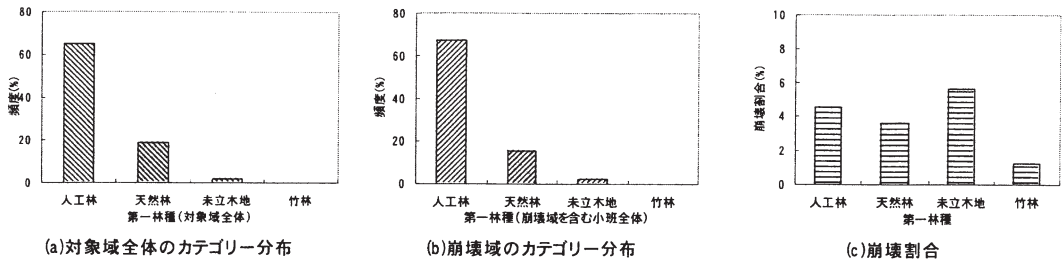


Fig.5 土砂崩壊と第一林種との関係

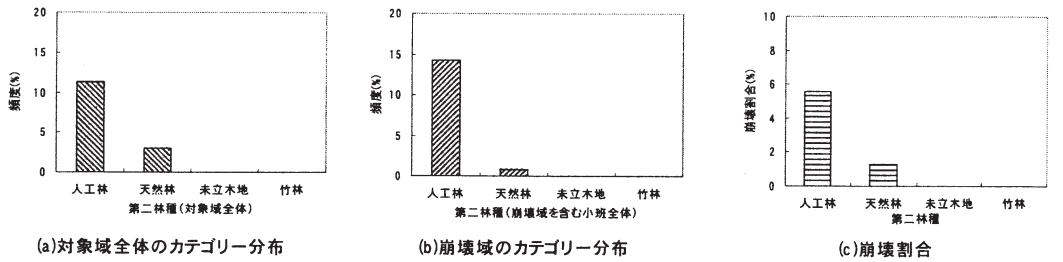


Fig.6 土砂崩壊と第二林種との関係

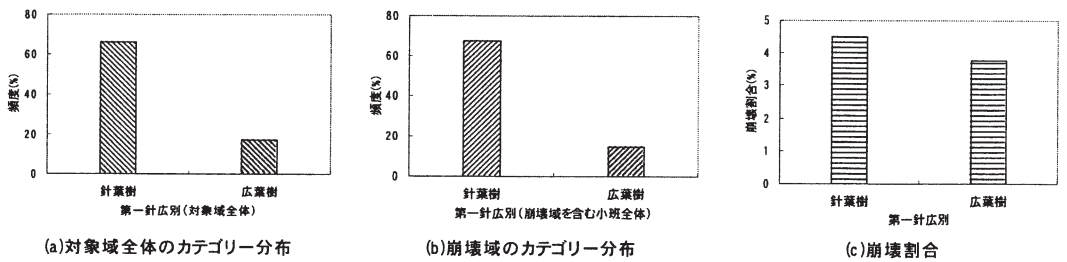


Fig.7 土砂崩壊と第一針広別との関係

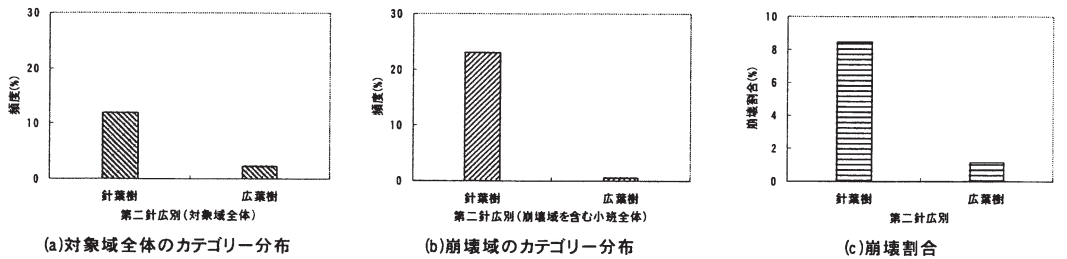


Fig.8 土砂崩壊と第二針広別との関係

たがって、間伐実施からの経過年数は、後述する危険度の推定には使用しなかった。

Fig. 13 は、土砂崩壊と樹冠密度の関係を示している。岐阜県森林課では、林齢が 10 増えるに

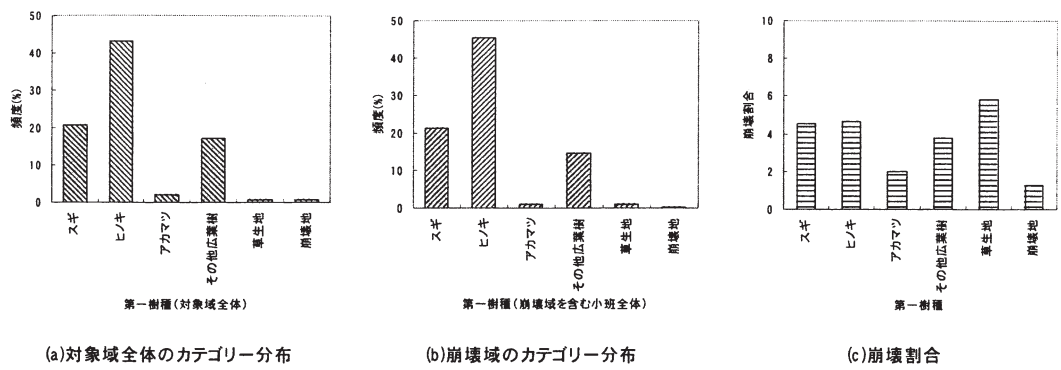


Fig.9 土砂崩壊と第一樹種との関係

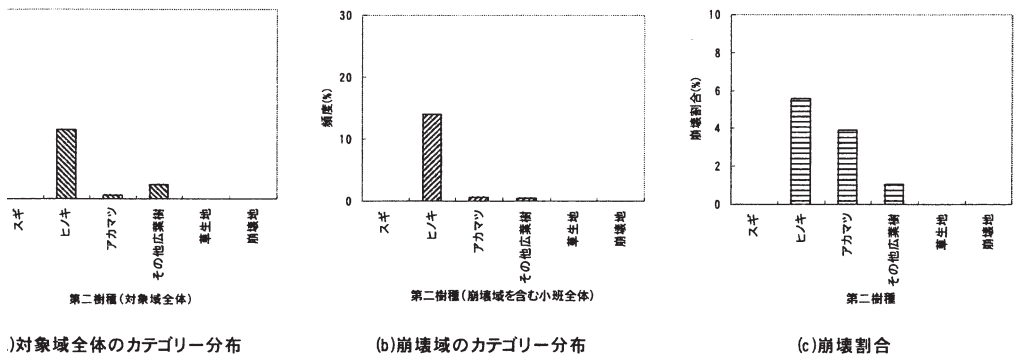


Fig.10 土砂崩壊と第二樹種との関係

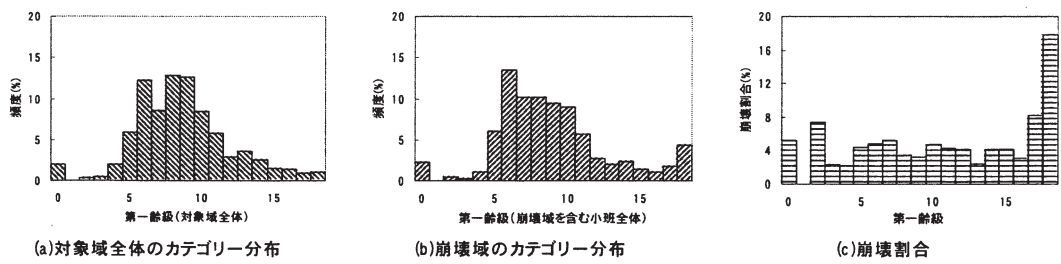


Fig.11 土砂崩壊と第一齢級との関係

したが、樹冠密度を自動計算で1増やす作業が行われている。したがって、樹冠密度には、林齢や間伐実施時期との関連も考えられる。樹冠密度0は未立木地を意味し、値が大きくなるに従って密になることを表す。(a)の解析対象域全体では、樹冠密度10が多く分布しているが、(c)の崩壊割合に着目すると大きな差は見られない。

なお、第三林種、第三針広別、第三樹種、第三齢級に関しては存在する場所が少ないために崩壊箇所との関連は見られなかった。したがって、これらのデータに関しては後述の危険度の判定に使用しなかった。

(2) 地質に関する土砂崩壊の特性分析

Fig. 14 は土砂崩壊と地質型の関係を示してい

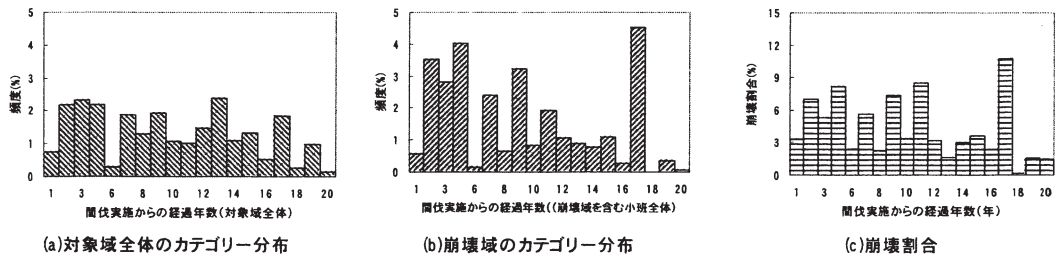


Fig.12 土砂崩壊と間伐実施からの経過年数の関係

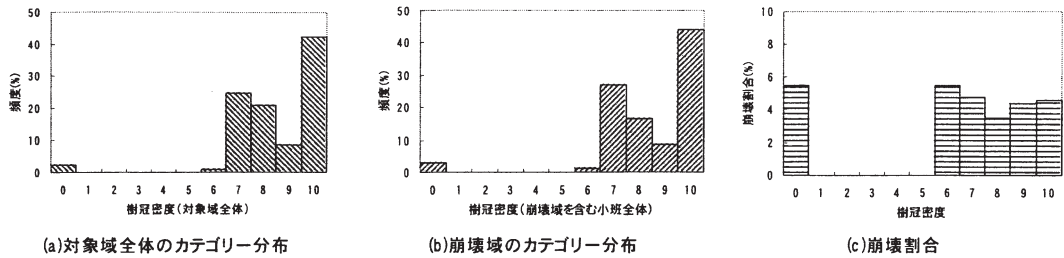


Fig.13 土砂崩壊と樹冠密度との関係

る。地質型に関して、対象域全体では花崗岩（中生代）の割合が最も多く、92.6%であった。崩壊を含む小班に関して、全体と同様に花崗岩のところでの崩壊が多い。

Fig. 15 は土砂崩壊と土壌型の関係を示している。BB から BF は、乾性から湿性の褐色森林土、BLD は黒色土、Er は受触土、Im は未熟土である。土壌については、山腹斜面で多く分布する BD DRY（適潤性褐色森林土偏乾亜型）の対象域全体に対する頻度が最も多く 47.3%であった。崩壊割合に関しては、未熟土が最も大きい。

(3) 地形に関する土砂崩壊の特性分析

詳細な地形分析として、柴山ら⁹⁾は、ベクター型 DEM（数値化された等高線）を用いて地形に関する分析を行っている。また、10 m メッシュの標高データやレーザープロファイラによる DSM (Digital Surface Model) を利用することにより詳細な地形解析が行われる。

本研究では、一般に入手が容易な国土地理院発行の数値地図 50 m メッシュ（標高）を用いた。メッシュサイズが大きいため、同データは、細密

な地形を表現できない。参考のために崩壊箇所の傾斜角を計算した。斜面傾斜角は、崩壊域全域について、以下に示す手順で求めた。

- ① 50 m メッシュ（標高）データを用いて対象域全体の傾斜角を計算し、IKONOS データを用いて解析した土砂崩壊検出結果をオーバーレイする。
- ② ①を用いて崩壊域の傾斜角を調べる。その際、50 m メッシュのグリッドで崩壊域が分割される場合は、1 つの崩壊を、2 つに分けて傾斜角を与える。
- ③ 傾斜角ごとに崩壊面積の頻度分布を求める。その結果、崩壊頻度が最も多い傾斜角 ($\beta=40^\circ$) を得た。

3.3 森林GISを用いた崩壊危険度の推定

この節では、災害特性分析結果に対する一考察として、この分析結果を用いて簡易な方法により崩壊の生じる可能性の高い斜面の推定を行う。この推定では、小班が約 100 から 200 程度集まった林班を単位として、大きな面積を持つ斜面につ

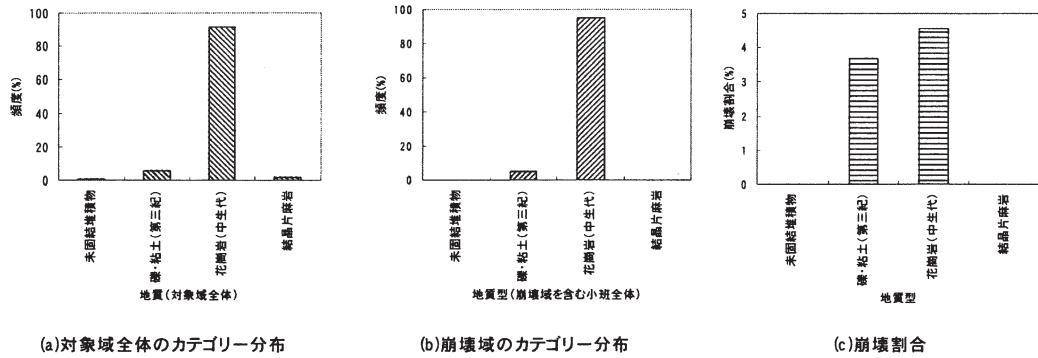


Fig.14 土砂崩壊と地質型との関係

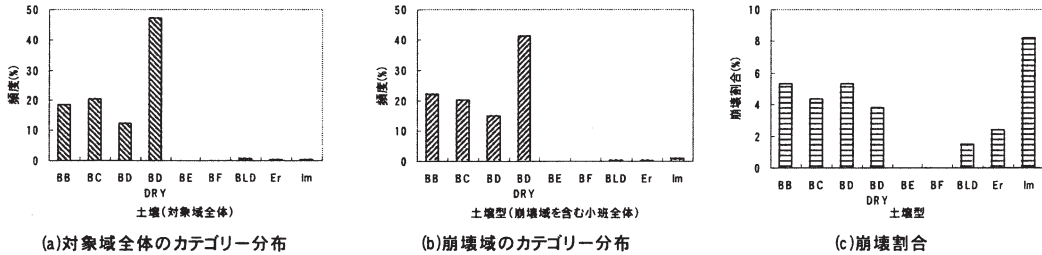


Fig.15 土砂崩壊と土壌型との関係

いて崩壊の可能性について検討する。

Fig. 5 から Fig. 15 の (b) 図において最大となるカテゴリーを、各要因について土砂崩壊との関連が最も強いカテゴリーとした。結果を Table 4 に示す。ある林班内に含まれる小班の持つ特性が、Table 4 に示すカテゴリーを含むほど、林班内の斜面が崩壊した斜面との類似度が高く、林班内における崩壊の危険性が高いと考える。Table 4 に示す一つの素因 i についてのある林班 k の崩壊危険度 x_i を次式のように定義する。ただし、斜面傾斜角については、崩壊頻度が最も多い傾斜角 ($\beta = 40^\circ$) と林班の平均傾斜角の比で、 x_i を算出した。

$$x_i = \frac{A_{ki}}{A_k} \quad (1)$$

ここに、 A_k は林班 k の面積、 A_{ki} は、林班 k に含まれる小班で、素因 i のカテゴリーが Table 4 に示すものと等しい小班について、その面積を合計

Table 4 土砂崩壊との関連が最も強いカテゴリー

素因	土砂崩壊との関連が最も強いカテゴリー
第一林種	人工林
第一針広別	針葉樹
第一樹種	ヒノキ
第一齢級	齢級 6
第二林種	人工林
第二針広別	針葉樹
第二樹種	ヒノキ
第二齢級	齢級 15
樹冠密度	10
土壌型	適潤性褐色森林度偏乾亜型 (BD DRY)
地質型	花崗岩(中生代)
斜面傾斜角	40°

したものである。12 個の素因について x_i を合計し、ある林班 k に対する危険度合計ポイント R_k を次式で算定する。

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{12} x_i}{12} \times 100 \quad (2)$$

小班単位で災害特性分析を行っていることに対して、危険度を推定する際に小班の集まりである林班を単位とした理由は、林班の境界が地形の形状的特性をよく表しているためである。ここで、対象とする崩壊危険度は、溪流に沿った大きな斜面での崩壊の可能性を示すものである。

土砂崩壊が含まれる68の林班に関して、崩壊面積と R_k の関係を調べた結果をFig. 16に示す。 R_k が大きくなるにしたがい、崩壊面積が大きくなる傾向が確認できる。また、 R_k が大きいかかわりなく、崩壊面積が小さい場所も存在する。これらのうち、崩壊が林班の境界によって分割されていたところもあった。

ここで、1000 m²以上、2000 m²以上、3000 m²以上の崩壊が初めて現れる R_k に着目した。林班とTable 4に示すカテゴリとのクロス集計によって得られた結果と R_k の計算結果をTable 5に示す。この結果を参照して、しきい値(レベルⅠ：36未満、レベルⅡ：36以上42未満、レベルⅢ：42以上)を決定した。

これらのしきい値を用いて林班単位での崩壊危険度推定結果をFig. 17に示す。同図中、○で示す領域は、Fig. 3で示した崩壊箇所がまとまっている場所である。レベルⅢの領域は、東海豪雨を誘因として崩壊した箇所の分布と良く対応している。比較的広範囲にわたってレベルⅢが分布しているが、これは崩壊箇所と同じような特性をもつ林班が多く分布していることを意味する。

得られた危険度(Ⅲ：危険度(高)、Ⅱ：危険度(中)、Ⅰ：危険度(低))の各レベルに対応する林班に含まれる崩壊地の面積の合計をFig. 18に示す。崩壊面積の合計に着目すると、レベルが増加するにしたがい、崩壊面積の合計も増加し、レベルの増加にともない崩壊の生じる可能性が大きいことを示している。

以上のように、IKONOSデータから作成された土砂崩壊記録と、災害特性分析結果を利用し、森林GISにより対象領域における土砂崩壊危険度を推定する資料が得られた。

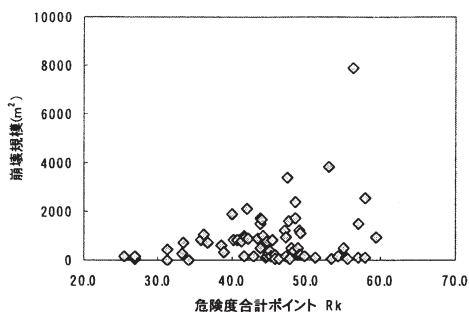


Fig.16 R_k と土砂崩壊面積との関係

Table 5 R_k の計算結果

林班 No	77	91	100
第一林種	0.461	0.793	0.680
第一針広別	0.461	0.802	0.692
第一樹種	0.384	0.537	0.455
第一齢級	0.442	0.285	0.314
第二林種	0.280	0.201	0.211
第二針広別	0.280	0.209	0.212
第二樹種	0.280	0.201	0.211
第二齢級	0.012	0.025	0.000
樹冠密度	0.748	0.381	0.527
土壌型	0.000	0.000	0.812
地質型	0.473	0.991	1.000
斜面傾斜角	0.483	0.615	0.574
危険度合計ポイント(R_k)	36.2	42.0	47.4
崩壊面積(m ²)	1044	2126	3414

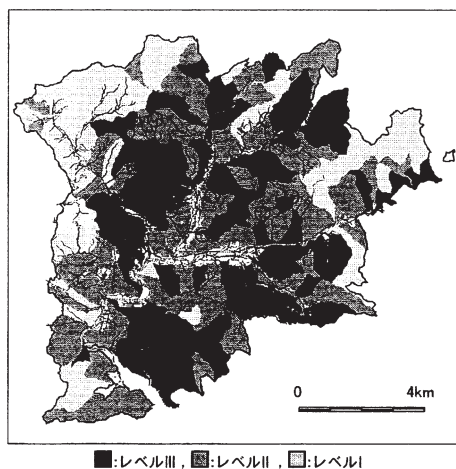


Fig.17 林班単位での崩壊危険度推定結果

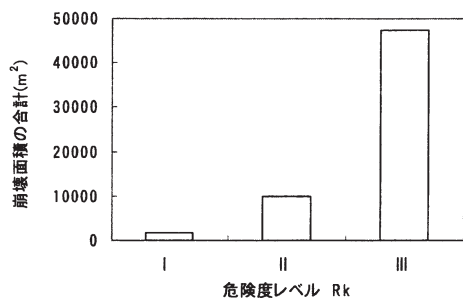


Fig.18 Rk と土砂崩壊面積との関係

4. まとめ

本研究では、2000年東海豪雨を誘因とする土砂崩壊について、高分解能衛星画像を用いた災害記録作成の可能性について検討を行った。また、作成された災害記録と森林GISとを用いて土砂崩壊の特性分析を行い、土砂崩壊危険度評価を試みた。得られた結論を以下に示す。

- ① IKONOS データを用いて土砂崩壊箇所を検出した結果、航空写真の判読結果と比較して遜色のない主題図が作成できることが示された。航空写真を用いる場合と比較して、モザイク処理などが不要である点、一連の処理により短時間で検出が行える点を考慮すると、この検出結果は災害情報の第一報として有用である。
- ② 航空写真から作成した検証データと比較して、約85%の崩壊箇所に関して検出が可能であった。土砂崩壊検出結果は、土砂崩壊記録支援データとして利用することができる。
- ③ 山間部には都市域と比較して詳細なデータベースが存在しないことから、行政が整備している森林データベースを利用し、土砂崩壊の特性分析のための森林GISを構築した。また、IKONOS データを用いて作成した災害記録と森林GIS、数値地図を用いて土砂崩壊の特性分析を行った。その結果、森林簿の属性は崩壊箇所の特性を詳細に分析することができるデータであることが示された。
- ④ ②に述べた災害記録と、③に述べた土砂崩壊特性分析の結果を利用し、森林GISと数値地図データを用いて対象領域の土砂崩壊危険度を林

班単位で評価した。推定結果は、東海豪雨による災害地点を適切に反映したものであった。

謝辞

本研究で使用した衛星データは、愛知県による平成12年度緊急雇用対策先進的地理情報システム開発事業の補助を受けた「高解像度衛星画像を用いた道路災害監視GISに関する研究」において、ナカシャクリエティブ株式会社が購入したものである。また、検証データ作成に使用した航空写真は、国土交通省豊橋工事事務所、および名城大学清水泰弘助教授より提供を受けた。また、森林データベースやこれに関連する資料は岐阜県農山村整備局森林課から提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 河邑 眞, 辻子裕二: 低分解能IR画像による六甲山系斜面崩壊モニタリングに対するMorphologyの応用, 写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.4, pp.26-37, 1997.
- 2) 河邑 眞, 辻野和彦, 辻子裕二: 複数のセンサーによる衛星データを用いた斜面崩壊検出手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.39, No.6, pp.13-21, 2000.
- 3) Makoto KAWAMURA, Kazuhiko TSUJINO, Yuji TSUJIKO: Morphological slope failure detection using multisensor data merged by wavelet transform, International archives of photogrammetry and remote sensing, Vol.33, Part B 7/4, pp.1544-1550, 2000.
- 4) 河邑 眞, 辻野和彦, 辻子裕二: 高分解能衛星画像を用いた陰影部を含む土砂災害域の検出, 写真測量とリモートセンシング, Vol.41, No.5, pp.20-28, 2002.
- 5) 大林成行, 小島尚人, 笠 博義: 斜面崩壊予測を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実利用化について, 土木学会論文集, No.415, VI-12, p.71-80, 1990.
- 6) 笠 博義, 黒台昌弘, 大林成行, 小島尚人: 地すべりの予測への衛星リモートセンシングデータの応用可能性について, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.12, No.1, pp.5-15, 1992.
- 7) 島重 章, 吉國 洋, 神谷 誠, 小川隆一: 衛星リモートセンシングを利用した法面崩壊発生の予

- 測, 土と基礎 Vol.45, No.6, pp.23-25, 1997.
- 8) 石原慎一郎, 島重章, 吉国洋: 地形要因データを考慮した降雨時の土砂崩壊発生の予測, 土と基礎, Vol.49, No.4, pp.25-27, 2001.
 - 9) 柴山卓史, 恩田裕一, 阿仁屋政武, 水越博子: IKONOS 画像を利用した 1999 年ベネズエラ豪雨災害における斜面崩壊の解析, 自然災害科学, Vol.22, No.1, pp.75-86, 2003.
 - 10) 河邑 眞, 辻子裕二: 衛星 IR 画像を用いた広域山腹斜面における二次災害監視 GIS, 自然災害科学, Vol.17, No.3, p.279-290, 1998.
 - 11) 牛山素行, 石垣泰輔, 戸田圭一, 千木良雅弘: 2000年9月11日~12日に東海地方で発生した豪雨災害の特徴, 自然災害科学, Vol.19, No.3, pp.359-373, 2000.
 - 12) Yasuhiro SHIMIZU, Naohiko TOKASHIKI, Fujio OKADA: The September 2000 torrential rain disaster in the Tokai region: Investigation of a mountain disaster caused by heavy rain in three prefecture; Aichi, Gifu and Nagano, Journal of Natural Disaster Science, Vol.24, No.2, pp.51-59, 2002.
 - 13) 植野利康, 原 義文, 伊藤 明, 小野秀樹, 森卓哉, 井戸清雄, 佐藤敏明: 平成 12 年 9 月東海豪雨時の矢作ダム流域における土砂移動についての検討, 平成 13 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.150-151, 2001.

(投稿受理:平成14年6月20日)

(訂正稿受理:平成15年3月29日)