

# iRIC-Morpho2DHを用いた土石流・泥流の数値シミュレーション

## Numerical simulation of debris/mud flow using iRIC-Morpho2DH

たけばやし ひろし  
竹林 洋史

京都大学防災研究所 准教授

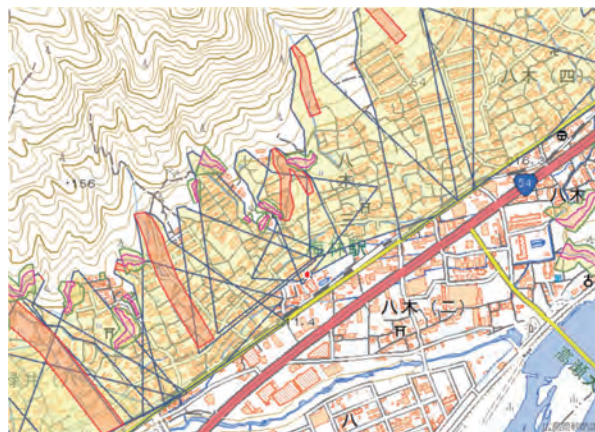


### 1. はじめに<sup>1)</sup>

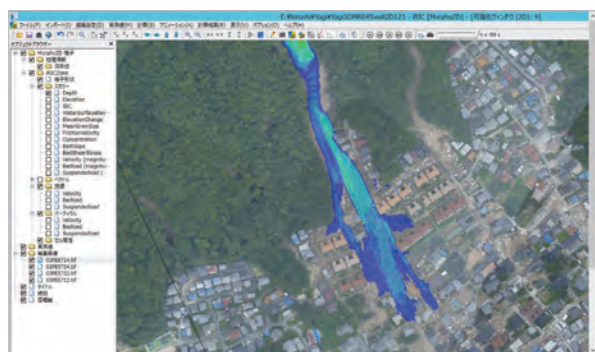
2018年の西日本豪雨の時の広島県、2019年の台風19号による宮城県、2022年の停滞前線による新潟県など、降雨強度が高い雨によって発生する表層崩壊に起因した土石流・泥流による土砂災害が毎年のように発生している。今後、地球温暖化に伴い気象特性が極端化することが予想されており<sup>2)</sup>、平均降水量が変化しない条件であっても降雨強度の高い雨の発生回数は増加することが予想されている。総降水量が少なくても降雨強度が高いと表層崩壊は発生しやすいと考えられるため、地球温暖化によって表層崩壊に起因した土石流・泥流の発生回数は増加することが予想される。そのため、土石流・泥流から市民の生命と財産を守るためには、土砂災害対策施設の設計や住民の避難などのハード・ソフト対策を検討するために必要な精度で土石流・泥流の流動・氾濫特性を評価することが重要となる。

土石流・泥流対策を実施する上で必要となる情報としては、土石流・泥流の氾濫域、流動深、流速、生産土砂量などであろう。例えば、土石流の土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫域は、**図-1**に示すように、土石流扇状地の上流端付近である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の堆積域を想定し、地盤勾配が緩やかになる勾配2度の地点を土石流氾濫範囲の下端としている。土石流氾濫域の設定にこのような簡便な方法が用いられているのは、溪流数が非常に多いことと、このような計算方法でもある一定レベルの精度で氾濫域が予測できるためである。しかし、実際の土石流は、氾濫域に存在する建物や道路の影響を受け、より複雑な平面形状で氾濫・堆積する。また、2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流は、本川源頭部での発生から宅地に到達するまでの時間が100秒程度と見積もられており<sup>3)</sup>、周辺は広い範囲で土砂災害警戒区域が重畳していることを考えると(**図-1**)、豪雨及び斜面崩壊発生後に避難をする場合は、土砂災害警戒区域の中の安全な場所の情報が必要である。このように、土石流の土砂災害警戒区域内の住民にとっては、より詳細な土石流氾濫域の情報が必要で

ある。さらに、一般に土砂災害対策を検討するときに用いる土石流溪流からの土砂流出量は、支川からの土砂流出は考慮せず、最も規模の大きい単一の溪流からの土砂流出量を用いる。しかし、前述の2014年の広島市安佐南区八木三丁目や後述する2018年の西日本豪雨時の広島市安芸区矢野東の土石流など、支川が存在する一つの流域において一回の豪雨イベントで複数の斜面崩壊が発生し、複数の溪流から土石流として土砂が流出することは非常に多い。**図-2**に示す著者らが開発している無料の解析インターフェースiRICに導入している土石流シミュレーションモデルMorpho2DHでは、各支川で発生した斜面崩壊を考慮すれば、複数



**図-1** 広島市安佐南区八木三丁目周辺の土砂災害警戒区域(土砂災害ポータル広島)



**図-2** iRIC上で土石流の数値シミュレーションを実施している様子(背景:国土交通省)

の支川で発生した土石流・泥流を考慮した土砂流出量の推定が可能となる。また、斜面崩壊の発生から宅地に土石流・泥流が到達するまでの時間や宅地で氾濫時の土石流・泥流の流速や流動深の時空間的な分布も解析可能であり、宅地内の家屋ごとに有効で実施しやすい避難方法を個別に提案できる。このように、数値シミュレーションによる土石流・泥流の解析では、効率的で効果的なハード・ソフトの土砂災害対策を検討するための情報を提供することが可能である。

一方、土石流・泥流の数値シミュレーションによる氾濫域の解析は、従来の土石流の土砂災害警戒区域の計算方法に比べると時間がかかると思われている。しかし、iRIC-Morpho2DHを使うと、非常に短時間で溪流における土石流・泥流の流動過程や土石流・泥流の氾濫域の解析が可能である。例えば、本稿で紹介するような解析の場合、細かい点の検討や改善を除けば数時間～1日程度で初期条件の設定から解析結果の動画作成まで可能であり、解析時間の問題も解決しつつある。

iRIC-Morpho2DHは、土石流・泥流が斜面崩壊発生地点から斜面・溪流を流動して宅地などの緩勾配域で堆積するまでの過程全てを平面二次元で解析する数値シミュレーションモデルであり<sup>3)~7)</sup>、一部上述したように、以下のような機能や現象を考慮した土石流・泥流の数値シミュレーションが可能である。

- ・複数の崩壊
- ・複数の支川
- ・溪床・河岸の浸食
- ・砂防ダムや治山ダムによる土砂の捕捉
- ・家屋や建物による遮蔽
- ・溪流及び宅地における土石流ハイドログラフの自動計算
- ・一般曲線格子の使用 (図-3)

また、iRIC インターフェースは以下のような機能を有している。

- ・国土地理院等の DEM データのダウンロード
- ・国土地理院等の衛星写真のダウンロード
- ・Google Earth に解析結果の画像や動画を出力 (図-4)

本稿では、2018年に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の二次元数値シミュレーションの結果を例にして、土石流の数値シミュレーションによる解析技術を紹介する。なお、iRIC-Morpho2DHは平面二次元の流況の計算や掃流砂・浮遊砂を考慮した河床変動解析も可能であるが<sup>8)</sup>、本稿では土石流・泥流の解析のみを紹介する。

## 2. 2018年7月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の実態<sup>1)</sup>

2018(平成30)年7月6日と7日に中国・四国地方

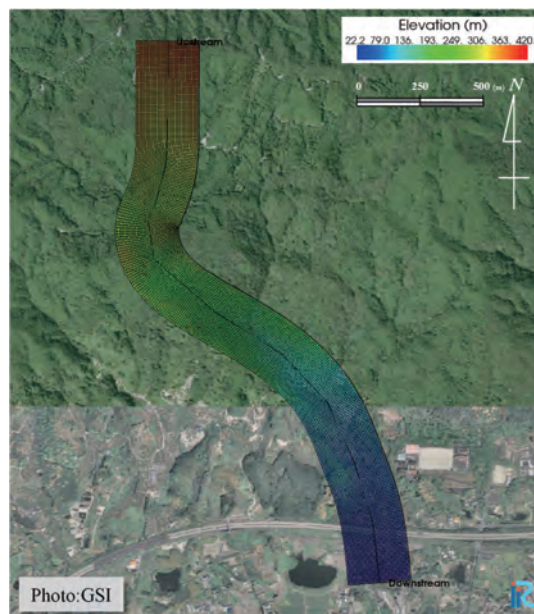


図-3 土石流の解析に用いた一般曲線格子の例<sup>4)</sup>

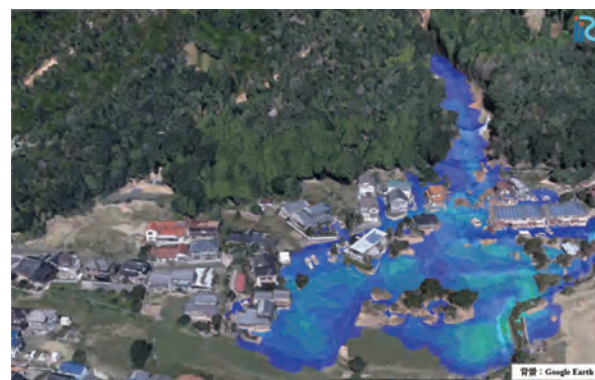


図-4 土石流の流動深のシミュレーション結果を Google Earth に出力した例

を中心として、西日本の広い範囲で豪雨となった。広島市においても市の南部を中心に雨が長時間降り続けるとともに線状降水帯が形成され、降雨強度の強い雨が観測された。その結果、非常に多くの土砂災害が発生し、甚大な被害が発生した。広島市では、4年前の2014年にも多くの土砂災害が発生している。そのため広島県では、一般には土石流を捕捉する機能を有していない治山ダムについても可能な場合は土石流を捕捉できる機能を持たせた設計とするなど、様々な対策が進められているところであった。

広島市安芸区矢野東の梅河団地は、広島市南部の矢野峠に続く県道34号線と矢野川の東に位置している(図-5)。多くの人的被害を発生させた土石流が流下した図-6に示す溪流は、梅河団地の東に位置しており、団地の北端付近に東から西に土石流が流入した。梅河団地の西側は崖となっており、崖の下には工場が県道及び矢野川の東に位置している。溪流の地質は花崗岩であり、地盤の表層は花崗岩が風化した真砂土に加え

て、球状風化した直径数 m の巨礫が存在している。山頂から宅地までの斜面は平均 24 度の急勾配となっている。土石流は大きく二つの溪流から発生しているが、両溪流は宅地に流入する直前に合流しており、合流点のすぐ下流に図-7 に示す治山ダムが建設されている。治山ダムは、2018 年 2 月に完成したばかりのものであり、発災直前の時点では土砂はほとんど貯まっていなかったと考えられる。一般に、治山ダムは土石流を受け止めるようには設計されていないが、本治山ダムは土石流を受け止めて溪流からの流出土砂を堆積させることも考慮した設計となっている。

斜面崩壊は、図-6 に赤丸で示した山頂付近の三カ所で発生しており、図中の真ん中と右の崩壊が発生した

溪流は、約 100m 下流で合流して南側の溪流(写真右側)となっている。また、前述したように、北側の溪流(写真左側)と南側の溪流は治山ダムの直上流で合流している。溪流の浸食幅は北側の溪流の方が広く、土石流の規模は南側の溪流よりも北側の溪流の方が大きかったと考えられるが、この点は数値シミュレーション結果のところで議論する。浸食された溪流には、球状風化した直径数 m の花崗岩が残されている。

図-7 は被災後の治山ダムの様子を示す。治山ダムは二つの溪流の合流点の直下流に位置しており、写真左上が北側の溪流、写真右上が南側の溪流である。治山ダム建設時の堆積可能容量は 2,659m<sup>3</sup> であり、ダム建設後に大きな出水を経験していないこととダムが満砂して土石流が越流したことから、2,659m<sup>3</sup> 以上の土砂が流れてきたことがわかる。ここで、治山ダム両岸の浸食状況に着目すると、右岸側(写真左側)斜面はほとんど浸食されていないのに対して、左岸側(写真右側)斜面は非常に高い位置まで浸食されていることがわかる。これは、南側(写真右側)の溪流からの土石流が先に治山ダムに到達し、治山ダムの堆砂域を埋め、北側(写真左側)の溪流からの土石流が、先に堆積した土砂の上を流れた可能性が高いことを示す。なお、住民によると、宅地には少なくとも 2 回は土石流が流れてきており、一回目は 19 時 50 分頃、二回目は 10 分後の 20 時頃である。

図-8(a)は溪流から土石流が宅地に流れ込んだ場所である。写真の奥には、治山ダムが見える。図-8(b)の Google Earth のストリートビューが示すように、被災前には多くの家屋が存在していたことがわかる。図-8(c)は溪流からの土石流が宅地に流れ込んだ場所を上空から下流に向かって撮影したものである。土石流が宅地に流れ込んでいる場所は家屋に作用する土石流の応力が大きいため、多くの家屋が破壊されていることがわかる。宅地内の大まかな土石流の流れを赤い矢印で示している。前述のように、土石流は宅地北側(写真右側)を流れて宅地西側(写真奥)の崖から崖下の工場に流れている。また、一部の土石流は南(写真左側)に分岐して宅地内の道路に沿って流れ、一部は矢野川

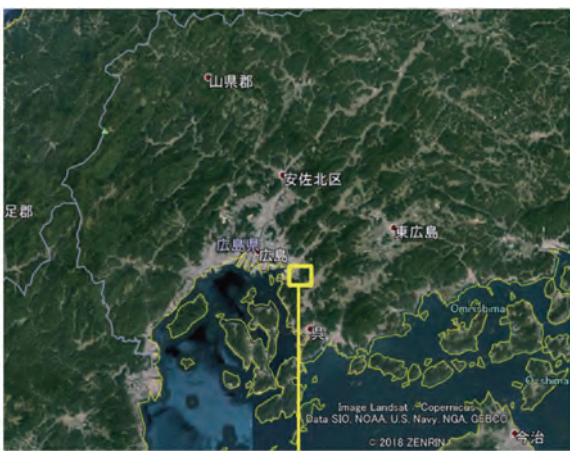


図-5 広島市安芸区矢野東梅河団地の場所(背景: Google)



図-6 梅河団地北西の溪流の被災後の様子



図-7 被災後の治山ダムの様子



(a) 土石流が宅地に流れ込んだ地点の被災後



(b) 土石流が宅地に流れ込んだ地点の被災前 (Google)



(c) 宅地内の土石流の流動経路

図-8 溪流が宅地に流れ込んでいる場所の様子

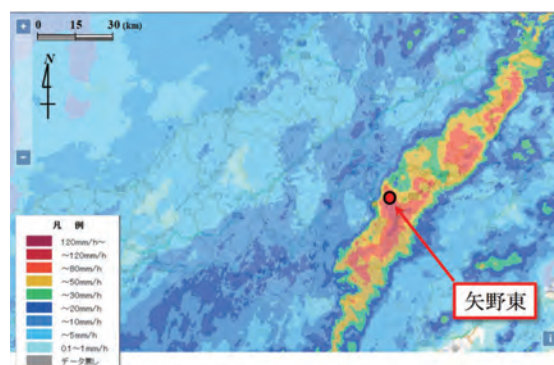
まで達している。

図-9は宅地内で土石流が分岐した地点の被災後の様子である。写真右の家屋は家屋全体が破壊されているが、写真左の家屋は一階のみが被害を受けて二階は全く損傷していないことがわかる。このように、僅か数メートルの位置の違いで家屋の損傷状態が大きく異なっている。これは、宅地内の土石流の被害を予測する場合、家屋に作用する応力などを数メートルオーダーの解像度で推定する必要性を示すものである。

図-10(b)は、CXバンドレーダーによって得られた梅河団地における2018年7月6日の降雨強度の時間変化である。雨は14時頃から強くなり、19時15分に時間換算で97mmの最大降雨強度を記録している。宅地に流れ込んだ土石流が発生したのは19時50分頃と20時頃であり、ちょうど雨が降り止むタイミングであった。図-10(a)に一回目の土石流が発生した19時50分におけるCXバンドレーダーによって得ら



図-9 土石流分岐部の家屋の被災状態



(a) 19時50分におけるCXバンドレーダーによる降雨強度



(b) 梅河団地における降雨強度の時間変化

図-10 梅河団地における2018年7月6日の降雨強度

れた矢野東周辺の降雨強度の平面分布を示す。土石流が発生した時間帯は南西から北東方向に伸びる線状降水帯が形成されている。一回目の土石流が発生した19時50分の時点における総降水量は168mmであり、2014年に広島市で発生した斜面崩壊・土石流の多くが総降水量200mm以上の場所で発生したことを考えると<sup>9)</sup>、少し小さめの値である。

### 3. 広島市安芸区矢野東で発生した土石流の数値シミュレーション<sup>1)</sup>

#### 3.1 解析条件

初期地形データは国土地理院により被災前に測定さ

れたものであり、平面的に5mの解像度のDEMデータである。解析格子は、道路上を流れる土石流を表現するとともに家屋の形状を表現するため、2m×2mの比較的細かい格子を用いる。なお、地形データは、iRIC インターフェースを用いてDEMデータを三次スプライン曲線で内挿補間した。土石流の発生は実現象に即して斜面崩壊を発端として発生するものとした。そのため、本解析の境界条件は、約5m<sup>3</sup>の流体化した水と土砂の混合物が斜面崩壊物質として初期の斜面に流速ゼロで存在するとしている。表層崩壊は、[図-6](#)に示す北側の溪流の山頂付近に二カ所、南側の溪流の山頂付近に二カ所の合計三カ所を考慮する。これら三カ所の斜面崩壊の発生時刻の関係は不明であるが、治山ダム周辺の状況から、南側の溪流からの土石流が北側の溪流の土石流よりも先に発生していると考えられるため、本解析では南側の溪流の二カ所の斜面崩壊を最初に同時に発生させ、後から北側の溪流の斜面崩壊を発生させている。なお、宅地を襲った二回目の土石流は、一回目の土石流が宅地に流れ込んでから10分後に発生していると考えられるが、本解析では解析時間短縮のため、南側の溪流からの土石流が流れ下った直後に（南側の溪流の土石流発生から100秒後）北側の溪流で斜面崩壊を発生させている。なお、本土石流のように土石流の流動距離が長い場合は、下流域での土石流の規模は土石流の流動過程で溪床や河岸などを浸食して取り込んだ土砂と水の量でほぼ決定されるため、斜面崩壊の大きさは土石流の規模にほとんど影響を与えない<sup>3)</sup>。治山ダムは非浸食性の構造物とし、高さは現地で計測した値を用いた。宅地の中の家屋は、高さ8mの非浸食域とした。ただし、土石流によって流された家屋については、本解析では家屋が無いと仮定して扱っている。

### 3.2 結果と考察

[図-11](#)に数値シミュレーションによって得られた土石流の流動深と地盤変動量の時空間的な変化を示す。南側の溪流で発生した二つの土石流は20秒後には合流し、流下とともに浸食した溪床や河岸の土砂と水を自身に取り込みながら規模を拡大させ、65秒後には治山ダムに流れ込んでいる。治山ダムに流れ込んだ土石流は、治山ダムに土砂を堆積させるとともに、一部は治山ダムを乗り越えて下流の宅地に流れている。その後、北側の溪流で発生した土石流が治山ダムに流れ込んでいるが、ほぼ満砂の治山ダムを乗り越えて宅地に流れ込んでいる。

数値シミュレーションによると、山頂付近の南側溪流の崩壊発生から土石流が溪流出口付近の家屋に到達するまで65秒となっており、治山ダムより上流での

土石流の平均速度は約8.6m/sである。また、北側溪流からの土石流が溪流出口付近の家屋に到達するまでは58秒となっており、治山ダムより上流での土石流の平均速度は約9.6m/sである。これらの土石流到達時間は、適切な避難方法を考える上で重要な情報となる。北側の溪流からの土石流が宅地に到達した時点の土石流の深さは約3mであり、宅地内では家屋に衝突した時に5m以上となっている場所もある。これらの土石流の深さや速度の情報は、砂防ダムの設計や家屋の被害予測などに利用可能である。

数値シミュレーションによると、治山ダムよりも上流域の地盤の浸食量は6,376m<sup>3</sup>であり、治山ダムの堆積可能容量である2,659m<sup>3</sup>を大きく上回っている。本数値シミュレーションによる治山ダム上流の堆積土砂量は2,425m<sup>3</sup>であり、堆積可能容量に近い値である。なお、iRIC-Morpho2DHでは、砂防・治山ダムの設定は堤体と同じ高さを有する非浸食壁ポリゴンをiRICインターフェース上で設定するだけであり、堆砂に関して特にパラメータの調整などはしていない。また、北側溪流と南側溪流で土石流による浸食幅を比べると、現地調査と同様に治山ダムに近いところでは、北側溪流の浸食幅の方が南側溪流の浸食幅よりも広がっている。しかし、南側溪流は二カ所で斜面崩壊・土石流が発生しているため流出土砂量は2,983m<sup>3</sup>となっており、北側溪流からの流出土砂量3,393m<sup>3</sup>と大きな違いは無い。そのため、従来、溪流からの土砂流出量の予測は、最も規模の大きい単一の溪流からの土砂流出量を用いることとなっているが、本研究の対象溪流のような場では流出土砂量をかなり小さく見積もってしまう危険性がある。

[図-11\(k\)](#)に治山ダムを考慮していない条件で得られた280秒後の地盤変動量を示す。[図-11\(j\)](#)と比較すると、治山ダムへの土砂の堆積が無いため、宅地に流れ込んだ総土砂量は多くなっている。しかし、土石流氾濫範囲はあまり変わっていないことがわかる。これは、土石流が宅地の北端を東から西に流れ込み、治山ダムが無いことによって増えた土砂の多くが宅地を通過して宅地西の崖を通過して崖下の工場に流れ込んだためである。よって、治山ダムが無いことによって一部の家屋や工場の被害は大きくなるが、宅地内の氾濫域には大きな影響が出ない。これらの結果は、土石流を宅地外に速やかに流せるような道路形状を考えて宅地を造成することにより、土石流の被害を少なくすることが可能となる一つの例となっている。

## 4. おわりに

2018年に広島市安芸区矢野東で発生した土石流災害の現地調査結果を紹介するとともに、平面二次元の土

石流・泥流数値シミュレーションモデルである iRIC-Morpho2DH によって得られた結果を例にして、土石流の数値シミュレーションによる解析技術と解析結果の利用方法について紹介した。

これまでの多くの流砂・河床変動の研究者による研究成果によって、様々な土砂災害現象についてハード・ソフトの土砂災害対策を検討する上で有用な結果が得られる数値シミュレーションが可能となっている。これらの数値シミュレーション技術を積極的に利用して、より経済的、効果的、合理的な土砂災害対策が実施されることが期待される。

参考文献

- 1) 竹林洋史・藤田正治：2018年7月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性、土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, I.859-I.864, 2019.
- 2) IPCC AR4, 2007, Publisher: Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 3) Takebayashi H. and Fujita, M.: Numerical Simulation of a

- Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model, Geosciences, 10, 45, 2020.
- 4) Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita, Koichiro Ohgushi: Numerical modeling of debris flows using basic equations in generalized curvilinear coordinate system and its application to debris flows in Kinryu River Basin in Saga City, Japan, Journal of Hydrology, 615, Part A, 128636, 2022.
- 5) Egashira, S. and Ashida K.: Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, pp.391-400, 1992.
- 6) 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, pp. 33-43, 2004.
- 7) 江頭進治、佐藤隆宏、千代啓三：砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響、京都大学防災研究所年報, 37号、B-2, pp. 359-369, 1994.
- 8) Takebayashi, H: Modelling braided channels under unsteady flow and the effect of spatiotemporal change of vegetation on bed and channel geometry. GBR 8, 671-702, 2017.
- 9) 松四雄騎: 2014年広島豪雨災害時の斜面崩壊・土石流について (速報その2: 降雨と崩壊の分布)、http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster\_reports/20140820Hiroshima/201408Hiroshimma\_Rep2.html, 2014.

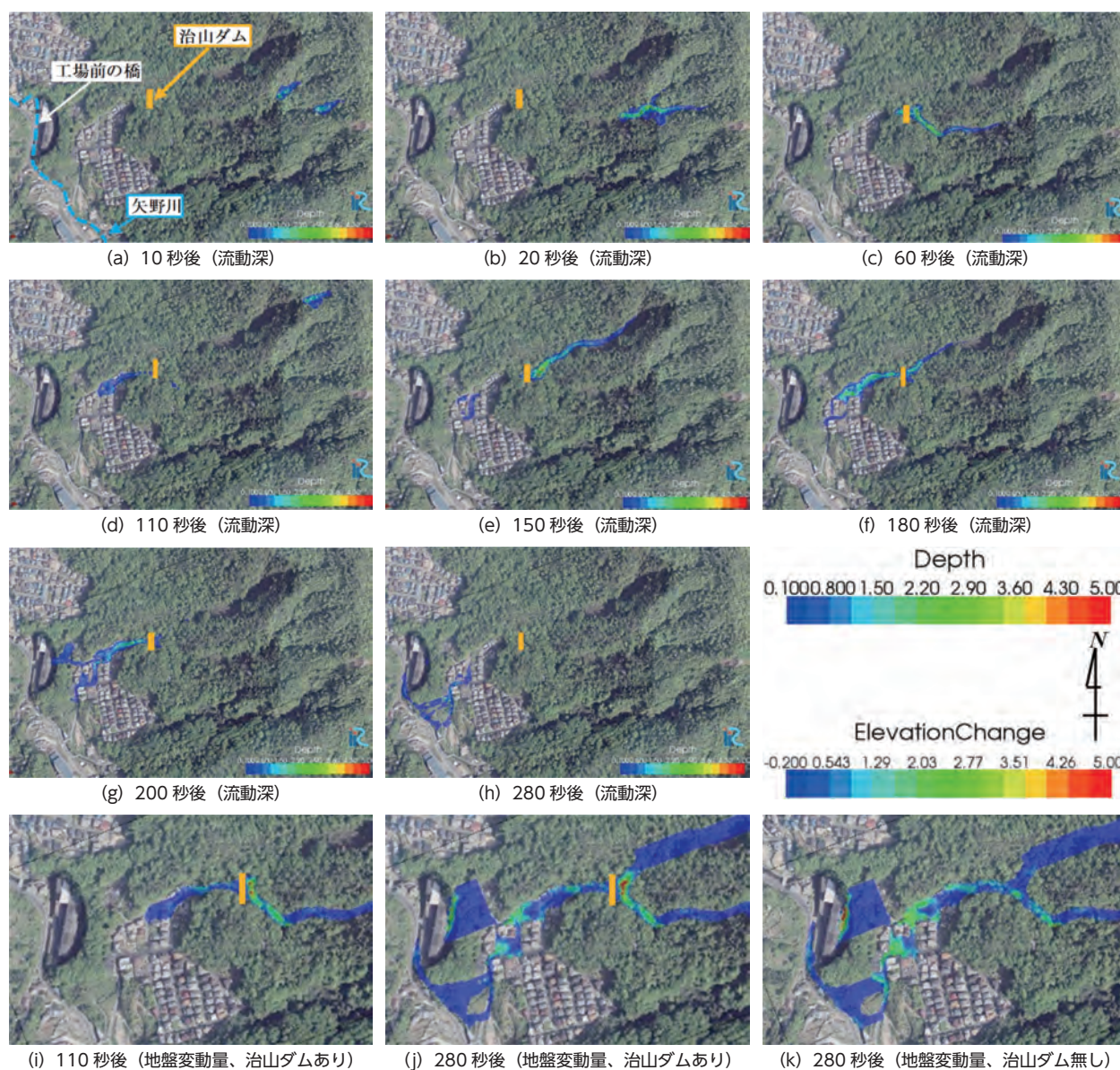


図-11 梅河団地に流入した土石流の数値シミュレーションによる流動深さと地盤変動量の時間変化 (背景: GSI, 単位: m)