

土石流シミュレーションのための 3次元地形モデルと動的3次元建物モデルの自動生成

村瀬 孝宏*・杉原 健一**・沈 振江***

Automatic Generation of 3D Terrain Models and Dynamic 3D Building Models for Debris Flow Simulation

Takahiro Murase*, Kenichi Sugihara**, Zhenjiang Shen***

In our research, we use 3D building models placed on the 3D terrain model in which massive moving elements are placed for flow simulations. Usually, 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.

Keywords: 3次元地形モデル (3D terrain model), 自動生成 (automatic generation), 土石流シミュレーション (debris flow simulation), 建物倒壊シミュレーション (building collapse simulation)

1. はじめに

令和2年7月豪雨は甚大な被害を九州、東海地区にもたらした。近年、世界各地で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。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。筆者らのこれまでの研究(2017)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3D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。これまでの研究(2013)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。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3次元建物モデルを自動生成し、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。

* 会員 中京学院大学 中京短期大学部 (Chukyo Gakuin University) 〒509-6192 岐阜県瑞浪市土岐町2216 E-mail: murase@chukyogakuin-u.ac.jp

** 非会員 岐阜協立大学 経営学部 (Gifu Kyoritsu University) sugihara@gifu-keizai.ac.jp

*** 非会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (Kanazawa University) shenzhe@t.kanazawa-u.ac.jp

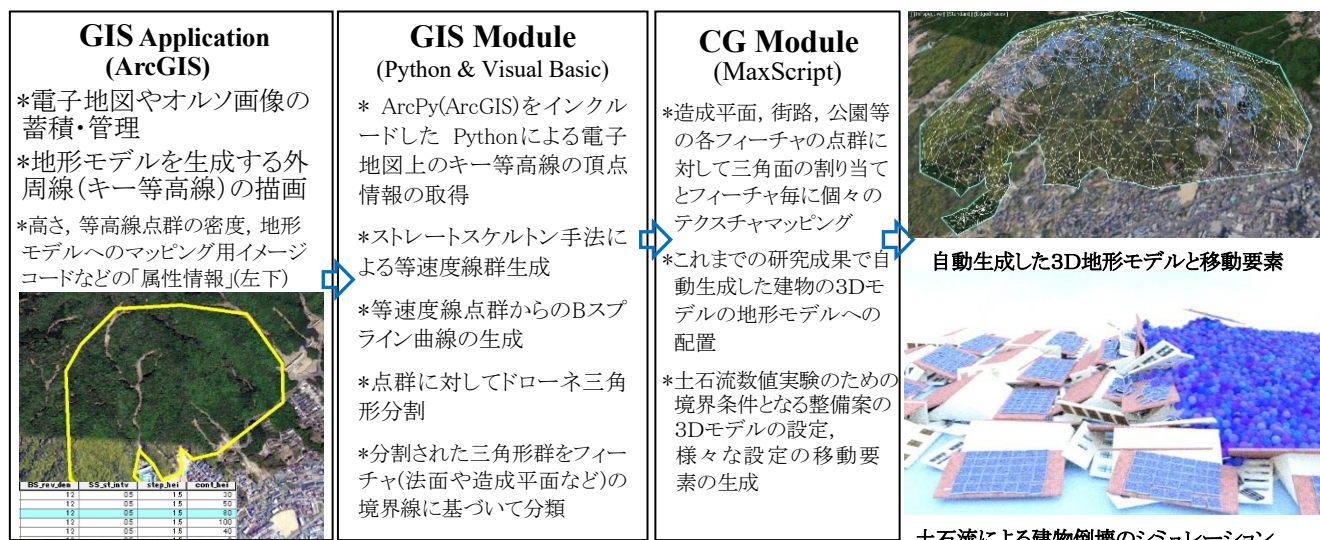


図-1 斜面に移動要素を配置した3D 地形モデルの自動生成システムの構成と建物倒壊のシミュレーションのプロセス

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、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 (2020)、及び、GIS(地理情報システム)で代表的な ArcGIS (2020)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。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 (1995) 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、土砂移動現象をシュミ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。

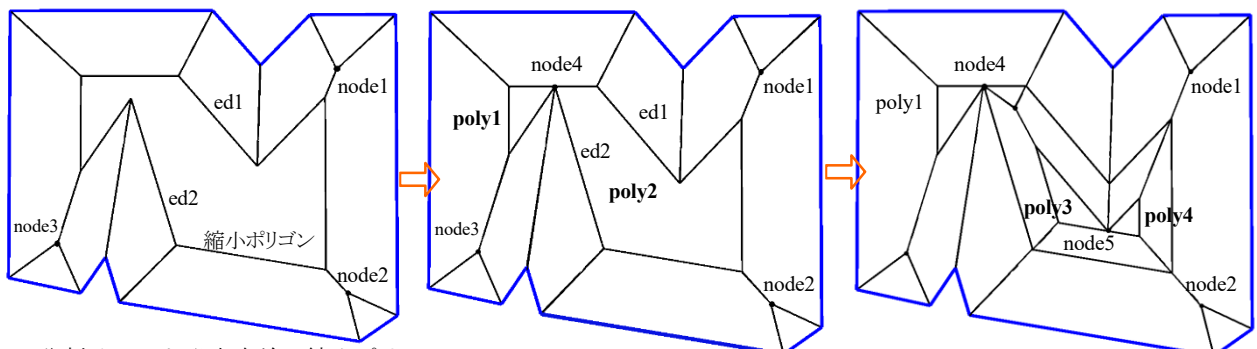
3. ストレートスケルトン手法による等高線の自動作図

3.1 ストレートスケルトン手法(SS法)とは

高さを上げるとともに、順に後退していく等高線は、複数のピークを持つ尾根に見られるように自ら

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。高度を上げるとともに、後退しない等高線や交差する等高線も理論的には考えられる。例えば、傾斜が90度以上の岸壁では等高線は後退しないが、通常地形は高度の上昇とともに、等高線は後退して、ある高さで等高線は自らと交差し、分離する。こうした等高線を描くには、後退と共に自らとの交差判定を行って生成されるストレートスケルトン手法(以下、SS法)が有効である。図-2、図-3で示すように、Simple ポリゴン(交差していない形状)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によって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。

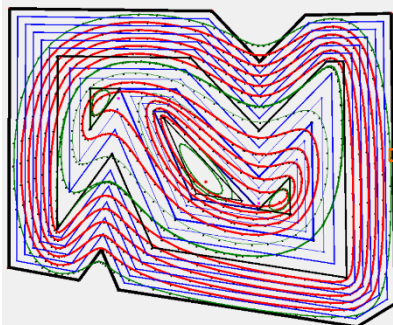
- 1) 辺消失イベント (Edge イベント) : 辺が縮小して消失する。消失辺の両側の辺が、以降は接する。
- 2) 分割イベント (Split イベント) : Reflex 頂点(内



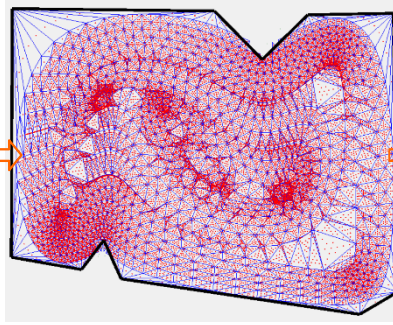
(a) 分割イベント発生直前の縮小ポリゴン、辺消失イベントで生じたノード: node1~node3

(b) 分割イベントが発生して、ポリゴンは2つのポリゴン(poly1 と poly2)に分割

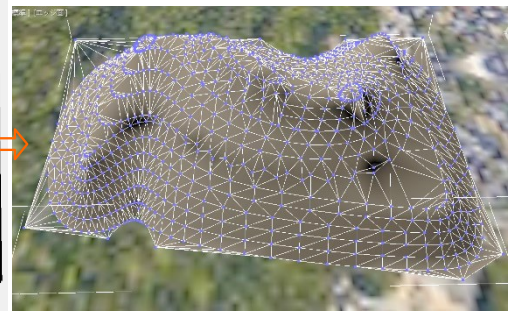
(c) 分割されたポリゴンで、さらに、分割イベントが発生し、2つのポリゴン(poly3 と poly4)に分割



(d) 一定速度で後退するポリゴン群: 辺消失イベントと分割イベントが生じてトポロジーが変化: B スプライン曲線生成



(e) 縮小ポリゴンからBスプライン曲線を生成し、B-スプライン曲線上の点群に対してドローネ三角形分割と移動要素の配置位置算出



(f) ドローネ三角形に三角面を割り当て、三角形頂点上に要素を配置し、自動生成した3D地形モデル

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三角形分割、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

角が 180 度以上の頂点)が辺に交差して、ポリゴン分割する。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-3c)。図-2a 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-2b 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-2c 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-2d 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-2e 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、ドローネ三角形分割を行った結果を図-2e で示す。さらに、本システムは「土石流の物理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三角形面上に配置する。そのために「移動要素」の配置位置を各三角面で算出する。その位置上に複数のレイヤー構成するように、移動要素を配置する。これら大量の要素が 3 次元地形モデルを流下する土石流シミュレーションを図-6 で示す。

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、点群をドローネ三角形分割する機能がない。

また、ドローネ三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、ドローネ三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-2a, b で示す「辺ed1」と「辺ed2」は縮小処理で、逆に長さが伸びている。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すると、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

本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-6 に示す。3 次元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

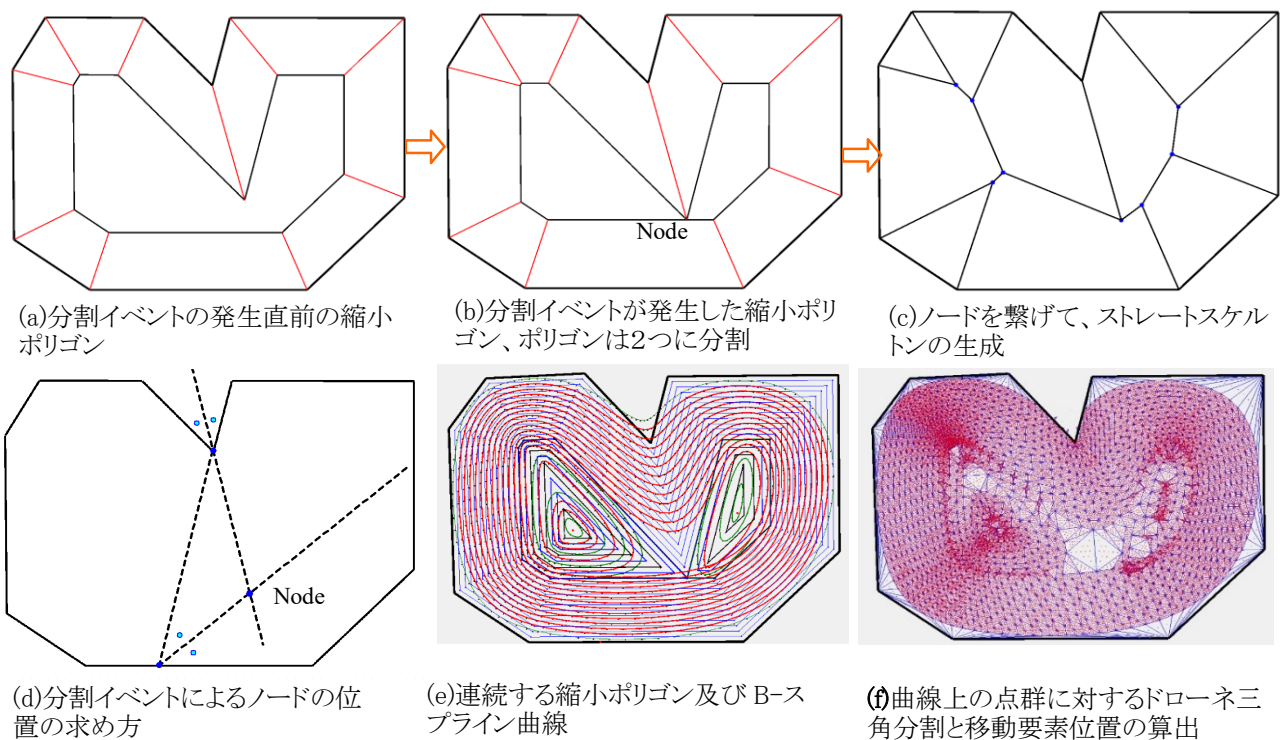


図-3 分割イベントの発生前後の縮小処理とノードの位置の求め方、連続する縮小ポリゴン及び B-スプライン曲線、曲線上の点群に対するドローネ三角分割

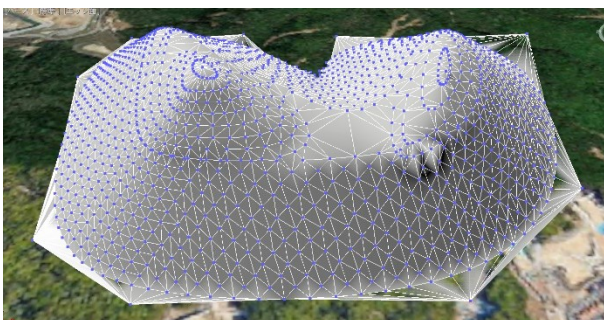


図-4 ドローネ三角形に三角面を割り当て、三角形頂点上に要素を配置した地形モデル

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、前述の式(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」が生じるかどうか調べる。具体的には、

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。交差しているのであれば、上の図-3 d に示すように、「分割イベントで生じるノード」の位置を算出し、そのノードと「対向辺」の距離を「分割イベントの縮小距離」として縮小ポリゴンに記憶する。それを「等高線の基準間隔」で割り、等高線間隔を算出し、イベント間の複数の縮小ポリゴンの間隔(縮小距離)をできるだけ等間隔になるようにする。

- (4) 「分割イベントの交差判定」で交差が生じたと判断されたとき、図-3 d に示すように、Reflex 頂点を端点とする 2 辺で「対向辺」との「内積が小さい方の辺」(つまり、平行でない方の辺)と「対向辺」との交点からの「頂角の二等分線」と Reflex 頂点の二等分線が交差する点をスケルトンの「ノード」とする(図-2 b の node4 や図-2 c の node5)。ここで、「平行でない方の辺を選ぶ」というのは、平行な辺の交点を求めようとするとゼロ除算等の数値演算エラーを引き起こすのを避けるためである。このとき、ノードには、Reflex 頂点の 2 辺と対向辺の計 3 個の辺情報を「元

辺 ID」として関連付ける。ここで、「元辺」とは、縮小前の元のポリゴンの各辺である。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、各頂点が 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、ポリゴンが三角形になるまで継続する(図-2c の三角形)。

(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」が生じ、その生じるノードの位置、「ノードを形成する伝搬辺の数」、ノードに消失辺、それに隣接する伝搬辺などの情報を「元辺 ID」として、ノードに関連付ける。

(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、縮小プロセスでの「辺消失イベント」で、辺数を減らしていき、三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。三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。後のプロセスで、三角形に対しても B-スプライン曲線を生成し、3次元地形モデルの頂上付近をなだらかなものにする。

(7) 縮小処理が終了し、縮小前の元のポリゴンの各辺である「元辺」について、順に全てのノードの「関連付けられた元辺 ID」を調べ、元辺 ID と一致するノードを集め、まとめて、順番に並べて単調増加ポリゴン (monotone polygon) を形成する。元辺の頂点を原点とし、各ノードまでのベクトルを考え、同じ元辺に所属する各ノードの元辺に対する射影成分でソートする。monotone ポリゴンが出来上がれば、ストレーツスケルトンが形成される。

(8) 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-2d 及び図-3e 参照)。

(9) B スプライン曲線上の各頂点に対して、ドローネ

三角分割を行い、三角面を割り当てる。具体的には、GIS モジュール(図-1)で、各頂点の「頂点座標」と三角形を形成する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。(図-2e 参照及び図-3f 参照)。

(10) CG モジュール(図-1)は受け取った三角形の3頂点に「3角面パッチ(patch)」を割り当てる。3角面パッチは境界線によって、分類され異なるテクスチャマッピング(模様の貼り付け)を施す(図-1 及び図-4 参照)。

(11) 指定する3角面上に土石流の物理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、地層の大量の構成要素から成り立つ土砂移動現象の力学シミュレーションを実現する(図-1 及び図-6 参照)。

5. 物理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、土砂に相当する球状の移動要素が持つ「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、「乾いた土石流と建物等の相互作用」の物理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 (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をシミュレートするには最適のツールとされる(Teufelsbauer 2011)。DEMはCundall と Strack (1979)によって、地盤工学の分野で導入され、土砂の微視レベルでの挙動の研究で使用された。DEMによる数値実験では、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、正確な流れの数値実験が行える(Tao Zhao 2011)。これまで土石流の数値実験では、深さが浅く、垂直方向の速度分布が無視できるような緩やかな地形モデルにおいて、2次元の連続的な流れのシミュレーションが主流であった。しかし、2次元の数値実験では、「緩やではない地形モデル」や、土石流の流下に障害物(堰堤等も含む)があるよ

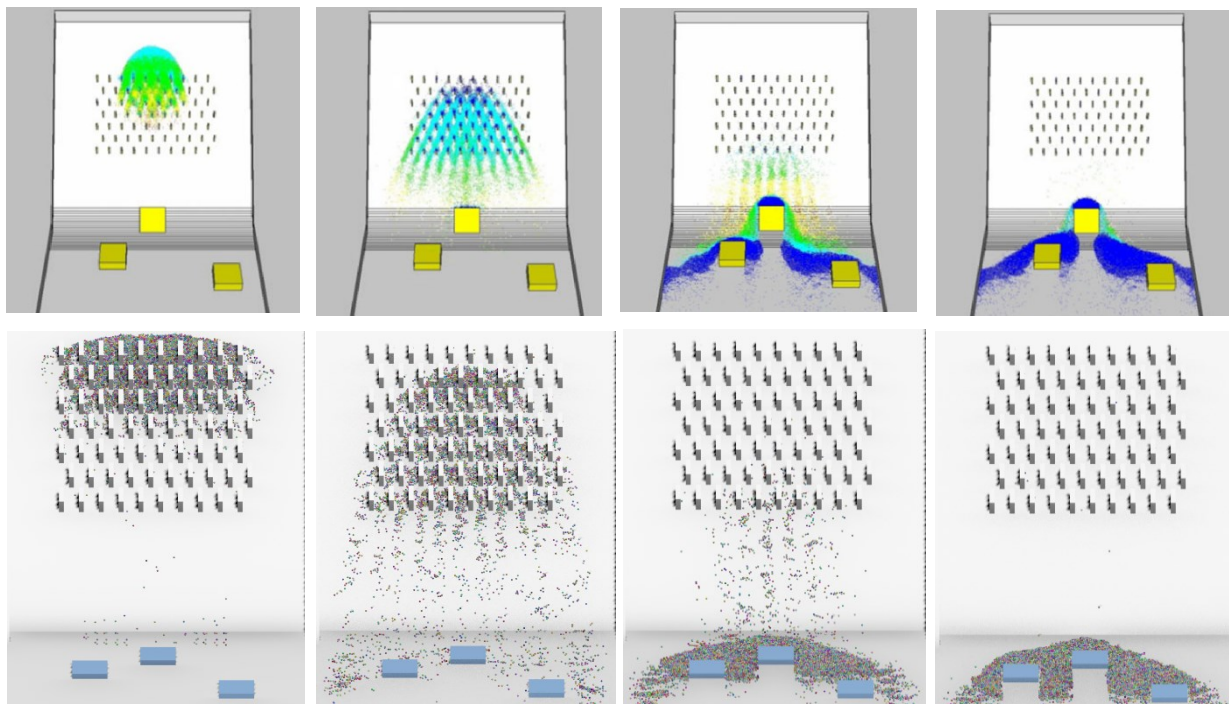


図-5 DEMを用いた雪崩の数値実験結果(上)と、本研究で MassFX を用いた土石流の数値実験結果(下)の比較
(「マトリックス状の保護構造(protection structure matrix)と雪崩の相互作用」の時系列)

うな場合、障害物周りの複雑で動的な流れをシミュレートするには単純すぎると考えられる (Teufelsbauer 2011)。このDEMによって、障害物に対する移動要素の垂直方向の運動量の移転を考慮して、より正確な衝撃力を予測することができる。

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。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

本研究で用いた3次元CGソフトである3ds MaxのMassFXツールでは、大量の球オブジェクトに「動的摩擦」、「静止摩擦」、「跳ね返り性(bounciness)」の各属性を持たせて、DEMと同様に乾いた土石流の物理シミュレーションを行うことができる。MassFXでは、様々なオブジェクトを作り、それらが「固体、軟体、布、液体」となるようにオブジェクトの各引数に値を与え、仮想空間に配置し、重力に基づいて単

独で動作，あるいは他のオブジェクトとの相互作用を行わせることで，現実世界と同様なニュートン力学に基づいたアニメーションを生成することができる．3次元CGのデファクトスタンダードである3ds Maxでは，各オブジェクトは形状そのままの「オリジナル形状 (graphical meshes)」と物理シミュレーションのための「物理形状 (Physical Shape)」という2つの形状を持つ．「物理形状」が複雑な形状だと，衝突検出でコンピュータに大きな負荷を与えてしまうので，物理形状は単純な形状で，少ないパラメータで表現できる基本立体(プリミティブ)が望ましい．実際，多くの複雑な形状のオブジェクトの「バウディングボリューム (Bounding Volume)」は基本立体である．

アニメ生成では，オブジェクトが他のオブジェクトと交差していないかを調べ(衝突検出)，オブジェクト間の「交差の深さ (penetration depth)」を計算し，「力-変位則(フックの法則)」に基づいて，反発力を算出する．この「衝突検出」において，オブジェクトが「凸包 (convex hull) 形状」であれば，自動的に衝突検出やそれらの間の距離を計算するアルゴリズムは存在する．例えば，GJK (Gilbert-Johnson-Keerthi distance) は「凸包立体間の最小距離」を効率よく算出する (1988)．

GJKをはじめとして，大部分の衝突検出のアルゴリズムは「凸包立体」間に関するもので，オブジェクトが「凹型 (concave) 形状」であれば，そのオブジェクトを凸包立体に分解するか，あるいは，「オーバーラップする凸包立体の集まり」にするかの処理を行わない，衝突検出を行っている．

MassFXでは，「凹型立体」を「凸包立体の集まり」に変換する機能を持つ．このとき，凸包形状の個数やその頂点数はユーザーが設定できるようになっている．凹型立体を「凸包立体の集まり」に変換し，各凸包立体を用いて衝突検出を行い，力学シミュレーションを行っている．この場合，凸包立体の個数やその頂点数を増やせば，より精緻に凹型立体を代替することができるが，コンピュータには多大な負荷を与えることになる．

Teufelsbauer (2011)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-5において，DEMを用いた雪崩のチャネルフローのシミュレーション結果 (2011) と本研究でのMassFXを用いたチャネルフローのシミュレーション結果を比較した．図-5はDEMとMassFXによる時系列の「マトリックス状の保護構造 (protection structure matrix) と雪崩の相互作用」を示す．同じような粒子群のトラジェクトリーがみられ，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．

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示す．図-6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

本研究では，等高線群をキー等高線 (外周ポリゴン) の連続的な縮小処理で構築する．このとき出来る縮小ポリゴンは，縮小処理前後の平行なポリゴン各

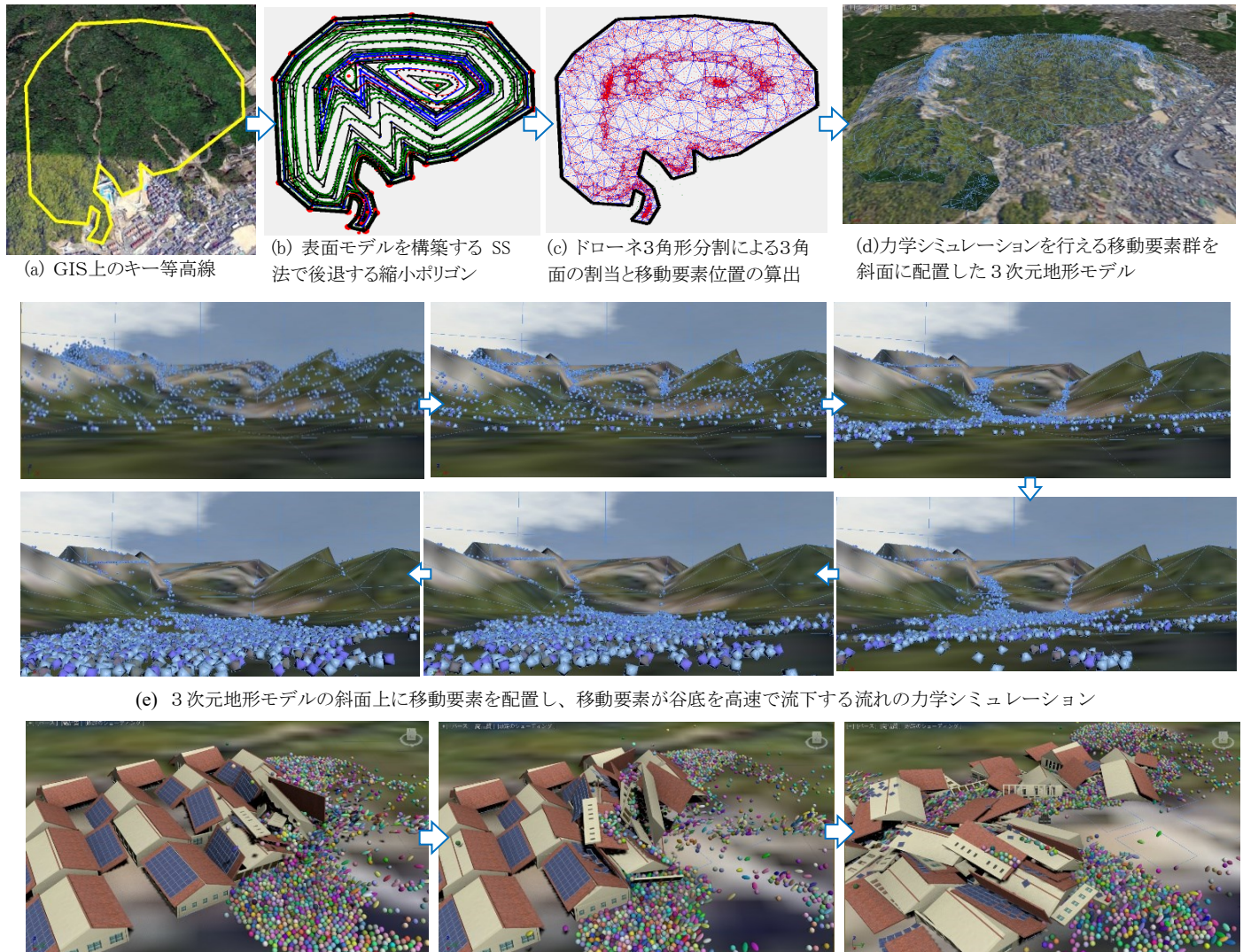


図-6 移動要素からなるレイヤーを備えた地形モデルの自動生成プロセスと移動要素流下の力学シミュレーション

辺間の縮小距離で「一意に」決まる。

図-2、図-3 で示すように、ポリゴン各辺は等速度でポリゴン内部に縮小移動する。この縮小プロセスは、イベント(辺消失と分割)が生じるまで、ポリゴンのトポロジーを変えずに続く。このトポロジーが変わらない縮小ポリゴン(shrinking polygon)に対して ID 番号(S-ID)をふり、管理する。具体的には、図-2 に示す 10 角形のポリゴンが 10 角形のまま縮小プロセスが続く期間を「ひとまとまりの期間」と考え、その縮小距離を等高線の「基準間隔」となる距離で割り、等高線の本数を決め、その基準に近い間隔の「等高線」を生成する。この場合、縮小処理でイベントが発生するまでの縮小距離は、「辺消失イベント」では、式(1)で計算され値が求められ、「等間

隔の等高線」の間隔は計算できるものの、「分割イベント」においては、イベントの縮小距離は、縮小処理で Reflex 頂点からの頂角の二等分線が「対向辺」と交差するか否かで判明するため、「縮小プロセスの途中」では「分割イベントの縮小距離」は分からない。

そのため、交差判定の後、分割処理完了後に S-ID 番号で決まる縮小ポリゴンに「分割イベントの縮小距離」を保存し、全ての縮小ポリゴンについて分割処理が終わった段階で、「等間隔の等高線」が生成されていない縮小ポリゴンに対して、保存されている「分割イベントの縮小距離」を「基準間隔」で割り、「等間隔の等高線」を生成する。

従って、本システムのメインルーチンでは、縮小プロセスにおいて、「辺消失イベント」が生じるまで

の縮小距離の間で、「分割イベント」が生じるかどうか調べ、ポリゴンを分割できるまで分割し、その後「辺消失イベントが生じる分割ポリゴン」と辺消失イベントが生じず、「等間隔の等高線が生成されていない縮小ポリゴン」について、「等間隔の等高線」を生成する。

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、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

- Kenichi Sugihara, Takahiro Murase (2017) Automatic Generation of a 3D Terrain Model from Key Contours. General Track (Full Papers) of 2017 International Conference on CYBERWORLDS, University of Chester.
- Kenichi Sugihara and Junne Kikata (2013) Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE (American Society of Civil Engineers), Vol.27 (5), pp.476-488.
- Autodesk Knowledge Network: Autodesk AutoCAD Civil 3D: <<https://knowledge.autodesk.com/support/civil-3d>>, (入手 2020 6.5).
- 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).

- Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D., and Gärtner, B. (1995) A novel type of skeleton for polygons. Journal of Universal Computer Science, Vol.1 (12): pp.752-761.
- Tao Zhao (2011). Investigation of Landslide-Induced Debris Flows by the DEM and CFD, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Oxford, St Cross College, Oxford, Hilary Term.
- Cundall PA, Strack ODL (1979). A distinct element model for granular assemblies, Geotechnique, 29:47-65.
- H. Teufelsbauer, Y. Wang, S. P. Pudasaini, R. I. Borja and W. Wu (2011) DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures. Acta Geotechnica, 6:119-133.
- E. G. Gilbert, D. W. Johnson, S. S. Keerthi (1988) A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space. IEEE Journal on Robotics and Automation Volume: 4, Issue: 2.