BIM 及び点群を利用した敷地高低差に着目した配置計画支援プログラムの開発

Development of a layout planning method using BIM and point clouds focusing on ground height difference

○松尾　悌弘[*1]，大西　康伸[*2]
Yoshihiro MATSUO [*1] and Yasunobu ONISHI[*2]

*1 熊本大学大学院自然科学教育部 大学院生
Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.
*2 熊本大学大学院先端科学研究部 教授 博士（学術）
Professor, Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto Univ., Ph. D.

Summary: In architectural site planning, it is important to consider the topographical features of a site and take them into account in the layout plan of buildings, parking lots, open spaces, etc. We have proposed a method for creating fine-grained topography BIM models automatically using point clouds obtained from drones. Nevertheless, even with the creation of fine-grained topography BIM models, it is difficult to decide the level of the ground and create the site preparation model. Therefore, we developed a layout planning support program with four functions: 1) Automatic placement of building ground floors and flat areas of the exterior design to match the average elevation of ground level. 2) Automatic modeling of sloped pathways within the site. 3) Automatic generation of the site preparation model. 4) Automatic calculation of earthwork volumes. The result of the evaluation revealed that the developed program could support part of the site planning by a designer.

キーワード: 配置計画; 敷地環境; 土量; モデリング; ドローン; 地形
Keywords: site planning; topography BIM model; earthwork volume; modeling; drone; topography.

1. 研究の背景と目的

建築設計の初期段階では、敷地の現状を読み解きそれを基に建物の配置計画を行う。敷地環境の一要素である高低差の特徴を考慮した配置計画を行うことは重要であり、高低差を加味せず整地を採用すれば、費用の増加や残土処理の問題が発生する。BIM の導入により 3 次元的な設計が可能になるが、高低差を正確に再現した精緻な 3 次元地形モデルを作成するには、トータルステーション等での測量による精緻な高低差の情報が必要となる[注1)]。当該情報が入手できない場合、BIM ソフトを使用した配置計画において、平面的もしくは大まかな配置計画しかできないという現状がある。

一方土木分野、農業分野では、ドローンを用いた SfM 写真測量[注2)]（以下、ドローン測量）により、敷地上空から撮影した画像データから点群を作成し、敷地環境を迅速にデジタル化できる技術がある。既存の研究では、ドローンより取得した敷地の点群情報を活用し、敷地の高低差を正確に再現した精緻な現況地盤モデルと周辺道路モデルを自動作成するプログラムを開発した[1)]。また、現況地盤モデルと道路モデル以外は点群で表現し、それらを合成することで敷地のデジタルモデル（以下、敷地環境モデル）を構築する提案を行った。

しかし、敷地環境モデルを用いて配置計画を行った場合、以下に示す 3 つの問題がある。

問題 1：高低差が複雑に変化する現況地盤の場合、敷地の局所的な現況地盤平均高さの算出には手間がかかる。そのため、現況地盤レベルに則したレベル決定を目視で行わざるを得ない。

問題 2：敷地内通路の平面的な位置検討に続きそのモデリングを行うが、レベルや勾配を正確に反映させることが困難である。そのため、敷地内通路の勾配や立体的な形状を把握しながら配置計画ができない。

問題 3：様々なレベルをもつ建物や外構の平地（駐車場やオープンスペース）、敷地内通路の配置結果に基づき形成される計画地盤のモデリングが困難である。そのため配置結果として生まれる外構の形状を把握することができない。

そこで本研究では、敷地環境モデルの利用を前提として、以上の 3 つの問題を解決するような BIM で稼働するプログラムを開発することで、敷地の高低差に着目した

配置計画を支援することを目的とする。なお、本研究における「精緻な現況地盤モデル」とは、実際の敷地との標高精度の差が±100mm に収まる精度を持つモデルと定義する[注3)]。本研究では、RTK（リアルタイムキネマティック）搭載ドローン[注4)]測量を用いて精緻な現況地盤モデルを作成した。

2. 既往研究

土木分野、農業分野において、ドローンや点群を活用した地形のモデリング及び地形形状を利用した各種数量の算出に関する研究[5) 6) 7)]がある。しかし土木分野において橋や道路などの土木構造物を設計する際、高低差を活かした土木設計を行ったとしても、建築と比較し詳細な高低差を考慮することは少ない。そのため精緻な現況地盤モデルを活用し、土木構造物の設計支援を目的とした研究はない。

一方地形に関する研究に乏しい建築分野において、BIM を活用して敷地の高低差に着目した配置計画を支援するような研究事例は見当たらない。

3. BIM を活用した配置計画手法の提案

本研究で提案する配置計画手法では、配置計画の検討対象を、「建物の地上階床の領域（以下、建物エリア）」、「駐車場や広場など平地となる外構の領域（以下、平地エリア）」、「現況の地形を残置する領域（以下、現況存続エリア）」、「敷地内の人や車の通路（以下、敷地内通路）」とする。本研究では、高さに関連する検討を自動で支援する機能群を備えたプログラムを開発する。なお、建物エリア、平地エリア、現況存続エリアの位置や平面的な形状および大きさの検討、敷地内通路の長さおよび通路幅は、BIM ソフトでの手動操作で検討することとし、これを配置ゾーニングと定義する。

3.1. 建物エリア、平地エリアの現況地盤平均高さへの自動配置機能

建物エリアや平地エリアの高さを現況地盤の高さに設定する場合、そのエリアの現況平均地盤高さを自動的に算出し、その位置に自動的に配置する機能。

3.2. 敷地内通路自動モデリングおよび勾配自動算出機能

敷地内通路を検討する際、エリアとエリアをつなぐように敷地内通路の中心線を平面的に描画する。その中心線を基準として、設定したエリアのレベルをつなげるように敷地内通路モデルが自動作成されると共に、敷地内通路の勾配が自動算出される機能。

3.3. 計画地盤モデル自動作成機能

建物や外構の平地（駐車場やオープンスペース等）、敷地内通路の配置結果に基づき、各要素および敷地境界線を最短距離でつなぐように計画地盤モデルが自動作成される機能。

3.4. 土量自動算出機能

現況地盤モデルと計画地盤モデルの高低差から切土、盛土量を自動算出し、その可視化が行える機能。土量を評価指標として加えることで、配置計画案を定量的に評価することが可能となる。

以上の支援機能群を「配置計画支援プログラム」（以下、開発プログラム）と称する。開発プログラムを活用することで、設計者が配置ゾーニングを行い、コンピュータが敷地の各要素のレベル（現況地盤、計画地盤、各エリア、敷地内通路）や土量を算出することによって、敷地の高低差を加味した配置計画案の検討を可能とする。また、本提案では高度な IT リテラシーを持たない建築設計者でも、BIM ソフト内で敷地環境モデルを活用し、配置計画の検討ができることを目指す。

4. 配置計画支援プログラム

4.1. 配置計画支援プログラムの開発と利用手順

プログラムの開発にあたり BIM ソフトとして Autodesk Revit 2023（以下、Revit）、開発環境としてビジュアルプログラミング言語の一種で Revit のプラグインである Dynamo 2.6.1（以下、Dynamo）を使用した。

図 1 に開発プログラムの利用イメージを示す。開発プログラムでは、敷地環境モデル上に表 1 に示すパーツを配置する。これらの BIM パーツは本研究にて新たに作成したものである。なお、開発プログラムは Dynamo プレイヤーから実行する。

表 1 配置計画を行うための BIM パーツ

BIM パーツ名	イメージ	用途	備考
BM 指定パーツ		BM の位置を設定	配置した BM の Z 値を基準に設計 GL が設定される
平地エリア（レベル）パーツ		駐車場や広場などの平地とするエリアの指定	設計 GL を基準とした高さを入力し、その位置にパーツが配置される。
平地エリア（現況）パーツ			描画したパーツ直下の現況地盤面の平均高さに配置される。
建物エリア（レベル）パーツ		建物の配置エリアの指定	設計 GL を基準とした高さを入力し、その位置にパーツが配置される。
建物エリア（現況）パーツ			描画したパーツ直下の現況地盤面の平均高さに配置される。
現況存続エリアパーツ		現況地盤面のまま残すエリアの指定	描画したパーツの範囲は現況地盤面が存続される。
敷地内通路描画パーツ		上記エリアパーツや敷地境界線間の敷地内通路の指定	始点と終点の高さの差と中心線の長さから勾配を算出される。
敷地内通路モデル		プログラム実行後自動で作成される通路モデル	敷地内通路描画パーツに基づき作成される。

4.2. 開発プログラムにおける支援ツールの概要

開発プログラムの機能群には以下の 6 つの支援ツールにより構成される。なお、既往研究[1)]で開発された敷地環境モデルの現況地盤モデルは、ドローン測量より取得した多数の点（以下、現況地盤点群）から構成される。開発プログラムでは、現況地盤点群に基づき処理を行う。

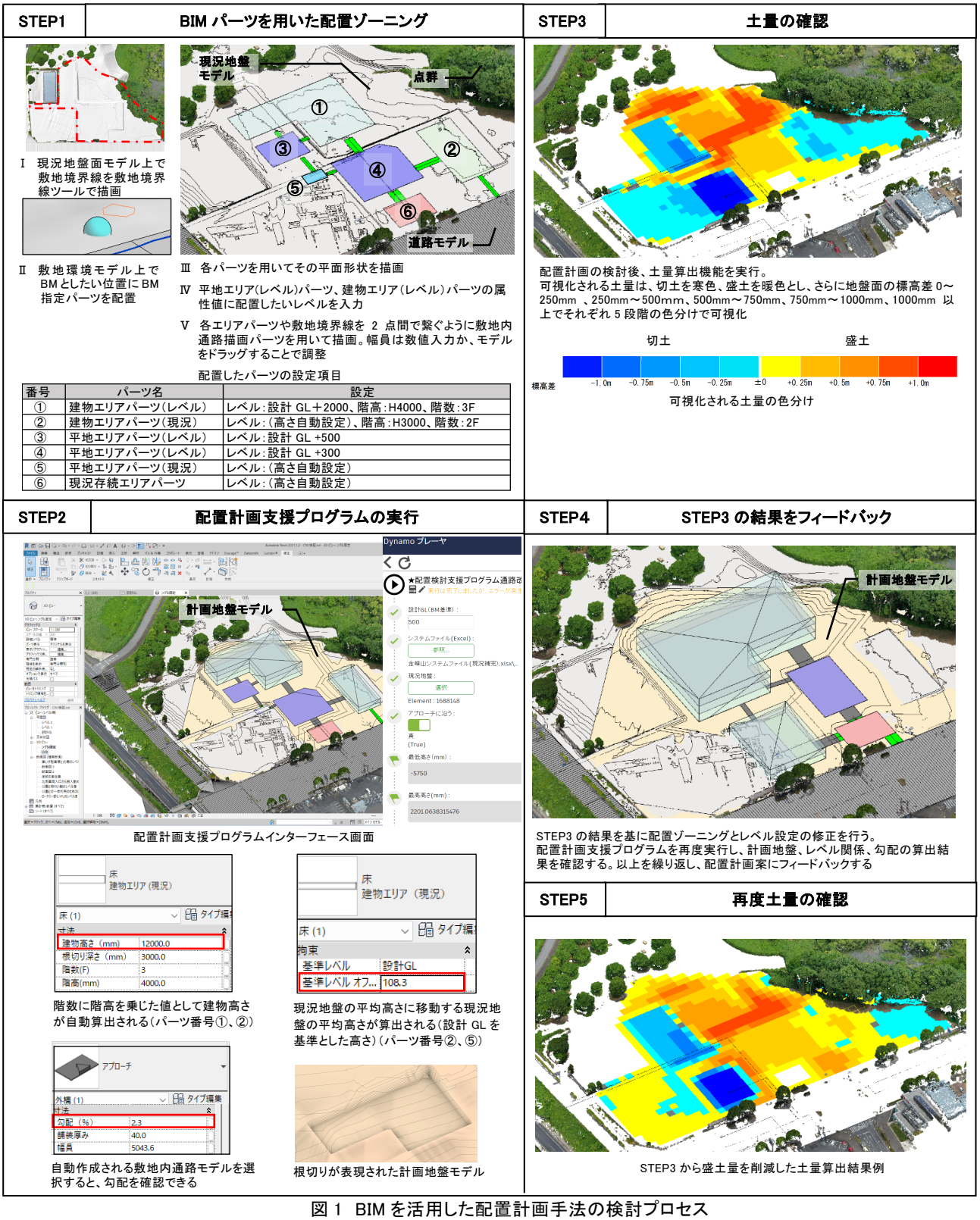

図 1 BIM を活用した配置計画手法の検討プロセス

4.2.1. BM の指定及び設計 GL の設定ツール

「BM 指定パーツ」を配置すると、その Z 値を取得し設計 GL レベルが設定される。以降の各エリアパーツのレベル設定時の基準は、ここで設定した設計 GL レベルとなる（図 2)。

4.2.2. 現況地盤面の平均高さへの自動配置ツール

敷地環境モデル上にある、現況地盤高さに合わせる建物エリアもしくは平地エリアパーツを取得し、平面的に各パーツと重なる領域の現況地盤点群の Z 値の平均を算出する。その後、各パーツは算出した Z 値の高さに自動的に移動する（図 3)。

4.2.3. 勾配のある敷地内通路の自動モデリングツール

敷地内通路描画パーツの中心線と平面的に接続するエリアパーツの高さより勾配を算出し、その値から勾配のある中心線を作成する。その中心線に基づき敷地内通路モデルを自動生成する。(図 4)。

4.2.4. 計画地盤の自動モデリングツール

計画地盤モデルは現況地盤モデルと同様に多数の点で構成される地形モデルとする。計画地盤モデルの作成方法は、配置された各パーツの外形線と敷地境界線上に複数の点を生成し、それらの点を利用して各パーツおよび敷地境界線で囲まれた地表面の面積が最小となるようにサーフェスを張る。これが計画地盤モデルとなる (図 5)。

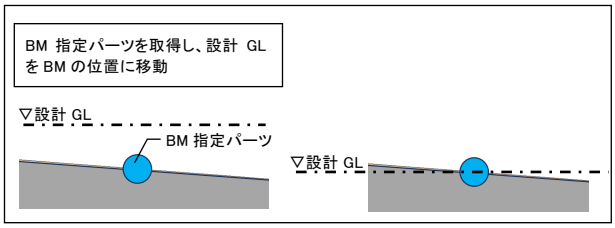

図 2 BM(ベンチマーク)の指定方法

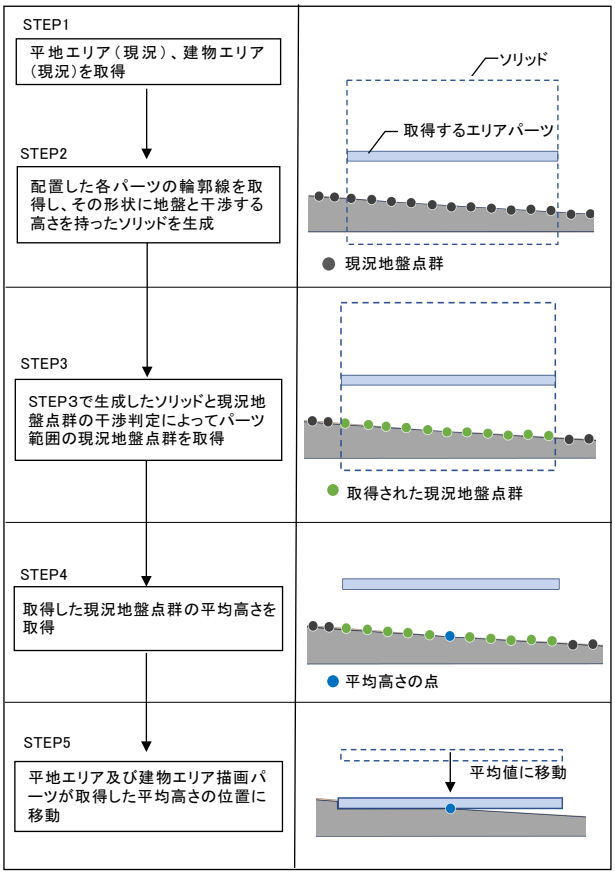

図 3 パーツの高さを現況地盤高さに合わせる処理方法

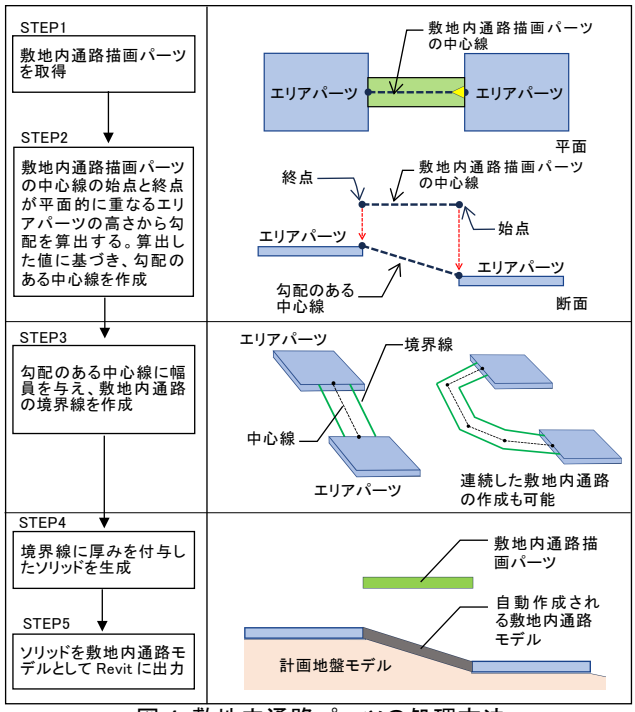

図 4 敷地内通路パーツの処理方法

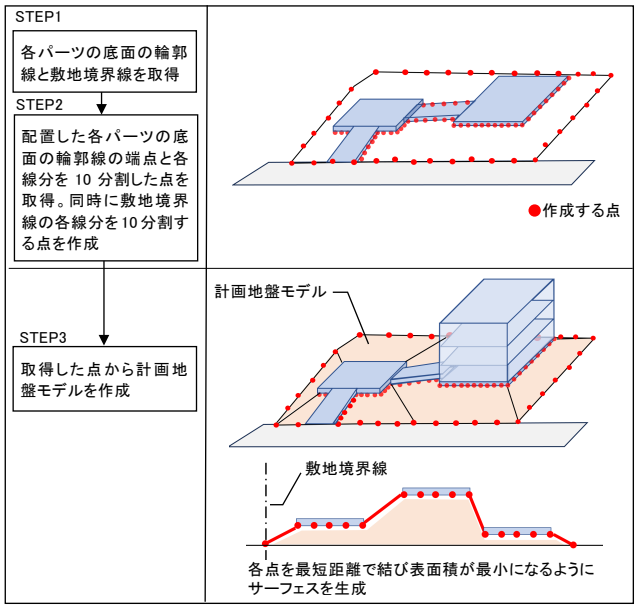

図 5 計画地盤モデル作成の処理方法

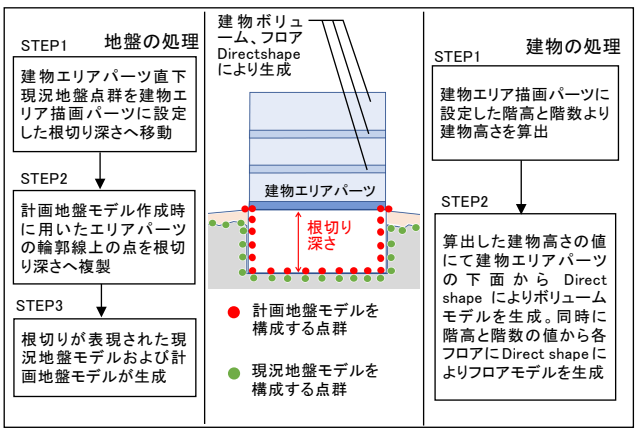

図 6 建物ボリュームと根切りのモデリング方法

4.2.5. 建物ボリュームと根切りの可視化ツール

建物ボリュームの処理方法として、建物エリアパーツ描画時に入力した階数と階高の値を乗じることで、建物高さを算出する。その値を基に配置した建物エリアパーツを基準として高さ方向に建物ボリュームが形成される。同時に各フロアに床が表示される。生成されるボリュームは Dynamo の Direct shape [注5)]によりボリュームとして生成される。ボリューム形状は、プログラム実行の度にパラメータ値に基づき更新される。根切り表現の処理方法として、入力した根切り深さ値を基に、現況地盤の点をその深さ方向にオフセットすることで、現況地盤が掘削されるような表現となる（図 6)。

4.2.6. 土量自動算出ツール

土量自動算出機能の処理の流れを図 7 に示す。Step1 では現況地盤面モデルと計画地盤面モデルをポリサーフェスに変換する。ただし、点群から作成した現況地盤モデルは点の数が多いため、サーフェスの作成処理が行えない。そのため、現況地盤面モデルに関しては点の数の削減処理を行なった後にサーフェスへと変換する。

本研究では土量計算の一つであるメッシュ法[注6)]のルールに基づき土量の算出を行う(図 8)。図 7 に示す Step2、Step3 では描画された土量算出範囲に一定の間隔のメッシュを作成し、メッシュ内で現状標高と造成後標高を算出する。Step4～Step6 では算出した標高差に基づきメッシュごとにソリッドを作成し、Direct shape にて出力する。これにより土量のモデルが可視化される。

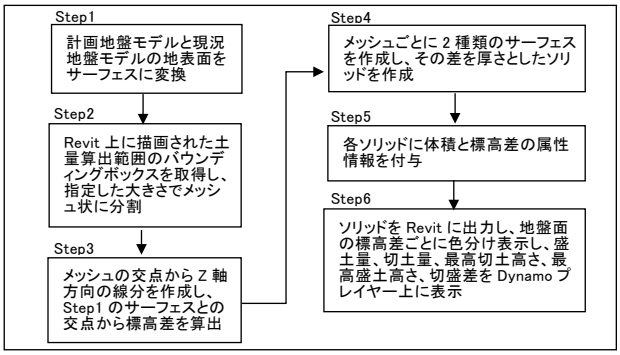

図 7　土量算出機能の処理の流れ

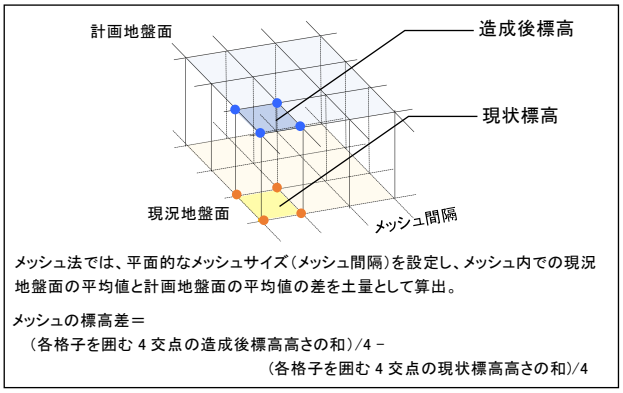

図 8　メッシュ法による土量計算

なお、設計の初期段階における検証を対象とするため、土量のあたりをつけることを想定する。したがって、ここでの土量計算は切土と盛土の体積の差、言わば切盛差を評価の対象とし、土のほぐし率や締固め率などの詳細な数値は考慮しないものとした。

5. 開発プログラムによる配置案の再現性の確認

背景で記した3つの問題に対する解決の可能性を検証するためには、開発プログラムの評価が必要である。本研究ではこの評価の前段階として、開発プログラムを用いて実際のプロジェクトの配置案の再現がどの程度可能かを確認した。また、開発プログラムを実行し、計画地盤の再現が可能かを確認した。検証の結果、建物エリア、平地エリア、既存存続エリア、直線状の敷地内通路はケーススタディの配置案通りに再現できた（図9）。一方、曲線の輪郭線をもつエリアや曲線状の敷地内通路、平地エリアの勾配が再現できなかった。

次に、開発プログラムにて自動で作成された計画地盤モデルと、計画高が記載された配置計画図面に基づき手動で作成した計画地盤モデルを重ね合わせて比較することで、精度検証を行った。目視による検証の結果、概ねケーススタディ案と同形で再現できたことを確認した。

表 2　建築概要

敷地面積	約 11,000 m^2
建築面積	2,823 m^2
延床面積	7,260 m^2
階数	3 階
設計 GL からの最高高さ	20,800mm

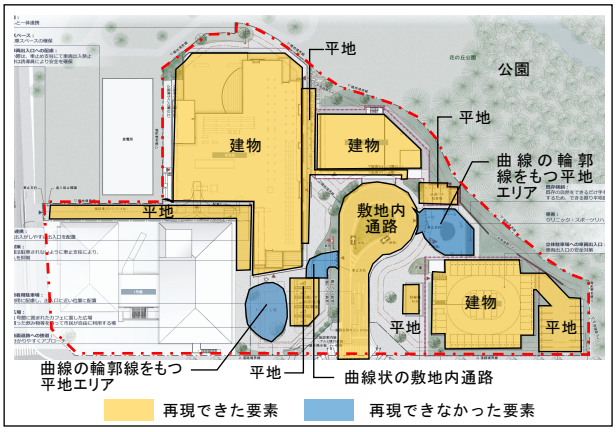

図 9 実在の施設配置計画の再現結果

開発プログラムの実行時間については、本ケーススタディの場合、配置した要素に基づきレベルや勾配の自動計算やそれに基づく計画地盤モデルの生成、建築ボリュームの生成に約 20 分要した[注7)]。また、土量自動算出機能の実行時間と算出結果については、メッシュ間隔の設定で異なる結果となった（表 3）。計算時間を短縮するためには、メッシュ間隔を大きくすることでプログラムの実行時間を削減できる。土量の精度の観点から、設計初期段階では 4000～5000mm 程度が適切なメッシュ間隔だと考えられる。

次に、開発プログラムの操作の不都合や手順に問題がないか確認するためにユーザビリティの評価を行った。評価実験の概要を表 4 に示す。評価実験の流れは次の通りである。初めに、評価の目的や検証手順について説明した。次に、基本機能を順に実行するチュートリアルに基づき、開発プログラムを試用した。最後に、「操作のしやすさ」、「配置計画を行う上で開発プログラムの効果」の二つを問うヒアリングを実施した。ヒアリングの結果、開発プログラムの操作に関して大きな混乱や問題は生じなかった。開発プログラムの効果に関して、「設計初期段階で現況地盤面を踏まえた計画レベルの傾向を掴むことができる」、「設計初期段階で BIM を用いる中で地盤面が意識できるようになった」という意見が得られた。また、「配置計画に追従する地盤モデルが自動的に作成できるのは楽である」という意見から、開発プログラムにより計画地盤の具体的な形状や特徴を配置計画作業の中で確認できたと考えられる。さらに、「切土、盛土が算出されることは、設計初期段階において配置計画の検討に有効である」、「これまで意識してこなかった土量を設計者が意識するようになる」という意見が得られた。ヒアリングの中で追加機能の要望として、複数の配置計画案に対して比較検討を行える機能や、ドローンを用いない場合の開発プログラムの利用方法の検討、法的な基準を満たさない勾配をもつ敷地内通路の警告機能等が挙げられた。

表 3 メッシュ間隔と土量算出結果

メッシュ間隔(mm)	2000	3000	4000	5000
実行時間	90 分	40 分	30 分	20 分
盛土量(㎥)	1017	802(差異 21%)	846(差異 17%)	731(差異 28%)
切土量(㎥)	7421	7559(差異 2%)	7163(差異 3%)	7352(差異 1%)
切盛差(㎥)	-6403	-6757(差異 5%)	-6317(差異 1%)	6621(差異 3%)

※表中の差異は 2000mm 間隔を基準とする

表 4 評価実験の概要

実施日	2023 年 1 月 12 日(木曜日)
実施時間	90 分
評価実験方法	オンラインによる遠隔での実験(Microsoft 社の Teams を活用)
被験者	BIM の操作に長けた組織設計事務所の意匠設計者 3 名

6. まとめ

本研究では、BIM で稼働する配置計画支援プログラムを開発した。それにより、建物や外構の平地、敷地内通路といった配置計画のごく限定的な要素が対象ではあるが、開発プログラムを用いた配置計画案の再現とそれに基づく計画地盤モデルの作成が可能であることが明らかとなった。また、建物ボリュームと各階フロアを自動生成し、加えて土量を算出することで、配置検討時の検証に寄与する情報を設計者に提供することを可能とした。

課題として、自動作成された計画地盤モデルの精度の検証は目視であったことから、ケーススタディ案との定量的な比較が必要である。また、開発プログラムで再現できなかった曲線の外形線をもつ配置構成要素への対応や外構の平地に水勾配を設定する機能の追加といったプログラムの改良が必要である。さらに、検証結果から、開発プログラムの実行は時間を要し、試行錯誤を妨げることが確認された。解決策として、開発プログラムの一部を pythonによるコーディングに変更し高速化行うことが考えられる。

展望として、例えば屋外の動線長さや位置、敷地ゾーニング、眺望や景観、より実務的な土量計算など、多角的な観点からの配置計画案の評価軸の追加が考えられる。また未検証であるが、実際の設計プロジェクトでの開発プログラム利用により、敷地高低差に着目した配置計画の支援が可能か検証が必要である。

[注釈]

注1) 国土地理院が提供する標高モデルは、最も詳細なものでも5m間隔かつ標高±300mmの精度[2]しかない。

注2) Structure from Motionの略であり、複数の写真から3次元の物体の形状や位置を計測・復元するための技術

注3) 国土交通省による『測量法第34条で定める作業規定の準則』[3]では、三次元点群の位置精度に関する規定について、起工測量の場合、許容誤差±100mmが求められており、本研究で必要な精度の参考とした。また、本研究と同機種のRTK搭載ドローンを用いた点群精度検証に関する取り組み[4]では、鉛直誤差が100mm以内であることが確認されている。

注4) 本研究ではDJI社Mavic3 EnterpriseにRTKモジュールを搭載したものを用いた。

注5) Dynamo内で作成したジオメトリをRevitにモデルデータとして直接インポートすることができる機能である。なお、インポートしたモデルはRevit内で編集できない

注6) 一般的に土量計算は平均断面法やメッシュ法が用いられるが、メッシュ法は微細な地形状況においてもより高精度な土量計算が可能な計算方法である。

注7) 検証に用いたPCは以下の通り。マウスコンピューター、G-TuneH5 H5-CMLR、OS:Windows10Pro、CPU:Intel®Core™i7-10875H 2.30GHz、RAM:64GB、GPU:NVIDIA GeForce RTX2070 super、モニタ:15.6インチ フルHD

[参考文献]

1) 前田隆成、大西康伸、「応急仮設住宅団地を対象としたドローンを活用した敷地の自動モデリングに関する研究」、日本建築学会第 45 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集（DVD）、pp.252-255、2022 年、東京

2) 国土地理院、「基盤地図情報数値標高モデルについて」http://fgd.gsi.go.jp/download/ref_dem.html（2023 年 9 月 20 日アクセス）

3) 国土地理院、「測量法第 34 条で定める作業規定の準則」https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html(2023 年 9 月 20 日アクセス)

4) KUU-SATSU.COM『Mavic3 Enterprise の UAV 測量精度検証』https://kuu-satsu.com/mavic3e-survey-verification/（2023 年 9 月 20 日アクセス）

5) 山村浩一、佐々木高使、藤原聖子、鈴木浩行、「３次元データを用いた景観シミュレーションの応用に関する研究」、土木学会第 71 回年次学術講演会、pp.105-106、2016 年、仙台

6) 市川健、斎藤正徳、那須野新、天谷香織、佐藤慶治、 楢舘晋、山田和宏、佐々木史恵、池内幸司、「植生が繁茂した中小河川における UAV 写真測量を用いた河道形状把握手法の開発」、河川技術論文集、第 26 巻、pp.119-124、2020 年

7) 清水裕太、松森堅治、「SfM 多視点ステレオ写真測量による過去の空中写真からの三次元地形モデルの構築」、新近畿中国四国農業研究、3 巻、pp.1-7、2020 年