

全面掃き出し窓の建物と両片流れ屋根の建物の自動生成と これらの建物内部での太陽光シミュレーション

Automatic Generation of Double Shed Roof & Full-length windows Buildings and Sun Light Simulation at Rooms of these 3D Building Models

○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 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.

*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. In this research, we developed a program for automatically generating "double-shed roof" houses with clerestory windows, often cited as an example in passive design. We also automatically generated houses equipped with full-length sliding windows that only open to the east, west, south, or north in order to elucidate the relationship between the orientation of building windows and the amount of sunlight entering rooms. These models are used for sun light simulation at the rooms, simulating the sunlight to travel through clerestory windows or full-length sliding windows. To measure the amount of sunlight entering the rooms, we capture images of the interior using a virtual camera with a parallel projection aimed at full-length sliding windows in a parallel orientation to sunlight rays within the virtual space.

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

Keywords: 3D building model; automatic generation; polygon partitioning; sun light simulation.

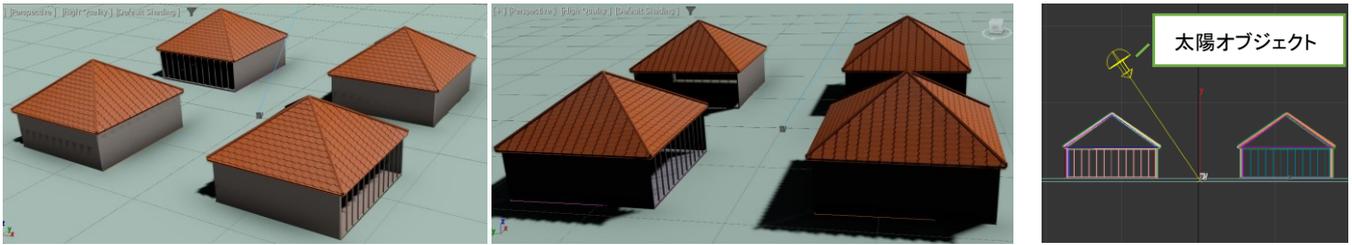
1. はじめに

これまでの研究^{1)~3)}で、下の図1に示すように、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。本システムが自動生成する 3次元建物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、3Dモデルの内部、即ち、部屋に入って、建物形状に応じて、冬に

<p>市販 GIS (ArcGIS)</p> <ul style="list-style-type: none"> *電子地図の蓄積・管理 *建物境界線(建物ポリゴン) *階数, 建物タイプ, イメージコードなど3次元化のための「属性情報」(左下)  <table border="1" data-bbox="159 1948 446 2027"> <thead> <tr> <th>Shape</th> <th>*STORIES</th> <th>AREA</th> <th>COL</th> <th>SITE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Polygon</td> <td>1</td> <td>0</td> <td></td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Polygon</td> <td>2</td> <td>0</td> <td></td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Polygon</td> <td>2</td> <td>0</td> <td></td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Polygon</td> <td>1</td> <td>0</td> <td></td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Polygon</td> <td>2</td> <td>0</td> <td></td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table>	Shape	*STORIES	AREA	COL	SITE	Polygon	1	0		8	Polygon	2	0		5	Polygon	2	0		7	Polygon	1	0		8	Polygon	2	0		6	<p>GIS Module (Python & VB)</p> <ul style="list-style-type: none"> * ArcPy(ArcGIS)をインクルードした Pythonによる頂点と属性情報の取得 *建物ポリゴンを長方形の集まりにまで分割・分離 *建物ポリゴンを正確な直角ポリゴンに整形 	<p>CG Module (MaxScript)</p> <ul style="list-style-type: none"> *建物部品を形成するため、適切なサイズの基本立体の生成 *窓やドア用に穴を空ける、部品を作成するためのブル演算 *部品を配置するために回転と移動 *自動テクスチャマッピング 	 <p>自動生成した街区の 3Dモデル</p>
Shape	*STORIES	AREA	COL	SITE																													
Polygon	1	0		8																													
Polygon	2	0		5																													
Polygon	2	0		7																													
Polygon	1	0		8																													
Polygon	2	0		6																													

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



(a) 自動生成した東西南北側が全面掃き出し窓の寄せ棟屋根の建物の太陽光シミュレーション(地点: 京都、6/21 AM10:00) (b) 自動生成した東西南北側が全面掃き出し窓の寄せ棟屋根の建物の太陽光シミュレーション(地点: 京都、9/21 AM10:00) (c) Sunlight システムを利用して太陽オブジェクトと建物の位置関係 (京都、9/21 正午)

図2 自動生成した東西南北に全面掃き出し窓の寄せ棟屋根の建物に対して太陽光シミュレーション

太陽光がどのように導かれるのか、あるいは、夏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、「全面掃き出し窓の建物」とパッシブデザインの事例としてよく挙げられる「両片流れの屋根」の建物の3Dモデルを自動生成する新規のプログラムの開発、そのためにモデル形状を決めるパラメータを明らかにし、これらのモデルに対して太陽光シミュレーションを行うことを目的とする。このパッシブデザインではどれだけ建物に日が差し込むか、即ち、「入射光量」を知ることが重要とされ、本研究では、太陽光シミュレーションで、「平行投影の仮想カメラ」を平行光線に平行で、掃き出し窓の方に向けると、カメラの投影面は光線に垂直、撮影画像の照射エリアは入射光量を表すと考える。この仮想カメラと仮想太陽、全面掃き出し窓の建物の位置関係の時刻、季節に応じた変化を以下の図2、図3に示す。本研究では、「両片流れの屋根」の採光窓である「高窓(Clerestory windows)」から、どのように入射光が差し込むかのシミュレーションを行った(図10)。建物を自動生成するプログラムに与えるパラメータに応じて形状を変えられる「3Dモデル」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、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

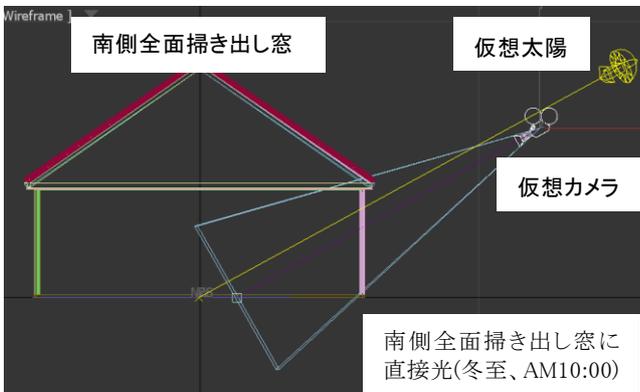
現在では、建築 設備 建材メーカー^{4)~5)}がその製品(天窓、カスタマイズされたファサードなど)を販売・設置するとき、仮想空間の3次元建物モデルにて、仮にこれらを設置して建物内部の直接光と天空光のシミュレーションを行っている。複数ある製品の選定において、その取り付け位置、その方向等が、様々なケースとなりうるので、複数の代替案となる製品とその取り付け位置を顧客に提示し、顧客のニーズに対応している。

但し、複数の案となりうる製品を備えた建物の3Dモデルを設計図から作り上げるのは時間と労力がかかる。本システムは、その建物の屋根の傾き、上片流れ屋根の割合、窓の間隔、大きさ、位置などを、建物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モデルを複数作り、建物内での太陽光のシミュレーションを行うことができる。

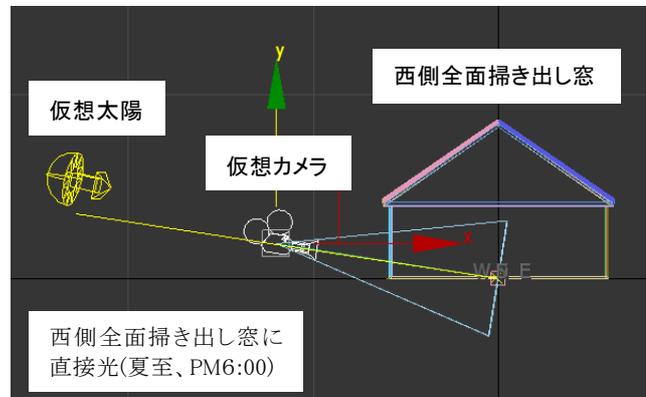
筆者らが直近に発表した論文^{6)~7)}と本稿の違いは、入射光量の算出での誤りを正し、両片流れ屋根建物の高窓からの入射光の変化をシミュレーションしたことである。

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3次元建物モデルは、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



(a)「冬至、AM10:00」における「太陽の平行光線」と「仮想カメラ」、「南側全面掃き出し窓の建物」の位置関係

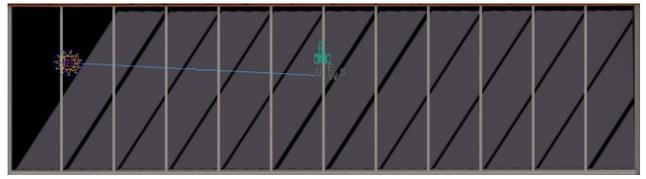


(b)「仮想カメラ」は太陽光線に平行で、掃き出し窓の方に向け、カメラの投影面は光線に垂直、撮影画像は照射エリアを写し出す

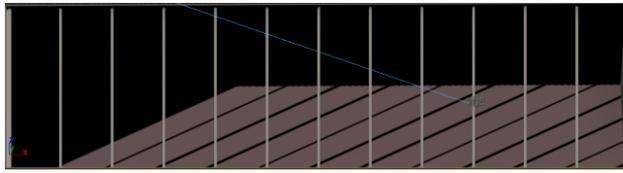
図3 「仮想太陽とその平行光線」と「仮想カメラ」、「全面掃き出し窓の建物」の提示した日時での位置関係



(a) 仮想カメラで南側全面掃き出し窓を撮影(冬至、AM10:00)



(b) 仮想カメラで西側全面掃き出し窓を撮影(夏至、PM5:30)



(c) 仮想カメラで南側全面掃き出し窓を撮影(冬至、PM2:00)



(d) 仮想カメラで西側全面掃き出し窓を撮影(夏至、PM6:30)

図4 「図3の位置関係」の平行投影の仮想カメラで全面掃き出し窓を撮影、照射エリアの面積値が入射光量

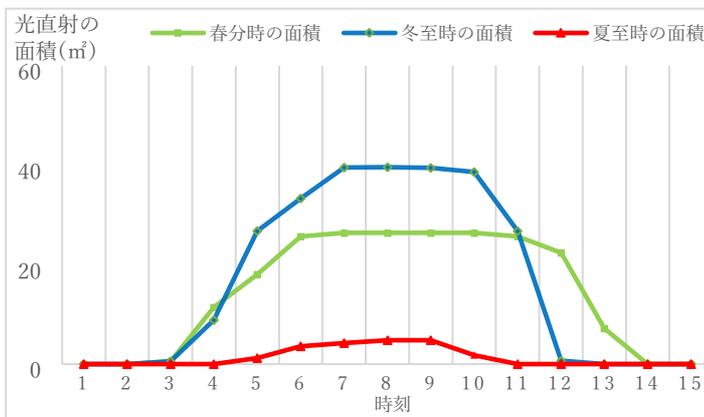
の光は、開口部からの直接光や天空光による影響が大きい。そこで、掃き出し窓の向きと部屋への直接光の関係を明らかにするように、図2に示すような東西南北側だけに大きく開口された「全面掃き出し窓」とする「寄せ棟屋根」の建物を自動生成した。この「寄せ棟屋根」は、その「軒長」を室内への直接光を遮らない⁸⁾とされる30cmの長さとし、東西南北方向に軒が伸びている構造とした。これは、北緯36°付近において、南中時の太陽高度が冬至、春分・秋分、夏至にそれぞれ「30°、54°、78°」となり、夏至の太陽高度78°に対して、軒長30cmは直接光を遮らない長さとなるからである。

図3は、提示した日時で、仮想カメラを掃き出し窓に向け、且つ、その向きが平行光線と平行になるように配置した「仮想太陽とその平行光線」と「仮想カメラ」、「全面掃き出し窓の建物」の位置関係を示す。この場合、カメラの投影面は太陽光線に垂直となり、図4に示す撮影画像の照射領域は建物内部への「入射光量」を写し出している。これは、単位面積当たりの光量である「照度(I)」はその面に入射する光(I₀)の入射角θの余弦(cos θ)に比例し、即ち、 $I = I_0 \cdot \cos \theta$ が成り立ち(cosine law of illumination)⁹⁾、その

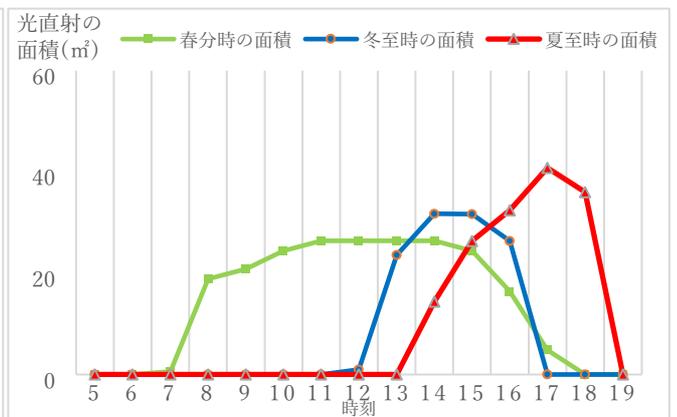
余弦方向からその面を写す「平行投影の仮想カメラ」の撮影画像は「照度」を写し出すと考えられる。例えば、入射角θ=0の場合、即ち、水平な面を真上から平行光線で照らす場合、撮影画像の面はその形状を変えないが、θ=60°とすると、その入射角の仮想カメラで面を写す場合、その撮影画像の面は半分の大きさになる。つまり、撮影画像の照射領域が入射光量を表している。

図4の(a)と(c)は、冬至に、図3の(a)に示すような位置関係の「平行投影の仮想カメラ」で南側全面掃き出し窓を撮影、照射領域は南側からの太陽光の「入射光量」を表し、同様に図4の(b)と(d)は、夏至に、図3の(b)に示すような位置関係の仮想カメラで西側全面掃き出し窓を撮影、照射領域は西側からの太陽光の「入射光量」を表している。これらの画像は光学的なレンズを使用しない仮想カメラで撮影し、光軸中心と周縁部の差はなく「平行投影の仮想カメラ」として設定しているため、遠くにあるものも「パースがかかる」ことがない「平行投影図」である。

本研究では、投影画像の照射領域の面積値を計算し、入射光量としてグラフを作成した。図4にて、窓間隔は仮想空間にて「1m」と設定してあり、窓サッシを「1m間



(a) 南側全面掃き出し窓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(サッシ間隔1m)



(b) 西側全面掃き出し窓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(サッシ間隔1m)

図5 南側と西側が全面掃き出し窓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掃き出し窓の太陽光直射エリアの面積の時間経過を表す折線グラフ

隔の目盛り」として「平行投影の画像の照射領域」の面積を計算した。具体的には、図 4(a)において、「照射領域」は 12×3.3 (横幅 × 高さ) - $3.8 \times 3.3/2$ (横幅 × 高さ ÷ 2) = 33.3m^2 と計算した。これは、「照射領域」の面積を、横幅 12 m、高さ 3.3 m の長方形形状の照射領域から右端の横幅 3.8 m、高さ 3.3 m の三角形形状の非照射領域を引いて算出した。

図 2 に示すような東西南北側だけが全面掃き出し窓という 4 つの建物において、掃き出し窓からの「入射太陽光」は、掃き出し窓の向きと季節(冬至, 春分・秋分, 夏至)と時刻によって、大きく変化する。その結果を図 5 に示す。本シミュレーションで、「南向き掃き出し窓部屋」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、「西向き掃き出し窓部屋」は、春秋は、南向き掃き出し窓部屋と同様に、午前午後を通して直接光の差し込みが多いが、西向き掃き出し窓部屋は夏と冬において、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、「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。

本研究で自動生成する建物も、下の図 6 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¹⁰⁾。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 7 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 8 (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(θ_1, θ_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。

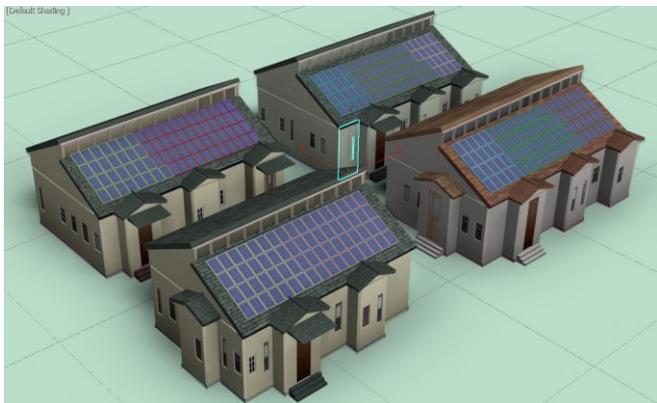


図 6 自動生成した両片流れ屋根の建物(南向き屋根にどのくらいソーラーパネルを設置できるかの検討、枝屋根はこの建物では延長せず、本体建物に突き出すことはない)

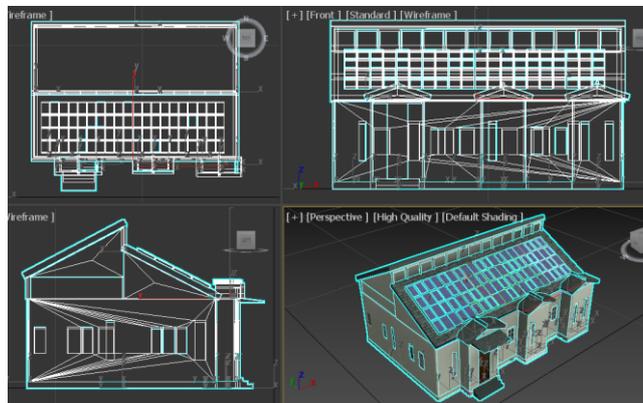
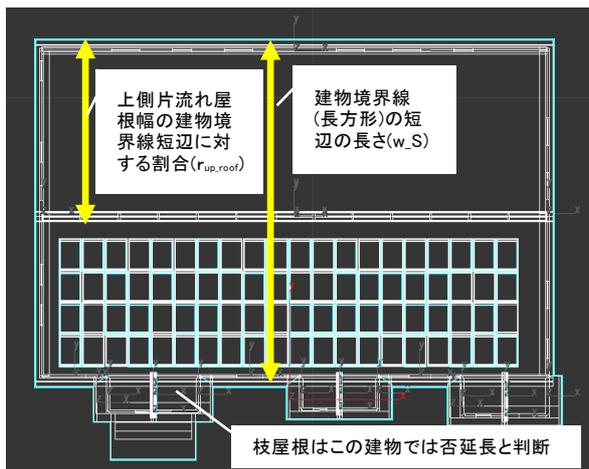
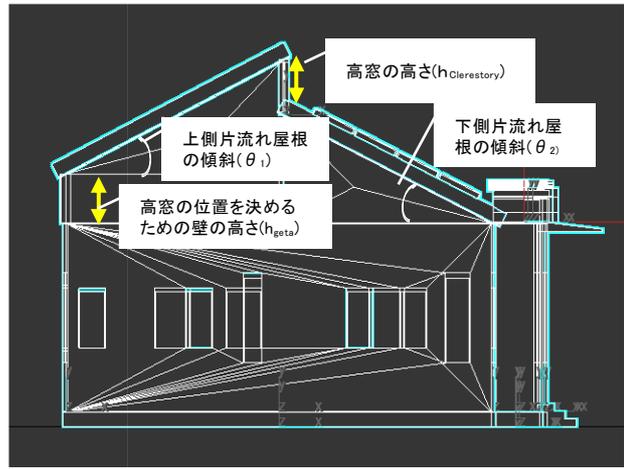


図 7 両片流れ屋根の建物の平面図、側面図、立面図と透視投影図(上側片流れ屋根の割合、上下側片流れ屋根の傾斜角、下駄履かせ壁の高さで採光窓である高窓が決定)



(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8 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)

5. パラメータを変えての両片流れの屋根の自動生成

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。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」、「 θ_1, θ_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、0.8 m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、「 $\tan(\theta_1)$ 」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てことになる。本研究では、その最適解を見つけたとき、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。それを以下の図9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

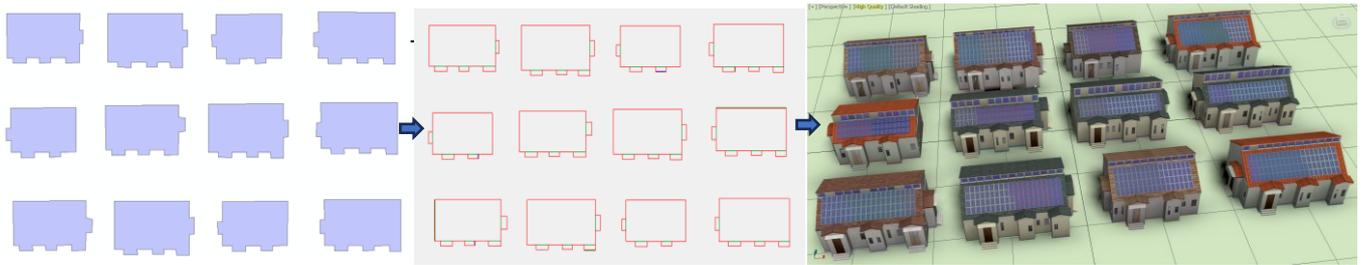
に接していたか」という「隣接情報」を分割四角形に保存する。

図9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9(b)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」で組み合わせて、「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9(b)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9(c)では、自動生成した両片流れ屋根の建物を示す。ここで、上から2行目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な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。図10では時間とともに高窓から光が差し込む様子をシミュレーションした。このシミュレーションでは、3ds MaxのDaylightシステムの直接光では、「レイトレーシング法」ではないためか、光線の差し込み具合を可視化することはできず、Daylightシステムを使わず、「フォトメトリック光(光の強さが光源からの距離の2乗に反比例する光源)」を使用して、光線の差し込みを再現した。

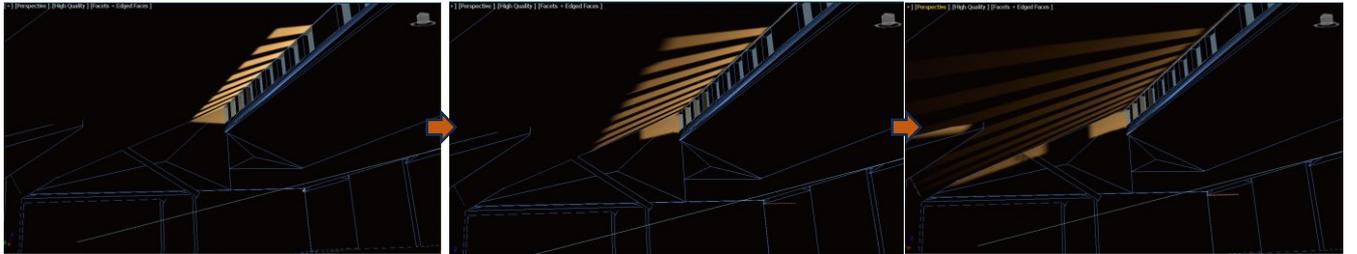
6. まとめ

本研究では、掃き出し窓から差し込む太陽光が、窓の

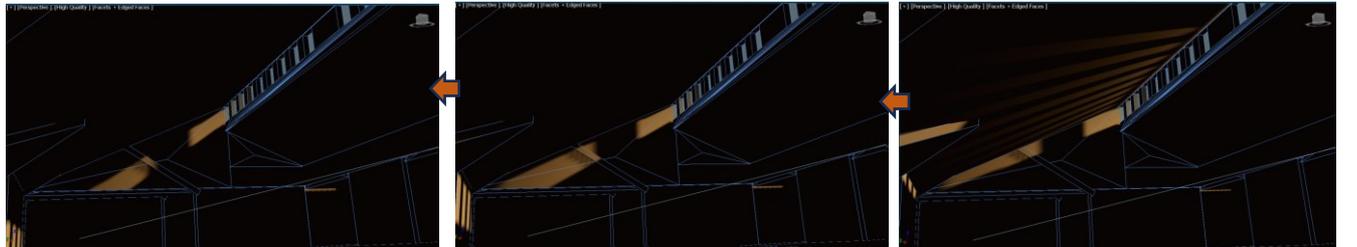


(a)電子地図上のほぼ頂角が直角の建物ポリゴン (b)ポリゴン分割、四角形整形と直交化、枝屋根延長 WDA の明確化(赤線) (c)自動生成した両片流れ屋根の建物(右へ行くほど屋根傾斜を大、2 行目は南側屋根の割合小)

図 9 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



(a)高窓からの入射光のシミュレーション：太陽の仰角が屋根の傾きより小さい (b)高窓からの入射光のシミュレーション：太陽の仰角が屋根の傾きより少し小さい (c)高窓からの入射光のシミュレーション：太陽の仰角が屋根の傾きとほぼ等しい



(d)高窓からの入射光のシミュレーション：太陽の仰角が屋根の傾きより大きい (e)高窓からの入射光のシミュレーション：太陽の仰角が屋根の傾きより大きい (f)高窓からの入射光のシミュレーション：太陽の仰角が屋根の傾きより少し大きい

図 10 両片流れ屋根の建物の高窓からの入射光のシミュレーション：光源(太陽)の仰角を変化

向き、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。このとき、太陽光に平行に向いている「仮想カメラ」で建物内部を撮影し、撮影面の照射エリアが入射光量であるとした。また、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るパラメータを明らかにし、自動生成するプログラムを開発し、その関数の引数に様々な値を入れ、様々な屋根勾配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。

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(上の図 9)」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、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：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) 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), Vol.27 (5), pp.476-488, 2012.
- 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 : 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, 2018.
- 4) Velux: <https://www.velux.com/what-we-do/research-and-knowledge/deic-basic-book/daylight/daylight-simulation-tools/>(入手 2022 8.15).
- 5) Extech: <https://extechinc.com/markets-case-studies/>(入手 2022 8.15)
- 6) 村瀬孝宏, 杉原健一 : 持続可能な環境への建物構造最適化のための自動生成による 3 次元建物内太陽光シミュレーション, 日本教育情報学会 年会論文集 39 pp. 397-398, 2023. 8
- 7) 村瀬孝宏, 杉原健一, 沈振江 : 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, 地理情報システム学会第 31 回学術大会論文集 31, 2022. 10
- 8) <https://sumai-sekkei.com/plactical/noki-length.html>(入手 2022 8.20).
- 9) https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert%27s_cosine_law(入手 2023 9.25).
- 10) <https://windows.lbl.gov/angular-selective-systems>(2022 8.25).