

# 自動生成する3次元建物モデルの内部での太陽光シミュレーション

村瀬 孝宏\*・杉原 健一\*\*・沈 振江\*\*\*

## Sun Light Simulation at Rooms of 3D Building Models Automatically Generated

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

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). Unlike the surface models created by procedural modeling or remote sensing, our models are the solid models made through CSG (Constructive Solid Geometry), whose parts are filled with materials. In our research, our models are used for sun light simulation at the inside of the models, i.e., rooms, simulating the sunlight to travel through clerestory windows or balconies to warm the rooms in winter or the sunlight shielded by eaves to avoid scorching sun in summer. In this paper, we proposed to generate 'double shed roof' houses which can have clerestory windows.

**Keywords:** 3次元建物モデル (3D building model), 自動生成 (automatic generation), ポリゴン分割 (polygon partitioning), 太陽光シミュレーション (sun light simulation)

### 1. はじめに

これまでの研究(2012, 2016, 2018)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(図-1参照)。この分割処理では、ポリゴンのReflex頂点(内角が180度以上の頂点)から分割線の候補を引き、分割線の優先度の高い順に分割処理を実行した。分割された四角形の集まりを互いに直交する長方形の集まりに整形するために、分割四角形は「どの四角形のどの辺にどのように接していたか」という「隣接情報」を分割四角形に保存する。「どのように接していたか」は、分割線がどのように引かれるかで判明し、「どの四角形のどの辺」かは、分割四角形の隣接辺がどの四角形の、次にその四角形のどの辺に含まれるかを順次探索して調べ、

建物ポリゴンを整形し、その上に3Dモデルを自動生成した。

本研究で、自動生成された建物の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(Surface model)と異なり、3Dモデルの壁や屋根などの「各部材」は中身の詰まったCSG(Constructive Solid Geometry)のモデルであり、3Dモデルの内部、つまり、部屋に入って、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の太陽光シミュレーションに利用できる。本研究では、ベランダや窓から差し込む太陽光は、そのベランダや窓の向き、それから時間と季節によってどう変化するかを3DCGでシミュレーションした。特に「両片流れの屋根」の建物に焦点をあて、その採光窓である「高窓(Clerestory windows)」から、どのように太陽光が入射し、壁で反射し、建物内部に光が届くか等がシミュレーションできる。このことは、冬至において、できる

\* 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

\*\* 会員 金沢大学 理工研究域 研究協力員 博士(工学) mjsbp812@yahoo.co.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

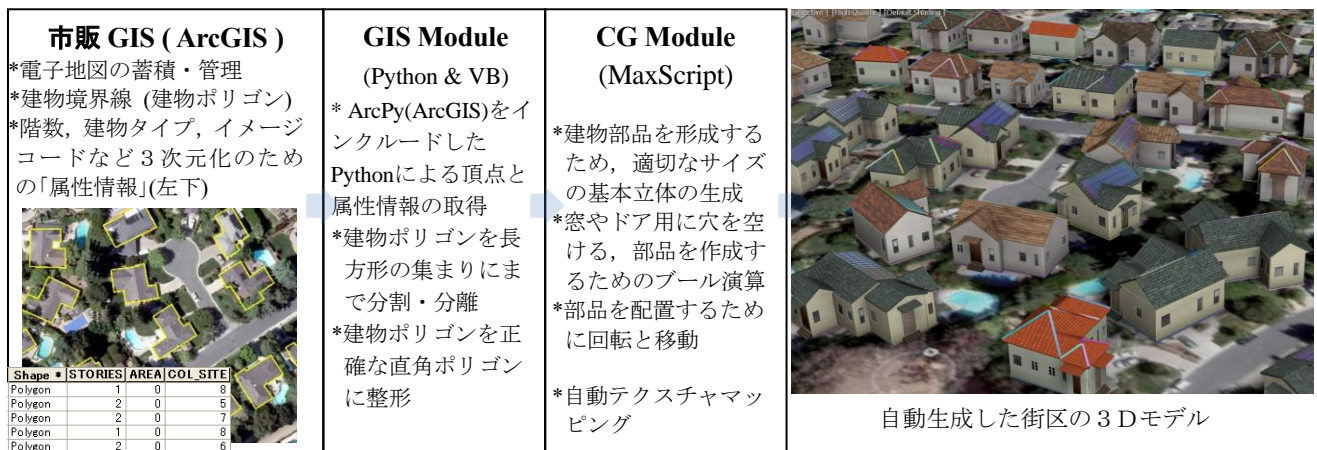


図-1 自動生成システムの構成と3Dモデルの自動生成のプロセス

だけ太陽光を取り入れ, 逆に夏至においては, できるだけ太陽光を遮蔽するような建物構造はどうあるべきかという「パッシブデザイン」に繋がる. そのために建物構造を決め, 建物を自動生成する関数のパラメータに様々な値を入れ, 様々な形状の「両片流れの屋根」を生成し, それらに仮想の太陽光を照射し, それが建物内部にどのように入り込むかをシミュレーションできる. 本シミュレーションの「アウトプット」は, 太陽の光線方向の照射エリアを仮想カメラで撮影して, その照射面積を算出したものである. アウトプットとなる建物内部に入り込む太陽の平行光線に垂直な面で投影した太陽光の照射面は, 屋根や壁, 軒などの傾きやその長さ, 位置, 同時に, 時刻と季節に応じて刻々と変化する. パラメータに応じて形状を変えられる「建物の3Dモデル(図-1)」は, 仮想空間でパッシブデザインを取り入れた持続可能な「スマートハウス」の案を検討する際, 建物構造の最適化を図り, 関係者で建物の出来上がりのイメージを共有することができ, 合意形成に役立ち, よりよいスマートハウスの設計につながる.

## 2. 既往の研究

太陽光シミュレーションは, 3次元CG, CADなどのソフトウェアで行える. 例えば, 代表的な3次元CGソフトである Autodesk 社の 3ds Max では, Daylight システムで直接日光(直接光)と天空光をシミュレートする. Daylight システムには Sunlight システムと Skylight システムがあり, Sunlight システムは直接光, Skylight システムは天空光を作る.

Sunlight システムでは, 直接光による日影を検討したい地点, 日時, コンパスの方向と太陽オブジェクトの位置を決めると, そのオブジェクトの位置に無関係に仮想空間全体を照らす平行光線で直接光をシミュレートする. Skylight システムにおいても, 地点, 日時, コンパスの方向等を決めると, CIE(国際照明委員会)の空に基づく環境光ともいえる天空光を生成する. Skylight システムは仮想空間の空全体を曇りか晴天の CIE sky で覆う. これらはグリーンビルディングの認証プログラム(US Green Building Council's LEED green building system)に準拠しているとされる. 本手法でも, この 3ds Max の Daylight システムを使い, 直接光と天空光をシミュレーションする.

現在では, 直接光と天空光のシミュレーションは, 建築 設備 建材メーカー(velux, extech 2022)がその製品(天窗, カスタマイズされたファサードなど)を販売・設置するとき, 様々な形状となる製品の選定において, その取付位置, その方向等が, 様々なケースとなりうるので, 複数の代替案となる建物の構造と設置する製品を備えた建物の内部での天空光や直接光のシミュレーションを行い, 最適な製品及び設置場所の最適化を図り, 顧客のニーズに対応している. 但し, 複数の案となりうる製品を備えた建物を設計図から3Dモデルを作り上げるのは時間と労力がかかる.

本システムは建物内部に入り込める建物の概形モデルを瞬時に自動生成し, さらにその建物の屋根の傾き, 窓の大きさ, その数などを自動生成する関数に与えることで, 様々な形状の建物の3Dモデルを

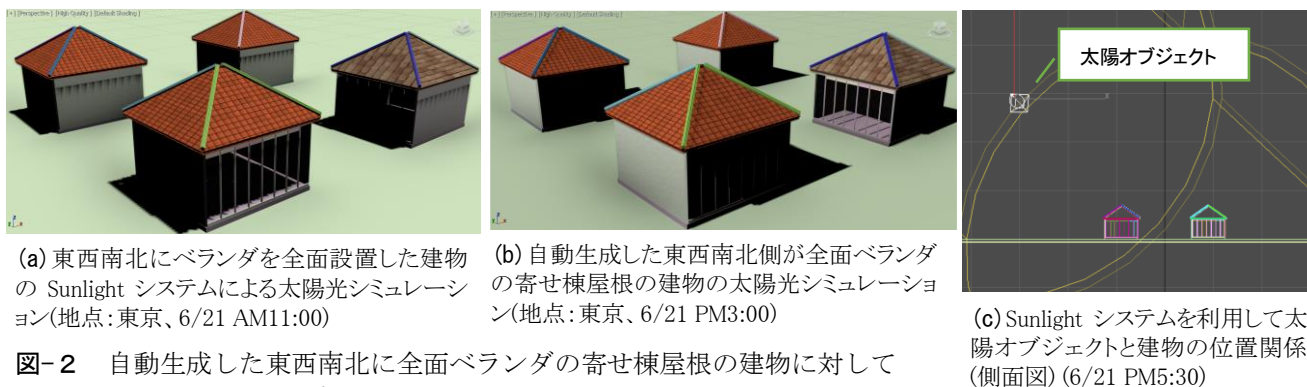


図-2 自動生成した東西南北に全面ベランダの寄せ棟屋根の建物に対して Sunlight システムによる太陽光シミュレーション

複数作り，建物内での天空光や直接光のシミュレーションを行うことができる。

### 3. 建物内部への太陽光シミュレーションの仕方

本研究で自動生成する建物の3次元モデルは，建物内部に入って，室内の光のシミュレーションが行える。また，外壁に任意の大きさ・位置の窓やドアを設置できる。室内の光は，開口部からの直接光や天空光による影響が大きい。そこで，ベランダの向きと部屋への直接光の関係を明らかにするよう東西南北側だけに大きく開口された建物を自動生成した。

具体的には，上の図-2に示すような，東西南北側を全面ベランダとする「寄せ棟屋根」の建物を生成した。この「寄せ棟屋根」は，その軒長が室内への直接

光を遮らないとされる 30cm の長さで，東西南北方向に軒が伸びている構造とした。これは，北緯  $36^{\circ}$  付近において，南中時の太陽高度が冬至，春分・秋分，夏至にそれぞれ「 $30^{\circ}$ ， $54^{\circ}$ ， $78^{\circ}$ 」となり，夏至の太陽高度  $78^{\circ}$  に対して，軒長 30cm は直接光を遮らない長さとする(2022)からである。東西南北側を全面ベランダとする4つの建物に対して，本研究では，直接光の部屋への入射を定量的に測定するために，3ds Max の「Daylight システム」のうち，「Sunlight システム」だけに限り太陽光シミュレーションを行った。

下の図-3に，それぞれ東西南北側だけが全面ベランダという4つの建物において，季節と時間の経過とともに，ベランダである「開口部からの直接光」が

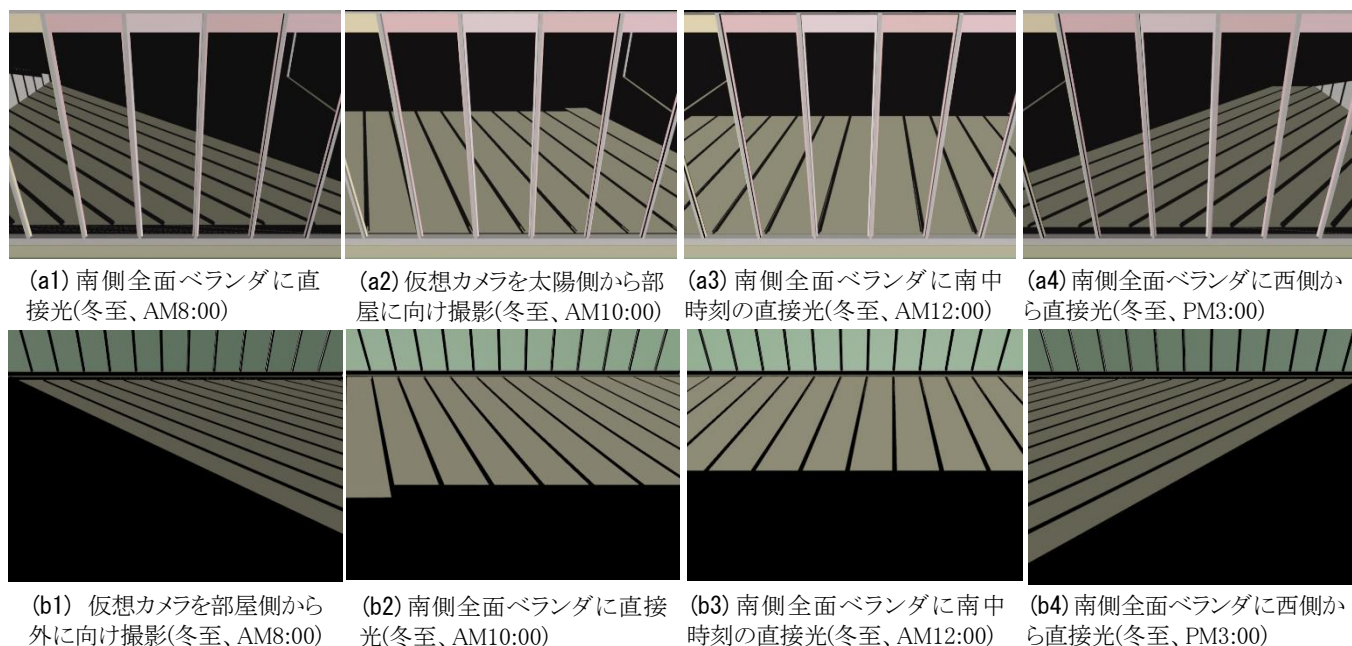


図-3 仮想カメラを「太陽側から部屋に向け(上段)」と「部屋側から外に向け(下段)」で撮影、南側が全面ベランダの建物への Sunlight システムによる太陽光シミュレーションの時刻による変化



どのように変化するかをシミュレーションした結果を示す。図-3の(a1)から(a4)は、右の図-4に示す3ds Maxの仮想空間において「太陽側からベランダ部屋」に向けた仮想カメラ1で撮影し、図-3の(b1)から(b4)は、右の図-4に示す「ベランダ部屋側から外側」に向けた仮想カメラ2で撮影し、時刻と共に変化する直接光が当たる床などのイメージを示す。

ここで、「太陽側から部屋に向けたカメラ1」で撮影したイメージは、「カメラの投影面(画像が写しだされる面)」が太陽の平行光線にほぼ垂直であるので、「部屋に入射する光量」を表すと考えられる。また、「部屋側から外側に向けたカメラ2」で撮影したイメージは、床に当たる直接光のレイアウトを表し、直接光の反射光がどのように部屋を伝搬するかを予測できる。但し、太陽高度が低く、部屋の奥まで差し込み、床に当たる直接光は広がっていても、太陽の平行光線と床との角度が垂直の90度から離れた値であれば、その面積は大きくなるので、入射光量を表すわけではなく、平行光線に垂直な「カメラの投影面」で撮影したイメージが光量を表す。

本研究では、図-2に示すような東西南北側だけが全面ベランダという4つの建物において、ベランダからの「入射太陽光」が、ベランダの向きと季節と時間の経過とともにどのように変化するかをシミュレーションした。「入射太陽光」は、前述の「カメラ1の

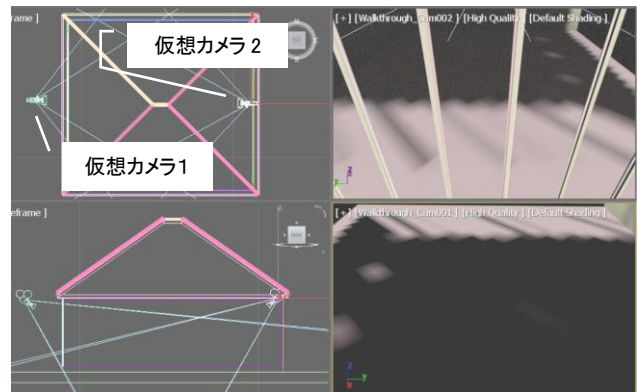
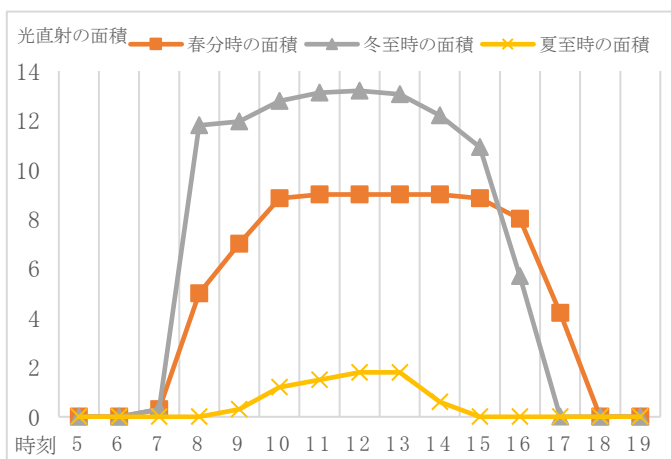
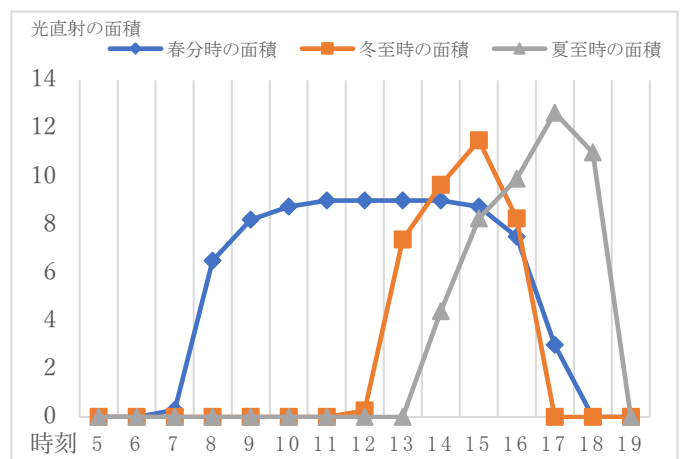


図-4 仮想カメラ1は「太陽側から部屋に向け」とカメラ2は「部屋側から外に向け」て撮影、西側が全面ベランダの建物へ太陽光シミュレーション

投影面」において「太陽光が直射するエリア」に比例すると考えられる。その投影面(図-3の(a1)から(a4))において太陽光が直射するエリアを「光直射エリア」とすると、その形状は、四角形と三角形を組み合わせた単純な形となり、面積は簡単に計算できる。ベランダの窓の間隔を1mとしているので、それを基準として、各投影面において「光直射エリア」の高さと時刻によっては太陽光がベランダに対して斜めから差し込むので、エリアで光の当たらない上隅の三角形の面積を算出して引くという計算法で「光直射エリア」の概算の面積を算出した。「光直射エリア」はベランダの向きと季節(冬至、春分・秋分、夏至)と時刻によって、大きく変化する。その結果を下の図-5に示す。



(a) 南側全面ベランダへ太陽の入射光の太陽側から撮影した時間とともに変化する光直射エリアの面積(相対値)



(b) 西側全面ベランダへ太陽の入射光の太陽側から撮影した時間とともに変化する光直射エリアの面積(相対値)

図-5 南側と西側が全面ベランダの寄せ棟屋根建物へ(冬至・春分・夏至における)太陽の入射光の太陽側から撮影したベランダの太陽光直射エリアの面積(相対値)の時間経過を表す折線グラフ

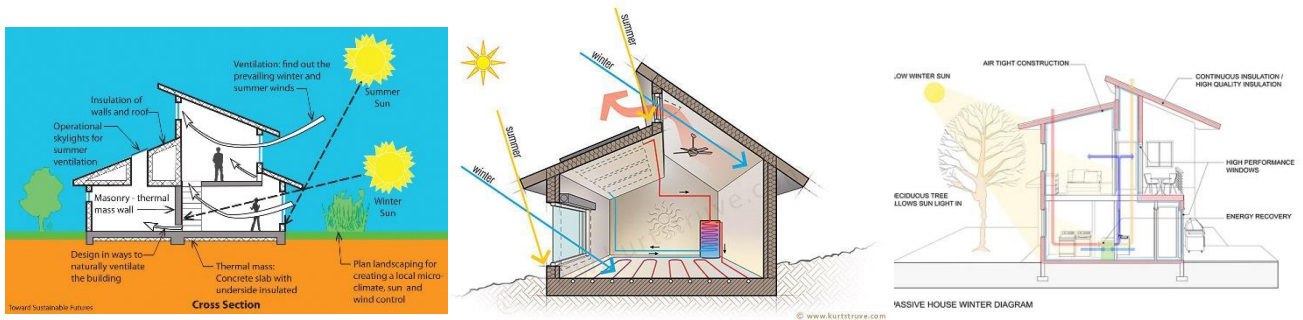


図-6 両片流れの屋根の建物を用いたパッシブデザインの事例; 両片流れの屋根の建物の側面図 (<https://www.pinterest.jp/>)

本シミュレーションで、「南向きベランダ」は、冬と春秋は、よく直接光が差し込むものの、夏はそれほど、直接光の差し込みは多くないことが分かる。また、「西向きベランダ」は、春秋は、南向きベランダと同様に、午前午後を通して直接光の差し込みが多いが、西向きベランダは夏と冬において、午前中、直接光が差し込まないものの、午後から、直接光が多く差し込み、特に夏場は日没近くまで直接光が差し込むことをシミュレーションしている。

#### 4. パッシブデザインの事例として両片流れの屋根の建物の自動生成

パッシブデザインは、太陽光や風、地熱などの自然エネルギーを活用して、主に化石燃料を元とする電気やガスへの依存を減らし、夏も冬も住むのに快適な建物の設計を行うことを目的とする。このパッシブデザインにおいて、上の図-6に示すような「両片流れ屋根の建物」の事例を多く目にする。「両片流れ屋根の建物」は、建物最上部に「採光窓である高窓

(Clerestory windows)」を備え、高窓から太陽の光と熱、そして風を部屋内部に導き入れる。この建物の部材や素材を、光を反射、そして、熱を集め、保存し、伝えるものとする、冬は部屋を暖め、逆に、夏は、庇で光を遮断し、室内の暖かい空気を排出し、一年を通して、高窓からの光を自然光として利用できる「持続可能な建物」とすることができる。このような季節に応じて太陽光を導き、空気の流れを制御し、冷暖房や照明のコストを抑えるパッシブデザインの事例を上図-6に示す。

一方、「スマートハウス」といわれるものは、太陽光パネルや蓄電システムを備え、その発電量と蓄電量をモニタリングし、同時に、照明、空調、エンターテインメント等の電力消費量をリアルタイムで把握し、コントロールする HEMS (Home Energy Management System)を備え、消費電力の最小化を図っている。本研究で自動生成する建物も、下の図-7に示すように、主に北向き以外の屋根にソーラーパネルを備え、太陽光をできるだけ多く受け止めるよ

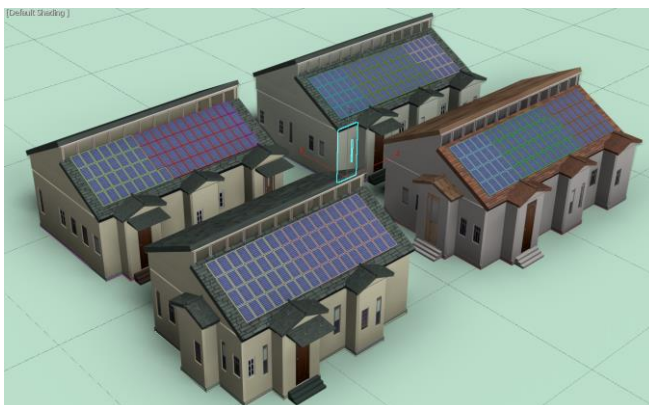


図-7 自動生成した両片流れ屋根の建物 (南向き屋根にどのぐらいソーラーパネルを設置できるかの検討、枝屋根はこの建物では延長せず、本体建物に突き出すことはない)

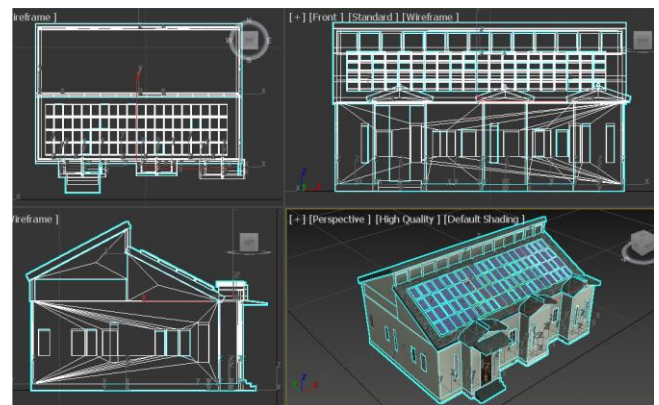
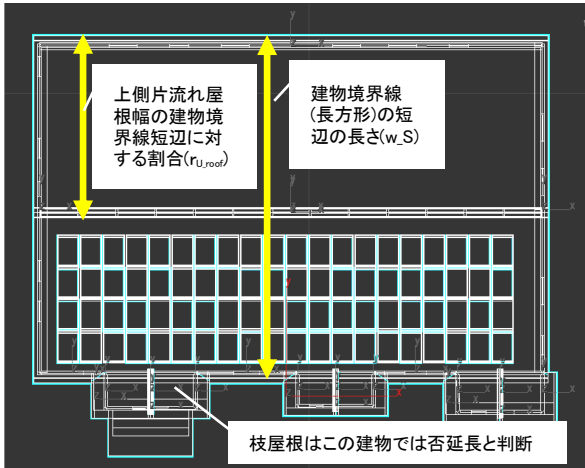
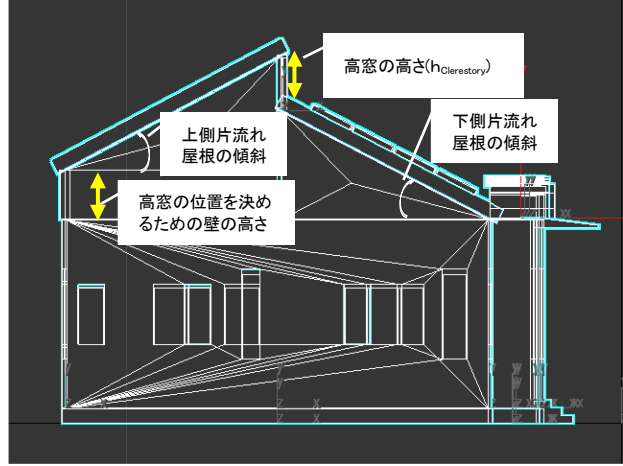


図-8 両片流れ屋根の建物の平面図、側面図、立面図と透視投影図 (上側片流れ屋根の割合、上下側片流れ屋根の傾斜角、下駄履かせ壁の高さで採光窓である高窓が決定)



(a) 両片流れ屋根の建物の平面図(上側片流れ屋根幅の建物境界線短辺に対する割合など)



(b) 両片流れ屋根の建物の側面図(上側と下側の片流れ屋根の傾斜、及び、高窓の位置を決めるための壁の高さ(h\_geta)など)

図-9 両片流れ屋根の建物の平面図と側面図 (これらのパラメータで採光窓である高窓が決定)

うな設計の検討もできる。

この両片流れの屋根のパッシブデザインでは、「南中時の太陽高度」が、建設される建物の位置、主に緯度に応じて、変化し、両片流れの屋根の傾斜によって、高窓からの建物内へ直接光の当たり具合、その反射光の建物内への反射具合は、光や熱の伝導、採光に大きく影響する「屋根傾斜で左右される設計(angular selective sunlight technique)」といえる(2022)。ここで、太陽光パネルを載せる屋根の傾斜も「angular selective sunlight technique」といえる。太陽の平行光線に対して垂直となる時間が長ければ長いほど、発電量は増えると考えられるので、建物の「緯度」に応じて、屋根傾斜を決めると発電量の最大化を図れる。

この「両片流れ屋根の建物」を自動生成では、図-8の平面図、側面図、立面図と透視投影図、その平面図、側面図を拡大した図-9(a)(b)に示すパラメータである「上側片流れ屋根幅の建物境界線短辺に対する割合( $r_{up\_roof}$ )」、「上側と下側の片流れ屋根の傾斜角( $\theta_1, \theta_2$ )」、高窓の位置を決めるための壁の高さである「下駄履かせ壁の高さ( $h_{geta}$ )」を決めると、屋根形状は決まる。

採光窓である高窓の高さ( $h_{Clerestory}$ )は以下の式で算出できる。

$$h_{Clerestory} = \text{Abs}(\tan(\theta_1) * r_{up\_roof} * w_S) + h_{geta} - \tan(\theta_2) * (1.0 - r_{up\_roof}) * w_S \quad \text{--- (1)}$$

ここで、Abs()は絶対値を算出する関数、 $w_S$ は建物境界線を分割・整形処理して出来上がった「長方形

の短辺の長さ」である。実際のプログラムでは、上側片流れ屋根側だけに  $h_{geta}$  を足すのではなく、 $h_{geta}$  がマイナスの場合、下側片流れ屋根に  $h_{geta}$  を足して、高窓が北向きとなる場合も実現している。

## 5. パラメータを変えての両片流れの屋根の自動生成プロセス

本研究で自動生成する両片流れ屋根の設計では、高窓からの直接光の建物内への照射エリア、それから、その反射光はどこに到達するのかが熱の伝導、採光に大きく影響し、それは屋根の傾斜によって左右される「angular selective sunlight technique」であるといえる(2022)。そこで、この設計では、採光や熱の伝導に適した屋根や壁の傾斜はどうあるべきか、その最適解を、屋根の傾斜やその位置が様々なケースが考えられる中で見つけることとなる。

本研究では、この両片流れの屋根は、その形状、方向、位置、高窓の高さ( $h_{Clerestory}$ )とサイズは、前述のパラメータである「 $r_{up\_roof}$ : 上側片流れ屋根の割合」、「 $\theta_1, \theta_2$ : 傾斜角」、「 $h_{geta}$ : 下駄履かせ壁の高さ」によって決まる。制約条件としては、「緯度に応じた南中時の太陽高度(南中高度)」と「高窓の縦方向の長さ」で、長さが例えば、0.8mとなるような値の組み合わせ(パラメータセット)が考えられる。しかし、式(1)からわかるように、一意にそのパラメータセットの値が決まるわけではなく、「 $\tan(\theta_2)$ 」が南中高度で決まるとすると、「 $\tan(\theta_1)$ 」と「 $r_{up\_roof}$ 」、「 $h_{geta}$ 」の3つの



独立変数は様々な値をとり、式(1)の制約下での採光や熱の伝導に適した傾斜の最適解を見つけることになる。本研究では、その最適解を見つけるとき、両片流れの屋根の形状を決めるパラメータに、式(1)の制約を満たすパラメータセットを、プログラム中にデータテーブルとして持たせ、その値を使って、建物モデルを自動生成した。それを下の図-10に示す。

3Dモデルの元になるデータは電子地図上のほぼ頂角が直角の建物ポリゴンで、その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する。ここで、分割された四角形の集まりを互いに直交する長方形の集まりとして再構築するために、分割四角形は「どの四角形のどの辺にどのように接していたか」という「隣接情報」を分割四角形に保存する。

図-10の「両片流れ屋根の建物」の場合、分割四角形は繋がっていた本体四角形が「両片流れ屋根の建物」であると分かると、図-10(b)(c)に示すように分割四角形は本体まで屋根を延長しない。延長してしまうと、部屋に不要な屋根が突き出すことになる。また、これまでの研究(2020)で、ポリゴン再構築時、長

方形と隣接長方形で辺を共有し、その「共有辺」で組み合わせ、「互いに直交する長方形の集まり」まで「整形」するが、その共有辺には、壁も作らず、また、窓やドアも設置できず、図-10(c)の赤線で表示するように、「窓やドアが設置可能な壁 WDA(Windows and Doors Available wall)」を明確化した。

図-10(d)(e)では、自動生成した両片流れ屋根の建物を示す。ここで、2行目の4つの建物は南側屋根の割合( $r_{up\_roof}$ )を小さくし、3行目の4つの建物は割合( $r_{up\_roof}$ )を大きくして、太陽光パネルを多く設置している。また、各行で右へ行くほど屋根傾斜を大としている。このように、屋根傾斜や北向きと南向き屋根の割合などを様々に変えた両片流れ屋根の建物を自動生成し、太陽光シミュレーションすることで、建物内部における直接光の当たり具合、部屋における採光の様子を再現できる。

## 6. まとめ

本研究で自動生成される建物の3Dモデルは、リモートセンシング等で得られる「表面モデル」と異なり、3Dモデルの壁や屋根などの「各部材」は基本立体をブール演算して作成される、中身の詰まった「ソ

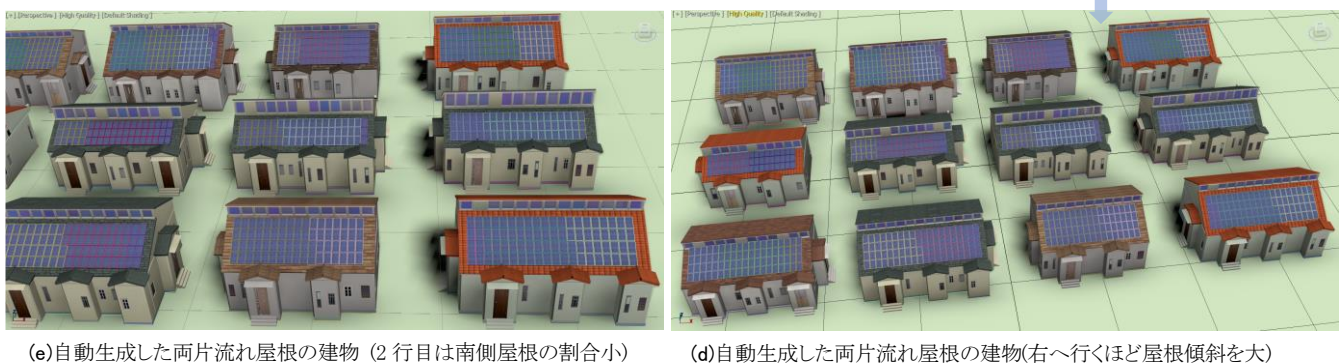
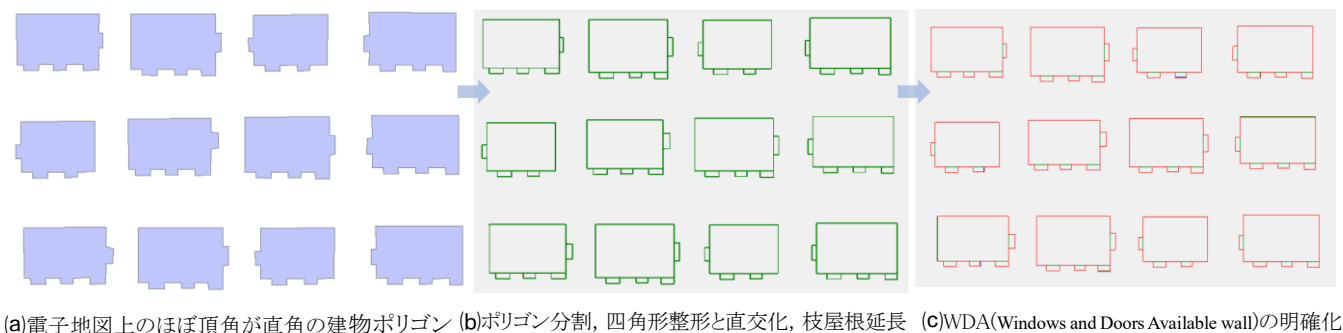


図-10 建物ポリゴン分割、整形、枝屋根(否)延長、WDA 明確化、自動生成した両片流れ屋根の建物

リッドモデル]であり、CADソフトからエクスポートされる3Dモデルと同様に、3Dモデルの内部、つまり、部屋に入って、太陽光シミュレーションに利用できる。本研究では、ベランダや窓から差し込む太陽光は、そのベランダや窓の向き、それから時間と季節によってどう変化するかをシミュレーションした。

その結果、「南向きベランダ」は、冬と春秋は、直接光の差し込みが多いものの、夏は直接光の差し込みは多くない。また、「西向きベランダ」は、春秋は、南向きベランダと同様に、午前午後を通して直接光の照射が多いが、夏と冬において、午前中、直接光の差し込みがないものの、午後から、直接光が多く差し込み、夏場は日没近くまで直接光が差し込むことをシミュレーションした。

本研究では、パッシブデザインで注目されている「両片流れの屋根」の建物に焦点をあて、その屋根の構造を決め、建物を自動生成する関数のパラメータに様々な値を入れ、様々な屋根傾斜や北向きと南向き屋根の割合などを変えた「両片流れの屋根」を生成した。本シミュレーションの「アウトプット」は太陽の光線方向の照射エリアを仮想カメラで撮影して、その面積を算出したものである。建物内部に入り込む直接光を、太陽の平行光線に垂直な面で投影して得られる画像は照射エリアを写し出し、その照射エリアの面積値がアウトプットである。本研究では、建物内部に入り込む直接光を、ベランダの方向と時刻、季節に応じて刻々と変化する様子をシミュレーションした。

パラメータに与える値に応じて形状を変えられる「建物の3Dモデル(図-10)」は、仮想空間でパッシブデザインを取り入れた持続可能な「スマートハウス」の案を検討する際、建物構造の最適化を図り、関係者で建物の出来上がりのイメージを共有することができ、合意形成に役立ち、よりよいスマートハウスの設計につながる。

## 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。

## 参考文献

- 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, 2012.
- 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.
- 杉原健一, 沈 振江: 四角形の方向性を考慮したポリゴン分割・整形による建物の自動生成, 日本建築学会 第41回 情報・システム・利用・技術 シンポジウム 査読付き, 2018.
- 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, 2020. 12. 10.
- Velux: <https://www.velux.com/what-we-do/research-and-knowledge/deic-basic-book/daylight/daylight-simulation-tools>, (入手 2022 8. 15).
- Extech: <https://extechinc.com/markets-case-studies/>, (入手 2022 8. 15).
- <https://sumai-sekkei.com/plactical/noki-length.html> (入手 2022 8. 20).
- <https://windows.lbl.gov/angular-selective-systems> (入手 2022 8. 25).