

教育機関とスモールファーム向け BIM プラットフォームのコストマネジメントシステムの概念設計と実装

助成研究期間：2021年10月1日～2023年12月31日

遠藤 和義¹・岩村 雅人¹・尾門 智志²

¹工学院大学建築学部・教授

²工学院大学建築学部・非常勤講師

研究要旨 本研究は、教育機関やスモールファームをターゲットに、BIM ソフトである Autodesk Revit とそれに連携する積算・工程管理ソフトである Vico Office 等を用い、インターネットを介して建設物価調査会提供のコスト情報等を参照、入力して、プロジェクトをモデリングする。さらに、それを主体間で「クラウド+BIM コラボレーション機能」で編集、連携させることによって、BIM プラットフォームによるコストマネジメントのプロセスを実体験させる。

1. 研究の背景と目的

BIM 元年と言われた 2009 年から 10 年以上経過したが、わが国における BIM (Building Information Modeling) の普及、取り組みの状況は諸外国に遅れをとり、その生産性向上等の導入効果が建築界全体に認識されているとは言い難い。そうした状況を踏まえ、2019 年には国土交通省が「建築 BIM 推進会議」を設置し、建物のライフサイクル全体に BIM を活用する提言も示された。また、普及に向けた制約の一つである生産システムの前線に位置する小規模設計事務所、中小建設業、専門工事業者等のスモールファームを対象とした「中小事業者 BIM 試行型」の提案募集も行われている。

こうした動向に対応して、大学等高等教育機関においても、BIM の本質を理解し、BIM をプラットフォームとした生産システム全体の協働をマネジメントする能力の開発、教育が求められる。しかし、予備的な調査によれば、この先端技術に対応した教育の定型は未整備で、本格的な技術習得の機会はこの分野で先端を走る企業への入社を起点とせざるを得ず、先行する企業とそうでない企業との格差が広がり、それが生産システム全体への普及の足かせになるという構造的問題を抱え

ている。

本研究では、建築学とくに助成申請者が専門とする積算、コストマネジメントの教育に対して、BIM の実践的プラットフォームを導入したコストマネジメント教育の標準的カリキュラムを確立し、BIM ソフトと積算・工程管理等の連携ソフトを用いてマネジメントプロセスの実体験を可能とする。さらにこの BIM 実践的プラットフォームは、大学教育での試行を経たのち、スモールファームや社会に向けて適宜公開する予定である。

2. BIM を用いた基本設計の初期段階における工期とコストマネジメント

(1) 本章の背景

現在、建築プロジェクトの複雑、高度化に対応して、クライアントは設計者に基本設計の初期段階から、その与条件を基にした確度の高い工事費の概算（以降、概算）と工期を求める。

基本設計の初期段階では、敷地条件、建物用途、グレード、床面積、階数、構造種別等の検討を行なう。概算と工期の検討に必要なパラメータは、建物のボリュームに加えて、各部位の仕様、数量が当然影響し、その精度には一定の限界がある。

概算、工期算出のために各部位について仮に設定するにしても、数量算出に必要な検討項目が多く、それに要する手間や時間を考慮すると、基本設計初期段階の検討フローに組み込む事は困難である。

こうした課題に対し、本研究の成果である既往研究¹⁾において、基本設計の初期段階から、各部位のモデリングを包含することが可能となる BIM を導入し、工期算出について建物の各部位に関する検討を導入する可能性や具体的な手法の研究に取り組んだ。

BIM におけるオブジェクトの考え方は、コストや生産プロセスの検討に馴染む建築構法、BE (Building Element) の分類に基づいており、各部位の数量を簡便に出力可能である。

本研究では、それによって得られた数量をプロジェクトマネジメントツールに連携する一連の手法を示した。

(2) 本章の目的

本章では、既往研究¹⁾の成果を拡張し、仮設計画を考慮したより確度の高い工程計画の手法と、数量と刊行物単価の紐づけにより、確度の高い概算手法を明らかにする。

具体的には BIM ソフトとして、Autodesk 社の Autodesk Revit2022 (以降 Revit とする) を用い、同ソフトに同包されたビジュアルプログラミングツール Dynamo を用いて、仮設足場と山留計画の自動化を図る。得られた数量を Revit と連携する Trimble 社の VICO office (以降 VICO とする) を用い、仮設工程の検討を行なう。

(3) BIM モデルの概要

a) 設計ステージ

本章では、既往研究¹⁾を継承し、基本設計の初期段階に相当する図-1 に示す BIM モデルを作成した。

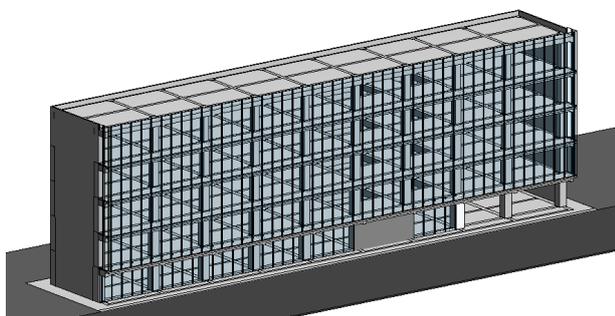


図-1 対象建物の BIM モデル

b) 対象建物の概要

本章に用いるサンプル建物は、実際の計画建物を基とした都心の狭小敷地における、地上 5 階建て、鉄筋コンクリート造のオフィスビルとした。建物の概要を表-1 に示す。

表-1 対象建物の概要

建築面積	460.00 m ²
延床面積	2300.00 m ²
構造	鉄筋コンクリート造
階数	地上 5 階
階高	3,500mm
用途	事務所

(4) 仮設足場概略の自動化

a) 実務家へのヒアリング

仮設足場工事における留意事項と概略の自動化フロー構築のため、実務家へのヒアリングを実施した。結果を以下に示す。

- ① 枠組み足場の製品規格が定められている
- ② 労働安全衛生法における基準に則して計画する
- ③ 仮設階段の配置にあたって、作業上支障のない位置に配置する
- ④ 足場は建物形状に沿うように配置し、施工上必要な建物とのクリアランスは一般的に 300mm 程度としている

b) ファミリの作成

仮設計画について、本章では枠組み足場について検討を行った。枠組み足場の構成部材を 3 つに分類し、ユニット化したものを、図-2 に示すファミリーとして作成した。

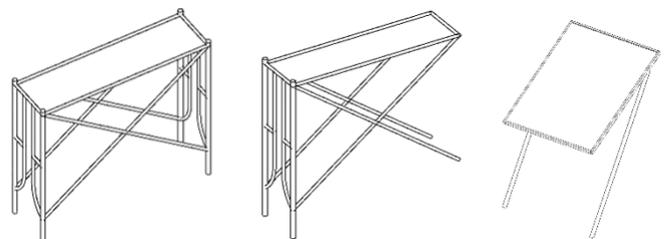


図-2 枠組み足場ファミリー

枠組み足場ファミリーは、建枠部材の重複を防ぐため、門型タイプと L 型タイプに分類した。枠組み足場ファミリーには図-3 に示すタイプパラメータを設定し、製品の規格サイズごとにタイプを分類した。

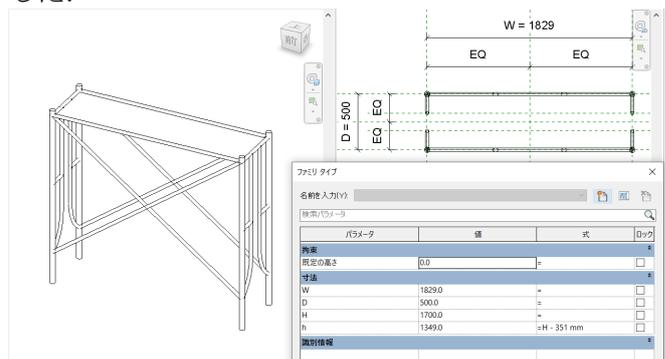


図-3 枠組み足場ファミリーのタイプパラメータ

c) Dynamo によるファミリの配置

Dynamo を用いて、枠組み足場ファミリを建物外形に沿うよう自動的に配置した。Dynamo の処理の概略手順は以下となる。

- ① 壁カテゴリのオブジェクトを指定
- ② 壁の中心線を読み込む
- ③ 壁の中心線をオフセットし施工上必要な建物とのクリアランスを確保したラインを生成
- ④ 製品サイズにより配置点を割付
- ⑤ ファミリを配置

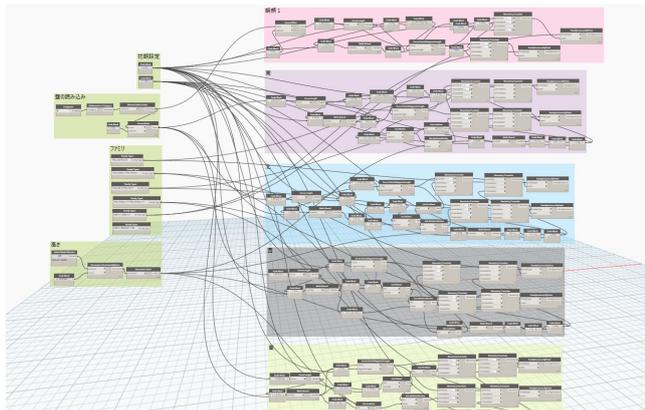


図-4 枠組み足場を自動的に配置する Dynamo

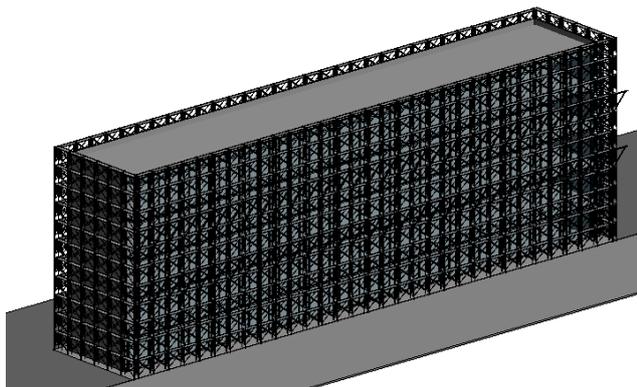


図-5 足場モデルを配置した結果

本章に用いたサンプル建物は、都心の狭小敷地であり、施工者への受け渡しの段階において、足場や搬入計画との擦り合わせに窮する事も起こり得る条件である。具体的な仮設計画が、基本計画段階から視覚化されることで、建築生産システムの一貫性を高めるものにもつながる。

d) 数量の算出

枠組み足場ファミリの数量算出を、Revit の初期機能である集計表により行った。数量はファミリ単位で集計し、ユニット部材数量を把握した。集計表の作成において抽出したパラメータは、初期値のファミリタイプ名と数量とし、枠組み足場ファミリに面積パラメータを付加した。これは、本章(6)にて概略工期を算出する際に用いる根拠数量となるため算出した。

<枠組み足場_集計表>		
A	B	C
枠組み足場タイプ	数量	面積(m ²)
朝顔	62	0.00 m ²
枠組み足場_L型	110	342.02 m ²
枠組み足場_工型	660	2052.14 m ²
枠組み足場_門型	22	68.40 m ²
枠組み足場_門型	22	68.40 m ²
	876	2530.97 m ²

図-6 枠組み足場ファミリの集計表

(5) 山留計画概略の自動化

a) ファミリの作成

本章では、親杭横矢板工法について検討を行った。サンプル建物は地階を有さず、掘削深さも比較的浅いため、山留は土留壁のみでの検討とした。

親杭横矢板工法を構成するファミリは、ワンスパンの親杭と横矢板をひとつのユニットとして扱い作成した。

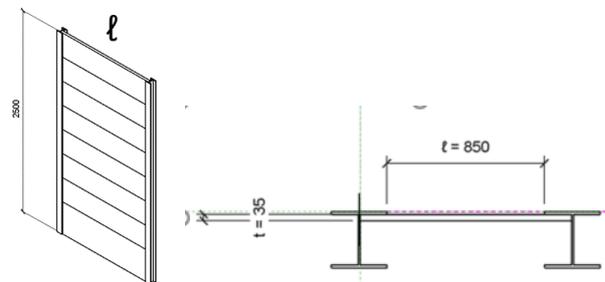


図-7 親杭横矢板ファミリ

b) 部材サイズの検討

横矢板の板厚について、板厚パラメータ及び検討に必要なパラメータを付加し、それらに計算式を設定し、検討を行った。

パラメータ	値	式	ロック
拘束			
マテリアルと仕上げ			
寸法			
H形鋼長さ	2000.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
横矢板スパン	840.0	=	<input type="checkbox"/>
板厚	40.0	=roundup((t / 1 mm) * 0.1) * 1 mm	<input type="checkbox"/>
t	34.3	=sqrt((6 * w * 横矢板スパン ^ 2) / 8)	<input type="checkbox"/>
l	1130.0	=横矢板スパン + 290 mm	<input type="checkbox"/>
f	13.5	=	<input type="checkbox"/>
w	0.0	=	<input type="checkbox"/>

図-8 親杭横矢板ファミリのパラメータ

従来は、計算を伴う検討と図面による検討は異なるツールを用いて行っていたが、Revit モデルに情報を集約し、管理することで、検討経過や検討根拠を一元管理することができる。

c) Dynamo によるファミリの配置

Dynamo を用いて、親杭横矢板ファミリを根切り面に沿うよう、自動的に配置した。Dynamo の処理の概略手順は以下となる。

- ① 根切り底面を指定

- ② 根切り外形形状を読み込む
- ③ 横矢板により配置点を割付
- ④ ファミリを配置

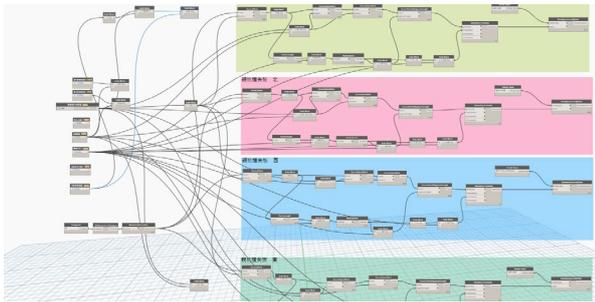


図-9 親杭横矢板を自動的に配置する Dynamo

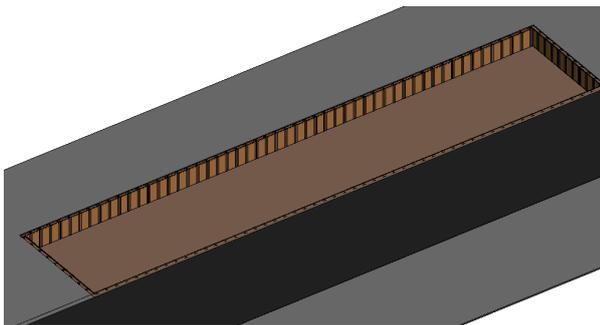


図-10 親杭横矢板ファミリを配置したモデル

d) 数量の算出

親杭横矢板ファミリの数量算出を、Revit の初期機能である集計表により行った。数量はファミリ単位で集計し、ユニット部材数量を把握した。

<親杭横矢板_集計表>		
A	B	C
親杭横矢板タイプ	数量	親杭長さ(m)
親杭横矢板	123	246
	123	246

図-11 親杭横矢板ファミリの集計表

集計表の作成において抽出したパラメータは、初期値のファミリタイプ名と数量で、親杭横矢板ファミリに親杭長さのパラメータを付加した。これは、本章 6 項にて概略工期を算出する為の根拠数量となるため算出した。

(6) 工期の検討

a) 実務家へのヒアリング

仮設足場と山留計画について、概略工期の算出を行う上で、根拠と数量などを把握するため、実務家へのヒアリングを実施した結果、以下の事項が明らかとなった。

- ① 枠組み足場の根拠数量：立面の面積
- ② 枠組み足場の労務歩掛：900 枠の場合 45 m²/人工、1200 枠の場合 40 m²/人、ただし、各現場の諸条件を考慮して、実務においてはそれ

らの数値を 8 掛けして用いる。

- ③ 山留計画の根拠数量：打込む親杭の長さ
- ④ 山留計画の労務歩掛：打込む地盤の固さにより異なる。

それぞれの根拠数量は、本章 4 項、5 項で作成した集計表により、自動的に集計可能な数量であるため、それらを用いて Revit と VICO を連携して概略工期の検討を行った。

b) Revit と VICO の連携

Revit と VICO の連携は、既往研究¹⁾で示した通り以下の手順で行った。

- ① Revit モデルのエクスポート
- ② Revit モデルのインポート
- ③ データの適応と更新
- ④ 根拠数量の抽出
- ⑤ 工種の設定
- ⑥ 工事タスクの設定
- ⑦ 工事タスクと根拠数量の紐づけ
- ⑧ 工事順序の設定

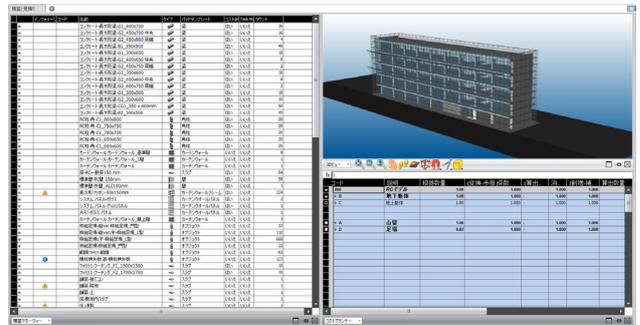


図-12 VICO による根拠数量と工種の紐づけ

c) 工程表と施工アニメーションの作成

既往研究の成果を拡張し、仮設足場と山留計画を含んだ工程表と施工アニメーションを作成した。

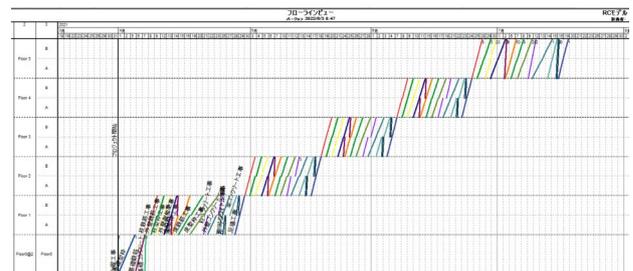


図-13 工程表

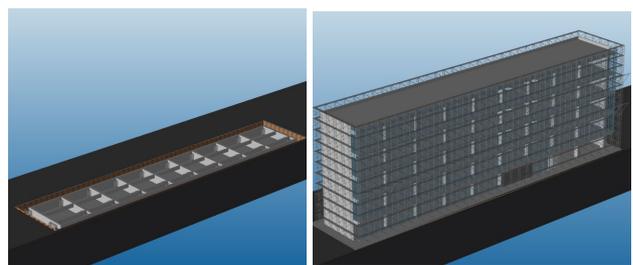


図-14 施工アニメーションの一部

Dynamo を用いた。以下はその手順である。

- ① 「壁」カテゴリのオブジェクトを指定
- ② 特定の高さ以下のオブジェクトを抽出
- ③ データ検索を行うオブジェクトと CSV 形式の刊行物単価を Dynamo で指定
- ④ 代表的な強度のコンクリートと鉄筋を当てはめ、該当する単価情報を抽出し、オブジェクトパラメータへ転記

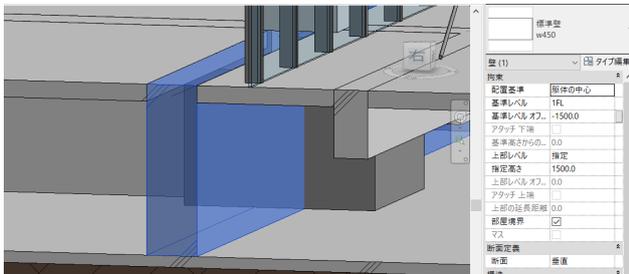


図-19 「壁」カテゴリで入力された基礎梁の例

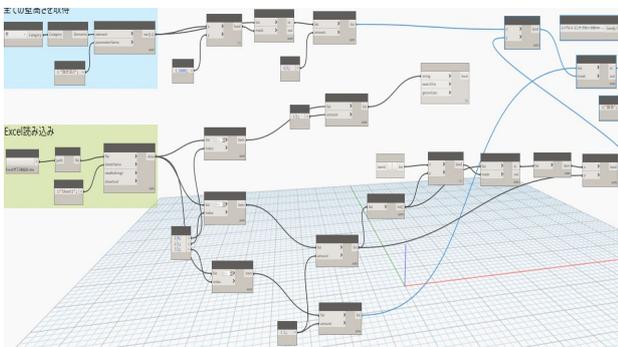


図-20 データ検索に用いた Dynamo

c) 単価の集計

ガラスの面積、数量、単価について、Revit の初期機能である集計表を用いて行った。

タイプ	ガラス種別	ガラス面積	単価(m ²)	金額(円)	備考
ガラス パネル1	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)	0.96 m ²	2680.00	2580	
ガラス パネル1	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)	0.96 m ²	2680.00	2580	
ガラス パネル1	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)	0.96 m ²	2680.00	2580	
ガラス パネル1	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)	0.96 m ²	2680.00	2580	
ガラス パネル1	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)	0.96 m ²	2680.00	2580	
ガラス パネル1	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)	0.96 m ²	2680.00	2580	
ガラス パネル3	Low-e複層ガラス(FL8+A12+FL8)	1.10 m ²	3080.00	3388	
ガラス パネル3	Low-e複層ガラス(FL8+A12+FL8)	1.10 m ²	3080.00	3388	
				6776	

図-21 単価を転記した集計表

ガラス面積と単価から、Revit のモデル内で基本設計の初期段階からコストをリアルタイムに確認出来る。単価情報については、調査時点を記録するためのパラメータを付加した。

パラメータ	値
アセンブリコード	
価格	2680.00
アセンブリ	
マーク(タイプ)	103
ガラス種別	Low-e複層ガラス(FL6+A12+FL6)
価格(2021年12月)	2680.000000
価格(2021年6月)	2680.000000
価格(2022年6月)	2880.000000

図-22 価格情報の調査時点を記録した例

(8) 本章のまとめ

本章では、既往研究¹⁾の成果を拡張し、仮設計画を考慮したより精度の高い工程計画の手法と、数量と刊行物単価の紐づけによる初期概算算出方法を示した。工程計画に用いる山留と足場のモデリングは、Dynamoを用いて自動化を図った。工程計画の検討は、RevitとVICOを連携し、仮設計画も考慮した。

コストマネジメントについては、本研究ではオブジェクトと刊行物単価の紐づけを2通りの手法で検討した。今後の展望として、データマイニングを用いた図-23に示す方法を検討したい。

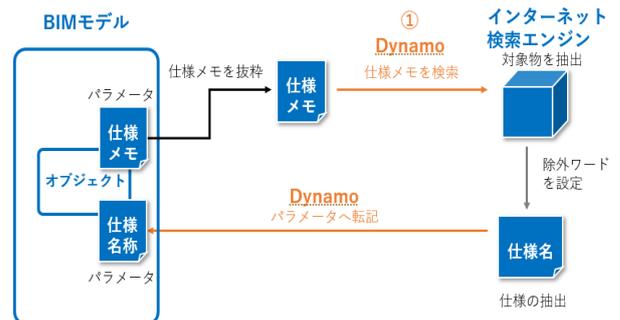


図-23 データマイニングによる連携イメージ

基本設計の初期段階において、刊行物単価との連携に必要な仕様名称を正確に記すことは困難である。そこで、オブジェクトに仕様をメモするパラメータを付加し、そこに例えば、「ジェットバーナー t30」といった文言をメモし、インターネット検索エンジンと連携すると、「御影石」といった仕様名称が抽出される。それを、本来仕様を入力するパラメータに転記できれば、パラメータ値の最適化につながる。図-23に示す①の部分まで実装したので、以降については今後の検討としたい。

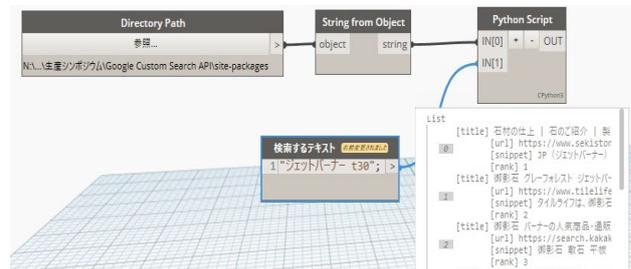


図-24 インターネット検索エンジンとの連携

3. BIMを用いた基本設計の初期段階におけるCO₂排出量削減とコストマネジメント

(1) 本章の背景

近年、世界的に想定を超える気象災害が発生し、気候変動に伴う環境問題が多発している。

この状況下で、CO₂排出量を実質的にゼロにする「カーボンニュートラル」は国内外において喫緊の課題となっている。

カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みは、世界共通の長期目標として130以上の国と地域が「2050年までにカーボンニュートラルを実現させる」⁵⁾ことを宣言している。建設分野において、CO₂排出量の割合は全世界の総発生量の約50%を占め、環境に配慮した取り組みは急務である。

GDP(国内総生産)とCO₂排出量の関係は正の相関が見られ⁶⁾、CO₂排出量削減を検討する上で、経済活動の状態やコストは切り離せない要因である。

プロジェクトの確定度が高くなるにつれ、コスト削減を目的とした検討の優先度が高くなり、CO₂排出量削減を目的とした検討は困難となる。よって、CO₂排出量削減を実現するため、基本設計の初期段階からコストを考慮した検討が重要であると考えられる。

第2章において、基本設計の初期段階から各部位のモデリングを包含することが可能となるBIMを導入し、コスト検討について建物の各部位に関する検討を導入する可能性や具体的な手法の検討に取り組んだ。BIMは、生産プロセスの検討に順応する建築構法、BEの分類に基づいており、各部位の数量を出力可能であり、得られた数量をコストと連携する一連の手法を示した。

(2) 本章の目的

本章では、第2章の成果を拡張し、基本設計の初期段階におけるコストを考慮したCO₂排出量算出の検討手法を明らかにする。具体的にはBIMソフトウェアとして、Autodesk社のAutodesk Revit2023を用い、Revitと連携しCO₂排出量を可視化するEC3(Embodied Carbon in Construction Calculator)ツールを用いる。EC3は、エンボディドカーボンのデータベースであり、CO₂原単位等の外部データベースとの紐付けにより、CO₂排出量の算出と可視化を行う。

CO₂排出量削減とコストの両立を実現する為、多目的最適化の検討にGenerative Designを用いる。Generative Designは、計算処理能力を駆使した多目的最適化技術である。目標や機能等のパラメータを入力すると全ての解決案と各案のパフォーマンスが提案され、多目的な最適案の検討を行う。検討対象とするBIMモデルは、第2章で用いたものとする。

(3) EC3 ツール

EC3は、Autodesk BIM360(以降BIM360とする)クラウドベースの共通データ環境と連携し、BIMモデルをインポートし、建築資材に内包されるCO₂排出量を算出するツールである。本項では、以下の概要を示す。

- ① BIM360の概要
- ② EC3ツールの概要
- ③ BIMモデルとEC3連携の概要

a) BIM360の概要

BIM360は、Autodeskが提供するクラウド型ワーキングプレイスであり、図-25に示すように図面、文書、3Dデータ等が共有、管理される。

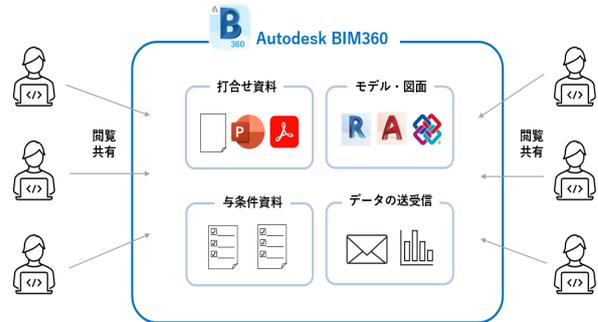


図-25 BIM360の概要

BIM360はウェブブラウザ上で動作するため、専用のソフトウェアを必要とせず、インターネット環境さえあればどこからでもアクセスすることができます。また、BIMモデルの作成において、ワークシェアリング機能を活用した。ワークシェアリングとは、図-26に示すひとつのファイルデータを複数人が同時アクセスし、同時編集可能な機能である。

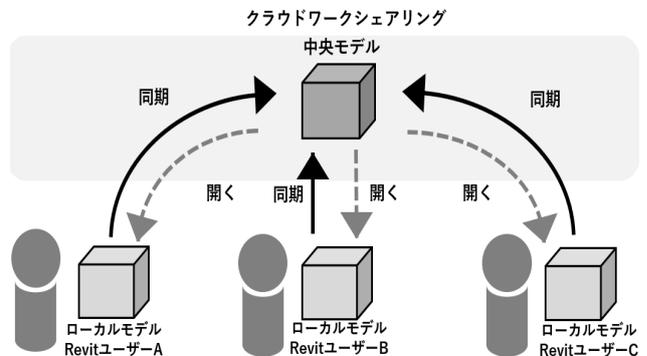


図-26 クラウドワークシェアリングの概要

b) EC3ツールの概要

EC3はオープンアクセスプラットフォームであり、建築物に使用される部材のCO₂排出量を算出するツールである。EC3において、CO₂排出量を算出する際に用いる部材の原単位は、データベースとして内包されており、Building Transparencyが用いられる。Building Transparencyは建設業界がエンボディドカーボンに対処するために必要なデータとツールを提供する団体で、EPD認証製品からエンボディドカーボンのデータを抽出し、要求仕様を満たす入手可能な部材の炭素強度を比較することで、CO₂排出量の削減目標が支援される。

一般に、CO₂排出量算出に用いる原単位データベースは、「積み上げベース」と「産業連関表ベース」がある。表-2に示す通り、産業連関表ベースは製品の平均的な単位生産額から作成されているため、EPDの算定方法とは異なる。一方、積み上げベースは、現実のプロセスに対応しており、データの代表性も高く、高精度な数値である。

表-2 積み上げベースと産業連関表の比較⁷⁾

積み上げベース	項目	産業連関表ベース
製品製造プロセスをもとに資材の物量を調査して原単位を求める方法	算定方法	産業連関表をもとに金額を物の流れに変換して原単位を求める方法
<ul style="list-style-type: none"> EPDの方法としても用いられている 実測データ等の調査によって、より詳細な原単位の作成が可能 	特徴	<ul style="list-style-type: none"> 社会に存在する全ての財、サービスが網羅的に整備されている 部門毎に算定されているため、詳細な原単位の作成は困難

EC3に内包されている原単位は、積み上げベースである。本章では、EC3に内包されている「Building Transparency」を用いた積み上げベースの原単位と、産業連関表ベースの原単位を用い、CO₂排出量の算出方法のプロセスと結果を明らかにすることとする。

c) BIMモデルとEC3連携の概要

BIMモデルとEC3の連携は図-27に示すBIM360クラウドベース上で行われる。

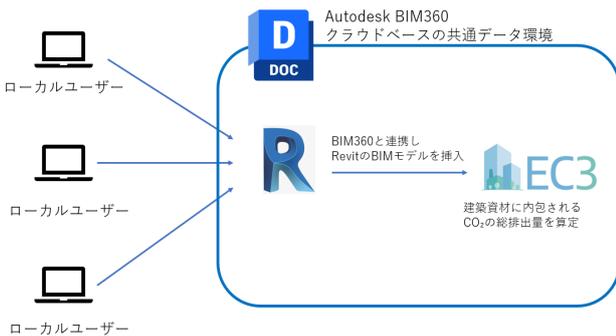


図-27 RevitとEC3の連携

EC3のウェブブラウザページよりBIM360上のBIMモデルを指定しEC3へインポートすると、BIMモデルのカテゴリ毎に項目が分類される。BIMモデルは、建築構法と同様の分類体系を備えたオブジェクトベースであり、EC3において、CO₂排出量算出の根拠となる原単位は部材毎であるため、オブジェクトと原単位の紐づけは容易に行うことができる。次章において、図-28に示すBIMモデルのインポートからCO₂排出量の算出までの具体

的な手法を明らかにする。

(4) CO₂排出量の算出

RevitとEC3を連携し、CO₂排出量の算出を行った。EC3へBIMモデルのインポートし、CO₂排出量の算出までは、以下の手順により行った。

- ① BIMモデルのインポート
- ② 部材の数量をBIMモデルから抽出
- ③ 積み上げベースの原単位の紐づけ
- ④ 産業連関表ベースの原単位の紐づけ
- ⑤ CO₂排出量の算出



図-28 CO₂排出量算出までの流れ

本章では、基本設計の初期段階を想定してBIMモデルを作成しているが、検討対象範囲は、基礎、柱、梁、床、屋根、外壁、カーテンウォールとした。

a) BIMモデルのインポート

EC3とBIMモデルを連携する際、BIMモデルはBIM360クラウドベース上に保存されている事が前提となる。ウェブブラウザ上のEC3ページにおいて「IMPORT FROM AUTODESK」からBIM360上にアップロードされたBIMモデルのプロジェクトファイルを選択し、特定の3Dビューを指定する。よって、基本設計の初期段階においては、CO₂排出量の検討を行う要素のみを分類・整理した3Dビューを作成し、EC3と連携することが有効な検討方法であると考えられる。

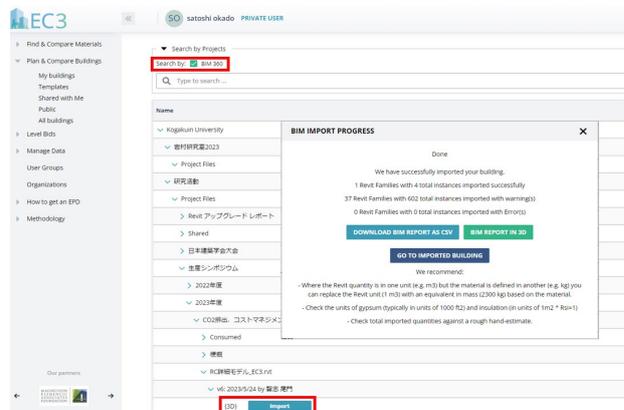


図-29 BIM360上でBIMモデルをインポート

基本設計の初期段階においては、プロジェクト

の確定度が低いため、複数案の検討が想定され、3D ビュー単位でBIMモデルをインポートするため、複数の3Dビューを作成し、EC3上でCO₂排出量の比較検討にも活用することができる。データの更新は、BIM360上のBIMモデルを「パブリッシュ」して行うこととなる。

b) 部材の数量をBIMモデルから抽出

EC3において、BIMモデルをインポートするとモデルカテゴリ毎、オブジェクトタイプ毎に項目が分類される。各部位の根拠数量は、BIMモデルから継承されるため、EC3上での数値入力は不要である。結果を図-30に示す。

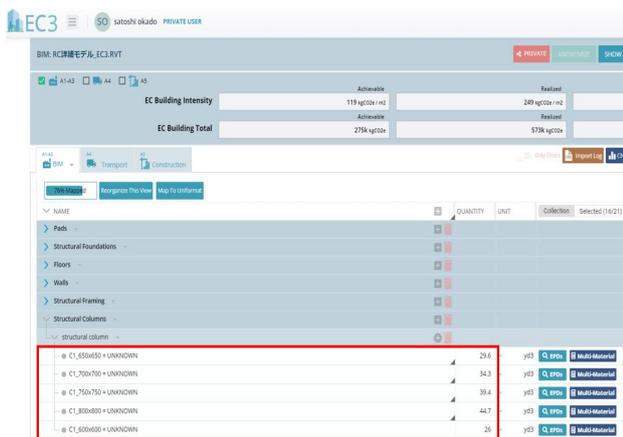


図-30 モデルカテゴリ毎に分類された項目

BIMは建築工法と同様の分類体系を備えたオブジェクトの集合体であるため、オブジェクト毎の数量算出が可能となる。EC3において、モデルカテゴリ毎、オブジェクトタイプ毎に項目が分類されるため、部材毎のCO₂排出量の算出を行うことができる。

c) 積み上げベースの原単位の紐づけ

積み上げベースの原単位は、EC3に含まれるエンボディドカーボンデータベースを用いた。図-31に示す通り、部材毎、製品毎に分類されている。

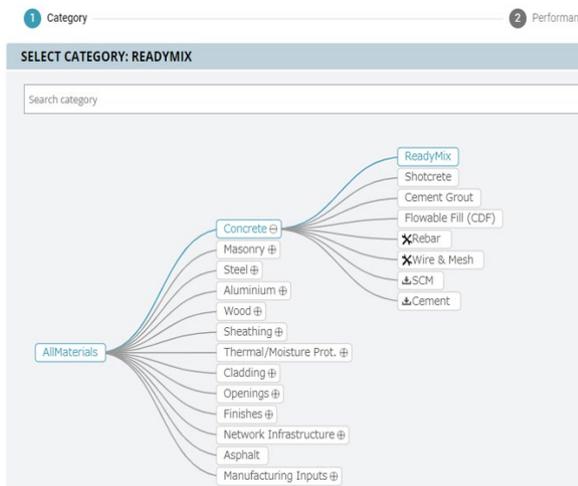


図-31 エンボディドカーボンデータベース分類

BIMモデルの各部材に紐づける製品の選択は、図-32に示す製品の仕様、地域などからフィルタリングすることができる。検索結果は、グラフなどで視覚的にCO₂排出量が把握し易く、比較検討しながら選定することができる。

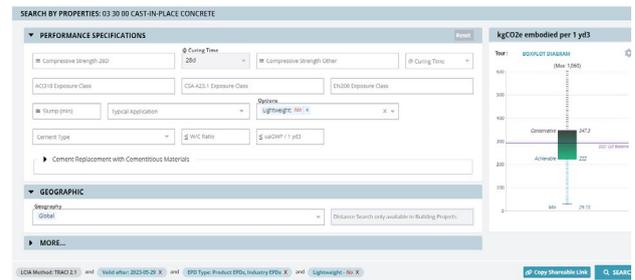


図-32 EPDデータの選択

BIMモデルは、建築構法の分類体系に馴染むオブジェクトベースであるが、積み上げベースの原単位と馴染まないオブジェクトも存在することが明らかとなった。本研究の対象建物は鉄筋コンクリート造であるが、柱、梁、床、屋根がそれに該当する。例えば、柱オブジェクトには鉄筋の情報は含まれていないため、柱の数量に歩掛りをかけて鉄筋数量を算出することとなる。鉄筋の項目はEC3上で追加し、柱数量に歩掛りをかけて鉄筋数量を算出した。

資材の選定後、オブジェクト項目との紐付けを行い、オブジェクト毎のCO₂排出量が算出され、合計値も算出される。現在、EC3のEPDデータベースには日本の建築資材の登録が少ない点が課題として明らかとなったが、積み上げベースの原単位については主に米国の原単位を採用した。

d) 産業連関表ベースの原単位の紐づけ

産業連関表ベースの原単位は「サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出量等の算定のための排出原単位データベース(Ver. 3.3)」⁸⁾を用いた。

産業連関表ベースにおいても積み上げベースと同様に、鉄筋コンクリート部分の根拠数量がコンクリートと鉄筋の合算値となっているため、歩掛りをかけて鉄筋量を算出した。産業連関表から必要な原単位を抽出し、EC3の「My imports」から数値を読み込み、各項目と原単位を紐づけた。

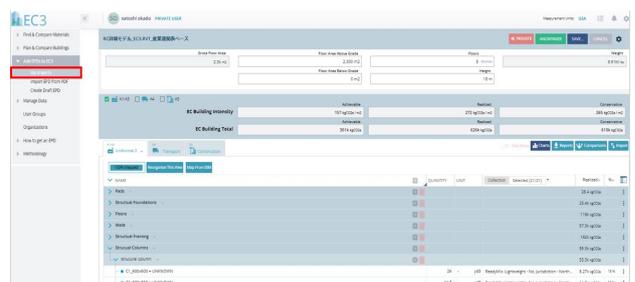


図-33 産業連関表ベースの原単位の読み込み

e) CO₂排出量算出

各部材と製品の紐づけを行うと、モデル全体での CO₂排出量が算出される。積み上げベースの原単位を用いた CO₂排出量と産業連関表ベースの原単位を用いた CO₂排出量の算出結果をそれぞれ図-34、35 に示す。

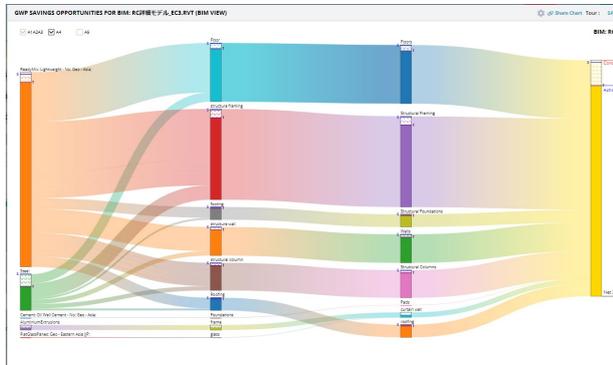


図-34 積み上げベースを用いた CO₂排出量

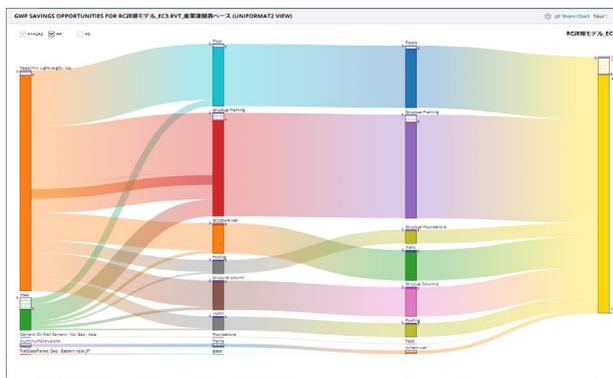


図-35 産業連関表ベースを用いた CO₂排出量

それぞれ、延床面積、階数、高さ等の建物の基本情報を EC3 へ入力する事で、図-34、35 に示すようなグラフとして、BIM モデル各部位や各部材の CO₂排出量が算出されると同時に、BIM モデル全体の CO₂排出量が算出される。また、サマリーチャートには、建物全体や各部位のプロジェクトのベースライン推定値と削減目標が明示される。積み上げベースを用いた場合と産業連関表ベースを用いた場合ともに、コンクリートと鉄筋が占める CO₂排出量の割合はそれぞれ 90%を超える結果となった。積み上げベースを用いた場合と産業連関表ベースを用いた場合で、コンクリートの CO₂排出量と鉄筋の CO₂排出量の割合に差が見られたが、要因は、用いた原単位の差によって生じたものと考えられる。

本章の検討範囲は、基礎、柱、梁、床、屋根、外壁、カーテンウォールの躯体と外装であったため、建物全体の CO₂排出量の算出までは至らなかったが、既往研究⁷⁾によると、本研究の検討範囲が建物全体の CO₂排出量の約 90%を占める事が明らかとされている。基本設計の初期段階における CO₂排出量の検討は躯体と外装程度に止め、得ら

れた結果に割増係数などをかけることによって、建物全体の CO₂排出量の概算値を把握する手段も考えられる。

BIMモデルのインポートから原単位の選定、BIMモデルから継承された各部材項目と原単位の紐づけ、CO₂排出量の算出までの流れは非常に明快であり、瞬時に CO₂排出量の算出、結果のグラフ化ができることから、基本設計の初期段階において十分実用可能なツールであると考えられる。

これらの検討結果や EC3 上のプロジェクト情報は XLSX 形式や CSV 形式で出力可能である事から、エビデンスとしてデータ蓄積可能なフォーマットとして活用できる。LEED 等とのフォーマットとも親和性があることから、今後は実務において各種手続きへの活用も期待される。

(5) 多目的最適化の検討

a) 多目的最適化の検討範囲

ここまで CO₂排出量の検討手法について示したが、CO₂排出量の検討を行う上でコストは切り離せない要因である。コストを考慮した検討に必要なパラメータを抽出し、多目的最適化を行った。本章 4 項の結果より鉄筋が占める CO₂排出量の割合が 90%を超えることから、検討範囲は、基礎、柱、梁、床、屋根の外壁のコンクリート躯体部分とした。

b) 最適化検討項目の抽出

多目的最適化の検討は Generative Design を用いた。Generative Design では、目標、定数、拘束、変数を定義する必要があるが、図-36 に示す入力値として、下記項目を抽出した。

- ① コンクリート 1 m³当たりの CO₂排出量
- ② 鉄筋 1t 当たりの CO₂排出量
- ③ 工区分割数

鉄筋とコンクリートが占める CO₂排出量の割合が 90%を超えることから、入力値として設定した。また既往研究¹⁾において、単工区における工期と 2 工区分割における工期を算出していることから、工区分割数を入力値として設定した。

出力値として下記項目を抽出した。

- ① コスト
- ② CO₂排出量

コストはコンクリートと鉄筋の CO₂排出量から算出され、CO₂排出量はコンクリートと鉄筋の CO₂排出量と工区分割数から算出される。

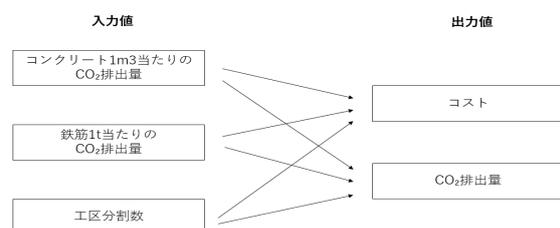


図-36 多目的最適化における入力値と出力値

c) Generative Design による多目的最適化の検討

Generative Design による多目的最適化は下記手順により行った。

- ① 入力値の設定から出力値までのプログラムを Dynamo へ実装
- ② Dynamo のプログラムを Generative Design へ書き出し
- ③ 多目的最適化の検討条件と目的を設定し、最適化を実行

多目的最適化を実行した結果、コストを抑えた検討結果が図-37に、CO₂排出量を抑えた検討結果を図-38に示す。

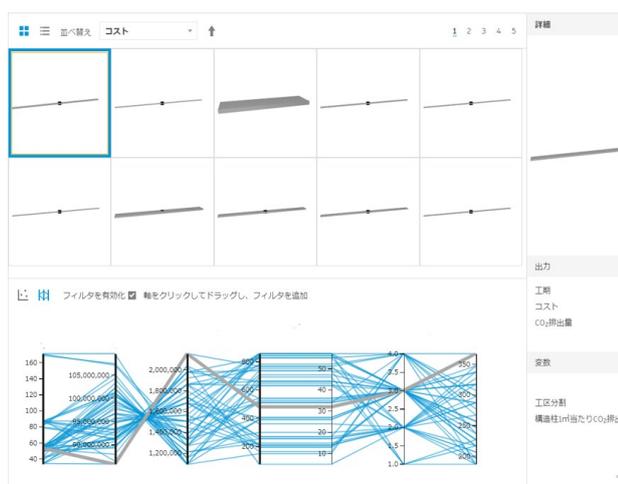


図-37 コストを抑えた検討結果

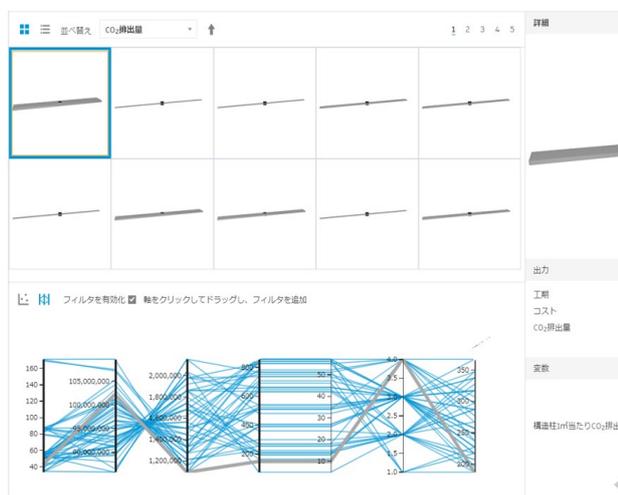


図-38 CO₂排出量を抑えた検討結果

本章では、Generative Design を用いて多目的最適化の検討を行ったが、コストと CO₂排出量の相関関係を検討した。基本設計の初期段階において一般的に想定される検討項目を考慮した解析は今後の検討としたい。

具体的には、構造種別、階高、階数、スパンといった検討項目を盛り込むことである。また、すでに示した通り、基本設計の初期段階において、

鉄筋とコンクリートが建物全体の CO₂排出量において 90%程度を占めるため、躯体数量とその他の部分の CO₂排出量の関係について、データの蓄積によって、基本計画段階で計数処理も可能である。

(6) 本章のまとめ

本章では、第2章の成果を拡張し、基本設計の初期段階におけるコストを考慮した CO₂排出量の検討を行う具体的な手法を明らかとした。BIM モデルと EC3 を BIM360 上で連携し、CO₂排出量算出までのプロセスは非常に明快であり、多忙な基本設計の初期段階においても実用性の高いツールであると考えられる。

本章では、CO₂排出量の算出に用いる原単位は、積み上げベースと産業連関表ベースを用いた。積み上げベースの原単位は EC3 内のデータベースを用いることで、各項目と容易に紐づけることが可能であり、産業連関表ベースを用いる場合でも、EC3 へ原単位をインポートすれば、紐づけは容易であった。本検討範囲は躯体と外装にとどまったが、それらは建築全体の CO₂排出量の約 90%が占められる⁵⁾ことから、計画の早期から躯体と外装について検討することが有効と考えられる。

本研究では、鉄筋コンクリート造を検討の対象としたが、既往研究⁷⁾における鉄骨造の場合や、基本設計の初期段階に想定される、スパン等の変更による CO₂排出量の算出についても今後、検討する予定である。多目的最適化の検討では Generative Design を使い、CO₂排出量や工区分割数を入力値として検討した。

4. 本研究チームの所属大学における教育での試行

(1) 本章の背景

我が国の大学における BIM 教育の遅れを指摘する声は少なくないが、「実践に基づいた建築学教育における BIM 活用可能性の考察」³⁾で示した通り「BIM を使うために BIM を学ぶ」のではなく、「建築を学ぶために BIM を使う」方針のもと構成したシラバスは、現状有効に機能し、本研究チームの所属大学における BIM 教育の基盤は整いつつある。

本章では、第2章、第3章の研究成果を本研究チーム所属大学の BIM 教育へ導入し、その効果について考察する。

(2) 「3DCAD・BIM 演習」における活用

a) 概要

本章で扱う「3DCAD・BIM 演習(以降本演習とする)」は、建築学部建築学科 3 年生後期に実施される。BIM ソフトウェアの Autodesk Revit と連携

ソフトである Dynamo、VICO office、Lumion を用いて、週 1 回 90 分×2 コマ、全 15 回からなる。

15 回の講義は表-3 に示す以下の 3 つのカテゴリに分類して実施した。

- ① ごく簡単なモデル入力による基本操作の習得
- ② 一つの建物を入力しながら各部構法の理解
- ③ 数量、コスト、施工計画を連携する為の関連ソフトウェアを併用した BIM データの活用

表-3 3つのカテゴリに分類した内容

	1 限目	2 限目
Revit の基本操作 第 1 回～第 4 回	・モデリング・図面化 ・パースの作成 (Lumion)	・ファミリの作成 ・ネストファミリの作成
各部構法の理解 第 5 回～第 10 回 ・各部構法の説明 ・Revit の操作 ・プログラミング	・構造 ・床・屋根防水 ・階段 ・カーテンウォール ・外壁 ・間仕切り壁 ・建具表と仕上表	・Dynamo の基本 ・Dynamo 演習 ・パターンベースファミリの作成 ・アダプティブファミリの作成
関連ツールの連携 第 11 回～第 13 回	・数量算出とコスト連携 ・施工計画連携(VICO office) ・設備計画	
自由課題 第 14 回～第 15 回	・過去に取り組んだ設計課題の BIM 化	

b) コロナ禍に対応したシラバスの変更

本演習は、対面とオンラインを同時双方向に行うハイフレックス型授業の併用により実施した。2 コマの配分を実習形式と演習形式に分類した。

1 コマ目：全員一斉のハンズオン形式を中心とした実習講義であり、全員が提出必須の通常課題に取り組む。

2 コマ目：全員一斉の課題実施を中心とした演習で、主にファミリ作成やプログラミング作成を扱い、全員が提出必須の通常課題に取り組む。

通常課題を終えた場合、チャレンジ課題に取り組む。課題の内容は実務レベルの高度なものである。

c) ハイフレックス型授業の運用

ハイフレックス型授業の運用として、ビデオ会議システムである Google meet を活用した。2DCAD と比べ、複雑な BIM の操作をオンラインで行う工夫として、毎回の講義において図-39 に示す 4 つのビデオ会議を立ち上げた。概要は以下となる。ビデオ会議 1：メイン解説用。授業開始時は教員、ティーチングアシスタント (TA) 含め全員この会議に入り、ハンズオン操作を行う。質疑がある場合は主にチャット機能を用いる。

ビデオ会議 2：アドバンス用。受講者が一定数通常課題を終えた場合は、チャレンジ課題の概要説明を行う。

ビデオ会議 3, 4：質問専用。主に TA2 名による対応。チャットによる応答が困難な場合、オンライン通話及び画面共有により対応する。

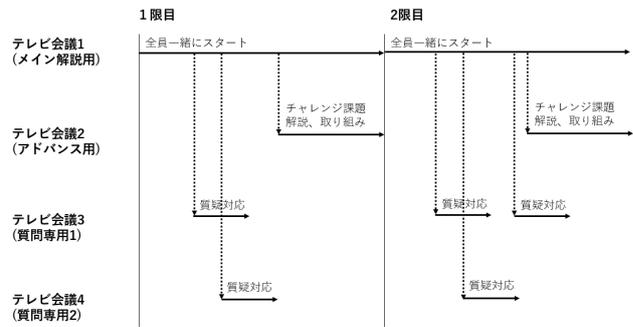


図-39 ビデオ会議システムの活用イメージ

d) 本演習における実践概要

本演習に用いるサンプル建物は、地上 3 階建て、鉄骨造のオフィスビルとした。建物の概要を表-4、図-40 に示す。

表-4 対象建物の概要

建築面積	280.00 m ²
延床面積	840.00 m ²
構造	鉄骨造
階数	地上 3 階
階高	4,000mm
用途	事務所



図-40 対象建物のイメージ

BIM モデルと刊行物単価の紐づけについて実施した。Dynamo を用いて BIM モデルと CSV 形式の刊行物単価を直接紐付けた。対象部位は以下とした。

- ① ECP と単価の紐づけ
- ② ガラスと単価の紐づけ

e) ECP と単価の紐づけ

対象建物の ECP 部について、「カーテンウォールオブジェクト」として入力した。これは、実際の生産プロセスに馴染む分類体系とする為である。これにより、ECP のパネルの種類、サイズ、サイズ毎の数量を把握することができる為、ECP パネルを 4 種類へ分類し、それらをランダムに置き換えた。ECP パネルの種類を置換え後、刊行物単価表の中から該当する単価を紐づける事とした。尚、刊行物単価表は教育用として、簡略化したものを用いることとした。

	A	B	C	D
	タイプ	面積	単価	金額
0.84 m ²				
t25	0.84 m ²	2680	2243.16	
t25	0.84 m ²	2680	2243.16	
t25	0.84 m ²	2680	2243.16	
t25	0.84 m ²	2680	2243.16	
4	3.35 m ²	10720	8972.64	
0.91 m ²				
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
t25	0.91 m ²	2680	2442.55	
8	7.29 m ²	21440	19540.42	
1.00 m ²				
t25	1.00 m ²	2680	2680.68	
1	1.00 m ²	2680	2680.68	

図-46 ガラスの集計結果

(3) 本章のまとめ

本章では、第2章、第3章の研究成果を本研究チームが所属する大学のBIM教育へ導入し、その効果について確認した。題材として、ECPパネルとガラスを取り上げた。BIMモデルと刊行物単価の紐づけは、Dynamoによる。

Dynamoなどのプログラミング教育における問題は、「nodeを言われたまま並べているだけで、何をやっているのかわからない」や、「プログラミングの思考についていけない」などがあるが、本演習においては、図-47に示す全体プログラムのを幾つかのカテゴリに分類して解説した。

プロジェクト内の全てのカーテンパネルを取得し、タイプ名が「ECP」を含むものを抽出

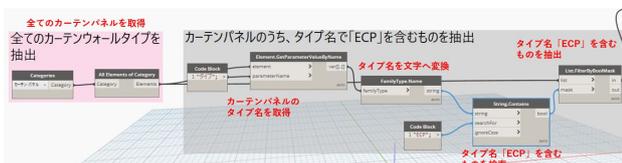


図-47 カテゴリに分類されたプログラム

これによって、プログラミングが意図する内容が明確となり、nodeの意味の理解も深まる事が明らかとなった。実務において、この手法を活用する事で、BIMやプログラミングに関する知識が浅くとも情報共有が可能であることが確認出来た。

5. 研究の総括

BIM普及時の建築プロジェクトの望ましい姿とは、単なる意匠表現の拡張にとどまらない。企画から解体に至るプロジェクト全体のワークフローを効率化し、各フェーズでの検討をシームレスに建築物の最適化につなげねばならない。

本研究は、その全体像を描くためのスタディとして、BIMがデータベース化するオブジェクトの数量をベースとしたコスト、施工計画、工期、環境負荷について検討したものである。

研究の成果を以下に整理する。

- ① BIMプラットフォームに建築学の知識体系を移植する試みとして、具体性を持たせるのが難しかった仮設計画を関連法規、仕様書等の内容をプログラミングして自動化した。
- ② BIMと連携ソフトによって、コスト、工期と環境負荷について、基本設計の初期段階で自動的に発生させた組合せをもとに、多目的最適化が検討可能であることを確認した。
- ③ 本研究では、上記①、②の開発の一部を初学者である卒論生が担い、講義・演習において学生がそれを使いこなせることを実証し、今後はスモールファームでの開発、活用の可能性も確認した。

謝辞

本研究は一般財団法人建設物価調査会の研究助成を受けた。また、講義での試行に際して、コスト情報の提供も受けた。記して謝意を表したい。

また、卒業論文のテーマとして取り組んだ皆さん、講義中の試行に真摯に取り組んだTA、受講者の貢献も大きい。

参考文献

- 1) 尾門智志、遠藤和義、岩村雅人：「BIMを用いた基本設計の初期段階における工期検討に関する研究」、日本建築学会 第36回建築生産シンポジウム、2021.8
- 2) 尾門智志、遠藤和義、岩村雅人：「BIMを用いた基本設計の初期段階における工期とコストマネジメントに関する研究」、日本建築学会 第37回建築生産シンポジウム、2022.8
- 3) 岩村雅人、遠藤和義：「実践に基づいた建築学教育におけるBIM活用可能性の考察」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2020.9
- 4) 小笠原正豊：「わが国における仕様分類体系の標準化についての考察—「建築工事標準分類」「共通建築コードインデックス」を事例として—」、日本建築学会 第37回建築生産シンポジウム、2022.8
- 5) 環境省：「カーボンニュートラルとは」(<https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon-neutral/about/>)
- 6) 環境省：「社会経済活動と環境負荷」(<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h24/html/hj12010103.html>)
- 7) 池沢真琴、中村恵、柳井崇、加藤晃敏、木野内剛、宮崎淳：「積み上げベースの排出原単位を活用したエンボディドカーボン評価に関する考察 その1 共通原単位データベースの作成」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2023.9
- 8) 総務省：「排出原単位データベース」、排出量算定について(https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate.html)