

街区単位的环境政策の検討・評価に活用する 街区の3Dモデルの自動生成

杉原 健一¹・沈 振江²・林 良嗣³

¹正会員 岐阜経済大学教授 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

²非会員 金沢大学教授 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-8667 金沢市小立野2丁目40番40号)
E-mail: shenzhe@t.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: yhayashi@genv.nagoya-u.ac.jp

街区レベルにおいて、環境政策の大きな柱の一つである地球温暖化対策において再生可能エネルギーの活用を強力に推進するために、建物や太陽光発電パネル、街路や敷地等を、再生可能エネルギーを活用するのに適したかたちにすることが求められている。そのとき、現実に出てくるであろう形を具体化する「街区の3Dモデル」は、建物の様々な形状や太陽光パネルの大きさや向き、屋上緑化、壁面緑化の可能性を検討・評価、あるいは、関係者で合意形成を図るときに非常に有効である。現状では、この街区レベルの3Dモデルを多大の時間と労力を掛けて作成している。本研究では、GISが蓄積・管理する電子地図に基づいて、太陽光発電に適した建物の3Dモデルを自動生成するシステムを開発した。エコまちづくりにおいて、色々な計画案や代替案をすばやく製作することが望まれている。本システムは、案に対する様々な変更や要望に迅速に対応し、モデルを効率的に自動生成する。

Key Words : 3D city block model, automatic generation, GIS, CG, 3D building model, environmental policy

1. はじめに

逼迫した地球環境問題に対応するため、再生可能エネルギーを導入する「創エネ」で低炭素型の都市を構築することが急務である。このとき、集約型都市構造の実現に資する拠点の市街地等において地区・街区単位における先導的な環境負荷削減の環境政策を推進する試みは重要である¹⁾。そこで、街区の3Dモデルを中心とする「3次元都市モデル」(図-1右参照)は、「太陽光発電に適したまちづくり」や「自然と共生するまちづくり」等の環境まちづくりを推進する環境政策に対して合意形成を図るための住民参加の場として利活用が期待される重要な「情報基盤」である。

特に、次の世代に地球温暖化による気象災害などの危険性の無い安心できる自然環境を引き継ぐためには、「環境共生型まちづくり」を進めるような社会資本整備において、構想段階から住民参加の機会を確保し、関心の醸成と計画・設計への寄与を促し、整備案の検討プロセスの「透明性」や「公平性」を高めることで、社会的合意の形成に取り組むことが重要であるとされる²⁾³⁾。社会資本整備に関わる社会的な合意形成を円滑に実現するためには、住民参加業務の担当者だけでなく、市民や関係者がそれぞれの立場から、実践上の課題を踏まえ改善に向け

た議論を継続的に行うことが不可欠である。

そこで、環境政策を推進する計画の構想段階から住民などの関係者に参加してもらい、行政、住民、地権者、デザイナー等の専門家で、「街区単位の整備案」の出来上りのイメージを共有し、整備案を検討していくことができれば、円滑に社会的な合意形成を実現することができる。そのために、「実際に出来上がる整備事業」に近いであろう「整備案の3Dモデル」が重要となる。例えば、太陽光発電に適した街区や建物の3Dモデルを構築するには、デザイナーが描く計画案の地図情報に基づき、主に3次元CG作成ソフトを用いて、膨大な手作業にて、街並みの3Dモデルを製作する。例えば、建物の3DモデルをCSG (Constructive Solid Geometry) で作成する場合、次に示す手順に従って、モデリングを行う。

(1) 屋根や建物本体など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本立体(プリミティブ)を作成する。(2) 建物本体に窓やドア用に穴を空ける、または、寄棟屋根の台形状の屋根板等の建物部品を形成するためにブール演算を行う。(3) 作成した建物の部品を回転する。(4) 電子地図上の図形情報に基づいて適切な位置にそれらを配置する。(5) それらにテクスチャマッピングを施す。

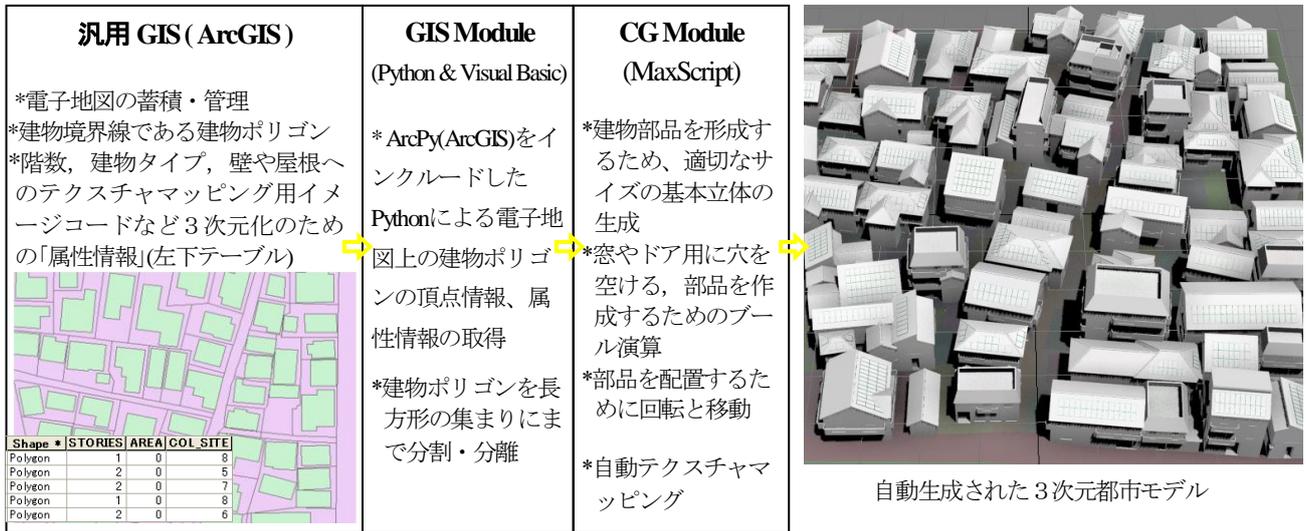


図-1 自動生成システムの構成と街区の3Dモデルの自動生成のプロセス

この手作業を省力化し、3次元都市モデルを自動的に作るために、筆者らは、GIS(地理情報システム)とCGを統合化したシステムを提案した⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本研究では、太陽光発電に適した建物の3Dモデルの自動生成を提案し、区画整理を行った街区単位で、太陽光発電の生産性がどのように向上するかを検証する。また、筆者らの開発した自動生成システムの機能向上についても提案する。即ち、図1左の電子地図上の建物ポリゴン(建物境界線)が示すように、通常、電子地図上の建物ポリゴン(建物境界線)は、その頂角が「ほぼ直角」の直角ポリゴン(orthogonal polygon)である。これまでの研究成果で、電子地図上の建物ポリゴンが「頂角がほぼ直角の直角ポリゴン」である場合、それらを長方形の集まりまで分割・分離して、これら長方形の上に、Box形状の建物本体や上から見て長方形の屋根を配置して、3Dモデリングを行った。しかし、通常、建物ポリゴンは厳密に頂角が直角の直角ポリゴンとは限らない。そのため、Box形状を組み合わせて作る建物で、そのBox間に「隙間」や「重なり」が生じてしまう。本研究では、建物ポリゴンを正確な直角ポリゴンに整形(Rectification)し、精緻な建物の3Dモデルを自動生成する手法を提案する。

2. 既往の研究

「3次元都市モデル」は、防災まちづくりや環境共生型まちづくり、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用が期待される情報インフラであるため、「現状ある都市」の3次元モデルを自動的にあるいは半自動的に構築する研究がさかんである。3次元都市モデルは、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(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。しかし、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。

Saeedi⁷⁾らは、単眼の(monocular)衛星画像から、自動的に屋根面の形状を抽出することを試みた。衛星画像のセグメント化(共通する色合いに応じて塊にする)を行い、セグメントの境界線は、衛星画像より抽出された線セグメントにあわせる。これら境界線は屋根面の四角形の雛形となり、当てはまり点(probability score)が線セグメントと画像のイメージ勾配によって算出され、忠実度の目安としている。

このシステムやアプローチは、正確なサイズの基本立体(プリミティブ、直方体など)から成る建物の3次元モデルを提供する。但し、これらは窓や玄関、ドア、ベランダといった建物の詳細を持っていない3次元モデルである。これらリモートセンシング技術などによる生成される「現状ある都市」の3次元モデルは、窓や玄関等の建物の詳細を無視した概形モデルの生成に集中しすぎて、現状ある建物とはかけ離れていると評される⁸⁾。

建物の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⁹⁾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(shape vocabulary)において、基本形(basic shapes)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(extruded footprint)とStraight Skeleton手法¹⁰⁾を用いて一般形状の屋根を生成している。しかし、彼らの論文において、電子地図上の建物ポリゴンへのStraight Skeletonの適用手法や適用結果などの図や記述はなく、手法は明らかにされていない。ま

た、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。屋根形態は多種多様にわたり、「長辺に垂直な頂線」となる屋根も存在する。従って、建物ポリゴンを長方形の集まりまで分割・分離して、長方形の長辺に平行な頂線とするか、垂直な頂線とするかをシステムで選択できれば、多種多様な屋根を自動生成できる。

本研究では、電子地図上の建物ポリゴンを長方形の集まりまで分割・分離して、各長方形上に任意の多種多様な建物形状を設計できる。

3. 太陽光発電に適した建物と街区

(1) 街区の3Dモデルと太陽光発電面積の表示

太陽光パネルの実使用時の出力(発電電力)は、日射の強さ、設置条件(屋根の傾斜角と方位角、周辺環境)、地域差、及び温度条件により異なる。日本気象協会の1981年から2009年の29年間の観測データをもとにNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が全国日射関連データマップを整備しており、地点を指定すれば、マップより日照量を予測できる。本システムによって自動生成された街区の3Dモデルでは、太陽光パネルは南向きと東向きの屋根に設置している。もっとも日照量が大き

くなるのはパネルが南向きであるが、東西向きのパネルも、南向きパネルの日照量の約85%であるとされる¹¹⁾ので、東向き屋根にもパネルを設置した。図-2から図-4に「街区の3Dモデル」とその元とした電子地図、及び、平行光線である太陽光に対する「太陽光パネルの垂直成分」を表示したものを示す。図-2(a)(b)では、典型的な密集市街地の電子地図から本システムを用いて、3次元モデリング化した街区の3Dモデル、図-2(c)は仰角43度の仮想カメラで撮影した街区の3Dモデルの「正投影の投影図」である。この正投影の投影図は隣接する建物の影の影響など詳細なレベルで、日照の状況をシミュレーションすることができる。

図-3(a)(b)は密集市街地を「区画整理した電子地図」から3次元モデリング化した街区の3Dモデル、同様に、図-3(c)は街区の3Dモデルの正投影の投影図である。この例では、単に区画整理しただけでは、太陽光発電を行う「太陽光に垂直なパネル面の垂直成分」を増やすことはできないことを図-3(c)は示している。そこで、太陽光を受けるパネルの面積を増やすために、東西方向に長い長方形の敷地だけでなく、南北方向に長い長方形の敷地に対しても、屋根頂線を東西方向にする、南向きの屋根の面積を大きくした「両片流れ屋根」を配置した街区の3Dモデルを図-4に示す。図-4(b)(c)の右側に南北方向に長い長方形の敷地に対して屋根頂線を東西方向に



図-2 電子地図から自動生成した街区の3Dモデルと正投影した街区イメージ

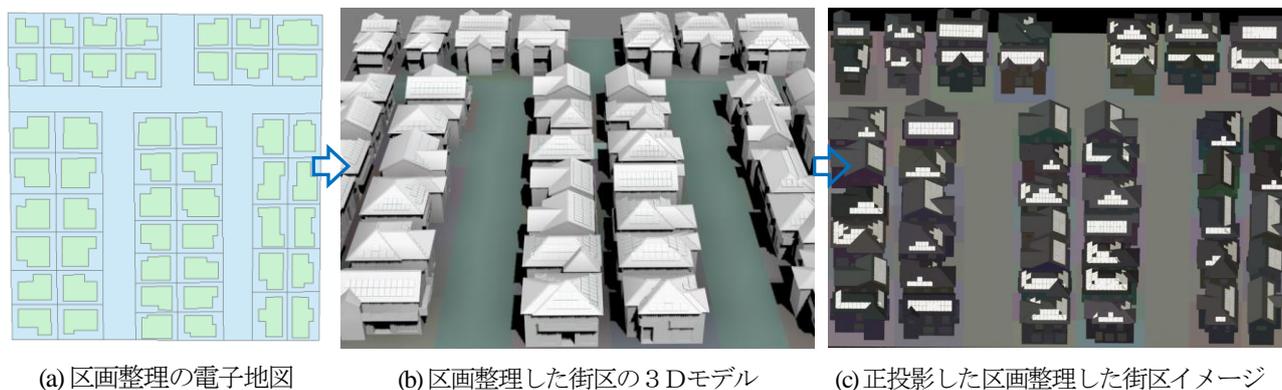


図-3 区画整理した地図から自動生成した街区の3Dモデルと正投影した街区イメージ

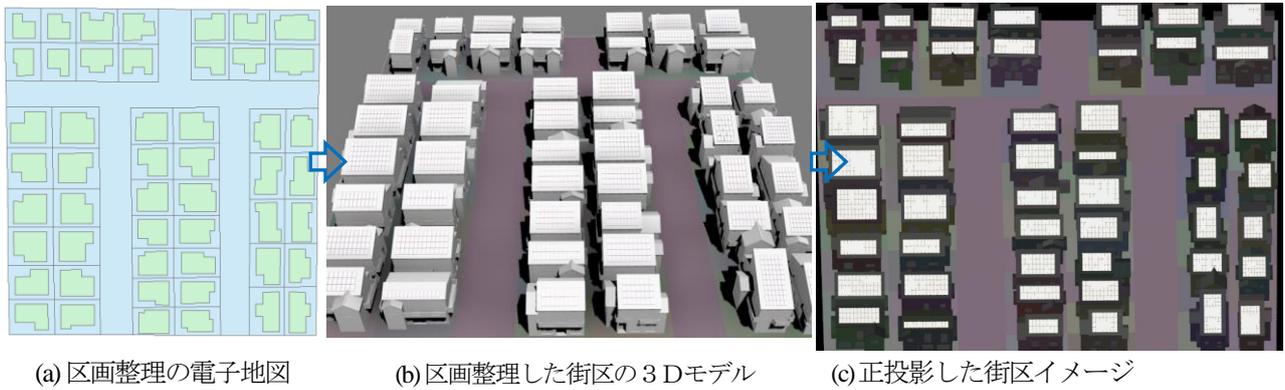


図-4 建物を両片流れ屋根とした街区の3Dモデルと正投影した街区イメージ

する、南向きの屋根の面積を大きくした「両片流れ屋根」を示す。

(2) 両片流れ屋根の3Dモデルの生成

両片流れ屋根は、片流れ屋根を組み合わせた建物と考える。図-5に、両片流れ屋根の平面図、正面図、側面図と透視投影図を示す。自動生成システムでは、「屋根を作る関数」に「屋根勾配 ($\tan \theta$: θ は屋根の傾き)」、長方形となる建物境界線の「短辺の長さ」、「長辺の長さ」と「長辺の傾き」、「屋根の中心位置」をパラメータとして与える。生成される3Dモデルは、パラメトリックなモデルで、個々の3Dモデルに平面図や正面図、側面図が関連付けられているわけではない。建物の3Dモデルの平面図は、建物境界線を四角形の集まりまで分割・分離してできる四角形に等しいが、次節で述べるように、建物境界線は必ずしも、頂角が直角の直角ポリゴン (Orthogonal Polygon) とは限らない。そこで、境界線を四角形に分割・分離した後で、直角ポリゴンとなるよう整形 (Rectification) を行う。建物境界線が直角ポリゴンでないと四角形から生成される建物 (Box) 間に隙間や重なりが生じてしまう。

「両片流れ屋根」を生成する関数には、建物境界線を分割・分離、整形して出来上がる長方形を上側(北側)と下側(南側)の2枚の屋根で両片流れ屋根を形成するように、長方形の短辺上に分割線の端点をとって、長方形を上下方向で分割する。その分割する割合をパラメータとして

与える。南側の屋根の面積を大きくするには、下側(南側)の屋根の割合を大きくするよう設定すればよい。また、上側(北側)屋根と下側(南側)屋根の勾配をパラメータとして別々に与えている。各勾配と上側と下側の屋根幅に応じて、各片流れ屋根の高さは決まるが、その高さの差がある一定の長さ以上であれば、ブール演算を用いて、屋根頂線の間に窓用の穴を開け、窓を設置する。

図-5で示す両片流れ屋根の3Dモデルでは、側面図が示すように、南側の屋根頂線が北側屋根の頂線より一定以上の高さ高いので、窓が設置され、この窓が設置されている様子を透視投影図で示している。また、図-6では、自動生成した両片流れ屋根の建物からなる街区の3Dモデルを東と南西から撮影したイメージを示す。

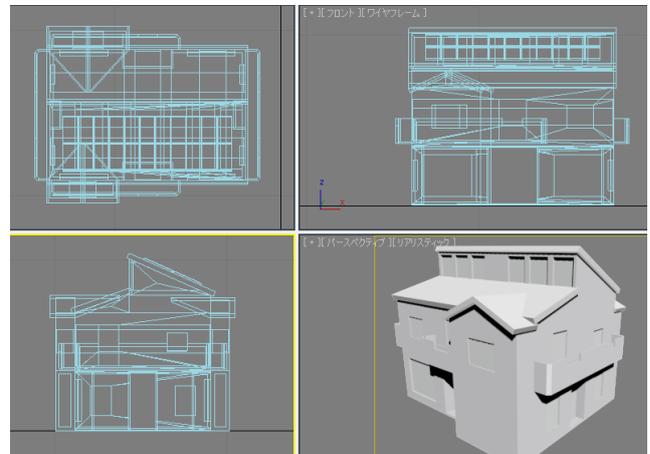
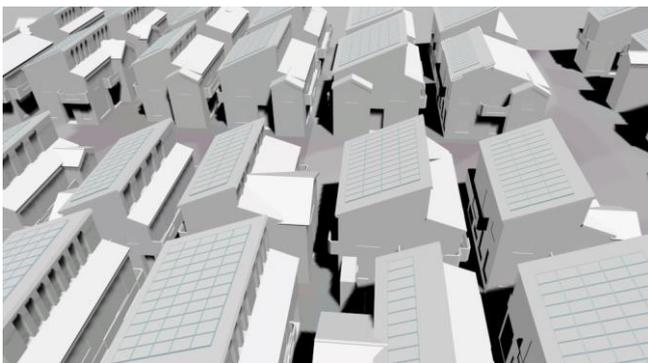


図-5 両片流れ屋根の3Dモデルの平面図、正面図、側面図と透視投影図



(a) 東から撮影した両片流れ屋根群の街区の3Dモデル (a) 南西から撮影した両片流れ屋根群の街区の3Dモデル

図-6 区画整理した地図から自動生成した両片流れ屋根の建物からなる街区の3Dモデル

4. 建物境界線(建物ポリゴン)の分割

(1) ポリゴンの表現と分割線

頂角が“ほぼ直角”の直角ポリゴンである建物ポリゴン(建物境界線)を図-7に示す。この建物ポリゴンの頂点を時計回りに辿ると、ポリゴンの辺は直角に右に曲がるか(R-tum)、直角に左に曲がるか(L-tum)のどちらかである。直角ポリゴンは、この辺の曲がる向き(RかL)で表現できる。これを「RL表現」と呼ぶ。図-7の建物ポリゴンの場合、左端の頂点から辿っていくと「RL表現」で「RRLRLRLRLRRLLRRLRLRLR」となる。この直角ポリ



図-7 電子地図上の建物ポリゴン

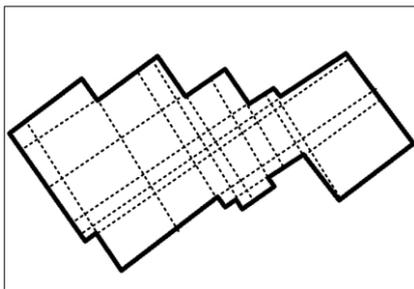


図-8 L頂点からの分割線

ゴンは、適切に分割線(Dividing Line)を引くことによって、「長方形」の集まりに分割・分離することが可能である。Reflex頂点(内角が180度以上の頂点)である左に曲がる頂点:「L頂点」から分割線は2本引くことができる。図-7の建物ポリゴンの場合の分割線を図-8に示す。図のポリゴンではL頂点は9個あるので、18本の分割線を引くことができる。これまでの研究で、この分割線の中から、次の3つの条件を満たす線を選び、分割処理を実行する。

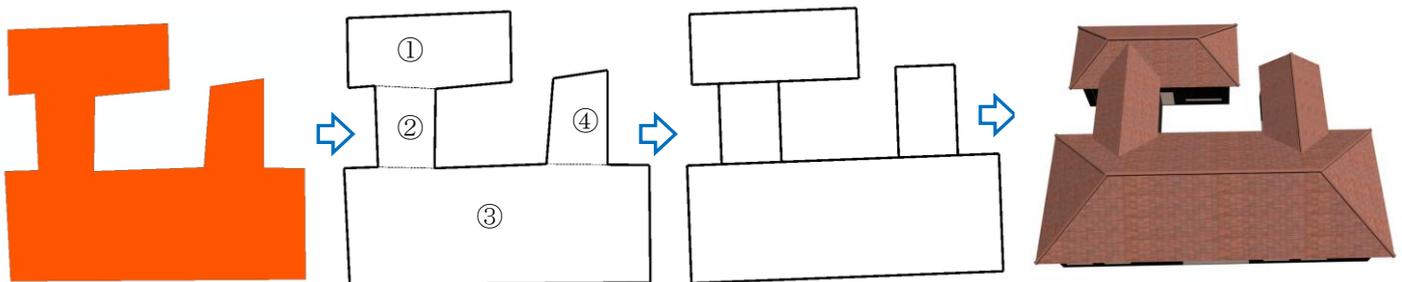
- (1) 四角形を切り取る。
- (2) 分割線の長さが切り取られる四角形の反対側のポリゴン辺までの最短距離より短い。
- (3) 分割される四角形の内部にポリゴン辺が回り込んでいない。

条件(1)の四角形を切り取る分割線は、RL表現で、L頂点間の連続するR頂点の個数が2個以上で、R頂点を挟むL頂点からの分割線は四角形を切り取れる可能性がある。L頂点で挟まれるR頂点が1個の場合は1本の分割線で、四角形を切り取ることはできない。あるL頂点を起点とする分割線が、それから連続する2個あるいは3個のR頂点でその最後のR頂点を起点とする辺と交わるような分割線は、条件(1)の四角形を切り取る分割線となりうるが、連続する4個以上の最後のR頂点を起点とする辺と交差する分割線は四角形を切り取ることはできない。これは、四角形は、連続する4個のR頂点から成り立つからである。

従って、本システムでは、連続するR頂点の個数をカウントして、その数が2個、3個、4個、5個以上と場合分けして、連続するR頂点を挟む2個のL頂点前後の辺の長さに応じて、分割線が条件にあうかあわないかで、分割処理を行うか行わないかを決め、行う場合にその「分割パターン(Dividing Pattern)」を決める。条件(2)は、分割された四角形から伸びていく「枝屋根」が、枝屋根が伸びてくる主屋根より高くなると不自然となるため、枝屋根の高さを低くするための条件である。条件(3)は、切り取られる図形が四角形であるための条件(1)のためのプログラム上の条件である。

(2) 枝屋根の形成

図-9は、建物ポリゴンの分割・整形処理を行っての屋根付き建物の3Dモデルの自動生成のプロセスを示す。図-9(b)において、ポリゴンは「分割される順番」で「番号付け」された4つの四角形に分割される。ここで、四角形①と③は「枝屋根」として、図-9(d)にあるように、切り取られた「主屋根」に伸ばす必要がある。四角形に分割された図-9(b)の前の段階で、枝屋根を伸ばすべき四角形①と③は、隣接していた四角形は何番で、その四角形のどの辺にどのように接していたかが不明である。例えば、四角形①を分割する段階で、「隣接する図形」は四角形に分割されておらず、何番の四角形であるか分からない。そこで、四角形①と③を、枝屋根を伸ばすべき隣接している四角形を探す「活性四角形」(Active Rectangleと



(a) 電子地図上の建物ポリゴン (b) ポリゴンの分割 (c) ポリゴンの整形 (d) 自動生成した3Dモデル

図-9 建物ポリゴンの分割・整形処理を行っての3Dモデルの自動生成

する)として、ポリゴンを四角形の集まりに分割した後、「活性四角形」は隣接していた四角形は何番で、その四角形のどの辺に「どのように接していたか」を調べることとした。「どのように接していたか」は、四角形を分割する際、その「分割パターン」を四角形に関連付ける。ここで、図-10は、枝屋根を伸ばすべき主屋根に対して、

の四角形のどの辺の上にあるかを調べる。どのように接するかは、分割する際に分割線の引き方で分かるので、その分割パターンを四角形①に蓄える。サーチの結果、四角形①の辺a3a4が四角形④の辺m1m2上にあることを突き止める。そして、四角形①と④の共通頂点である母点(a3=m2)を基準として、活性四角形の平均長辺(w_L)と

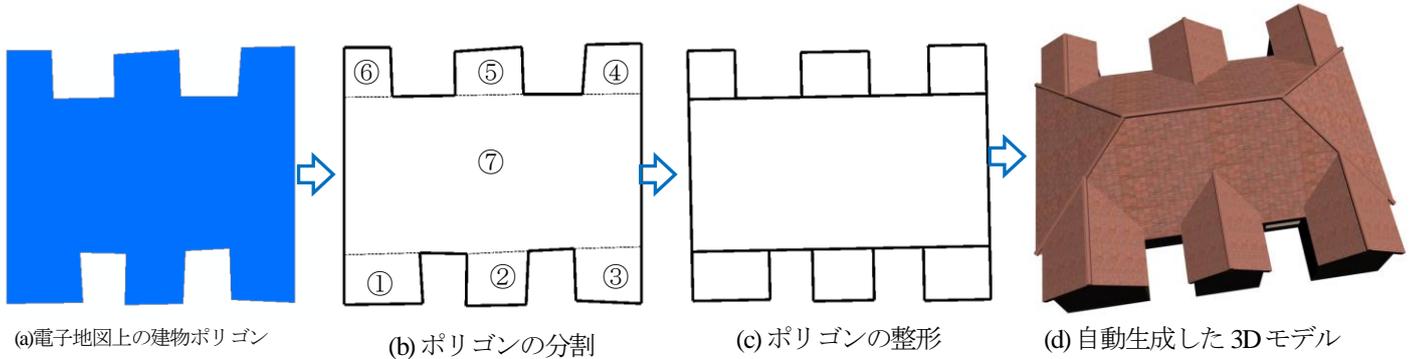


図-10 自動生成のプロセスと枝屋根が主屋根にどう隣接するかを示す3つの分割パターン

枝屋根となる四角形がどのように接しているかを示す。図-10(b)において、四角形①と④は、分割線が時計回りの反対方向の分割線(Backward Dividing Line: BDL)であり、四角形③と⑥は、分割線が時計回り方向の分割線(Forward Dividing Line: FDL)であり、四角形②と⑤は、分割線が両方向からの分割線(F&B)と考える。

平均短辺(w_S)、Main Angle(θ)から、整形した四角形を生成する。以下の式で、整形した四角形の頂点の位置を算出する。

$$\begin{aligned} a1.x &= m2.x - w_S \cdot \sin\theta - w_L \cdot \cos\theta \\ a1.y &= m2.y + w_S \cdot \cos\theta - w_L \cdot \sin\theta \\ a2.x &= m2.x - w_S \cdot \sin\theta & a2.y &= m2.y + w_S \cdot \cos\theta \\ a4.x &= m2.x - w_L \cdot \cos\theta & a4.y &= m2.y - w_L \cdot \sin\theta \end{aligned}$$

(3) ポリゴン整形

活性四角形が、どの四角形のどの辺に、どのように接するかを調べ、接する「主屋根の四角形の傾き」(Main Angle: θ)も取得し、「主屋根との共通頂点である頂点」(これを母点: generatrixとする)を基準として、活性四角形の平均長辺と平均短辺、Main Angleから、整形した四角形を形成する。図-11において、まず、分割された頂角がほぼ直角の四角形は、その頂点を時計回りに番号付けするが、上側の長辺の始点を番号1とするよう「番号付け」を行う。四角形①は活性四角形で、隣接する四角形をサーチするが、①の辺a3a4上の点(Checkpoint)がど

5. 活用事例とあとなぎ

街区レベルにおいて、敷地や建物を太陽光発電に適したかたちにして、環境政策である再生可能エネルギーの利用を進めることが重要である。そのとき、出来あがるであろう形を具体化する「街区の3Dモデル」は、建物の様々な形状や太陽光パネルの大きさや向き、屋上緑化、壁面緑化の可能性を検討・評価、あるいは、関係者で合意形成を図るときに非常に有効である。現状では、この街区レベルの3Dモデルを多大の時間と労力を掛けて作成している。本研究では、GISが蓄積・管理する電子

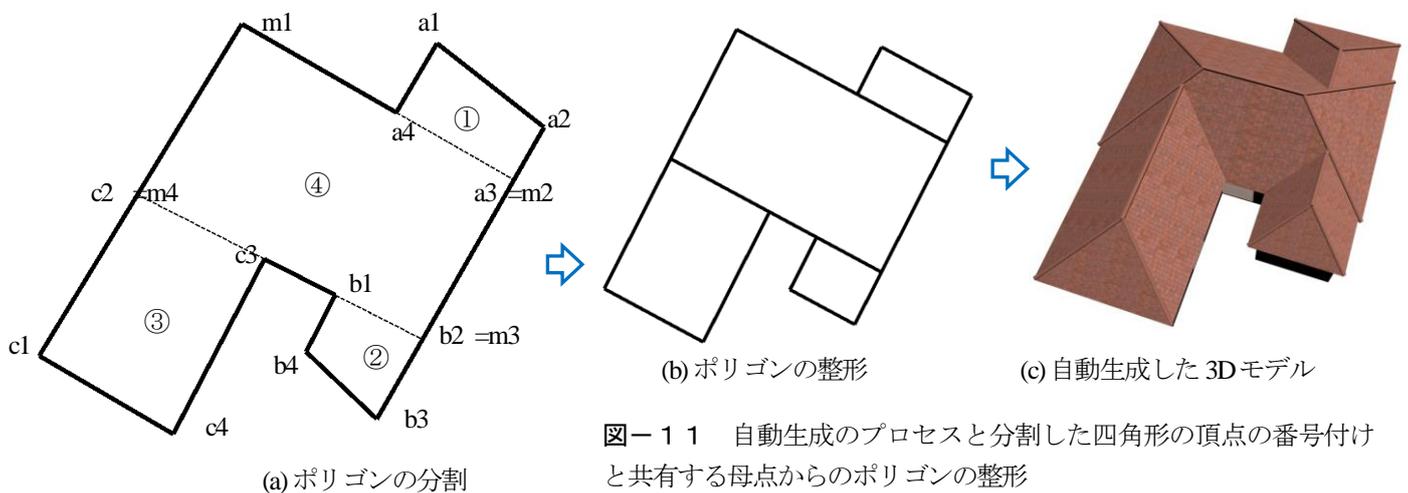


図-11 自動生成のプロセスと分割した四角形の頂点の番号付けと共有する母点からのポリゴンの整形

地図に基づいて、太陽光発電に適した建物の3Dモデルを自動生成するシステムを開発した。また、これまでの自動生成システムの性能向上させたこととして、電子地図上の建物ポリゴンが厳密に頂角が直角の直角ポリゴンとは限らず、そのため、Box形状を組み合わせて作る建物で、そのBox間に「隙間」や「重なり」が生じてしまう。そこで、本研究では、建物ポリゴンを正確な直角ポリゴンに整形(Rectification)し、精緻な建物の3Dモデルを自動生成する手法の提案を行った。このような手法で建物の3Dモデルを自動生成する事例は他には見られない。

参考文献

- 1) 先導的都市環境形成促進事業制度要綱：国土交通省平成20年
- 2) 国土技術政策総合研究所：社会資本整備における合意形成円滑化のための手引き～紛争アセスメント及びメディエーション～ 住民参加に関わる紛争解決のあり方に関する検討会 平成20年3月
- 3) 高台移転と住まいに関する説明会の資料、南三陸町震災復興計画（素案）、南三陸町役場 震災復興推進課・建設課
- 4) 杉原健一，林良嗣：“3次元建物モデルの自動生成のための一般化建物ポリゴン分割法”，土木学会情報利用技術委員会 2006年度土木情報利用技術論文集 査読付き論文，Vol.15，pp.67-74，2006.10.
- 5) 杉原健一，林良嗣：“様々な形態の屋根付き3次元建物モデルの自動生成”，土木学会 情報利用技術委員会 2008年度土木情報利用技術論文集 査読付き論文，Vol.17，pp.153-160，2008.10.
- 6) Sugihara, K. and Kikata, J. 2012. Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons, *Journal of Computing in Civil Engineering*.doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000192.
- 7) Parvaneh Saeedi and Harold Zwick: ‘Automatic building detection in aerial and satellite images’, *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision - ICARCV*, pp. 623-629, 2008, DOI: 10.1109/ICARCV.2008.4795590
- 8) Zlatanova, S. ,and Heuvel Van Den, F.A. (2002). “Knowledge-based automatic 3D line extraction from close range images”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34, 233 – 238.
- 9) Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., and Van Gool, L.: ‘Procedural modeling of buildings’, *ACM Transactions on Graphics*, 25, 3, 614–623 (2006)
- 10) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Albers, D., and Gärtner, B.: ‘A novel type of skeleton for polygons’, *Journal of Universal Computer Science*, 1 (12): 752–761 (1995).
- 11) SHARP の住宅用太陽光発電システム「サンビスタ」のオフィシャルサイト: <http://www.sharp.co.jp/sunvista/>

(2014.???.?? 受付)