

階数の異なる四角形の集まりに分割するポリゴン分割手法による 階段状建物モデルの自動生成

Automatic Generation of Step-Shaped Building Models using a Polygon Dividing Method with a Set of Divided Quadrilaterals of Varying Story

○杉原 健一*¹, 沈 振江*², 村瀬 孝宏*³
Kenichi SUGIHARA *¹, Zhenjiang SHEN*² and Takahiro MURASE*³

*1 金沢大学 理工研究域 研究協力員 博士(工学)

Researcher, Kanazawa University, Faculty of Geosciences and civil Engineering, Dr. Eng.

*2 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.

*3 中京学院大学 短期大学部 教授

Professor, ChukyoGakuin University

Summary: We aim to automatically generate "Step-Shaped Building Models" by dividing the building contours (building polygons) on digital maps into a set of divided quadrilaterals ('quads' for short) and assigning different story to them. In previous research, we divided and reshaped building polygons into a set of quads and based on the floor numbers associated with the building polygons, we extrude the entire polygon by the number of floors to automatically generate 3D building models. In this paper, a building polygon is considered as a "tree structure" consisting of divided quads. The assigned floor numbers to the divided quads depend on the "layer" (tree depth) of the quad, where a quad with branches can have a child branch, which then can have a grandchild with lower layer. Specifically, the "root" of the tree has the full number of floors, the "leaves" have initial floor numbers, and the quads in intermediate layers are assigned intermediate floor numbers calculated from the full floor and the initial floor number. This allows for the automatic generation of step-shaped buildings. A step-shaped building can be a promising candidate for a "smart building" by implementing rooftop greening and installing solar panels on balconies.

キーワード: 自動生成; 3次元建物モデル; 階段状建物; ポリゴン分割; 建物境界線

Keywords: Automatic generation; 3D building model; step-shaped building; polygon partition; building footprint.

1. はじめに

経済発展と社会的課題の解決を両立する「Society 5.0」の実現には、「IoT」や「責任ある AI」、「ビッグデータ解析」等の情報技術の成果を最大限活用し、現実都市のデジタルレプリカである「スマートシティ/デジタルツイン」プロジェクトを強力に推進する必要がある。「デジタルツイン」では、「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る。デジタルツインの3Dモデルは人や車の流れだけでなく、ビルのパイプラインの水や電気等の流れをリアルタイムで把握できるとしている。ここで、持続可能な「スマートビル」とこれらを集合した「スマートシティ/デジタルツイン」はどうあるべきかを仮想空間で検討するとき、建物の3Dモデルは屋上緑化やソーラーパネルを備え、どれぐらいパネルが太陽光を受け止められるのか。さらに、3Dモデル内部、即ち、部屋に入ることができ、建物形状に応じて、冬に太陽光がどのように導かれるのか、あるいは、夏にはど

のように遮蔽されるのか等をシミュレーションできれば、よりよいスマートビルの設計につながる。そのため、建物の3Dモデルを効率よく作ることが求められる。しかし、現状では、3Dモデルを構築するには、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形状の建物本体と屋根を配置して3次元建物モデルを自動生成した。さらに、分割四角形のどの辺に壁を作り、あるいは、「壁のどこからどこまで窓やドアが設置できるか(WDA壁: Windows and Doors Available wall)」を明らかにする手法も提案した³⁾。本研究では、建物ポリゴンを分割して出来上がった「分割四角の集まり」を、分割された「枝部」を「子」、残った四角を「親」とする「ツリー構造」とみ

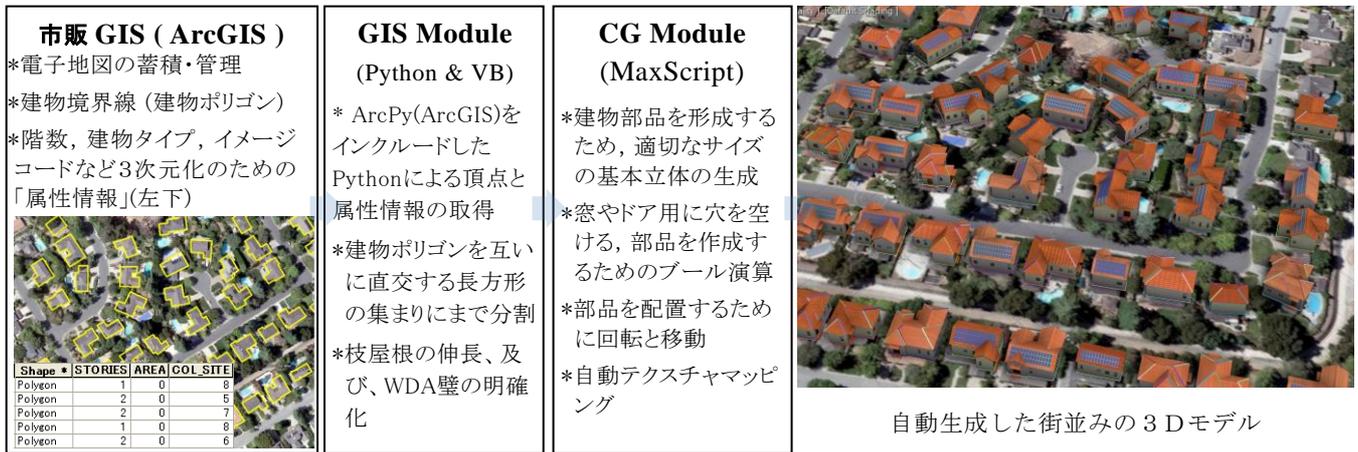


図1 自動生成システムの構成と3Dモデルの自動生成のプロセス

なし、「ルート(root)」には建物ポリゴンに関連付けている「フル階数」、子がない「リーフ」は「スタート階数」、ルートとリーフの間の「層」の四角形には、「ツリー全体の階層」とフル階数、スタート階数から計算される中間の階数を与え、「階段状建物」を自動生成するとした。ここで、「層」は、その四角形が枝部を持ち、その枝部がさらに何層までの子の枝部を持つかの「レベル(ツリー深さ)」とした。

本研究は、例えば、デザイナーが図3や図6に示すような「階段状建物」の3Dモデルをいくつか作ってみたいとき、建物境界線を描き、その境界線に「フル階数」と「スタート階数」という属性情報を与えれば、「階段状ビル」の3Dモデルを自動生成するシステムの開発を目的とする。

2. 既往の研究

街並みの3Dモデルは、広範囲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で街並みの3Dモデルを構築する研究が盛んである。現存する街並みの3Dモデルは、ステレオ画像の航空写真や衛星写真からCV(コンピュータビジョン)や写真測量(Photogrammetry)、リモートセンシングの技術を用いて、建物をふくむ地物の3次元形状を復元する。これらの測量法は、得られた点群に面を割り当て、テクスチャマッピング(模様貼り付け)を施した表面モデル(Surface Model)であり、正確なサイズの建物概形の3Dモデルを提供するが、窓や玄関、柱、壁といった建物の詳細を持たず、力学や建物内の太陽光などのエンジニアリングシミュレーションが困難な、現状把握や景観を重視する3Dモデルである。

まだ、存在しない、これから作る計画案の街並みの建物の3次元形状をドローン等で取得することはできないが、詳細を有する現状ありうる形状の3次元建物モデルを、製作ルール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、この手続き型モデリングにおいて、GISが蓄積管理する電子地図から「建物境界線」を取り込んで、彼ら

の形状言語において、基本形に分類する。もし、それができない形状であれば、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している。しかし、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」を持つ屋根しか生成できない。屋根形状は多種多様に渡り、「長辺に垂直な頂線」となる屋根も存在する。

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、各四角形の上に、建物ポリゴンに関連付けた属性情報によって、「長辺に垂直な頂線」の屋根も生成できる。また、本研究の建物の3Dモデルは、リモートセンシングやProcedural modelingで得られる表面モデルと異なり、3Dモデルの各部材は中身の詰まったCSGのモデルであり、3Dモデルの内部に入って、太陽光がどのように差し込むか、あるいは、力学や熱伝導・熱流体解析等の「解析モデル」に利用できる。

3. 端枝部の場合分けによるWDA壁の明確化

本手法では、建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割し、全ての分割四角形にIDを割り当て、分割四角形の「隣接情報」を調べ、この隣接情報に基づいて、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、これら長方形の上に、主に薄いbox形状の壁や板を組み合わせて、建物本体や屋根を自動生成する。この「隣接情報」は、分割処理が全て終了し、全ての四角形にIDが割り当てられたあと、分割した四角形の「切り口の辺」が、どの四角形に含まれ、次に、その四角形のどの辺に含まれるかを順次探索し、隣接情報を取得する。具体的には、四角形頂点の「ラベリング(番号付け)」を行い、辺に辺番号をつけ、「どの四角、次にどの辺に含まれるか」を特定する¹⁾²⁾。

本手法では、次の図2に示すように四角形の端に位置する分割四角である「端枝部」の有無に応じて、WDA壁(Windows and Doors Available wall)の範囲を場合分け

し、明確化を行う。本システムでは、分割四角の各辺を「オブジェクト」として、その辺に接していた「子の分割四角」の隣接辺の2頂点の座標を「足跡(footprint)」として「辺オブジェクト」に保存する。その頂点の座標は「添字: R(j).i_ed34_last」を割り振り記憶する。ここで、「R(j)」はj番目に分割された「四角形(Rectangle)オブジェクト」、「i_ed34_last」はそのメンバーで「親の四角形の辺34(ed34)に残した子である分割四角の足跡の頂点座標の”添字”」となる。分割は順番に行われるとは限らないので、辺上の足跡である頂点を順に並べる必要がある。これら頂点を辺オブジェクトの「原点」(辺34であれば原点は頂点3:図5(b)(c)で「pt3」)からの距離に応じて、ソートして、図2の表上から2行目の式に示すようにWDA壁の座標を出力する。

これまでの研究¹⁾²⁾で、四角形の頂点は時計回り(Forward)に番号付けし、反時計回りはBackwardとした。図2の場合分けでは、その辺にBackwardに分割する枝部がない場合(Bw_bra_flag=Off)は、WDA壁はその辺の原点からスタートし、Forwardに分割する枝部がない場合(Fw_bra_flag=Off)は、WDA壁はその辺の終点で終

了する。Backwardに分割する枝部がある場合(Bw_bra_flag=ON)は、WDA壁は端枝部の本体四角と共有する頂点と異なる頂点からスタートするというように場合分けし、WDA壁を明確化する。図2の表の2行目で、「R(i).num_WDA_e34」は「辺34(e34)上のWDA壁の数(num_WDA)」を表し、4つのケースで表のように計算される。同図左端のケースで $\text{Int}(\text{nv}(\text{i_st})/2)$ の $\text{nv}(\text{i_st})$ は i_st 階での「足跡の数」で、その半分がWDA壁の数となっている。この場合、辺34上の複数のWDA壁の両端の座標は以下の式;

For j = 1 To $\text{nv}(\text{i_st})$

$$\text{R}(\text{i}).\text{ptd_WDA_e34}(\text{j}, \text{i_st}) = \text{R}(\text{i}).\text{pt_WDA_e34}(\text{j}, 1)$$

で与えられる。ここで、 $\text{R}(\text{i}).\text{pt_WDA_e34}(\text{j}, 1)$ はソートされた1階のWDAの頂点の座標を表し、 $\text{R}(\text{i}).\text{ptd_WDA_e34}(\text{j}, \text{i_st})$ は、 i_st 階の決定されたWDAの頂点の座標を表す。1階のWDAが基本で、上階である i_st 階では、次章で述べる階層レベル(k-th)によって、端枝部はなくなる場合があり、2つの添え字で pt_WDA (WDAの頂点) を区別する。

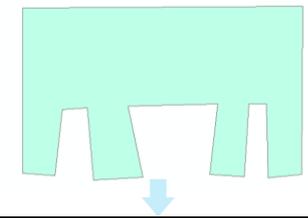
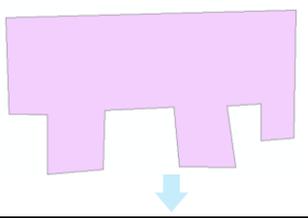
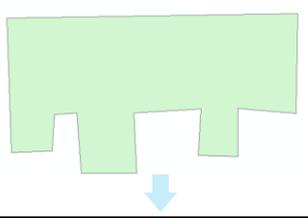
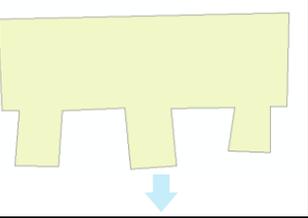
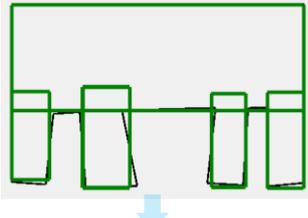
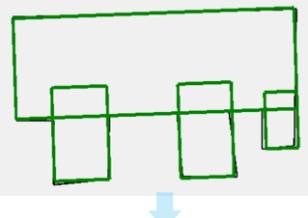
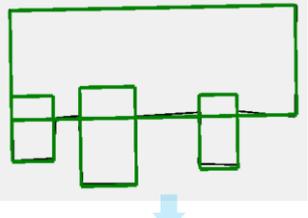
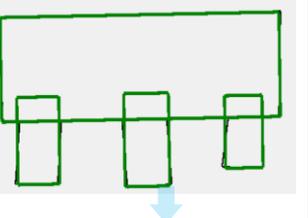
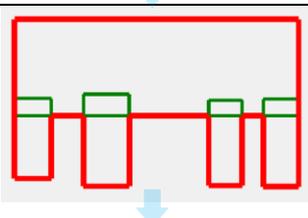
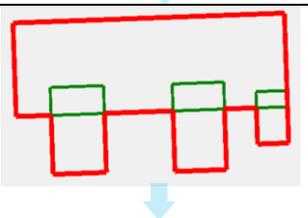
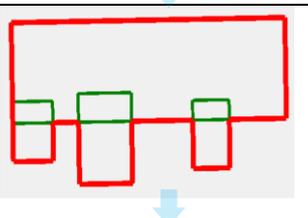
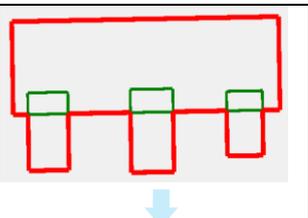
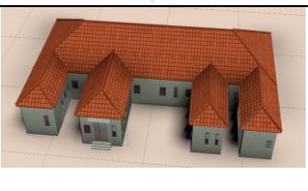
Fw_bra_flag=ON; Bw_bra_flag=ON;	Fw_bra_flag=Off; Bw_bra_flag=ON;	Fw_bra_flag=ON; Bw_bra_flag=Off;	Fw_bra_flag=Off; Bw_bra_flag=Off;
R(i).num_WDA_e34= $\text{Int}(\text{nv}(\text{i_st})/2)$ For j = 1 To $\text{nv}(\text{i_st})$ R(i).ptd_WDA_e34(j,i_st)= R(i).pt_WDA_e34(j, 1)	R(i).num_WDA_e34= $\text{Int}((\text{nv}(\text{i_st})+1)/2)$ For j = 1 To $\text{nv}(\text{i_st}) - 1$ R(i).ptd_WDA_e34(j+1,i_st) =R(i).pt_WDA_e34(j, 1)	R(i).num_WDA_e34= $\text{Int}((\text{nv}(\text{i_st})+1)/2)$ For j = 2 To $\text{nv}(\text{i_st})$ R(i).ptd_WDA_e34(j+1,i_st) =R(i).pt_WDA_e34(j, 1)	R(i).num_WDA_e34= $\text{Int}((\text{nv}(\text{i_st})+2)/2)$ For j = 2 To $\text{nv}(\text{i_st}) - 1$ R(i).ptd_WDA_e34(j+1,i_st) =R(i).pt_WDA_e34(j, 1)
			
			
			
			

図2 建物ポリゴンの端枝部の有無による場合分け、窓やドア設置可能な壁(WDA壁)の数と座標の導出式、元の建物ポリゴン、ポリゴン分割、四角形整形と直交化、枝屋根延長、WDA壁の明確化、自動生成された3次元建物モデル

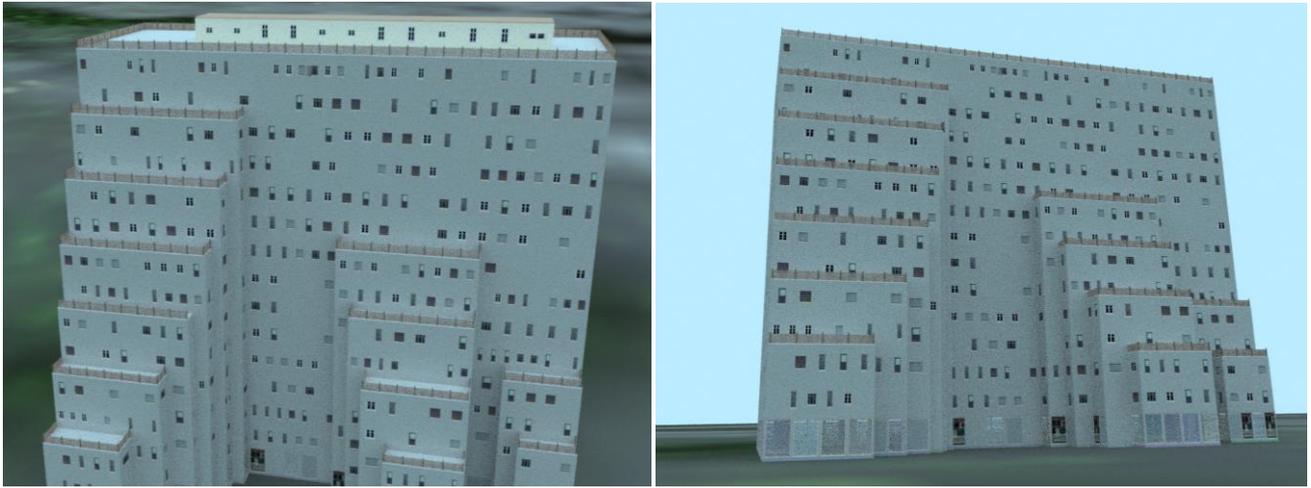


図3 本研究で自動生成した階段状ビルディング（15階建て、階層レベル(k-th)は7層）

4. 階数によるWDA壁の変化

これまでの手法では、建物ポリゴンに関連付けている階数に応じて、建物ポリゴン全体を、その階数分、「押し出し」処理するように建物を自動生成してきた。建物の容積は多くとれるものの、階段状建物などの多様性のある建物は自動生成できなかった。階段状建物は、広く屋上緑化やベランダに太陽光パネルを設置できる。

本手法では、建物ポリゴンを四角形の集まりまで分割し、分割四角が「隣接四角の属性情報や隣接辺、隣接の仕方である”隣接情報”」を検索・取得し、それらに基づいて、分割四角上に建物を自動生成する。本手法では、この検索する分割四角が上記隣接情報に加え、「階層レベル(ツリーの深さ：以下 k-th とする)」も取得する。即ち、

分割四角は接続している「親四角」の「k-th (階層レベル)」を取得し、自分より小さいか等しい場合に、その親四角の k-th を自分より一つ大きい k-th にする。この操作は、次にその親四角を「子四角」として、その子四角が親四角を持つかどうかを調べ、親の k-th が自分より小さいか等しい場合、親の k-th を自分より一つ大きくする。この操作を親四角が「ルート(ツリーの最上位)」か「吸収型四角」になるまで続ける。

上記操作を行い、全ての分割四角に k-th が与えられ、それに基づいて、「階数」が計算される。この操作の結果を図3の階段状建物で示す。即ち、ルートの四角は建物ポリゴンに関連付けた「フル階数」である15階、四角形の集まりをツリー構造とみなし、リーフの四角は

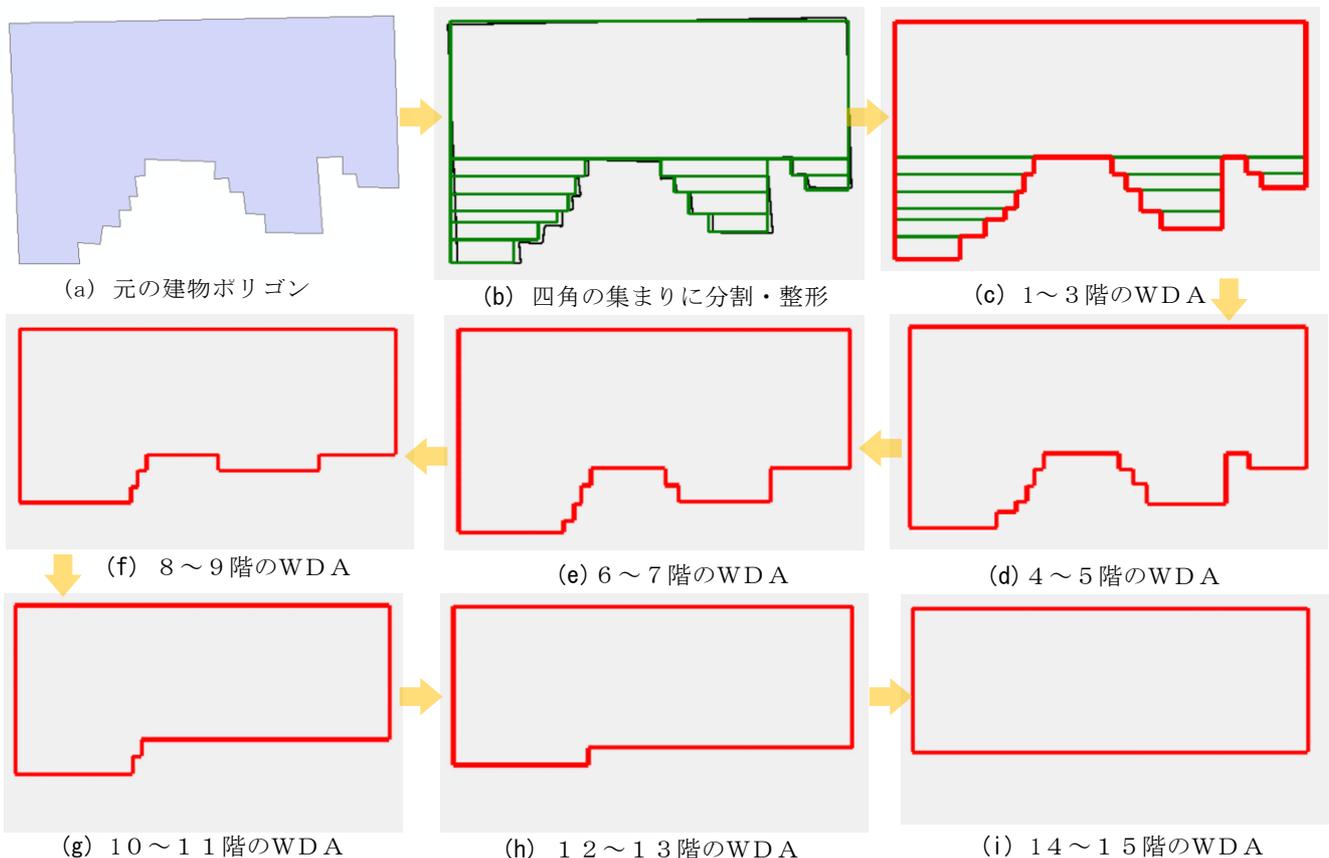


図4 ポリゴン分割、四角形整形と直交化、各階における WDA(Windows and Doors Available wall)の変化

「k-th」が最小の1で、「スタート階数(=3)」としている。これらの中間の四角には、それらの k-th のレベルに応じて、階数を次の式に基づいて算出する。

$$\text{floor_dif} = \text{Int}((\text{stories} - \text{sta_st}) / (\text{k-th_max} - 1))$$

$$\text{Rect(ii).story} = \text{sta_st} + \text{floor_dif} * (\text{Rect(ii).k-th} - 1)$$

ここで、「sta_st」は「スタート階数」, 「stories」は「フル階数」, 「Rect(ii)」は ii 番目の分割四角で, 「Rect(ii).story」は分割四角の階数, 「Rect(ii).k-th」は分割四角の「階層レベル(k-th)」, 「Int()」は小数点以下を切り捨て、整数化する関数である。具体的に、図3の建物の場合、sta_st=3, stories=15, k-th_max=7 となり、floor_dif=2 と算出され、Rect(ii).k-th=1 で Rect(ii).story=3, Rect(ii).k-th=2 で Rect(ii).story=5 となり以下、Rect(ii).k-th より、Rect(ii).story が算出される。

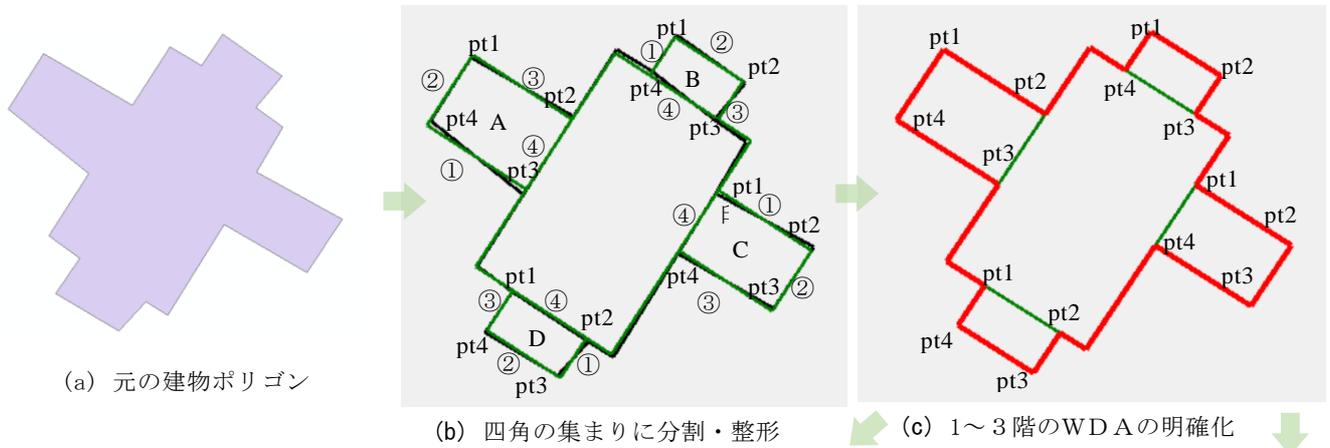
各分割四角の上に、算出された階数分の建物を生成することになるが、図4に示すようにWDA壁の範囲は階数によって異なることになる。例えば、図4のルートの子四角にはフル階数(=15階)が与えられるが、その3つの「子四角」は、k-th が異なるため子四角の階数が異なる。建物向かって右側の子四角の k-th は2であるので、階数=sta_st + floor_dif * (Rect(ii).k-th - 1)=5となり、建物向かって真中の子四角の k-th は4で、階数=9、建物向かって左側の子四角の k-th は6で階数=13となる。ルートの四角が1階から15階まで階数を上げていくとき、

5階までは隣接する3つの子四角から生成される「枝建物」と接し、6階からは向かって右側の枝建物は消え、9階までは2つの枝建物と接し、10階からは、1つの枝建物と接し、さらに、14階と最上階では接する枝建物はなくなり、ルート四角の全ての辺に窓が取り付けられる。

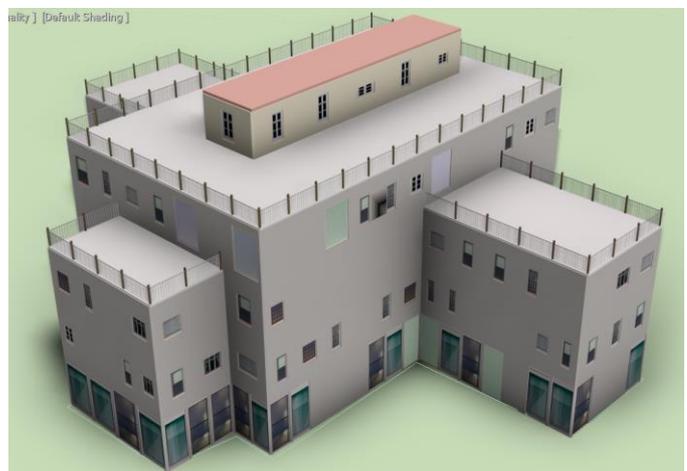
WDA壁は2章で述べた4つのケースに場合分けされて、導き出され、図3の建物の1階から5階では、辺両側の端枝部がある場合(Fw_& Bw_bra_flag=ON), 6階から13階では、片側のみ端枝部で、中間枝部(Fw_& Bw_bra)がある場合(Fw_bra_flag=ON, Bw_bra_flag=Off)と場合分けして、WDA壁を導出する。

5. 階段状建物モデル用フェンス設置位置明確化

これまでの研究で、頂角がほぼ直角の建物ポリゴンを四角形の集まりに分割し、四角形頂点のラベリングを行い、「分割四角」は自分の「切り口の辺」がどの四角形と接続し、その四角のどの辺かを調べ、「隣接四角の属性情報や隣接辺、隣接の仕方などの“隣接情報”」を取得した。階段状建物モデルのバルコニーフェンスの設置位置を明確化する際も、分割四角形の「切り口の辺」が「どの辺か」に基づいて、フェンスの設置位置を明確化する。即ち、「切り口の辺」にはフェンスを設置せず、「切り口の辺」以外の辺で、少しセットバックした位置にフェン



(d) バランダにフェンスを設置した建物(1)



(e) バランダにフェンスを設置した建物(2)

図5 ポリゴン分割、四角形整形と直交化、WDA とフェンス設置位置の明確化

スを設置する。分割四角形が自分の「切り口の辺」をどう特定するかを図 5 に示す。図 5(b)(c)において、時計回りに四角形の頂点を辿るとき、右に向かう辺が最長のとき、その始点を点 1(pt1), または左に向かう辺が最長のとき、その始点を点 3(pt3)とし、残りの頂点を時計回り順に番号付けする。このとき、「切り口の辺」は図 5 に示す「頂点の相対添字(①~④)」に示すように、必ず④番目となる。即ち、図 5(b)の左に向かう辺が最長となり、その始点が点 3 となる分割四角 A においては相対添字④の辺 23(pt2 と pt3 の間の辺)が「切り口の辺」、分割四角 B においては辺 34, 分割四角 C においては辺 41, 分割四角 D においては辺 12 がそれぞれ「切り口の辺」となる。このように本システムは分割四角の頂点を時計回りである「相対添字(①~④)」順に辿り、辺長を計算し、その 4 つの辺の中で最長の辺の相対添字、その辺の向きから、上記のように「切り口の辺」を決定する。

6.まとめ

本研究では、建物ポリゴンを四角の集まりまで分割し、四角の集まりをツリー構造とみなし、従来からの「隣接情報(隣接四角の属性情報や隣接辺、隣接の仕方)」に加え、分割四角はツリーのリーフからの階層レベル(k-th)を取得し、それに基づいて、各分割四角に異なる階数を与え、階段状建物モデルを自動生成した。このとき、分割四角の上に box 形状の建物を組み合わせて建物全体を構築するが、窓やドア、掃き出し窓を設置できる壁(WDA壁)を明らかにする必要がある。WDA壁は階段状建物モデルでは、隣接している子の分割四角の階数に応じて、即ち、子の分割四角の階数以下では、子の建物によって、WDA壁は遮られ、階数以上では、子の建物によって遮

られることはない。本研究では、異なる階数となる分割四角上の建物本体の組み合わせで、階数が増すにつれ、WDA壁が変化する(遮られることなく広がる)ことを明らかにした。いわば階数という上に向かう軸にも依存する「2次元でのWDA壁の明確化」を行った。階段状建物は、下の図 6 に示すようにバルコニーに植栽することでの屋上緑化やベランダに太陽光パネルを設置することができる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費の研究課題番号：20K03138 と 21K04405, 23K04156 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 (American Society of Civil Engineers), Vol.27, pp.476-488, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000192
- 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 (2016) No.2 p. I_167-I_174.
- 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.



(a) 階段状建物モデルを正面から見た図



(b) 屋上緑化した階段状建物(17階、17階、19階)



(c) 階段状建物(17階、17階、19階、全て k-th=7)



(d) 側面から見た階段状建物モデル

図 6 自動生成した屋上緑化した階段状建物(17階、17階、19階、全て k-th=7)