

津波等の力学シミュレーションのための動的3次元建物モデルの自動生成 Automatic Generation of 3D Dynamic Building Models for Physical Simulation including Tsunami

○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: Based on building footprints (building polygons) on a digital map, we have proposed a GIS and CG integrated system which automatically generates 3D building models. The proposed integrated system partitions an approximately orthogonal building polygon into a set of quadrilaterals ('quads' for short) and rectifies them, placing rectangular roofs and box-shaped building bodies on these rectified quads (rectangles). Our contribution is the unique methodology for partitioning and rectifying a building polygon for automatic generation by the quad vertices labelling. For polygon shape rectification, the vertices labelling of divided quads is used for each quad to know which quad is adjacent to and which edge of the quad is adjacent to, which will lead to the generation of 'window and door available' (WDA) walls and building's interior space. In this paper, we aim to generate mechanically stable 3D dynamic building models which can interact with massive moving elements based on Newtonian mechanics such as Tsunami. To be mechanically stable 3D building models, 3D models' composing components do not intersect each other. If components overlap each other, then 3D building models collapse by Hooke's law. Building components are placed so as not to be overlapped by setting proper local coordinates for quads.

キーワード: 自動生成; 3次元建物モデル; ポリゴン分割; 力学シミュレーション; 3次元CG

Keywords: automatic generation; 3D building model; polygon partition; dynamic simulation; 3DCG.

1. はじめに

都市計画や建築設計、特に、BIMのために「建物の3Dモデル群」(図1右)を効率よく作ることが求められている。例えば、津波対策のための「住居の高台移転の案」、あるいは、ソーラーパネルを備え、季節に応じて太陽光を導き、空気の流れを制御して冷暖房コストを抑え、災害時にも「持続可能な建物」の設計はどうあるべきか等をシミュレーションするには、それぞれ、専門家が描く「建物境界線や平面図」に基づき、3次元CGやCADソフトを用いて、膨大な手作業にて、建物の3Dモデルを製作する。

これまでの研究^{1)~3)}で、電子地図上の頂角がほぼ直角の建物境界線(直角建物ポリゴン)を四角形の集まりまで分割し、四角形の集まりを「互いに直交する長方形の集まり」まで整形し、各長方形の上にBox形状の建物本体を配置して3次元建物モデルを自動生成した。本研究では、当手法を発展させ、3次元建物モデルを構成部材

同士が重なっておらず、建物の力学シミュレーションを行なうとき、崩れることのない「力学的に安定」した建物の動的3Dモデルを自動生成することを目指す。本システムで自動生成する建物の3Dモデルは、建物の構成部材が重なり合うことなく、力学的に安定した構造の建物、いわば、構造用金物のない「組積造:masonry construction」の建物を仮想空間で構築するものである。本システムは、3次元仮想空間内で、「大量の移動要素と動的3次元建物モデルのインタラクション」を可能にし、「津波や土石流などの土砂移動現象と建物の間の相互作用」を再現し、例えば、津波による3次元建物モデル倒壊のシミュレーション(図6参照)を行えるシステムを提案する。これらは防災まちづくりの整備案の合意形成、あるいは、色々なシナリオに基づく現実に起こりうる災害や災害防止対策の効果を示すアニメーションの作成が可能であり、防災科学における数値実験や防災教育の教材などを提供できる。

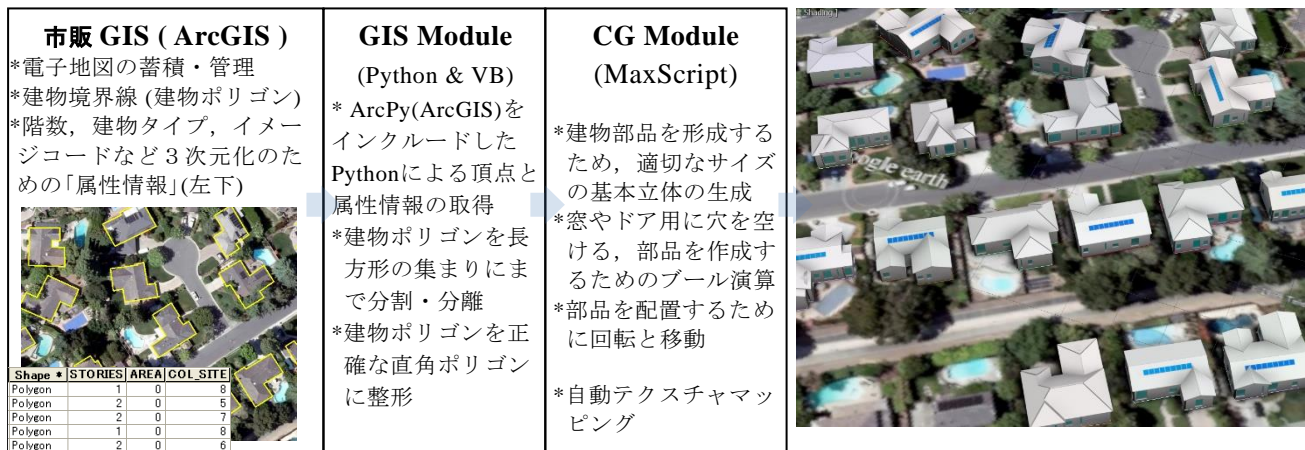


図1 自動生成システムの構成と3Dモデルの自動生成のプロセス

2. 既往の研究

防災まちづくりを実現するために、「3次元都市モデル(図1右)」は、住民、地権者、行政が「まちの出来上がりのイメージ」を共有し、合意形成に至るのに役立つ。3次元都市モデルは、このような持続可能なまちづくり、景観工学等のアカデミックな分野から公共事業の情報公開をはじめとして、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、「現状ある都市」や「スマートハウスによるまちづくりの提案」など、3次元都市モデルを自動的あるいは半自動的で構築する研究が盛んである。

建物の3Dモデルを作るとき、まちづくりの合意形成やBIM用、即ち、建築設計のための「まだ存在しない建物の3Dモデルを作る立場」、別の立場として、リモートセンシングやコンピュータビジョンの技術を用いて、コンピュータ内に作る「今ある建物を仮想空間に写像する立場」である。これから作る建物の3Dモデルは、建築設計において、平面図、立面図などに基づいて、CGやCADソフトで建物の3Dモデルを作り、それをパース図や下絵として利用する。

この3Dモデル構築には多大な手作業が必要とされるので、これを省力化するために、製作ルールのプログラミングで自動生成する「手続き型モデリング(Procedural modeling)」が研究されている。Müllerら⁴⁾は、建物境界線である建物ポリゴンの押し出し処理とAichholzerら⁵⁾によるStraight skeleton手法を用いて一般形状の屋根を生成する。ここで、Straight skeleton手法による生成される屋根は、Straight skeletonの縮小処理において、短い辺は消失するので、長い辺が残ることになり、屋根頂線は、建物境界線の「長辺に平行な頂線」を持つ屋根、即ち、「寄せ棟屋根」しか生成できない。

本システムは、電子地図上の建物ポリゴンを「四角形の集まり」まで分割して、四角形の集まりを「互いに直交する長方形の集まり」まで「整形」し、各長方形の上に個別に建物を作成する。本システムでは、分割長方形ごとに個別に「横長切妻屋根」、「マンサード屋根」、「ギャンブレル屋根」など多種多様な屋根形状を生成できる。

3. 大量の移動要素と動的3次元建物モデルのインタラクション

本研究では3次元CGソフトである3ds Maxの、物理シミュレーションを行う「MassFX」ツールを用いて、「大量の移動要素」を津波とみなして、「大量の移動要素と動的3次元建物モデルの間の力学シミュレーション」を行った。雪崩や乾いた土石流は、それらを細かい要素にまで分けて、「粒子の流れ」とみなすことができるが、DEM(離散要素法: Discrete Element Method)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⁶⁾。DEMは、多数の「粒子(要素)」の動きや効果を分析するための数値解析ツールの一つである。地盤や粉体などの物体を、自由に運動できる多角形や円形、3次元に拡張した球や多面体(polyhedra)の要素の集合体としてモデル化し、要素間の接触、回転、滑動を考慮して、各時刻におけるそれぞれの要素の運動を逐次追跡して解析する手法である。物体を実在する分子の集まりとして解析する「分子動力学」と比較されることが多いが、違いは「粒子の相互作用における回転」、「前の状態を覚えている接触(stateful contact)」、「粒子の様々な幾何形状(多面体を含む)」にある。DEMは、岩盤工学に適用するためにPeter A. Cundall(1971)⁷⁾により発表された論文に端を発しており、現在は「液状化や土石流などの生じる地盤」や「粉体(化学工学、リチウムイオン電池、薬学、農学など)」の挙動解析に用いられている。

DEMをはじめとす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す。「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である。この衝突検出において、オブジェクトは「凸包(Convex hull)」でなければ、効率的な衝突検出ができない⁸⁾とされる。

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と同様に乾いた土石流の物理シミュレーションを

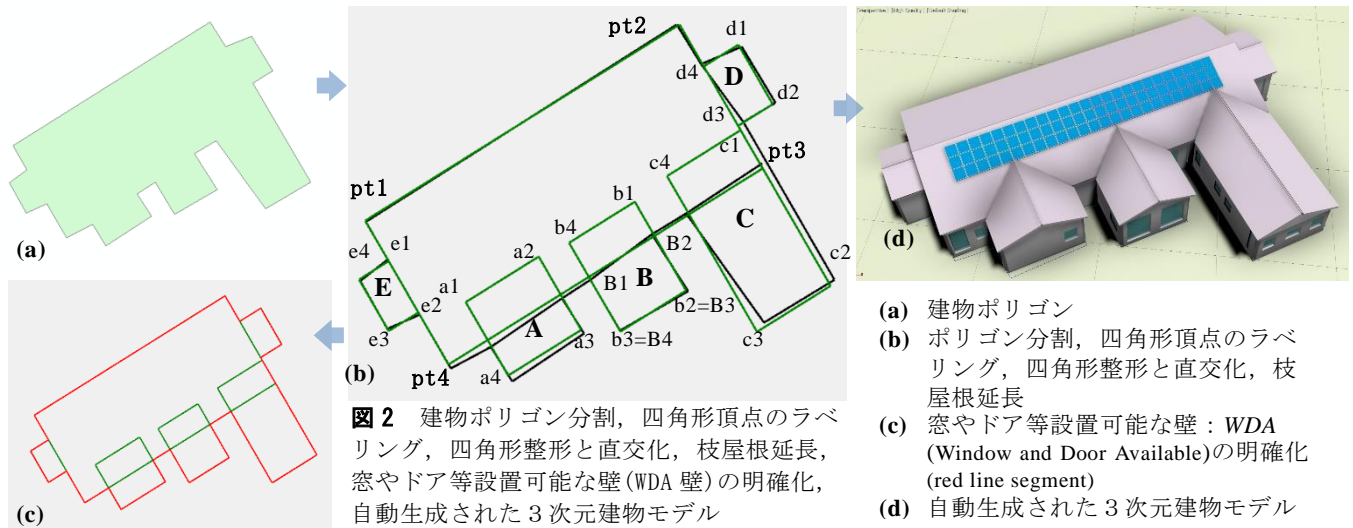


図2 建物ポリゴン分割, 四角形頂点のラベリング, 四角形整形と直交化, 枝屋根延長, 窓やドア等設置可能な壁(WDA壁)の明確化, 自動生成された3次元建物モデル

行うことができる。MassFX において、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」の建築部材作成で、例えば、ブール演算で壁板に窓用の穴を開けた後は、壁板の形状は「凹型立体」となり、物理シミュレーションするために、「凸包立体の集まり」まで分離・分割する。「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、次に、部材が重なって、フックの法則で反発しないように離し(0.02m程度)、力学的に安定するように、多数の部材を組み上げ、配置して構築する。

4. 取得する隣接情報による屋根タイプ決定

これまでの研究^{1)~3)}で、図2(a)に示すような頂角がほぼ直角の建物ポリゴンを、四角形の集まりまで分割して、ポリゴンの再構築、即ち、ポリゴン整形、枝屋根延長、WDA壁(Windows and Doors Available wall)の明確化などを行った。これらの処理は、図2(b)に示すように、分割四角形の頂点の「ラベリング(番号付け)」を行い、分割四角形は、分割する際、隣接する「四角形」または「辺」にその隣接情報を与える。あるいは、四角形は活性四角形として隣接四角形を探索して、その隣接情報を取得することで整形、延長、明確化、部材の重なり防止を行う。例えば、活性四角形の活性辺(Active Edge)はどの辺か、隣接四角形はどの四角形でそのタイプは何か、その隣接四角形のどの辺に、どの様に接していたか、四角形の傾きなどは、四角形の頂点をラベリングすることで取得できる。図2(b)で、頂点のラベリングは四角形の頂点を時計回りに辿るとき(clock-wise)、右に向かう最長辺の始点を点1として、順に頂点のラベリングを行

う。同じく、これまでの研究²⁾で、図2(b)が示すように、分割四角形は「活性辺」、もしくは、「保存辺(Stored Edge)」を共有して、主ポリゴンに接続し、これらの辺上には、壁を作らない。これらの辺以外の辺上に壁を作り、ポリゴン全体を囲むように壁は作られる。ここで、窓やドア等を設置する場合、設置が可能な壁かどうかを明確化しなければ、窓やドアが「建物分岐部」と交差して、重なり合いが生じてしまうという不具合を生じる。

図2(b)の枝部D、Eと図2(c)が示すように、切妻屋根の「妻」側に接続している枝部D、Eは、建物ポリゴン再構築時に、その屋根を延長しないと判断している。もし、延長してしまうと、部屋の中に屋根が突き出し、屋根延長部が壁板と重なり、フック法則で反発力が生じ、建物が倒壊してしまう。そこで、枝部の「活性辺」が隣接情報を取得し、隣接四角形が切妻屋根でかつ隣接辺が「妻」側であるed23、ed41の場合、「延長しない切妻屋根」としている。逆に、図2(b)で示す枝部A、B、Cは切妻屋根の「平側」に接しているので、建物ポリゴン再構築時に、枝屋根を延長する。

ここで、本システムでは、枝部A、B、Cを場合分けして、枝屋根を生成している。本システムでは、四角形の頂点を時計回りに辿り、右に向かう最長辺の始点を点1とするか、左に向かう最長辺の始点を点3として、頂点のラベリングを行っている。枝部Cは「切り取られる四角形」と「枝屋根が載る四角形」を指すとして、Cの枝屋根の棟はこの2つの四角形の長辺に平行な屋根となる。逆に、枝部Aの「切り取られる四角形」と「枝屋根が載る四角形」は、Aの枝屋根の棟が2つの四角形の長辺に「垂直」な屋根となる。もし、枝部Aに四角形の長辺に平行な屋根となる枝屋根を設置すると、その棟が「主屋根の棟」と平行な枝屋根となってしまうという不具合を生じる。ここで、枝部Bは「切り取られる四角形(B1B2B3B4)」と「枝屋根が載る四角形(b1b2b3b4)」は、「方向(四角形の長辺の向きと同じとする)」が異なる。枝屋根の棟が、「枝屋根が載る四角形」の長辺に平行な棟と

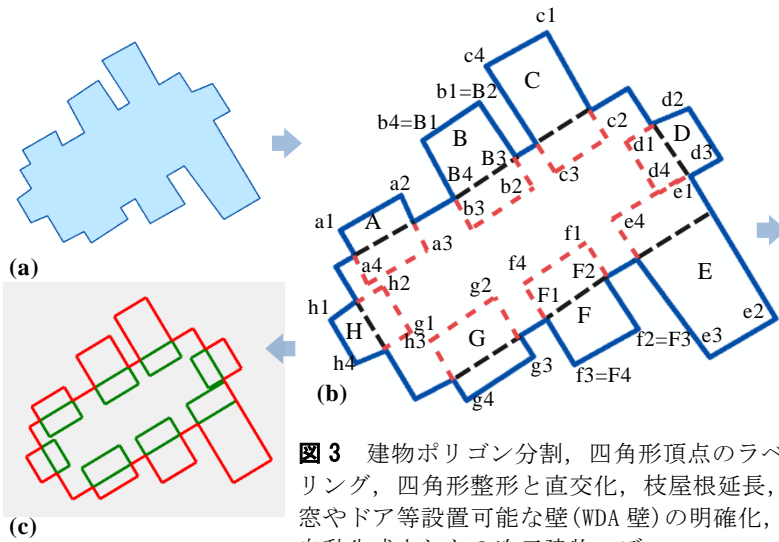


図3 建物ポリゴン分割，四角形頂点のラベリング，四角形整形と直交化，枝屋根延長，窓やドア等設置可能な壁(WDA 壁)の明確化，自動生成された3次元建物モデル

- (a)建物ポリゴン (b)ポリゴン分割，四角形頂点のラベリング，整形と直交化，枝屋根延長 (c)窓やドア等設置可能な壁：WDA (Window and Door Available)の明確化 (red line segment) (d)自動生成された3次元建物モデル (e)屋根板を透明化して，屋根下構造物を表示した3次元建物モデル

なるが、「切り取られる四角形」には垂直な棟となる。このように、枝部 A には四角形の長辺に垂直な棟となる屋根(「横長切妻屋根」)を設置し、枝部 B、C には四角形の長辺に平行な棟となる屋根(通常の切妻屋根)を設置する。図3にも、まったく同様に枝部の長さによって場合分けする枝屋根の例を示す。図2のポリゴンと異なる点は、図3の枝部 D と H は主屋根が寄せ棟屋根であるので、主屋根に延長する枝屋根となる点である。本システムは、このような判断を、ポリゴンの枝部を切り取る時に行う。即ち、四角形分割時に、その分割四角形の最長辺、その方向、分割パターン(Forward DL か Backward DL か F&B DL)などを調べ、活性辺の決定、活性辺の隣接四角形サーチ、隣接四角形のどの辺が隣接辺か、隣接四角形方向や属性、階数などを取得し、それらに基づいて、屋根タイプ(「切妻屋根」、「寄せ棟屋根」、「横長切妻屋根」、「延長しない切妻屋根」、「延長しない横長切妻屋根」、「片流れ屋根」など)を決定する。本システムでは、これらの屋根タイプをさらに、四角形のどの辺が「妻側」になるのか、「活性辺」になるのかに応じて、分類し、「屋根タイプコード」を割り当てる。

5.部材の重なるの防止するためのローカル座標設定

本システムで自動生成する建物の3Dモデルは力学シミュレーションが行えるよう、建物を構成する部材が重なり合うことがなく、力学的に安定した構造の建物、いわば、構造用金物のない「組積造」の建物を仮想空間で構築するものである。そのために平面図と側面図、立面図で見て、部材が重なり合わないよう、また、力学的に安定するように形状の設計、配置を行う必要がある。例えば、図3(e)に示すように、屋根板を支えるためには屋根下構造物として垂木と天井根太を一体化したものを

屋根板の下に等間隔に配置して、屋根を支える。さらにそれらをその下の天井板と壁が支える構造となっている。屋根板が垂木、天井根太を一体化したものを滑り落ちることのないよう天井板をもっとも幅広として、軒長も確保している。

平面図で見て部材が重なり合わないようするために、「主屋根と枝屋根の境目」に注目し、そこで部材の干渉が起きないように、枝屋根の部材の位置を決める「枝部のローカル座標」を、主屋根の壁板の厚さを考慮して設定する。下の図4に、図3の枝部Cと枝部Fを拡大した平面図を示す。ここで、枝部の天井板が「主屋根の壁板」と干渉しないようにローカル座標は主屋根の壁板の厚さ分だけ主屋根から離れるよう設定してある(主屋根の壁高と枝屋根の壁高が必ずしも一致しないとしている)。枝部の垂木と天井根太は「主屋根の軒長」を考慮して、軒と重なり合わないよう垂木の間隔、端の垂木の位置を決めている。

本システムでは、建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割し、各四角形に屋根と建物本体を配置する。屋根や建物本体の部材を配置するとき、枝部の四角形にうまくローカル座標を設定すると、枝部の部材が「主屋根の部材」と干渉せず、また、枝部の部材の配置が容易になる。

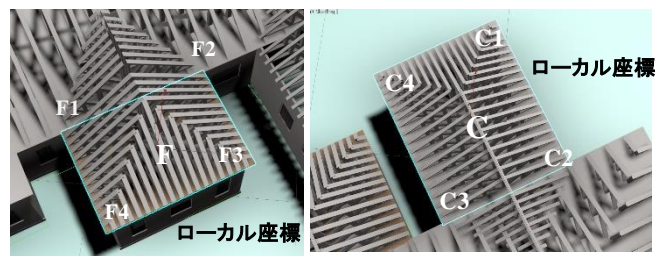


図4 枝部C & F(図3)を拡大した投影図、枝部の天井板は主屋根の壁板と干渉しないように枝部のローカル座標(ラベリングして表示)は壁板の厚さ分シフトして設定

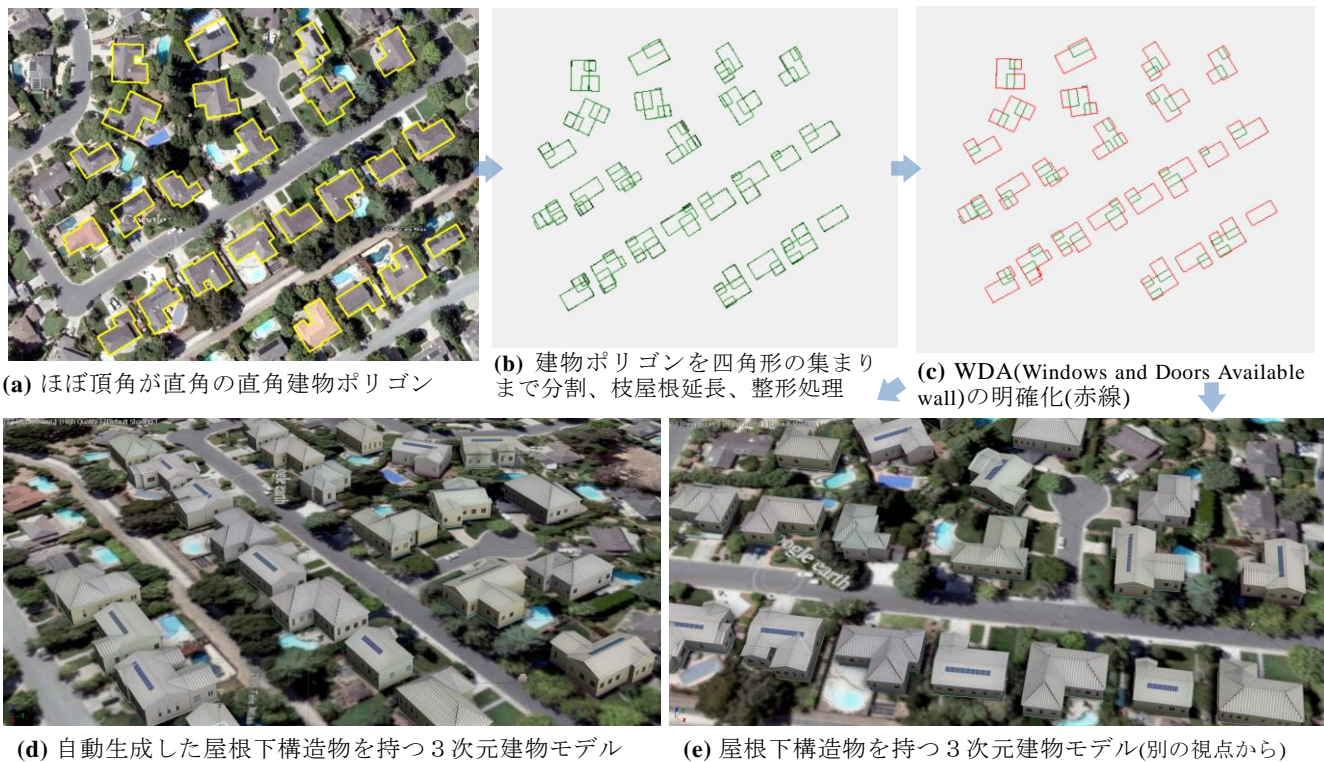


図5 屋根下構造物を持ち、部材の重なりを排除し、力学的に安定した動的3次元建物モデル自動生成

例えば、寄せ棟屋根の「普通屋根」と「隅木」との間を埋める「配付き垂木(jack rafters)」の制御点(CP)の位置をローカル座標の縦線あるいは横線上に配置できれば、垂木の位置を決める算術式は単純となり、それらを干渉のない位置に容易に配置することができる。

電子地図上の建物境界線に建物の3Dモデルを正しく配置するには、建物境界線を分割してできる分割四角形のローカル座標に基づいて、四角形内で指定する「親部品」に対して、当四角形内の各部材を適切な相対位置になるように配置し、分割四角形の中心位置に対する「親部品」の制御点の位置を明らかにする式に基づいて、「親部品」を回転・移動すれば、建物の3Dモデルを正しく配置できる。

6. 本手法の適用事例とまとめ

本システムを適用した事例を上図5に示す(自動生成のシステム構成は図1参照)。図5の左上から3次元建物モデルの元になる電子地図上の、様々な形状をした頂角がほぼ頂角が直角の建物ポリゴン群、それらの図形情報を、ArcPy(ArCGIS)をインクルードしたPythonモジュールによって頂点と属性情報を取得する。それをGISモジュールが取り込み、建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割し、活性四角形は隣接四角形、隣接辺を探索、それらに応じて、整形して、枝屋根延長、枝屋根の種類を決め、枝屋根を生成し、建物全体を自動生成する。そのプロセスを図5(b)で、「建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割、枝屋根延長、整形処理」、図5(c)で、「WDA(Windows and Doors Available wall)の明確化(赤

線)」を示す。

図6では、本システムで自動生成した「動的3次元建物モデル」と「大量の移動要素」とのインタラクション、力学シミュレーションの事例を示す。国が示した日本海側統一の津波断層モデルを使い、福井県が新たな想定により最大津波高が大幅に増加した福井県坂井市三国地区のオルソ画像を元に、津波シミュレーションモデルを構築した。GIS上の津波浸水想定地域とされたオルソ画像と、その地区を囲むキー等高線と地区内一部の建物境界線を元に、3次元地形モデルを生成し、建物境界線から動的3次元建物モデルの生成した図を示す。図6では、地形モデルとその上の大量の移動要素、そして、「動的3次元建物モデル」の間の相互作用で建物モデルが倒壊する力学シミュレーションを示す。

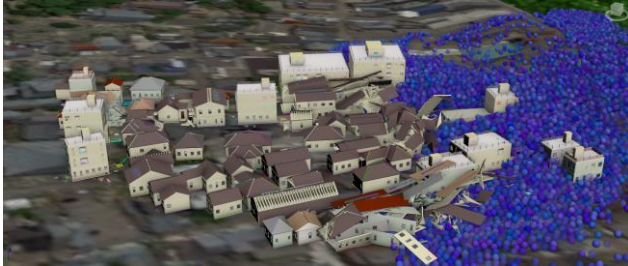
本システムの有効性として、3Dモデル製作時間の大幅な短縮がある。例えば、図6の50軒ほどの建物の3Dモデルを製作するのに、BIMソフトを使う場合、複合する寄せ棟屋根、壁や窓やドアの作成に加え、比較的複雑な形状の屋根下構造物(図3(e)や図4参照)、それらを作成するには、「垂木と天井根太を一体化したもの」の雛形を作り、それを部品としてソフトに登録し、繰り返しコピー機能を使っても、平面図、立面図から3Dモデルを立ち上げるには数時間要すると考えられる。仮に1軒あたり、2時間としても、50棟で100時間はかかる。自動生成システムでは、建物境界線の形状の複雑さにも依存するが、住宅の屋根下構造物を含めて、GISモジュールの処理を入れて、10分以内で自動生成可能である。



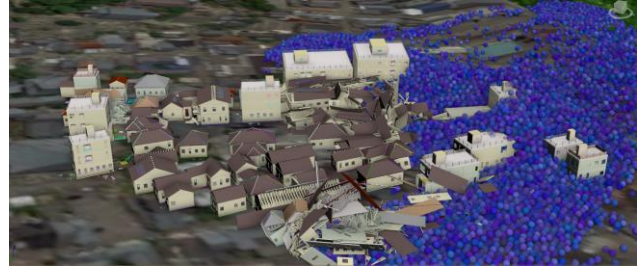
(a) 自動生成した三国地区の3次元地形モデル上の建物モデル(堤防の高さ, 地区の高さをGISモジュールで与えている)



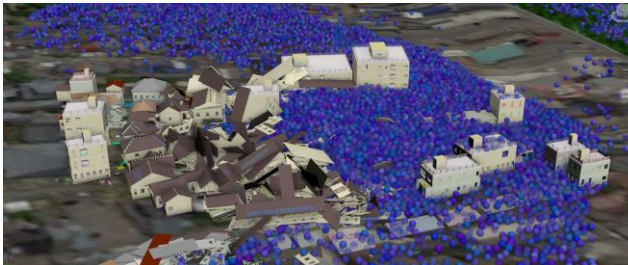
(b)「動的3次元建物モデル」は窓設置可能な壁に窓用に穴を開けた壁が「凸包立体の集まり」には変換していないので, 窓が弾かれる



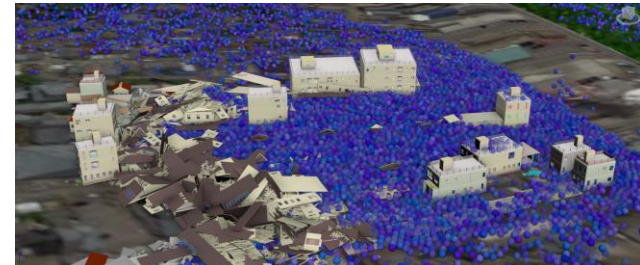
(c) 津波が堤防(高さ3mとしている)を乗り越え,「動的3次元建物モデル」に接触・破壊し始めた状況



(d) 津波が堤防(高さ3m)を乗り越え,「動的3次元建物モデル」を破壊し始めた状況



(e) 津波が堤防を乗り越え,「動的3次元建物モデル」を破壊、押し流している状況



(f) 津波が堤防を乗り越え,「動的3次元建物モデル」を押し流している状況

図6 自動生成した三国地区の3次元地形モデルと建物モデル(堤防の高さ, 地区の高さをGISモジュールで与えている), 津波に相当する大量の移動要素と建物モデルの間のインタラクションで建物モデルが倒壊

今後の課題として、本研究で自動生成する「動的3次元建物モデル」は仮想空間で構築する「組積造の建物」と考えるが、本モデルの妥当性を検証するために、例えば、ニュージーランドの2011年2月のクライストチャーチ地震において、倒壊した補強組積造の建築物の倒壊状況と本研究でモデリングする建物の倒壊を比較して、本モデルの妥当性、有効性を高めることを考えていきたい。

本研究では、仮想空間内で「物理シミュレーションを行える部材」で「部材の物理形状(幾何形状とは異なる)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、「土砂移動現象を再現できる大量の要素群」を備えた3次元地形モデルを用いて、「津波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、防災まちづくりの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：19K04750 と 20K03138、21K04405 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, *Journal of Computing in Civil Engineering* ASCE, Vol.27, pp.476-488, 2013.
 2) 杉原 健一, 村瀬 孝宏: 3次元建物モデルの自動生成のための建物境界線のポリゴン整形, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, Vol.72, No.2, p. I_167-I_174, 2016.
 3) 杉原健一、沈 振江、村瀬 孝宏: 窓設置可能な壁を明確化する建物ポリゴン分割及び整形による3次元建物モデルの自動生成、*日本建築学会 第43回 情報・システム・利用・技術 シンポジウム*, DVD-ROM 収録 4 page, 2020.12.10.
 4) Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool: Procedural modeling of buildings, *ACM Transactions on Graphics* 25, Vol. 3, pp.614-623, 2006.
 5) 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.
 6) 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.
 7) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, *Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Society for Rock Mechanics (ISRM), France, II-8, 1971.*
 8) Gino vanden Bergen: Collision Detection in Interactive 3D Environments, *Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology*, 2004.