

土石流シミュレーションのための3次元地形モデルの自動生成 Automatic Generation of 3D Terrain Models for Debris Flow Simulation

○村瀬 孝宏^{*1}、杉原 健一^{*2}、沈 振江^{*3}
Takahiro Murase^{*1}, Kenichi Sugihara^{*2} and Zhenjiang Shen^{*3}

*1 中京学院大学 中京短期大学部 教授
Professor, ChukyoGakuin University.

*2 岐阜協立大学情報メディア学科 教授 博士(工学)
Professor, Gifu Kyoritsu University, Information Media, Dr. Eng.

*3 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授 博士(工学)
Professor, Kanazawa University, Faculty of Geosciences and civil Engineering, Ph.D.

Summary: Mountainous countries are prone to natural disasters, especially mass granular flow disasters, such as avalanche and debris flow. Due to the difficulty of direct measurements of the flows, numerical and physical simulations are effective measures to predict and control mass granular flow. In our research, besides carrying out the granular flow simulations along an inclined channel, we use 3D building models placed on the 3D terrain model in which massive moving elements are placed for flow simulations. However, enormous time and labor must be needed to manually create these 3D models using 3D modelling software. In order to automate laborious steps, we are proposing a GIS and CG integrated system for automatically generating 'dynamic 3D models'. The proposed system succeeded in automatically generating 3D terrain models from key contour lines by straight skeleton computation. The system can perform a physical simulation using more realistic environment, such as 3D building models placed on 3D terrain models, and mass granular flow based on Newtonian mechanics. Dynamic 3D building models are created being made up of building parts for dynamic simulation. The moving building parts simulates the dynamic motion such as the collapse of 3D building models hit by a debris flow.

キーワード: 3次元地形モデル; 自動生成; 土石流シミュレーション; 建物倒壊シミュレーション; CG; GIS.

Keywords: 3D terrain model; automatic generation; debris flow simulation; building collapse simulation; CG; GIS.

1. はじめに

令和2年7月豪雨災害にみられるように地球温暖化による想定外の集中豪雨や巨大化した台風が甚大な被害をもたらしている。また、日本列島は地震活動期に入ったとされ、首都直下型地震や南海トラフ巨大地震の30年以内の発生確率は非常に高いとされる。こうした災害は、主に土石流や土砂崩れなど土砂災害によるものが多い。こうした災害を防止・軽減するために堰堤などの構造物によって土砂移動現象を無害化するような防災対策が急務である。このためにも地質学など、土石流や土砂崩れのメカニズムを研究する防災科学やそれを学ぶ防災教育が重要である。このとき土石流等のシミュレーションを行える3次元地形モデルは防災教育には有効である。筆者らのこれまでの研究¹⁾で、「キー等高線から表面のみで成り立つ3次元地形モデル」の自動生成には成功した。また、基盤地図やGoogle Earthから今ある「現状の表面のみで成り立つ3次元地形モデル」の構築は可能であるが、「力学シミュレーションを行える要素群」を備えた3次元

地形モデル(図1右参照)は現状ほとんど構築されていない。本研究では、土砂に相当する要素からなるレイヤーを備えた3次元地形モデルを自動生成し、「流れ盤に沿う土砂崩れ」というような土砂移動現象を、仮想空間の中で、このレイヤーを持つ3次元地形モデルで再現し、防災教育等を支援することを研究目標とする。ここで、「3次元地形モデル」を作成するには、3次元CGソフト等を用いて、多大の労力と時間が必要である。これまでの研究で図1右の建物の3Dモデルが示すように、電子地図上の建物境界線を長方形の集まりまで分割・分離し、各長方形の上にBox形状の建物本体、上から見て長方形形状の屋根を載せて、3Dモデルを自動生成する手法を提案した¹⁾。

本研究では、「土砂移動現象を再現できる要素群」を備えた3次元地形モデルと「物理シミュレーションの行える部材」で「部材の物理形状(幾何形状ではない)が重ならないような構造」で構築された3次元建物モデルを自動生成し、仮想空間内で、「土石流による建物倒壊のシミュレーション」を行えるシステムを提案する。

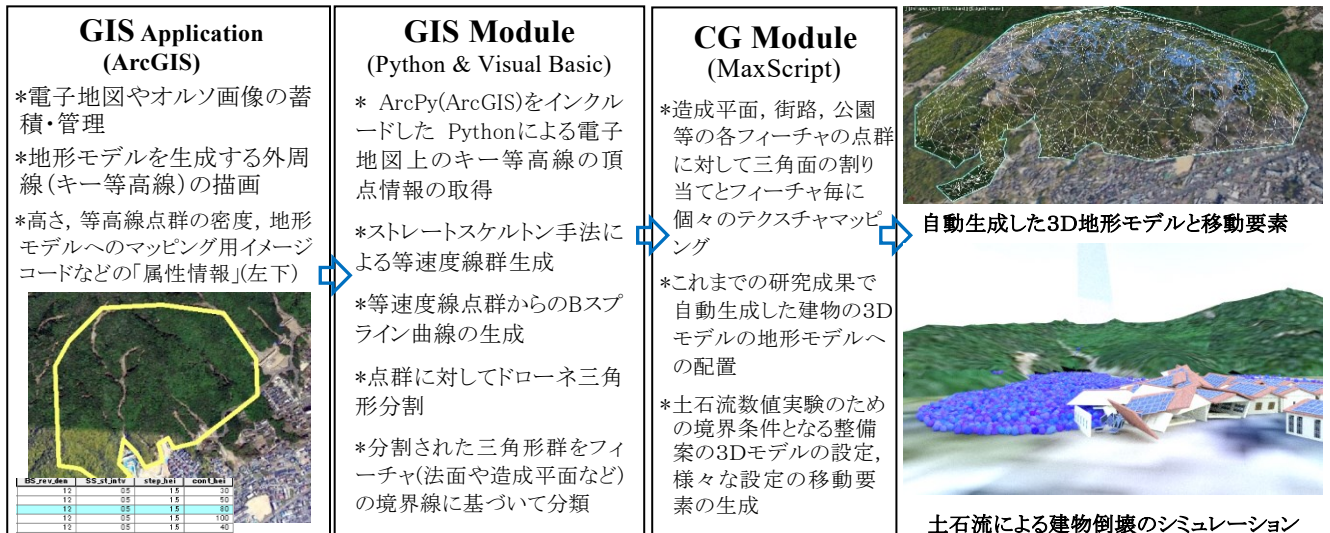


図 1. 斜面に移動要素を配置した3D 地形モデルの自動生成システムの構成と建物倒壊のシミュレーションのプロセス

2. 既往の研究

建物や地形を含む「3次元都市モデル」は、広範囲で多目的に利活用が期待される情報インフラであるため、自動的あるいは半自動的に構築する研究が盛んである。ステレオ画像の航空写真や衛星写真からコンピュータビジョン(CV)や写真測量、リモートセンシングの技術を用いて、建物や地形の3次元形状を復元する。特に昨今では、車載写真レーザ測量システム(MMS)やレーザースキャナー搭載のドローンにより建物の形状を計測・点群化し、点群や三角面要素による3次元都市モデルを構築する企業や大学は数多くある。しかし、レーザースキャナーによる計測や地物のステレオ画像からCVの技術で地物の3次元形状を復元できる場合もあるが、地物の形状は複雑で多様性があり、また、オクルージョン、あるいは、詳しくサンプリングできないところがあること、CVのソフトウェアの能力不足等で、実用に耐えられるレベルでの「完全自動復元」は達成されていない。

ここで、ドローン等による計測で、今ある現状の3次元都市モデルを構築できるが、例えば、整備案の3Dモデルはドローン等による計測だけでは構築できない。これは、「将来の整備案の3Dモデル」は、これから出来上がるもので、「現在はまだないもの」であるからである。通常、整備案の地形モデルは、等高線群を作図して、それらに基づいて地形モデルを生成する。しかし、この等高線群を作図するには時間と労力がかかり、また、トポロジー的に変化する等高線群を描くのは技術的にも難しい。提案する本システムは、平面図上のキー等高線(地形を囲む外周線)を描くだけで、内部に等高線群の自動作図、そして、3次元地形モデルの自動生成まで行き、製作効率を著しく向上させる。

等高線の自動作図について、CADソフトの分野で代表的なオートデスク社の製品 AutoCAD Civil 3D²⁾、及び、GIS(地理情報システム)で代表的な ArcGIS³⁾では、高さデータの与えられた点群に対して、同一の高さである

点群を等高線でつないで、等高線を描画する機能を持つ。

但し、この方法では、こうした高さデータを持つ点群データが前もって準備されていることが前提となる。また、複数の等高線において、対応付けられた点を持つ等高線が、その間に内挿関数を用いて、対応付けられた点間を内分する点を順に求め、つなぐことで等高線を自動作図する機能を持つCADソフトは存在する²⁾。しかしながら、起伏する稜線などに見られるような複数のピークを持つ尾根において、高さを上げるとともに、順に後退していく等高線は、自らの等高線と交差して、トポロジーが変化する可能性がある。こうした後退処理(縮小処理)においては等高線であるポリゴンの各辺がポリゴン内部に後退して行くとき、「交差判定」や「辺消失判定」を行いながら、縮小ポリゴンを描いていくストレートスケルトン手法(Straight Skeleton 以下 SS 法と略す)が有効であると考え、当手法によって、3次元地形モデルを自動生成する手法を提案した。但し、Aichholzer ら⁴⁾のストレートスケルトンの論文では、数学的にスケルトンが持つ性質、その証明は記述してあるが、スケルトンの構築手法の記述はないため、本研究での構築手法は独自の手法である。

3. ストレートスケルトンによる等高線の自動作図

3.1 ストレートスケルトン手法(SS法)とは

図2(a)で示すように、交差していない形状のSimpleポリゴンにおいて、ポリゴンの各辺がポリゴン内部に、各辺自らに平行に一定速度で移動縮小するとき、各頂点の軌跡を辿ることで得られる直線状の骨格が「ストレートスケルトン」である。Simpleポリゴンの縮小プロセスは、次のイベントが生じるまで続く。

- 1) **辺消失イベント**(Edge イベント) : 辺が縮小して消失する。消失辺の両側の辺が、以降は接する。
- 2) **分割イベント**(Split イベント) : Reflex頂点(内角が180度以上の頂点)が辺に交差して、ポリゴンを分割する。

分割されて2本になった辺と Reflex 頂点に付随する辺が、以降は接するという新たな隣接関係が生じる。

ストレートスケルトンはポリゴンの一定速度での縮小プロセスにおいて、各頂点が辿る「頂角の二等分線 (angular bisector)」と上記のイベントを経て生じる「ノード (線分と線分をつなぐ頂点)」の集まりとして形成される。図 2(a) は、縮小処理が進み、Reflex 頂点からの二等分線が伸びて、分割イベントが発生する直前の縮小ポリゴンを示す。図 2(b) では、二等分線と対向する辺がノード (node4) で交差して、分割イベントが発生し、ポリゴンが分割される。図 2(c) では、分割されたポリゴンで、さらに、分割イベントが発生し、2つのポリゴンに分割される。図 2(d) では、等速度で縮小するポリゴン群を全て表示し、辺消失イベントと分割イベントによるトポロジーの変化を表示している。図 2(d) の状態では、等高線を形成するための頂点 (ノード) が少ないので、この頂点を制御点とする「B-スプライン曲線」を生成する。B-スプライン曲線はなだらかな起伏の地形モデルを生成するにはふさわしい自由曲線である。この B-スプライン曲線上の点群に対して、ドローネ 3 角形分割を行った結果を図 2(e) で示す。さらに、本システムは土石流の力学シミュレーションを行う「移動要素」を 3 次元地形モデルのドローネ 3 角形面上に配置する。

本システムでは、3 次元 CG ソフトの 3ds MAX のスクリプト言語で開発したプログラムで 3D モデルを自動的

に作成するが、3ds MAX には TIN サーフェスを点群に割り付ける機能を有するものの、スクリプト言語には、点群をドローネ 3 角形分割する機能がない。

また、ドローネ 3 角形分割の処理には、自分自身を呼び出すことが必要であり、自分自身を呼び出すことのできる (recursive) 言語体系でなければならない。そこで、図 1 の GIS モジュールは、ドローネ 3 角形分割を行うプログラムを Visual Basic.NET で独自に開発した。

3.2 SS法におけるイベントとは

図 2 のポリゴンの縮小プロセスにおいて、ポリゴンの全辺の長さが短くなるわけではなく、長くなる辺も存在する。例えば、図 2(a) (b) で示す辺 ed1 と辺 ed2 は縮小処理で、長さが逆に伸びている。これは辺の両端の頂点の内角の和が 360 度以上であれば、その辺の長さは縮小処理で長くなり、内角の和が 360 度未満であれば、短くなり、「分割イベント」が起こらないかぎり、「辺消失イベント」でノードに収束する。縮小処理を一意に決める値は、縮小処理前後の辺間の距離：「縮小距離 (= d_{shri})」である。分割イベントが生じないとして、 i 番目の辺に対して、「辺消失イベント」が生じる距離 (= $e_{d_{shri}}$) は次の式で与えられる。

$$e_{d_{shri}} = L_i / (\cot(0.5 * \theta_i) + \cot(0.5 * \theta_{i+1})) \quad (1)$$

ここで、 L_i は辺長、 θ_i 、 θ_{i+1} は辺両端の内角を表す。但し、辺両端の頂点の内角を 2 等分する線がポリゴン内

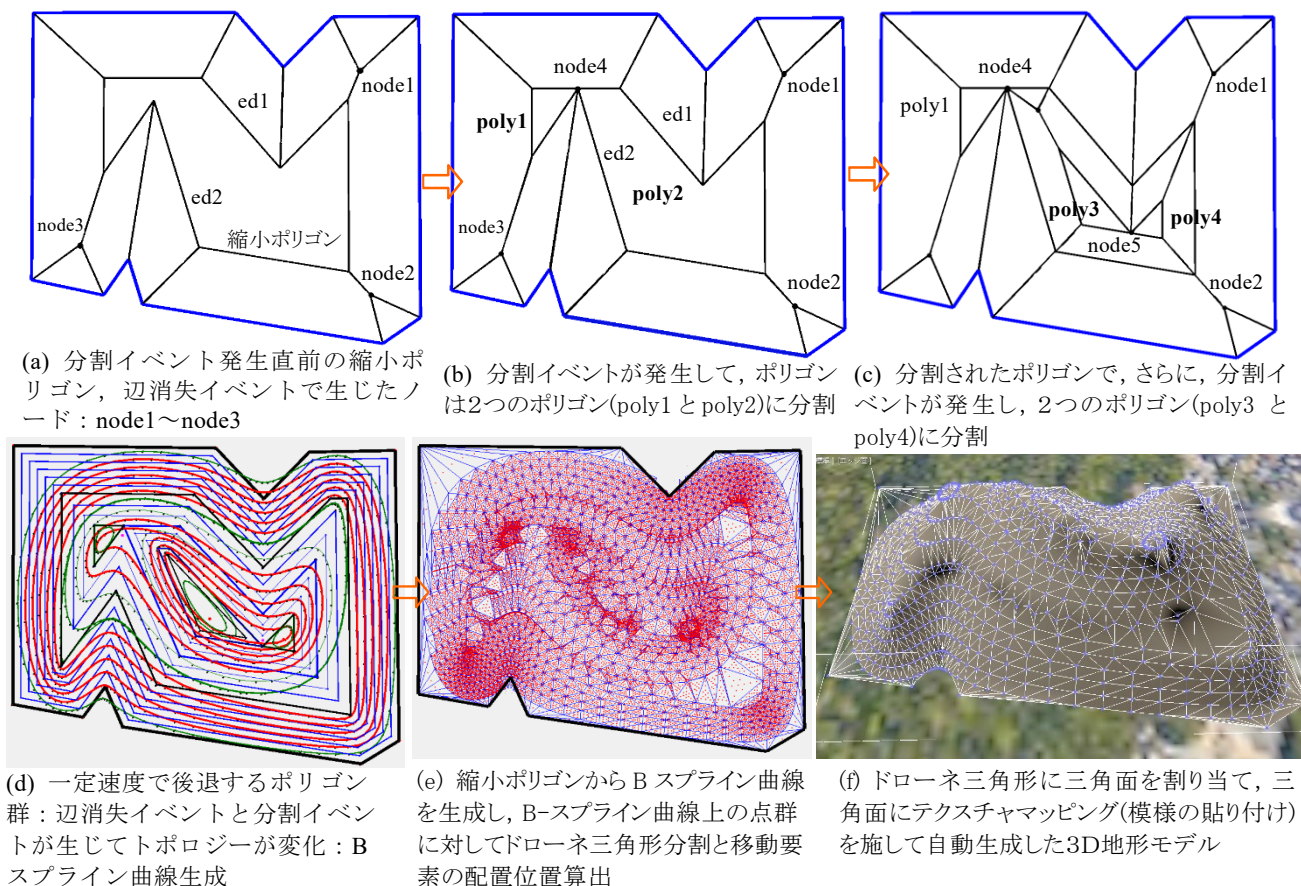


図 2. 等高線生成のためのポリゴンの縮小プロセスと分割イベント、生成された点群にドローネ 3 角形分割、三角形群に三角面の割り当て、テクスチャマッピングして自動生成した 3 次元地形モデル

部で交わるために、 $0.5 * \theta_i + 0.5 * \theta_{i+1} < 180^\circ$ となる必要がある。この条件を満たす全ての辺について、 d_{shri} を式(1)で求める。分割イベントが生じなければ、これらの d_{shri} の中で最小となる値が、「最初に辺消失イベント」が生じる縮小距離 (d_{shri}) となり、その辺が最初に消失する辺となる。本研究では、「分割イベント」は、縮小処理において最初に「辺消失イベント」が生じるまでの「 $e_{d_{shri}}$ 」の間において、分割イベントが生じるかどうかを調べる。

4. 自動生成のシステム構成とプロセス

研究における自動生成のシステム構成と「3次元地形モデル」の自動生成のプロセス、及び「動的3次元建物モデル」を用いた「土石流による建物倒壊シミュレーション」を図1と図4に示す。地形モデルの情報源は図1左に示すような電子地図上に描いた属性情報を関連付けた「キー等高線(外周ポリゴン)」である。キー等高線は、本研究で開発した ArcPy(ArcGIS)をインクルードした Python プログラムにより、外周ポリゴンの頂点と属性情報などを取得する。GISモジュール(図1)によって、次の前処理を行う。

- (1) 外周ポリゴンの各辺の長さや傾き、各頂点の内角の計算し「Reflex 頂点」(内角が180度以上の頂点)を調べる。
- (2) 「辺消失イベント」が生じる全ての辺について、上の式(1)を用いて、イベントが生じる縮小距離 (d_{shri}) を求め、その中で「最小の縮小距離(= d_{shri_min})」を求める。
- (3) その「最小の縮小距離」まで縮小処理を行い、「分割イベント」が生じるかどうか、Reflex 頂点からの「頂角の二等分線(angular bisector)」が「対向する辺」と交差するかどうかの「交差判定」を行う。
- (4) 「交差判定」で「分割イベント」が生じたと判断されたとき、Reflex 頂点からの頂角の二等分線と対向辺との交点を求め、スケルトンの「ノード」とする(図2(b)の node4 や図2(c)の node5)。分割イベントの結果、ポリゴンは2つ以上のポリゴンに分割される。分割ポリゴンにID番号をふり、ポリゴンの各辺の長さや傾き、各頂点の内角を再計算し Reflex 頂点か否かの判定等の分割処理を行う。分割された複数のポリゴンにこの「交点ノード」は所属し、その後、分割ポリゴンは別々に縮小処理を、ポリゴンが3角形になるまで継続する(図2(c)の3角形)。
- (5) 縮小処理において、「最小の縮小距離」までの「交差判定」で分割イベントが生じなかった場合は、「辺消失イベント」で生じるノードの位置を求める。
- (6) Reflex 頂点が存在する限り、ポリゴンは「分割イベント」の交差判定を行い、ポリゴンは分割される。Reflex 頂点がないポリゴンでは、縮小処理での「辺消失イベント」で、辺数を減らしていき、3角形になった段階で、そのポリゴンについて縮小処理を終了する。3角形はその各頂点の二等分線が交わる「内心」に収束して終了となる。
- (7) 縮小プロセスでの「等速度の縮小ポリゴン」が等高

線となる。縮小ポリゴンでは、頂点数が少なく、地形モデルには不十分なので、縮小ポリゴンの頂点を制御点とする B スプライン曲線を発生させ、その曲線を使い、なだらかな地形表面を形作する(図2(d)参照)。

(8) B スプライン曲線上の各頂点に対して、ドロネ三角分割を行い、三角面を割り当てる。具体的には、各頂点の「頂点座標」と三角面を形成する3頂点のID番号(並べた「頂点座標」の何番目の頂点か)をCGモジュールへ出力する。また、三角面内部に、三角面の辺を内分する点と辺に対向する三角面の頂点を結ぶ線分をまた内分する点を求めて、移動要素を配置する位置としてそのXY座標を算出する(図2(e)参照)。移動要素の位置をCGモジュールへ出力する。

CGモジュール(図1)では、GISモジュールから受け取った3角形の3頂点に三角面パッチ(patch)を割り当てる。三角面パッチを「地物」によって分類し、異なるテクスチャマッピング(模様の貼り付け)を施す。三角面上で「算出された移動要素位置」に土石流の力学シミュレーションを行う移動要素を複数個配置する。移動要素の「形状」やパラメータである「摩擦係数」、「跳ね返り性(ばね係数k)」をレイヤーで変えて、地層を構成し、土砂移動現象の力学シミュレーションを実現する。そのとき、移動要素が重なると、フック法則で反発してしまうので、水平方向・垂直方向で重ならないような位置にする。

倒壊する建物についても、同様に、建物部材が重なってしまうとフック法則で反発してしまうので離し、同時に、衝突検出できるように部材の形状を「凸包(Convex hull)」とするか、あるいは部材が「凹型立体(Concave)」の場合は、それを「凸包立体の集まり」まで分解する。

5. 力学シミュレーション手法について

5.1 DEM(離散要素法)について

本研究の土石流の力学シミュレーションは、DEM(離散要素法)に基づく。本研究では、3次元CGソフトである3ds Maxの「MassFXによる力学シミュレーション」を用いて、壁や屋根板、球状の移動要素を持つ「動的摩擦」、「静止摩擦」、「跳ね返り性」等のパラメータに様々な値を与え、力学シミュレーションを行う。

乾いた土石流やなだれは「粒子の流れ」とみなすことができるが、DEM(離散要素法)はこれら粒子の流れをシミュレートするには最適のツールとされる⁵⁾。DEMによる模擬実験では、粒子がどういった種類の岩石から成り立つかについてのパラメータが必要なく、正確な流れの模擬実験が行えるとされる⁵⁾。DEMによる数値計算は市販のソフトウェア、例えば、PFC3d (Particle Flow Code in three dimensions)⁶⁾で行うことができる。

DEMは、離散要素である任意のサイズの球状粒子の集まりが、力-変位則(フックの法則: $F=k \Delta x$)とニュート

ンの第2法則($F=m\alpha$)に基づいて、相互作用を行う。ここで、変位は「粒子間の重なり(衝突の深さ)」で表され、重なりが大きいほど、相互作用の力が大きくなる。

この粒子間に働く力は並列に繋がっている「ばね」と「油緩衝器」で例えられ、粒子が接触した時の力が算出される(Kelvin-Voigt モデル)。通常、粒子間の接触力は、粒子の面に垂直方向の力(垂直抗力: normal force)とそれに垂直な「せん断力」(shear force)に分けられる。粘性のない乾いた粒子の流れでは、粒子間の「面に垂直方向の力」である垂直抗力は「圧縮力」のみに限定される。即ち、引っ張り合う力は考えない。面の接線方向の力である「せん断力」については、クーロンの摩擦法則: $F^s = \mu |F^n|$ に従うとされる。ここで、 F^s は「せん断力」、 F^n は「垂直抗力」、 μ は摩擦係数である。

土石流離散要素法(DEM)の「要素」の素材は「硬さ」と「摩擦」で特徴づけられる。DEMにおける各粒子の動きと位置は、まず、重なりあう粒子を見つけ、その粒子間の「重なり(の深さ)」を調べる。次に、重なり(の深さ)から反発力を算出する。即ち、重なりが検出された粒子の動きと位置を入力した支配方程式から力とモーメントを算出する。算出された力とモーメントを入力したニュートンの第2法則から粒子の動きと位置を計算する。

5.2 MassFXによる土石流シミュレーションの特徴

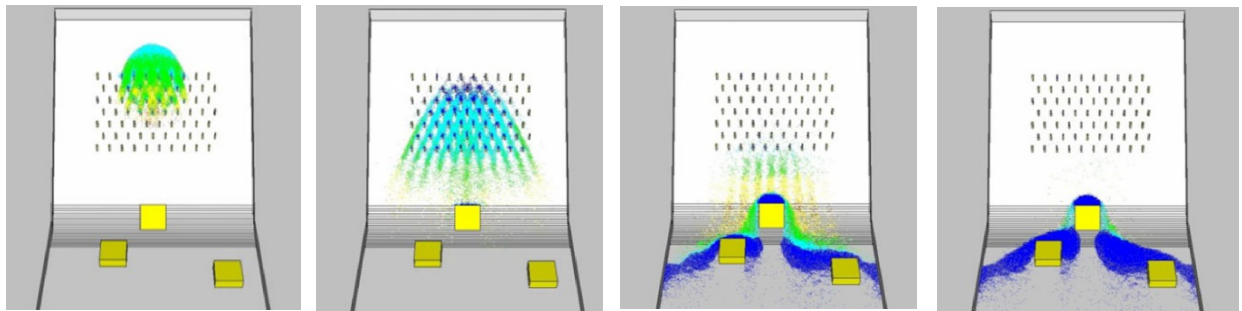
3ds MaxのMassFXでは、「動的摩擦」、「静止摩擦」、「跳ね返り性(bounciness)」の各属性を持つ球状粒子を多数用いて、DEMと同様に土石流の力学シミュレーション

を行うことができる。Teufelsbauer⁵⁾らは、DEMを用いた土石流シミュレーションを「室内実験結果」と比較し、シミュレーションの妥当性を証明している。妥当性を示している論文のDEMを用いた土石流シミュレーション結果と、本研究において、MassFXを用いた土石流シミュレーション結果が同じであれば、MassFXによる土石流シミュレーションも妥当性があると考えられる。

図3はDEMとMassFXによる時系列の「マトリックス状の保護構造と雪崩の相互作用」を示す。全体として同様な移動要素の塊、即ち、時系列2番目のドーム状塊や3、4番目の障害物周辺の同様な要素の塊がみられ、MassFXの土石流シミュレーションには妥当性があると考えられる。

MassFXでは、その機能の元になる物理法則は明らかにされていないが、重なりあったオブジェクトが反発する現象を観察しており、DEMの粒子間の「跳ね返る力」はMassFXでは「跳ね返り性」の係数に比例することが考えられる。即ち、両者は同じニュートン力学とフックの法則($F=k\Delta x$)に基づくと考えられ、MassFXの「跳ね返り性」を決めているのがDEMでの粒子間に働く力を決める「ばね係数k」である。

力学シミュレーションでは、各オブジェクトが衝突しているかどうかの「衝突検出」を行い、「衝突の深さ」を測定し、この「深さ」に応じて、ニュートンの第2法則を用いて、力と加速度、移動距離を求めて、次の各オブジェクトの位置を求めるというサイクルを繰り返している。「衝突検出」は力学シミュレーションにおいて、もっとも重要なプロセスといえる。この衝突検出において、オブ



Teufelsbauer⁵⁾の論文にてDEMを用いた雪崩の数値実験(マトリックス状の保護構造と雪崩の相互作用の時系列)

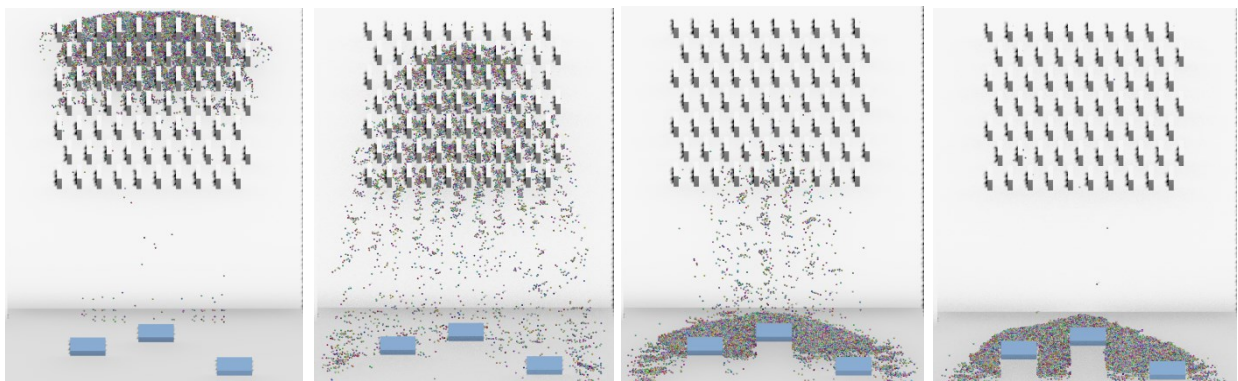


図3. DEMを用いた論文の雪崩の数値実験結果(上)と、MassFXを用いた土石流の数値実験結果(下)の比較(「マトリックス状の保護構造(protection structure matrix)と雪崩の相互作用」の時系列)

ジェクトは「凸包(Convex hull)」でなければ、衝突検出ができない⁷⁾とされ、MassFX では、オブジェクトが「凹型形状(Concave)」の場合、「メッシュ詳細度」、「最小 hull サイズ」や「hull 毎の最大頂点数」などの値を指定して、それを「凸包立体の集まり」まで分離する。メッシュ詳細度を大きくすれば、「凸包立体の集まり」はオブジェクトを正確に表現することになるが、PCには大きな負荷を与えることになり、「正確な表現」と「PCの負荷」はトレードオフの関係となる。本研究において、「動的3次元建物モデル」の建築部材で、例えば、窓用の穴の開けた壁は凹型立体であり、本システムがブール演算で壁板に窓用の穴をあけた後は、形状が凹型立体であり、「凸包立体の集まり」まで分離する。「動的3次元建物モデル」はこのように構成部材を凸包立体の集まりまで分離し、互いに距離をとることで構築する。

力学シミュレーションの事例を図4上にて、移動要素を配置した3次元地形モデルを自動生成するプロセスと、図4下にて、移動要素が地形モデルを流下、及び、動的3次元建物モデルと流下移動要素との間の相互作用、即ち、土石流による建物の倒壊の様子を示す。

6. まとめ

これまでの研究で、地形を囲む外周線であるキー等高線から、それに囲まれる「盛り上り」である3次元地形モデルを自動生成するシステムを開発した。本研究では、この土石流等の土砂移動現象をシュミレートできる要素を地形モデルの表面である「ドローネ3角」上に配置し、

また、力学的にシミュレートできる要素から成り立つ3次元建物モデルを自動生成し、それらの間の相互作用をシミュレーションした。これらは防災科学における模擬実験や防災教育の教材、整備案の合意形成などで、現実に近いイメージ、アニメーションを提供できる。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費の研究課題番号: 18K04523 と 19K04750、20K03138 の助成を受けて遂行された。ここに謝意を表する。

【参考文献】

- 1) Sugihara, K. and Kikata, J.: Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons, ASCE Journal (アメリカ土木学会), Vol. 27, pp. 476-488, 2013.
- 2) Autodesk Knowledge Network: Autodesk AutoCAD Civil 3D: <<https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d/learn-explore/>>, (入手 2020 6. 5).
- 3) Esri ArcGIS Pro /Tool Reference/Tool/3D Analyst/ : <<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-contouring-works.htm>>, (入手 2020 6. 5).
- 4) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D., and Gärtner, B.: A novel type of skeleton for polygons, Journal of Universal Computer Science, Vol. 1 (12), pp. 752-761, 1995
- 5) Teufelsbauer, H., Wang, Y., Pudasaini, S. P., Borja, R. I. and Wu, W.: DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures, Acta Geotechnica, Vol. 6, pp. 119-133, Springer-Verlag, 2011
- 6) PFC3d (Particle Flow Code in three dimensions) <<https://www.itascacg.com/software>>
- 7) van den Bergen, G.: Efficient collision detection of complex deformable models using aabb trees, Journal of Graphics Tools 2(4), pp. 1-13, 1997

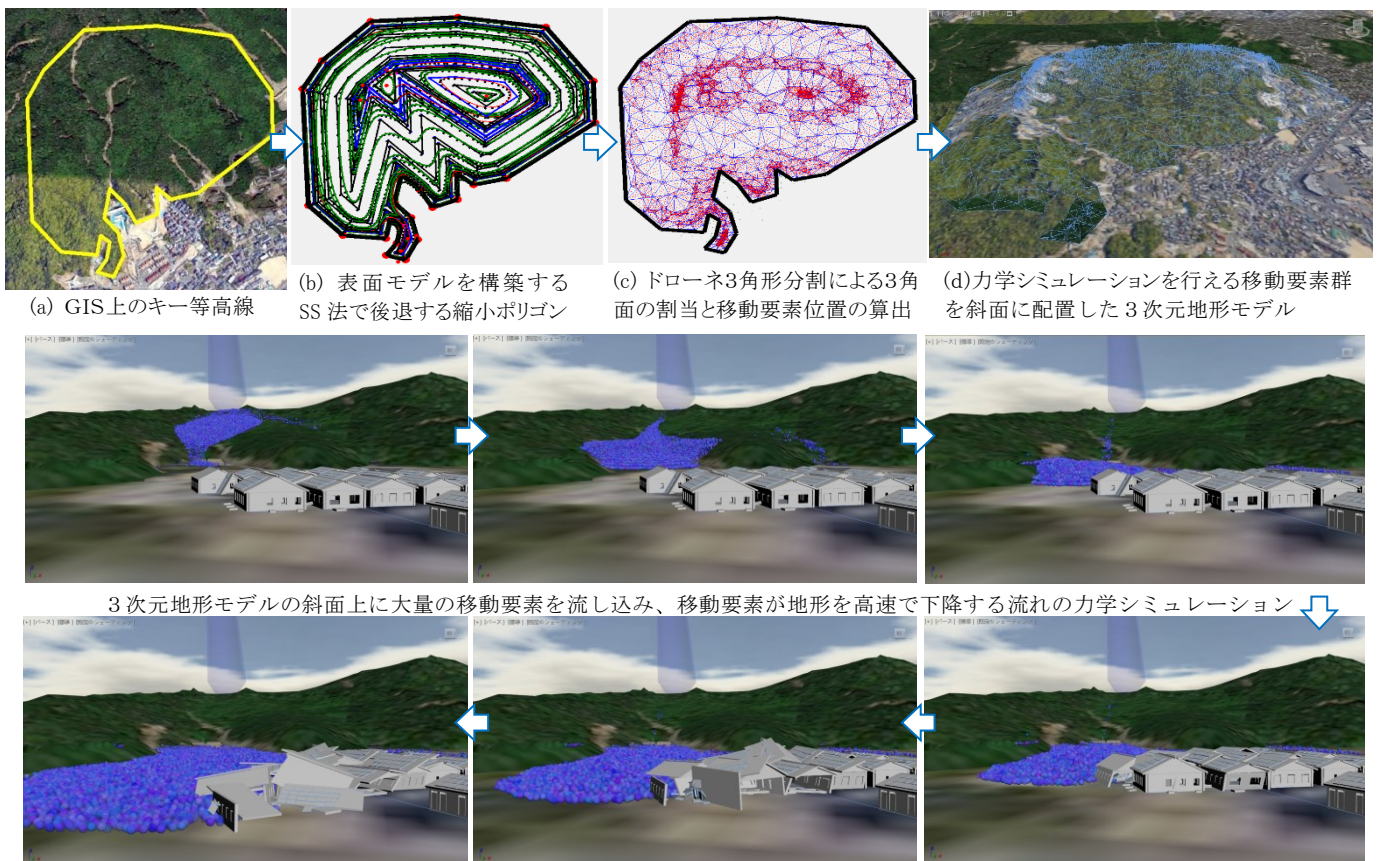


図4. 建物と大量の移動要素との間のインタラクションで「動的3次元建物モデル」が倒壊する力学シミュレーション