

# (6) 自動生成する地形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

村瀬 孝宏<sup>1</sup>・杉原 健一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 中京学院大学教授 中京短期大学部(〒509-6192 岐阜県瑞浪市土岐町2216)

E-mail: murase@chukyogakuin-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 岐阜協立大学教授 経営学部情報メディア学科(〒503-8550 岐阜県大垣市北方町5丁目50番)

E-mail:sugihara@gifu-keizai.ac.jp

土石流や地滑り、岩盤崩壊などの土砂移動現象を3次元の仮想空間にてシミュレートできるシステムは国内外の研究にてほとんど見られない。筆者らのこれまでの研究で、外周線等のキー等高線から等高線群を自動作成し、それらに基づいて、3次元地形モデルを自動生成した。また、建物境界線に基づいて、3次元建物モデルを自動生成する研究も行ってきた。本研究では、大量の移動要素を斜面に配置し、「力学シミュレーションを行える要素群から成り立つレイヤー」を備えた3次元地形モデルを自動生成し、3次元仮想空間内で、土石流などの土砂移動現象を再現し、さらに、3次元建物モデルを「力学シミュレーションを行える部品」で構築し、「土石流による3次元建物モデル倒壊のシミュレーション」を行えるシステムを提案する。

**Key Words :** 3D terrain model, building collapse simulation, automatic generation, , debris flow, CG, GIS

## 1. はじめに

近年、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、北海道胆振東部地震で丘陵地帯の大規模崩壊をもたらし、さらに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。喫緊の課題としてこうした大自然災害とコロナ禍の複合災害も懸念されている。従来の避難所では集団感染リスクなどがあるとされており、早急の対策

案の策定が望まれている。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3D地形モデルは防災教育には有効である。これまでの研究で、「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

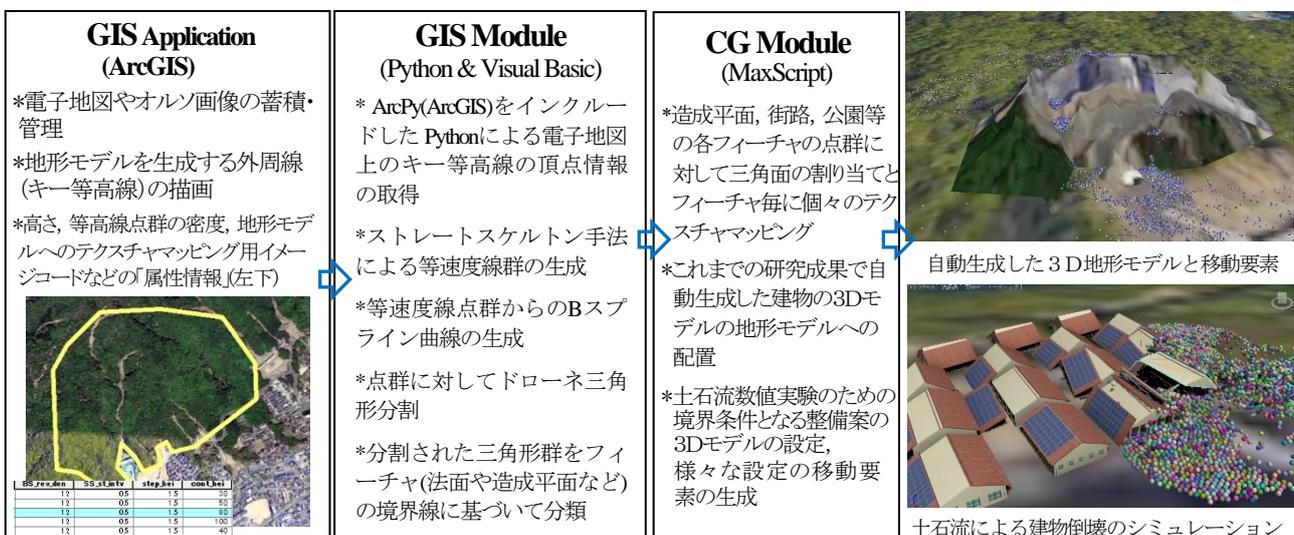


図-1 斜面に移動要素を配置した3D地形モデルの自動生成システムの構成と建物倒壊のシミュレーションのプロセス

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3D地形モデルを自動生成し、「流れ盤に沿う土砂崩れ」、受け盤斜面の「トップリング」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3D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、「3D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。筆者らは、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(建物ポリゴン)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<sup>1)</sup>。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「力学シミュレーションの行える部品」で構築された「動的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。

## 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、3次元都市モデルの構築では、ドローン(無人機)による空撮写真から建物の屋根の形状を計測・点群化し、地上の3次元レーザースキャナーで計測した壁面部と合成し、点群による建物の3Dモデルを構築する研究などがさかんである。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い、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 3D<sup>2)</sup>、及び、GIS(地理情報システム)で代表的なArcGIS<sup>3)</sup>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<sup>2)</sup>。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(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<sup>4)</sup>ら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。

本研究では、土砂移動現象をシミュレートできる移動要素を、この地形モデル上に大量に配置し、それから、近傍に力学シミュレーションを行える建物の3Dモデルも配置し、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。

## 3. 物理シミュレーション手法について

### (1) DEM(離散要素法)について

本研究の土石流の物理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による物理シミュレーション」を用いて、壁や屋根板、流れの移動要素を持つ「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、また、レイヤーに応じて、移動要素の形状も変え、様々なシナリオに基づく物理シミュレーション

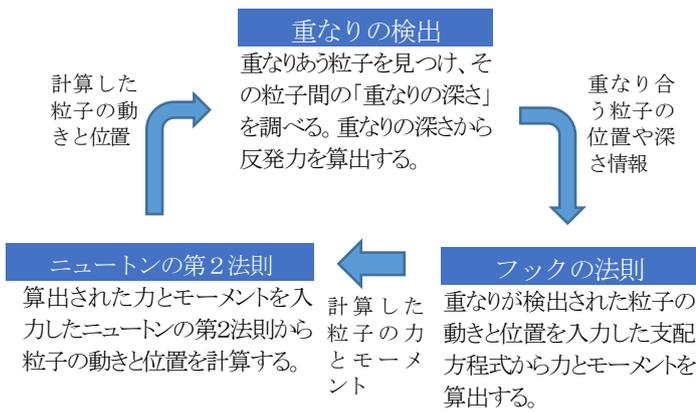


図-2 DEM (離散要素法) における各粒子の動きと位置を計算するループ

を行う。

乾いた土石流やなだれは「粒子の流れ (granular flows)」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のシミュレーションするには最適のツールとされる<sup>5)</sup>。本研究で自動生成される、場合によって大きな起伏もありうる複雑な3次元地形モデルにおいても、DEMはシミュレーションの適用可能である。さらに、DEMによる数値実験では、粒子がこ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ほとんど必要なく、正確な流れのシミュレーションが行える<sup>5)</sup>とされる。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)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 ( $F=m a$ ) に基づいて、相互作用を行うとしている。ここで、変位は「粒子間の重なり」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、粒子同士が接触した時の力は算出される (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。ここで、 $F^s$  は「せん断力」、 $F^n$  は「垂直抗力」、 $\mu$  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 (離散要素法) における各粒子の動きと位置を計算するループを図-2 に示す。まず、重なりあう粒子を見つけ、その粒子間の「重なるの深さ」を調べる。次に、重なる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

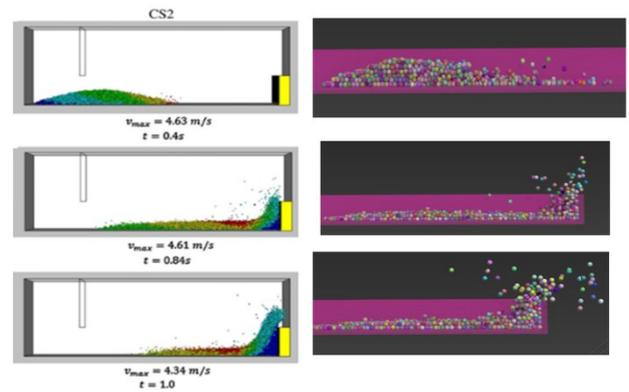


図-3 DEMを用いた論文の土石流の数値実験結果 (右) と、MassFXを用いた土石流の数値実験結果 (左) の比較

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。そして、粒子間の「重なるの深さ」を調べるモードに戻る。

## (2) 3ds Max の MassFX (物理シミュレーション) による土石流シミュレーションの特徴

本研究で使用した3次元CGソフトウェアである 3ds Max は、物理シミュレーションを行う MassFX を備えている。MassFX では、「動的摩擦」、「静止摩擦」、「跳ね返り性 (bounciness)」の各属性を持つ多数の球状粒子を用いて、DEMと同様に土石流の物理シミュレーションを行うことができる。Teufelsbauer<sup>6)</sup>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において、DEMを用いた土石流のチャンネルフロー (粒子間の回転自由、摩擦0、粒子と壁間も摩擦0である水路) のシミュレーション結果と MassFXを用いたチャンネルフローのシミュレーション結果を比較している。ほぼ、同じような粒子群のトラジェクトリーがみられる。MassFXの土石流シミュレーションには妥当性があると考ええる。

DEMにおいて、離散要素 (球状粒子と壁) の主な材質は「摩擦」と「硬さ (stiffness)」であり、前述したように粒子が他の粒子とオーバーラップしたとき、粒子間に働く力である「跳ね返る力」は、フックの法則によって「オーバーラップの深さ」に比例するとしている。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( $F=k\Delta x$ )に基づく物理シミュレーションをしていると考えられ、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。

MassFX を用いた土石流の物理シミュレーションの事例を以下にしめす。図-4 上にて、移動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するシミュレーション、及び、「力学シミュレーションを行える部品」で構築した「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。

#### 4. 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ミュ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「動的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数値実験や防災教育の教材、整備案の合意形成などで、2次元メッシュによるシミュレーションよりも、現実に近いイメージ、アニメーションを提供できる。

#### 参考文献

- 1) Sugihara, K. and Kikata, J.: Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons, *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE (American Society of Civil Engineers)*, 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) H.Teufelsbauer, Y.Wang, S.P.Pudasaini, R.I.Borja and W. Wu: DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures, *Acta Geotechnica*, 6:119-133, Springer-Verlag, 2011

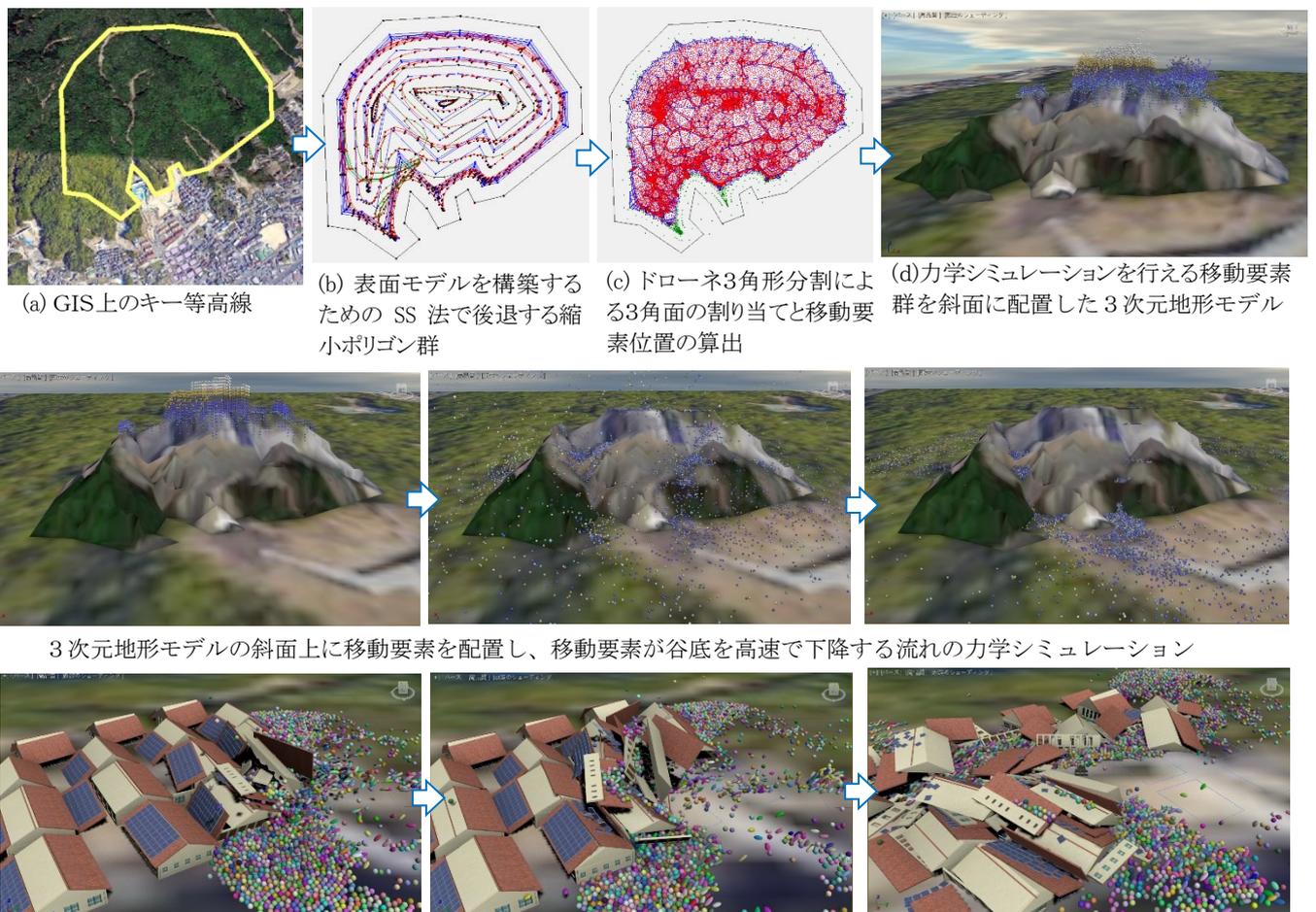


図-4 移動要素からなるレイヤーを備えた3次元地形モデルの自動生成プロセスと移動要素流下の力学シミュレーション