

GUI を実装した 汎用土石流シミュレータ開発

DEVELOPMENT OF AN USER FRIENDLY DEBRIS FLOW SIMULATOR EQUIPPED WITH GUI

中谷 加奈¹・和田 孝志²・里深 好文³・水山 高久⁴

Kana NAKATANI, Takashi WADA, Yoshifumi SATOFUKA and Takahisa MIZUYAMA

¹ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: kana2151@kais.kyoto-u.ac.jp

² 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³ 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: satofuka@se.ritsume.ac.jp

⁴ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Key Words: debris flow, GUI, numerical simulation, one and two dimensional integration model

1. はじめに

日本は地形が急峻で地質も脆弱であり降水量も多いことから、毎年各地で土石流が発生し、甚大な人的・経済的被害が生じている。被害を軽減する有効な手法の一つとして、砂防ダム整備が各地で進められている。砂防ダムが持つ土砂調節効果を検証するツールとして、また、土石流の堆積・氾濫範囲を予測するツールとしてこれまでに様々な土石流数値シミュレーションモデルが提案され、それらを実装したシミュレーションプログラムが開発されてきた^{1),2)}。

しかし、これらのモデルやプログラムを活用するために必要となるユーザーインターフェイス整備は遅れているため、シミュレーションを扱うには専門的な知識が必要となっている。このため一般の砂防技術者が数値シミュレーションを自力で行うことができず、計算業務を外部に発注せざるをえないのが実情である。また、数値計算に関する技術は日々進歩しているため、計算を専門とする者とそうでない者との知識格差は拡大する傾向にあり、計算の精度やモデルの妥当性の検証といったこれまで研究者が行ってきた努力だけでは、砂防の分野の数値シミュレーションにおける総合的な技術力の向上に結びつかないことが予想される。

2. 土石流計算を一般的にするために

上述した現状を踏まえて、扱いやすいユーザーインターフェイスを実装した土石流シミュレータ「kanako」を開発した。本システムでは里深・水山によって提案された土石流の流動・堆積モデル^{3),4)}、和田らによって提案された結合モデル⁵⁾を使用した。

開発したシステムでは、ユーザーが簡単に計算条件の入力を行うことができ、直感的にシミュレーション結果を把握できる GUI を実装することで情報の視覚化^{6),7)}を図った。GUI の詳細については4. で後述する。情報の視覚化とは、情報を図やパターンとして抽象化して表示することによって、人間の認識特性を活かし、情報への理解をより早く・深くする手法である。情報が図化されることで、数字によって従来表現されていた計算結果である土石流水深・堆積厚・初期河床の変化等、より多くの情報を一度に閲覧することや、情報の持つ特徴を即座に直感的に理解することが可能となり、土石流の数値計算における専門家以外のユーザーも土石流数値シミュレーションが自力で扱えるようになると考えられる。

また、里深・水山によって提案された土石流の流動・堆積モデル^{3),4)}に改良を加えて、従来では個別にプログラムを作成する必要があった砂防ダムを複数基設置

する場合や異なる種類の砂防ダムを組み合わせで設置した条件下での計算を、一つのシミュレータ上で実行可能とした。これにより、多様な砂防ダム設置条件下での土石流制御効果や維持管理法に関する高度な検討が容易に行えるようになると考えられる。

3. Kanako Ver. 2.00 システム

(1) 開発環境

開発環境としては MS VisualBasic.NET (VB.NET) を利用した。VB.NET は現在最も広く用いられている開発言語の一つであり、この言語で作成したプログラムは、MS Windows OS が持つ様々なグラフィック機能、インタラクティブなユーザーインターフェイス機能を容易に活用できる。またユーザー人口も多く、習得も比較的容易なプログラミング言語であるため、第三者によるプログラムの修正や拡張が容易であると考えられる。

(2) システム概要

VB.NET 上で開発したシステムは、初期条件入力や計算結果表示を担うインターフェイス部分と、シミュレーションを行う計算部分を併せ持つ(図-1)。

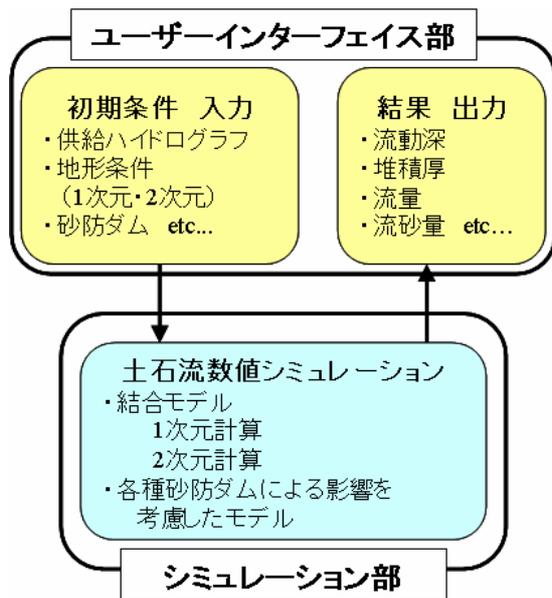


図-1 システム諸機能関連図

インターフェイス部分では、利用者が計算条件などを簡単に入力し、シミュレーション結果を直感的に把握できるよう、マウスによる入力、及びグラフィックを多用した表示を基本としている。このことにより、高度な専門知識がなくても簡単に土石流の流下過程や堆積過程を計算することが可能となった。2次元計算までを可能としたシミュレータを kanako 2.00 とし、そのインターフェイス部における主要機能を表-1 に示す。

表-1 kanako2.00 インターフェイス部・主要機能

| 主機能 | 機能詳細 | 説明 |
|-------|-----------------------|--|
| 入力 | 1次元河床形状 | 急傾斜地の縦断形状、川幅を設定 |
| | 2次元河床形状 | 緩勾配地(扇状地等)の地形条件設定 |
| | 砂防ダム | 種類(不透過, スリット, 格子)・高さ・設置位置・基数の設定 (1次元のみ) |
| | ハイドログラフ観測点 | 数・設置位置の設定 (1次元のみ) |
| | 供給ハイドログラフ | 上流端から供給される土石流の流量・濃度の設定 |
| | 初期河床堆積厚 | 計算開始前の堆積厚(移動床)設定 |
| | フィールド | 計算点数の設定 |
| 保存・呼出 | 入力の諸条件を保存・呼出 | |
| 出力 | 計算実行中のリアルタイムアニメーション表示 | 画面の地形上に流動深・堆積厚を表示 ハイドログラフ観測点における流量・土砂量を表示 |
| | 計算終了後の結果保存 | 詳細な計算結果データを保存 |

インターフェイス部を介して条件設定を行った後、計算を開始すると計算部を介してシミュレーションが実行され、同時にインターフェイス部を介して結果が出力される。計算部においては、5.で後述する計算モデルを使用している。

kanako を利用することで、土石流計算の知識のないユーザーでも所定の入力条件設定さえ行えば、シミュレーションを実行することができる。これは、計算に必要であり一部の専門家以外には設定が困難である各種パラメータ(マニングの粗度係数・堆積速度係数、等)や計算モデルは予め設定されており、ユーザーはこれらを意識することなく、計算を実行できるためである。設定ファイルを編集することで、これらの計算に必要な各種パラメータを変更することも可能である。

4. ユーザーインターフェイス

一般にユーザーインターフェイスとは、データ入力方式や情報の表示様式を規定する、コンピュータシステムの「操作感」の意味で使われる。GUI とは Graphical User Interface の略であり、表示に多くの絵や画像を用

い、基礎的な操作の大半をマウス等のポインティングデバイスによって直感的に行なうことができるユーザーインターフェイスである。

(1) インターフェイスを介した情報の入出力

GUIを実装したkanakoでの情報の入出力は、例えば河床形状入力を行う際であれば、マウスポインタを設定する点に合わせた後ドラッグを行い、特定の位置でドラッグを止めると新しい点の位置が決定される。このユーザー操作の背後では、以下の処理が行われている。

設定する点にマウスポインタがある距離以下に接近すると、その点が選択されたことが判別される。その点がドラッグされている間は、ポインタの位置座標が随時取得される。ドラッグ終了時点では、位置座標が記録され、さらに実際のシミュレーションで用いるデータへ数値が変換され、新たな入力条件が設定される。

同様に、砂防ダムのパラメータ入力画面では、高さやスリット幅、ダムの種類、格子型砂防ダムの詳細形状といった情報が、「決定」ボタンをクリックした時点で、新しい情報としてシステム内に記録される。ユーザーは、このような複雑な処理がマウス操作の背後で行われていることを意識することはない。

出力においては、土石流の数値計算を行いながら、画面上に計算結果を連続して描画することによってリアルタイムのアニメーション表示を可能にしている。計算時間間隔(Δt)は初期設定を0.01秒としているが、アニメーション表示される流量ハイドログラフの描画間隔は2秒とし、河床変動や土石流の流動深の描画間隔は Δt と同じ0.01秒間隔としている。

(2) GUI実装のための開発言語

VB.NETを選択した理由は3(1)で述べたが、従来の土石流数値計算で普及していたFortranがGUIを実装した汎用シミュレータ開発に適さないかを詳細に示すため、両プログラム言語の特徴の比較を、表-2に挙げる。

5. 土石流の数値計算モデル

本システムでは結合モデル⁵⁾を採用した。急勾配の谷部では砂防ダムを設置した山地河川における土石流の流動・堆積過程を再現する1次元計算^{3),4)}を行い、扇状地などの緩勾配領域では土石流の堆積・氾濫過程について2次元計算⁸⁾を行う。土石流の流動・堆積に関する支配方程式として高橋ら^{9),10)}のモデルが使用され、これを差分化することによりシミュレーションモデルが構築されている。

表-2 プログラム言語の特徴比較

| 比較項目 | Fortran | VB.NET |
|--------------|--|--|
| 概要 | <ul style="list-style-type: none"> ・科学技術計算処理が主目的 ・数値計算や解析に適する ・習得が困難 | <ul style="list-style-type: none"> ・視覚的要素を備える ・構造化プログラミングやオブジェクト指向プログラミングが可能 ・簡単かつ高機能 |
| 言語処理の種類・実行速度 | <ul style="list-style-type: none"> ・コンパイラ(一括翻訳)方式 ・速い | <ul style="list-style-type: none"> ・インタプリタ(同時通訳)方式 ・遅い(Fortranとの比較) |
| ユーザー | <ul style="list-style-type: none"> ・利用者少ない ・専門家が多い ・第三者による修正や拡張が行いにくい | <ul style="list-style-type: none"> ・利用者多い ・初心者・学生からシステム会社で働くプロまでと利用層が幅広い |
| 操作感 | <ul style="list-style-type: none"> ・GUIを備えず対話的・直感的な操作が困難 | <ul style="list-style-type: none"> ・GUIを備え、対話的・直感的な操作が可能 |
| 土石流計算への利用頻度 | <ul style="list-style-type: none"> ・数多く利用 ・既存プログラムを、直接利用・修正 | <ul style="list-style-type: none"> ・現在、利用数は非常に少ない |

従来の土石流数値計算においては、急勾配である谷部分では1次元計算、緩勾配である扇状地では2次元計算が用いられ、1次元計算で得られた下流端の流量・流砂量を2次元計算の流入条件として用いることが通常であったが、この手法では1次元計算と2次元計算が一方向の関係であり、領域の境界である谷出口で顕著な土砂生産が起るような場合に、再現性の高い計算が行えなかった。結合モデルでは、1次元計算領域下流端の境界条件に2次元計算領域を反映させており、従来と比較してより合理的な計算が可能となっている。

(1) 土石流の支配方程式

本研究で用いた2次元土石流計算の基礎方程式を以下に示す。1次元計算では以下の方程式のy方向成分について考慮しないものを用いる。

水・土砂を含めた全容積の保存式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i \quad (1)$$

土砂の体積の保存式

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = iC_* \quad (2)$$

x方向(流下方向)の流水の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta_{wx} - \frac{\tau_x}{\rho h} \quad (3)$$

y 方向(横断方向)の流水の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \sin \theta_{wy} - \frac{\tau_y}{\rho h} \quad (4)$$

河床変動の式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (5)$$

ここに, h : 流動深, u : x 方向の流速, v : y 方向の流速, C : 土砂濃度, z : 河床位, t : 時間, i : 侵食・堆積速度, ρ : 間隙流体の密度, C_* : 河床堆積物の体積濃度, θ_{wx} , θ_{wy} : x, y 方向の水面勾配, τ_x, τ_y : x, y 方向の河床せん断力である。

(2) 砂防ダムに関する条件設定

本論においては上述の基礎式を差分化して数値計算モデルを構築する際に, スタッガードスキームを使用している. この方法では図-2に示すように, スカラー量とベクトル量が $1/2\Delta x$ だけ上下流方向にずれた形で設定されている. ここではベクトル量の評価点に砂防ダムを配置する. 砂防ダムからの流出流量を求める際には, ダム天端上の水深 h' が必要となるので, これは以下のように設定している³⁾.

$$h' = \begin{cases} h_i + z_i - z_d & (h_i + z_i - z_d \geq 0) \\ 0 & (h_i + z_i - z_d < 0) \\ h_i & (z_i > z_d) \end{cases} \quad (6)$$

ここに, h_i : ダムの直上流に位置するスカラー量評価点での水深, z_i : h_i と同じ地点での河床位である(図-3). なお, 砂防ダムが設置されていない通常のベクトル量評価点においては, 流れの上流側の水深と当該地点の流速とを用いて流量を計算している.

a) 不透過型砂防ダム上流域における堆積速度式

不透過型砂防ダム上流域における堆積速度式を考える際, 既存の河床変動計算で用いられてきた手法^{3),11)}, すなわち砂防ダム天端高とダム上流域の河床高との関係に応じてダムからの土砂の越流条件を決定する方法を採用している. 本論で用いたモデル³⁾では, ダム上

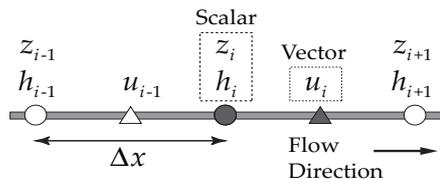


図-2 変数の配置

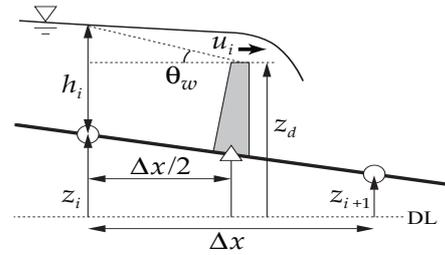


図-3 砂防ダム地点における変数の配置

流にポケットがあれば土砂と水が容易に分離されるとして, 砂防ダムより上流のエリアにおいて地点 i における河床位が砂防ダムの天端高より低い, すなわち $z_i < z_d$ であるとき, 上流から流入するすべての土砂が瞬時にその地点に堆積するものとする。

b) スリット型砂防ダムが設置された領域の計算

スリット型砂防ダムを設置した計算では, 砂防ダムを設置するベクトル評価点の前後にあるスカラー評価点の川幅がスリット幅に等しいとしている. 現行ではスリット部の急縮によるエネルギー損失や砂防ダム背後のポケットについては考慮していない。

c) 格子型砂防ダムが設置された領域の計算

格子型砂防ダムによる土石流調節に関する数値シミュレーションにおいては, 格子間の閉塞に関する大粒子と, 関与しない小粒子を別個に取り扱う必要がある. そこで, 大小2種類の材料で構成される石礫型土石流の1次元流動堆積モデル¹¹⁾に, 格子間閉塞モデルによって計算されるダム地点河床平均上昇速度を組み込んだモデル⁴⁾を採用している. 詳しくは4), 11)の文献を参照されたい. デフォルト値は大粒径 $1m$, 小粒径 $0.1m$ としており, これらの値は変更可能である。

(3) 結合モデル

a) 結合モデルの概略

結合モデルでは, 時間ステップ Δt 毎に谷部の1次元計算と扇状地部の2次元計算を連続して行う. 1次元計算領域下流端部における流量と流砂量を2次元計算の流入条件として用い, 2次元計算領域上流端部の河床位と流動深を1次元計算の下流端境界条件として用いることで, 1次元計算と2次元計算が相互に関連する(図-4). 1次元計算の計算点間隔や河道幅が2次元計算のメッシュ間隔と異なることや1次元計算と2次元計算の x 軸方向が若干異なる場合も対応できるよう配慮している。

b) 1次元計算領域と2次元計算領域の結合

1次元計算領域の下流端の計算点番号を ie とし, 2次元計算領域の流入地点の格子点を $(1, jc)$ とする. 図-5に示すように, 1次元計算領域と2次元計算領域は $ie - 1$ 番のベクトル量評価点と $(1, jc)$ のベクトル量評価点

の位置を一致させることで結合させる。この際、1次元計算と2次元計算のx軸の成す角である θ_i を考慮すると、

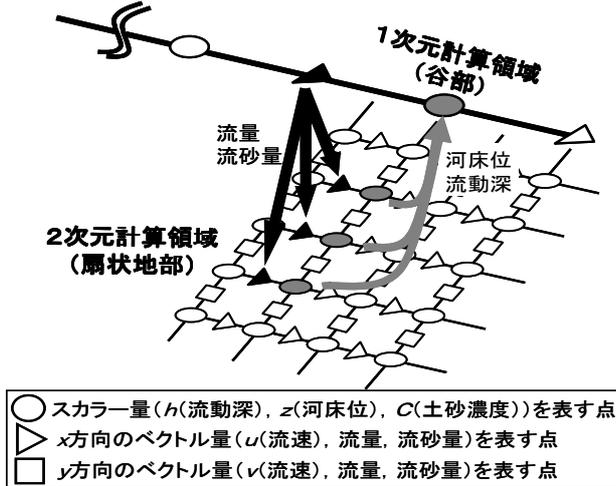


図-4 結合モデル概略

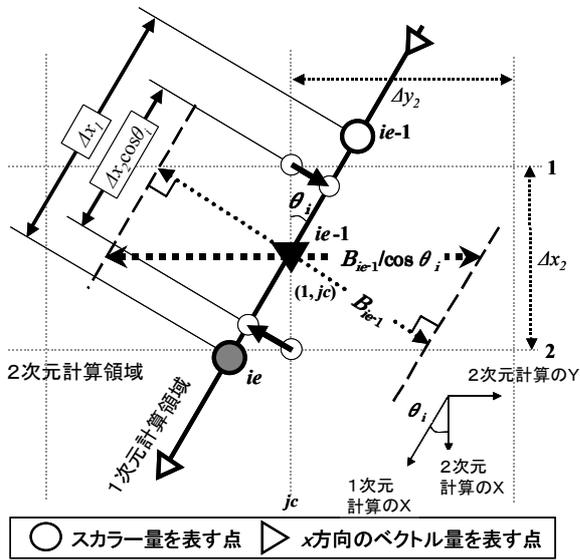


図-5 結合モデル平面図

1次元計算領域上における2次元計算のx軸方向のメッシュ間隔は $\Delta x_2 \cos \theta_i$, 2次元計算領域上における1次元計算領域の $ie-1$ 番のベクトル量評価点の河道幅は $B_{ie-1} / \cos \theta_i$ となる。ここで、 Δx_1 は1次元計算の計算点間隔、 Δx_2 は2次元計算のx軸方向のメッシュ間隔、 B_{ie-1} は1次元計算領域の $ie-1$ 番のベクトル量評価点の河道幅、 Δy_2 は2次元計算のy軸方向のメッシュ間隔である。

6. シミュレータ使用方法

表-1 で記した kanakoVer.2.00 インターフェイス部における主要な機能の一部を以下に挙げる。

(1) 河床形状設定

kanako を起動すると、図-6 の様な画面が表示される。

河床の縦断面図と平面図が上下に並び、1次元領域と2次元領域は連続して表示される。縦軸は標高、横軸は上流端からの距離を表し、単位はいずれもメートルである。表示された各点を上下・左右にドラッグして固定床・移動層・川幅等の河床形状、砂防ダム・ハイドログラフ観測点の設置位置を決定する。

2次元地形設定画面では(図-7)扇状地を形成する大きな要因である3つのパラメータ、平面の傾き、中心軸への傾き、扇状地の中心角を設定して、2次元地形を設定する。1次元・2次元地形とも各計算点での数値入力や、外部ファイルからの読み込みも可能である。

(2) 砂防ダム設定

砂防ダムの種類[不透過, スリット, 格子], 高さ, スリット幅等の設定はダム詳細設定画面で行い、格子型砂防ダムの詳細形状は格子型入力画面で設定する(図-8)。

これまで建設された格子型砂防ダムでは、柱や桁の間隔が一定のものが多い。

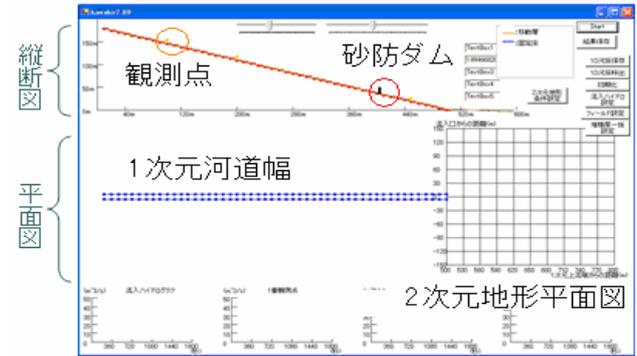


図-6 起動画面 (1次元河床設定)

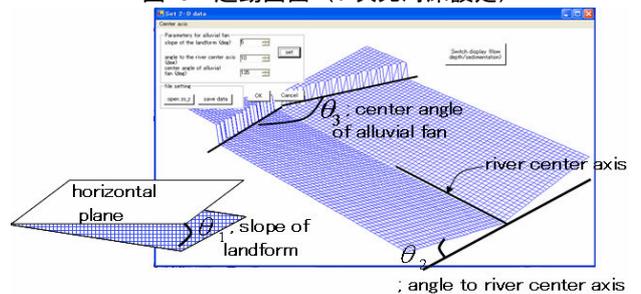


図-7 2次元地形設定画面

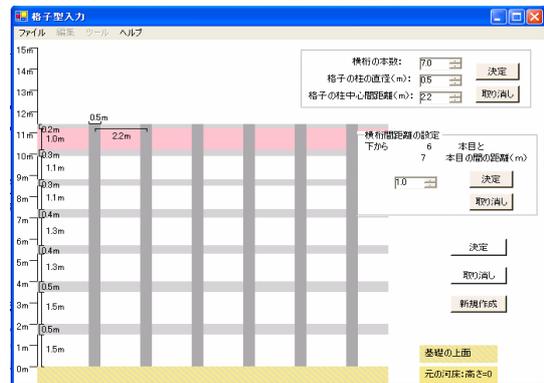


図-8 格子型砂防ダム設定画面 (編集中心)

しかし、上部の横材間隔を狭くした格子型砂防ダムが後続流を効率的に捕捉し土石流捕捉効果を高めることがわかってきた今後、横桁は上に行くほど部材が細くなり、桁の間隔が狭まった形状が主流となる可能性がある¹²⁾。kanako では図-8 の様に、格子型砂防ダムの横桁直径・横桁間距離は、縦の柱における直径・中心間距離の一括設定とは異なり、各々詳細に設定できるようにした。

(2) シミュレーション実行例

シミュレーションを実行すると、2画面でアニメーションが表示される。主画面(図-9)では、画面上部で河床縦断形状や土石流水面形状の変化、画面中央では平面図での水深・堆積厚、画面下部の4つのグラフでは左端から順に流入ハイドログラフと3つの各観測点における流量と土砂量を表示する。画面下部のハイドログラフでは、縦軸が流量($m^3/秒$)を、横軸は時間(秒)を表す。2次元地形画面(図-10)では水深・堆積厚が設定した地形上に表示される。主画面・2次元地形画面とも2次元計算領域の水深・堆積厚表示を切り替えることが可能である。初期設定において計算は1800秒経過するまで行われるが、計算時間を変更することも可能である。

7. おわりに

GUI 実装により、既存シミュレータと比較して、操作性が高く、かつ計算モデル精度は同様に精緻である汎用

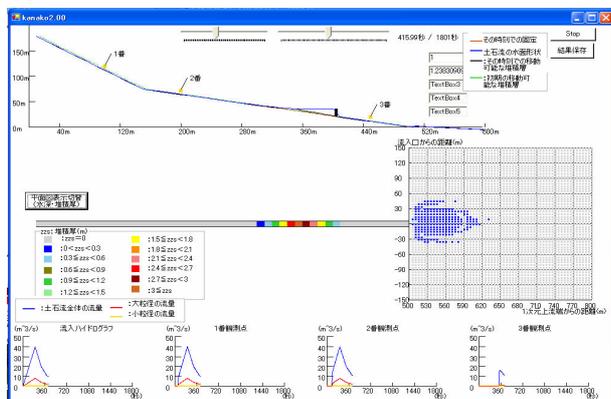


図-9 計算画面(主画面、平面図; 堆積厚表示)

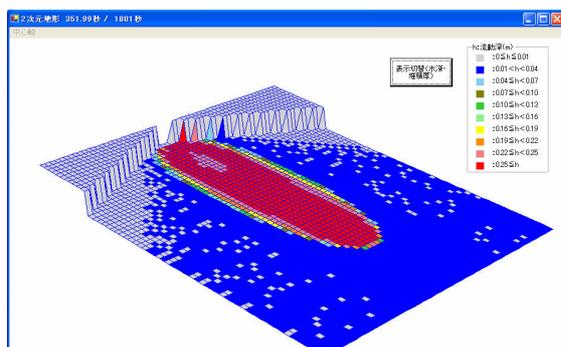


図-10 計算画面(2次元地形画面・水深表示)

土石流シミュレータが完成した。

しかし、いかにシミュレータが扱いやすくとも専門家以外のユーザーが自力で適切な砂防構造物の種類・数・サイズ・設置位置等の最適解(砂防ソリューション)を探すことは難しい。そこで、土石流による被害を最小にする砂防ソリューションを一つのシステム上で自動的に提案する機能があれば、多くの現場技術者によって高度な砂防施設の配置方法や維持管理方法に関する検討が容易に可能となり非常に有効だと考えられる。今後はこのような機能の提案するためのアルゴリズム構築し、汎用シミュレータへ実装することを課題とする。

参考文献

- 1) 高濱淳一郎, 藤田裕一郎, 近藤康弘, 蜂谷圭: 土石流の堆積侵食過程に関する実験と二層流モデルによる解析, 水工学論文集, Vol. 46, p.677-682, 2002.
- 2) 江頭進治, 伊藤隆郭: 土石流の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, Vol.12, No.2, 2004.
- 3) 里深好文, 水山高久: 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58, No.1, p.14-19, 2005.
- 4) 里深好文, 水山高久: 格子型砂防ダムによる土石流の調節に関する数値解析, 砂防学会誌, Vol.57, No.6, p.21-27, 2005.
- 5) 和田孝志, 里深好文, 水山高久: 土石流の1次元・2次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, p.36-40, 2008.
- 6) 高田哲司, 小池英樹: 見えログ: 情報視覚化とテキストマイニングを用いたログ情報ブラウザ, 情報処理学会論文誌 Vol.41, No.12, p.3265-3275, 2000.
- 7) 飯田進史, 五十嵐孝浩, 高木茂知: 分散シミュレーション統合技術を適用した水害危機管理行動支援システムに関する一考察, 河川技術論文集 Vol.9, p.161-166, 2003.
- 8) 中川一, 高橋保, 里深好文, 川池健司: 1999年ベネズエラのカムリグランダ流域で発生した土砂災害について, 京都大学防災研究所年報, 44B-2, p.207-228, 2001.
- 9) 高橋保, 中川一: 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol.44, No.3, p.12-19, 1991.
- 10) 高橋保, 匡尚富: 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, Vol.29, B-2, p.345-359, 1986.
- 11) 芦田和男, 江頭進治, 村岡猛, 里深好文: 砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究, 京都大学防災研究所年報, Vol.30, B-2, p.421-439, 1987.
- 12) 水野秀明, 水山高久: 上部格子間隔が狭い格子型ダムに関する研究, 砂防学会誌, Vol.49, No.4, p.3-8, 1996.

(2008.5.16 受付)