

デジタルツインの実際化に向けた BIM/CIM データ整備に関する研究

助成研究期間：2022年10月1日～2024年9月30日

秀島 栄三¹・日高 菜緒²

¹名古屋工業大学・教授

²名古屋工業大学・助教

BIM/CIM もデジタルツインも概念が構築されて間もない、適用が始まったばかりの技術である。この段階でどのような可能性が見込まれるかを掘り下げることが今後の進展に有意義と考え、BIM/CIM とデジタルツインの現状と論点を整理、3次元モデルを制作した上で多様な関係主体がどのように捉えているかを調べ、これらの技術を複数の主体で共同して利用することで生じる負担配分問題を考察した。以上より BIM/CIM とデジタルツインに係る 3次元モデル、それらを適用する業務プロセス、負担配分のあり方について維持管理に至るまでの展望をもって考慮すべきであることを結論としてまとめた。

1. はじめに

公共事業の生産性向上に向けて BIM/CIM に期待が寄せられ、2018 年に国土交通省は 2023 年までに BIM/CIM の原則適用を図ることとした¹⁾。2024 年度時点で原則適用となっているが、自治体が発注する土木事業などでの導入には未だ高いハードルがあると言わざるをえない。

ハードルを克服するために色々な取り組みがなされ、より有効な活用方法も模索されている。その一つとしてデジタルツインが期待されている。デジタルツインは現実空間を仮想空間上に再現し、現実空間と仮想空間の情報交換をリアルタイムで行うことによって様々な分析、シミュレーションを精密に行う技術である。仮想空間で構造物の状態を把握することで、維持管理の作業を少ない労力で正確かつ迅速に実施できると期待されている。これに BIM/CIM のデータを用いることが可能である。

BIM/CIM もデジタルツインも概念が構築されて間もない、適用が始まったばかりの技術である。この段階でどのような可能性が見込まれるかを掘

り下げることが今後の進展に有意義と考えた。そこで本研究では、デジタルツインの実際化に向けて BIM/CIM をどのように適用していくべきかを様々な角度から捉えることを目的としていくつかの研究を行った。2. では現状と論点を整理し、3. ではデジタルツインに関係すると想定される主体の関わり方について議論をもとに考察し、4. では 3次元モデルの制作を通じて考察し、5. ではデジタルツイン導入による業務プロセスの変化の可能性を探り、6. では共同して利用することで生じる負担配分問題を取り上げ、最後に 7. でこれら別個に進めた研究を総括し、今後に対する提言をまとめる。

2. 現状と論点の整理

(1) BIM/CIM の現状と課題

BIM/CIM は部材の属性情報等も含めた多元的データを建設プロダクトサイクルを通じて再利用する仕組みである。1. で述べたようになかなか普及しない。大規模事業を受注する建設コンサルタ

ント会社、建設会社であればDX（デジタルトランスフォーメーション）を推進する組織をつくるなどして既に BIM/CIM を導入している一方で、中小の建設会社では全くその兆しは見えない²⁾。秀島は「BIM/CIM をあたりまえにするために」をまとめ、BIM/CIM に係る技術研修などに活用してきた³⁾。その中で以下 4 点のハードルがあることを指摘している。1) ハード・ソフトの充足、2) 契約方式等の改訂、標準化(互換性の議論を含む)、3) (過渡期に限るが) 設計図面(2次元)からの3次元化、4) 新たな技術群の習得である。

(2) デジタルツインの現状と課題

近年、我が国ではインフラの老朽化が問題となっており、点検及び補修箇所の増大や維持管理の作業員の人手不足からインフラの機能や安全性の低下が懸念されている。このような現状で注目されている技術としてデジタルツインがある。デジタルツインは現実空間を仮想空間上に再現し、現実空間と仮想空間の情報交換をリアルタイムで行うことによって様々な分析、シミュレーションを精密に行う技術である。仮想空間で構造物の状態を把握することで維持管理の作業を少ない労力で正確かつ迅速に実施できると期待されている。

デジタルツインは開発されたばかりで未だその技術の理解が進んでおらず、デジタルツインの導入事例は少ない。

(3) BIM/CIM とデジタルツインへの期待と論点

デジタルツインに期待が寄せられる一方で具体的に何をすればいいか、どれだけ有効かが明らかでない。BIM/CIM は単なる 3 次元 CAD ではなく多元的なデータを建設プロダクトサイクルを通じて再利用する仕組みであることが認識されていない。今後コンパクトシティ化、公共施設統廃合などにおいてデジタルツインと BIM/CIM を活用した分析、意思決定を行うことが期待される。

上記の目的に対応して本研究では以下 4 つに取り組むこととした。

- 1) デジタルツインとBIM/CIMの可能性に関する考察
- 2) 人間中心設計に基づくBIM/CIMデータの活用方法に関する考察
- 3) 特定地域を対象としたデジタルツイン適用のケーススタディ
- 4) BIM/CIMならびにデジタルツインに係る取り組みの提案

なお、結果として2)の検証は3)のケーススタディを前提としていたが3)の特定地域を公表できないため2)は本稿に示されない。また上述の論点をもとに新たな課題に対応して研究を進めたため、本稿は上記1)～4)とは異なる構成となっていることを予め断っておく。

上記1)デジタルツインとBIM/CIMの可能性に関して討議を繰り返し行った。手始めとして2023年3月10日に「土木構造物維持管理におけるデジタルツインの可能性」と題する公開研究会を主催し、建設コンサルタント、道路管理者、研究者5名で議論した。(図-1)現時点では、計画段階で制作する土木構造物の3次元モデルを施工段階、ましてや維持管理段階で使える可能性は極めて低いことを実感した。ネックとなるのは詳細度、精度、使用するアプリケーション、求められる属性情報の違いである。計画段階よりも設計段階で、設計段階よりも施工段階の方で高い詳細度を求められる一方、時間的に前となる段階で高い詳細度のモデルを制作するインセンティブが見当たらない。本研究では根源的な問題となると捉え、以下ではこれをいくつかの論点に分解して研究を進めた。

- ・関係しうる主体はどのように捉えているか
 - ・業務プロセスを効率化できるか
 - ・デジタルツイン適用を想定した3次元モデルを制作することで何か明らかにできるか
 - ・各主体は何をどれだけ負担すればよいか
- 以下の各章ではそれぞれの論点を取り上げ、考察していく。



図-1 公開研究会で用いたスライドより

3. 諸主体の関わりに関する考察

2023 年 11 月 25 日，第 68 回土木計画学研究発表会においてスペシャルセッション「3 次元都市空間モデルの可能性」⁴⁾を開催し，色々な形で 3 次元都市空間モデルを扱ってきたメンバーと討議し，土木計画，都市計画の分野における可能性を探ることとした。

登壇者の所属，発表内容は以下の通りである。

- ・小出和政，国際航業(株)，3D 都市モデルの活用一事例と方策，課題
- ・磯野 昂士，(一財)計量計画研究所，3D 都市モデルとシミュレーションの活用方法，交通施策
- ・湯浅知英，(株)大林組，建設プロダクトサイクルと 3D モデルの展開，実現化に向けた人材，維持コスト，効果測定上の課題
- ・日高菜緒，名古屋工大，BIM/CIM を活用したデジタルツインの実現に向けた課題とガイドライン
- ・秀島栄三，名古屋工大，人材育成/コーディネーション

各位の発表の後に行ったパネルディスカッションにおける議論の要点は以下の通りである。

- ・PLATEAU の活用が始まっているが，補助制度などで制約も見受けられる。
- ・求める詳細度が建築物，土木構造物で一致しない。
- ・合わせて使いたいデータの公開や使用の許諾に制約がある。
- ・3 次元モデルはコストがかかり，行政などで使われにくい。

- ・3 次元の重要性は必ずしも理解されていない。
- ・分かりやすさと誤解を生まない可視化を両立するべき。
- ・2D データも活用したい。高さ情報は不明。
- ・他社とも共有する基盤がほしい。
- ・データの蓄積が求められる。
- ・誰が共通基盤を制作，管理するか不明。
- ・CIM モデルの詳細度，周辺環境のモデルの有無，属性情報にばらつきがある。
- ・設計・施工・維持管理で求められるモデルが異なる。
- ・費用に見合う便益があるかをはっきりさせたいと考えられている。
- ・電子データのメリットを具体的にすべき。
- ・自治体，B・C ランクの建設会社で遅れがある。

4. 3 次元モデル制作にもとづく考察

(1) 制作の諸前提

3 次元可視化技術とコンピュータの能力の向上に伴い，仮想都市を想定し，都市計画，公共施設マネジメント等への活用が期待される「デジタルツイン」が現実味を増してきた。国土交通省が無償で公開する 3 次元都市モデル「PLATEAU」⁵⁾により一般利用の敷居も下がるであろう。しかしながら PLATEAU を補完するデータの大幅な欠如と利用目的の不明確さにより今すぐ浸透するとは考えられない。

一方で，一部の公共事業で BIM/CIM データの適用が始まっている。BIM/CIM は設計・施工・維持管理，言わば土木構造物のすべてのライフサイクルにおいて，属性情報を有する 3D モデルに情報を集約・連携させることで，一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図ることを目的としている。現状，BIM/CIM は主に新設プロジェクトにおいて，施工時の機材の位置関係や完成時の景観が視覚的に分かりやすいことから建設計画時の合意形成として用途が評価されている。

が、本来の目的である 3D モデルの属性情報の活用や他の電子データの連携により、一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図る段階には至っていないのが実情である。

そこで PLATEAU と BIM/CIM データを活用したデジタルツインの実際化を目的に、既に PLATEAU が公表されている都市の一部地域を選定し、デジタルツインの実際化で何ができるかを明らかにする。

PLATEAU は国土交通省が主導となり 2020 年から開始され、現在は 1 都 1 道 2 府 29 県の 100 都市もののデータが公開されている。データは形状や属性情報を格納できる CityGML 形式で定義され、BIM/CIM の標準フォーマットである IFC 形式、GIS で用いる FGDB 形式、3D モデリングで用いる OBJ 形式など、様々なデータ形式に変換可能である。PLATEAU の活用事例としては、災害時の避難経路の選定、建物の浸水被害予測、自動運転のシミュレーションなどがある。

PLATEAU の建築物や道路、地形モデルは、Level of Detail (LOD) と呼ばれる詳細度が一律でない。PLATEAU では独自の LOD を設定しており、建築物や道路、地形など種別によって LOD の定義は異なる。建築物の LOD は 4 段階あり、LOD1 では底面を高さ分鉛直方向に押し出した形状で、LOD2 で屋根形状が適用され、LOD3 では更に窓やドアが追加され、LOD4 では建物内部もモデル化される。道路の LOD は LOD0～3 の 4 段階あり、更に LOD3 は LOD3.0～3.4 と 5 種類に細分される。LOD0 は高さを持たない線で、LOD1 は高さを持たない面として道路を表し、LOD2 では車道、車道交差部、歩道、分離帯が区分された面として表す。LOD0～2 は高さを持たないため、実際は立体的に交差している道路が統合される特徴がある。LOD3 では高さ情報を有し、かつ細かく区分されたモデルになる。要公開されているデータの大半の詳細度は LOD1 である。

デジタルツインの実際化について検討するにあたって LOD1 のデータが大半を占める都市をケー

ススタディに設定することで、より実用的な課題を発見できる見込みがある。そのため、建築物のみ LOD2 で、大半の建築物とすべての道路が LOD1 である地区を対象として選定する。なお本稿では地域を公表できないため、制作した 3 次元モデル等の図を割愛する。

(2) 公共施設マネジメントにおける BIM/CIM

国土交通省の令和 5 年度以降の BIM/CIM 原則適用によると、3 次元モデルの活用は土木設計業務共通仕様書に基づき実施する設計及び計画業務や土木工事共通仕様書に基づく土木工事、これらに関連する測量業務および地質・土質調査業務に適用され、このうち詳細設計については義務項目に設定されており、合意形成のための出来上がり全体イメージや 2 次元図面の補助を目的にした特定部の確認、施工計画の検討補助が活用目的として提示されている。また、3 次元モデルの詳細度の目安は 200（構造形式がわかるモデル）～300（主構造の形状が正確なモデル）程度で、属性情報はオブジェクト分類名のみ入力し、その他は任意としている。推奨項目では、官民境界や用地取得状況、建築限界や地質などを重ね合わせることで、位置関係のずれや干渉がないかを確認したり、概算数量を算出したりがある。重ね合わせによる検討は視覚的に干渉が把握しやすいが、干渉の有無や程度は技術者の判断に委ねられており、定量的な判断はされていない。また、概算数量計算は従来の 2 次元図面を基にした数量計算ルールと 3 次元モデルでの数量計算方法に乖離があるという課題がある。また、現状は設計時の実用事例が多く、施工や維持管理での数量計算や検討では設計時と異なるルールを適用していることから、設計時に作成した 3 次元モデルが流用できず、作り直しや加工を要する問題がある。以上を踏まえ、詳細度 200～300 の BIM/CIM モデルを作成する。

PLATEAU のデータは、建築物、道路、地形のモデルを使用する。実際は複数の高架橋が空間的に交差し、かつ下道がある構造をしているが、

PLATEAU モデル上ではすべての道路が統合された平面として表されている。

PLATEAU の建築物、道路、地形のモデルと、新洲崎 JCT の高架橋の BIM/CIM モデルは、Unreal Engine で統合する。PLATEAU のモデルはオープンソースキットの PLATEAU SDK for Unreal を用いて読み込む。読み込まれたモデルは形状情報のほかに、建築物であれば階数や高さ、道路であれば路線名など、属性情報も有している。

一方で、BIM/CIM モデルは Autodesk Civil 3D を用いて手作業で作成した。属性情報を定義するために、路線名、上部工、下部工・基礎工が階層構造になるようにデータやレイヤを分離した。Civil 3D で作成したそれぞれのモデルを Autodesk Navisworks で統合し、Excel シートで各部材に属性情報を与えた。最後に、統合モデルを Unreal Engine で読み込めるデータ形式である Datasmith 形式に変換する。BIM/CIM モデルも PLATEAU モデルと同様に、Unreal Engine で属性情報が定義されている。

(3) PLATEAU と BIM/CIM モデルを活用した公共施設マネジメントの検討

PLATEAU と CIM モデルの統合モデルに対して、モデルが有する位置情報、形状特徴、属性情報を用いた公共施設マネジメントの可能性について検討する。統合プラットフォームに使用した Unreal Engine はゲームエンジンなので、3D モデルの統合や可視化以外に属性情報の判定や簡単な衝突判定、数値計算が可能である。

従来の騒音対策範囲の検討は施工箇所を基点に平面的に分布した影響範囲を作図するため、高さ情報が複雑に入り組む構造物の場合、本来対策範囲外にある建築物が該当する可能性がある。3D モデルを用いることで、より厳密な対策範囲を検討することが出来ることが分かった。

撤去工事費の概算については、前述した Excel シートを用いた属性情報の定義時に数量を設定し、Unreal Engine で指定の構造物の数量を取得して単価をかけたものを画面表示させることで実装した。

3 次元モデルは干渉箇所など修正箇所を発見しやすい利点があることからそこから即座に撤去工費などの判断指標が概算できればスムーズな合意形成や検討につなげられる見込みがある。

以上より、PLATEAU や BIM/CIM モデルを活用した公共施設マネジメントの可能性として空間的な検討ができる点、属性情報を紐づけられることから視覚的に要検討箇所を即座に特定してかつ即座に簡易計算・検討が行えることが考えられる。

(4) PLATEAU と BIM/CIM モデルを活用した公共施設マネジメントの課題

BIM/CIM モデルの作成時や PLATEAU モデルと統合後の機能の実装時に生じた問題点に基づき、PLATEAU と BIM/CIM モデルを活用した公共施設マネジメントの課題を述べる。

1 点目に、モデル作成・データ処理のコストの大きさがある。3 次元モデルの作成は 2 次元図面よりも微修正の手間を要し、また 2 次元図面であれば省略表現が可能であった箇所も正確にモデル化を要することから、2 次元図面よりも作成に時間を要する。また、設計要領、数量算出要領に応じた 3 次元モデルの作成や属性情報を用いた計算などは、技術者がその機能を会得するまでのコストが大きい問題がある。更に、現在、設計・施工・維持管理における数量算出方法や部材の分類方法がそれぞれ異なることから、設計から施工、施工から維持管理に移行する際に現在の 3 次元モデルが転用できず、修正や作り直しを要する件も問題として挙げられる。

2 点目にモデルの詳細度がある。現在、PLATEAU モデルの大半は LOD1 であることから、PLATEAU モデルと実際の形状との乖離により不適切な検討につながる可能性がある。また、高架橋の下道の道路については高さ情報を有していないため建築限界の照査を行うには不十分である。更に BIM/CIM モデルに関しても、特に重視される箇所の詳細度を高くする傾向があったため、各プロジェクトでの検討内容にモデルの詳細度が依

存することになる。この現状を受け、公共施設マネジメントでの検討内容とモデルの詳細度、モデルの作成・修正コストとのバランスを検討し、詳細度を高めるべきモデルを適切に設定することが求められる。

3 点目に属性情報の適用方法がある。BIM/CIMモデルに計算書の数量や材料情報などを再度手入力することは手間を要するため、ID づけなど属性情報の一元化が求められる。

PLATEAUやBIM/CIMモデルを活用した公共施設マネジメントの可能性として空間的な検討ができる点、属性情報を紐づけられることから視覚的に要検討箇所を即座に特定してかつ即座に簡易計算・検討が行えることが挙げられる。一方で、PLATEAUやBIM/CIMモデルを活用した公共施設マネジメントを実現するにあたり、PLATEAUの詳細度向上の是非の検討や、設計・施工・維持管理の各プロジェクトに特化した現状のBIM/CIMモデルの要件の見直し、3次元モデルと計算書での属性情報の一元管理が課題として挙げられる。

5. デジタルツイン導入による業務プロセスの変化⁶⁾

デジタルツインとそれに要する技術に対して理解が進んでおらず、インフラの維持管理へのデジタルツインの導入事例は少ない。導入した場合の業務プロセスを想定した上で活用方法とそれによって生じる業務上の変化とそのメリット、デメリットを示すことが重要と考えた。そこで維持管理業務の手順や工程を表すフローをUML(Universal Modeling Language)を用いて表現し、その上でデジタルツインを導入した場合の定性的な変化を分析することで現行の維持管理のフローと作成したデジタルツイン導入を想定したフローの比較と評価からデジタルツインが維持管理の作業に与える効果を明らかにする。

実際の道路橋を対象にして道路法で定められて

いる5年に1度実施する定期点検を対象に作業の手順や工程を表す作業フローを作成する。

デジタルツインのモデルとシミュレーションで道路橋の部材の材質や劣化状態等の属性情報、交通量等の周辺環境の情報を概ね把握できる。しかし、打音検査のように現場で行う作業もあるため、デジタルツイン導入によって点検が不要になることはない。補修工事で当初の予定と現場の状況が異なり補修方法や材料の変更のための打合せのやり直しが必要になるが、打合せ時にデジタルツインで整理された情報やシミュレーション結果を確認できるため予期せぬ作業の変更は減ると考えられる。他にもデジタルツイン導入によって変更される作業を分析し、現行の作業フローとデジタルツイン導入を想定した作業フローを作成した。図-2に現行の作業フローとデジタルツインの作業フローとで変化した部分3つを対比する。

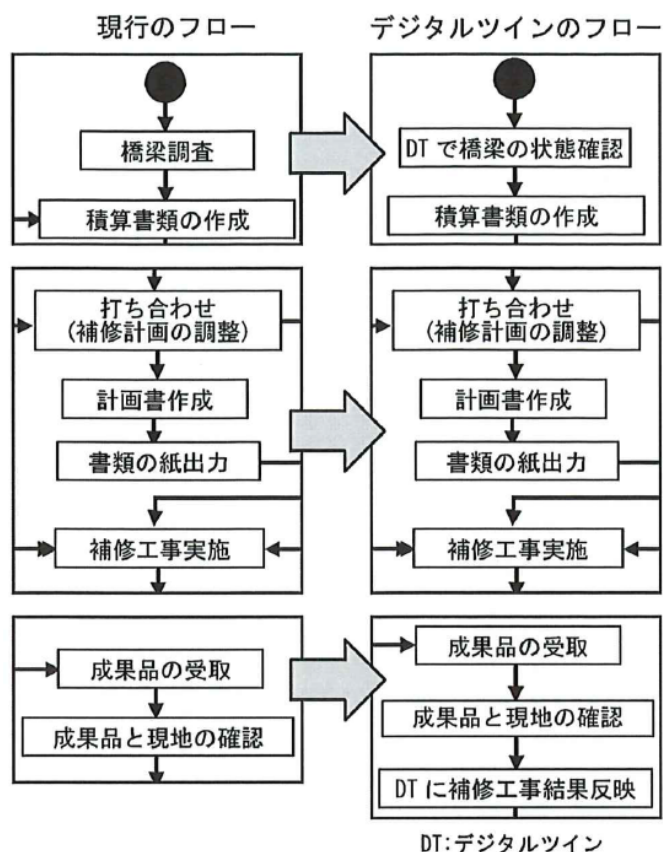


図-2 現行のフローとデジタルツインのフローの抜粋

橋梁の調査がデスクで行えることで現地調査の必要が無くなり、労力の減少が考えられる。打ち

合わせのやり直し等の手戻りが減り、現場作業の間延び等がなくなる。作業の変更には効率を高めるものばかりではなく、デジタルツインの情報の更新等の作業が増える面もある。

デジタルツインのモデルと作業フローについて関係者にヒアリングを行ったところ以下の意見が挙がった。デジタルツインのモデルとシミュレーションにより、複数の道路橋の予測した健全性を比較することで、機能に支障が生じる可能性の高い道路橋から適切な順番で点検、補修計画を立てられる。デジタルツインの効果が現れるのは、現行から作業が変更された箇所のみでなく、橋梁の情報を的確に把握できることで点検や補修の計画書がより正確に作成できることなどで結果的に作業の精度が向上する。作業フローで定期点検の橋梁の点検から記録までの維持管理の業務の流れを示したが、自治体の管理する橋梁の補修の優先順位の決定や撤去の判断など、点検以前の業務にもデジタルツインのシミュレーションを参考すれば、より適切な維持管理計画を策定できるだろう。

分析より、デジタルツイン導入が維持管理の作業に与える効果について考察した。

- ・現場作業のコストの減少：デジタルツインによって現実空間の情報を正確に把握することができるため、現地に赴かずデスク上で容易に構造物の状態を確認でき、打ち合わせで適切な点検、補修計画が立てられる。これにより現場に向かう移動時間や現場での労力、人件費が減少し、予期せぬ事態で費用が膨れ上がることも少なくなる。

- ・作業の効率、精度の向上：現実空間で視認しにくい場所でもデジタルツインで状況を正確に確認でき、現実で橋梁を見ただけではわからない部材の健全性や補修履歴等を同時に把握可能である。これにより点検や補修に必要な情報の見落としが減り、状況確認が容易に行えることで作業を迅速に完了することができる。また、デジタルツインのシミュレーションで対象の構造物に何が起こりうるかを把握できる。これにより目星をつけて効率良く現場作業を行える。

意思決定の補助：デジタルツインで確認できる構造物や周辺環境の情報と仮想空間上で状況を変えて何度も試行できるシミュレーションを参考にし、維持管理計画の策定における補修、補強の優先度の高い構造物の選定やライフサイクルを考えて構造物の撤去、集約等の判断の難しい選択をより正確に行うことができる。

6. 関係主体間の負担配分問題⁷⁾

(1) 問題の諸前提

建設プロダクトサイクルの下流で利用する主体は上流で制作された3次元モデルを利用するにあたってフリーライドする可能性がある。建設プロダクトサイクルにわたって主体間の公平性ができるだけ保たれるべきであり、保たれることによってデジタルツインの導入が促進されるだろう。

そこでひとつの道路整備事業を想定し、デジタルツインを可能とする3次元モデルを導入した際にそれを利用することによって事業に関係する主体がどのような便益を得るかを整理し、各主体がどのように費用を分担しあうべきかを検討する。

ある道路整備事業においてデジタルツインを導入する状況を想定する。道路を新規に建設する局面では必ずしもデジタルツインを利用するとは限らない。これに対し、道路が供用され、維持管理を行う局面では、存在する道路に対して状態の変化を把握することが不可欠であり、デジタルツインを活用する意義が大いに認められる。また地域住民の声、道路利用者のニーズを聞き入れることは大事であり、このためにデジタルツインを利用することが考えられる。維持管理を行う主体は道路を建設しようとする主体と同一かもしれないが、異なる時点において異なる判断を行う可能性があることから別の主体として考慮すべきである。よって、ここには道路管理者(主体1)、地域(主体2)、維持管理者(主体3)の3つの主体がデジタルツインに関係するとみなす。

デジタルツインを利用することでそれぞれの主体にはどのような便益が生じるかを考察する。道路管理者にとっては3次元での設計が可能であること、必要材料の数量の自動算出が可能であることが挙げられる。地域にとっては3次元モデルによって完成後の構造物が可視化されることで事業の理解が容易化されること、景観の検討が可能であることが挙げられる。維持管理者にとっては修繕必要箇所の予測、それによる現場点検のコスト削減が可能であることが挙げられる。

ひとつの3次元モデルを各主体が共有するか、個別に用いるかで異なるシナリオが想定される。3主体の場合、表-1に示すように5つのシナリオが考えられる。シナリオごとに上述した便益の大きさが異なるであろう。例として、主体3のメリットをシナリオ5で整理したものを表-2に示す。分析においては、各主体のメリット1種類あたりの便益を1000万円とした。

表-1 3次元モデル導入時のシナリオ分類

シナリオ1	1, 2, 3が個別に用いる。
シナリオ2	1, 2が協力, 3が個別に用いる。
シナリオ3	1, 3が協力, 2が個別に用いる。
シナリオ4	2, 3が協力, 1が個別に用いる。
シナリオ5	1, 2, 3が協力して用いる。

表-2 3次元モデルが主体3にもたらす便益

	メリット	便益 (万円)
シ ナ リ オ 5	修繕箇所の予測	1000
	現場点検, 修繕活動のコスト削減	1000
	主体1との協力による, 施工段階 予想でされた修繕, 維持管理注意 箇所の把握	1000
	主体2からの道路利用時に発見し た修繕必要箇所の伝達による効率 的な維持管理	1000
	合計	4000

(2) 制作費用の合理的配分

事業に3次元モデルを導入する際、各主体がその費用をどのように分担するかが問題となり得る。参加の動機を持つ費用配分を検討する必要がある、これを費用配分問題として捉える。その解決方法としてゲーム理論に準拠した配分法が提案されている⁸⁾。ゲーム理論は、非協力ゲーム理論と協力ゲーム理論に分けられるが、想定する道路整備事業では、主体間で3次元モデルを協力して用いることを前提として費用の分担を検討することから協力ゲーム理論を用いる。

協力ゲーム理論では、まずいずれの主体（プレイヤー）も不公平を主張しない解の領域「コア」を明らかにする。しかしこれでは唯一の解に定まらない。そこで協力ゲーム理論における配分解「仁」「シャープレイ値」を求める。

n 人のプレイヤーが協力して便益を配分する一般的な状況を分析するため、特性関数形ゲームの定義を与える。 n 人のプレイヤーの集合を $N=\{1,2,\dots,n\}$ とする。ここで、 N の非空な部分集合を提携と呼ぶことにする。

a) コア

協力ゲーム理論による配分解としてコアがある。コアは、個人合理性と提携合理性を満たす部分であり、式(1), (2)を満たす部分である。

$$x_i \geq v(i) \quad (1)$$

$$\sum_{i \in S} x_i \geq v(S) \quad (2)$$

x_i : 全提携 N のプレイヤー $i(i \in N)$ の便益

$v(i)$: 単独行動時のプレイヤー i の便益

$v(S)$: 提携 S 内のプレイヤーが提携時の総便益

b) 仁

具体的な配分解が1つ必要な状況では、コアによる分析では不十分になる場合がある。そこで、配分解を1つに定める解として、仁がある。仁は、各提携が持つ不満のなかで、最大のものを最小化する配分解と定義される。不満は、式(3)のように表される。

$$e(S, x) = v(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad (3)$$

$e(S, x)$: 配分 x に関する提携 S の不満

x_i : 全提携 N のプレイヤー $i(i \in N)$ の便益

$v(S)$: 提携 S 内のプレイヤーが提携時の総便益

c) シャープレイ値

仁と同様に配分解を 1 つに定める解として、シャープレイ値がある。シャープレイ値は、提携に対するプレイヤーの貢献度に応じた配分解であり、限界貢献度の期待値で表される。限界貢献度は式(4)、シャープレイ値は式(5)のように表される。

$$M = v(S) - v(S - \{i\}) \quad (4)$$

$$\varphi_i = \sum_{s \subset N} \left\{ \frac{1}{n!} (s-1)! (n-s)! \right\} \cdot M \quad (5)$$

M : 提携 S に対するプレイヤー i の限界貢献度

$v(S)$: 提携 S 内のプレイヤーが提携時の総便益

s, n : 提携 S 内、全体のプレイヤーの数

φ_i : プレイヤー i のシャープレイ値

(3) 3次元モデル制作費用の合理的配分

事業の便益が最大となるシナリオ 5 の場合を考え、特性関数 $v(S)$ は、事業全体の便益から制作費用を引いたものとする。制作費用が 1000 万円から 20000 万円まで変化する場合、3次元モデルを協力して用いることにより得られる便益が 1 種類当たり 100 万円から 3000 万円まで変化する場合の合理的配分を検討する。

a) 制作費用が 1000 万円から 20000 万円まで変化する場合

仁では各主体の負担額、補助金の補助額は図-3 のようになる。制作費用が 2000 万円から 11000 万円までであれば合理的配分がなされる。しかし、制作費用が 2000 万円を下回る場合は主体 2 の費用が負となり、11000 万円を上回る場合は主体 3 の費用便益比が 1 を下回るため、合理的配分がなされない。それぞれ主体 2、3 の費用を補填する額の補助金により事業を成立させる必要がある。

シャープレイ値では図-4 のようになる。制作費用が 1500 万円から 12000 万円までであれば合理的配分がなされる。制作費用が 1500 万円を下回る

場合は主体 2 の費用が負となり、12000 万円を上回る場合は主体 3、さらに 19500 万円を上回る場合は主体 2 の費用便益比が 1 を下回るため合理的配分がなされない。主体 2 の費用が負となる場合は主体 1、3 から主体 2 の負の費用を支払い、費用便益比が 1 を下回る場合は主体 2、3 の費用を補填する補助金により事業を成立させる必要がある。

b) 3次元モデルを共有することによる便益が 1 種類当たり 100 万円から 3000 万円まで変化する場合

仁による配分を行った場合、各主体の負担額、補助金の補助額は図-5 のようになる。1 種類の便益が 100 万円から 2000 万円までであれば合理的配分がなされる。しかし便益が 2000 万円を上回る場合は主体 2 の費用が負となるため合理的配分がなされない。主体 2 の費用を補填する額の補助金により事業を成立させる必要がある。

シャープレイ値による配分を行った場合、各主体の負担額、補助金の補助額は図-6 のようになる。制作費用が 100 万円から 2666 万円までであれば合理的配分がなされる。便益が 2666 万円を上回る場合は主体 2 の費用が負となるため合理的配分がなされない。主体 1、3 から主体 2 への必要額の支払いにより事業を成立させる必要がある。

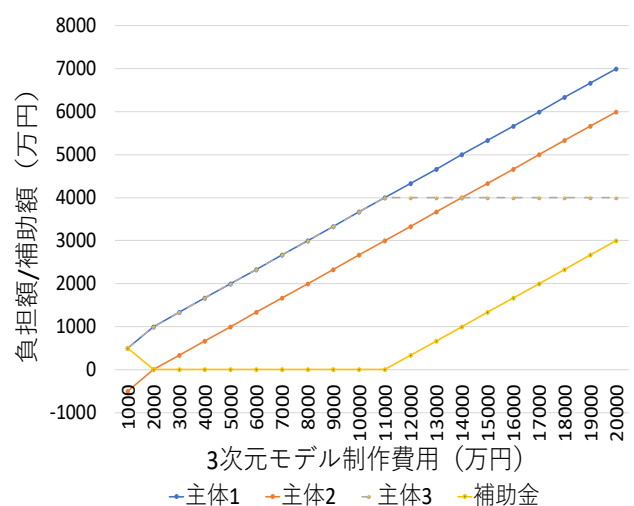


図-3 費用配分額 (仁による配分)

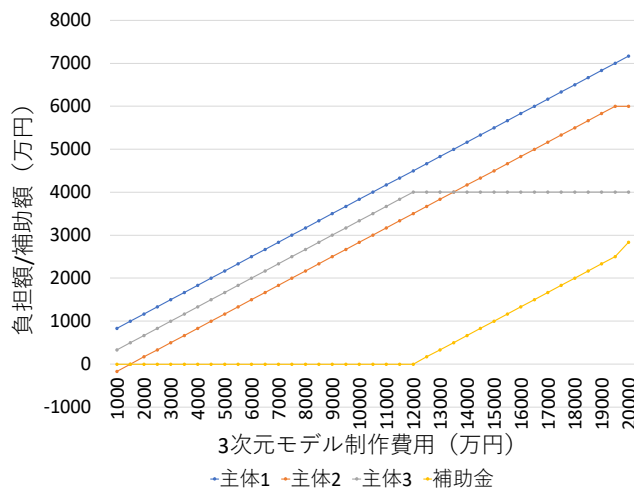


図-4 費用配分額
(シャープレイ値による配分)

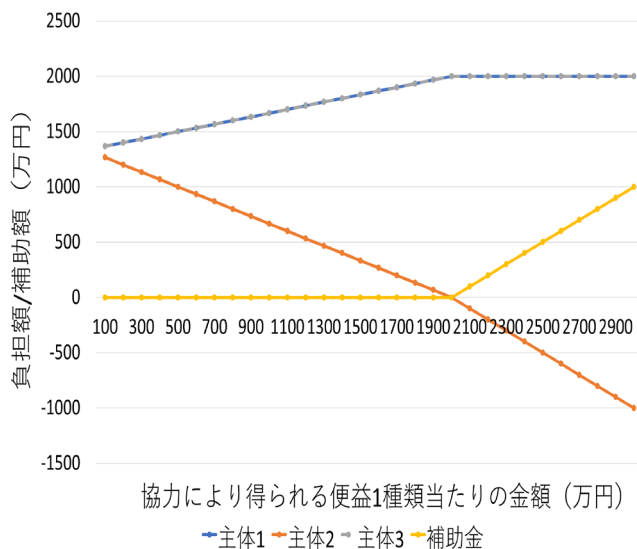


図-5 費用配分額 (仁による配分)

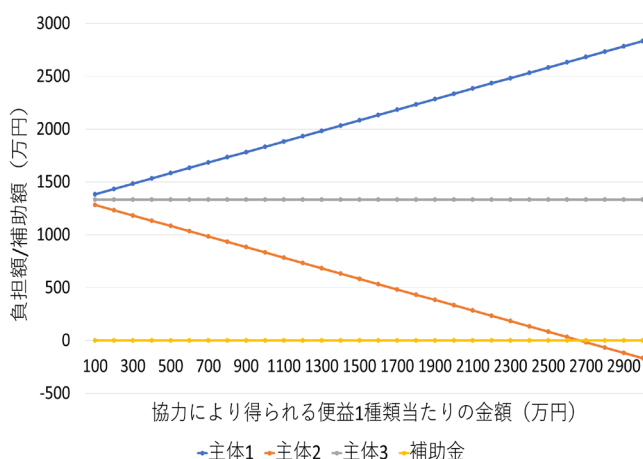


図-6 費用配分額
(シャープレイ値による配分)

以上、デジタルツインを可能とする3次元モデルが各主体にもたらす便益を踏まえた費用配分の計算から各主体の合理的費用配分が実現されることを確認した。しかし制作費用が小さすぎる場合、大きすぎる場合、3次元モデルを共同して用いることにより得られる便益が大きい場合には合理的費用配分が実現しなかった。また、仁、シャープレイ値による配分のどちらを選ぶかによって合理的費用配分が実現される制作費用の範囲、便益の範囲は異なる。

制作費用が小さすぎる場合、3次元モデルを協力して用いることにより得られる便益が大きい場合は、負担する費用が負となる主体が現れ、費用を支払うのではなく公平性を保つためにむしろ他の主体から金銭等を受け取るべきと言える。仁による配分の場合は、必ず補助金による負担の再配分を行う必要があるが、シャープレイ値による配分の場合は、主体間での必要額の受け渡しにより、合理的費用配分が実現される。

制作費用が大きすぎる場合は、主体にとっての費用便益比が1を下回る主体が現れるため、そのような主体に対し、補助を行う必要がある。仁、シャープレイ値による配分どちらの場合であっても必ず補助金による補助により合理的費用配分を実現する必要がある。

仁、シャープレイ値のどちらの配分を選択するかによって、補助金の要否に影響を及ぼすことが分かった。建設プロダクトサイクルの初期の段階においてその判断が求められる。

7. おわりに

本研究では、現時点におけるBIM/CIMとデジタルツインに関する課題を明らかにし、関係主体、モデル制作、業務プロセス、負担配分について考察した。

デジタルツインは既存空間との対比を行うものでもあり、建設プロダクトサイクルの中で計画、

設計よりも維持管理段階での活用が大いに有意義である。BIM/CIM の適用は計画、設計、施工で進んでいるが維持管理への適用を急ぐべきである。

発注者と受注者、建設プロダクトサイクルで登場する時点が異なる主体という多様な主体間で共有することとなる。6. で取り上げた負担の問題だけでなく権利、互換性、ユーザビリティなどの調整も重要である。

これらを進めることが“生産性向上”に大いに寄与するものとする。

謝辞：本研究を実施するにあたって資料を提供いただいた国土交通省中部地方整備局、研究をともに進めた名古屋工業大学 阿部福史氏(現愛知県)、南草伊吹氏に謝意を表する。そして2年間にわたり一般財団法人建設物価調査会より多大かつ寛容なるご支援を賜ったことに深く感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和5年度BIM/CIM原則適用について，
<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001510002.pdf>
(2024年2月28日閲覧)。
- 2) 三重県：三重県建設産業活性化プラン2024,<https://www.pref.mie.lg.jp/common/06/ci600015875.htm>(2024.9.30.閲覧)
- 3) 秀島栄三：一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成事業実績報告書,2022.
- 4) 秀島栄三：3次元都市空間モデルの可能性,第68回土木計画学研究発表会スペシャルセッション,土木学会,2023.
- 5) 国土交通省：PLATEAU，
<https://www.mlit.go.jp/plateau/> (2024年2月28日閲覧)。
- 6) 阿部 福史：デジタルツイン導入による維持管理業務プロセスの変化に関する考察,名古屋工業大学卒業論文,2022.
- 7) 南草伊吹,秀島栄三：デジタルツイン導入時の主体間の負担配分に関するゲーム論的考察,第6回 i-Construction の推進に関するシンポジウム,,2024.
- 8) 岡田憲夫：公共プロジェクトの費用配分法に関する研究：その系譜と展望，土木学会論文集，431号，pp.19-27，1991.