

特集 3

GIS上のデータベース と連動した 数値シミュレーション システムの開発

梶木 敏仁

はしのき としひろ

(財)砂防・地すべり技術センター 総合防災部 技術課長

1 はじめに

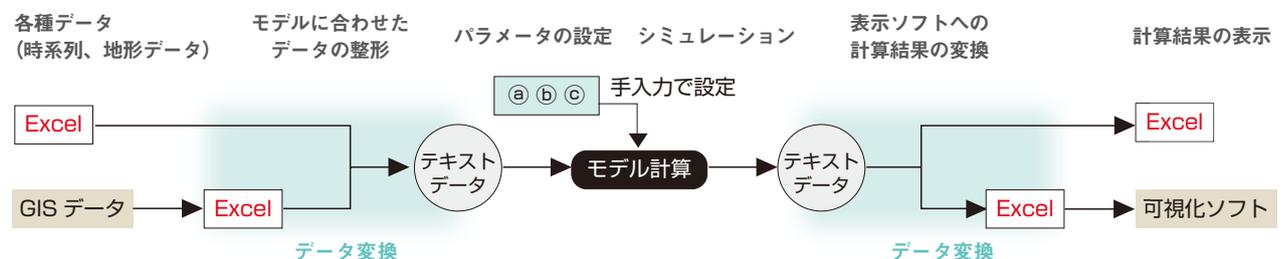
我が国には108の活火山が存在しており、そのうち、29火山において火山噴火緊急減災対策砂防計画を策定する予定となっている。これまでに、この29火山では火山学及び土砂水理学を踏まえた数値シミュレーションをベースとした火山災害予想区域図が作成されている。これまでに作成された火山災害予想区域図は、ある条件下(例えば、地形、流出土砂量、流量など)における災害予想区域である。火砕流等の堆積による地形変化や想定以外の位置から噴火した場合などでは計算条件を変更して新たに数値シミュレーションを実施し、災害予想区域図を早急に作成する必要がある。このように状況の変化に対応して、その条件を取り込んだ予測結果を迅速に示すことにより、防災・減災対策に結びつけるものがリアルタイムハザードマップである(安養寺、2008)。リアルタイムハザードマップを素早く作成するためには、状況の変化に対応した条件を如何に迅速に設定できるかがポイントである。

地形データについては、近年レーザープロファイラや人工衛星(例えば、だいち)による地形データ取得が行われるようになり、10数年前と比較すると地形データの取得に要する時間は格段に短縮されてきており、デジタルデータとして取得されている。

地形データの他に、状況の変化に対応する条件としては、ハイドログラフ及び土砂量がある。融雪型火山泥流

図-1 GIS連動イメージ

従来の手順



GIS 連動イメージ

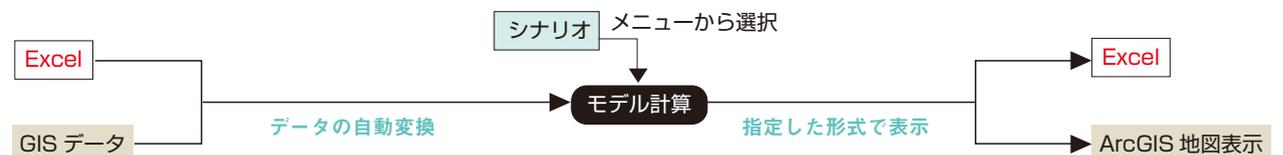
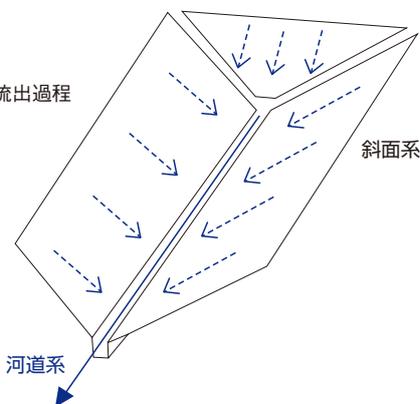


表1 流出解析に必要なデータとArcGISとの連動を図る場合の留意点

		通常降雨を対象とした流出解析	火山灰が堆積している状況下の降雨を対象とした流出解析	融雪型火山泥流を対象とした流出解析
地形条件 (モデル地形の作成)		一次元のKinematicWave法による流出解析計算では、斜面から河道への流出過程(斜面系)と河道沿いの洪水の流出過程(河道系)とに分けて計算するため、河道系の地形データ、並びに斜面系の地形データが必要になる。 ○河道系データ(連続する河道の地形条件を複数の断面データで表現) →断面区間距離、河床標高、川幅、側岸勾配、等 ○斜面系データ(河道に接続する斜面を台形近似で表現) →流入断面番号(下流側)、流入断面番号(上流側)、単元斜面流域面積、流路長、高低差、下端幅、上端幅、等		
	降雨条件	・面的に把握された降雨波形(ハイドログラフ) →等雨量線図、ティーセン分割法等により面的に推定(複数の点情報を面情報へ変換)		——
	降灰条件	——	・面的に把握された降灰厚分布データ →等降灰厚線図等により面的に推定(複数の点情報を面情報へ変換)	——
融雪条件	——	——	・融雪範囲(火砕流堆積、到達範囲等) ・面的に把握された積雪厚分布データ(複数の点情報を面情報へ変換)	
計算条件 (計算パラメータ、河道特性、斜面特性等)	一次元のKinematicWave法による流出解析計算では、以下の計算条件(パラメータ等)を設定することが必要である。 ①対象とする流出現象(土石流、泥流、等)に関する条件 清水の密度(ρ)、土粒子の密度(σ)、粗粒分の平均粒径(dm)、河道堆積層の土粒子容積濃度、土粒子の内部摩擦角、河道再堆積時の堆積層の粗粒分土粒子容積濃度、土石流発生タイミング等 ②河道系に関する条件(河道特性) 粗度係数、許容洗掘深(m)又は河床不安定土砂量(m^3) ③斜面系に関する条件(斜面特性) 等価粗度係数、飽和透水係数(m/s)、中間層厚(m)、斜面崩壊可能厚(m)又は斜面不安定土砂量(m^3)、雨量の表面流出率、斜面中間層の空隙率、等			



のハイドログラフや降灰後の土石流ハイドログラフは融雪量や降雨量、土砂量、斜面長や透水係数などの斜面諸元、流路勾配、流下中の堆積・侵食などに依存していると考えられる(例えば、柙木、1995、嶋、2003)。このような流出過程を解析するために、流域を河道網と各河道に接続する斜面群としてモデル化する手法が多く提案されており(高濱、2004)、その流出解析手法の1つとしてKinematicWave法がある。KinematicWave法を用いることで地形や融雪量等を分布型のデータとして捉えることが可能となり、より現地状況を反映させ

たハイドログラフを作成することが可能となる。しかし、KinematicWave法では数値シミュレーションの対象範囲が大きいほど膨大な斜面数、河道数を設定し、それぞれ関係づけることが必要となる。このような多量のデータを扱うにはGISを使用することが有効である。本研究では火山噴火に対する緊急時の対策としてSTCが行う数値シミュレーションを、できるだけ短時間で効率的に行える環境を整備することを目的し、そのためにGIS上で一貫した操作により数値シミュレーションを行うための下記に示す種々のプログラムの1つとしてGIS

ArcGISとの連動を図る場合の留意点	
	<p>地形データ作成にはArcGIS固有機能である水文学に特化した関数群、流向(Flow Direction)、累積流量(Flow Accumulation)、流域界(Watershed)、河道生成(Stream Line)地形平滑化(Sink)、等の利用が前提である。この機能を利用すれば、これまで多大な時間と労力を費やしたモデル地形(河道・斜面データ)の作成が短時間で効率的に行え、大幅な労力削減が期待できる。</p> <p>しかしながら、作成するモデル地形は、作成の基になる数値標高データの精度、流出解析の精度、ユーザー(砂防技術者)が求めるモデルの精度により様々な形が予想される。</p> <p>よって、実際にArcGISで地形データを作成する過程においては、作業内容を段階的に確定しながら、途中段階(確認・修正段階)のデータの任意選択、全削除、任意削除、復元、統合、分割、再計算、再表示等の機能を有する必要がある。</p>
	<p>ArcGISの基本機能(Special Analyst)を利用すれば、容易にモデル地形で作成した単元斜面毎に降雨条件を設定することができる。</p> <p>ただし、ArcGIS上で基本となる複数の点情報を面情報へ変換・展開させる作業が必要となる。</p>
	<p>ArcGISの基本機能(Special Analyst)を利用すれば、容易にモデル地形で作成した単元斜面毎に降灰厚・降灰量等を設定することができる。</p> <p>ただし、ArcGIS上で基本となる複数の点情報を面情報へ変換・展開させる作業が必要となる。</p>
	<p>ArcGISの基本機能(Special Analyst)を利用すれば、容易にモデル地形で作成した単元斜面毎に融雪の有無、積雪厚・積雪量等を設定することができる他、若干の計算を付加すれば融雪水量を設定可能である。</p> <p>ただし、ArcGIS上で基本となる複数の点情報を面情報へ変換・展開させる作業が必要となる。</p>
	<p>①はArcGIS連動の観点からはあまり関係がない。</p> <p>②は、モデル地形で作成した断面毎に属性を付与する形で容易にArcGIS上での整理が可能である。</p> <p>③は、モデル地形で作成した単元斜面毎に属性を付与する形で容易にArcGIS上での整理が可能である。</p>

と連動したハイドログラフ作成プログラムを開発した。
なお、使用するGISソフトはArcGIS Ver.9.1とした。

2

流出解析とGISとの連動の基本方針

表1には既往研究やこれまで当センターが実施した流出解析に関する検討報告書等をもとに、土石流および、融雪型火山泥流について、解析モデルと必要なデータ、その形式及びArcGISとの連動を図る際の留意点について

を示す。

降雨による土石流、泥流と融雪型火山泥流を対象とした流出解析とArcGIS上の地形データとの連動に関する基本方針は以下の通りとした。

具体的なプログラム作成に際しては、ArcGIS上の一連の操作で、①流出解析のためのモデル地形データの作成・確認・修正、②初期条件としての降雨条件、積雪や降灰の分布・特性の設定・確認・修正、③計算条件としての斜面・河道特性(等価粗度、侵食可能深など)の設定・確認・修正、④流出解析計算、⑤計算結果の表示・出力が可能となるように留意した。またArcGISで表現されるまたは入力されている地形データをKinematicWave法にどのように取り込むか、取り込む際にはどこまで自動化するか等についても検討した。

①モデル地形データ作成

KinematicWave法を用いた一次元の流出解析では、地形は大きく斜面と河道に分けられる。そこで、**図2**に示すようにGIS画面上で河道と斜面境界を設定し、その結果をもとに下記に示す流出解析に必要な地形データの自動生成を検討する。

○河道系データ(連続する河道の地形条件を複数の断面データで表現)

→断面区間距離、河床標高、川幅、側岸勾配、等

○斜面系データ(河道に接続する斜面を台形近似で表現)

→流入断面番号(下流側)、流入断面番号(上流側)、単元斜面流域面積、流路長、高低差、下端幅、上端幅、等

なお、実際にArcGISで地形データを作成する過程においては、作業内容を段階的に確定しながら、途中段階(確認・修正段階)のデータの任意選択、全削除、任意削除、復元、統合、分割、再計算、再表示等が可能になるようにする。

②初期条件の設定(降雨、降灰、積雪等)

初期条件としての降雨特性・特性(ハイエトグラフなど)、降灰分布・特性(降灰深、火山灰の粒度組成・密度など)、積雪分布・特性(積雪深、雪密度など)に関するデータは、ArcGISの基本機能(Special Analyst)を利用すれば、容易に①で作成した単元斜面毎に初期条件を設定することが可能である(単元斜面毎に属性付与が可能)。

③計算条件の設定(計算パラメータ、河道特性、斜面特性)

計算条件として、計算パラメータ、河道特性・斜面特

図2 モデル地形のイメージ

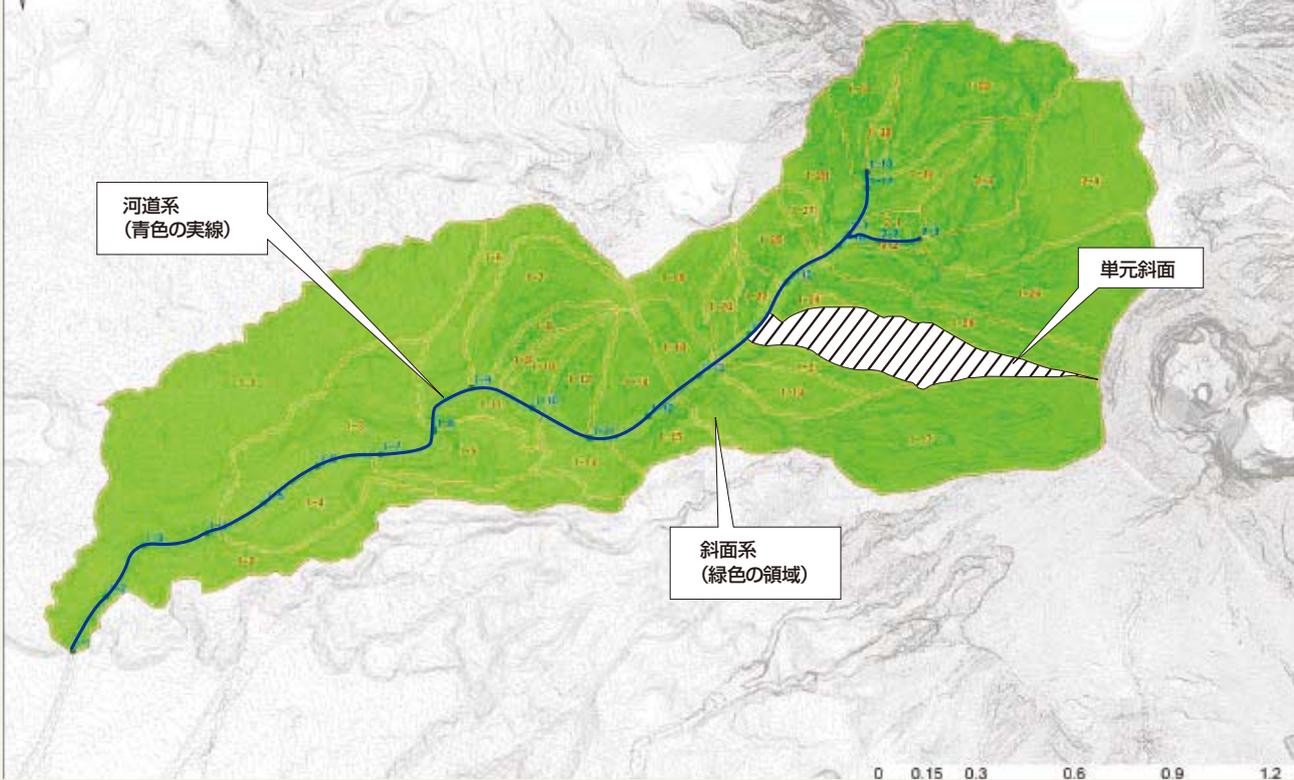
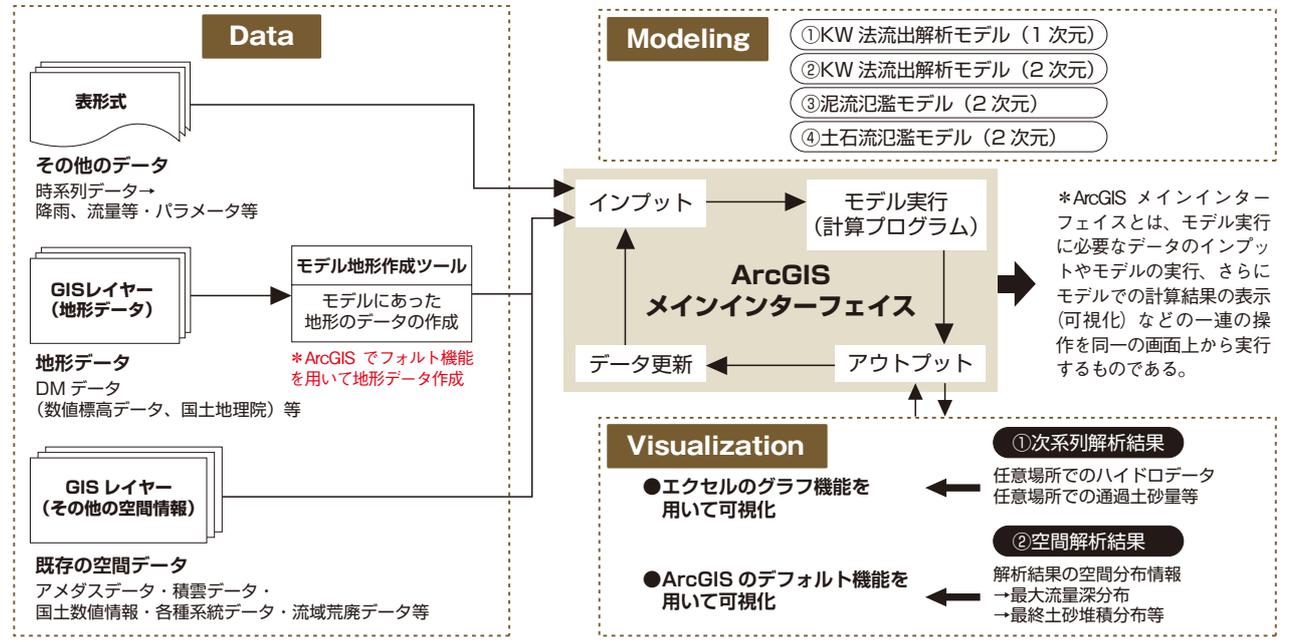


図3 ArcGISメインシステム(インターフェイス)のイメージ



性に関するデータ設定が必要となる。モデル地形で作成した断面毎、並びに単元斜面毎に属性を付与する形で容易にArcGIS上での整理が可能である。

④流出解析プログラム

流出解析プログラムはVisual BASICで作成する。①～③で作成・設定した計算データを直接入力条件とし

て、GISと連動して一連の操作で流出解析計算の実行できるようにする。

⑤計算結果の表示・出力

KinematicWave法を用いた一次元の流出解析計算結果の表示・出力は、Excelをベースに構築する。

3

流出解析のアルゴリズム及びプログラムの作成

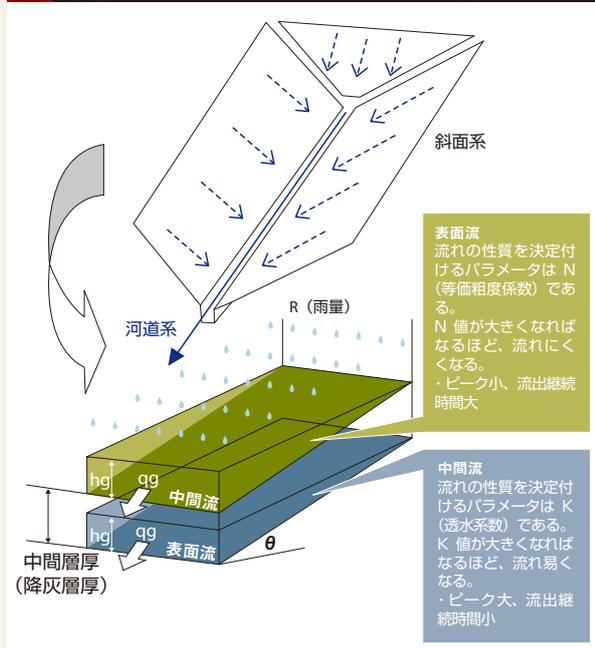
3 -1 KinematicWave法による一次元流出解析プログラムの作成

ArcGIS上で稼働するKinematicWave法のアルゴリズム及びプログラムを作成した。流出解析に用いるプログラム言語はArcGISとの親和性を考慮してVisual Basicとした。

なお、流出解析は解析に必要な諸元の算出で抽出された「Kadou.csv, Slope.csv」のデータをインポートして実施することにした。

一次元のKinematicWave法による流出解析計算では、斜面から河道への流出過程(斜面系)と河道沿いの洪水の流出過程(河道系)とに分け、さらに斜面系では表面流と浸透流(二次流出)に分けてそれぞれ次に示す方程式を用いて計算が行われる。

図4 斜面系でのkinematic Wave法による流出解析のイメージ



①斜面系

〈表面流の連続式〉

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r_e$$

〈表面流の運動方程式〉

$$h_s = kq_s^p$$

ここに、hs:水深、qs:斜面単位幅流量、re:有効降雨

強度(融雪型火山泥流では融雪水の供給速度)、k, p: 流れの抵抗に関する定数、x: 流下方向の距離である。

表面流の運動がManning則で近似されると仮定すると、k 及びp は次式で表される。

浸透水の二次流出については、地中に浸透した雨水が地中流として流下して河道へ流出すると考え、地下水流動の運動方程式としてダルシー則を用いる。ただし、融雪型火山泥流の二次流出は考慮しない。

〈浸透流の運動方程式〉

$$k = \left[\frac{N}{\sqrt{i}} \right]^p, \quad p = \frac{3}{5}$$

〈浸透流の連続式〉

$$\frac{\partial h_g}{\partial t} + \frac{\partial q_g}{\partial x} = \alpha r$$

N: 等価粗度係数、i: 斜面勾配、hg: 地下水深、qg: 浸透流の単位幅流量、K: ダルシーの透水係数である。また、αは雨水の地中への浸透率であり、雨量強度rと有効雨量強度reの関係により

$$r_e = (1 - \alpha) r$$

で定義することとする。

②河道系

河道における連続式および運動方程式は、図5に示したモデルを用いた場合は次式で表せる(高橋ら、1986)。

〈連続式〉

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i + r$$

〈運動方程式〉

$$\frac{q^2}{h^2 C^2 R^{2p}} = \sin \theta$$

ここに、h: 流動深、q: 単位幅流量、R: 径深、C: 係数、p: 定数(Chey型の抵抗則の場合p=1/2、ダイラント型抵抗則の場合p=3/2)、i: 侵食(正)・堆積速度(負)、r: 流路の単位長さ当たりの横流入量である。

また、運動方程式に一般的なマニング則を適用した場合は、

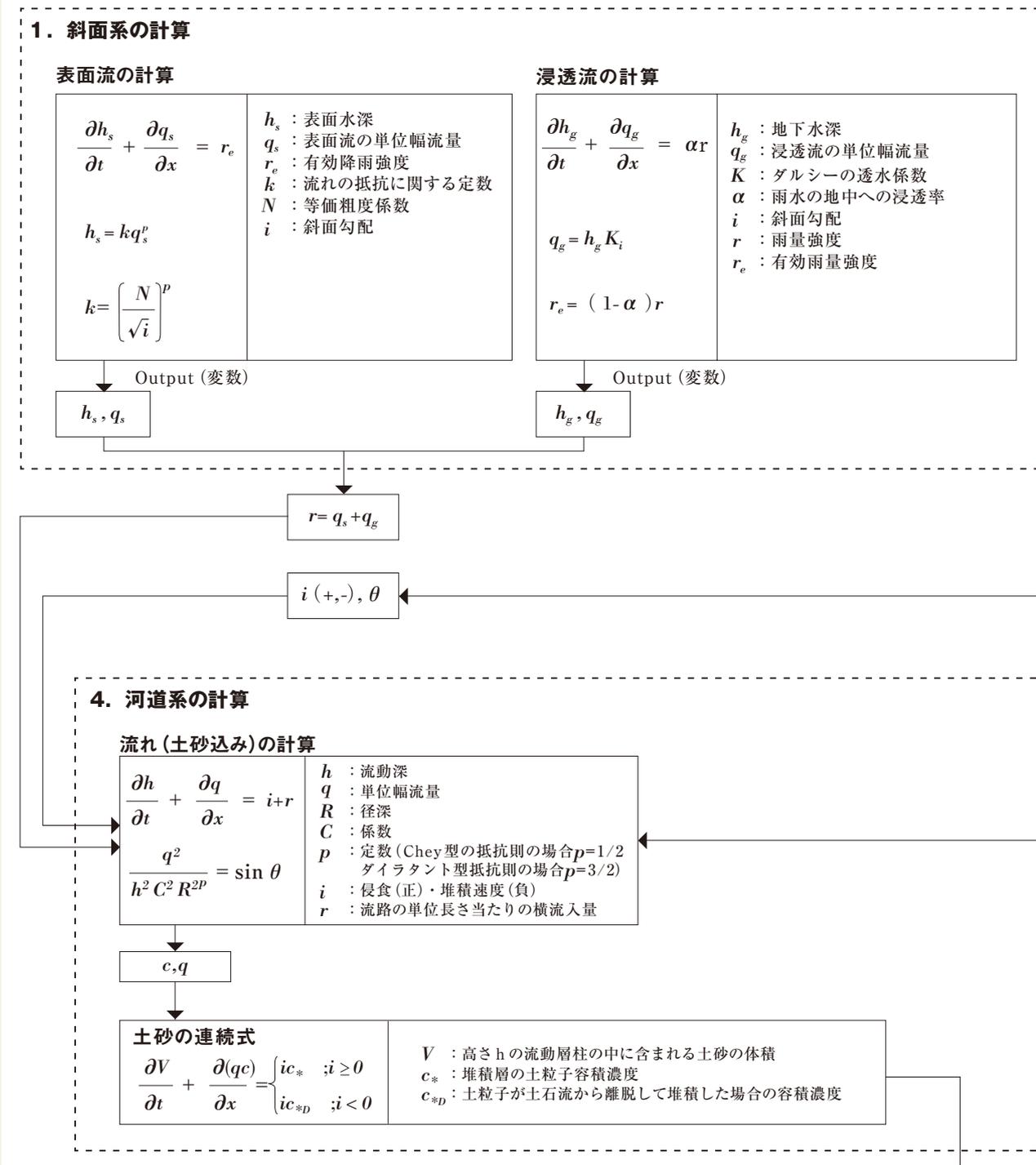
$$\frac{n^2 q^2}{h^2 R^{4/3}} = \sin \theta$$

となる。ここに、nはマニング粗度係数である。

③斜面侵食・河床変動

斜面侵食や河床変動による土石流・泥流の発生・発達過程については、図5のモデル(高橋ら、1986)を基本とした。

図5 河床変動をとりいれたKinematic Wave法計算フロー



**3 - 2 ArcGISによる
モデル地形作成ツールの作成**

KinematicWave法の流出解析で用いる地形データの取り込みのため、ArcGISを利用したシステム並びにプログラムを作成した。
本システムの操作手順は、大きく分けると、河道デー

タ作成、斜面データ作成、断面データ作成、数値シミュレーションに使用する諸元の算出である。本システムの手順フローを図6に示す。

2. 侵食・堆積速度の計算 (侵食・堆積速度能力の計算)

$i(+)=\alpha \frac{c_{\infty}-c}{c_{*}-c_{\infty}} \times \frac{q}{d_m}$	$i(-)=\beta \frac{c_{\infty}-c}{c_{*D}} \times \frac{q}{d_m}$
$c_{\infty}=\frac{p \tan \theta}{(\sigma-p)(\tan \Phi-\tan \theta)}$	

i : 侵食速度(+), 堆積速度(-) c : 流動中の土砂濃度
 c_{∞} : 勾配 θ の元で侵食も堆積も生じずに流れることのできる最大土砂濃度
 $\langle i=0$ となる $c \rangle$
 c_{*D} : 流動物が停止した時の容積濃度 d_m : 堆積層の代表粒径
 q : 単位幅流量

Output (変数)
 $i(+,-), c, q$

3. 河床変動 (i規制)

$\frac{\partial D}{\partial t} + i = 0$	D : 堆積層の厚さ θ_0 : 堆積層の初期勾配 θ : 河床勾配
$\theta = \theta_0 - \tan^{-1} \frac{\partial D}{\partial x}$	

係数Cの計算

・ 掃流状集合状態 $c < c_{dc}$ ($c_{dc} = 0.4c_*$)

$$C = 0.7 \sqrt{g} \frac{h}{d_m} R^{2-P}$$

・ 土石流状態 ($h/d_m \leq 30$)

$$C = \frac{2}{5d_m} \left[\frac{g}{0.02} \left\{ c + (1-c) \frac{\rho}{\sigma} \right\}^{1/2} \left\{ \left(\frac{c_{*D}}{c} \right)^{1/3} - 1 \right\} \right]$$

・ 土石流状態 ($h/d_m > 30$)

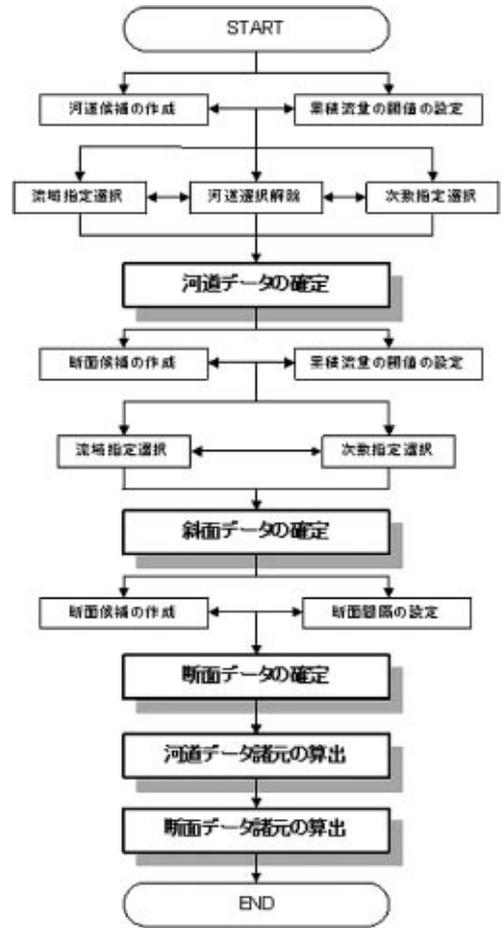
$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

4

おわりに

本研究では、リアルタイムハザードマップを素早く作成するために、状況の変化に対応した条件を迅速に設定するための環境整備の一環として「GISと連動したハイドログラフ作成プログラム」を開発した。本研究では今

図-6 システム操作の手順フロー



回示した「GISと連動したハイドログラフ作成プログラム」の他に「メッシュ作成プログラム」、「計算パラメータリスト作成」などの種々プログラムを開発する予定である。これらのプログラムが開発されることにより、さらに土砂災害や火山災害に対する警戒避難体制に資するための資料を迅速に提供できるようになる。

★参考文献

- 安養寺信夫 (2008) : 火山ハザードマップを防災にどのように活かすか? 産総研地質調査総合センター第9回シンポジウム, p10-13
- 柘木敏仁・安養寺信夫・山下伸太郎 (1995) : 融雪型火山泥流のハイドログラフについて, 砂防学会研究発表会概要集, p403-404
- 嶋大尚・安養寺信夫 (2003) : 融雪型火山泥流の融雪水の発生条件とピーク流量について, 砂防学会研究発表会概要集, p234-235
- 高濱淳一郎・里深好文・鈴木浩二 (2004) : 土砂流出解析支援システムについて, 砂防学会研究発表会概要集, p336-337
- 小川潤・小川茂男・吉迫宏・島武男 (2007) : 水理解析を目的とした流域GISデータのオブジェクト構造化と応用, 地理情報システム学会, GIS-理論と応用, Vol15, No2, p93-102
- 高橋保・匡尚富 (1986) : 変勾配流路における土石流の形成, 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, p343-359