

太陽光発電に適した3次元建物モデルの自動生成とその活用事例

○杉原 健一*¹ 沈 振江*²

キーワード：3Dモデル、自動生成、3次元建物モデル、太陽光発電、街区

1. はじめに

近年、温室効果ガス排出量のさらなる、増加により、温暖化が前例のないペースで進行し、異常気象を引き起こし、自然災害が増加している。こうした中、CO₂削減に効果のある「緑の建築」や効率よく太陽光発電を行える「ソーラーハウス」に人々の関心が集まっている。こうした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。ここで、「環境共生型まちづくりの整備案」のイメージを、住民や関係者で共有し、あらゆる視点で確認しながら、合意形成と意思決定を速やかに図ることが重要である。

このとき、図-1右に示す「3次元都市モデル」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「環境共生型まちづくり」を進める社会資本整備において、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。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(Primitive)

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。

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、CGとGIS(地理情報システム)を統合化したシステムを提案した¹⁾²⁾。本研究では、一般的な屋根である寄せ棟屋根に太陽光パネルを配置するために、屋根の構造を明らかにし、パネルの配置手法、及び、太陽光発電に適した建物の3Dモデルの自動生成手法を提案する。また、本システムの活用事例として、「仮想の密集市街地」に対して、区画整理を行う前後の街区、あるいは、太陽光発電に適した建物形状であるかないかで、太陽光発電がどのように変わるかをシミュレーションする。ここで太陽光発電は、太陽光パネルの太陽光に対する垂直成分の面積に比例すると考えて、シミュレーションを行った。

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」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

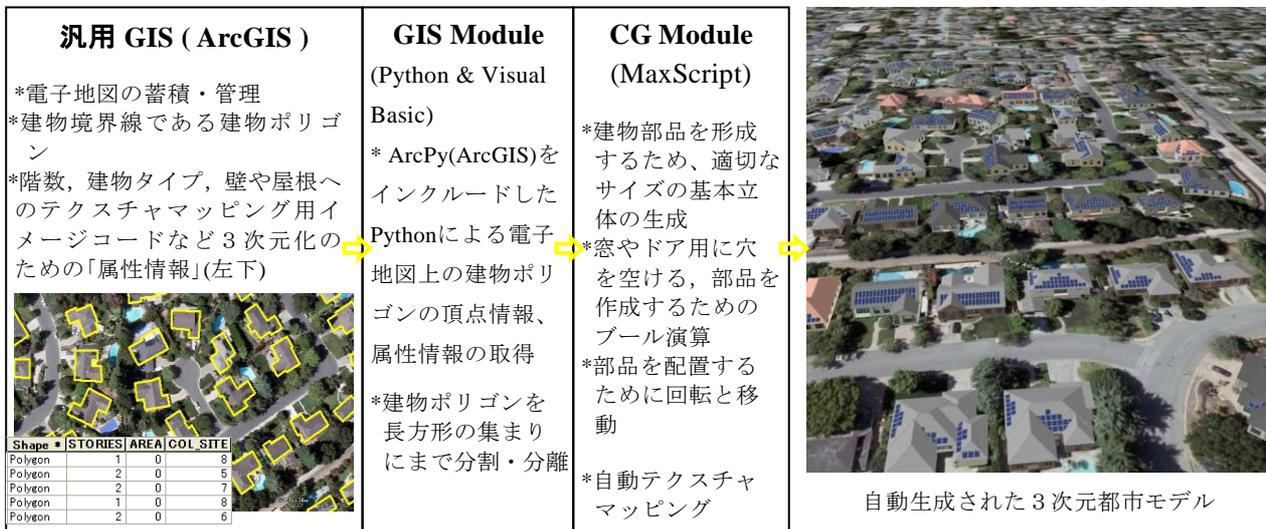


図1 自動生成システムの構成と3Dモデルの自動生成のプロセス

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。

Saedi³⁾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、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⁴⁾。

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。Wonkaら⁵⁾⁶⁾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⁷⁾を用いて一般形状の屋根を生成するとしている。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。長方形形状 (その集まりも含む) の建物境界線の「長方形の長辺に平行な屋根頂線」を持つ屋根しか生成できない。

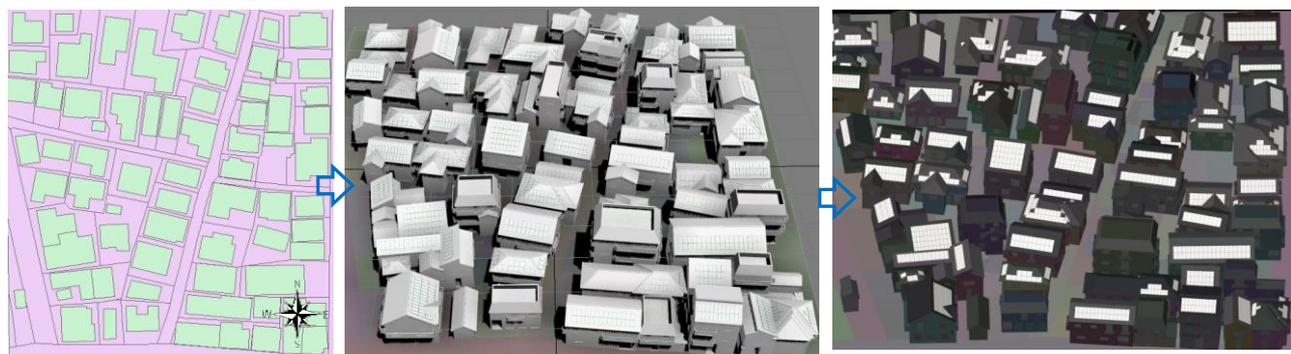
屋根形態は多種多様にわたり、「長辺に垂直な頂線」となる屋根も存在する。筆者らはこれまでの研究で、電子地図上の直角建物ポリゴンを長方形の集まりまで分割・分離して、長方形の長辺に平行な頂線とするか、垂直な頂線とするかをシステムで選択し、多種多様な屋根形状を自動生成する手法を提案した¹⁾²⁾⁸⁾。

本研究では、一般的な屋根である「寄せ棟屋根」に太陽光パネルを配置するために、2枚の台形状と三角形状の板屋根からなる寄せ棟屋根の形状や構造を明らかにし、そこへのパネルの配置手法を提案する。また、太陽光発電に適した建物として、太陽光発電の効率がいいとされる「メガソーラ」のパネル形態に似せた南向きの屋根を大きくした片流れ屋根の3Dモデルの自動生成手法を提案する。また、本システムの活用事例として、「仮想の密集市街地」に対して、細街路を拡幅する等の一般的な区画整理を行い、その前後の街区、あるいは、太陽光発電に適した建物形状であるかないかで、太陽光発電がどのように変わるかを数値実験した。ここで、太陽光発電は、パネルの太陽光線に対する「垂直成分」の面積に比例すると考えられるので、仮想空間で、仮想のカメラで仮想街区を、例えば、俯角40度の正投影で撮影し、各屋根に設置されたパネルの垂直成分の合計面積を求めた。

3. 太陽光発電に適した建物

(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

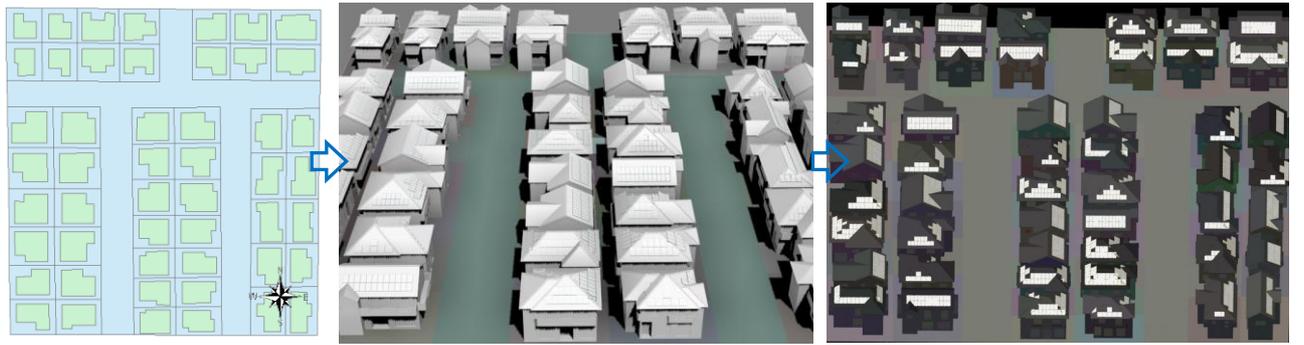


(a) 現況の電子地図

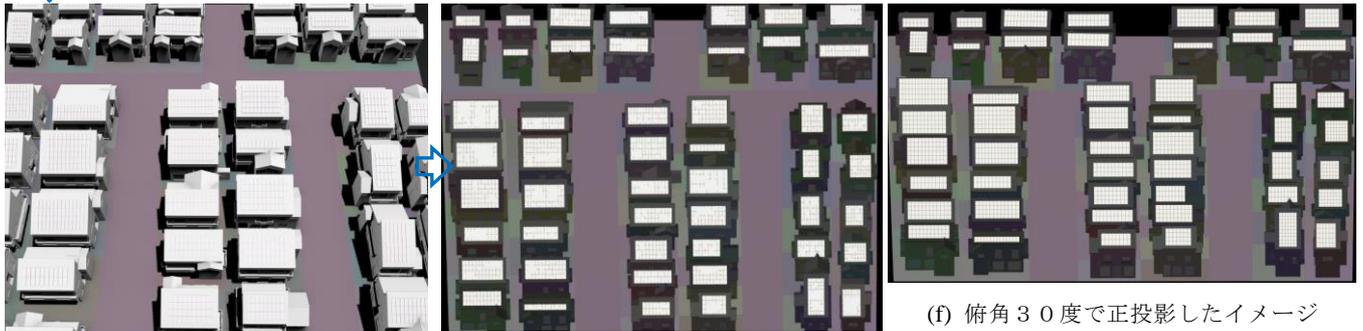
(b) 自動生成した街区の3Dモデル

(c) 俯角43度で正投影した街区のイメージ

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



(a) 区画整理の電子地図 (b) 区画整理した街区の3Dモデル (c) 正投影した区画整理した街区イメージ



(d) 両片流れ屋根の建物の3Dモデル (e) 俯角50度で正投影したイメージ (f) 俯角30度で正投影したイメージ

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（上）、建物を両片流れ屋根とした街区の3Dモデルと俯角50度と30度で正投影した街区イメージ（下）

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⁹⁾ので、東向き屋根にもパネルを設置した。図2と図3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、自動生成した街区の3Dモデル、図2(c)は俯角43度の仮想カメラで撮影した街区の「正投影の投影図」である。NEDOの日射関連マップでは、日照量は指定した地点の周りの平均値しか分からないが、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)(d)は密集市街地を「区画整理した電子地図」とそれから自動生成した街区の3Dモデル、図3(c)は街区の3Dモデルの正投影の投影図、図3(d)は自動生成する建物を太陽光発電に適した形状である両片流れ屋根の建物とした場合、図3(e)(f)は仮想カメラによる俯角50度と30度で街区を正投影で撮影した図である。

図4は、建物形状の変更及び区画整理前後で「全体図の面積に対する各屋根のパネルの垂直成分の合計面積の割合」の比較を表している。この例では、図4に示すように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が、「両片流れ屋根」を配置した街区とすると大幅に垂直

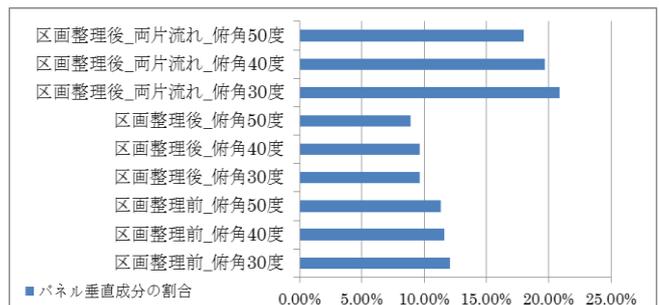


図4 建物形状の変更及び区画整理前後でパネル垂直成分の割合

成分の面積を増やすことができることを示している。太陽光を受けるパネルの面積を増やすために、図3(d)に示すように、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する、南向きの屋根の面積を大きくした「両片流れ屋根」とした。

(2) 両片流れ屋根の3Dモデルの自動生成

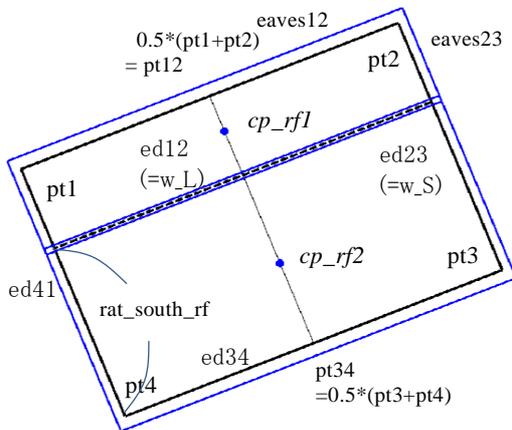
図1の自動生成システムのGISモジュールで、頂角が直角の建物境界線を「長方形」の集まりまで、分割・分離する。これら長方形は建物の平面図となる。「両片流れ屋根」は、「片流れ屋根」を組み合わせた建物と考える。両片流れ屋根は、それを構成する2枚の屋根板と屋根下の構造物(三角柱: prism)、建物本体を図5の平面図、図6の正面図で示すように配置して、作成する。長方形は、その頂点を図5のように番号付けし、これらの頂点間を内分、外分する点を求め、建物を構成する部品を配置する。

本システムは、時計回りに長方形の頂点を辿り、辺長

と辺の傾きを求め、最長の辺が右向きであれば、その辺の起点を pt1 とし、もし、最長の辺が左向きであれば、その辺の起点を pt3 とし、時計回りに番号付けを行う。このように番号付けすることにより、長方形の長辺で、図で上にある辺の左側の頂点から pt1、pt2、pt3、pt4 と時計回りに番号付けを行うことができる。ここで、長方形の4つの辺は、長辺である ed12 と ed34、短辺である ed23 と ed41 に分けられ、「長方形の傾き」は長辺である ed12 の傾きとする。

図5に示すように、両片流れ屋根は、平面図の長方形を上側(北側)と下側(南側)の2枚の屋根板で形成するように、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「ratio of south roof」とする。屋根板の長さは、ed12 の辺長(w_L)に ed12 方向の軒長(eaves12)を加えた長さとなり、屋根板の幅は、屋根下の構造物である三角柱(prism)の上向斜面の幅(side23L)に ed23 方向の軒長(eaves23)と三角柱の上向斜面から斜面法線方向の屋根板上面までのオフセット距離(rf_offs)に屋根の傾き θ の正接を乗じた値(rf_offs × tan θ)を加えた幅となる。

屋根板は基本立体の box であり、その制御点の位置は底面の中心にある。平面図上で、2枚の屋根板の制御点(cp_rf1,2)の位置を、ed12 の中点(pt12)と ed34 の中点(pt34)を結ぶ線を内分する点に配置する。屋根板は水平面に対して θ だけ傾いていることを考えると、内分比は、ratio_south_roof (南側屋根板の幅の全体の建物境界線の



$$\text{ratio}_s = 0.5 \times (1.0 - \text{rat_south_rf})$$

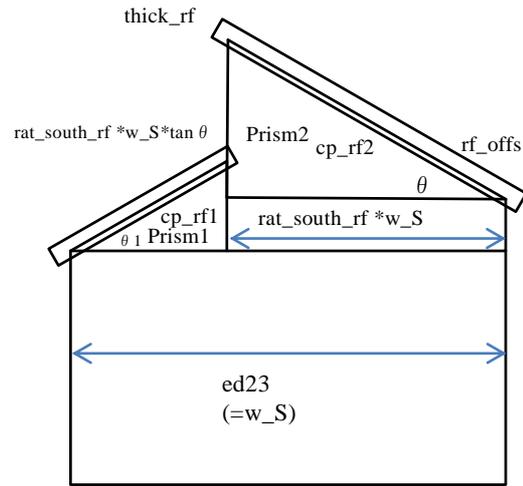
$$\frac{0.5 \times (\text{eaves23} \times \cos\theta + \text{rf_offs} \times \sin\theta)}{w_S} + \frac{\text{thick_rf} \times \sin\theta}{w_S}$$

$$\text{cp_rf1} = (1.0 - \text{ratio}_s) \times \text{pt12} + \text{ratio}_s \times \text{pt34}$$

$$\text{cp_rf2} = \text{ratio}_s \times \text{pt12} + (1.0 - \text{ratio}_s) \times \text{pt34}$$

*ここで、rat_south_rfは南側屋根板の幅の全体の建物境界線の幅に対する割合、thick_rf は屋根板の厚さ、eaves23 は ed23 の方向の軒部の長さ、θ は屋根板の水平面に対する傾き

図5 建物境界線とそれに対して生成される両片流れ屋根の2枚の屋根板の平面図と各パラメータの説明



南側屋根板の幅(wid_rfb ; width of roof board)は
 $\text{wid_rfb} = \text{side23L} + \text{eaves23} + \text{rf_offs} \times \tan\theta$

ここで side23L は $\text{side23L} = \text{rat_s_rf} \times w_S \times \sqrt{1 + \tan^2\theta}$
 rf_offs は三角柱の上向斜面から斜面法線方向の屋根板上面までのオフセット距離。

* 屋根板の高さ(hei_rf)は以下の式で与える。

$$\text{hei_rf} = \text{st_heit} + \text{rat_south_rf} \times \tan\theta \times w_S$$

$$- 0.5 \times \text{wid_rfb} \times \sin\theta - \text{thick_rf} \times \cos\theta + \text{rf_offs} \times \cos\theta$$

ここで、st_heit は建物本体の高さで、階高×階数

図6 2枚の屋根板の両片流れ屋根の側面図

幅に対する割合)よりも長さ eaves23 と長さ rf_offs の長さ w_S に対する比の分だけ小さくなり、板の厚さ(thick_rf)の長さ w_S に対する比の分だけ大きくなる。

発電量を増やすため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る。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、各片流れ屋根頂線の高さは決まるが、その高さの差がある一定の長さ以上であれば、屋根下の構造物(prism)に対して、ブール演算を用いて屋根頂線の間窓用の穴を開け、窓を設置する。

図7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モデルを東から撮影したイメージを示す。図7で示す多くの両片流れ屋根の3Dモデルでは、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。

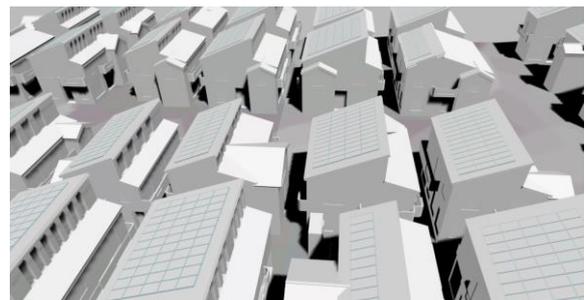


図7 区画整理した地図から自動生成した両片流れ屋根の建物からなる街区の3Dモデル

(3) パネルを設置した寄せ棟屋根の3Dモデルの生成

寄せ棟屋根は、4方向に勾配を持ち、建物境界線は長方形となり、長方形の短辺（妻側）を底辺とする三角形の屋根と長方形の長辺（平側）を底辺とする台形の屋根からなる。本自動生成システムにおいて、寄せ棟屋根の形状を決めるパラメータとして、屋根の勾配（ $\tan \alpha$ ）と共に、長辺（平側）に対するトップの屋根頂線の割合（ r_{hip_top} ）を与え、形状に自由度を持たせている。通常、丸瓦を配置し、トップの屋根頂線から枝分かれする屋根頂線から、妻側と平側へ下がる方向にふせる瓦を同じ枚数としている。そのため、屋根頂線の各点から短辺及び長辺までの距離は等しくなる。以下の式によって、図8下で示す台形屋根の側辺の傾き（ θ ）と三角形屋根の頂角の角度（ 2θ ）が決まる。

$$\tan \theta = \frac{0.5 * (1 - r_{hip_top}) * w_L}{side23L} = \frac{0.5 * w_S}{side23L} = \frac{0.5 * w_S}{0.5 * w_S / \cos \alpha} = \cos \alpha$$

ここで、 w_L 、 w_S は建物境界線となる長方形の長辺の長さ、短辺の長さ、 $side23L$ は台形屋根の高さとする。

通常、 $r_{hip_top} = \frac{w_L - w_S}{w_L}$ として、 $\tan \theta = \cos \alpha$ となる。

この寄せ棟屋根に対して、太陽光発電パネルを設置した例を図9に示す。台形屋根にパネルを配置するとき、パネルの配列は、その台形の側辺の傾き（ θ ）に依存する。

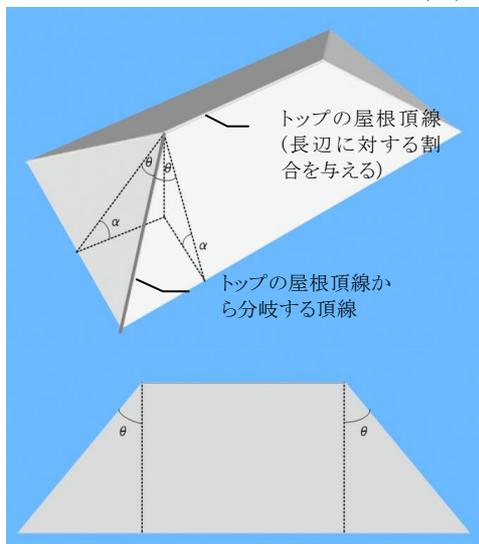


図8 屋根の勾配（ α ）と台形屋根板の側辺の傾き（ θ ）の関係、下図：屋根を構成する台形屋根板の側辺の傾き

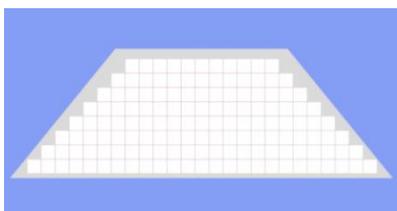


図9 寄せ棟屋根を構成する台形屋根にソーラーパネルを配置

側辺の傾きが 45° 以下であれば、パネルは、最下段の列に対して、その1つ上の列は左右1つずつパネルの個数を減らすよう配置する。屋根勾配が小さく、なだらかな傾斜の屋根であれば、台形屋根の側辺の傾きが大きくなり、パネルは、最下段の列に対して、その1つ上の段の列は左右1個以上のパネルの個数を減らすよう配置する。

4. 結論

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、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、出来上がるであろう形を具体化する「街区の3Dモデル」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、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。活用事例として、区画整理前後の街区、あるいは、太陽光発電に適した建物形状であるかないかで、太陽光発電がどのように変わるかを数値実験した。

謝辞 本研究は、公益財団法人 小川科学技術財団の援助の下により行われた。

【参考文献】

- 1) K. Sugihara, Y. Hayashi: "Automatic Generation of 3-D Building Models with Multiple Roofs", Journal: Tsinghua Science & Technology (清華大學(中国)のジャーナル), vol. 13, pp. 368-374
- 2) Kenichi Sugihara and Junne Kikata: "Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE (American Society of Civil Engineers、アメリカ土木学会) January 2012
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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)
- 6) Tom Kelly, Peter Wonka, 2011 "Interactive Architectural Modeling with Procedural Extrusions", ACM Transactions on Graphics.
- 7) Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D., and Gärtner, B.: 'A novel type of skeleton for polygons', Journal of Universal Computer Science, 1 (12): 752-761 (1995).
- 8) Kenichi SUGIHARA: "Automatic Generation of 3D Building Models with Various Shapes of Roofs", ACM SIGGRAPH ASIA 2009, Sketches, Visualization, 16-19 DEC, 2009. DOI: 10.1145/1667146.1667181
- 9) 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/>.

*1 岐阜経済大学 経営学部 教授 博士(工学)

*2 金沢大学 環境デザイン学系 教授 博士(工学)

Automatic Generation of 3D Buildings Models Suitable for Solar Photovoltaic Generation and its Application

○Kenichi SUGIHARA*¹

Zhenjiang SHEN*²

Keywords: 3D building model, automatic generation, solar photovoltaic generation, 3D city model

To facilitate public involvement for sustainable development, 3D models simulating a real or near future cities by a 3D CG (Computer Graphics) can be of great use. 3D city models are important in environmentally friendly urban planning that will use solar photovoltaic (PV) generation. However, enormous time and labour has to be consumed to create these 3D models, using 3D modeling softwares such as 3ds Max or SketchUp. For example, when manually modeling a house with roofs by Constructive Solid Geometry (CSG), one must use the following laborious steps: (1) Generation of primitives of appropriate size, such as box, prism or polyhedron that will form parts of a house (2) Boolean operations are applied to these primitives to form the shapes of parts of a house such as making holes in a building body for doors and windows (3) Rotation of parts of a house (4) Positioning of parts of a house (5) Texture mapping onto these parts.

In order to automate these laborious steps, we proposed a GIS (Geographic Information System) and CG integrated system that automatically generates 3D building models, based on building polygons or building footprints on digital maps, which show most building polygons' edges meet at right angles (orthogonal polygon). A complicated orthogonal polygon can be partitioned into a set of rectangles. The proposed integrated system partitions orthogonal building polygons into a set of rectangles and places rectangular roofs and box-shaped building bodies on these rectangles.

In this paper, for placing solar panels on the hipped roof, we clarify the structure of an ordinary hipped roof that is made up of two triangular roof boards and two trapezoidal ones. To implement efficient PV generation, we propose to automatically generate 3D building models topped with double shed roofs attached by PV arrays. The sizes and positions, slopes of roof boards and main under roof constructions are made clear by designing the top view and side view of a double shed roof house. For the application example of the developed system, we simulate the solar photovoltaic generation change of a city block by performing land readjustment and changing shape of buildings, that is, ordinary roof house or double shed roof house suitable for efficient PV generation. Our simulation reveals that double shed roof houses have greatly improved the solar photovoltaic generation.

*1 Professor, School of Management, Gifu Keizai University

*2 Professor, School of Environment, Kanazawa University