

## 7. 土石流検知センサー最適配置支援システムの構築

堀井宣幸\*, 豊澤康男\*\*, 玉手 聡\*\*, 濱島京子\*\*\*

## 7. Construction of a Support System for Optimum Arrangement of Debris Flow Detection Sensors

by Noriyuki HORII\*, Yasuo TOYOSAWA\*\*,  
Satoshi TAMATE\*\* and Kyoko HAMAJIMA\*\*\*

**Abstract:** In December 1996, a large debris flow occurred at Gamaharazawa located at the border between Nagano and Niigata prefectures. The debris flow, which involved construction workers working in the drainage basin, resulted in a serious disaster with 14 persons dead and 9 persons injured. In this case, once a debris flow occurs not only many workers were in the basin but also nearby residents were involved and then the disaster becomes expanded. For this reason, “the guideline for the prevention of industrial accidents due to the debris flow” is published in accordance with the revision of a regulation of Occupational safety and health at Ministry of Labor.

In this guideline, an installation of a debris flow detection sensor is recommended as part of the alarm-evacuation system and the following important matter is suggested about the arrangement of these detection sensors.

1. capable of monitoring debris flows generated in any tributaries
2. capable of evacuating laborers within the time span between debris flow generation

In order to cope with these important matter, it is indispensable to understand the generation place, magnitude, arrival time and arrival area of a presumed debris flow, and it is necessary to build the alarm system where effective evacuation can be taken based on this information. In this paper, a support system for optimum arrangement of the debris flow detection sensors is described, which can provide required information to construct a reliable debris flow detection system.

Former arrangement methods of debris flow detection sensors are rather subjective. They tend to decide the arrangement empirically, only considering past debris flow generation conditions and topographic features of the basin. The present method using DEM data proposes a new system to observe dynamic conditions of debris flows objectively and sequentially. The main procedure is as follows.

- ① divide a drainage basin into some small sub-basins and obtain gradient distribution for each sub-basin
- ② extract meshes of gradients greater than 20-22° and weight points according to sediment depth and the steepest gradient value
- ③ accumulate indices of meshes obtained in ② on the basis of each sub-basin, and then calculate the area ratio
- ④ specify the sub-basin of the highest area ratio obtained in ③ as a danger area susceptible to slope failures

\* 研究企画調整部 Research Planning and Coordination Division

\*\* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

\*\*\* 境界領域・人間科学安全研究グループ Interdisciplinary and Human Science Safety Research Group

- ⑤ execute one-dimension river-bed fluctuation analysis in a transport reach for the debris flow presumed to be generated at the danger area
- ⑥ execute two-dimension inundation analysis in the downstream extent from the initial inundation point with the boundary conditions obtained from calculation results of ⑤
- ⑦ estimate the arrival time of the debris flow coming from the generation point to residential areas based on the previous analyses

These analyses enable us to understand dynamic features of debris flows from generation, transport to accumulation sequentially, and arrange debris flow detection sensors on a computer display.

The present system utilizes a GIS technology in order to manage DEM data and map information simultaneously. Because debris flow analyses require complicated numerical simulation and enormous amounts of data management, visual map information is necessary to examine the final arrangement of the sensors. The present results show one example of analytical GIS applications.

**Keywords**; Debris flow, GIS, Detective sensor, Alarm-evacuation system, Optimum arrangement, Slope failure, Numerical simulation

## 1. はじめに

平成8年12月6日、長野と新潟の県境に位置する蒲原沢（姫川支川）にて大規模な土石流が発生し、砂防工事を行っていた作業員が土石流に巻き込まれ、23名が死傷するという重大災害となった（Fig. 1）。土石流災害が一旦発生した場合には多数の現場作業員が被災する確率は極めて高く、さらに一作業現場に止まらず近隣住民を巻き込んで広範囲に被害が拡大することもあり、社会的影響も甚大なものがある。

この災害を契機に、労働省（現・厚生労働省）は労働安全衛生規則の改正を行うとともに、「土石流による労働災害防止のためのガイドライン」を作成した。

このガイドラインは建設事業者が土石流危険河川内で工事を行う際に講ずるべき安全対策を具体的に示したものであり、その中では土石流発生の監視措置の1つとして土石流検知機器（センサー）の設置が規定さ

れている。

本報で報告する『土石流検知センサー最適配置支援システム』は、今後必要性の高まる土石流検知センサーについて、その配置計画を支援するための解析ツールとして構築したものである。

## 2. 検知センサー最適配置支援システムの必要性

土石流検知センサーの設置場所については、従来定性的かつ経験的に判断されてきており、経験のある技術者が過去の土石流発生状況や地形的特性を考慮して決定しているのが現状である。しかし、「土石流による労働災害防止のためのガイドライン」では、その土石流検知センサーの配置決定に際して以下の留意点が明確に挙げられている。

- ・河川の状況に応じ、支川において発生・流下してくる土石流を監視できること。
- ・土石流を検知してから工事場所に到達するまでの間に労働者を避難させることができること。

上記の留意点に対処するには、想定される土石流の発生場所、規模、到達時間、到達範囲等についての確かな解析を行い、定量的に土石流を予測することが不可欠と考えられる。

そこで、複雑な数値計算と膨大なデータ管理を効率的に処理するためにGIS（Geographical Information System, 地理情報システム）を応用した土石流検知センサー最適配置支援システムを開発した。本システムを用いることにより、土石流の発生から流下、堆積までを定量的に追跡することができ、その解析情報をもとに画面上で土石流検知センサーの配置検討を行い、設置場所から工事現場までの土石流到達時間を算出することができる。

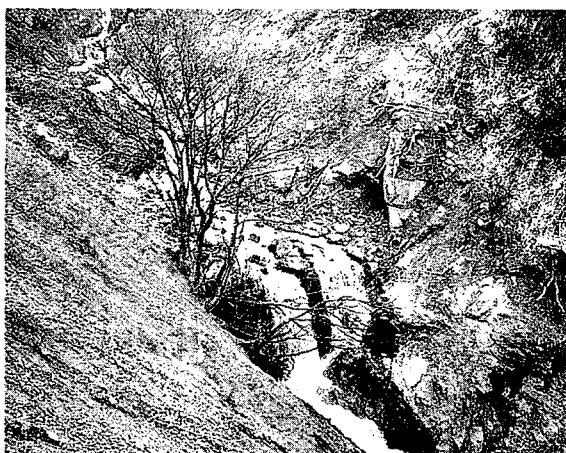


Fig. 1 Gamahazawa debris flow accident.  
蒲原沢土石流災害

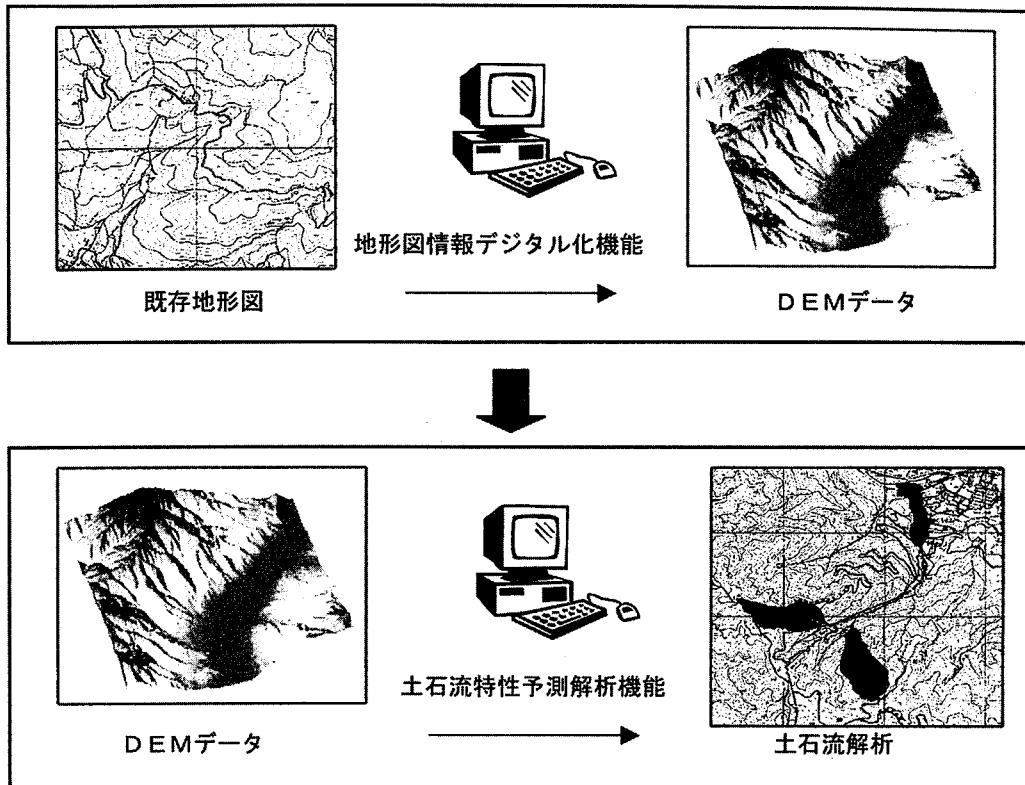


Fig. 2 Outline of analytical system.  
解析システムの概要

### 3. システムの概要

本システムでは DEM データ (Digital Elevation Model, メッシュ標高データ) をもとに GIS 上で地形解析や数値計算を行うが、解析の基盤となる DEM データの作成機能もシステムに付属させている。したがって、Fig. 2 に示したように全体として大きく 2 つの機能 (地形図情報デジタル化機能と土石流特性予測解析機能) を持っている。

### 4. 解析処理の流れ

Fig. 3 にシステムの全体フローを示す。

基本的な流れは、

- ① 対象流域の地形図から DEM データを作成
- ② GIS システム用のデータセット作成 (ラスター画像 { スキャナーなどで読み込んだ地図等の画像 } + DEM データ)
- ③ 対象流域の崩壊危険度判定 (地形解析)
- ④ 土石流流下経路の決定
- ⑤ 1次元河床変動計算による土石流到達時間の解析
- ⑥ 2次元氾濫シミュレーションによる土石流氾濫解析

となっている。

### 5. データ構造

Fig. 4 にデータ構造を示す。本システムでは GIS をベースにしているため階層別のデータ構造となっており、図形データ、背景画像および標高データの 3 つを一元的に管理することができる。また背景画像では地形図の他、オルソフォト (正射投影写真、これを地図と重ね合わせることで写真地図として利用できる) による表示も可能となっている。

### 6. 地形図情報デジタル化機能

ここでは地形図ラスター画像 (既存地形図のスキャン画像) から DEM データを作成する。等高線をベクトル化し標高値を与え、TIN (Triangulated Irregular Network, 土地などの連続的な表面を、高さを接点とした三角形メッシュによって表現する不規則三角形網) データを作成した後、任意のメッシュ間隔で DEM データを発生させることができる。メッシュ精度については出力されるデータサイズや使用する地形図の精度を吟味しなければならないが、GIS 上での地形解析や氾濫シミュレーションを考慮した場合、5m 程度のメッシュ区分が必要であると考えられる。Fig. 5 に DEM データの作成フローを示した。

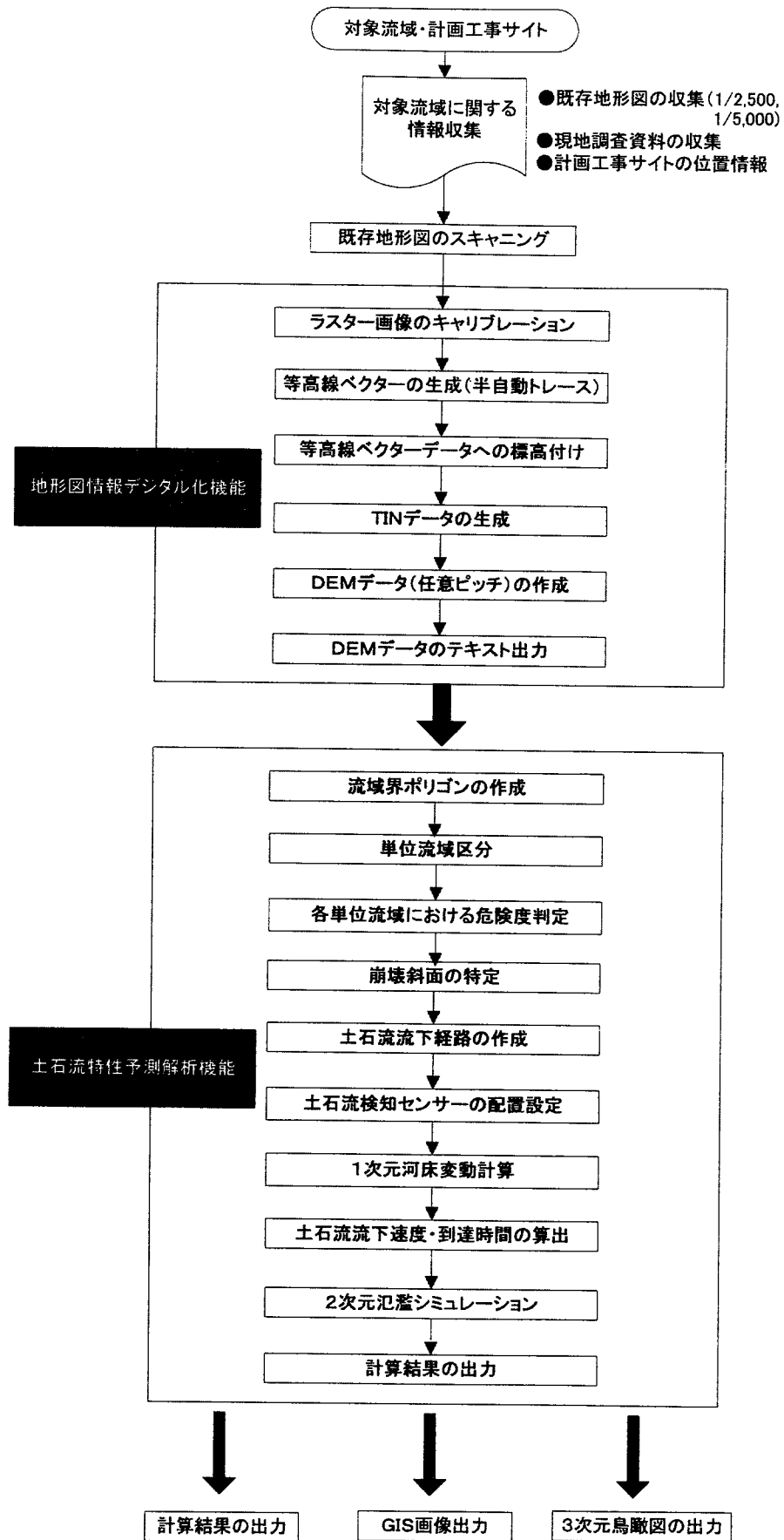


Fig. 3 Flow of analytical system.  
本システムの全体フロー

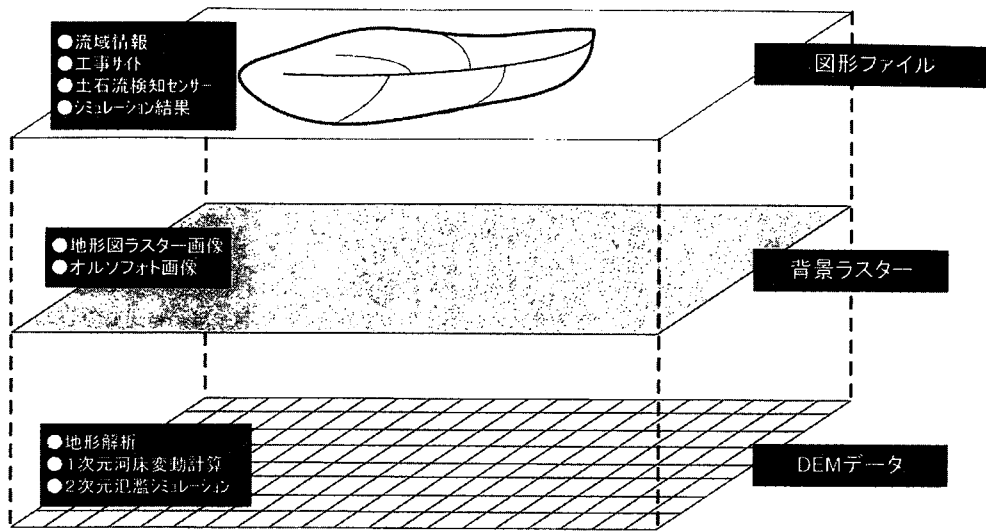


Fig. 4 Structure of GIS data layer used in this system.  
本システムにおける GIS データレイヤー構造

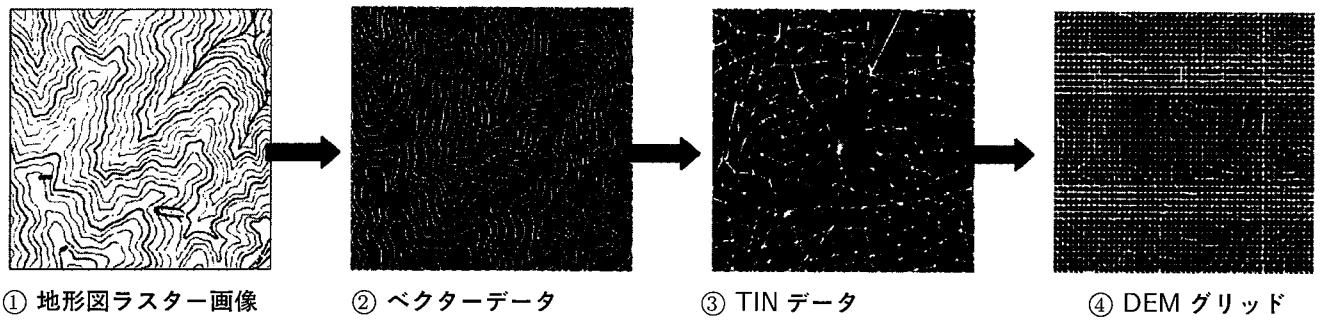


Fig. 5 Generation procedure of DEM data.  
DEM データ作成フロー

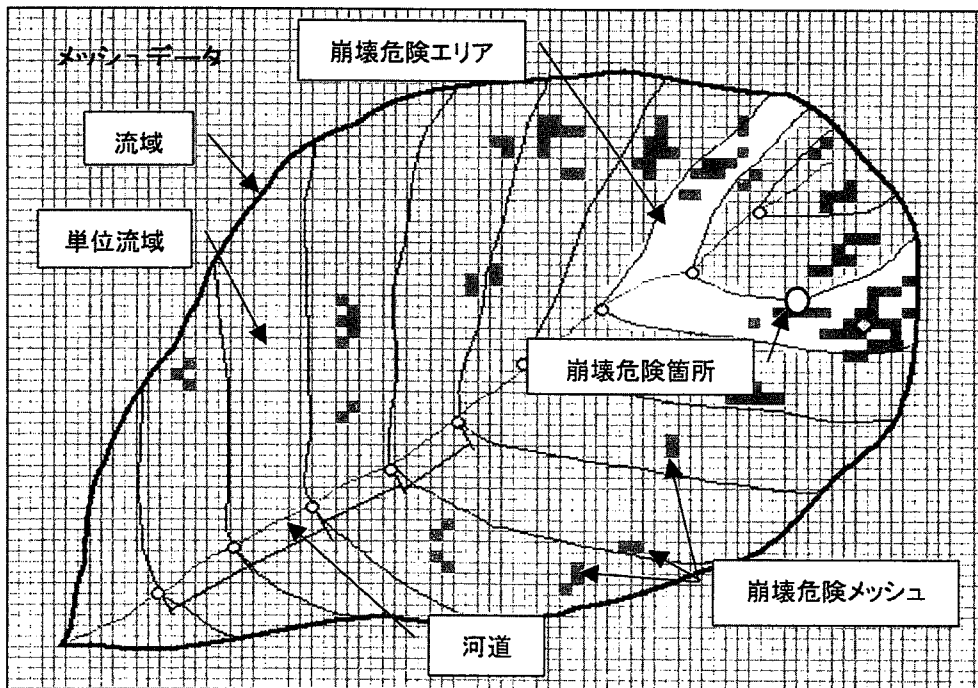


Fig. 6 Image of determination of a danger area susceptible to slope failure.  
崩壊危険箇所抽出のイメージ

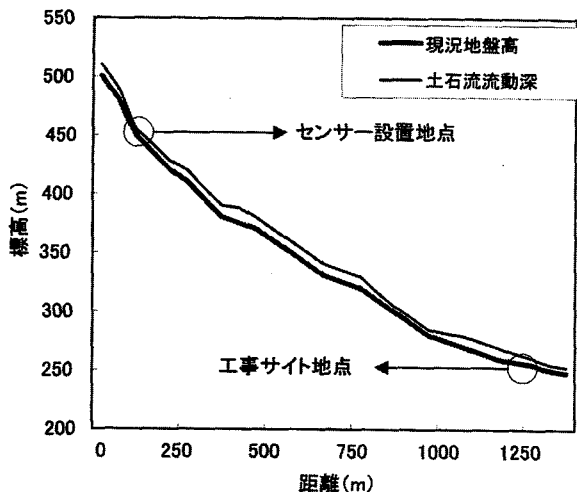


Fig. 7 Horizontal shape of debris flow.  
土石流波形の縦断表示

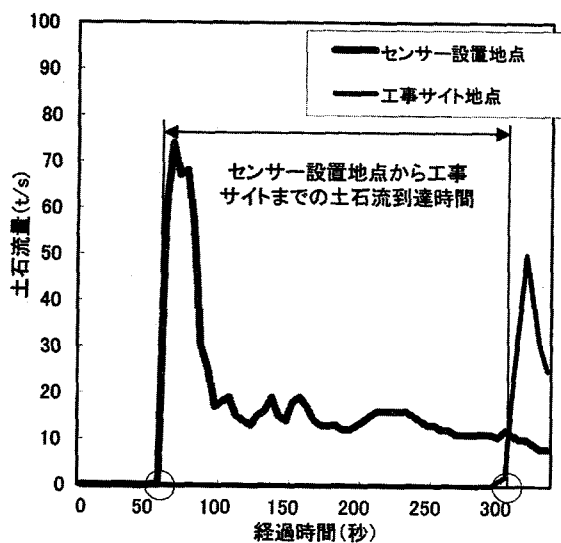


Fig. 8 Hydro-graphs at the position arranged sensors and construction site.  
2地点におけるハイドログラフ

### 7. 土石流特性予測解析機能について

ここでは GIS 上において土石流特性の解析を行う。地形図情報デジタル化機能により作成した DEM データを利用して、最初に地形解析および土石流到達時間の解析を行う。ついで 2次元氾濫シミュレーションを行うことにより、土石流の流動過程を連続的に把握することができる。

#### 7.1 地形解析 (崩壊危険度判定)

地形解析では流域界の設定から崩壊危険斜面の抽出までを行う。崩壊危険箇所を抽出するイメージを Fig. 6 に示した。GIS 上の流域界ポリゴンは以降の解析において基本となる領域であり、図面内で複数の流域界を設定することも可能である。崩壊危険斜面を抽出す

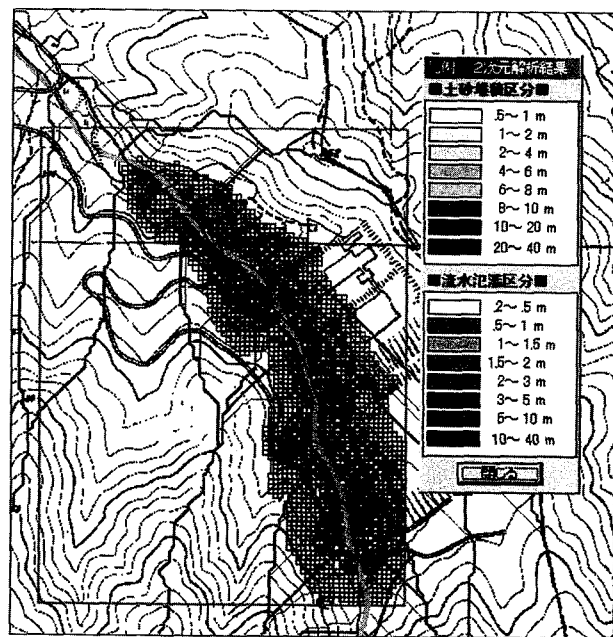


Fig. 9 An analytical result of 2-dimension inundation analysis.  
2次元氾濫シミュレーションによる解析結果

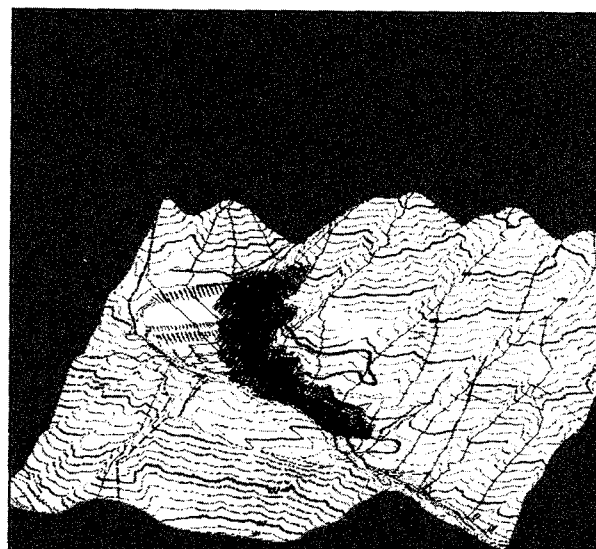


Fig. 10 3 dimensional view of an analytical result.  
解析結果の鳥瞰図表示 (3次元表示)

るための具体的な手法は以下のとおりである。

- ① 河道を固定ピッチで区切り, 単位河道とする。
- ② 単位河道の両側斜面を1つの単位流域とする。
- ③ それぞれの単位流域内で, 勾配が 20~22 度以上 (崩壊の危険性にある勾配) のメッシュを崩壊危険メッシュとして抽出する。
- ④ 抽出された崩壊危険メッシュ1つ1つについて個々の面積に勾配値を乗じて, ランク付けを行う。
- ⑤ ④において個々のメッシュに堆積土層がない場

Table 1 Procedures of estimation analysis on characteristics of debris flow.  
土石流特性予測解析における処理

| 処理            | 解析フロー   | 画面サンプル  |
|---------------|---|---|
| 流域区分          | <ul style="list-style-type: none"> <li>●対象流域界のポリゴン入力</li> <li>↓</li> <li>●落水線の自動解析</li> <li>↓</li> <li>●単位流域区分</li> <li>↓</li> <li>●単位流域のポリゴン自動形成</li> </ul>  | <p>自動解析された落水線上を指定</p> <p>境界線の自動作画</p>                                       |
| 崩壊危険度判定       | <ul style="list-style-type: none"> <li>●メッシュ単位の傾斜区分</li> <li>↓</li> <li>●崩壊危険勾配のメッシュ抽出</li> <li>↓</li> <li>●単位流域内の危険斜面面積率の算出</li> <li>↓</li> <li>●堆積土厚の有無による重み付け</li> <li>↓</li> <li>●最も崩壊危険度の高い箇所の抽出</li> </ul>                                      | <p>指定した単位流域について傾斜区分が描画される</p> <p>解析後、抽出された崩壊危険箇所</p>                        |
| 1次元河床変動解析     | <ul style="list-style-type: none"> <li>●崩壊危険箇所から想定される土石流の流下経路の探索</li> <li>↓</li> <li>●各計算断面の河道幅算出</li> <li>↓</li> <li>●土石流検知センサーと工事サイトの設定</li> <li>↓</li> <li>●1次元データセットの作成</li> <li>↓</li> <li>●1次元河床変動計算</li> <li>↓</li> <li>●ハイドロデータの作成</li> </ul> | <p>工事サイト</p> <p>センサー設置箇所</p> <p>計算結果の縦断表</p> <p>ハイドログラ</p> <p>一次元河床変動計算</p> |
| 2次元氾濫シミュレーション | <ul style="list-style-type: none"> <li>●計算範囲の指定</li> <li>↓</li> <li>●2次元データセットの作成</li> <li>↓</li> <li>●2次元氾濫シミュレーション</li> <li>↓</li> <li>●結果出力 (レイヤー管理)</li> </ul>  | <p>2次元氾濫計算範囲の設定</p> <p>シミュレーション結果</p>                                       |

合はゼロを乗ずる。

(堆積土層の存在が不明な場合はゼロとしない。  
現状のシステムではすべて1を乗ずる。)

- ⑥ ④と⑤で算出されたランク値を単位流域面積で除して、ランク値の面積率を算出する。
- ⑦ ⑥における面積率の最も高い流域を崩壊危険流域とし、その中で最もランク値の高いメッシュを崩壊危険箇所とする。

## 7.2 一次元河床変動解析 (土石流到達時間の計算)

地形解析で抽出された崩壊危険箇所から土石流が発生した場合を想定して、1次元河床変動計算により土石流の流動過程を追跡することができる。この解析では Fig. 7 に示すように、計算区間内の土石流波形が時系列で縦断表示されるほか、Fig. 8 に示したようなセンサー設置地点と工事サイト地点のハイドログラフ (土石流量曲線) を表示することができる。土石流を検知してから工事サイトに至るまでの到達時間については2地点のハイドログラフの差分によって表現される。

## 7.3 二次元氾濫解析 (氾濫域の計算)

前項の1次元河床変動計算は土石流の到達時間を把握するための解析であるが、2次元氾濫シミュレーションを行うことにより土石流の面的な氾濫形状についても解析することができる。解析結果は Fig. 9 に示したように、流水と土砂に区分され、それぞれの氾濫堆積形状を時系列的に把握することができる。このようなシミュレーション計算技術については現時点においてかなり広範な現象について一応の解 (計算結果) が得られるまでになっているが、砂防河川での河床変動現象はその支配要因が多岐にわたるため、全ての現象を表現できるような計算モデルの完成には至っていない。砂防河川において数値計算を行う場合には、それぞれの現象を表現できる計算モデルを使用し、かつまた計算条件を正しく設定する必要がある。本システムにおける2次元氾濫シミュレーションでは、土石流の面的な氾濫形状 (広がり) を精度よく表現することに特化した計算モデルを用いており、対象となる工事サイト付近やその下流域における氾濫形状を予測することに主眼を置いている。

また、解析結果の表現手法として、Fig. 10 に示したような、DEM データを利用した鳥瞰表示 (3次元表示) が可能となっている。画面上で鳥瞰表示したい範囲を任意に選択することで、自由な視点から解析結果を確認することができる。

以上のように、土石流特性予測解析機能では、土石流の発生→流下→氾濫までを幅広く扱い、それぞれのメニューを順序良く行うことによって連続的に解析することができる。本機能の一連の処理フローを整理すると Table 1 のようにまとめられる。

## 8. おわりに

本システムは防災分野において現在活発に議論されている解析型 GIS の1つとして位置付けられるものである。これらの GIS 技術や数値解析技術はハザードマップ作成や危機管理システムとしての応用が期待されるものであり、今回構築したシステムは土石流による労働災害防止を目的として開発したものである。

その具体的な内容は、土石流検知センサー配置計画のための土砂水理学的な解析であり、土石流の発生から流下・氾濫までを予測することによって、的確なセンサーサイトの検討を行うことができるようになった。今後の課題としては、

- ① 試験データによるシステム検証
- ② 災害実績データによる再現性の検証
- ③ 現地調査による詳細データの反映手法
- ④ 地形解析手法の精度向上
- ⑤ 数値解析モデルの研究開発が挙げられる。

## 参考文献

- (1) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高橋徹也：土石流の構成則に関する研究，京大防災研究所年報，第32号 B-2，pp.487～501 (1989)。
- (2) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，第41巻，土木学会，pp.786～794 (1997)。
- (3) 伊藤隆郭・江頭進治：土石流に関する構成則の比較研究，水工学論文集，Vol.42，土木学会，pp.913～918 (1998)。

(平成14年1月18日受理)