

# レジリエントな国土・地域をデザインするための 整備案の3Dモデルの自動生成

杉原 健一<sup>1</sup>・沈 振江<sup>2</sup>・林 良嗣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

自然災害に対する強靱な国土形成に向けたレジリエントな国土・地域をデザインするため、デザイナーや専門家は整備案を地図上で策定する。自然災害、特に異常気象による大災害対策、津波被災市街地の復興まちづくり、あるいは、今後の南海トラフ巨大地震対策のために、可能な限り環境負荷を低減し、生態系ネットワークに配慮した安全地区への集団移転とする、例えば、「地区に隣接する丘陵地と一体的な整備」等の整備案の検討を地図上で行う。ここで、整備案を具体的な形にする「3Dモデル」は、現実に来るであろう「整備案」を分かりやすく周知し、合意形成に役立ち、「防災まちづくり」を支援する。しかし、3Dモデルを作成するには、3次元CGソフト等を用いて、多大の労力と時間が必要である。そこで、本研究では、「整備案の電子地図」に基づき「安全地区への集団移転などの整備案の3Dモデル」を自動生成する「防災まちづくり支援システム」の研究・開発を目的とする。

**Key Words :** *automatic generation, GIS, CG, 3D town model, 3D terrain model*

## 1. はじめに

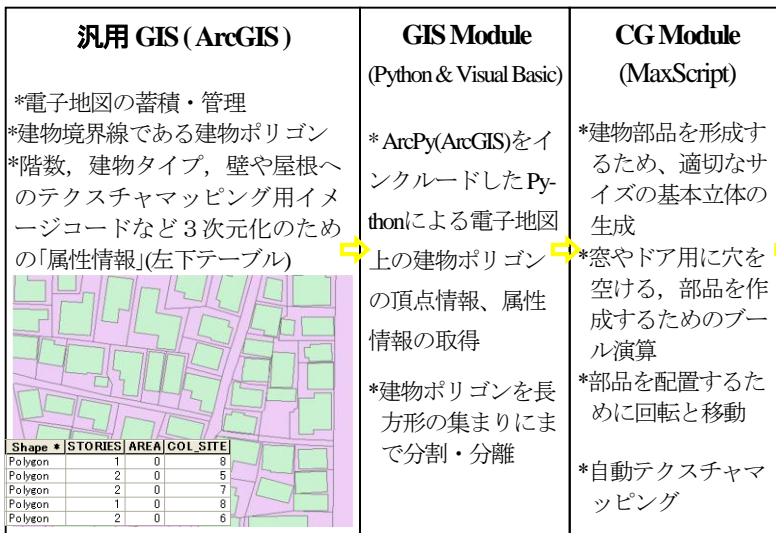
異常気象による大災害対策、津波被災市街地の復興まちづくり、あるいは、今後の南海トラフ巨大地震対策のために、デザイナーや専門家は、可能な限り環境負荷を低減し、生態系ネットワークに配慮した安全地区への集団移転とする、例えば、「地区に隣接する丘陵地と一体的な整備」等の整備案の検討を地図上で行う。ここで、整備案を具体的な形にする、街区の3Dモデルを中心とする「3次元都市モデル」(図-1右参照)は、「復興まちづくり」や「自然と共生するまちづくり」等の次世代型まちづくりを推進する国土強靱化政策に対して、合意形成を図るための住民参加の場として利活用が期待される重要な「情報基盤」である。「整備案の3Dモデル」は、現実に来るであろう「整備案」を分かりやすく周知し、合意形成に役立ち、「防災まちづくり」を支援する。

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<sup>2,3)</sup>。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。

このように、防災・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」の出来上が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、地区に隣接する丘陵地と一体的な整備の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。



自動生成された3次元都市モデル

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

(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, 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<sup>4)5)</sup>. 本研究では, 造成地をシミュレーションする3Dモデルの自動生成を提案する. 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あるいは半自動的で構築す

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.

Saeedi<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>.

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<sup>9)</sup>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<sup>10)</sup>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. 整備案の3Dモデルの自動生成

#### (1) 水路の3Dモデルの自動生成

3次元水路モデルの自動生成のプロセスを図-2に示す。3次元モデルの元になるものは、電子地図上の河川や水路の中心線である。電子地図はGISアプリケーションによって、蓄積・管理される。GISは、地図上の建物や水路といった地物に対して、建物の階数や「川底幅」などの「属性情報」を関連付け、属性データを持たせることができる。ここで河川や水路を3次元化するための属性情報として、「川底幅」、「護岸面1幅」、「護岸面2幅」、「堤防面1幅」、などのフィールドを持たせた。本システムにおいて、GISアプリケーションは、エスリ社のGISソフト(ArcGIS)を採用している。「GISモジュール」は、エスリ社のGISアプリケーション開発用のソフトウェア部品であるArcGIS Pythonで頂点情報等を取り込み、Visual Basicで開発を行った。ここで、GISモジュールでの生成前処理は次の順に行われる。

- (1) 水路や河川の中心線ポリラインの点群を制御点とするB-Spline曲線を生成し、新たな河川や水路の中心線とする。
- (2) 中心線B-Spline曲線に沿って、川底面や護岸斜面、護岸面、堤防斜面、堤防面などの境となる境界線(点群)を生成する。これらの境界線点群には、深さ、高さデータを与える。例えば、川底面境界線に対して-2m、堤防面に対して1m。
- (3) 生成された点群に対して、Delaunay 3角分割し、3角面を割り当てる(T I N(Triangulated Irregular Network)の割り当て)。
- (4) 各境界線に対して、生成された3角面の内外判定を行い、CGモジュールで異なるテクスチャをマッピングするため3角面を分類する。

上記の生成前処理を以下に説明する。GISモジュールは、電子地図上の水路中心線(ポリライン)に対して、その頂点群を制御点とするなだらかな曲線であるB-Spline曲線を生成する。B-Spline曲線は、制御点列が与えられたとき、制御点の影響が曲線全体に及ぼさないようにすることができる。以下の2次のB-Spline関数を用いて、B-Spline曲線を生成した。

$$N^2(t) = \begin{cases} -t^2+3/4 & (0 < t < 1/2) \\ (4t^2-12t+9)/8 & (1/2 < t < 3/2) \\ 0 & (3/2 < t) \end{cases}$$

但し、この式では、B-Spline関数は偶関数なので、tを0以上の範囲とした。GISモジュールは、水路中心線の頂点群を制御点とするこの2次のB-Spline曲線に沿って、川底面、護岸斜面、護岸面、堤防斜面、堤防平面などを形成するための高さデータの与えられた点群を生成する。この様子を図-5の「3次元水路モデルのデータ処理」の上から2つ目の図で示す。水路中心線(B-Spline曲線)を構成し、連続する2頂点(始点と終点)を両端とする直線に対して、この直線に直交し、始点から

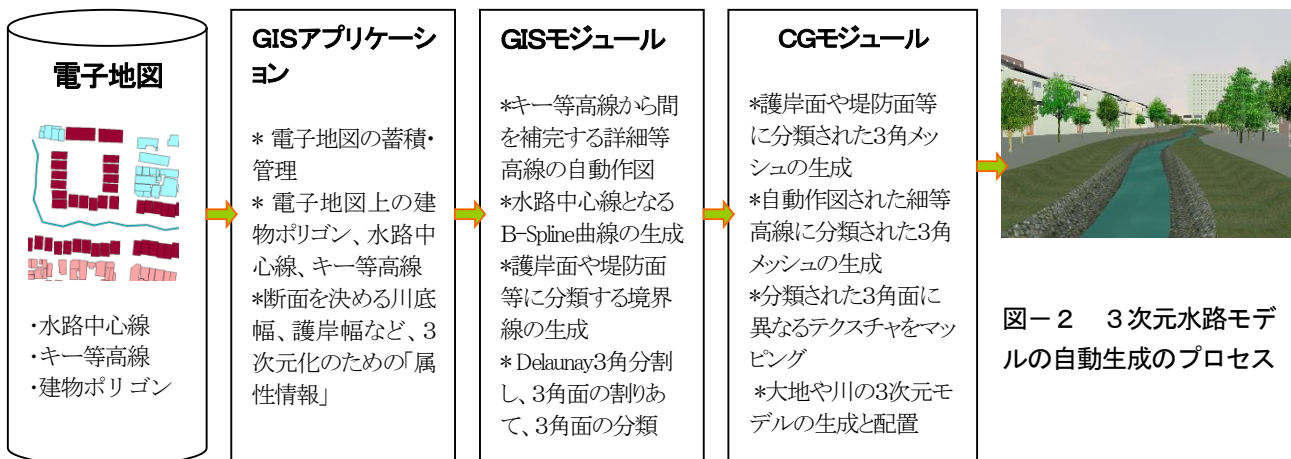


図-2 3次元水路モデルの自動生成のプロセス

「指定された距離」だけ離れた点の位置を算出して、川底面、護岸斜面などの点群を生成する。「指定された距離」は、GIS上の水路中心線の「属性情報」として蓄積されている「川底幅」、「護岸面1幅」、「護岸面2幅」、「堤防面1幅」などを用いて、算出される。また、CGモジュールで、川底面、護岸面と堤防面とで異なるイメージをテクスチャマッピングするために、川底面、護岸面を囲む境界線と中心線に対して左右に存在する堤防面を囲む境界線を生成する。この(1)(2)の前処理で、川底面、護岸面、堤防斜面などを形成する高さデータの与えられた点群が生成される。この「高さデータ」と「指定された距離」から河川や水路の断面図が決定される。例えば、下の断面図は、川底面の幅は2m、高さは-1m、護岸面1の幅は0.5m、上端の高さは-0.6m、護岸面2の幅は0.5m、上端の高さは-0.4m、堤防面3の幅は2m、高さは-0.4m、堤防面2の幅は0.5m、上端の高さは0m、堤防面1の幅は1m、高さは0mとした。これらの値は、河川や水路の中心線ポリラインに関連付けられた属性情報で設定できる。この断面図から、次の図-3と図-4に示すような水路の3次元モデルが生成される。

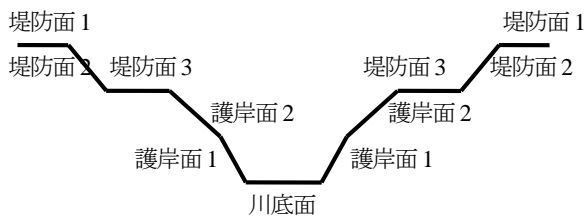


図-3 設定された断面図と生成された3次元水路モデル

属性情報である「川底幅」、「護岸面1幅」、「護岸面2幅」、「堤防面1幅」とそれぞれの面両端の頂点の高さの値を変えることで、様々な断面を持つ河川や水路を生成することができる。図-4は、異なる設定値に基づいて、自動生成された水路の3次元モデルである。

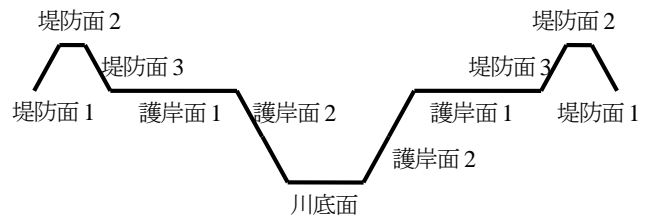


図-4 別の断面図から生成された3次元水路モデル

次に、GISモジュールは、堤防や護岸等の水路の形状を近似する自由曲面を生成するために、高さデータの与えられた、堤防や護岸等を構成する点群に対して、3角面を割り当てる。通常、3角形はその最小の角度を最大にするドローネ(Delaunay)3角分割を行い、TIN(Triangulated Irregular Network)を生成し、各点を頂点とする3角面を配置する。ドローネ3角形分割のアルゴリズムは明らかにされ、TINを生成する機能を有する3次元CGソフトは存在する。アルゴリズムは、通常、ランダムな順序で点群の点を加えていき、毎回現在の点集合のドローネ3角形分割を管理する確率的逐次添加法をとる<sup>11)12)13)</sup>。

このアルゴリズムによると、点Prをドローネ3角形分割された点群に加える。まず、現在の3角形分割された3角形群の中で、どの3角形の中に点Prが含まれるかを調べる。点Prからこの3角形の頂点への辺を引き、新たな3個の3角形が作られる。これらの新たに出来上がった3角形はドローネ3角形分割されているとはいえない。点Prを加えたことによって、ある辺が正当でない辺(ドローネ3角形分割されていない辺、即ち、正三角形に近い三角形ではない三角形)になってしまうことがあるからである。そこで、3角形の外接円の中に他の頂点が含まれているかを調べ、外接円の中に他の頂点が含まれている場合は、その辺が正当であるかを調べる手続きLegalizeEdgeが呼び出される。この手続きでは、正当でない辺を正当な辺で置き換える(ドローネフリップ)。ドローネ3角形分割のアルゴリズムのメインルーティン、及び、正当化を調べる関数:LegalizeEdgeは次のページに示すように記述されている。

アルゴリズム : *Delauay\_Triangulation*(P)

入力 : 平面上の  $n$  個の点の集合  $P$ .

出力 : 集合  $P$  のドローネ 3 角形分割  $T$ .

- 1) 集合  $P$  が 3 角形  $p_1p_2p_3$  に含まれるように点  $p_1, p_2, p_3$  を選ぶ.
- 2) 3 角形  $p_1p_2p_3$  から成り立つ 3 角形分割として,  $T$  を初期化する.
- 3) For  $r = 1$  to  $n$  //  $n$  は頂点数
- 4) Do ( 点  $p_r$  を  $T$  に挿入する )
- 5) 点  $p_r$  を含む 3 角形  $p_i p_j p_k$  を求める.
- 6) 点  $p_r$  と 3 頂点  $p_i, p_j, p_k$  を辺で結び, 新たな 3 つの 3 角形 ( $p_r p_i p_j, p_r p_j p_k, p_r p_i p_k$ ) に分割する.
- 7) *LegalizeEdge*(点  $p_r$ , 辺  $p_i p_j$ )
- 8) *LegalizeEdge*(点  $p_r$ , 辺  $p_j p_k$ )
- 9) *LegalizeEdge*(点  $p_r$ , 辺  $p_i p_k$ )
- 10) 点  $p_1, p_2, p_3$  と, これらに接続する辺をすべて  $T$  から削除する.

アルゴリズム : *LegalizeEdge*(点  $p_r$ , 辺  $p_i p_j$ )

挿入した点が  $p_r$  で, 辺  $p_i p_j$  は正当でなく, フリップする可能性がある辺とする.

- 1) If 辺  $p_i p_j$  が正当でない
- 2) then 3 角形  $p_i p_j p_l$  を辺  $p_i p_j$  で 3 角形  $p_i p_j p_k$  に隣接する 3 角形とする.
- 3) 辺  $p_i p_j$  を辺  $p_i p_l$  で置き換える (辺  $p_i p_j$  をフリップする).
- 4) *LegalizeEdge*(点  $p_r$ , 辺  $p_i p_l$ )
- 5) *LegalizeEdge*(点  $p_r$ , 辺  $p_l p_j$ )

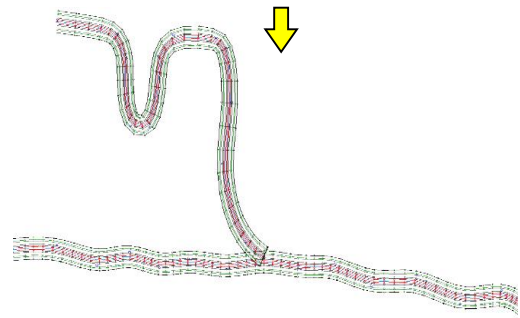
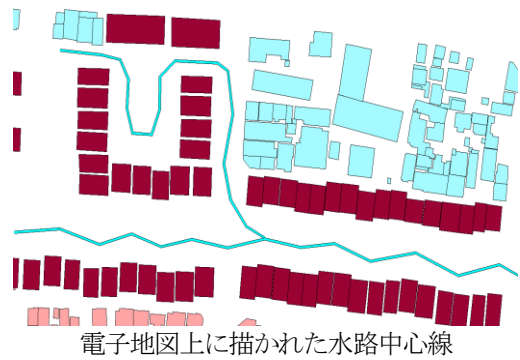
このようにドローネ 3 角形分割を行うアルゴリズムは明らかにされているが, 実際にドローネ 3 角形分割の処理をできるプログラムを開発するには, 次にあげることが不明である.

(1) 3 角形の頂点は, どの頂点であるかを特定するために番号付けする必要があるが, どのように番号付けするのか.

(2) *LegalizeEdge* で, ある 3 角形に隣接する 3 角形のある 3 角形と共有しない頂点が, ある 3 角形の外接円の内部にあるかを調べるが, ある 3 角形に隣接する 3 角形をどのように調べるのか. また, その調べる頂点をどのように特定するのか.

(3) フリップした結果, 新たに得られる 2 個の 3 角形の頂点をどのように番号付けするのか. また, これらの 3 角形に隣接する 3 角形をどのように決めるのか. フリップは続けて起こる可能性もあるので, *LegalizeEdge* で正当かどうか調べる頂点をどのように特定するのか.

(4) 点  $p_r$  を内部に含む 3 角形を見つけ, その 3 角形を 3 個の 3 角形に分割するが, 新たにできる 3 角形のどの辺



中心線から川底面等の境界線(B-Spline 曲線)の生

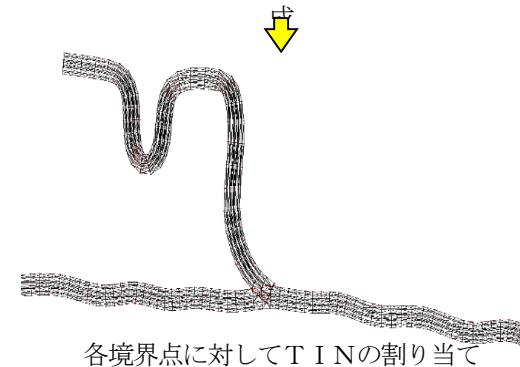


図-5 3次元水路モデルのデータ処理の流れ

をLegalizeEdgeで正当かどうか調べる辺とするのか。また、隣接する3三角形をどのように特定し、その3三角形のどの頂点を正当かどうか調べる頂点とするのか。

これらの問題点を明らかにするために、3三角形の頂点は、頂点のx座標が最も小さいものを $p_1$ とし、時計回りに番号付けすることとした。これにより、頂点の中で最も小さいx座標値を持つ頂点が、 $p_1$ であることが分かる。隣接する3三角形、正当かどうかをチェックする頂点を特定するために、次のプロパティをもつ3三角形の構造体を定義した。

```
Structure triangle // 構造体 triangle
・ 3頂点  $p_1, p_2, p_3$ の x座標, y座標, z座標
・ 3頂点  $p_1, p_2, p_3$ の id番号
・ 辺 12, 辺 23, 辺 31 で隣接する 3三角形の id番号
・ 辺 12, 辺 23, 辺 31 で隣接する 3三角形の正当かどうか調べる頂点の x座標, y座標, z座標
・ この 3三角形が有効かどうかのブール型変数
```

上記のような構造体を定義し、3つの3三角形へ分割するとき、あるいは、ドローネフリップするとき、これらの3三角形構造体のプロパティを正しく設定することで、前記の問題点を解決することができる。以上のアルゴリズムで、ドローネフリップは、収束はするが、数多く起こる場合がある。3三角形内部に追加された点があるかないかを調べ、あれば、3つの3三角形に分割し、新たにできる3つの3三角形に対して、各々の3三角形の外接円の内部に、元の3三角形に外で接する3三角形の、元の3三角形と共有する辺の頂点以外の頂点があるかどうかを調べ、あれば、ドローネフリップを行う。この一連の操作を、外接円内部に他の頂点がなくなるまで実行するので、自分自身を呼び出す再帰型(recursive)の関数を用いている。再帰型のプログラムであるため、戻り番地がスタックに積み上げられる。

本システムの開発では、「スタック領域が不足」というエラーが頻発した。そこで、ドローネ3三角形分割のプロセスは、独立させて、スタック領域が不足しないようにした。このようにドローネ3三角形分割を行うことで、護岸面や川底面、堤防面を構成する頂点群に対して、最適な3角面を割りあて、TINを生成することができる。

GISモジュールの最終の生成前処理として、生成したTINを川底面・護岸面用と堤防面用に分ける。これは川底面・護岸面と堤防面の境界線を用いて、3角面の重心が境界線の内側か外側かで判定して、分類する。即ち、ポリゴンに対する点の内外判定を行って、3角面に分ける。点の内外判定方法には、以下の方法がある<sup>13)</sup>。

- (1) 判定点から任意の方向へ伸ばした半直線とポリゴンの辺との交点数を求め、それが奇数なら内部、偶数なら外部と判定する。但し、例外処理として、半直線が頂点を通過し、かつその頂点に接続する2つの辺が半直線に関して、同じ側にあれば、その交点の数を1ではなく2と数える。
- (2) 判定点を原点として、ポリゴンの頂点を順に眺めたとき、変化の符号付きの偏角の和が $\pm 2\pi$ ならば内部と判定し、0ならば外部と判定する。

本研究では、偏角の総和に着目した判定を行い、次のアルゴリズムで偏角の総和を求め、点の内外判定を行った。

アルゴリズム：*cal\_sum\_angle()*

入力：ポリゴンの全頂点の座標、判定点の座標

出力：ポリゴン頂点の偏角の総和

- 1) 判定点からポリゴンの連続する2頂点までの単位ベクトル $(u_i, u_{i+1})$ を求める。
- 2)  $\theta = \text{Arctan}((u_{i,x} * u_{i+1,y} - u_{i+1,x} * u_{i,y}) / (u_{i,x} * u_{i+1,x} + u_{i,y} * u_{i+1,y}))$
- 3) if 単位ベクトル $u_i$ と $u_{i+1}$ の外積 $> 0$  and  $\theta < 0$  then  $\theta = \theta + 2\pi$
- 4) if 単位ベクトル $u_i$ と $u_{i+1}$ の外積 $< 0$  and  $\theta > 0$  then  $\theta = \theta - 2\pi$

このようにして、3角面を分類し、異なるオブジェクトとして、CGモジュールへエクスポートする。ここで、これまでの川や水路の3次元モデルの自動生成におけるデータ処理の流れを図-4に示す。

川底面・護岸面用と堤防面用に分けられた3角面をCGモジュールは受け取って、それぞれに異なるイメージをテクスチャマッピングを施す。CGモジュールは、代表的な3次元CGソフトである3dsMAXを制御するスクリプト言語(MaxScript)を用いて、プログラム開発した。GISモジュールで作成された地物毎のTIN情報に基づいて、自由曲面となるメッシュオブジェクトを生成し、川底、護岸、堤防等の地物毎に異なったイメージやテクスチャをマッピングする。

## (2) 起伏ある地形への整備案の3Dモデルの自動生成

防災まちづくりには、計画をあらゆる視点で確認しながら、新しい街並みのイメージを、住民や関係者と共有し、合意形成と意思決定を速やかに図ることが重要とされる。本研究代表者らは、「GISとCGの統合化による3次元都市モデルの自動生成」という研究課題に取り

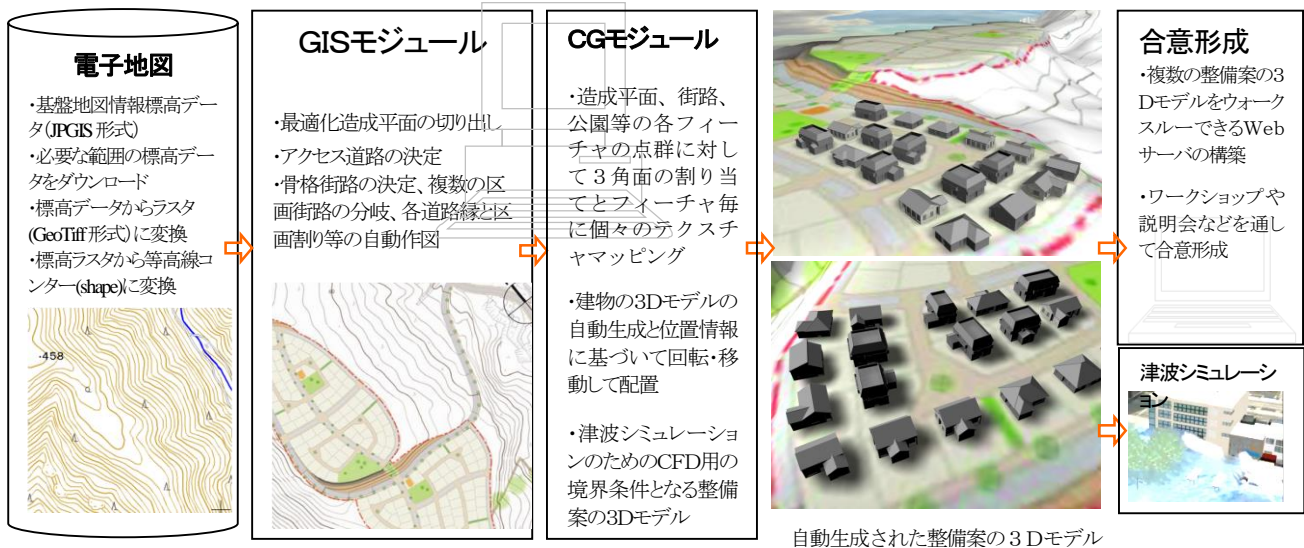


図-6 整備案の3Dモデル自動生成のプロセス

組んできたが、異常気象や津波などの災害対策のための「安全地区への集団移転」などの防災まちづくり案を作成するには、平地の市街地ではなく、「起伏に富んだ地形」に対し、「自然地形上に生態系ネットワークに配慮する造成を行う住宅市街地の3Dモデル」が必要となる。

現地地形をできる限り残す用地造成を実現するために、自然地形に沿って街路や水路を通し、敷地エリアを配置し、敷地を区割り、それらの敷地内に建物境界線を描く。これらの作業は、かなりの時間と労力を必要とし、また、それを描くデザイナーによって、整備案が偏った区画割り案となってしまう可能性も高い。そこで、本研究では、「様々な整備案」を素早く構築できるよう、「造成土量や法面の面積」を最小にする平面を自動的に切り出して、その平面に対して骨格街路を指定すれば、「分岐する複数の区画街路の自動描画」、及び、「区画割りの自動作図」を行う手法を提案するに至った。また、避難場所として、例えば、平時は「海を望める憩いの場である公園」は、その眺望などを検討するために整備案を含む広範囲の3Dモデルでの検討が必要である。本研究では、次の図-6に示すような「防災まちづくり支援システム」を開発するために、「自然地形の最適化造成」、および、「区画割りと街路の自動作図」、「整備案の津波シミュレーション」を行う機能を持つシステムを研究開発する。そのために、各機能の開発において、現状の業務を分析し、システムによって実現すべき機能、要求仕様を定義する。続いて、外部設計、内部設計、プログラム設計等という一連の開発工程を行い、システム開発する。図-6に示すような自動生成のプロセスにおいて、システムの前工程の「自動作図モジュール」等が完成したら、後工程のモジュールを完成させるスパイラルモデルの手法を使う。新しい街並みの3Dイメージを、住民や関係者と共有し、「合意形成」を図る計画案の3DモデルをWeb

仮想空間上に構築し、情報発信するシステムを研究・開発する。本研究では、図-6に示すようなプロセスで、整備案の3Dモデルを自動生成する。3Dモデルの情報源は、基盤地図情報の標高データを変換して等高線コンターとしたものである。「自然地形の最適化造成」や「区画割りと街路の自動作図」、「最適なアクセス道路の経路決定支援」を行うようGISモジュールを開発する。まずは、「容易に自動作図が行える単純な形状の造成平面」において、一連の開発工程を経て、モジュールを完成させる。CGモジュールは、造成平面、街路、公園等の各フィーチャの点群に対して3角面の割り当て、マッピングを行い、3次元化を行う。最終工程では、3DモデルをWebサーバに展開し情報発信すると同時に、再構成した3Dモデルで津波シミュレーションも行う。

#### 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-turn)、直角に左に曲がるか(L-turn)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わらないかで、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とする)として、ポリゴンを四角形の集まりに分割した後に、「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」を調べることにした。「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、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。



図-7 電子地図上の建物ポリゴン

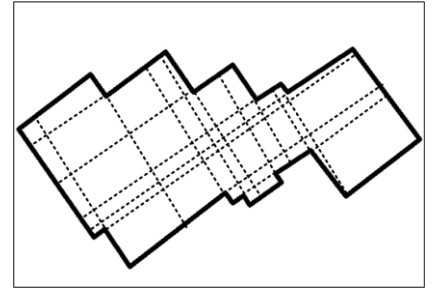


図-8 L頂点からの分割線

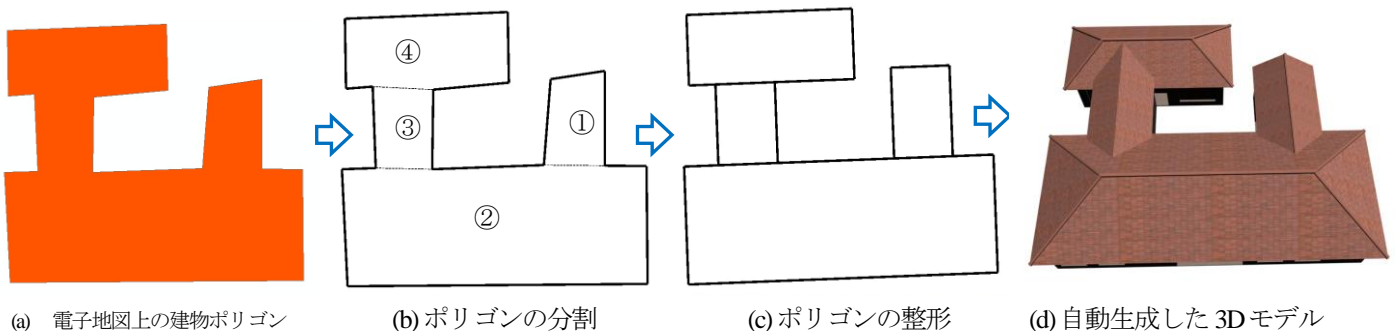


図-9 建物ポリゴンの分割・整形処理を行っての3Dモデルの自動生成



### (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:  $\theta$ )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-1 1 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  $a_3a_4$  上の点(Checkpoint)がど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  $a_3a_4$  が四角形④の辺  $m_1m_2$  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( $a_3=m_2$ )を基準として、活性四角形の平均長辺( $w_L$ )と平均短辺( $w_S$ )、Main Angle ( $\theta$ ) から、整形した四角形を生成する。以下の式で、整形した頂点の位置を算出する。

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

### 5. 活用事例とあとかぎ

防災まちづくりには、計画をあらゆる視点で確認しながら、新しい街並みのイメージを、住民や関係者と共有し、合意形成と意思決定を速やかに図ることが重要である。本研究代表者らは、「GIS と CG の統合化による 3 次元都市モデルの自動生成」という研究課題に取り組んできたが、異常気象や津波などの災害対策のための「安全地区への集団移転」などの防災まちづくり案を作成するには、平地の市街地ではなく、「起伏に富んだ地形」に対し、「自然地形上に生態系ネットワークに配慮する造成を行う住宅市街地の 3 D モデル」が必要となる。現地地形をできる限り残す用地造成を実現するために、自然地形に沿って街路や水路を通し、敷地エリアを配置し、敷地を区割り、それらの敷地内に建物境界線を描く。

これらの作業は、かなりの時間と労力を必要とし、また、それを描くデザイナーによって、整備案が偏った区画割り案となってしまう可能性も高い。そこで、本研究では、「様々な整備案」を素早く構築できるように、水路中心線を指定すれば、「水路中心線に沿って護岸や堤防の境界線の自動描画」、及び、「キー等高線に沿って、詳細等高線の自動作図」などを行い、造成平面を自動的に切り出す手法を提案するに至った。また、避難場所として、例えば、平時は「海を望める憩いの場である公園」は、そ

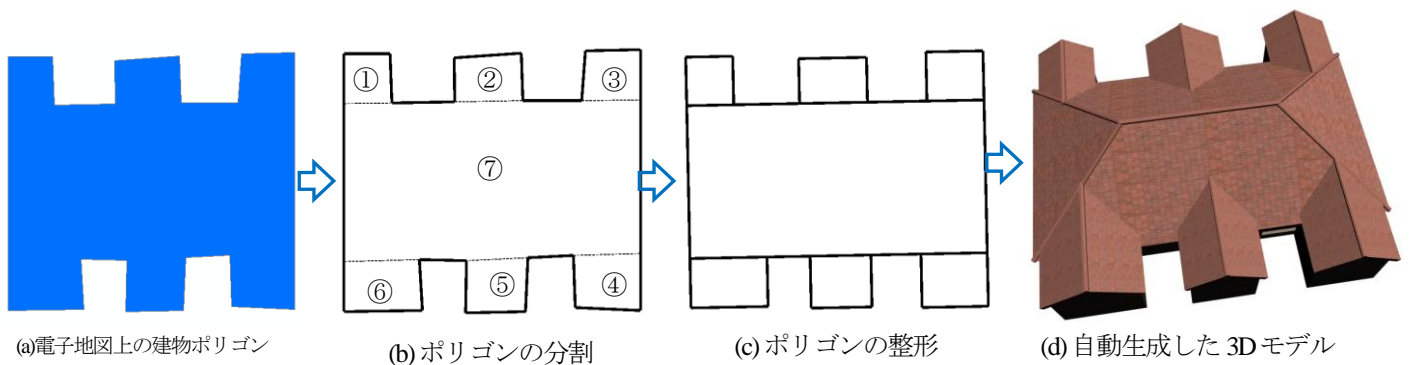


図-1 0 自動生成のプロセスと枝屋根が主屋根にどう隣接するかを示す 3 つの分割パターン

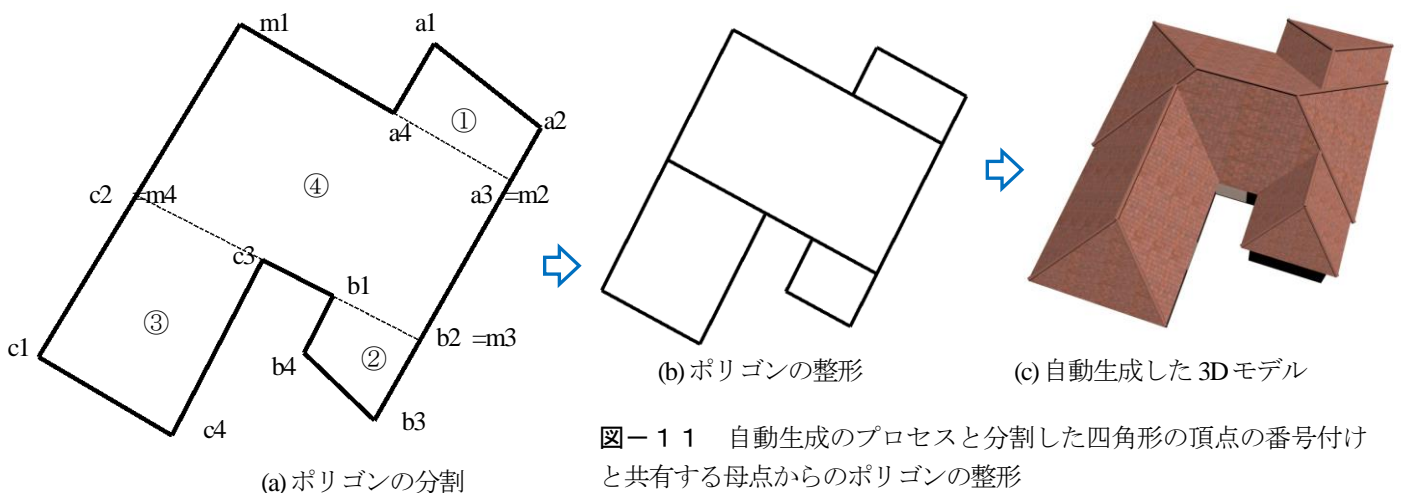


図-1 1 自動生成のプロセスと分割した四角形の頂点の番号付けと共有する母点からのポリゴンの整形

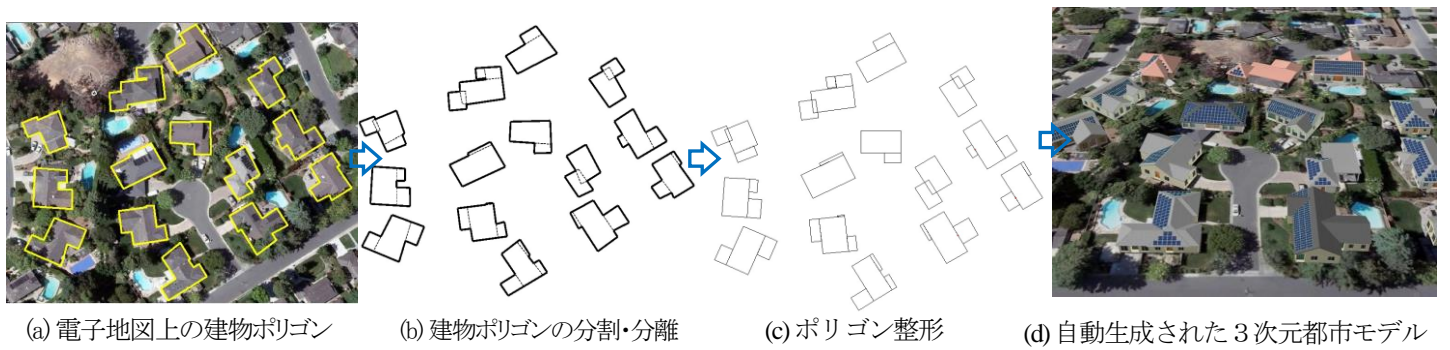


図-12 自動生成のプロセスと分割した四角形の頂点の番号付けと共有する母点からのポリゴンの整形

の眺望などを検討するために整備案を含む広範囲の3Dモデルでの検討が必要である

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) M. ドバーク他，『コンピュータジオメトリ』，p225～p243，近代科学社(2000)
- 12) 徐 剛，『写真から作る3次元CG』，p88～p89，近代科学社(2000)
- 13) 杉原厚吉，『グラフィックスの数理』，p88～p92，共立出版株式会社(1996)