

論文

広域災害特性分析結果を用いた土砂災害対策支援 GIS の検討

河邑 眞*・辻野 和彦**・大辻 喜典***

Investigation of Sediment Disaster Mitigation GIS by Using Results of Large Area Disaster Characteristic Analysis

Makoto KAWAMURA*, Kazuhiko TSUJINO**
and Yoshinori OHTSUJI***

Abstract

Exact and detailed evaluation of the risk for sediment collapse, and counter measures to mitigate sediment disasters in mountain areas caused by heavy rainfall are shown in this paper. At first the characteristics of the sediment disaster in the mountain areas of Gifu Prefecture, Japan due to the 2000 Tokai Heavy Rainfall, are analyzed by using the detailed records for rainfall and sediment collapses, and the database for many features of the forests. Based on the results of the analysis the more exact risks for sediment flow and slope failures are evaluated in the area, and the reliability of the evaluation is confirmed.

The practical counter measures for sediment disaster are demonstrated for different phases of the disaster, applying the GIS. Detailed evacuation plans are derived by the real time records of the precipitation and the evaluated risk. To recognize the disasters in the whole area, the sediment collapses map developed with high resolution satellite images, and the GIS data such as roads and houses, are overlaid. In the plan for the dams to mitigate the disaster, the risk analysis is applied to determine the priority for the construction sites.

キーワード：2000年東海豪雨, IKONOS データ, 広域災害特性分析, リスクアナリシス

Key words : the 2000 Tokai Heavy Rainfall, IKONOS data, large area disaster characteristic analysis and Risk analysis

* 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

*** 豊橋技術科学大学建設工学専攻
Department of Architecture and Civil Engineering,
Toyohashi University of Technology

1. はじめに

山間部における、豪雨による土砂災害の対策を実施する場合には、どの地点が危険であるかをあらかじめ特定する危険度評価を的確に行うことと、被害を軽減するために避難、応急復旧、砂防施設の建設などの平常時の対策を合理的に行うことが求められる。前者の災害危険度評価に関する問題としては、①広域に渡る降雨情報、災害記録、および地形、地質、植生といった詳細なデータベースが得がたく、広域災害特性の分析を行い、正確な危険度評価を行うことが困難であること、②降雨という誘因と、地形、地質、植生といった素因との両方を考慮して面的な危険度評価を行うことが困難であること、③崩壊域を特定し、土石流と斜面崩壊という二つのタイプのマスマーブメントに分けて災害特性を分析し、両者の個々の危険度を評価した総合的な危険度評価を行うことが困難であること、といった点が挙げられる。

また、後者の避難、応急復旧、防災施設計画などの対策に関する問題点としては、①個々の地点における危険度評価が困難なため、各地点における誘因、素因の特性を考慮した避難勧告を行うことが困難である、②避難、防災施設計画などの対策によって、素因、誘因の取り扱いが異なるため、統一的な基準に基づく総合的な対策が困難である、③広域にわたる詳細な災害状況の把握が困難なため、広域にわたる合理的な応急復旧計画の早急な立案が困難である、④信頼できる危険度評価データが不足しているために、広域にわたる合理的な施設計画が困難である、といった問題点がある。

本研究では、上述した問題を解決するための広域特性分析結果を考慮した土砂災害対策支援 GIS について検討する。具体的には、2000年東海豪雨における岐阜県山間部における土砂災害特性の分析結果を示すと同時に、その分析結果に基づく危険度評価を用いた災害対策支援 GIS の事例を示す。

広域の土砂災害危険度評価に関するこれまでの研究では、素因の分析に関する研究が多く見られる。衛星画像を用いた、このような研究の例とし

て、大林ら^{1,2)}は、斜面崩壊前の LANDSAT TM データから得られる被覆特性、植生指標や地形、地質特性を用いて崩壊特性を数量化Ⅱ類により分析している。また、柴山ら³⁾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、地形、地質のデータベースを用いて崩壊の発生要因の分析を行っている。

しかし、これらの崩壊特性を分析した研究では、1:50,000の現存植生図などが利用されているため、細密な植生や地質に関する情報が得られないといった問題点も指摘できる。そこで筆者ら⁴⁾は、山間部の細密なデータベースとして行政が整備する森林簿に着目し、2000年東海豪雨を誘因とする斜面崩壊について、高分解能衛星画像を用いた災害記録と森林データベースを用いて土砂崩壊箇所の特性分析を行っている。

本研究では、東海豪雨における岐阜県の山間部を対象として、誘因と素因に着目した災害特性の分析を行った。素因に着目した災害特性分析では、崩壊から土石流に発達し堆積するタイプと崩壊土砂がそのまま堆積するタイプの2タイプに分けるとともに、各崩壊について崩壊発生域を特定し、より詳細な災害特性の分析を行った。また、これらの分析結果を用いた、素因、誘因の両者を考慮した広域の危険度評価方法を示す。

被害軽減のための対策である避難に関するこれまでの研究では、誘因に着目した研究が多く見られる。これらの研究の例として、荒木ら^{5,6)}は、土石流危険渓流毎の地形特性を考慮し、土石流警戒避難基準雨量を設定している。また、彼らは、山口県大島郡を対象として土石流警戒避難支援システムのモデルを構築し、時々刻々と変化する雨量情報の表示や危険度情報の表示機能を有した GIS の開発を行っている。

本研究では、上述の方法により素因、誘因の両者を考慮することで、崩壊現象の両面から考察することが可能であり、より合理的な危険度評価結果に基づき、災害発生直前、発生直後、平常時の各フェーズにおける災害対策支援を行う GIS の事例を示す。災害発生直前の時点については、山間

部の各林班における誘因と素因に着目し、地区の特性に応じた避難計画を検討する例を示す。

災害直後の時点については、高分解能衛星画像により土砂崩壊地点を特定し、災害状況を把握し、応急復旧計画などを検討する事例を示す。さらに、平常時において砂防施設の計画を行う場合について、危険度評価結果を用いて、リスクアナリシスを行い、施設建設の優先順位を検討する事例を示す。

2. 土砂災害対策支援 GIS の概要

2.1 システムの概要

このシステムは、広域災害特性分析に基づく危険度評価と、異なるフェーズにおける災害対策支援を総合的に行い、行政における災害対応者が意思決定をする際の支援を行うことを目的とした。

ここで対象とする領域は、約100km²の面積をもつ地域である。システムの概要を Fig. 1に示す。本システムは、GIS-DBMS（データベース管理システム）、分析・画像解析モジュール、意志決定支援の3つのパートで構成される。

GIS-DBMSは、データの検索、閲覧、入力、編集などを行う。なお、GISのアプリケーションには、Arc GISを用いた。ベクター型のデータはshape形式、ラスタ型データのデータはimg形式とした。ベクター型データとしては、森林計画図、河川、道路、建物、気象、土砂災害履歴を用いた。また、降雨データについては、リアルタイムで取得される観測データも含まれている。ラスタ型データとしては、標高データ、航空写真、IKONOS データおよびLANDSAT TM データを用いた。

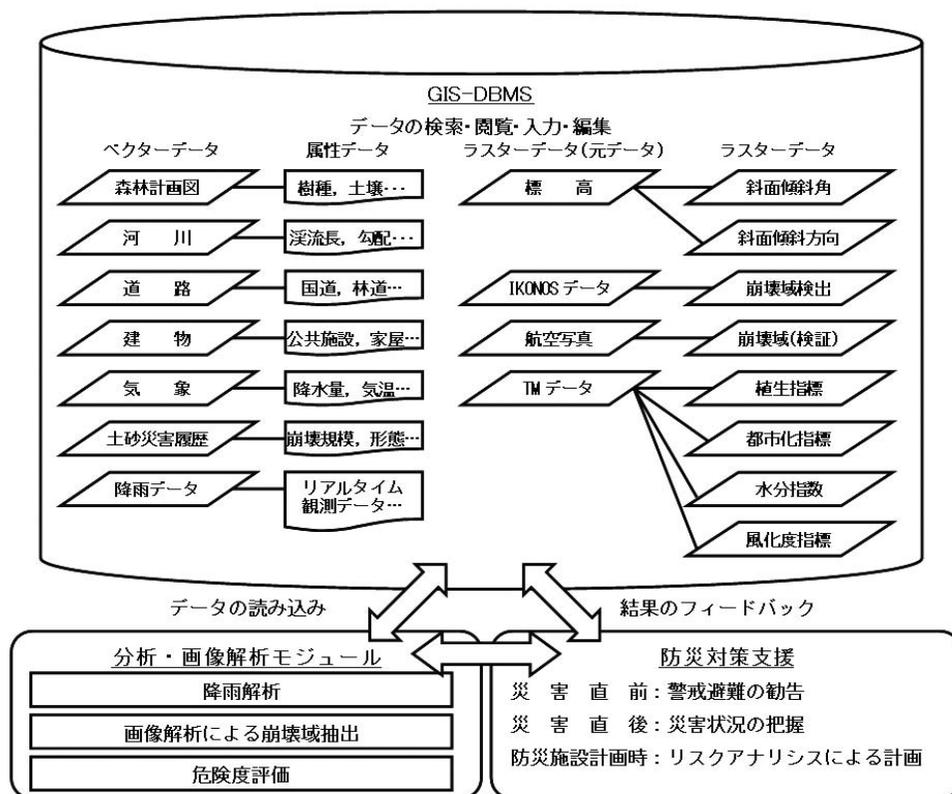


Fig. 1 土砂災害対策支援 GIS の概要

この GIS-DBMS から必要となるデータを分析・画像解析モジュールに渡し、降雨特性分析、衛星画像による土砂崩壊の検出、崩壊記録と森林データベースによる崩壊地特性分析、および素因・誘因を考慮した危険度評価を行う。また、分析結果は、DBMS に主題図などとしてフィードバックする。意志決定支援として、本研究では、3つの時刻（災害発生直前、災害発生直後、防災対策計画時）に着目し、土砂災害の警戒避難支援、災害状況の把握・応急復旧支援、砂防施設の計画支援を行う。

2.2 使用データ

上述のシステムには、Table 1 に示すデータを使用した。本研究の特徴として、多数の地点における降雨の時刻歴データ、高分解能衛星画像、および森林データベースデータの利用が挙げられる。ここでは、これらについて説明を加える。

降雨量データとしては、上矢作町周辺の20の観測地点において、2000年9月10日20時00分～2000年9月12日21時00分までに記録された時間雨量、累積雨量、有効雨量を用いて、雨量データベースを作成した。有効雨量とは、一連の降雨において時間雨量4 mm/h以上の降り始めから4 mm/h未満が3時間以上経過するまでの累積雨量をいう。

地球観測衛星 IKONOS には、パンクロマチック ($0.45 \mu\text{m} \sim 0.90 \mu\text{m}$)、可視域青 ($0.45 \mu\text{m} \sim 0.52 \mu\text{m}$)、可視域緑 ($0.52 \mu\text{m} \sim 0.60 \mu\text{m}$)、可視域赤

($0.63 \mu\text{m} \sim 0.69 \mu\text{m}$)、および近赤外域 ($0.76 \mu\text{m} \sim 0.90 \mu\text{m}$) 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、これらを合成して得られるパンシャープン画像を用いた。

本研究では、森林データベースとして森林簿 (CSV形式) を利用し、データベースに対応する地点を表す地図としては、森林基本図 (TIFF形式)、森林計画図 (DXF形式) を用いた。森林基本図とは、縮尺1:5,000の地形図である。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。森林計画図とは、林班や小班などの形状が記録されたポリゴンデータである。森林計画図のポリゴンデータの位置は修正を施しており、DBMSで管理するデータの対象地点の座標についてもすべて UTM 座標系で統一して表している。

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、必要に応じて細分化された区画である。したがって、森林の属性データは、小班単位で記録されている。そこで、後述の危険度評価は小班単位で行った。森林簿は、各小班に対する位置、植生、地質などに関する属性データがテキスト形式で保存されている。これらの属性データを森林基本図に付与する形で使用した。

Table 1 使用データ

データ名	内容	データの出典
森林 GIS	森林簿, 森林基本図, 森林計画図	岐阜県農山村整備局森林課
地形データ	数値地図10mメッシュ標高(明智, 横道)	北海道地図株式会社
	数値地図50mメッシュ標高(明智, 横道, 美濃焼山, 岩村)	財団法人日本地図センター
気象データ	気象庁メッシュ統計値1971年(降水量, 気温, 最深積雪量)	財団法人気象業務支援センター
	東海豪雨2000年9月10日20時00分～12日21時00分(時間雨量, 累積雨量)	国土交通省豊橋工事事務所
RS データ	IKONOS 2000年9月27日観測	JSI
	LANDSAT 2000年9月27日観測	RESTEC
土砂崩壊データ	航空写真 2000年9月15日～19日撮影から作製	中日本航空株式会社
砂防・治山データ	危険地マップ, 山地防災情報マップ	岐阜県ふるさと地理情報センター

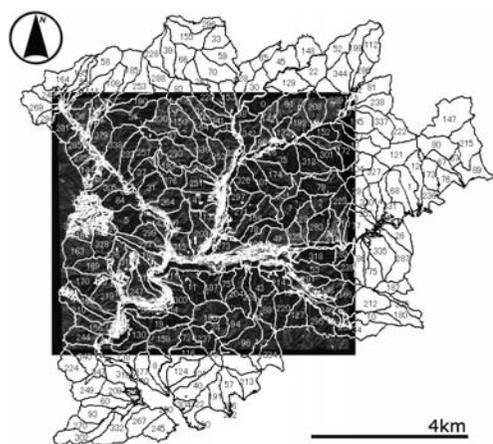
3. 広域災害特性分析

3.1 降雨特性分析

(1) 2000年東海豪雨の概要と解析対象域

2000年9月11日から12日かけて、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600mm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、長野県下伊那郡根羽村などでの河川災害や土砂崩壊などが報告されている⁷⁻⁹⁾。

本研究では、山間部の土砂災害に着目し、解析対象域を Fig. 2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、上矢作町の IKONOS データの観測範囲に対応する。これらの領域に、林班のポリゴンを重ね合わせた。岐阜県から提供を受けた森林計画図の林班数は、228、小班数は22,437であった。このうち、IKONOS データと重なる林班の数は、150であり、小班の数は、15,189であった。以下の分析では、IKONOS データの図郭と重なる林班および小班を用いた。



上矢作町 (ULX, ULY)=(E137° 27' 34.10", N35° 20' 11.26")
 (LRX, LRY)=(E137° 32' 36.94", N35° 16' 30.22")

Fig. 2 解析対象域

(2) 土砂災害発生限界線の設定

東海豪雨の際に2次元の分布データとして得られた降雨データによって、対象領域における多数の林班の時間雨量、有効雨量の関係を調べる。ここでは、土砂災害発生限界線 (Critical Line: CL) を用いて土砂災害の発生林班と非発生林班を区別する。CLとは、縦軸に短期降雨指標、横軸に長期降雨指標を取り、土砂災害が発生する降雨と発生しない降雨を区分するものである¹⁰⁾。

本研究では、前述のように、2000年9月10日20時00分～2000年9月12日21時00分までの時間雨量、累積雨量、有効雨量記録から、雨量データベースを作成した。観測所の位置を緯度経度からUTM座標に変換した後、等雨量線を作成した。Fig. 3は、等雨量線の一例であり、2000年9月12日0時時点の時間雨量データを用いて作成したものである。槍ヶ入観測所付近で80mmの降雨量があることがわかる。

一般的にCLを設定するためには、過去の多くの土砂災害発生降雨量と非発生降雨量のデータ、さらに土砂災害の発生時刻が必要となる。しかし、対象域においては東海豪雨以外の土砂災害発生降雨量のデータはなく、また、土砂災害の発生時刻も明確ではないため、CLを設定する条件が

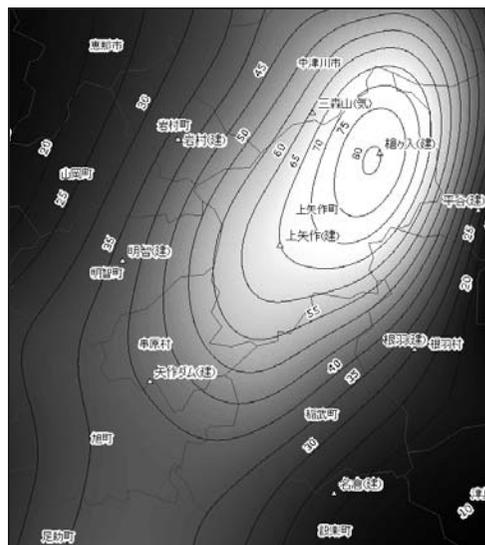


Fig. 3 上矢作町周辺の等雨量線図の一例

限られる。本研究では、前述のように東海豪雨における上矢作町周辺の20の観測所の降雨データを内挿処理し、面的に降雨データを作成している。一つの降雨ではあるが、土砂災害が発生した林班と発生しなかった林班について、多くのポイントデータを用いることができる。そこで、土砂災害発生林班と非発生林班のそれぞれについて20個の林班を選定し、時間雨量と有効雨量が共に大きな時間帯のデータを用いて散布図を作成した。Fig. 4に、本研究において設定したCLを示す。同図中、土砂災害発生林班の降雨量を○、非発生林班の降雨量を×で示す。本研究では、土砂災害発生降雨が全て危険領域に包含されること、また、CLの傾きaが $-1 < a < 0$ の範囲となるようにCLを設定した。

過去23年分の最大日雨量データを用いて上矢作町観測所における東海豪雨の発生確率年¹¹⁾を推定したところ、約50年となった。上矢作町における東海豪雨による最大日雨量は、過去の観測記録から求めると50年に1回の確率で生じる降雨量に相当している。したがって、本研究で設定したCLは、50年確率の降雨データのみに基づいて求めたことを意味する。今後、CLの信頼性を向上させるために、東海豪雨以外の土砂災害発生・非発生降雨のデータを蓄積する必要がある。しかしながら、上矢作町を対象とした場合、現時点では崩壊時の他の降雨量データはなく、東海豪雨の降雨量データから決定されるCLを用いて後述の警戒避難支援を行う。

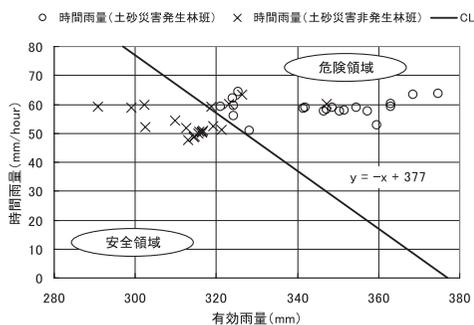


Fig. 4 土砂災害発生限界線 (CL) の設定

3.2 崩壊発生域の特性分析

(1) 高分解能衛星画像を用いた土砂崩壊の検出

筆者らは、IKONOS データを用いて土砂崩壊箇所を検出する手法を検討し、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¹²⁾。提案手法は、崩壊域陰影部の問題点を克服する手段として、崩壊域採光部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。運動形態による崩壊タイプの分類、検出手法の詳細、検出結果に関しては、参考文献¹²⁾を参照されたい。

提案手法により土砂崩壊の検出を行った結果、崩壊域すべてが陰影部である箇所を検出することはできなかったものの、崩壊箇所数では、85%が検出可能であった。本研究では、東海豪雨直後に観測された航空写真を用いて崩壊箇所の判読を行い、検出結果に崩壊域すべてが陰影部である崩壊箇所を加えて土砂災害記録を作成した。ただし、土石流の形態において、曲がりくねって流下する場合、樹木や深い谷地形の影の影響を受け土石流が途切れて見える場合もあった。したがって、連続性が確実に判断できた数をカウントした。その結果、斜面崩壊が124箇所、土石流が141箇所であった。斜面崩壊と土石流の区別は、流経距離の違いによる崩壊形状から判別した。ここで、崩壊形状が円形、もしくは楕円に近い場合は斜面崩壊、線状の場合は土石流とした。

(2) 土砂災害記録と標高データを用いた土砂崩壊発生域の設定

一般的に土砂崩壊は、発生域、流送域、堆積域などに区分することができる。土砂災害の危険度を評価するためには、発生域の特性を分析することが重要である。本研究で対象とした土石流、崩壊についても、その運動形態から土石流の発生域、流送域、堆積域、崩壊の発生域、堆積域に区分することができる。しかし、衛星画像、航空写真では同じ被覆としか捉えられないため、これらの区分は困難である。そこで、本研究では、10mメッシュの細密な数値標高データを用いて土砂崩壊発生域の設定を試みた。

土石流発生箇所における標高と斜面傾斜角の一例を Fig. 5 に示す。これは、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土石流の発生箇所である。この土石流に対して、流下方向に向かって約10m 間隔で標高、斜面傾斜角の値を取得した。ここで、横軸のポイント No. は0が最上流であり、番号が大きくなるにしたがって、下流に進むことを意味する。土石流の始点と終点の標高差は、約200m であった。

また、崩壊発生箇所における標高と斜面傾斜角の一例を Fig. 6 に示す。これは、宇連地区における林道近傍の斜面崩壊の発生箇所である。Fig. 5 と同様に、標高と斜面傾斜角をグラフで表した。崩壊の始点と終点の標高差は、約70m であった。

一般的に土石流の発生域は、15° から20° 以上の溪流、崩壊の発生域は、30° 以上の急斜面とされる。しかし、斜面傾斜角が激しく変化していることにより発生域、流送域、堆積域の区分を困難にしている。その原因として、豪雨によって林道に雨水が集まり、土石流が発生したこと、国道施工時の切り土によって斜面傾斜角が急になったことなどが考えられる。同様に、他の土石流、崩壊箇所についても分析を行ったが、斜面傾斜角によって明確に発生域を区分することは困難であった。土石流、斜面崩壊、それぞれについて数例を検討した結果から、発生域とみなしても誤認の可能性が低いと考えられる領域として、下記の領域を特定した。

① 土石流：崩壊最上流部から崩壊方向に向かって

全崩壊面積の約10%を発生域とする。

② 斜面崩壊：崩壊方向に向かって、全崩壊面積の約90%を発生域とする。

この定義にしたがって、対象域すべての土砂崩壊に対して発生域のポリゴンを作成した。

(3) 土砂崩壊発生域の特性分析

上述した方法により発生域を特定し、土石流、斜面崩壊の二つの崩壊タイプについて崩壊特性分析を行った。土砂崩壊発生域の特性分析結果の一例を Fig. 7 に示す。同図 (a) は針広別に対するカテゴリ分布である。ここで、針広別とは、針葉樹と広葉樹の区別であり、森林簿に記載されている表現である。土石流の発生域が含まれる小班のうち、約83%が針葉樹であり、斜面崩壊の発生域が含まれる小班のうち、約84%が針葉樹であったことが分かる。

同図 (b) は、間伐の有無に対するカテゴリ分布である。管理が行き届かない林は、崩壊が発生しやすいと考えられるが、間伐がされておらず、管理が不十分な箇所において土石流、斜面崩壊ともに多く発生していることが、この図より分かる。

森林簿にはおいて土砂崩壊の履歴が小班ごとに示されているが、この履歴の有無と東海豪雨によって発生した土石流、斜面崩壊の有無を各小班について比較した結果を、同図 (c) に示す。東海豪雨以前に土砂災害履歴の無い箇所においても、東海豪雨による土砂崩壊が多く発生している。特

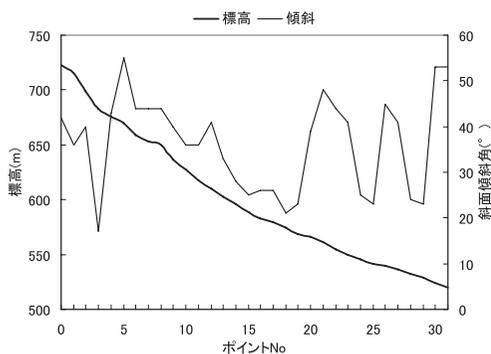


Fig. 5 土砂崩壊箇所（土石流）の標高と斜面傾斜角

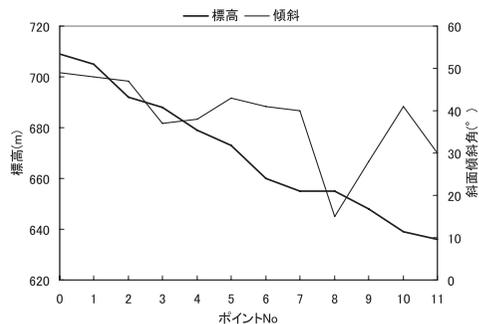


Fig. 6 土砂崩壊箇所（崩壊）の標高と斜面傾斜角

に、東海豪雨により土石流が発生した割合は約94%と高かった。東海豪雨以前の崩壊履歴と東海豪雨による崩壊とに相関性が見られない理由としては、前述したように、上矢作町における東海豪雨による降雨量は50年確率に相当する降雨量であり、まれに発生する降雨量のため、詳細な災害記録が残されていない可能性がある。このように、東海豪雨以前においては必ずしも詳細な崩壊記録が森林簿に残されていなかったことがあげられ

る。また、新たな林道の建設により、林道沿いに雨水が流れ土石流のような崩壊を起こしたという新たな崩壊パターンが東海豪雨の場合に加わったためと考えられる。

3.3 数量化理論を用いた土砂災害危険度評価

(1) 土砂災害危険度評価手法とその精度検定

数量化理論による分析に使用した属性データを Table 2に示す。植生、地質、地形、気象、衛星画像データより作成した各指標、土砂災害履歴、東海豪雨の降雨量特性の各項目に関する19のアイテムを用いた。これら素因と誘因を含む19のアイテムを説明変数とし、東海豪雨による崩壊の有無を外的基準として数量化Ⅱ類による危険度評価を行った。この危険度評価は土石流と斜面崩壊の二つのタイプの崩壊に対して個別に行った。

数量化Ⅱ類の理論を適用する場合には、使用する要因データの構造分析を行う必要がある。そこで、数量化Ⅲ類によるカテゴリー分析を行った。この解析に用いた土砂崩壊発生域を含む小班数は455、土砂崩壊非発生小班数は14,734である。土砂崩壊発生域を含む小班のうち、土石流の発生域を含む小班数は301、斜面崩壊発生域を含む小班数は164、両方の発生域を含む小班数は10である。

Fig. 8に数量化Ⅲ類のカテゴリー散布図を示す。土石流発生域小班、斜面崩壊発生域小班、土砂災害非発生小班の散布状態が異なることから、データ構造に違いが見られ、土砂災害の有無が判定できる可能性を示唆しているものといえる。

数量化Ⅱ類によって土石流の危険度評価を行った結果を Fig. 9に、斜面崩壊の危険度評価結果を Fig. 10に示す。これらの図において、危険と評価された小班は、やまぶき色、安全と評価された小班は、白色で示す。また、土石流の発生箇所は紫色、崩壊の発生箇所は青で示す。これらの危険度評価の精度を検証するために、本研究では以下の式を用いた。

$$AR = \frac{Ad}{Ao} \quad (1)$$

ここで、ARは適合度、Adは予測が適合した小班の総面積(km²)、Aoは実際の土砂災害発生域を含

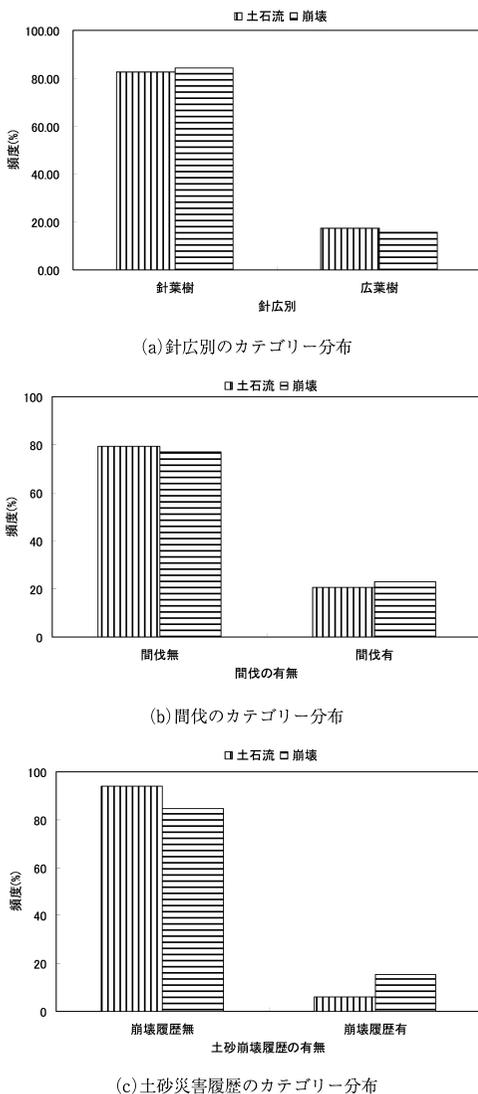


Fig. 7 土砂崩壊発生域の特性分析の一例

Table 2 数量化理論解析に用いた属性データ

分類	アイテム	カテゴリー
植生	針広別	針葉樹, 広葉樹
	樹種	スギ, ヒノキ, カラマツ, 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
	粗密度	0 から10まで11段階 (値が大きくなるに従って密になることを意味する.)
	間伐	間伐の有無 (1981年から2000年)
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	褐色森林度 (BB, BC, BD, BD DRY, BE, BF), 黒色土 (BLD), 受触土 (Er), 未熟土 (Im)
地形	標高	0 から1250m までを50m 毎に区分
	斜面傾斜角	0° から55° を5° 毎に区分
	斜面傾斜方向	北, 北東, 東, 南東, 南, 南西, 西, 北西, 平坦地
気象	年平均降水量	年平均降水量1901mm から2600mm を50mm 毎に区分
	年平均気温	年平均気温8.6°C から13.0°C を05°C 毎に区分
	最深積雪量	最深積雪量16cm から85cm を5cm 毎に区分
衛星画像	植生指標	DN 値 (0 から255) を等間隔に区分, 値が高いほど植生活性度が高いことを意味する.
	都市化指標	DN 値 (0 から255) を等間隔に区分, 値が高いほど都市化していることを意味する.
	水分指数	DN 値 (0 から255) を等間隔に区分, 値が高いほど水分量が高いことを意味する.
	風化度指標	DN 値 (0 から255) を等間隔に区分, 値が高いほど風化が進んでいることを意味する.
土砂災害	災害履歴	過去の土砂崩壊発生の有無
東海豪雨	累積雨量	411mm から500mm を10mm 毎に区分 (2000年9月10日20時00分から9月12日21時00分)
	最大時間雨量	46mm/h から65mm/h を5mm/h 毎に区分 (上矢作観測所最大時間雨量2000年9月12日0時00分)

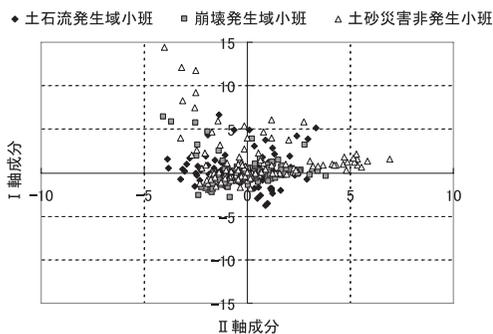
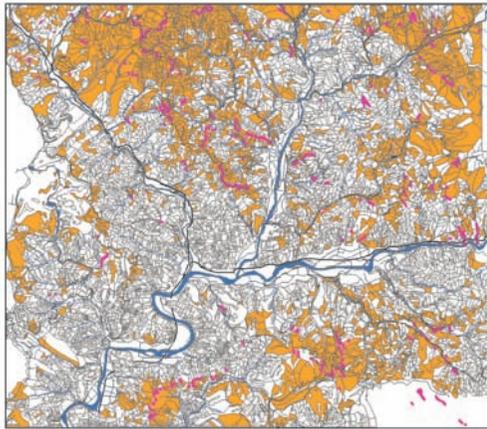


Fig. 8 数量化Ⅲ類によるカテゴリー散布図

む小班の総面積 (km²) である。東海豪雨による土石流, 斜面崩壊の危険度評価結果に対して適合度を計算したところ, 0.89, 0.79と良好な結果が得られた。

本研究では, 従来詳細な情報を得ることができなかったデータについて森林簿のデータを活用し, 広域にわたる降雨情報, 災害記録, 地形・地質・植生のデータベースを解析に利用している。また, 誘因と素因の両方を同時に考慮するという新たな考え方にもとづき, 面的に危険度評価を行っている。さらに, 崩壊域を高分解能衛星画像解析から詳細に特定するという新たな技術を導入し, 土石流と斜面崩壊の2つのタイプに分けて災害特性を分析し, 両者の危険度評価を実施している。詳細な災害特性分析結果に基づき, 素因, 誘因の両者を考慮して行った危険度評価は高い信頼性を持つものと考えられる。また, 危険と判断されて崩壊や土石流が発生しなかった小班は, 土砂崩壊の発生した小班と特性が類似しているため, 土砂崩壊の発生確率が高い場所であると考えられる。



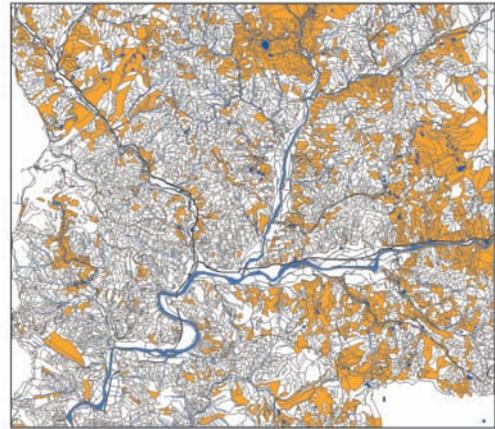
■土石流の発生箇所，■数量化理論によって危険と評価された小班，
□数量化理論によって安全と評価された小班

Fig. 9 数量化理論Ⅱ類による土石流発生危険度評価

(2) 災害の各フェーズにおける土砂災害危険度評価

前述したように、災害の異なるフェーズに対して災害対策を行う場合、より統一した基準による信頼性の高い危険度の評価が必要となる。この論文で示す危険度評価手法では、どのような崩壊記録を外的基準に取るか、また降雨特性に関する説明変数に対してどのレベルの確率降雨を用いるかによって、異なる災害のフェーズに対して適用することが可能である。

想定する場面ごとの外的基準と説明変数の関係を Table 3 に示す。平常時および災害直前の警戒・避難時の危険度評価における外的基準には、森林基本図から作成した過去の土砂崩壊履歴を含む小班を用いた。また、説明変数には、東海豪雨前の LANDSAT TM データより作成した各指標、および100年確率降雨量を用いた。また、災害直後の災害把握・応急復旧時の土砂災害危険度評価における外的基準には、東海豪雨における土砂災害記録から設定した土石流および崩壊発生域を含む小班を用いた。また、説明変数における雨量には、東海豪雨の降雨量を用いた。さらに、災害後の防災施設計画時については、災害把握・応急復旧時に用いた東海豪雨の雨量を100年確率降雨量



■崩壊の発生箇所，■数量化理論によって危険と評価された小班，
□数量化理論によって安全と評価された小班

Fig. 10 数量化理論Ⅱ類による崩壊発生危険度評価

に替え、他の説明変数、外的基準は同じとして危険度評価を行った。これらの危険度評価の結果は、後述する災害対策支援に利用される。

4. 広域災害特性分析結果を用いた土砂災害対策支援 GIS の適用事例

4.1 警戒避難勧告

東海豪雨の雨量データより作成した土砂災害発生限界線 (CL) と等雨量線から求められる各林班におけるスネーク曲線を用いて、降雨データのみによって各林班における崩壊の有無を検討した結果を Fig. 11 (a) に示す。CL を超えた林班を赤色、超えていない林班を水色で示す。この結果の検証を行うために、土砂災害記録 (同図中、黄色で示すポリゴン) のオーバーレイを試みた。降雨要因により危険と判断された林班に、土砂災害記録が含まれる箇所が多いことが分かる。しかし、崩壊が発生した箇所を非発生と判別した林班も、若干見られる。これは、土砂災害の判別を誘因のみで行うには限界があることを示している。

警戒・避難時における土砂災害危険度評価結果を Fig. 11 (b) に示す。この図は、Table 3 の警戒・避難時 (t1) に示すデータを用いて、数量化Ⅱ類により危険度評価を行った結果であり、危険と評

Table 3 災害の異なるフェーズにおける外的基準と説明変数の関係

フェーズ	外的基準	説明変数
t0: 平常時 t1: 警戒・避難時 (災害直前)	森林基本図に示される過去の土砂崩壊履歴を含む小班	植生：針広別, 樹種, 粗密度, 間伐
		地質：地質型, 土壌型
		地形：標高, 斜面傾斜角, 斜面傾斜方向
		気象：年平均降水量, 年平均気温, 最深積雪量
		衛星画像：TM データ (2000年6月7日観測) → NDVI, UI, 水分, 風化
		降雨量：100年確率降雨量
t2: 応急復旧時 (災害直後)	IKONOS データを用いた土砂災害記録から設定した土砂崩壊 (土石流・崩壊別) の発生域を含む小班	植生：針広別, 樹種, 粗密度, 間伐
		地質：地質型, 土壌型
		地形：標高, 斜面傾斜角, 斜面傾斜方向
		気象：年平均降水量, 年平均気温, 最深積雪量
		衛星画像：TM データ (2000年9月27日観測) → NDVI, UI, 水分, 風化
		災害履歴：過去の災害履歴
t3: 防災施設計画時 (災害後)	IKONOS データを用いた土砂災害記録から設定した土砂崩壊 (土石流・崩壊別) の発生域を含む小班	植生：針広別, 樹種, 粗密度, 間伐
		地質：地質型, 土壌型
		地形：標高, 斜面傾斜角, 斜面傾斜方向
		気象：年平均降水量, 年平均気温, 最深積雪量
		衛星画像：TM データ (2000年9月27日観測) → NDVI, UI, 水分, 風化
		災害履歴：過去の災害履歴
		降雨量：100年確率降雨量

価した小班をやまぶき色で示す。この場合、外的基準が森林基本図より作成した土砂災害履歴であるため、(1) 式の A_0 を東海豪雨による土砂崩壊域 (土石流と斜面崩壊の両者を含む) のある小班の面積の合計として、適合度を求めた。適合度は 0.52 であり、詳細な災害記録データが不足している場合には、その精度が低下するものと考えられる。

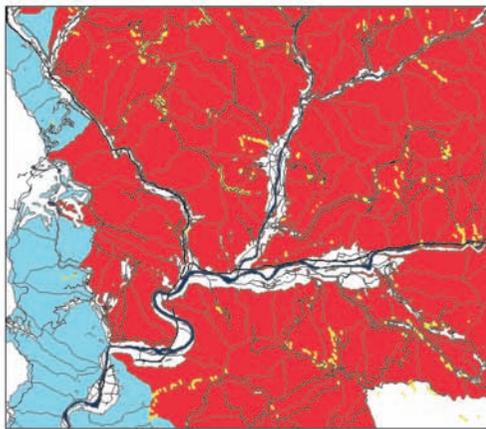
Fig. 11(a) および (b) を重ね合わせた結果を Fig.11(c) に示す。リアルタイムの情報として、東海豪雨により設定した CL によって危険と判断された箇所と事前情報としての平常時の危険度評価結果を重ね合わせることで、危険箇所を容易に認識することができる。

ここで、(c) 図において最も危険とされる宇連東地区における警戒避難時期の検証を試みた結果を Fig. 12 に示す。同図に示すスネーク曲線は、宇連東地区に含まれる 10 の林班の有効雨量と時間雨量を用いて作成した。また、スネーク曲線の推移に着目し、時間雨量のピーク値に対応する有効雨量の差が約 100 mm であるので、100 mm を基準

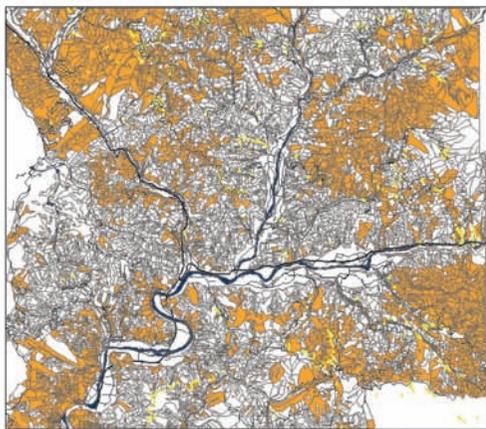
として避難線および警戒線を描いた。その結果、スネーク曲線が 9 月 11 日の 10:40 pm 頃に警戒線を超え、9 月 12 日 2:40 am 頃に避難線を、さらに、4:40 am 頃に限界線を越えていることがわかる。この GIS では、各林班についてのスネーク曲線、および警戒時、避難時の崩壊危険度を求めることができる。上矢作町全域について、一つの降雨量データだけで、避難、警戒の決定支援をするよりは、上矢作町の多数の林班のそれぞれに対するデータにより支援の検討ができるので、詳細な警戒避難支援が可能である。今後、他の豪雨災害にも適用できるように、東海豪雨以外の土砂災害発生・非発生降雨のデータを蓄積する必要がある。

4.2 被害状況把握

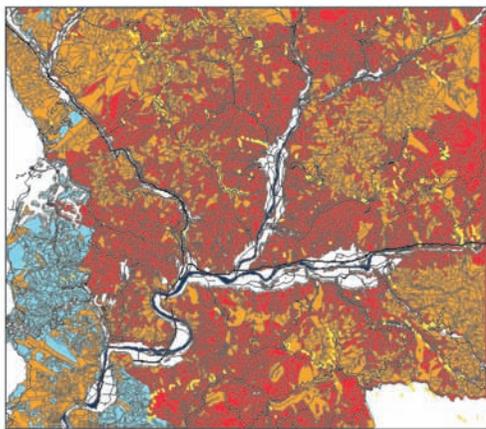
衛星画像などより緊急に作成された土砂災害記録と国道、県道および林道、建物のベクターデータをオーバーレイし、重なった箇所をカウントすることで災害状況の把握を行った事例を Fig. 13 に示す。背景は IKONOS 画像であり、土砂災害記録を赤で示す。



(a) 土砂災害発生限界線 (CL) による危険度評価



(b) 警戒・避難時の土砂災害危険度評価



(c) CL による危険度評価と警戒・避難時の危険度評価のオーバーレイ
 ■土砂崩壊箇所, □CLを超えていない林班, ■CLを超えた林班,
 ■土砂崩壊の危険度評価で危険と評価した小班

Fig. 11 緊急避難支援の一例

分析に用いる衛星画像の取得が、どの程度の時間で被害状況の把握が可能かといった点に大きく関係する。気象条件等にもよるが、現時点での高分解能衛星画像の取得に要する時間は被害発生後半日から1日程度である。

Fig. 13(a) は国道と土砂災害記録による道路被害抽出結果を示したものであり、6箇所の寸断箇所が認められる。同図中に、国道の寸断箇所を○で示す。被害延長から災害の規模が、また結果の表示により孤立地区の判別が可能となる。(b) 図は県道・林道被害抽出結果であり、やまぶき色で示す112箇所の被害箇所が認められる。国道と同様に、被害規模、孤立地区が判別されるとともに、緊急物資の運搬のための迂回路の検討なども可能となる。(c) 図は建物被害抽出結果である。同図中に、被災箇所を○で示す。総被災戸数、被災箇所の総面積など被災規模を知るとともに、1 m 分解能の衛星画像から作成された詳細な崩壊箇所を示した地図と、5000分の1の縮尺の地図からデジタルタイザにより作成された建物位置図を重ねることにより、各被災家屋についてどの部分が、何平方メートル被災しているかを知ることが可能であり、各戸の被害の程度を詳細に判別することが可能である。

また、降雨に関する説明変数に30年降雨確率の値などを用いて、数量化理論により危険度予測を行い、引き続き降雨による、二次災害箇所の予測なども可能である。東海豪雨においては崩壊を免れたが、部分的な崩壊が生じ不安定な状態になって

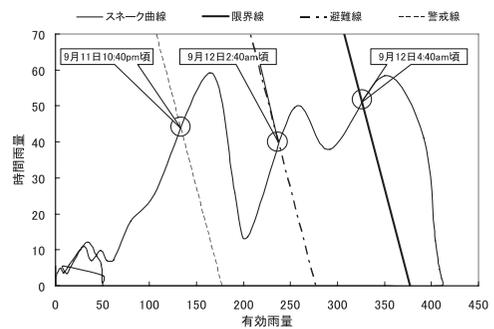


Fig. 12 宇連東地区の警戒避難時期の検証

おり、東海豪雨後の降雨により崩壊が生じ、二次的な災害は発生する場合も考えられる。流域の状態

が大きく変化した場合に、災害前のデータを用いて予測を行うことには困難な点があるが、現時点でこのような災害を予測する方法として、東海豪雨より発生確率が低い降雨量を前提とし、東海豪雨で崩壊が生じた地点と類似した特性をもち崩壊の可能性が高い小班を抽出する手法が考えられる。



(a) 国道被災箇所の抽出結果



(b) 県道と林道の被災箇所の抽出結果



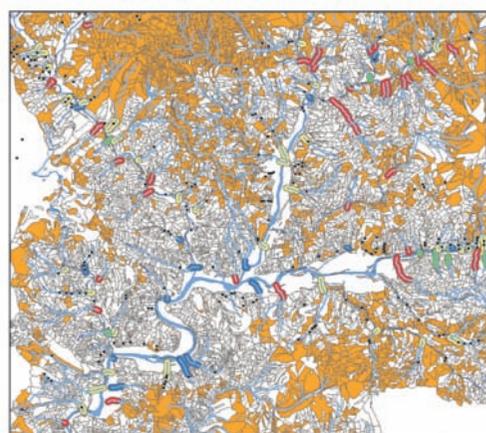
(c) 建物被害の抽出結果

Fig. 13 土砂災害記録による被災箇所の把握

4.3 リスクアナリシスによる砂防施設計画

数多くの土砂災害危険箇所には砂防施設などの施設を計画しハードな対策を行うことは、時間的、経済的に大きな制約がある。したがって、優先的に対策すべき箇所を選定する必要がある。そこで、土砂災害発生に伴う損失期待値と対策にかかる費用の比較を行うリスクアナリシスにより、優先対策箇所の選定を行う方法を示す。

リスクアナリシスの前提となる危険度の評価としては、Table 3に示した災害後防災施設計画時(t3)における、外的基準と説明変数により各小班の危険度評価を行った。また、この防災施設計画時における土石流危険度評価結果と既存の砂防・治山施設(2003年3月末まで)の有無の組み合わせにより、溪流の崩壊土砂流出被災危険度の評価を91の溪流に対して行った結果をFig. 14に示す。崩壊土砂流出被災危険度は、数量化によって危険と判定された溪流に砂防施設が無い場合を危険度



■ 危険度 A, ■ 危険度 B, ■ 危険度 C, ■ 危険度 D,
● 砂防施設

Fig. 14 崩壊土砂流出被災危険度評価

A (赤色), これに砂防施設がある場合を危険度 B (黄色), 数量化によって安全と判定された溪流に砂防施設がない場合を危険度 C (緑色), これに砂防施設がある場合を危険度 D (青色) とした。その結果, 危険度 A は32箇所, 危険度 B は34箇所, 危険度 C は10箇所, 危険度 D は15箇所であった。危険度 A に対応する32の溪流に対して防災施設計画の優先順位を検討する。

土砂災害の被害を推定するためには, 建物, 道路等に被害が及ぶ崩壊土砂堆積域の推定を行う必要がある。ここで, 対象域において, 実際に発生した崩壊の堆積域の幅を調べた。その結果, 最も規模が大きかった崩壊で, 50mの幅が確認された。また, この堆積域は, 最上流部と最下流部の標高差の10%程度であった。ここで得られた結果を基に, 最上流部と最下流部の標高差に対して, 最下流から標高差の10%の標高に相当する部分を求め, その部分に対して河道の中心から両側50mの幅をもつ領域をバッファ処理によって求め, これを堆積域として設定した。

溪流ごとの土砂堆積域内に存在する家屋戸数, 避難施設・国道の有無を土砂堆積域ごとに整理し, 被災規模の推定を行った。被災推定額は, 家屋1戸当たり1,500万円と算定した。なお, 避難施設は, 崩壊土砂流出危険度の高い箇所には無かった。

Table 4 砂防・治山ダムの概算設計仕様

項目	内容
ダム高さ	溪流長が長く溪流勾配が急なほど, 土砂堆積量が多いと考え, 溪流長と溪流勾配の組み合わせからダム高さを5m, 10m, 15mとした。このダム高さに根入れ深さ2mを加算した。
ダム幅	等高線から横断面を作製し, 谷幅がもっとも狭くなっている箇所を計測した。
ダム奥行き	3m
コンクリート単価	無筋コンクリート (40000円/m ³)
設置位置	推定堆積域の最上流部近傍
推定施工金額	ダム高さ × ダム幅 × ダム奥行き × コンクリート単価

また, 国道の被害額は算定が困難であったため除外されている。また, 期待損失を計算するための土石流発生確率としては, 3.3(1)で検討した土石流危険度予測の適合度を参照して, 0.8とした。この値は, 類似した特性をもつ小班の内, 防災施設の耐用年限内に実際に土石流が生じた割合を示す値に相当すると考えて, 土石流発生確率として用いた。

本研究では, 砂防ダムを防災施設として取り上げ, その施工費を対策に要する費用として, 対策費用の概算を行った。概略的に砂防・治山ダムの設計規模を決定するためには, ダム高さ, ダム幅, ダム奥行きを決定しなければならない。概算に用いた仕様を Table 4 に示す。

上述の危険度 A の溪流に対して, 崩壊危険度の高い溪流を抽出し, 被災額と対策費用の比較した結果を Fig. 15 に示す。図中の棒グラフは, すべての溪流についての被害額 (期待損失) の合計に対する各溪流の被害額の割合, もしくは対策費用の合計に対する各溪流の費用の割合を示している。被災額全体に占める割合が多く, かつ, 対策費用全体に占める割合の少ない箇所が優先度の高い対策箇所の候補となる。このようなリスクアナリシスの手法を取り入れることにより, 広域にわたってハードな防災対策を行う場合に, 各小班,



■ 被災額全体に占める割合, ■ 対策費用全体に占める割合

Fig. 15 リスクアナリシスによる対策優先箇所の選定

各溪流における災害発生特性を定量化し、対策費用と比較することにより合理的に施設計画を遂行することが可能となる。

5. まとめ

本研究では、2000年東海豪雨における降雨記録、災害記録、および森林データベースを用いて広域災害特性を分析した結果を示すとともに、分析結果に基づき、素因、誘因の両者を考慮した総合的な土砂崩壊危険度評価手法を示した。また、この総合的な土砂崩壊危険度評価を用い、統一的な基準に基づいた、被害軽減のための災害対策支援 GIS の適用事例を、災害における異なるフェーズに対して示した。危険度評価については、以下の点が明らかになった。

- ① 誘因である降雨特性については、各観測所の時間雨量から時間雨量と有効雨量に関する等雨量線を作成し、林班ごとに雨量を集計した。得られたスネーク曲線から土砂災害発生限界線を設定した。土砂災害発生限界線は、警戒避難の基準となることが示された。
- ② 素因データの分析については、高分解能衛星画像を用いて土砂崩壊箇所の検出を行い、航空写真判読結果を加えて土砂災害記録を作成した。この土砂災害記録と10m メッシュの標高データを用いて土砂崩壊発生域を設定し、森林のデータベースや気象、地形データを用いて土砂崩壊発生域の特性分析を行った。特に、土石流、斜面崩壊の二つのタイプについて、それぞれの特性を調べた。
- ③ 誘因としての降雨強度と、地形、地質、植生などの素因の両者を考慮した数量化理論による危険度評価手法を示した。また、この手法を東海豪雨における崩壊事例により検証した結果、土石流、崩壊ともに良好な結果が得られた。

また、被害軽減のための対策支援事例としては、以下の点が明確となった。

- ④ 避難、警戒時については、降雨についてのリアルタイムデータと危険度評価結果を用いて、林班ごとにおける避難計画を策定支援する事

例を示した。

- ⑤ 災害発生直後の応急復旧時については、高分解能衛星画像により検出された崩壊地と、道路、民家などの GIS データとをオーバーレイすることにより被害状況を把握する事例を示した。
- ⑥ 平常時における防災施設計画については、上記の危険度評価に基づく被災額と、砂防施設の建設費を広域にわたって評価し、建設の優先度を検討するリスクアナリシスの事例を示した。

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、ナカシャクリエイ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、降雨データは、国土交通省豊橋工事事務所より提供をうけた。また、航空写真については名城大学清水泰弘助教授からも提供を受けた。さらに、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) 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, IV-12, pp. 71-80, 1990.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 河呂真, 辻野和彦, 辻子裕二: 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, 自然災害科学, Vol. 23, No. 2, pp. 245-258, 2004.

- 5) 荒木義則, 古川浩平, 松永悟, 小笠原貴人, 石川芳治, 水山高久: 土石流危険渓流における地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No. 574/VI - 36, pp. 33-47, 1997.
- 6) 瀬尾克美, 高橋透, 荒木義則, 古川浩平, 水山高久: GIS を用いた土石流警戒避難支援システムの構築～山口県大島郡におけるモデルの開発～, 砂防学会誌, Vol. 53, No. 4, pp. 30-37, 2000.
- 7) 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土砂災害の特徴, 自然災害科学, Vol. 19, No. 3, pp. 359-373, 2000.
- 8) Yasuhiro SHIMIZU, Naohiko TOKASHIKI and Fujio OKADA: The September 2000 torrential rain disaster in the Tokai region - Investigation of a mountain disaster caused by heavy rain in three prefecture -, Journal of Natural Disaster Science, Vol.24, No.2, pp.51-59, 2002.
- 9) 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現象についての検討, 平成13年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 150-151, 2002.
- 10) 松村和樹, 中筋章人, 井上公夫: 土砂災害調査マニュアル, 鹿島出版会, pp. 227-234, 1988.
- 11) 高瀬信忠: 河川水文学, 森北出版, pp. 102-128, 1979.
- 12) 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.

(投稿受理: 平成17年4月1日
訂正稿受理: 平成18年1月12日)