

## II-6 火山地域における泥流氾濫シミュレーション及びハザードマップの精度向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：火山・土石流チーム

研究担当者：栗原淳一、秋山一弥

### 【要旨】

火山泥流による災害を防止するため、泥流氾濫域を精度良く予測し、警戒避難体制を整備する必要がある。例えば火山山麓において都市化が進行している箇所では、火山泥流の流下・堆積現象が建造物や道路等の人工構造物の影響を受け、複雑になり、氾濫域を正確に予測することが困難なケースがある。そこで本研究では、複雑な氾濫域の形状を考慮した泥流氾濫・堆積機構をモデル化し、GISを活用した泥流ハザードマップの作成手法を提案する。そして、泥流氾濫シミュレーションを用いた対策施設計画手法を提案する。

キーワード：火山泥流、市街地氾濫、土砂堆積、水理実験、人工構造物

### 1. はじめに

近年の都市化の進行に伴い、火山山麓にまで建造物や道路等の人工構造物が設置されてきている。火山泥流による災害を防止するためには、泥流氾濫域を精度よく予測し、警戒避難体制を整備する必要があるが、人工構造物や複雑な地形の影響を考慮する必要がある。氾濫域の正確な予測には、このような地形、構造物を有する区域では、道路に沿った氾濫域の拡大等が過去の事例から確認されており、また人工構造物の影響による氾濫範囲や堆積現象の変化が予想されるが、その氾濫および堆積形態への具体的影響についてはいまだ十分な解明がなされていない。このような理由から、都市化が進展した氾濫域での予測精度の向上が現在重要な課題となっている。

本研究は、複雑な地形の区域や人工構造物が集中した氾濫域における火山泥流の氾濫堆積特性を明らかにし、氾濫範囲推定精度の向上を図ることを目的に実施するもので、泥流氾濫・堆積機構のモデル化を図る必要がある。そこで、家屋を模した構造物を配置した氾濫域を作り水理実験により家屋密集地における基本的な土砂堆積傾向を把握した。次に、実際の市街地配置での家屋をモデルとして水理実験を行い、これらの実験結果から家屋が密集している区域での氾濫堆積特性を明らかにした。次いで、複雑な地域におけるシミュレーションの精度向上の検討を行った。これまでは構造格子モデルをもとにした泥流氾濫シミュレーションが行われているが、地形の要素として取り込むことのできる情報は格子が矩形を示しているために、泥流の流下・堆積範囲に影響を及ぼす河道の形状などの要素を充分に取り入れることが困難である。一方、非構造格子モデルは、河道や道路に沿って格子の大きさ・形状を自由に設定出来るため、複雑な地形情報を反

映させることが可能である。そこで、本シミュレーションでは過去に実施した模型実験の結果を再現対象として、構造格子モデルおよび非構造格子モデルの双方で再現計算を行い、屈曲部の再現性について比較した。また、再現性の精度を向上させるため、従来の重力項の計算手法の問題点を指摘し改善した。また、GISを活用することによって、シミュレーション結果から泥流ハザードマップを短時間に作成する手法を提案した。さらにシミュレーションを活用した対策施設の計画手法を提案した。

### 2. 家屋密集地における土砂堆積特性に関する検討

実験は2カ年にわたって実施し、平成14年度は家屋構造物の配置による氾濫特性への基本的な影響を確認した。平成15年度は、実際の市街地での配置状況に変え、その氾濫特性への影響を確認した。以下の記述では、個々の家屋に関しては「家屋」、家屋が集まったまとまりを「家屋群」と称する。

#### 2.1 家屋群を規則的に配置した実験（スケール 1/40 および1/100）

実験装置は泥流流入部（幅10cm、長さ3.0m）と氾濫域（幅1.7～2.3m、長さ2.7m）から構成されており、氾濫域に家屋を模したブロックを盤面に固定した。家屋の模型は、強固なものとした。なお、縮尺は1/40と1/100とし、前者の場合は家屋の一辺を25cm、後者の場合は一辺を10cmとし各々について家屋なしの実験を行い、家屋の有無による氾濫の違いを考察した。流入部から泥流を流入させ、水深、土砂堆積厚を計測した。また、模型の河床勾配は流入水路では一律に10°、氾濫域は一律に5°、通水時間は15分とした。

## 2. 1. 1 家屋の有無による全体的な傾向

最初に、模型全体の平均的な堆積傾向について考察する。家屋がないケースに比べ家屋があると、泥流が家屋群の間隙に流れ込み、その遮蔽効果や家屋との摩擦により泥流の流下や土砂の堆積等に局所的な影響を及ぼしている。一方、家屋がない場合、泥流はほぼ一様水深で流下し、土砂もほぼ一様の厚さで堆積する。図-1に家屋密度と堆積深との関係を示す。家屋群がある場合は、家屋の立地している部分において堆積厚が増大し、家屋群がない場合に比べて1.1~6.2倍まで達する(図-1)。

我が国の家屋の敷地面積の平均値は301m<sup>2</sup>であり、法律上の建蔽率が50~80%であることから、平均的な家屋間隔は約4~10mで、家屋密度は0.3~0.5と推定できる。

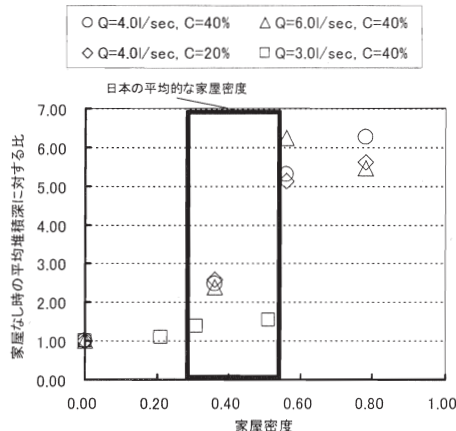


図-1 家屋群による平均堆積厚の影響

## 2. 1. 2 家屋群内での縦断方向の堆積傾向

次に、家屋群内の堆積状況を縦断方向に見てみると、今回行った実験の範囲においては、家屋群内での堆積厚は下流側のほうが大きくなり、第1列の家屋における堆積厚の1.3~2.1倍となる。また、家屋間隔の狭い方が堆積が促進する傾向にある(表-1)。

表-1 家屋群における堆積厚の変化

Q=4.0/sec, C=40% (cm; 横列平均値)			
列	家屋間隔		
	0.2B	0.5B	B
第1列	1.20	1.30	1.10
第2列	2.50	2.30	1.40
第3列	2.20	2.40	1.60
(第1列の堆積深との比)			
第1列	1.0	1.0	1.0
第2列	2.1	1.8	1.3
第3列	1.8	1.8	1.5

これは、今回行った実験条件のような場合(地形勾配5°)には、家屋群上流側では流速が大きくて土砂はほとんど堆積せず、また泥流が左右に分散し流下しやすい傾向にあるためと考えられる。一方、下流側では家屋との摩擦等によって流速が徐々に減少し堆積が促進されると考えられる。

## 2. 1. 3 屋群内での横断方向の堆積傾向

家屋群内の横断方向の堆積傾向について、家屋間隔が0.5Bのケースを図-2に示す。家屋群中心部の縦列Bの堆積厚は左岸側の縦列Aでの1~1.5倍となり、家屋群内で最下流に位置する横断3列目上流側での堆積傾向を除いて概ね中央部に堆積する傾向にある。但し、他の間隔では、これよりも中央部への土砂堆積の集中は顕著には認められず、横方向での堆積の偏りはあまり認められなかった。

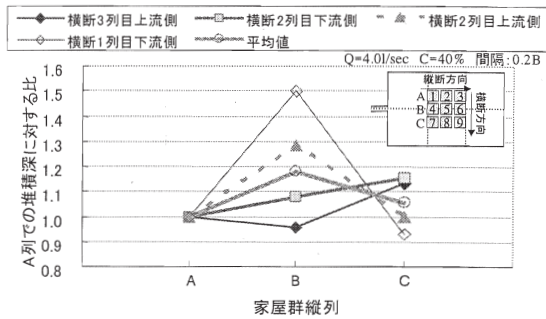


図-2 家屋群内での横断方向にみた堆積傾向

## 2. 1. 4 個々の家屋周辺の堆積傾向

次に、個々の家屋周辺の上流側と下流側で土砂がどのように堆積するか分析した。図-3に家屋の前面と背面に土砂がどのように堆積したか一例を示す。最も上流側の家屋では家屋の上流側よりも下流側に厚く堆積し、それより下流側に立地している家屋では家屋の上流側に厚く堆積する傾向が明らかとなった。但し、最下流の家屋の下流側に土砂は堆積しない。これは最下流の家屋の下流側には流れを妨げる障害物がなく、そのまま土砂を押し流してしまうためと考えられる。

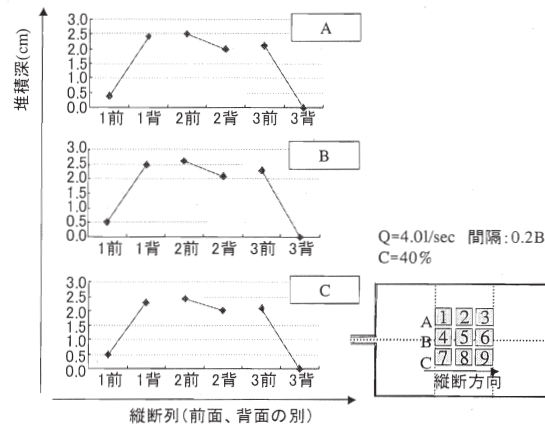


図-3 家屋群内の縦断方向の堆積厚

家屋周辺の流れのイメージを図-4に示す。家屋間隔が1.0Bの場合は、家屋間の隙間が大きいので、泥流が家屋間を勢よく流下し、また家屋にぶつかりながら横断方向にも流出していく。その際、各家屋の前面との衝突、側面との摩擦により流速が落ちるとともに、局所流(渦流)が発生し家屋前面での堆積が促進される傾向がある。

一方、家屋間隔が0.2Bの場合も基本的には図-4のような挙動を示すが、第1列の間隔が狭いために、流れが家屋に衝突して横へのひろがりが大きくなる。但し、家屋間の隙間に一部の土砂が流れ込み、1.0Bのときと同じように家屋前面に土砂が堆積する。

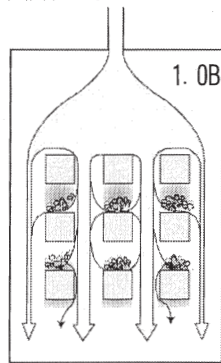


図-4 泥流の流れ (イメージ)

## 2. 1. 5 まとめ

家屋群がない場合、泥流はほぼ一様水深で流下し、土砂の堆積もほぼ一様の厚さで堆積する。一方、家屋群がある場合は、堆積厚が増大することが実験から明らかになった。家屋群内でのマクロ的な堆積傾向は、堆積厚は下流側で大きくなる。横断方向では、中央部においてやや大きくなる傾向が見られた。個別の家屋単位で見ると、最も上流側の家屋は家屋の下流側に厚く、それより下流側の家屋の逆に家屋では上流側に厚く堆積する。そして、最も下流側の家屋の下流側には堆積しないことが明らかとなった。

## 2. 2 家屋が不規則に配置されている場合の堆積傾向

前述の水利実験では、規則的に配置した家屋を対象に土砂堆積傾向を観測したが、実際の市街地のように家屋が乱雑に立地している場合でも同様の結果が得られるかどうかを確認した。

### 2. 2. 1 実験概要

実験は、平成11年6月に土石流災害が発生した広島県の屋代川流域 (図-5) の地形を模して氾濫域を作成し、これに実際に立地していた家屋を一辺10cmの立方体で模して盤面に固定した。なお、縮尺は1/100とした。泥流流入部から泥流を流入させ、家屋周辺の水深、土砂堆積厚を計測した。また、模型の河床勾配は2.1節の基礎実験と同様、流入水路で10°、氾濫域で一律に5°とした。実験砂は雲仙・三宅島の泥流氾濫被災事例で得られた火山灰を想定し、フライアッシュと珪砂の混合砂を用いた。

流量は2, 3, 4 l/sの3ケース、重量土砂濃度は20%とし、各々定常状態で15分間通水した。対象地域の家屋を現地



図-5 人工構造物密集地における土石流氾濫の一例 (屋代川：広島市五日市町)

の道路および水路を境界として、図-6のように10の家屋群A～Jにグルーピングし、家屋群ごとの堆積厚について考察した。

### 2. 2. 2 流量と堆積傾向の関係

個々の家屋群において、その前面、背面および側面について堆積厚の変化を把握するとともに考察した。家屋群前面の堆積厚は流量が大きいほど小さくなっており、2.1で行った基礎実験と同様の結果が得られた。また下流域の家屋群I, Jのほうが大きな堆積厚を示す傾向がある (図-7)。

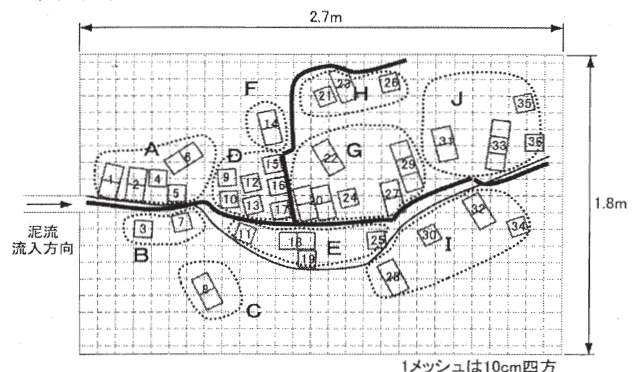


図-6 設定した家屋群

これは、流量が小さい方が家屋前面の流速が小さく、また下流域ほど流れが分散することによって流速が減少し、堆積しやすくなったためと考えられる。

家屋群背面の堆積厚も、流量が小さい方が大きい値を示す。家屋群ごとに、上流と下流のどちらで堆積しているかを見ると、すべての群で家屋の上流側に堆積しており、基礎実験と同様の結果が得られた (図-8)。泥流対策として強固な家屋が築造されれば、家屋の上流側に土砂が堆積することが推測される。また、紙面の都合により詳細は省略するが、図-6の流入方向を変えた実験も行っており、家屋だけでなく、道路などにより氾濫形状が異なることが分かった。

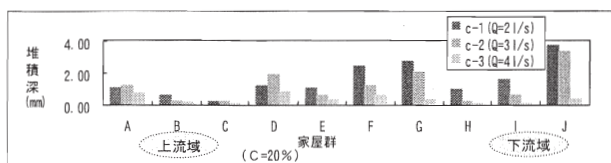


図-7 家屋群上流側堆積厚の流量による変化

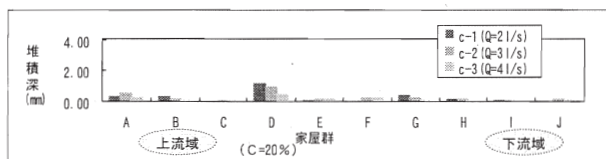


図-8 家屋群下流側堆積厚の流量による変化

### 2. 2. 3 まとめ

実際の家屋配置を例に模型実験を行ったが、2.1で行った基礎実験と同様、最上流部よりも中・下流側の家屋前面に土砂が堆積する事が分かった。泥流対策として強固な家屋が築造されていくと、このような氾濫特性を反映した氾濫シミュレーションが必要となる。

### 3. 泥流氾濫シミュレーションの精度向上

複雑な地形下での氾濫シミュレーション精度の向上を図るため、①地形の表現手法、②モデル内の差分式の改良、③土砂の堆積機構の検討の3点について検討を行った。

まず、複雑な地形を非構造格子モデルを用いて検討した。非構造格子モデルは、土石流などの土砂災害が発生するような地形変化の激しい山地部で用いられる例はまだ少ない。また、非構造格子のモデル形状の設定は、最近TINモデルなどコンピュータによる自動設定を可能とするソフト開発が進んでいるが、以下に示すような溪流の屈曲に沿うモデル形状を任意に設定するような場合には、やはり手動で行う必要がある。従来の格子型のメッシュの方が作業時間としては当然短い、非構造格子モデルの場合、時間では評価できない精度向上という利点があり、両者の長を考えたうえで用いていくことになる。非構造格子モデルによる地形データの読み取りを効率的に行うための手法も併せて提案する。

また、計算精度の課題としてモデル中の重力項（水面勾配）における計算方法があげられる。これは、従来の手法では隣接する格子メッシュの重心間の水面勾配を計算する方法をとってきたが、この場合計算結果がメッシュ形状に左右されたり、メッシュの境界辺がx軸やy軸と平行な場合に不具合を生じる場合があるため、水面勾配の計算方法に改良を加えた。

### 3. 1 計算の対象とする土石流の実験

ここでは、平成元年に土木研究所が行った土石流の堆積に関する実験をモデル対象に屈曲部の流れに関する検

討を行う。まず、実験による最終堆積状況を図-9に示す。

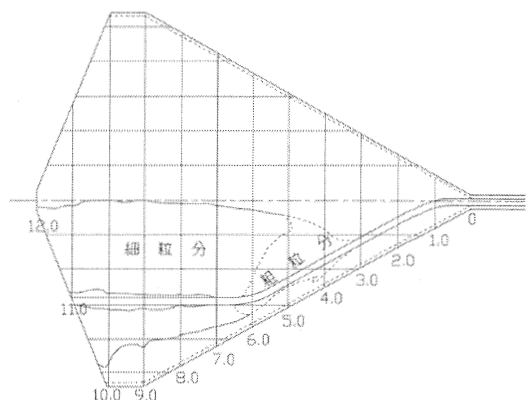


図-9 実験による最終堆積状況

実験の条件は以下のとおりである。扇状地の勾配は、扇頂部で10度とし、下流方向に測線ごとに1度ずつ勾配を減少させ、最下流部の勾配は0.5度とした。横断方向の形状は、一様に水平とした。流路部は、深さ10cm、幅20cmである。上流の水路部は全長14m、勾配は最上部が30度で順次緩くし、最下流で12度とした。流量は1.5l/s、土砂量は240l、給水時間は4分間である。報告書によると、土石流は測線4と5の間から氾濫し始め、その両側を2つに分かれ流下する。その後、かなりの堆積遡上をしながら測線3と4の中間付近を始点に、測線6付近（勾配4度）まで土砂が氾濫し、それより下流は土砂よりも流れの氾濫が主である。

### 3. 2 再現計算

#### 3. 2. 1 格子の形状と計算条件

ここでは、氾濫区域の地形を近似するモデルとして、構造格子と非構造格子の2種類を作成した。

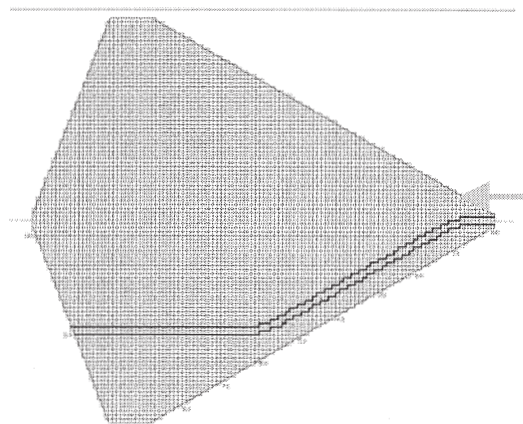


図-10 構造格子モデルの地形データ

対象氾濫域の構造格子および非構造格子の地形データを図-10、図-11に示す。構造格子モデルは、実験模型の縦横断面図をもとに5cmメッシュの格子データで作成した。

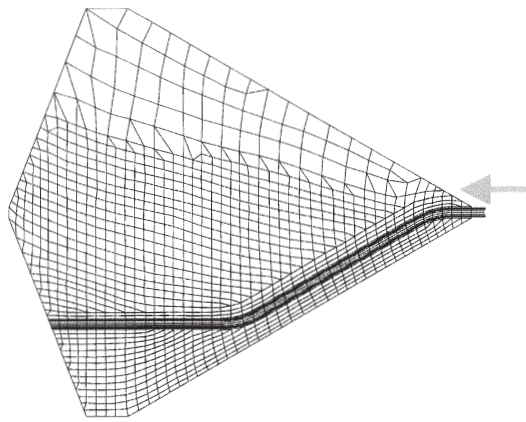


図-11 非構造格子モデルの地形データ

また、流路については、5cmメッシュで連続するように平面的に近似した。非構造格子モデルは、実験模型の縦横断面図をもとに多角形の集合体で作成した。特に、流水が集中し、地形変化の大きい流路近傍は細かく分割し、実験で氾濫の及ばなかったエリアについては大きく分割して多角形の格子を形成した。基礎式は以下のとおりである。

・運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_T} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T} \quad (2)$$

・流れ全体の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

・土砂の連続式

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial(cM)}{\partial x} + \frac{\partial(cN)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $M, N$ ；それぞれ $x, y$ 方向の流量フラックスで、 $M = vh, N = v_h$ 、 $u, v$ ；それぞれ $x, y$ 方向の平均流速、 $H$ ；水位で $H = h + z_0 + z_b$ 、 $z_0$ ；初期地盤高、 $z_b$ ；浸食あるいは堆積土砂厚、 $g$ ；重力加速度、 $\beta$ ；運動量補正係数 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ ；流れの流砂形態に応じた $x, y$ 方向のせん断応力、 $\rho_T$ ；流れにおける水と土砂粒子の混合物の密度、 $C_L$ は土砂濃度、 $i$ ；浸食あるいは堆積速度である。

構造格子モデルによる再現計算結果（最終堆積状況）を図-12に、非構造格子モデルによる計算結果（最終堆積状況）を図-13に示す。

### 3. 2. 2 計算結果

構造格子モデルでは、扇頂部の測線1の屈曲で氾濫が始

まり、さらに測線5付近でも氾濫が生じ、実験結果とは全く異なる中央部で大きな堆積が生じる結果となった。

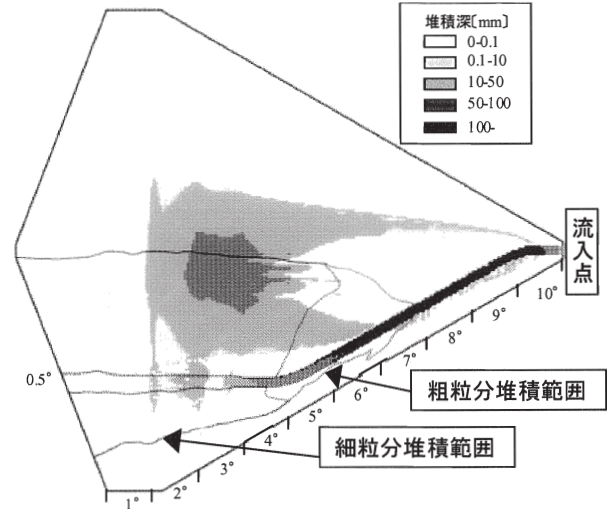


図-12 最終堆積状況（構造格子モデル）

これに対し、非構造格子モデルでは、泥流が流路沿いに流れ、氾濫も流路沿いに生じているなど、構造格子よりも再現性高くなっているが、測線1付近で氾濫が生じ、そのまま右岸側に氾濫が広がる傾向が見られ、再現性として課題が残る結果となった。

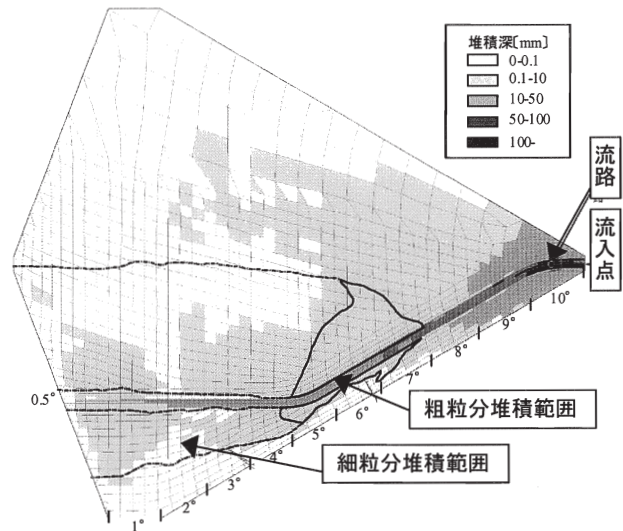


図-13 最終堆積状況（非構造格子モデル）

### 3. 3 重力項（水面勾配）計算法の修正

非構造格子モデルにおける隣接する格子間の流れに関して、重力項（動水勾配）に関する従来の計算方法では、隣接する格子の重心間の水面勾配を計算する方法をとっている。これにより、計算結果が格子形状に左右される場合や、格子の境界辺が $x$ 軸や $y$ 軸と平行な場合に不具合を生じることがある。ここでは、このような計算の不具合を改良する方法を考案して再現計算の精度向上を試みた。

### 3. 3. 1 従来の重力項（水面勾配）計算法と問題

従来の重力項（動水勾配）の計算方法を次に説明する。図-14に示すような隣接する2つの格子*i*、*j*を考える。格子間の境界の辺*L*において、流量フラックスを*x*方向、*y*方向別にそれぞれ*M<sub>L</sub>*、*N<sub>L</sub>*とすると、次の式で求められる。

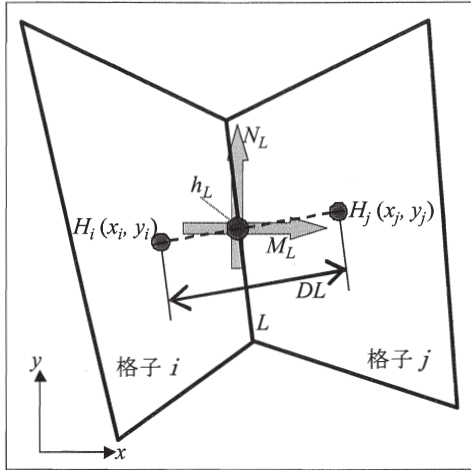


図-14 従来型の重力項計算方法（模式図）

$$\frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = g h_L^{n+1} (\nabla H)_x - T_x \quad (5)$$

$$\frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = g h_L^{n+1} (\nabla H)_y - T_y \quad (6)$$

このうち、重力項の中で*x*方向、*y*方向に $(\nabla H)_x$ 、 $(\nabla H)_y$ は次のとおり計算される。

$$(\nabla H)_x = \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{DL} \cdot \frac{x_j - x_i}{DL} \quad (7)$$

$$(\nabla H)_y = \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{DL} \cdot \frac{y_j - y_i}{DL} \quad (8)$$

ここに、*H<sub>i</sub>*、*H<sub>j</sub>*はメッシュ*i*、*j*での水位、(*x<sub>i</sub>*、*y<sub>i</sub>*)、(*x<sub>j</sub>*、*y<sub>j</sub>*)はメッシュ*i*と*j*の重心の座標、*DL*はメッシュ*i*と*j*の重心間の距離である。このとき、隣接する2つのメッシュの境界辺*L*が*x*軸に平行な場合、*y<sub>j</sub>* = *y<sub>i</sub>*となり、常に*y*方向の水面勾配 $(\nabla H)_y$ が0となり流量フラックス*N<sub>L</sub>*が0になるという問題がある。

### 3. 3. 2 重力項（水面勾配）計算法の改良

前節で説明した不具合を解消するための改良点を説明する。まず、図-15に示すような隣接する2つの格子*i*、*j*を考える。格子間境界の辺*L*の中央点 (*x<sub>m</sub>*、*y<sub>m</sub>*) での重力項を*x*方向、*y*方向別に次のように定義する。

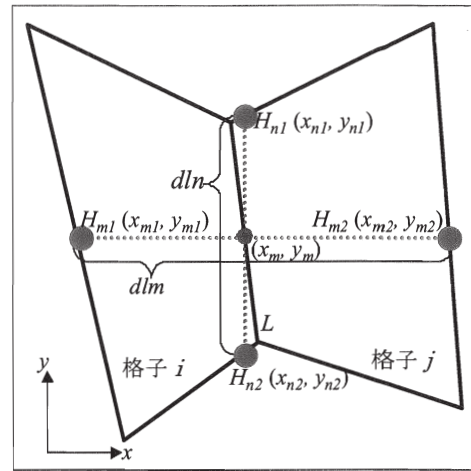


図-15 改良型の重力項計算方法（模式図）

$$(\nabla H)_x = \frac{H_{m1}^{n+1} - H_{m2}^{n+1}}{dlm} \quad (9)$$

$$(\nabla H)_y = \frac{H_{n1}^{n+1} - H_{n2}^{n+1}}{dln} \quad (10)$$

ここに、*dlm* = *x<sub>m1</sub>* - *x<sub>m2</sub>*、*dln* = *y<sub>n1</sub>* - *y<sub>n2</sub>* である。

従来の計算方法の場合、隣接する2つのメッシュの重心間における水面勾配を計算していたが、改良案では、メッシュ上の節点（ノード）、辺上の水位、河床高もメッシュ中心の標高から算出し、隣接する2つのメッシュ間における境界辺の中心点の*x*、*y*方向の水面勾配を計算することで重力項を計算する方法をとっている。

図-16において、直線 (m2-m1)、直線 (n2-n1) は各々の辺の中点を通り、*X*、*Y*軸に平行な直線である。また、点*m2* (*x<sub>m2</sub>*、*y<sub>m2</sub>*)、*m1* (*x<sub>m1</sub>*、*y<sub>m1</sub>*)、*n2* (*x<sub>n2</sub>*、*y<sub>n2</sub>*)、*n1* (*x<sub>n1</sub>*、*y<sub>n1</sub>*) の各点は格子の境界上の点である。

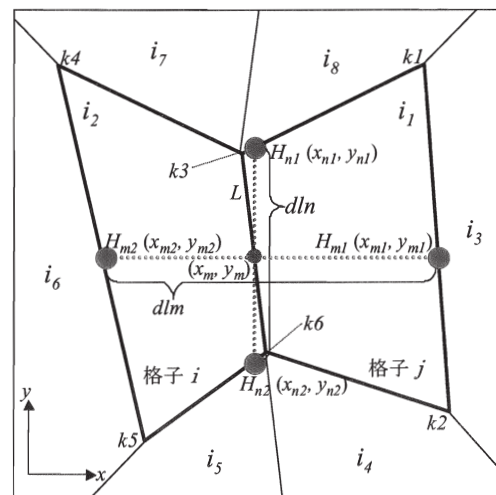


図-16 節点（ノード）、境界辺等の配置

隣接する格子境界上の節点を、図-16に示すようにk1～k6とする。このとき、例えばk3の水深  $h$ 、河床高  $z$ 、水位  $H$ を求めると、次のようになる。

$$h_{k3} = \left( \frac{h_{i7}}{d_{i7}} + \frac{h_{i2}}{d_{i2}} + \frac{h_{i1}}{d_{i1}} + \frac{h_{i8}}{d_{i8}} \right) / \left( \frac{1}{d_{i7}} + \frac{1}{d_{i2}} + \frac{1}{d_{i1}} + \frac{1}{d_{i8}} \right) \quad (11)$$

$$z_{k3} = \left( \frac{z_{i7}}{d_{i7}} + \frac{z_{i2}}{d_{i2}} + \frac{z_{i1}}{d_{i1}} + \frac{z_{i8}}{d_{i8}} \right) / \left( \frac{1}{d_{i7}} + \frac{1}{d_{i2}} + \frac{1}{d_{i1}} + \frac{1}{d_{i8}} \right) \quad (12)$$

$$H_{k3} = h_{k3} + z_{k3} \quad (13)$$

これにより、 $H_{n1}$ は $H_{k1}$ と $H_{k3}$ を内分することによって求められる。同様に、 $H_{n2}$ 、 $H_{m1}$ および $H_{m2}$ も両隣の節点を用い、内分により求めることができ、式(9)、(10)で示した水面勾配を計算し、式(5)、(6)における重力項を計算することができる。

### 3. 3. 3 計算結果と再現性の変化

平衡土砂濃度式を適用した場合の氾濫範囲の広がりを図-17に示す。

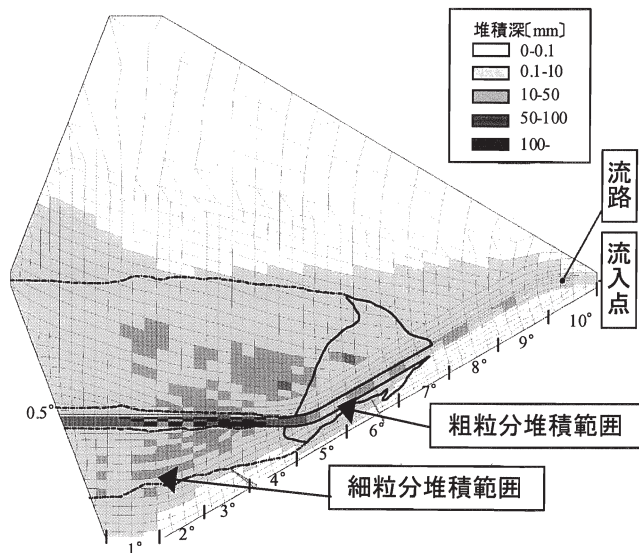


図-17 最終堆積状況 (平衡土砂濃度式の適用)

図-13に比べ、扇頂部の氾濫が抑えられ、屈曲した流路を土石流が流下し、測線3～4付近で氾濫が生じているなど、実験と同様な結果が得られ再現性が認められた。

### 3. 3. 4 堆積・侵食速度式を用いた計算との比較

これまでの計算は、平衡土砂濃度式を適用して、河床変動を流砂量収支で求めていく手法で行ってきた。これに対し、堆積現象の非平衡性を考慮して提案されている堆積・侵食速度式を用いた計算法がある。ここでは、堆積・侵食速度式による計算も行い、上記計算結果を比較した。

このときの連続式は以下のとおりで、 $i$ は侵食あるいは堆積速度である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i \quad (14)$$

・侵食のとき

$$i = \delta \frac{C_{\infty} - C}{C_{*} - C_{\infty}} \cdot |u| \quad (15)$$

・堆積のとき

$$i = \delta' \frac{C_{\infty} - C}{C_{*}} \cdot |u| \quad (16)$$

とした。ここで、 $\delta$ 、 $\delta'$ は定数であり、0.01～0.001の値が過去の事例で扱われている。 $C_{*}$ は堆積層の容積濃度、 $C$ は粗粒子の容積濃度、 $C_{\infty}$ は平衡土砂濃度。

計算結果を図-18に示す。

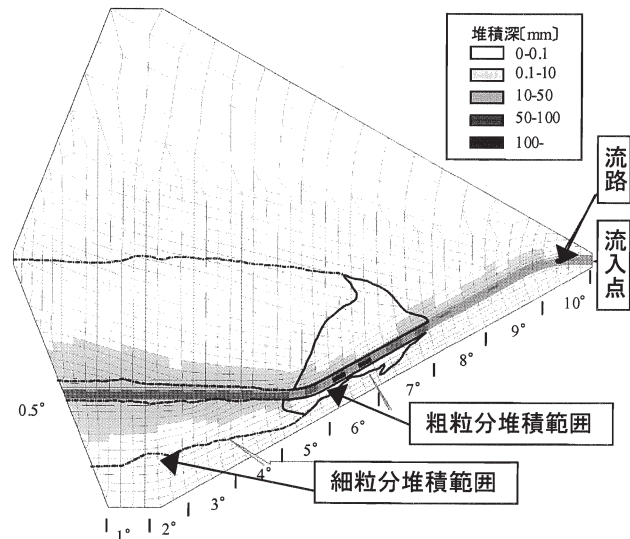


図-18 最終堆積状況 (堆積速度式の適用)

堆積速度係数 $\delta$ が大きいと上流部で氾濫してしまうが、 $\delta$ が小さいと氾濫ポイントが下流部に移動するが、再現性はよくなかった。

今回の結果によると、土砂濃度式を用いた計算のほうが適用性が高い結果となった。紙面の関係で省略するが、平成4年8月の雲仙普賢岳で発生した土石流の計算でも同様の結果となっている。なお、堆積・侵食の現象を表現するこれらの式については、氾濫計算を行う際に十分に適用性を検討する必要がある。

### 3. 3. 5 複雑な氾濫域の形状を考慮した泥流氾濫シミュレーションプログラムの提案

以上の検討結果により、非構造格子モデルと重力項(動水勾配)の計算法を改良した氾濫シミュレーションプログラムを作成した。これを用いて、他の溪流についても同様の氾濫シミュレーションを行い、適用性を確認した(図-19)。

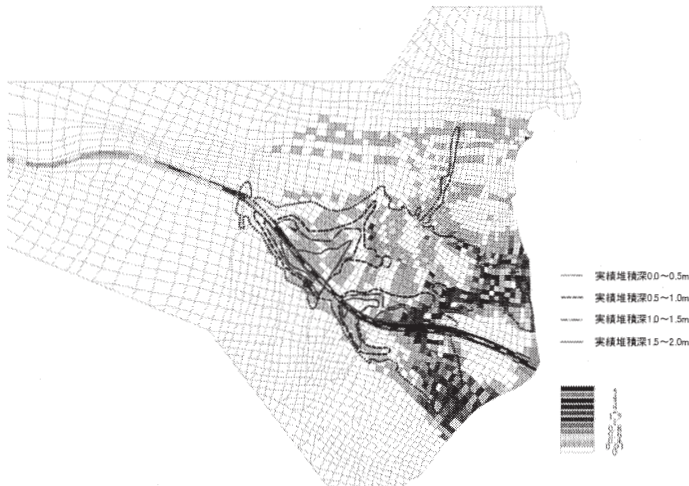


図-19 最終堆積状況（雲仙水無川）

### 3. 4 非構造格子モデルの設定方法について

計算に必要な地形データは、従来構造格子モデルで設定されてきたが、計算精度向上のため上述のような非構造格子モデルが効果的であることがわかった。このうち、非構造格子モデルについては、自動的に設定するソフトが市販されてきているものの、これらは対象範囲を全て一定の幾何学的なルールに基づいて同じ要領で自動設定するために、計算にとって重要となる範囲に限って利用者の意向に沿った設定を自動的に行うというような弾力性に欠け、実用段階にまでは至っていない。このような状況から、非構造格子モデルを設定する場合の留意点を以下のようにとりまとめた。今後は、これらを基に自動設定できるようなプログラム開発をすれば、更なる省力化が図られることになる。今回とりまとめた土石流氾濫計算のための非構造格子モデル設定の留意点は、以下のとおりである。

#### 3. 4. 1 格子形状

格子形状は、多角形であれば計算は成立するが、流れの表現という点からは三角形あるいは四角形で表現するのが望ましい。端部は、五角形でもやむを得ない。代表的な格子形状を図-20に示す。

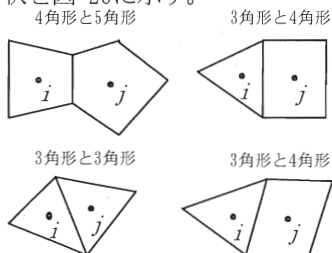


図-20 代表的な格子形状

#### 3. 4. 2 モデルの隣接条件

二つの格子は、一辺（リンク）を介して隣り合うことが必要である。言い換えると、隣り合う格子は、互いに

同一の一辺を共有することが必要で、一辺で2個以上の格子と隣り合う場合や境界の格子でないにもかかわらず一辺で隣り合う格子がないといったことがないように設定する（図-21）。

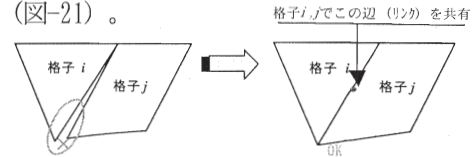


図-21 隣接条件

#### 3. 4. 3 流路

屈曲部の表現に影響する地形は、流路である。従来の構造格子モデルでは、現地の流路形状を表現していなかった。このため、流路幅を $B$ とすると、流路部の横断方向の格子幅は $1B \sim 1/5B$ 程度に設定することが望ましい。ただし、細かくすると計算の安定性が生じやすくなり、大きくすると屈曲部が表現できなくなるので、注意が必要である。今回の検討では、流路部の格子幅は、土石流の最大流動深より大きい方が計算の安定上望ましいことが明らかとなった。

流下方向の格子の長さ是可以だけ等間隔で、流路幅 $B$ の $1 \sim 5$ 倍程度とし、屈曲部では流路幅とするのが望ましい。流路の表現方法を図-22に示す。

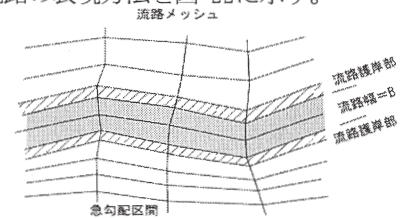


図-22 流路の表現方法

#### 3. 4. 4 道路

土石流の氾濫計算に影響を与える要素に道路がある。流路同様、従来の構造格子モデルで表現が難しかったものである。流路から土石流が氾濫した場合、道路上を流下することが多い。このため、道路線形に合う形で非構造格子を連続的に設定する。格子幅は、道路幅に合わせる。道路等の格子切りのイメージを図-23に示す。

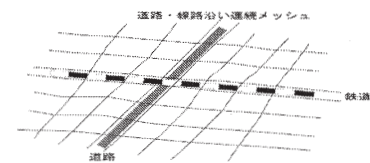


図-23 道路等の格子切りのイメージ

#### 3. 4. 5 盛土および構造物

盛土地形、比較的大きな構造物及び水田や畑などの平坦地形がある場合、その形状を近似して設定する。格子幅は現地に合わせることになるが、後述するように隣接の格子幅と極端に変化することのないように留意する。構造物、水田等の格子切りのイメージを図-24に示す。



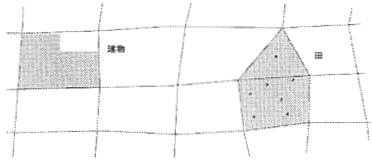


図-24 構造物、水田等の格子切りのイメージ

### 3. 4. 6 地形勾配を考慮した設計

その他、例えば平坦地形については、その平坦な地形のまとまりを表現できるようにするなど、計算に影響を与える地形勾配の変化に注意した設定が必要になる。

### 3. 4. 7 その他留意点

#### i) 格子の大きさ

格子の大きさは効率化を図るため、溪流及び溪流付近の住宅地は細かく設定し、これらから離れた区域については粗い設定とする。

#### ii) 格子の大きさの変化

計算の安定性から、隣接する格子の長さの変化は、概ね2倍以内とする。ただし、氾濫しないことが明らかな区域については当然大きくして良い(図-25)。

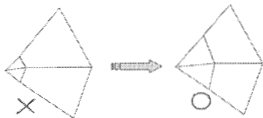


図-25 格子の大きさの変化についての留意

#### iii) 隣接する格子の方向

格子間を出入りする辺(リンク)上の流れの計算を安定させるため、格子はできるだけ直交するよう設定する。

ちなみに、今回計算した雲仙水無川土石流災害のケースの場合、上記の各要素の平均的な格子幅は、以下のよう

に設定した。  
流路幅：6~14m、道路：8~14m、溪流付近の住宅地：15~25m、溪流から離れた区域：50~80m

## 4. GISを活用した泥流ハザードマップ作成の提案

泥流の氾濫計算は、①地形モデル作成、②氾濫計算、③計算結果の図面展開(堆積深等のマッピング)という3つの工程によってハザードマップの作成を行うことになる。これらを効率的に実施するためにGISの活用について検討を行った。

①は、標高データの入った地図から、格子の標高を読み取ることになるが、今回の研究により屈曲部などの複雑な地形での氾濫計算では非構造格子による地形モデルがより精度の向上につながる事が明らかとなった。今回、前述のとおり屈曲部や河道などの一部の区間を細かく細分したり、地形に沿うような格子の設定は、市販のソフトがないため現状では手作業で行わざるを得ない状

況にあるが、GIS上で自動的に格子を設定し、地形図を見ながら確認ができるようになれば、非構造格子の設定作業がより効率的になる。今回、屈曲地形を有する地域での非構造格子の設定ルール(アルゴリズム)を示すことができた。これに基づく自動設定ソフトの構築には相応の予算を伴うためソフト開発は行わなかったが、設定ルールを示せたのでGISによる非構造格子設定化が実質行えたと考えている。

②は、この非構造格子モデル等を用いて泥流の氾濫を計算させていくものである。今回の水理模型実験を対象にした計算の場合、格子数が約1,400個で、一般のパソコンで約2時間の計算時間を要した。仮に格子数が10,000個の場合、計算時間は15時間程度になると想定される。この計算部分については、特段GIS上で行う必要はなく、できるだけ早い計算環境をつくり計算が行われればよい。

③は、計算結果をハザードマップとして作成するものである。通常は描画ツールを使って計算結果を作画しているのが実態であるが、表示する堆積深の表示区分や色分けに応じてツールの設定やプログラムの書き換えが発生して一定の技術が要求される。このため、計算結果を自動的にGIS画面に表示して、地形図との比較、確認を行ったり、地形図を見ながら氾濫範囲の修正等も可能にするような機能を有していることが望まれる。今回、計算結果をGISの持つ機能のうち、Web上に表示するソフトを構築した。これにより、インターネットを介することによって、多数の人がハザードマップを同時に閲覧することも可能となり、重要な防災情報を共有することができるようになった。

GIS上で氾濫図を表示したイメージを図-26に示す。

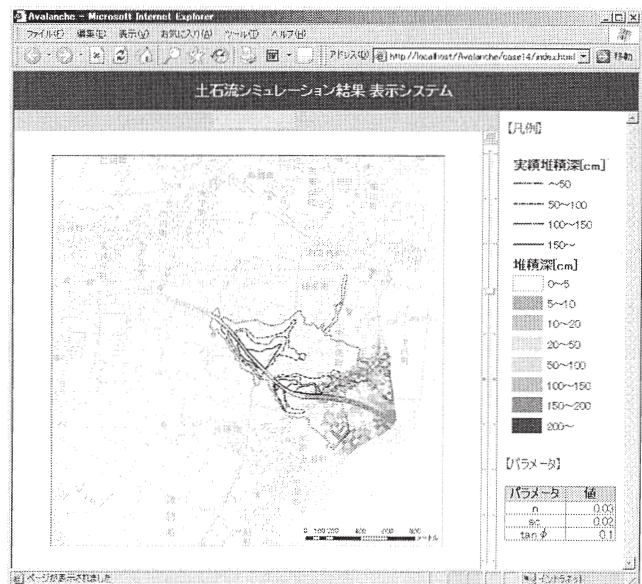


図-26 GIS上で氾濫図を表示したイメージ

## 5. 泥流氾濫シミュレーションを用いた対策施設計画手法の提案

本研究において非構造格子モデルによる泥流氾濫計算手法を提案した。氾濫域である扇状地に泥流規模に近い疎通能力の流路が形成されている場合、構造格子モデルでは流路の形状の表現が難しく実際には流路沿いに流下する泥流が流路に入った直後に氾濫するという問題があった。このため、扇状地部に導流堤や溪流保全工などを計画し、その効果を計算で確認する場合には、非構造格子モデルによる計算が適切な手法となり得る。また、土砂災害は橋脚部で閉塞を起し、そこから氾濫が発生することが多い。このようなケースに対しても非構造格子モデルにより橋脚区間の地形条件を適切に表現して、疎通能力の減少や閉塞現象を説明することが可能となり、かつ、その対策施設の効果の確認などに寄与するものと思われる。一方、構造格子モデルは、格子モデル作成において規則正しく地形標高データを抽出すればよいので非構造格子モデルよりかなり容易であり、氾濫域に流路や大規模構造物がない場合であっても泥流規模に対して小規模な場合は迅速性、利便性の観点からは非構造格子モデルより適している。

表-2 非構造格子モデルを用いた氾濫シミュレーションによる対策施設計画手法

非構造格子モデル	構造格子モデル
1. 扇状地において流路の形状を構造格子モデルより適切に表現でき、屈曲した溪流保全工や導流堤、流れに対し不規則に配置された遊砂地の効果検討を数値計算により行える。 2. 橋脚等の閉塞による道路幅の減少や閉塞状況を表現したり、さらにはその拡幅効果なども計算により確認することが可能になるものと期待できる。 3. 溪流保全工内での堆積分布を横断的に表現することができ、保全工内部の土砂の移動などの検討も可能となることが期待できる。	1. 溪流規模の小さい氾濫域や泥流規模に比較して氾濫域の流路、構造物が小さい場合に適用可能である。 2. 流れに対し対策施設が比較的垂直、又は平行方向に配置される場合に適用可能である。 3. 格子データ作成が非構造格子モデルよりかなり容易であるので、施設設置の概略検討に適用できる。但し、平面形状が複雑な流路等に適用することは格子幅を小さくしても困難な面がある。

## 6. おわりに

泥流氾濫域の都市化による人工構造物や複雑な地形の氾濫範囲への影響を考慮した氾濫範囲推定の精度向上について検討を行った。

1) 家屋密集地における土砂堆積特性に関する検討では、家屋がない場合に比べ、家屋があると堆積厚が増大し勾配が5°前後の地形では下流側で堆積厚が大きく、横断方向では中央部においてやや大きくなる傾向が確認された。個々の家屋単位では、最も上流側の家屋は下流側に、それより下流側の家屋では逆に上流側に厚く堆積する傾向が確認された。

2) 従来の構造格子モデルから非構造格子モデルを用いるとともに、氾濫計算モデルの重力項の計算法を改良し、泥流氾濫シミュレーションの精度向上を図った。

3) 屈曲地形を有する地域での非構造格子の設定ルール（アルゴリズム）を示し、GISによる非構造格子設定化手法を導いた。また、この非構造格子により流路を的確に表現し、保全工等の効果や施設による氾濫への影響について評価する手法を提案した。

以上、1)、2)により、泥流氾濫・堆積機構をモデル化することができた。3)により、GISを活用した泥流ハザードマップ作成手法および泥流氾濫シミュレーションを活用した対策施設の計画手法を提案した。

## 引用文献

- 福岡捷二・川島幹男ら：「密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究」、土木学会論文集、No600/II-44、PP. 23-36、1998
- 中川一：「洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究」、京都大学博士論文、1989
- 水山高久・石川芳治ら：「火山噴火に伴う泥流災害の予測と対策に関する研究」、土木研究所資料、2601、1988
- 中川一・高橋保ら：「1999年ベネズエラのカムリグランド流域で発生した土砂災害について-数値シミュレーションによる再現計算と砂防施設設置効果の評価-」、京都大学防災研究所年報、第44号B-2、PP. 207-228、2001
- 中川一・高橋保・里深好文・立川康人・市川温・吉田義則・中村行雄：「平成9年度鹿児島県出水市針原川で発生した土石流災害について」、京都大学防災研究所年報、第41号B-2、PP. 287-298、1998
- 川池健司・井上和也・戸田圭一・中川一・中井勉：「急傾斜都市における土砂・氾濫災害の解析」、京都大学防災研究所年報、第43号B-2、PP. 333-343、2000
- 仲野公章：「住宅密集区域での土砂氾濫シミュレーション手法」、平成13年度 砂防学会概要集
- 武田ら：「非構造格子を用いた氾濫解析に関する一考察」、水工学論文集、第17巻、2003年2月、pp. 895~900
- 水山ら：「土石流氾濫シミュレーションと模型実験による土石流災害の再現」、新砂防、Vol. 40、No. 3 (152)、昭62。