

MAS を用いた土石流氾濫シミュレーションに関する研究

A Study of boulder flow flood simulation using multi-agent-system

広兼道幸*, 宮脇悠輔**, 井上祐平***

Michiyuki Hirokane, Yusuke Miyawaki, Yuhei Inoue

*工博, 関西大学教授, 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

**関西大学大学院, 総合情報学研究科知識情報学専攻 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

***関西大学, 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

In this study, we attempted to simulate the phenomenon that the debris flow is flowing down from the dangerous mountain on the 2 dimensional mesh space by using the multi-agent-system. This is possible to set up some elements in the debris flow with more practicable method by using the multi-agent-system than the numerical simulation. And also, it is possible to control the movement of each element in the debris flow by some simple local rules. It is easy to understand and modify the parameters in the local rules.

Key Words: Multi-Agent-System, Simulation, Debris Flow

キーワード: マルチエージェントシステム, シミュレーション, 土石流

1. はじめに

現在, 土砂災害は毎年のように全国各地で発生しており, 私たちの暮らしに大きな影響を与えている。また, その一方で新たな宅地開発が進み, それに伴って土砂災害の発生するおそれのある危険な箇所も年々増加し続けている。2009年7月に九州・中国地方において, 記録的な豪雨が発生し, それに伴って起きた土石流により15名もの犠牲者が発生した。また2010年7月に起きた全国的な集中豪雨により発生した土石流により, 2名の犠牲者があった¹⁾。

土石流とは, 水を含んだ大量の土石が一体となって急速に流下する現象のことであり, 山地の小さな河川を流下する土砂と水とが混合し合った流れは, 土石流となり, 周辺の地域に被害を与える²⁾。土石流は斜面が不安定や表流水が集まりやすいといった素因と, 大雨や集中豪雨といった誘因が組み合わさる事によって発生し, 速度が大きい, 巨礫や倒木を流体に含む, 突発的に発生するなどの特徴をもつ。こういった特徴のため, ひとたび土石流が起こってしまうと, 周辺の家屋や施設などに, 全壊あるいは半壊などの被害をあたえる。また, 事前の警戒・退避の遅れにより, 大きな人的被害をもたらすこともある。確かな前兆現象などが明らかにされていない土石流の発生を予測することは非常に困難である³⁾。また土石

流の発生誘因のひとつである集中豪雨は, 近年の局地的豪雨の最近10年(平成10年~平成19年)の全国平均と30年前(昭和51年~昭和62年)の全国平均を比較すると, 時間50mmの豪雨は約1.5倍に, 時間100mmの豪雨は約2倍に増加しており, 今後100年間で日降水量が100mm以上となる豪雨日数は, 現在の年3回程度から, 最大年10回程度に増加すると予測されており⁴⁾, 将来的には土石流の発生件数が増える事が予測できる。したがって, 現段階ではその氾濫区域を予測し, 発生した時の被害を抑えるようソフト面とハード面による対策をすることが必要不可欠である。

土石流対策として必要となる氾濫区域予測について, 現在のところ, 専門家による現地調査や過去の土石流氾濫からの調査の他に, 模型水路を用いた土石流の氾濫・実験予測⁵⁾, ニューラルネットワークを用いた予測⁶⁾, 土石流の現象を数式によってモデル化し⁷⁾, それを用いて土石流の氾濫領域のシミュレーション⁸⁾などの研究が行われている。しかし専門家による現地調査などによる方法では時間やコストがかかり, 模型水路を用いた予測では大型の模型水路を構築する必要があり, ニューラルネットワークを用いた予測では対象地域に適した地形や降雨データなどを用いた再学習が必要である。また, 数値シミュレーションでは, 実際にシミュレーションを実施するにあたって, 土石流の諸条件, 方程式中の定数の

すべてを定めなくてはならず、従来の連続式モデルを用いたシステムでは過去の同じ地質の地域におけるこれらの諸定数の調査結果や、土石流シミュレーション例を参考にするため、土砂や泥水における濃度や石礫の粒径といった値が一律に扱われてしまう可能性がある。従って、従来のシステムでは実際の土石流の再現性に限界があり、土石流を構成する土砂や礫などに関するパラメータや、土嚢などのように現地の細かな防災対策に応じてモデルを容易に変更することが難しい。これらのことより、上述したすべての方法に共通する問題点として、他の地域に適用するためには、該当地域のモデルを再度構築する必要があり、地域特性に合わせた形でモデル式などを容易に変更することが困難であることがあげられる。

複雑な社会・自然問題を表現・解決するにあたってマルチエージェントシステム（以下 MAS）が挙げられる。各要素をエージェントとして設定する事によって、エージェント間の協調を図り、個々の能力以上に複雑な問題を解決する事が出来る⁹⁾。MAS を用いた既存研究として、災害時の避難シミュレーション等が挙げられる¹⁰⁾。

本研究では、MAS を用いて土石流氾濫の流下現象を表現するシミュレーションの検証を行った。具体的には、数値シミュレーション^{7),8)}で扱われた偏微分方程式で表現されている時間的および空間的意味を単純かつ理解しやすいルールに置き換え、これらのルールに基づき土石流を構成する各エージェントが自律・協調して移動する仕組みとし、全体として土石流の氾濫シミュレーションを実現した。

2 システムの概要

2.1 土石流の構成要素

本研究においては、土石流要素を、水、砂、礫（小）、および礫（大）の4つのエージェントの相互作用を表現するため土石流の要素を構成した。これらのエージェントは、大量に降り注いだ雨を水とし、水によって流される砂、それから数値シミュレーションでは平均粒径として一律で扱われている礫を、石や大きな岩などの大きさに配慮して、それぞれ礫（小）、礫（大）で表現した。また、それぞれのエージェントは、移動、停止、再移動など、固有のパラメータを持ち、相互に協調しながら、注目セルと図-1に示す注目セルに隣接する近傍8セルとの関係によって、移動や停止を行うこととした。礫エージェントのルール内で停止する際に用いた水の値については、事前に行った実験結果により調整を行い、決定した。

水は大量の雨が降り注いでいるという事と土石流の流れを作る原因となっていることから、一番流入量が多く、また勾配の差の影響をほとんど受けない特徴を与えた。注目セルと近傍セルとの高低差が0m以上の場合、高低差の低い方へと流れ出ると定めた。

次に砂は注目セルと近傍セルとの高低差が1m以上の場合、流下する事と定めた。

大小の礫は、石や大きな岩によって構成されているので、水や砂とは違い流下しにくいという特性を持っている。そのため、水や砂とは違い高低差がないと停止してしまう事とした。しかし、何度かの実験の中で、高低差が少ない場所でこの特性が働くとすべての礫が停止してしまうという結果が出たため、大小の礫は同じセル内に存在する水の流れの影響を受けることで砂と同じ性質を有するというパラメータを加えることとした。

- ・礫（小）は、粒径80cmの大きさの石礫を想定した。
- ・礫（小）は同じセル内に水が一定量より多い場合は、砂と同様に注目セルと近傍セルとの高低差が1m以上の場合、流下すると定めた。
- ・同じセル内に水が一定量未満しか存在しない場合は、近傍セルとの高低差が2m以上で流下すると定めた。
- ・停止条件は、同じセル内に水が一定量より多い場合は、近傍セルの高低差が1m未満で停止するとした。
- ・同じセル内に水が一定量未満しか存在しない場合は、近傍セルの高低差が2m未満で停止するとした。

礫（大）は、粒径160cmの大きさの石礫を想定した。礫（小）より大きな岩などによって構成されていると考えられるので、当然高低差の影響をより受けると考えられる。

- ・礫（大）は同じセル内に水が一定量より多い場合は、砂と同様に注目セルと近傍セルとの高低差が1m以上の場合、流下すると定めた。
- ・同じセル内に水が一定量未満しか存在しない場合は、近傍セルとの高低差が3m以上で流下すると定めた。
- ・停止条件は、同じセル内に水が一定量より多い場合は、近傍セルの高低差が1m未満で停止するとした。
- ・同じセル内に水が一定量未満しか存在しない場合は、近傍セルの高低差が3m未満で停止するとした。

(i-1,j+1)	(i,j+1)	(i+1,j+1)
(i-1,j)	(i,j)	(i+1,j)
(i-1,j-1)	(i,j-1)	(i+1,j-1)

図-1 注目セルと近傍セルの関係

2.2 衝突の影響

衝突の影響は、構成要素が衝突した時に移動・停止などの行動に対し受ける影響を考慮したものである。土石

流内においては、粒径の大きい要素と粒径の小さい要素が衝突した場合、粒径の小さい要素ははじかれ、再び移動を開始する。礫（小）は注目セルに礫（大）が一定量より多く存在していた場合、衝突の影響が反映されると設定し、注目セルと近傍セルの勾配の差が0以上の場合、高低差の低い方へと流れ出ると設定した。

2.3 流出配分

MASによる土石流被害範囲予測のためには、格子状の空間の各セルにおける状態を設定する必要がある。そこで必要になるのがローカルルールである。この土石流被害範囲予測において土石流が流れていくというルールを決めなくてはならない。はじめに、隣接するセルの高さの低い方へと土石流を流すというルールを決める。これにより、斜面を下って山から町のある平地の方へと土石流が流れていく様子があらわされる。2つの流入地点に発生した土石流の構成要素である、水、砂、大小の礫は、地形データの高低差に従って低い方へと流下していく。ここで必要になるのが、流出配分である。どれ位の量の土石流がどの方向へ向かって広がっていくのかをローカルルールのひとつとして決めることで土石流の動きをコントロールすることが可能になる。

水の流出配分は、注目セルから8つの近傍セルに水が流れたかどうかを確認する。8つの近傍セルとの高さの差をそれぞれとする $h_1 \sim h_8$ 。ここで $h_i (i=1 \sim 8)$ が負の場合（すなわち着目セルより高い場合）は0とする。着目セルの水の量を Q とするとそれぞれのセルへの流出配分は以下の式(1)で求める事が出来る。

$$Q_i = \frac{h_i}{\sum h_i} \times Q \quad (1)$$

砂の場合は $h_i (i=1 \sim 8)$ が1以下の場合には0とし、礫(小)の場合は、注目セルに水が一定量以上ある場合は $h_i (i=1 \sim 8)$ が1以下の場合には0とし、ない場合は $h_i (i=1 \sim 8)$ が2以下の場合には0とした、礫(大)の場合は、注目セルに水が一定量以上ある場合は $h_i (i=1 \sim 8)$ が1以下の場合には0とし、ない場合は $h_i (i=1 \sim 8)$ が3以下の場合には0とし、式(1)と同じ考え方で各々の流出配分量をきめた。

2.4 慣性力の影響

本研究では、高い地点から低い地点に土石流が流下した時、その流下速度によって生じるそれぞれのエージェントの慣性力を考慮した。慣性力を考慮することにより、流出配分のローカルルールでは流出することの出来ない地点、すなわち流出地点よりも標高が高い地点に実際の土石流が到達する現象を再現することが可能になるものと考えた。

判定の対象となる近傍セルの高度が中心セルより高く、また、中心セルから流出する土石流の要素と同じ要素が

その地点に存在した場合、その前のステップでその近傍セルから中心セルに対して要素の流入がおこったものとして判定する。図-2はこの慣性力を示した図である。各近傍セルと中心セルの高度を比較し、近傍セルが中心セルより高い関係を抽出する。今回はセル $(i-1, j+1)$ と中心セル (i, j) との間でその関係があったとする。つぎに両方のセルに同じ要素があるかを判定する。水ならば水、砂ならば砂というように要素ごとに判定を行い、同じ要素があった場合、前ステップでセル $(i-1, j+1)$ から中心セル (i, j) に流入があったとする。流入により慣性力が発生するとして、セル $(i-1, j+1)$ から中心セル (i, j) を挟むセル $(i+1, j-1)$ に対する方向に慣性力が働くとした。

慣性力が働くと、その方向に対し要素が多く流入すると考えられる。ローカルルールでは中心セルと近傍セルとの傾斜の差が大きい方に流入量が増加するようになっている。ここから、慣性力の働いた方向にある近傍セルと中央セルとの勾配の差に修正値を加える。修正値は、慣性力が働く始点となったセルと中央セルの勾配の差に地形の抵抗などを考慮した変数をかけたものである。変数は1未満0以上の範囲で設定し、地形の状況により任意に変更させていいものとする。これにより中央セルとの勾配の差がマイナスである地点、つまり注目セルよりも高い位置にある近傍セルに、要素が流れる可能性が出てくる。すなわち、前ステップに中央セルに流出した地点が要素の流れる地点よりも高い場合、その修正の大きさにより勾配の差がプラスに転じる場合がうまれることをあらわす。

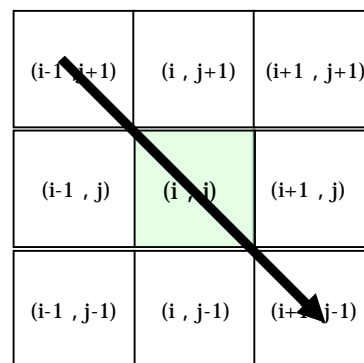


図-2 慣性力の働き

2.5 実験空間

本研究では、地形データとして広島県太田川支流の辻ノ河原川流域周辺の地形を実験空間とした。この地域は、1988年7月に土石流災害が実際に発生し、甚大な被害を与えた地域である。同時に、被害のあった範囲にあわせる形で実施された数値シミュレーションによる結果もあり、MASでの結果の評価に利用できるものと判断した。MASを用いてシミュレーションを行うためには格子空間が必要になる。図-3は本研究で用いた辻ノ河原川流域周辺の地形に格子を重ねた図であり、濃くなっている

部分が土石流の流入地点である．まず始めに実際の地形の傾斜を元にして，格子状の実験空間をエクセルによって作成し，1セルあたり10m間隔を設け，49×49のセルを割り当てた．格子状の空間の各セルには標高を割り当て，土石流の流入箇所である2ヶ所，(2, 11)と(2, 26)のセルを土石流の流入地点として設定した．土石流は1ステップ毎にセル(2, 11)と(2, 26)に定められた流入地点に発生する．表-1に示すように本研究では，土石流の総流入量をあらかじめ設定した．この値は土石流の発生直後の現地調査の結果によって得られた値を利用した数値シミュレーションの研究¹¹⁾で用いられたものと同じ条件とした．2つの流入地点には，それぞれ1ステップ毎の流入量の半分が溢れ出ることとする．本研究では1ステップを1秒とし，10ステップ目においてすべての土石流が流れ出ることと決めた．

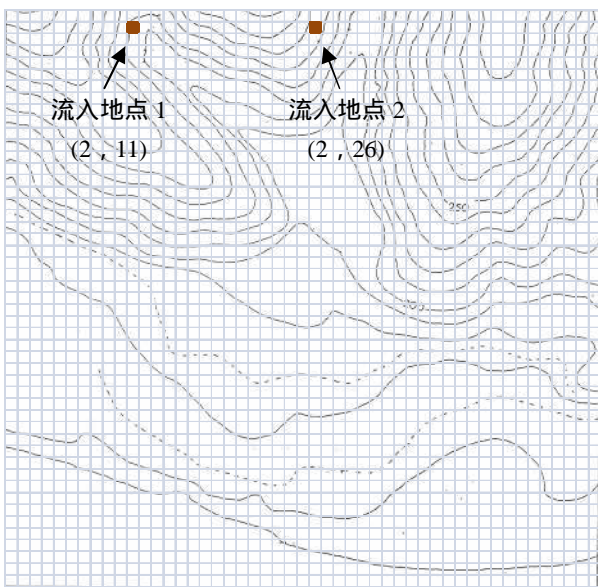


図-3 辻河原川流域周辺の地形

表-1 土石流の総流入量と1ステップ毎の流入量

	総流入量	1ステップ毎の流入量
水	2000m ³	200m ³
砂	1000m ³	100m ³
礫(小)	600m ³	60m ³
礫(大)	400m ³	40m ³

2.6 計算ステップ

実際のシミュレーションは，あらかじめ決めておいた初期設定とローカルルールを用いて行った．ステップごとに2つの流入地点に発生した土石流はローカルルールで定められたように高低差の低い方のセルへと移動する．本研究では溢れ出る土石の量が0となり，また土石流を構成するすべての要素が停止するまでステップを繰り返した．図-4は計算ステップをフローチャートで示した

ものである．以下はシミュレーションの流れをまとめたものである．

- (1) はじめに初期値の設定を行う．
- (2) 1ステップ目がスタートし，流入地点に土石流が発生する．
- (3) 土石流はローカルルールに従って，隣接するセルの高さの低い方へと流れ出る．またこの時に流れ出る水の割合は8近傍の勾配の比によって決定される．
- (4) 次に停止の処理を行う．この時は各構成要素(水，砂，大小の礫)に与えられた停止条件を元にそれぞれの停止の処理を行う．
- (5) ここでステップがひとまず終了する．この段階において，溢れ出た水の量が総流入量に達しているかどうかを確認する．水の量が総流入量に達していた場合はYESの方向へと進み，水の量が総流入量に達していない場合はNOの方向へと進み，ステップを1追加する．
- (6) YESに進んだ場合は，次に構成するすべての要素が停止したかを確認する．すべての構成要素が停止していた場合は計算ステップを終了することとする．すべての構成要素がまだ流れ続けている場合は，NOの方向へと進みステップを1追加する．

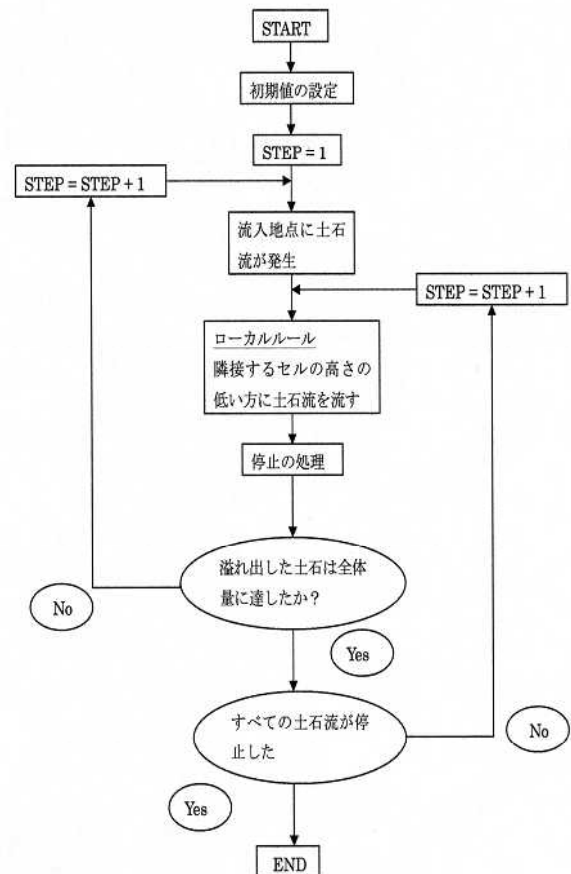


図-4 計算ステップのフローチャート

3. 実験結果と評価

3.1 実験 1

実験 1 では、構築したシミュレーションの再現性を検証するために、表 1 に示した土石流の総流入量を条件に砂と礫の流下シミュレーションを実施した。また土石流の数値シミュレーション⁸⁾で用いられている運動方程式を実験空間の条件に適用し、実験結果と比較した。

砂の流下結果を図 - 5 に示す。図 - 5 において濃い色で敷き詰められている範囲が、本システムの砂の流下範囲の結果で、線で囲まれた範囲が数値シミュレーションによる土石流の氾濫範囲の結果によるものである。これは本システムが、数値シミュレーションと同等の結果を近似的に表現できたといえる。しかし、図 - 5 の西側においては、数値シミュレーションを超える部分も現れている。この現象は、中流において西側の標高が東側に比べて低い事により、大きく流下した事が考えられる。これは砂が慣性力を考慮したときの弱くすることで解決できると考えられる。

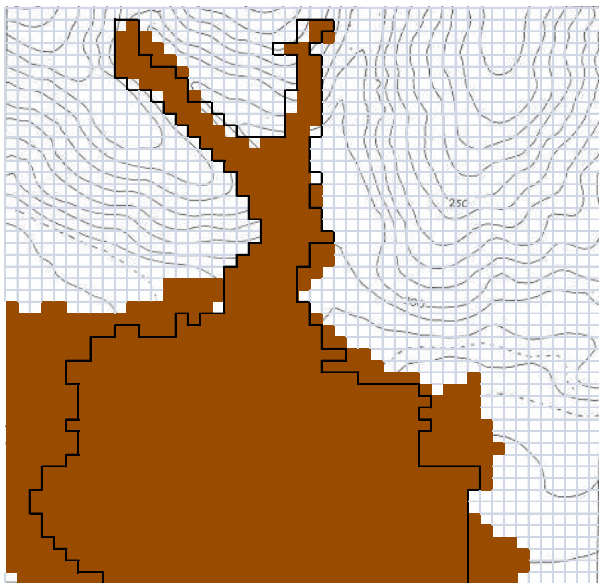


図 - 5 砂の流下結果

礫の流下結果については図 - 6 に示す。図 - 6 において濃い色で敷き詰められている範囲が、礫（大）が流下した範囲であり、薄い色で敷き詰められている範囲が、礫（小）が流下した範囲である。そして線で囲まれた範囲が、平均粒径を用いた数値シミュレーションによる石礫の氾濫範囲の結果によるものである。この結果より辻ノ河原川流域周辺においては上流から中流において、礫による大きな被害が予測される。また礫においても本システムでは、数値シミュレーションの流れを再現する事が出来た。しかし、図 - 6 の西南側では、数値シミュレーションでは予測していない範囲においても、礫が停止せずに流下するという結果が出た。これは、水と砂の流下範囲が中流から下流の西側において大きく、それによって礫も西南側まで流下したと考えられる。

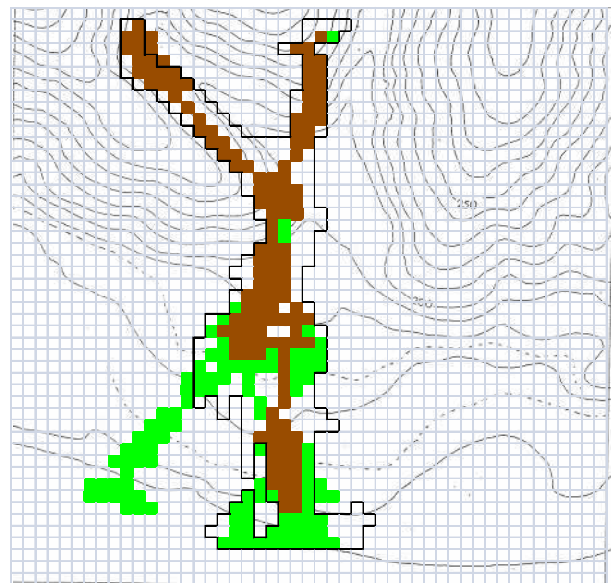


図 - 6 礫の流下結果

3.2 実験 2

実験 2 では、実験 1 で検証したシミュレーションの再現性を踏まえて、MAS の利点である実験空間の状況に応じてシミュレーションの条件を容易に変える事が出来、そして高い再現性が得られるか検証した。実験環境として、辻ノ河原流域の土石流による被害を軽減するための防災設備（砂防ダム）の整備を行い、土石流の規模が 30% になった事を想定した。表 - 2 に示した土石流の総流入量を条件は、表 - 1 の条件に 0.3 倍にした値であり、この条件を用いて砂と礫の流下シミュレーションを実施し、土石流の数値シミュレーション⁹⁾における結果と比較した。

表 - 2 実験 2 における総流入量と 1 ステップ毎の流入

	総流入量	1ステップ毎の流入量
水	600m ³	60m ³
砂	300m ³	30m ³
礫(小)	180m ³	18m ³
礫(大)	120m ³	12m ³

設備想定時の砂の流下結果については、図 - 7 に示す。図 - 7 において濃い色で敷き詰められている範囲が、本研究の砂の流下範囲の結果であり、線で囲まれた範囲が、数値シミュレーションによる土石流の氾濫範囲の結果によるものである。これは実験 1 と同様に、土石流の流れを再現する事が出来たと言えるが、西側においては砂が停止せずに数値シミュレーションを超えた部分現れた。この現象は、実験 1 と同様に東側に比べて、西側の標高が低い事により、砂が大きく流下した事が考えられる。これも慣性力の影響を小さくするようパラメータを調整することで解決できると考えられる。

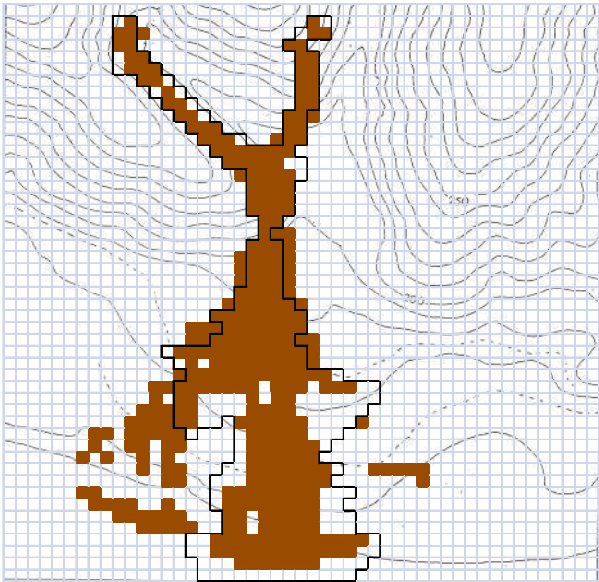


図 - 7 設備想定時の砂の流下結果

設備想定時の礫の流下結果については図 - 8 に示す。図 - 8 において濃い色で敷き詰められている範囲が、礫(大)が流下した範囲であり、薄い色で敷き詰められている範囲が、礫(小)が流下した範囲であり、線で囲まれた範囲が、数値シミュレーションによる石礫の氾濫範囲の結果によるものである。設備想定時の礫においては、数値シミュレーションの流れと同等の結果を近似的に表現する事ができた。これは、設備想定時の水の大きな流れが上流から中流で止まり、それによって礫も中流付近で停止したと考えられる。

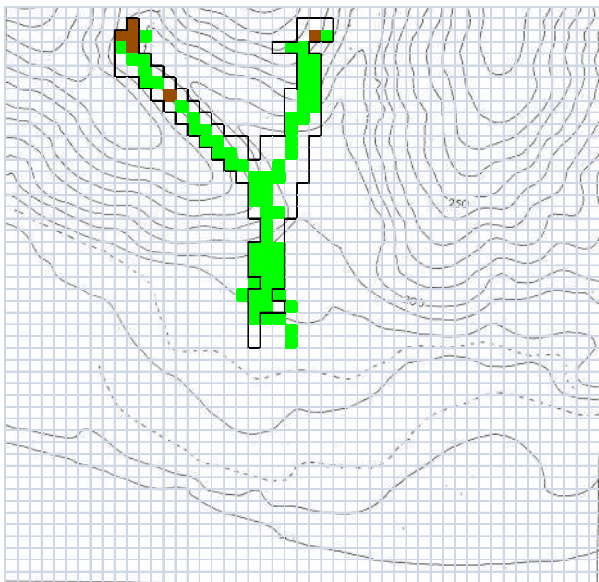


図 - 8 設備想定時の礫の流下結果

4. 終わりに

本研究では、土石流の構成を水、砂、礫(小)や礫(大)といったエージェントでモデル化し、MAS を用いて土石流の被害範囲をシミュレーションによって予測するシステムを構築し、また数値シミュレーションによる被害範

囲予測との比較を行った。

通常時の砂や礫の流下範囲においては、流下を表現する事ができた。しかし西側においては、数値シミュレーションでは予測していない範囲においても、停止せずに流下するという結果が出た。これは水の流下範囲が大きかったためと考えられ、水の流下条件を変更する事や、慣性力を考慮したときの調整値を変更する事で解決できると考える。また空間環境に合わせて条件を変えて行った実験結果も、流下の流れを表現する事ができた。これによりパラメータの変更の容易性を確認することができ、またその汎用性を確認できた。

今後の課題として、他の地域で検証を行うと同時に、様々なエージェントの移動ルールを細分化する事により細かな表現する事により完成度を高める事が出来ると考える。本研究では、事前に起こった災害時の降水量や堆積土砂量から流出量を決定したが、これらの量をモニタリングする技術と連動させることにより、氾濫区域の予測などが事前に可能となり、ソフト防災に活用することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省, 砂防.
<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/index.html>
- 2) 吉見吉昭: 土は襲う, 社団法人 地盤工学会, 1995.
- 3) 社団法人 地盤工学会関西支部: 土はおしゃべり, 地盤工学会関西支部「地盤工学広報企画委員会」, 1998.
- 4) 社団法人 中部経済連合会: ゲリラ豪雨に備えて.
- 5) 岡田康彦: 土石流災害の予測に向けて, 山林, pp59-67, 2009, 1.
- 6) 荒木 義則, 古川 浩平, 松井 範明, 大木戸 孝也, 石川 芳治, 水山 高久: ニューラルネットワークを用いた土石流危険渓流における土砂崩壊のリアルタイム発生予測に関する研究, 土木学会論文 第 581 号 pp107-121, 1997, 12.
- 7) 江頭 進治, 芦田 和男, 矢島 啓, 高濱 淳一郎: 土石流の構成則に関する研究, 京都防災研究所年報 第 32 号, pp487-500, 1989.
- 8) 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 11, 2004.
- 9) 高玉圭樹著: マルチエージェント学習/相互作用の謎に迫る, コロナ社, 2003.
- 10) 松田 樹, 大野 晋: 高層複合施設における震災時火災を想定した全館避難シミュレーションに関する研究, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系(71), pp171-174, 2008, 06.
- 11) 広島県 土木部砂防課, (財)砂防・地すべり技術センター: 土石流対策総合調査にかかわるシミュレーション調査業務, 1990.

(2010年8月6日受付)