(2) 建物内の太陽光シミュレーションが可能な３Ｄ建物モデルの自動生成

村瀬　孝宏[1]・杉原　健一[2]

[1]非会員　中京学院大学教授　短期大学部(〒509-6192　岐阜県瑞浪市土岐町2216)
E-mail: murase@chukyogakuin-u.ac.jp

[2]正会員　金沢大学 理工研究域 研究協力員(〒920-1192 石川県金沢市角間町ヌ7番地)
E-mail:mjsbp812@yahoo.co.jp

これまでの研究で，電子地図上の頂角がほぼ直角の建物境界線を四角形の集まりまで分割し，「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．本研究で自動生成された建物の３Ｄモデルは，壁や屋根などの「各部材」は中身の詰まったCSGモデルであり，建物形状に応じて３Ｄモデルの内部に入って，太陽光がどのように導かれ，あるいは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．またパラメータに応じて形状を変えられる「建物の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，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，合意形成に役立つことができる．

Key Words : *3D building model, automatic generation, polygon partitioning, sun light simulation, CG*

1.　はじめに

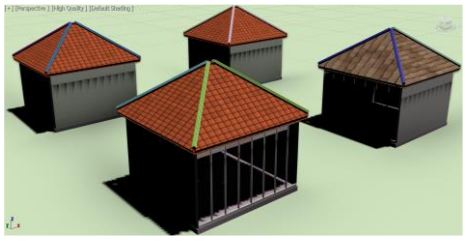
これまでの研究 [1)~4)]で，電子地図上の頂角がほぼ直角の建物境界線 (直角建物ポリゴン)を四角形の集まりまで分割し，さらに「互いに直交する長方形の集まり」まで「整形」し，各長方形の上に Box 形状の建物本体と屋根を配置して３次元建物モデルを自動生成した(図－１参照).

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 モデルであり，建物形状に応じて３Ｄモデルの内部に入って，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．

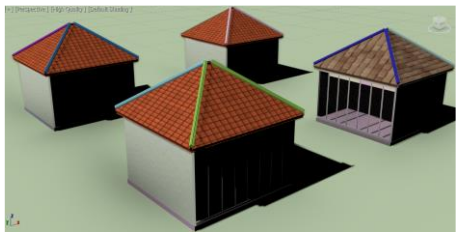
本研究では，ベランダや窓から差し込む太陽光は，そのベランダや窓の向き，時間と季節によってどう変化するかを 3ＤＣＧでシミュレーションした．特に「両片流れの屋根」の建物に焦点をあて，その採光窓である「高窓 (Clerestory windows)」から，どのように太陽光が入射し，壁で反射し，建物内部に光が届くか等がシミュレーションできる．このことは，冬至において，できるだけだけ太陽光を取り入れ，逆に夏至においては，できるだけ太陽光を遮蔽するような建物構造はどうあるべきかという「パッシブデザイン」に繋がる．そのために建物構造を決め，建物を自動生成する関数のパラメータに様々な値を入れ，様々な形状の「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．



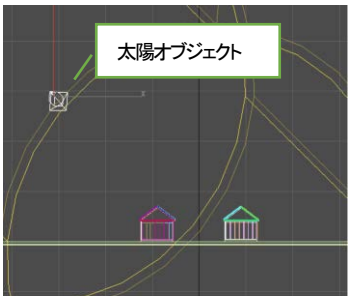
図－１　自動生成システムの構成と３Ｄモデルの自動生成のプロセス



(a) 東西南北にベランダを全面設置した建物の Sunlight システムによる太陽光シミュレーション(地点:東京, 6/21 AM11:00)



(b) 自動生成した東西南北側が全面ベランダの寄せ棟屋根の建物の太陽光シミュレーション(地点:東京, 6/21 PM3:00)



(c) Sunlight システムを利用した太陽オブジェクトと建物の位置関係(側面図) (6/21 PM5:30)

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

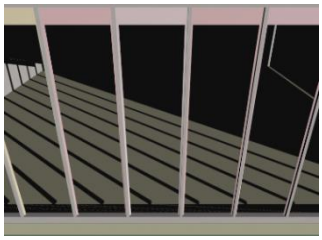
2.　建物内部への太陽光シミュレーションの方法

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．

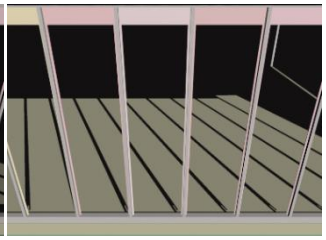
図−３に，それぞれ東西南北側だけが全面ベランダという４つの建物において，季節と時間の経過とともに，ベランダである「開口部からの直接光」がどのように変化するかをシミュレーションした結果を示す．**図−３**の(a1)から(a4)は，**図−４**に示す 3ds Max の仮想空間において「太陽側からベランダ部屋」に向けた仮想カメラ１で撮影し，**図−３**の(b1)から(b4)は，**図−４**に示す「ベランダ部屋側から外側」に向けた仮想カメラ２で撮影し，時刻と共に変化する直接光があたる床などのイメージを示す．

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．「光直射エリア」はベランダの向きと季節と時刻によって，大きく変化する．その結果を**図−５**に示す．

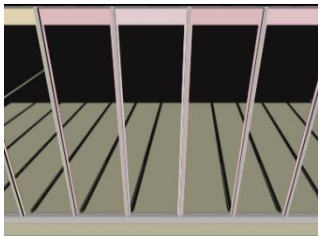
本シミュレーションで，「南向きベランダ」は，冬と春秋は，よく直接光が差し込むものの，夏はそれほど，直接光の差し込みは多くないことが分かる．また，「西向きベランダ」は，春秋は，南向きベランダと同様に，午前午後を通して直接光の差し込みが多いが，西向きベランダは夏と冬において，午前中，直接光が差し込まないものの，午後から，直接光が多く差し込み，特に夏場は日没近くまで直接光が差し込むことをシミュレーションしている．



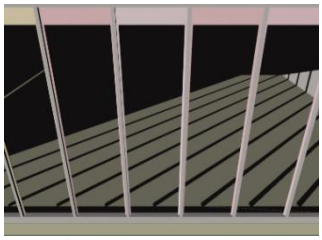
(a1) 南側全面ベランダに直接光(冬至, AM8:00)



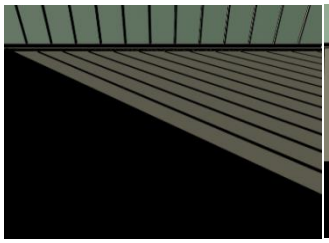
(a2) 仮想カメラを太陽側から部屋に向け撮影(冬至, AM10:00)



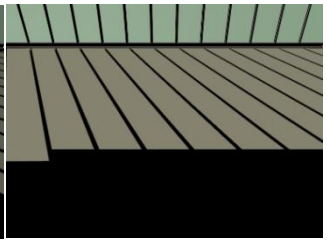
(a3) 南側全面ベランダに南中時刻の直接光(冬至, AM12:00)



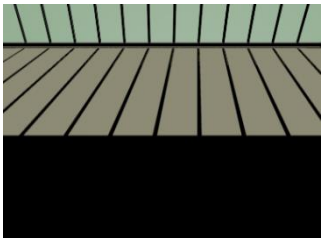
(a4) 南側全面ベランダに西側から直接光(冬至, PM3:00)



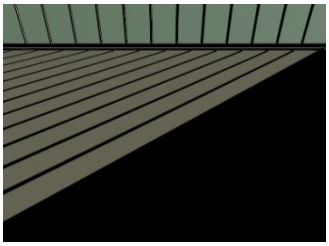
(b1) 仮想カメラを部屋側から外に向け撮影(冬至, AM8:00)



(b2) 南側全面ベランダに直接光(冬至, AM10:00)

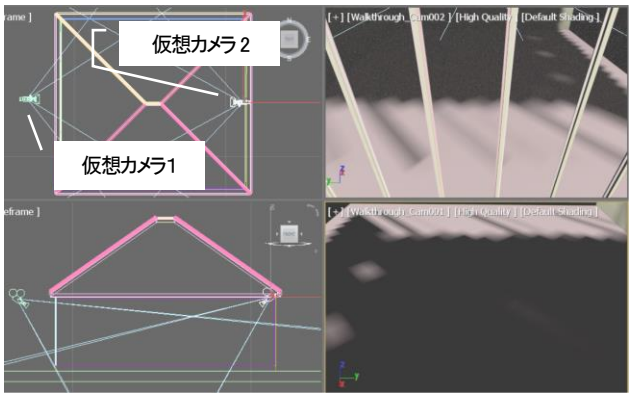


(b3) 南側全面ベランダに南中時刻の直接光(冬至, AM12:00)



(b4) 南側全面ベランダに西側から直接光(冬至, PM3:00)

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)」て撮影，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



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

3.　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．

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．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」の自動生成では，平面図，側面図を表した**図−６**(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．

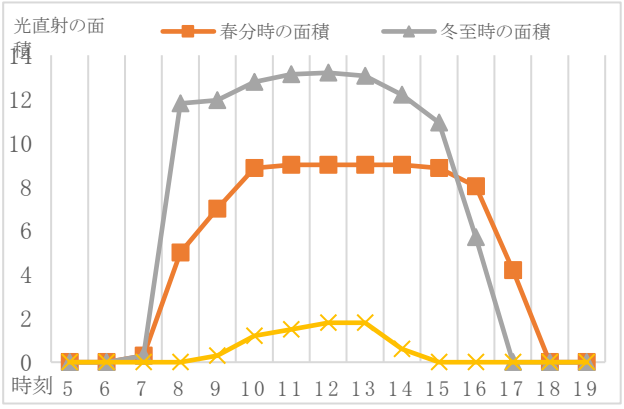
$$h_{Clerestory} = Abs((\tan(\theta_1) * r_{up_roof} * w_S + h_{geta}) - \tan(\theta_2) * (1.0 - r_{up_roof}) * w_S) \quad (1)$$

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．

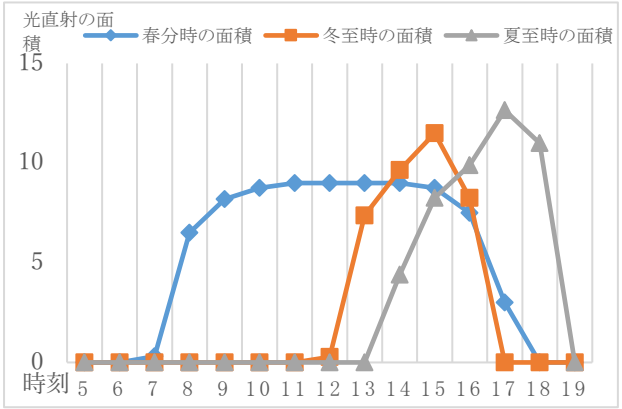
4.　パラメータを変えての両片流れの屋根の自動生成プロセス

本研究では，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，0.8m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**図−７**に示す．

図−７(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，

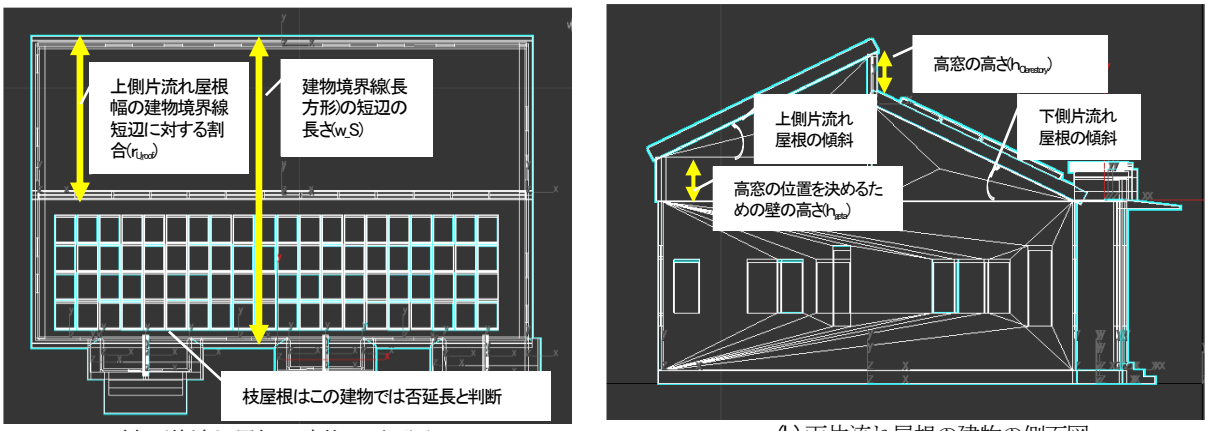


(a) **南側**全面ベランダへ太陽の入射光の太陽側から撮影した時間とともに変化する光直射エリアの面積(相対値)



(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



(a) 両片流れ屋根の建物の平面図　　(b) 両片流れ屋根の建物の側面図

図−6　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)

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．

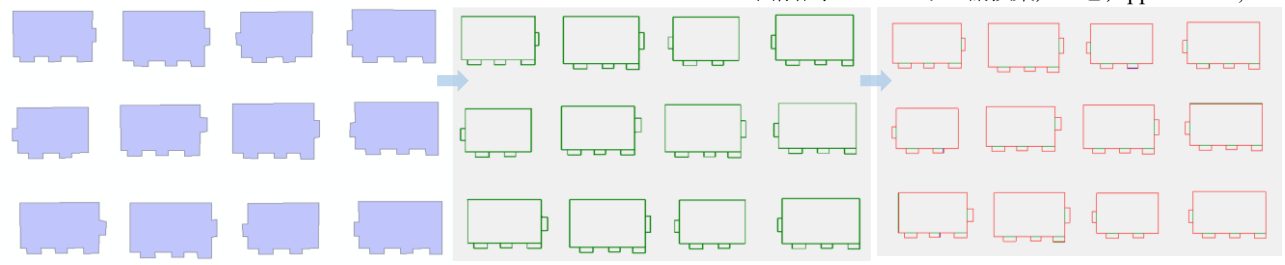
5.　まとめ

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「ソリッドモデル」であり，３Ｄモデルの内部に入って，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．

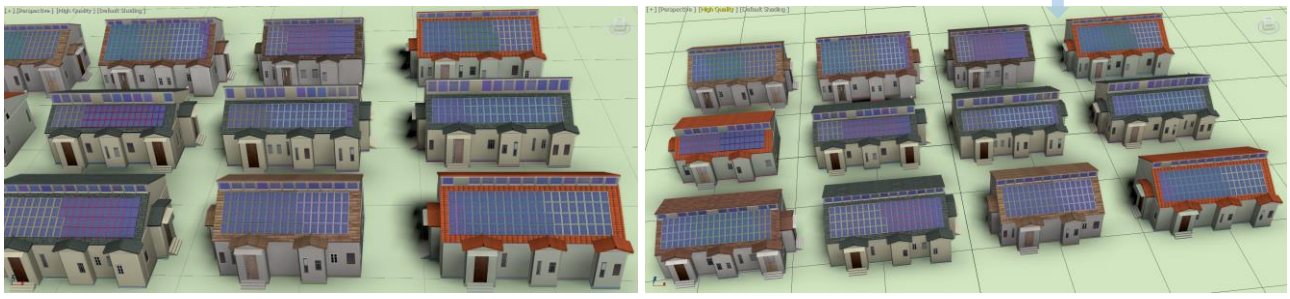
さらに，パッシブデザインで注目されている「両片流れの屋根」の建物に焦点をあて，その屋根の構造を決め，建物を自動生成する関数のパラメータに様々な値を入れ，様々な屋根傾斜や北向きと南向き屋根の割合などを変えた「両片流れの屋根」を生成した．パラメータに与える値に応じて形状を変えられる「建物の３Ｄモデル(**図−７**)」は，仮想空間でパッシブデザインを取り入れた持続可能な「スマートハウス」の案を検討する際，建物構造の最適化を図り，関係者で建物の出来上がりのイメージを共有することができ，合意形成に役立ち，よりよいスマートハウスの設計につながる．

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.
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)，72 巻 2 号，pp.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・技術シンポジウム論文集，pp.83-88, 2018.
4) 杉原健一，村瀬孝宏：窓やドアの設置可能な壁を明らかにするポリゴン分割法による３次元建物モデルの自動生成，土木情報学シンポジウム講演集，45 巻，pp.101-104, 2020.



(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　(c)WDA(Windows and Doors Available wall)の明確



(e)自動生成した両片流れ屋根の建物 (2 行目は南側屋根の割合小)　(d)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)

図−７　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