

1. 土石流・泥流モデルの開発（担当：竹林洋史）

(1) Morpho2DHの基礎方程式と解析例

a) Morpho2DHの基礎方程式

Morpho2DHはMorpho2Dに土石流・泥流モデルを加えた計算ソルバである。Morpho2DHは平面二次元の土石流・泥流モデルを主体とした解析ソルバであり、斜面崩壊を初期条件とした土石流・泥流の流動・堆積過程を表現可能とするモデルで、砂防ダム、堰、家屋などの構造物や地盤の浸食深さの平面分布などを考慮した解析が可能である。

以下、基礎方程式を示す。水及び土砂の混合物の質量保存則⁹⁾は以下のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 h は泥流の流動深である。 u と v は x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の堆積濃度、 E は河床の浸食速度であり、以下の江頭らの式⁹⁾を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* (\tan \theta - \tan \theta_e) \quad (2)$$

ここに、 θ は流動方向の河床勾配であり、以下の関係がある。

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

ここに、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配である。 θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 \bar{c} に関する流動方向の平衡河床勾配であり、図1のように、水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考え、 \bar{c} を一定とすると、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (4)$$

ここに、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。流体中の土砂の質量保存則⁹⁾は以下のようである。

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hU}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hV}{\partial y} = E \quad (5)$$

運動量保存則⁹⁾は以下のようである。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (7)$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位である。 P は圧力であり、静水圧近似を用いる。 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho \quad (8)$$

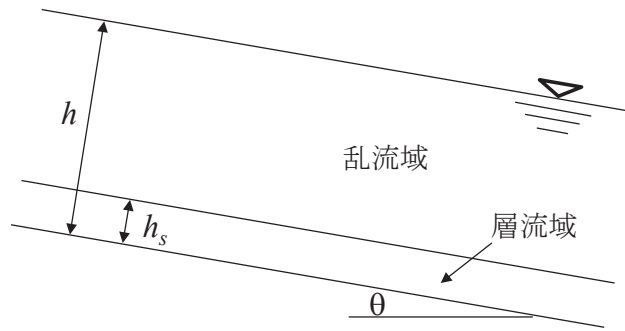


図1 二層モデルの流れの概要

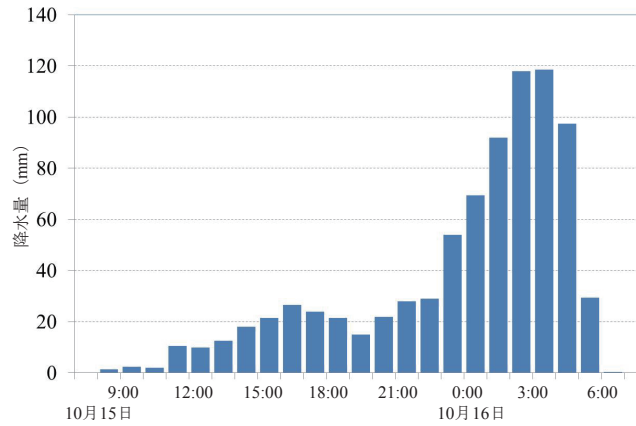


図2 大島観測所の1時間降水量の時間変化¹⁾

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度である。 τ_{bx} と τ_{by} は x と y 方向における掃流力成分であり、乱流域が卓越していると考えると以下のようなものである。

$$\tau_{bx} = \rho \frac{f_b}{8} (u^2 + v^2) \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \rho \frac{f_b}{8} (u^2 + v^2) \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (10)$$

f_b は抵抗係数であり、本泥流解析では以下の関係を用いる。

$$f_b = 72\alpha^2 \quad \alpha = \kappa/6 \quad (11)$$

河床位方程式³⁾は以下のようなものである。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \quad (12)$$

b) Morpho2DHの解析例

・解析対象領域

本解析では、2013年10月16日に伊豆大島で発生した泥流を対象とする。東京都大島町では、台風26号がもたらす湿った空気の影響で、2013年10月16日午前2時ごろから1時間100mmを超える猛烈な雨が数時間降り続き、24時間の降水量が800mmを超える豪雨となった¹⁾。この豪雨により、東京都大島町では大規模な土砂災害が発生し、2013年10月20日時点で、死者27名、行方不明19名となった²⁾。

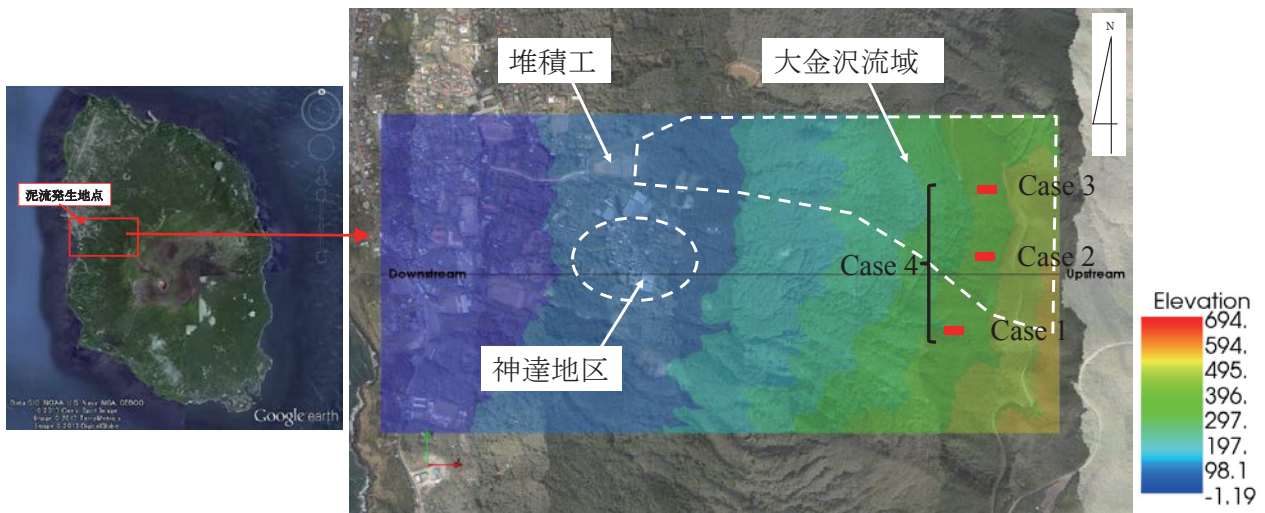


図3 解析領域

伊豆大島は、伊豆半島から南東へ約25kmに位置する火山島である。面積は91.06km²、平均年間降水量は約2800mmであり、雨の多い地域である³⁾。最近の土砂災害としては、1958年9月27日に狩野川台風による豪雨時に発生している。総降水量419.2mm、瞬間最大風速50.2mを記録し、大金沢とその北隣の長沢で泥流が発生した。その結果、元町で全壊55戸、半壊49戸、死者・行方不明者各1人、重軽傷53名の被害が発生した³⁾。伊豆大島は火山島であり、島全域において地盤の表層約1mは粒径2mm以下の火山灰で覆われている。そのため、島東部の神達地区を含む斜面では、2013年10月16日の豪雨時に発生した斜面崩壊に起因して、高濃度で流動性の高い泥流が形成され、斜面を流下したと考えられる。

図2に大島観測所の1時間降水量の時間変化を示す。10月14日から16日までの総降水量は、東京都大島町大島観測所で824.0mmを記録した。東京大学地震研究所の地震計が観測した斜面崩壊による震動と思われる揺れの観測値を解析した土井によると⁴⁾、2013年10月16日午前2時03分、午前2時22分、午前2時32分、午前2時37分、午前3時02分に常時微動とは異なる様相の比較的大きな揺れを観測している。これらの結果から、ちょうど100mm/h以上の雨が降った前半の時間帯に斜面崩壊が発生したと考えられる。また、斜面崩壊発生後も100mm/h以上の降雨が続いたことがわかる。

・解析条件

解析領域は、図3にコンターを色分布で示した領域であり、神達地区及び大金沢を流れた泥流の流動域が含まれている（図3～図10の背景写真は国土地理院より提供、コンター図はiRICのGUIを用いた）。初期地形データは、平成24年度に計測された国土地理院による5mメッシュデータ⁶⁾である。解析格子は、東西方向に15m、南北方向に12mとした。斜面崩壊は3ヶ所を想定した。Case 1は最も南側の斜面崩壊であり、神達地区に多くの土砂が流れ込むと想定したものである。Case 2は神達地区の真東に位置している場所からの斜面崩壊であるが、大金沢流域内に位置している。Case 3は最も北に位置している斜面崩壊であり、多くの土砂が大金沢に流れ込むことを想定したものである。Case 4は3ヶ所の崩壊が同時に発生した場合である。各斜面崩壊の崩土の大きさは同一であり、厚さ0.5m、東西方向の長さ45m、南北方向の長さ36m、体積は810m³とした。なお、地盤は飽和しており、斜面崩壊とともに土砂だけでなく空隙に存在する水も流れ、泥流が形成されるとしている。

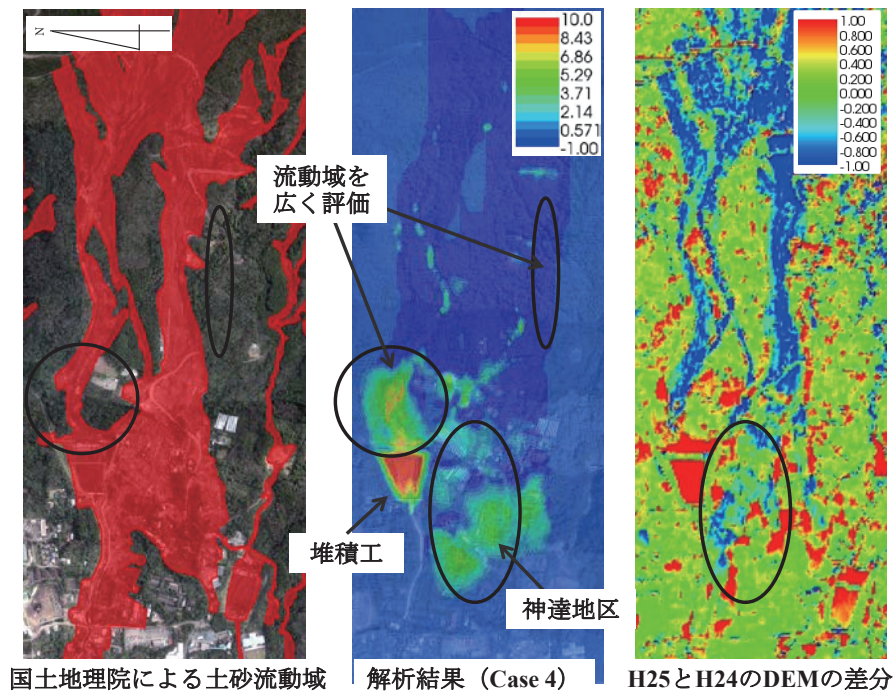


図4 国土地理院による泥流流動域の平面分布⁷⁾，地盤の浸食・土砂の堆積域の平面分布，DEMIによる浸食・堆積域の平面分布^{6), 8)}

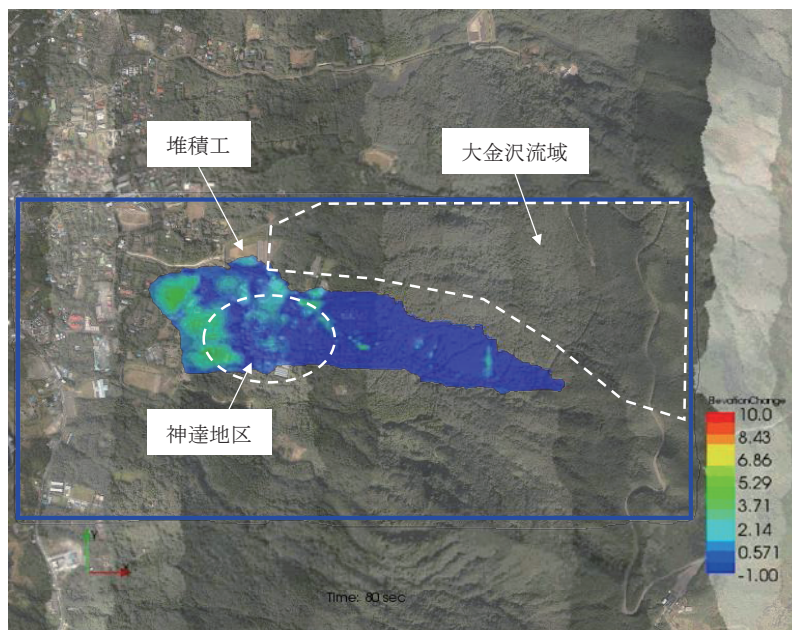


図5 Case 1の180秒後の浸食・堆積域の平面分布

・結果と考察

まず，本解析による泥流現象の再現性について検討する．図4はCase 4による地盤の浸食・土砂の堆積域の平面分布，国土地理院による泥流流動域の平面分布⁷⁾，DEMによる浸食・堆積域の平面分布^{6), 8)}を示したものである．国土地理院による泥流流動域の平面分布と解析結果を比較すると，解析結果は神達地区東部や堆積工東部での流動域が広く評価されている．これは，解析格子が粗く，深い谷の形状が十分考慮されておらず，泥流が平面的に広がりすぎたためと考えられる．このように，本解析では実際に発生した泥流現象を再現できていない部分もあるが，それぞれの斜面崩壊の発生位置からの泥流の流下

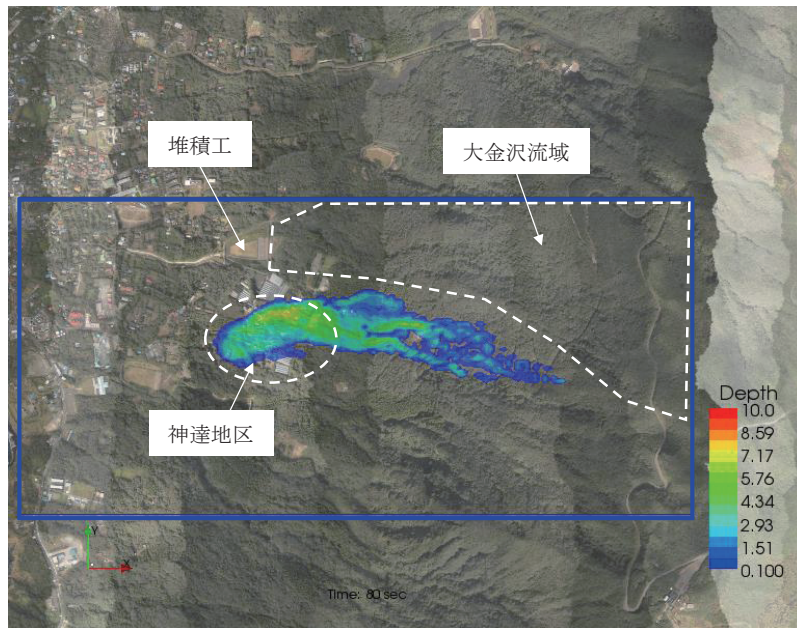


図6 Case 1の80秒後の流動深の平面分布

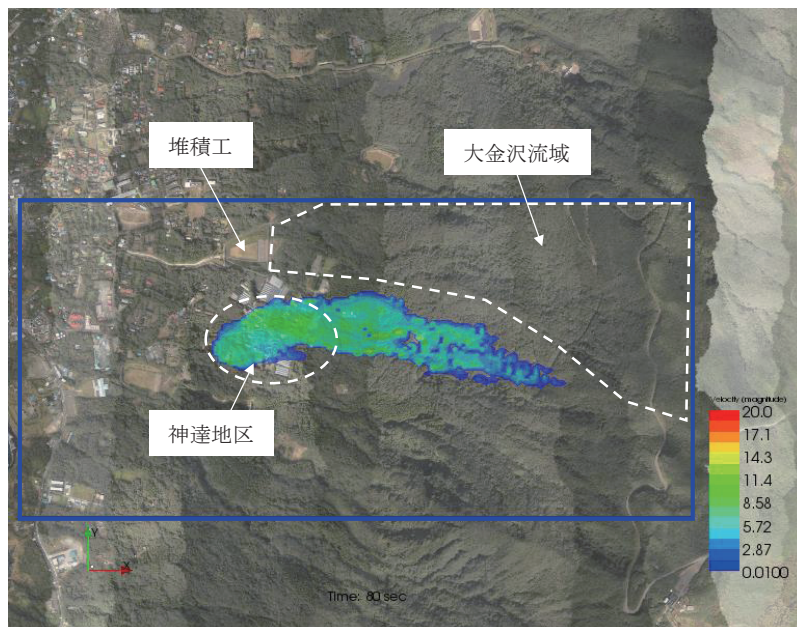


図7 Case 1の80秒後の流速の平面分布

経路、流動速度、浸食・堆積域の概形など、泥流のいくつかの特性は評価できると考えられる。なお、本解析では神達地区は土砂の堆積域と評価されているが、DEMによる浸食・堆積域の平面分布では、浸食領域か堆積も浸食も発生していない領域となっている。これは、泥流によって一旦堆積した土砂が、泥流発生後の時間雨量100mm以上の豪雨によって浸食されたと考えられるため、泥流の流動のみを対象とした本解析では表現できない。

図5にCase 1の180秒後の浸食・堆積域の平面分布を示す。図より、南側の斜面からの崩壊による泥流は、全てが神達地区に流れ込んでいることがわかる。また、図6に示すように、斜面崩壊発生地点から神達地区までの1200mを約80秒で流下しており、非常に速い速度で泥流が斜面を流下したと推察される。また、図7に示すように、神達地区に到達したときの泥流の速度は約10m/sであり、非常に速い速度で泥流が家屋や樹木を流出させたと考えられる。

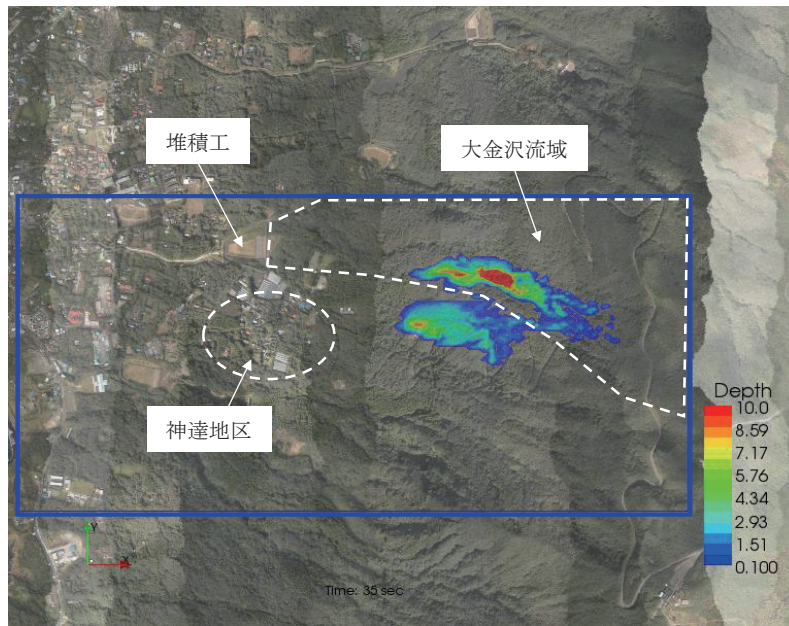


図8 Case 2の35秒後の流動深の平面分布

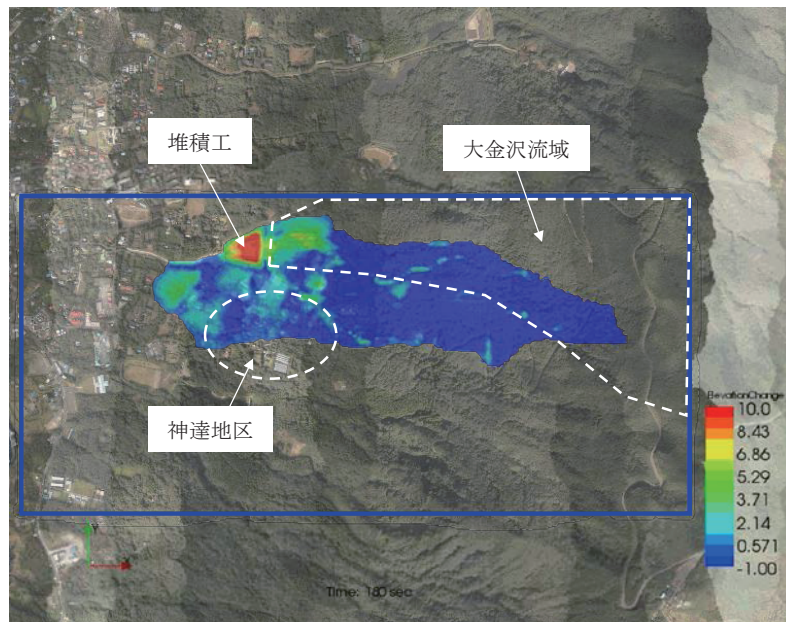


図9 Case 2の180秒後の浸食・堆積深の平面分布

図8にCase 2の35秒後の流動深の平面分布を示す。Case 2の斜面崩壊発生地点は大金沢の流域に位置しており、図に示すように斜面崩壊に起因した泥流の多くは大金沢に流れている。しかし、泥流の一部は神達地区の方にも流れていることがわかる。大金沢に流れた土砂の多くは、図9に示すように、堆積工に捕捉された。

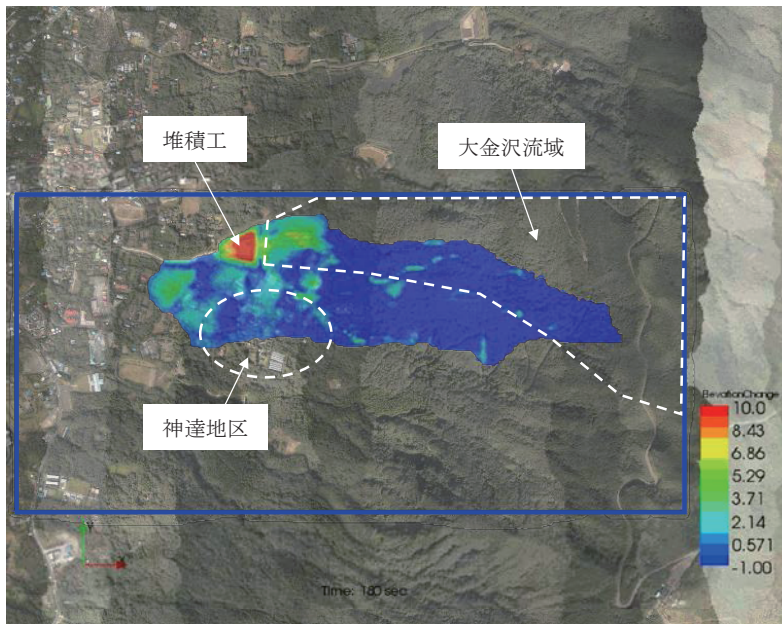
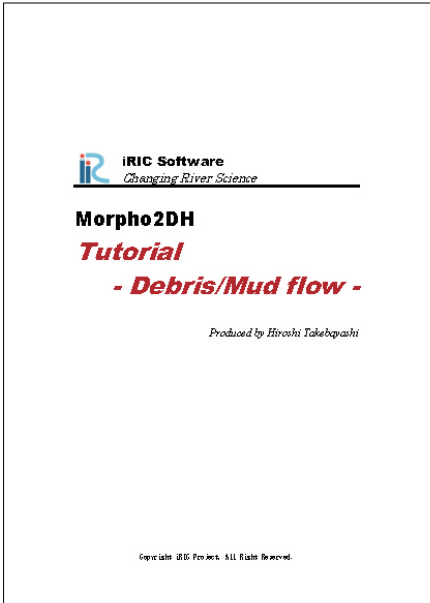


図10 Case 4の180秒後の浸食・堆積深の平面分布

図10にCase 4の180秒後の浸食・堆積域の平面分布を示す。本解析では3ヶ所の斜面崩壊を同時に発生させているが、実際にはこれらの斜面崩壊は異なる時間で発生していると考えられる。そのため、本解析は一度に多くの泥流が流れる解析となっているにもかかわらず、住宅地が密集している都道208号線（コンターの左端とほぼ同位置）までは泥流は到達していないことがわかる。これは、神達地区から西側の地区の流下方向斜面勾配が緩やかであるためである。なお、現地では、一部の土砂は都道208号を越えて海まで到達している。これは、泥流発生後の豪雨によって流路工に沿って流れたものと推察される。

(2) Morpho2DHの日本語・英語マニュアルの開発

図11にiRIC ver2用に開発したMorpho2DHの日本語チュートリアルを一部抜粋したものを示す。チュートリアルは、Morpho2Dと同一フォーマットとなっており、ユーザーが教材に沿ってiRICを操作すれば解析が可能となるようになっている。図12にiRIC ver2用に開発したMorpho2DHの日本語マニュアルを一部抜粋したものを示す。マニュアルは、Morpho2Dと同一フォーマットとなっており、モデルの概要、使用されている基礎方程式、xmlファイルによる条件設定用ダイアログ、入力データフォーマットの説明の順で記載されている。図13に英語チュートリアル、図14に英語マニュアルを一部抜粋したものを示す。



Contents

I. OUTLINE	1
1.1 Morpho2DH	1
1.2 Morpho2DH Tutorial – Debris/Mud flow –	1
1.3 Open Morpho2DH	2
1.4 Start Morpho2DH	2
1.5 Select [Morpho2DH] in [Select Setup] window and press OK.	2
1.6 Select [Create New Project] in [Start Simulation Project] window and press OK.	2
1.7 Select [Morpho2DH v1.0] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.8 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.9 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.10 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.11 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.12 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.13 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.14 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.15 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.16 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.17 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.18 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.19 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.20 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.21 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.22 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.23 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.24 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.25 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.26 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.27 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.28 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.29 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.30 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.31 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.32 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.33 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.34 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.35 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.36 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.37 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.38 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.39 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.40 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.41 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.42 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.43 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.44 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.45 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.46 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.47 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.48 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.49 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2
1.50 Select [Kama2] in [Report Solution] window and press OK.	2

I. Outline

1.1 Morpho2DH

Morpho2DH is an extension of the 2D debris flow model developed by Morpho2D. Morpho2D is the 2D debris flow model developed by Hiroshi Takebayashi, Fumio Ohtsuka. The governing equations are written in boundary-finite element method system. In 2009, the system was modified as iRIC-Flow Version 1.0 which is a debris flow solver developed by iRIC. Some functions are added in the original system and the improved version is called as iRIC-Flow2D (or Morpho2D). Morpho2D was modified with Morpho2DH and Morpho2DH was developed. Hence, the development of Morpho2DH was stopped in March 2014.

Morpho2DH is the 2D debris flow model developed for debris flow analysis which can represent the complex and irregular geometry of debris flow due to the bathymetry. Simulation of debris flow, wave, debris and so on) and lateral distribution of debris depth can be conducted in the system. Additionally, the 2D debris flow model can be used for debris flow analysis which can be performed using Morpho2DH to be performed in parallel.

1.2 Morpho2DH Tutorial – Debris/Mud flow –

The purpose of this tutorial is to show the detailed procedure of the analysis from the beginning to the end. This is the rough explanation of the analysis procedure. However, if the system is used for the work, please refer to the manual and Morpho2DH manual.

Contents of Tutorial

- Chapter 1: Transport and deposition process of debris/mud flow
- Chapter 2: Transport and deposition process of debris/mud flow
- Chapter 3: Data of debris flow analysis with results

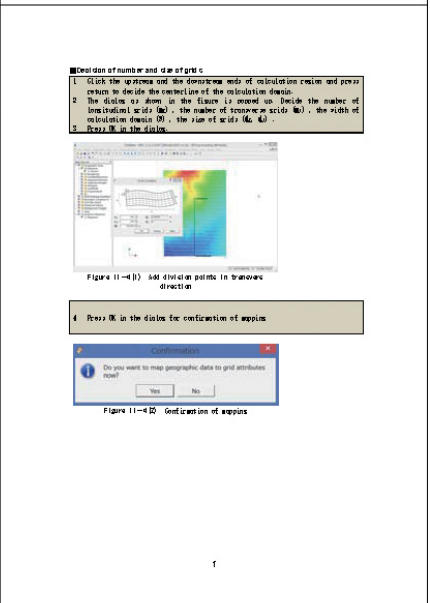
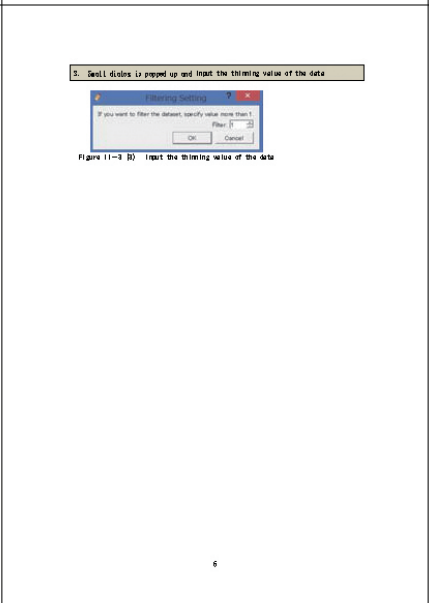
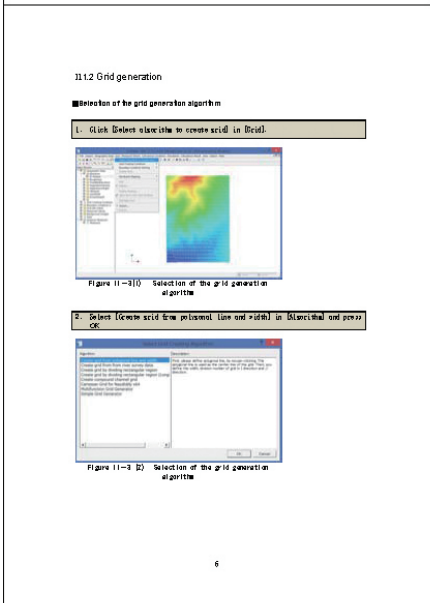
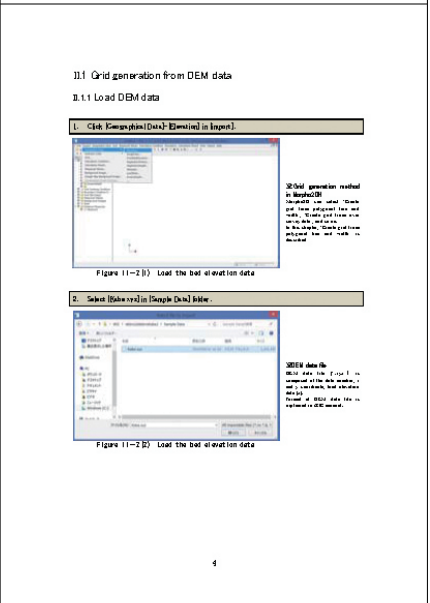
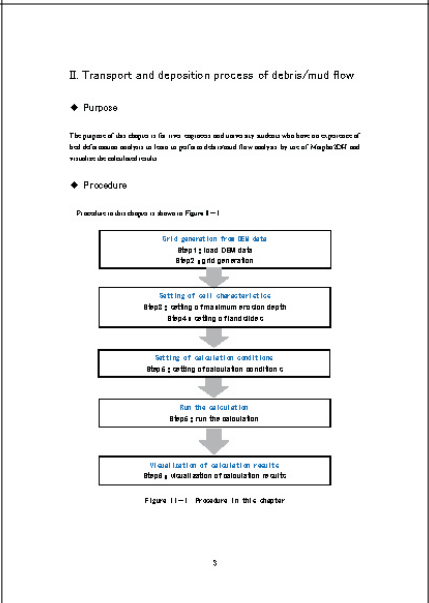
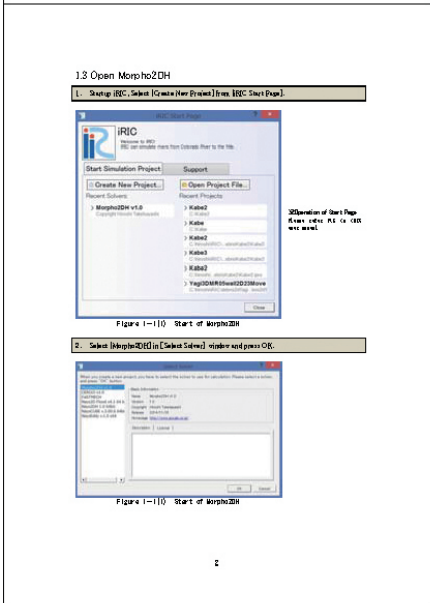


図13 iRIC ver2用に開発したMorpho2DHの英語チュートリアル (全34ページ)

(3) 本章のまとめ

Morpho2Dに土石流・泥流モデルを追加したMorpho2DHを開発した。本モデルによって土石流・泥流の解析が可能となった。本モデルの再現性を検証するため、2013年10月に伊豆大島で発生した泥流を対象として再現計算を行うとともに、泥流の流動特性を検討した。その結果、泥流の流動範囲と堆積範囲はおおむね再現できていることを確認した。また、iRIC ver2に対してMorpho2DHの日本語及び英語のチュートリアルとマニュアルを開発した。

参考文献（第1章分）

- 1) 気象庁：台風第26号による大雨，2013.
- 2) 読売新聞：2013年10月20日読売新聞朝刊，2013.
- 3) 東京都大島町公式サイト，2013.
- 4) 土井一生：2013/10/16 伊豆大島の斜面崩壊に伴う震動，2013年10月16日未明の伊豆大島における斜面崩壊に関する報告（その3），京都大学防災研究所HP，2013.
- 5) 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，第12巻，第2号，pp. 33-43，2004.
- 6) 平成24年度DEMは国土地理院から提供.
- 7) 国土地理院災害情報共有マップ（地理院地図）.
- 8) 平成25年度DEMは東京都から提供.