

2013年10月に伊豆大島で発生した泥流の現地調査と数値解析

Field Survey and Numerical Analysis of Mud Flow Occurred in Izuoshima Island on October 2013

竹林洋史・江頭進治⁽¹⁾・藤田正治

Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA⁽¹⁾ and Masaharu FUJITA

(1) 水災害・リスクマネジメント国際センター

(1) International Centre for Water Hazard and Risk Management

Synopsis

Mud flows were occurred in the west part of the Izuoshima Island on 16 October 2013. The Izuoshima Island is a volcanic island and the land surface is covered by the volcanic ash sediment in about 1m depth. The laminar layer is formed in the debris flow from the bed to the fluid surface. On the other hand, the laminar flow is restricted near the bed in the mud flow and the turbulence flow is formed on the laminar flow layer. As a result, the equilibrium slope of the mud flow becomes smaller comparing to the debris flow. In this study, the horizontal two dimensional mud flow model considering the both the laminar and the turbulence flows is developed. Subsequently, the model is applied to the mud flow occurred in the Izuoshima Island and discussed the applicability of the model. The differences of the horizontal flow areas between the simulated results and the field data are discussed and it was found that the outline of the horizontal shape of the flow areas is reproduced well. Furthermore, the horizontal distribution of the erosion and deposition area is reproduced by the numerical analysis well except for the residential area.

キーワード: 泥流, 現地調査, 数値解析, 伊豆大島, 乱流

Keywords: mud flow, field survey, numerical analysis, Izuoshima, turbulence flow

1. はじめに

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(気象庁, 2013)。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(読売新聞, 2013)。

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

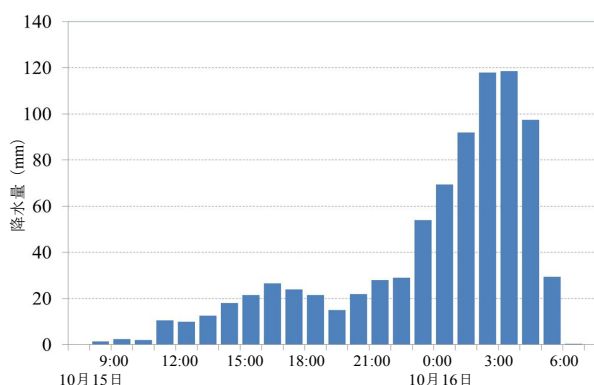


Fig. 1 Temporal change of one hour precipitation at Oshima Observatory (Japan Meteorological Agency, 2013)

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。泥流は土石流と異なり、層流域が河床近傍に限定され、平衡勾配が土石流よりも緩やかとなる。そのため、既存の土石流の基礎方程式では適切に土砂の流動及び停止過程を評価できない。また、泥流は粒径の小さい土砂を高濃度に含む流れであり、低濃度の土砂輸送現象を対象とした既存の浮遊砂や掃流砂の基礎方程式を用いてその動態を解析することは困難である。そこで本研究では、水と土砂の混合物に対して層流域と乱流域を考慮した平面二次元の泥流数値解析モデルを開発し、伊豆大島で発生した泥流の数値解析を行い、解析モデルの適用性および泥流の流動特性について検討を行った。

2. 2013年10月に伊豆大島で発生した泥流の実態

2.1 伊豆大島の概要（東京都大島町，2013）

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。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

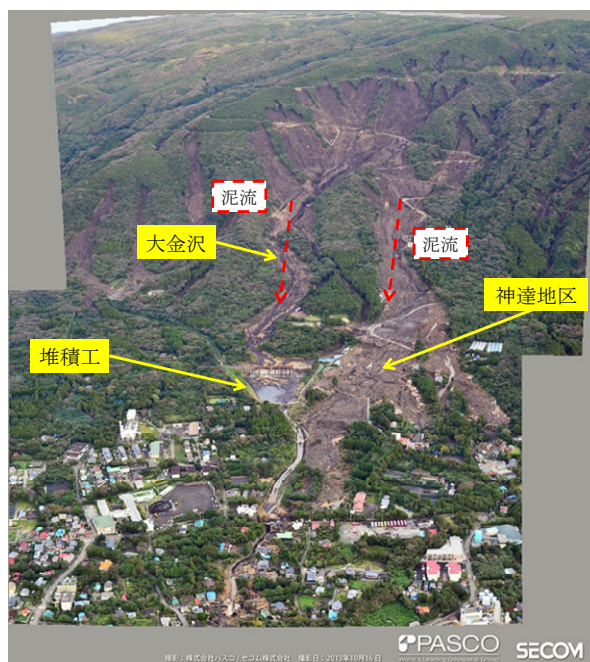


Fig. 2 The slope after the disaster



Fig. 3 The slope after the disaster

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。

2.2 降雨特性（気象庁，2013）

台風 26 号は発達しながら日本の南海上に北上し、大型で強い勢力のまま、16 日明け方に暴風域を伴って関東地方沿岸に接近した Fig. 1 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（土井一生，2013），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。

2.3 泥流の実態と被災状況

Fig. 2 に神達地区周辺の航空写真を示す。図に示すように，泥流が流れた経路は，大金沢を流れた経路と神達地区を流れた経路の大きく二つあることがわかる。両方を合わせると，南北約 600m の広い範囲で土砂が流動しており，複数の場所から斜面崩壊が発生したことが分かる。これらの斜面崩壊は，起点が異なるため同時に発生して一気に下流に流れたとは考えにくく，数波に分かれて斜面を流下したと考えられる。実際，地震計（土井一生，2013）も複数回の揺れを観測している。

Fig. 3 に，泥流発生後の現地の様子を示す。Fig. 3 (e) に示すように，源頭部付近では複数の斜面崩壊が発生していた。これらの斜面崩壊は小規模であり，崩壊厚さは約 50cm，それぞれの崩壊幅は 5m 以下であった。流出した土砂は Fig. 3 (h) に示すように，平均粒径約 0.5mm の火山灰であった。これらの斜面崩壊地周辺からは，火山灰層の下に存在すると思われる溶岩層は見られなかった。Fig. 3 (a) に示すように，中腹部では泥流及び豪雨によって地盤が浸食され，流路が形成されたことを確認した。地盤の土砂は粘着性を有しているようであり，流路幅が狭く，流路深が深い形状特性を有していた。中腹部で地盤が浸食された領域の多くはこのような粘着性材料を含む地盤が露出した状態であったが，Fig. 3 (c) に示すように，一部の地盤からはスコリア層や溶岩層が露出しており，10cm～1m 程度の粒径の岩石が流

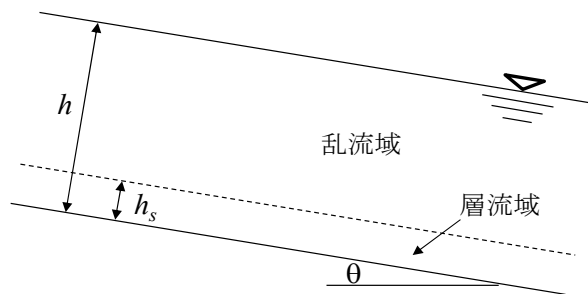


Fig. 4 Two Phase flow model

出していた。ただし，後述するように，これらの岩石は下流の宅地までは到達していなかった。浸食厚さは非常に薄く，Fig. 3 (b) に示すように，多くの領域で浸食厚さは 1m 以下であった。

Fig. 3 (d) に示すように，神達地区の西の道路や住宅の敷地内には，約 50cm の厚さで火山灰が堆積した痕跡があった。また，Fig. 3 (f) に示すように，流路工周辺や住宅の敷地内には多くの流木が堆積していた。これらの流木に火山灰があまり付着していないことや地震計による揺れの計測時刻などから，これらの土砂や流木は泥流発生時に一気に流れて来たのではなく，神達地区周辺に一旦堆積した後に泥流発生後も続いた豪雨によって流されてきた可能性がある。また，調査時の神達地区の地盤の様子を見ると，Fig. 3 (g) のように，溶岩層が露出している場所も見られ，約 2m のステップ状の地形となっている場所もあった。

3. 泥流の数値シミュレーションの概要

3.1 基礎方程式

神達地区周辺で発生した泥流の流動特性を明らかにするために，泥流の平面二次元解析を行った。解析に用いた基礎方程式を以下に示す。

水及び土砂の混合物の質量保存則（江頭・伊藤，2004）は以下のようなものである。

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

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（江頭・伊藤，2004）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，Fig. 4 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（江頭・伊藤, 2004）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（江頭・伊藤, 2004）は以下のようである．

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

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

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．

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

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（江頭・伊藤, 2004）は以下のようである．

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

3.2 解析条件

解析領域は，Fig. 5 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（Fig. 5, 7-13 の背景写真は国土地

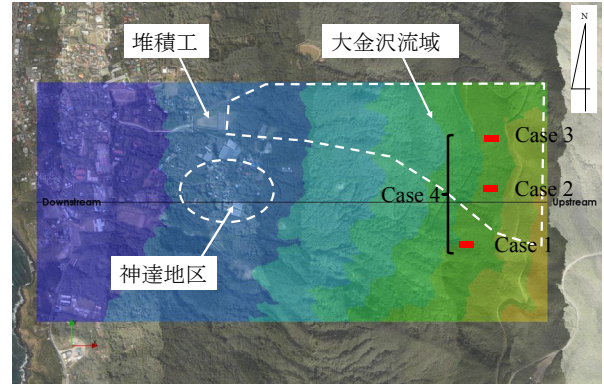


Fig. 5 Calculation domain

理院より提供，コンター図はiRICのGUIを用いた）．

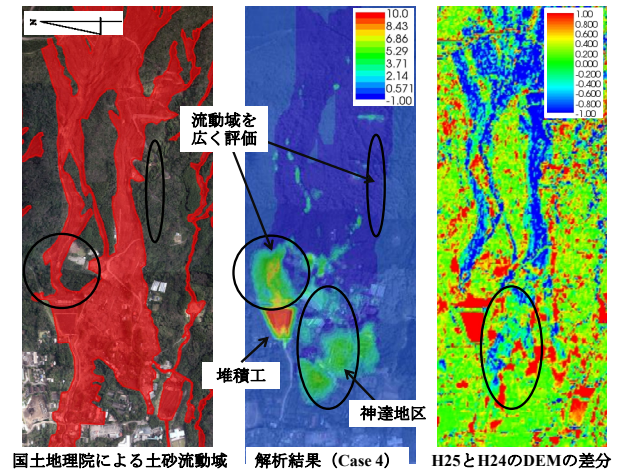


Fig. 6 Horizontal distribution of mud flow area (GSI, 2013), Horizontal distribution of land surface deformation by numerical analysis, Horizontal distribution of land surface deformation by DEM data from GSI and Tokyo, 2013)

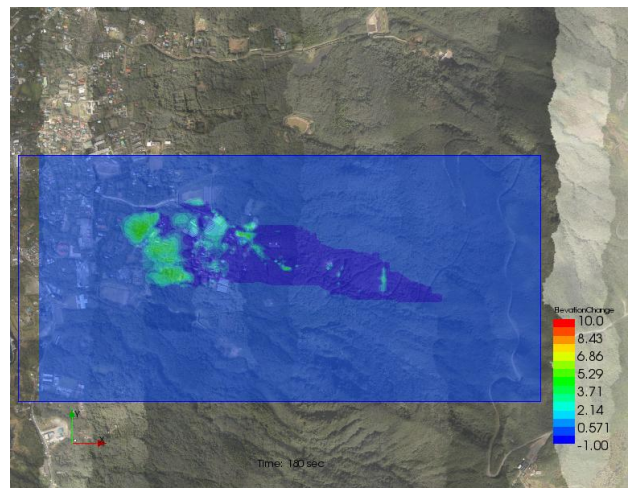


Fig. 7 Horizontal distribution of land surface deformation after 180 s in Case 1.

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（国土地理院, 2012）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

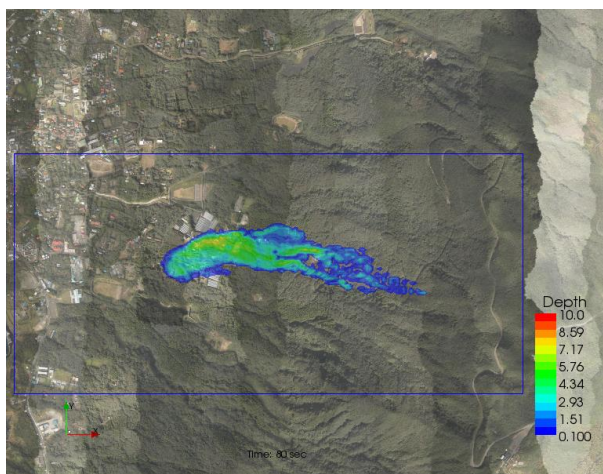


Fig. 8 Horizontal distribution of flow depth after 80 s in Case 1.

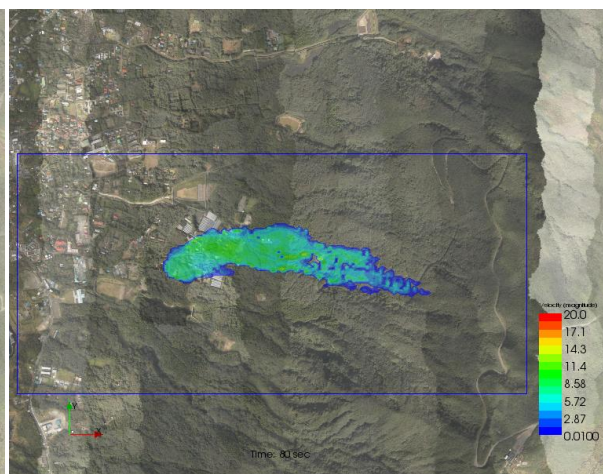


Fig. 9 Horizontal distribution of velocity after 80 s in Case 1.

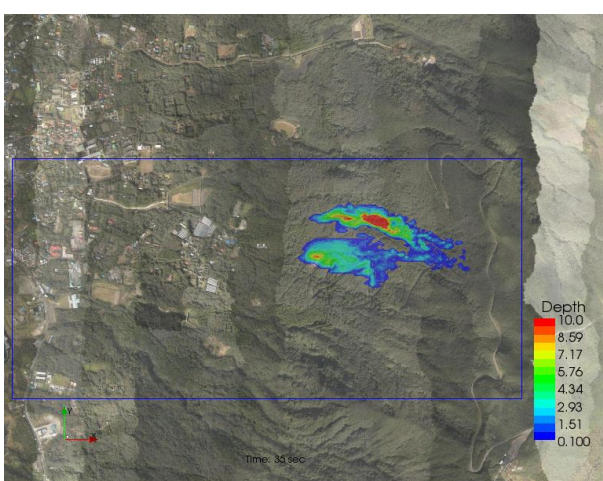


Fig. 10 Horizontal distribution of flow depth after 35 s in Case 2.

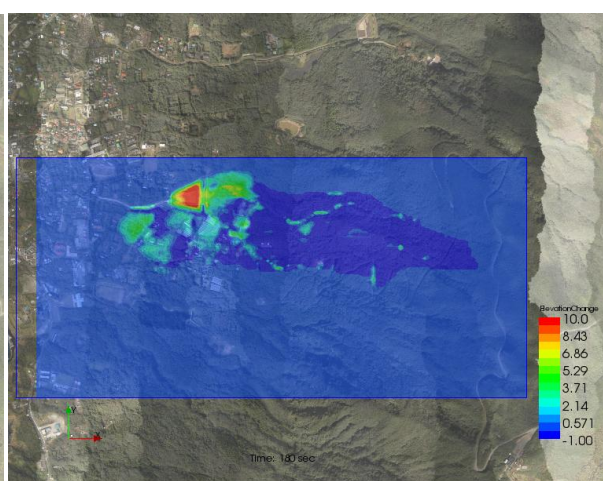


Fig. 11 Horizontal distribution of land surface deformation after 180 s in Case 2.

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。

4. 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。Fig. 6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（国土地理院，2013）、DEMによる浸食・

堆積域の平面分布（国土地理院，2012；国土地理院，2013）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。

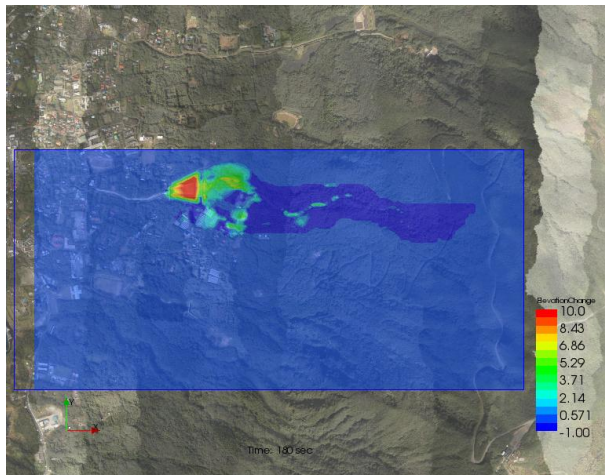


Fig. 12 Horizontal distribution of land surface deformation after 180 s in Case 3.

Fig. 7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、Fig. 8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、Fig. 9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。

Fig. 10にCase 2の35秒後と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、Fig. 11に示すように、堆積工に捕捉された。

Fig. 12にCase 3の180秒後の浸食・堆積域の平面分布を示す。図に示すように、Case 3の斜面崩壊による土砂は全て大金沢に流れ、堆積工に流れ込んだことがわかる。

Fig. 13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。

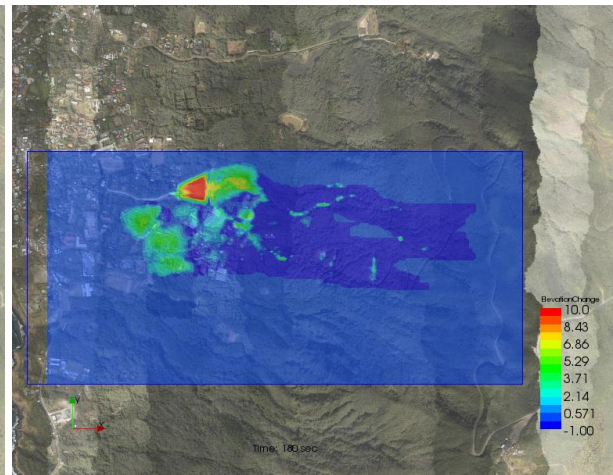


Fig. 13 Horizontal distribution of land surface deformation after 180 s in Case 4.

5. 結論

伊豆大島で発生した泥流の概要を紹介するとともに、層流域と乱流域を考慮した平面二次元の泥流数値解析モデルを開発して伊豆大島で発生した泥流の数値解析を行い、解析モデルの適用性および泥流の流動特性について検討を行った。得られた成果をまとめると以下のようなものである。

- 1) 現地調査によると、流出した土砂の多くは火山灰であり、神達地区より下流域に堆積した土砂の多くも火山灰である。なお、斜面中流部からはスコリアや巨礫も流出しているが、下流域まで流れていない。
- 2) 現地調査によると、表層の火山灰層の厚さは1m程度であり、火山灰層以下の層も泥流及びその後の豪雨で浸食され、浸食深は5m以上の領域もあった。
- 3) 数値解析の結果によると、斜面崩壊発生から土砂が神達地区まで到達する時間は約80秒であり、神達地区での泥流の流速は10m/s程度であったと推察される。
- 4) 層流域と乱流域を考慮した平面二次元の泥流数値解析モデルを構築した。本解析モデル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。
- 5) 数値解析の結果によると、中央の崩壊仮定地からの土砂の多くは、大金沢を流下し、堆積工に流れ込んだと考えられる。ただし、一部の土砂は真っ直ぐ西に流下し、神達地区の宅地に流れ込んだようである。

- 6) 解析結果によると，神達地区は堆積域である．一方，被災後の神達地区の地盤高さは，豪雨前と大きな違いは無い．これは，泥流が堆積した後の豪雨により，神達地区に堆積した土砂が流路工およびその下流域に流れていったためと考えられる．

謝 辞

本研究は科研費補助金若手研究(B)(研究代表者：竹林洋史)，科研費補助金特別研究推進費(研究代表者：東畑郁生)，河川整備基金(研究代表者：清水義彦)の助成を受けて行われた．記して謝意を表します．

参考文献

江頭進治・伊藤隆郭(2004)：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.

気象庁(2013)：台風第 26 号による大雨．

国土地理院(2012)：平成 24 年度 DEM.

国土地理院(2013)：国土地理院災害情報共有マップ(地理院地図)．

土井一生(2013)：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.

東京都(2013)：平成 25 年度 DEM.

東京都大島町公式サイト(2013)．

読売新聞(2013)：2013 年 10 月 20 日読売新聞朝刊．

(論文受理日：2014 年 6 月 11 日)