三次元モデルによるツーバイフォー構法の知識表現に関する研究

3D-MODEL-BASED KNOWLEDGE REPRESENTATION FOR TWO-BY-FOUR CONSTRUCTION SYSTEM

田中智己 — * 1 高林弘樹 — * 2
加戸啓太 — * 3 平沢岳人 — * 4

Tomoki TANAKA — * 1 Hiroki TAKABAYASHI — * 2
Keita KADO — * 3 Gakuhito HIRASAWA — * 4

キーワード：
ツーバイフォー構法, 知識表現, 3D CAD, 3D プリンタ,
スケール模型

Keywords:
Two-by-four construction system, 3D-model-based knowledge representation, 3D CAD, 3D printer, Scale model

For comprehensive understanding of a two-by-four construction system, sufficient textbooks or manuals have not been published in Japan. In such a situation, a 3D-model-based representation will serve as a good reference to understand this system.

We attempt to represent a two-by-four housing system by creating a detailed 3D model generated from predefined classes. These classes can dynamically produce the shapes of each element by setting parameters. Furthermore, we confirmed that the representation is valid and useful by outputting a scale model using a 3D printer.

1. はじめに

ツーバイフォー構法^{注1}は我が国の主要な木造建築構法のひとつであり、簡素化された接合部など、在来軸組構法に比べて合理的な構法であるといわれている。1974年に日本でオープン化されて以来、たて枠のスパンといったモジュールを例として、各部構法で日本での施工に適うよう時代とともに独自の改変がなされてきている。このような特徴をもつツーバイフォー構法であるが、日本で出版されている建築構法（一般構造）の書籍を横断的に観察しても、この構法に関する記述および図版は質・量ともに不足しており、またその内容についても現在主流の各部構法とは異なる部分もある。

本研究では、この構法による住宅建築を部品単位で三次元モデル化することで、現代のツーバイフォー構法に関して三次元モデルを併用した知識表現を試みる。

2. 研究手法

2. 1 調査

上述のように、ツーバイフォー構法は現在までに各部構法に改変がなされているが、ツーバイフォー構法関連の書籍の改訂はなされていても、それらの変化に完全に追従できているとはいえない状況にある。構法の知識表現にあたり、施工現場の調査やツーバイフォーメーカーなどへのヒアリングをおこない、メーカー独自の改良を経てデファクトスタンダードとなっている各部構法などを整理した。

各部構法の改変の例として剛床構法を挙げる。ツーバイフォー構法の一階の床組は、既存図書などでは根太構法で例示されているものが大半であるが、近年では図1に示すように端根太、側根太といった床組部材を省略して土台に床根太を直接留付け、床下張り材の合板を厚くした剛床構法が採用されることがほとんどである。また、床下の束を鋼製束とするなど、部品レベルでの変化もみられる。

こういった各部構法の時系列的な変遷も非常に興味深いものであるが、本研究では、現代において主として採用されている各部構法や生産工程を基本として、知識表現をおこなう方針をとる。

図1 剛床構法（施工現場調査より）

2. 2 構法の知識表現

ツーバイフォーメーカーの実務には、近年、この構法に特化した生産系CAD/CAMシステムが組み込まれ、このシステムへの入力データを整える生産設計プロセスがある。このプロセスでは図面によって部材レベルでの情報伝達がおこなわれており、プレカット工場においても図面を入力として数値制御工作機を用いて部材を切り出している。これらのシステムでは、二次元図面での情報伝達が主であり、三次元表現やその組み上げといった機能は想定されておらず、充実していない。

他方、一般的な三次元CADでは、建築を三次元部品（モデル）の集合として組み上げ、部品それぞれに寸法や素材などの諸情報を紐付けて管理する、いわゆるBIM (Building Information Modeling)が採り入れられている。三次元モデルにより直感的に形状を捉えられることから、設計段階に大きな効用があるが、三次元モデルへ集約された諸情報の生産・施工段階での活用にも期待が集まっている。

¹ 千葉大学大学院工学研究科 博士後期課程
(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

² 千葉県庁

³ 建築研究所建築生産研究グループ 日本学術振興会特別研究員PD

⁴ 千葉大学大学院工学研究科 准教授

¹ Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

² Chiba Prefectural Government

³ JSPS Research Fellow, Building Research Institute

⁴ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

構法の知識表現についても同様に、三次元モデルを併用することが望ましいと考えられる。特に構法の理解という観点から見れば、三次元モデルとして部品形状や構成の表現がされていた方が学術的・教育的効果も高いであろう。

しかし、一般的な三次元 CAD でツーバイフォー構法の部品を細かく表現しようとする、壁組と小屋組の接合部における材の切り欠きのような形状を柱ツールや梁ツールなどの CAD の標準ツールの組み合わせで実現する必要がある。これは、この構法の部材は製材から切り出すことで作られるという実際の生産形態との不整合も含め、非効率である。この場合、三次元 CAD の内部データベースにおいては作成した部品が「垂木」などの本来の部品呼称で表現されておらず、CAD の内部表現である汎用的な「柱」や「梁」などの部品の集合として扱われる。また、部品の形状を決定する動作が複雑になるため、その形状が実際に生産できるかどうかかわからないといった問題も生ずる。

当研究室で継続的におこなっている伝統木造建築に関するデジタルアーカイブ研究では、伝統木造建築に固有な斗部品や、継手仕口での納まりを持つ軸部品の雛形を計算機言語により定義する手法を取り、この雛形の実体化によりスケール模型の作成が可能な精緻さでの三次元モデル化をおこなってきた^{1,2)}。この方法をとることで、各部材を情報処理上での最小単位とすることができ、既存 CAD の標準部品を組み合わせる場合に比較して、合理的である。

以上のような考察から、ツーバイフォー構法においても建築を部品レベルで表現するために、この手法を適用することとした。

ツーバイフォー構法を構成する部品の雛形を計算機言語により定義する例として垂木を挙げる。垂木は屋根の勾配や軒の出に依存して形状が変化するが、部品の作図法をパラメトリックなモデルに変換し、寸法型式、屋根勾配、軒の出を変数とする部品雛形として記述する。実体化の際には、図2に例示したように寸法型式の変数の値（パラメータ）を変更することで、「垂木」という同一の部品雛形からパラメータに応じた具体的な部品形状を一意に決定できる。同時に、その部品の寸法型式が何であるかという情報も保持することができる。このように、それぞれの部品について雛形を定義し、それらに適宜パラメータを与えながら図面上に実体化し組み上げていくことで、部品レベルでの表現とともに情報を管理し建築全体の三次元モデルを構築する。

本研究でいうところの「構法の知識表現」とは、部材の作図法を記述した部品雛形の作成と、それらを使用して組み上げた、精緻な建築部品の情報付きの三次元モデルを意味している。また、これら部品の設計法を雛形として記述する行為にも価値があると考えられる。

図2 垂木の部品雛形によるパラメトリックな部品例
(左から寸法型式を 206、208、210 と変更している^{注2)})

3. 部品雛形の作成

本研究では、三次元 CAD に ArchiCAD^{注3)}、部品雛形の記述に ArchiCAD 付属のスクリプト言語である GDL^{注4)} を利用する。GDL により三次元での部品表現を記述し、GDL ファイルとして保存したものが部品雛形となる。ここで、ツーバイフォー構法の知識表現のための部品雛形の構成について説明する。

GDL による部品雛形の記述は、図面上に実体化された具体的な部品ごとにパラメータを渡すことのできる公開変数と、公開変数を参照しながら三次元形状を表現するスクリプトの記述部から成る(図3)。スクリプトの記述部では、GDL に用意されている数式・関数、フロー制御、座標変換、形状定義といったコマンド類の他に、コマンド類をパッケージ化したものを独自のマクロとして呼び出す機能もある。

図3 GDLによるモデリング概要

3. 1 部品雛形が所有する情報

三次元モデルを併用した知識表現をするにあたって、部品それぞれについて、その形状表現に必要なパラメータなどの情報のみならず、呼称やどの部位に属するかといった、形状以外の情報も管理する必要がある。これに対応するため、部品雛形の公開変数として呼称や部位を入力できる変数を用意して、部品それぞれがこのような情報を保持できるようにした。

呼称などの管理手法にはいくつか異なったやりようがあり、前述の伝統木造建築に関するデジタルアーカイブ研究においては、部品の呼称ごとに部品雛形を作成し部品雛形の名称を呼称とすることで部品と呼称の対応をとった。これは、伝統木造建築を構成する部品は概ねその呼称ごとに作図法が異なっているという理由からである。

一方で、ツーバイフォー構法は部材が規格化されているため、異なる部位の異なる呼称の部品であっても、寸法に関するパラメータを変更することで一つの部品雛形からそれぞれの形状を導出できるものが多い。部品雛形の総数を不必要に増加させるとその管理や保守が煩雑になることから、伝統木造構法の場合とは異なり、ツーバイフォー構法では部品の公開変数に呼称などの情報を記録する方針をとった。これにより、部品雛形の総数を少なく抑えられる。

具体的には、図4のように、部品には階、部位、部品呼称、寸法型式といった情報の入力が可能である。情報の入力はプルダウンのメニューから選択しておこなう。また、部位が「床組」で呼称が「まぐさ」といったようにあり得ない組み合わせも存在しうするため、部位、部品呼称と寸法型式の関係性を予め整理し、不適切な組み合わせについては選択肢として表示されないよう設計した。

図4 枠組材の呼称に関する情報

3. 2 枠組材の部品雛形のモデリング

ツーバイフォー構法の建築を構成する部品の多くは規格化された構造用製材を加工したものである。近年ではツーバイフォー構法においても在来軸組構法と同様にプレカット化が進んでおり、工場でのプレカット加工には全自動クロスカットソーなどの数値制御工作機が導入されている。加工機内では製材が固定され、入力されたオペレーションコマンドに従い、回転刃を駆動して製材を裁断する。柱、梁を始めとする多くの部品は部品全長の寸法でのカットのみで加工機による工程は終了する。一方、小屋組を構成する部品などは部品全長でのカットの他に、例えば垂木の場合では、屋根勾配に応じた木口の切り落としや、頭つなぎとの接合部の切り欠きといった工程が加わる(図5)。本研究では、これらの実際の工程を踏まえ、数値制御機械のオペレーションコマンドを自動生成することを想定した部品雛形を設計することで、生産段階での部品加工と整合した知識表現をおこなった。

実務における製材の生産と、部品雛形の処理のフローを図6に示す。部品雛形内部において、三次元の部品形状を求め形状を生成するまでの処理を、公開変数に入力されたパラメータから部材の設計法に則ってカット位置を導出するカット位置計算部と、求めたカット位置を引数として三次元形状を生成する製材カット部に整理する。

製材カット部では、加工機での製材の切断方法をモデル化して製材カットモデルとしたものをマクロとして呼び出す。このマクロでは、図7に示すように、実際のオペレーションコマンドと対応させるかたちで用意した引数から、製材(柱状体)からカットをおこない、三次元形状を生成する処理を記述している。具体的オペレーションコマンドの出力は現段階ではおこなっていないが、規格材カットモデルの内部で引数を整形することでオペレーションコマンドの出力が可能である。また、枠組材の三次元モデルは全てこの製材カットモデルを経て三次元モデル化されることから、三次元モデル化がなされていても実際にはその部品が加工できないといった不具合を避けることができる。

図5 全自動クロスカットソーによる垂木の加工

図6 実務における生産と部品雛形のフロー比較

図7 製材カットモデルの引数・カット位置・プレビュー

3. 3 金物の部品雛形

ツーバイフォー構法ではそれぞれの構造部材や枠組を金物で緊結して施工する。本研究の知識表現では木材の部品雛形に加え、鋼製束、根太受け金物といった金物の部品雛形のモデリングもおこない、可能な限り正確なディテールの表現に努めた(図8)。なお、金物の部品雛形には規格番号という公開変数を設け、予め用意したいくつかのパラメータの中から選択することによって、その規格番号に応じた形状が表現されるように定義した。

図8 金物の三次元モデル

4. 住宅モデルの構築

鈴木ら³による書籍にある設計例をモデルケースに、ツーバイフォー構法による住宅建築の部品レベルでの三次元モデル化をおこなった(図9)。なお、ここでは、2. 1節で述べた調査から、床組部を剛床構法とし、床下の束を鋼製束と改めた。また、基礎部はベタ基礎とし、換気口でなく基礎パッキング工法に、浴室周りは、浴室を現場施工する在来構法から、近年主流であるユニットバスの据え置きによるものと改めた。

床組、壁組部は比較的単純な構成ではあるが、隅柱は二本のたて枠とかい木の合成とするなど細部を忠実にモデル化している。また、切り落としや切り欠きのある小屋組部を構成する部品では、勾配や軒の出などの入力に応じてその形状を決定しており、その正しさは、次節でのスケール模型による検証により確認した。

実務では現場への搬入を考慮して木材の最大長が決定されることもある。今回はこれに倣い、スケール模型化に使用する三次元プリンタ^{注5}の最大加工サイズを設計上の最大部材長であると仮定し、木材の長さが4,000mm以下となるようモデル化した。

図9 三次元モデル全景（板材は非表示）

5. スケール模型の作成

三次元 CAD の画面上では、部品同士が実際には干渉していても成立してしまうため、前章までに構築した三次元モデルが知識表現として正しいことの検証は別の手段に依らねばならない。実務における生産工程では、CAD の図面上の情報を数値制御工作機に入力することで部材のプレカットをおこない、現場で施工をおこなう。そこで本研究では、これらの一連の流れに倣い、三次元 CAD 上のモデルを部品ごとに三次元プリンタで出力し、それらを組み上げスケール模型を作成することで、三次元モデルおよびそれらに用いた部品雛形の正しさを検証した。図10に検証用に作成したスケール模型を示す。実際のツーバイフォー住宅を正確に再現することに成功しており、この知識表現より部品レベルでの三次元モデル化が正しくおこなわれたことがわかる。

図10 スケール模型全景（縮尺は1/20）

6. まとめ

ツーバイフォー構法に関して、建築を構成する各部材ごとに正確な三次元形状を与え、それらをアセンブルする形で技術（知識）を表現することを試みた。調査から得られた、現在主として用いられる各部構法や、プレカットなどの現実の生産技術を考慮することで、より現状に則した構法知識を表現することができた。

最後に、本研究で作成した三次元モデルを併用した構法の知識表現の利用例として Web アプリケーションで閲覧できるツーバイフォー構法教材を提案する（図11）。この教材は本研究で作成したツーバイフォー構法による住宅の三次元モデルを、マウス操作で視点を変えながら閲覧することができる。また、部品を選択することでその部品が属する部位や呼称、寸法型式といった情報も同時に表示する（図11では垂木を選択）。この教材はインターネットを介して閲覧することができ^{注6}、この構法の知識・情報を共有することができる。

図11 ツーバイフォー構法教材

謝辞

本研究は、（財）日本ツーバイフォー建築協会「坪井記念研究助成」の補助を得た。記して謝意を表す。

注釈

- 注1) 「ツーバイフォー」に続く「こうほう」の漢字表記は、一般的には「工法」とすることが多いが、日本建築学会では「構法」を公式の表記としているため、本稿では「ツーバイフォー構法」と記述する。
- 注2) JAS により断面寸法が規定されており、例えば寸法呼称 2x4 の寸法型式は 204 と表記する。
- 注3) ArchiCAD16 (GRAPHISOFT 社製) を用いた。ArchiCAD は建築向け三次元 CAD である。
- 注4) Geometric Description Language (幾何記述言語)。ArchiCAD 付属のライブラリオブジェクト記述言語。GDL プログラムを記述したものを GDL ファイル (拡張子は .gsm) として保存し、ArchiCAD 図面 (プロジェクトと呼ばれる) に読み込むことで利用する。
- 注5) 三次元モデルデータを入力とし立体を造形するデバイス。本研究では Stratasys 社製 Dimension BST768 を用いた。
- 注6) <http://yanaka50.ta.chiba-u.jp/da/2x4/3DViewWODB.html>

参考文献

- 加戸啓太：伝統木造構法の精緻なモデル化に関する研究、千葉大学学位論文、2011.1
- 加戸啓太、平沢岳人：伝統木造のデジタルアーカイブ化における部品雛形と部品に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第76巻、第662号、pp.877-886、2011.4
- 鈴木秀三、友井政利：初めて学ぶ 図解・ツーバイフォー工法（改訂3版）、井上書院、2011

[2013年10月11日原稿受理 2014年1月7日採用決定]