

三次元 CAD 情報を用いた木造住宅の耐震性能の見える化

中川 貴文^{1*}

Visualization for seismic performance of wooden houses using 3D-CAD information

Takafumi Nakagawa^{1*}

概要

現在、新築されている戸建木造住宅の多くがプレカット加工（後述）を利用して生産されている。木造住宅の構造性能を評価するためには、軸組の情報や、接合部に関する設計情報が必要であるが、プレカット加工用 CAD（Computer Aided Design）データにはこれらの情報が三次元情報として作成されており、構造解析との親和性は極めて高い。現在 2 階建て木造住宅では壁量計算のみが求められているが、プレカット加工の際の三次元情報を構造設計に活かすことができれば、合理的により構造安全性の高い木造住宅の生産が可能となる。ここでは木造住宅用 CAD 情報に着目し、構造性能評価と連携する手法の検討を行った研究内容について紹介する。

1. はじめに

現在、新築されている戸建木造住宅の 85%が軸組構法であり、そのうちの 90%がプレカット（あらかじめ工場で木材を加工して、現場で短期間に組み上げることを）を利用して生産されている（図 1）。プレカット加工は三次元 CAD・CAM（Computer Aided Manufacturing）を用いた全自動機械加工が主流となっている。木造住宅の構造性能を評価するためには、軸組（柱・梁等の木材）の情報や、接合部（金物）に関する設計情報が必要であるが、プレカット加工用 CAD データには上記情報が三次元情報として作成されており、構造計算や応力解析との親和性は極めて高い。構造部材に関して、三次元 CAD による詳細な情報が我が国の大半の木造住宅の生産において作成されていることは、他の国や、他の構造種別（鉄骨造、鉄筋コンクリート造等）による建築物と比べてみても特殊な状況といえる。現在 2 階建て木造住宅では、新築時の構造性能確認として壁量計算のみが求められているが、住宅生産時に作成される三次元 CAD 情報を活用すれば、すぐにでも詳細な構造計算を行える状況にある。しかし、毎年数十万戸分作成されている三次元 CAD 情報は、構造性能評価に活用されることなく、プレカット工場で死蔵されているのが現状である。図 2 に木造住宅の設計・生産の標準的な流れを示したが、現状では、意匠設計の段階で確認申請が行われ、その後にプレカット加工に入り初めて軸組の架構等の構造に関する検討が行われることが一般的である。この流れを変えてプレカット加工の際の三次元情報を構造設計に活かすことができれば、合理的により構造安全性の高い木造住宅の生産が可能となる。

ここでは、木造住宅用 CAD の構造図やプレカット加工の際に作成される三次元 CAD 情報に着目

2019 年 7 月 2 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生活圏構造機能分野.

* E-mail: nakagawa@rish.kyoto-u.ac.jp

し、構造性能評価と連携する手法の検討を行った研究内容について紹介する。三次元 CAD 情報として研究対象としたのは、後述するシーデクセマ (CEDXM) と呼ばれるファイルフォーマットであり、これを木造住宅用の構造解析ソフトウェア (wallstat: ウォールスタット) と連携させることを試みた。

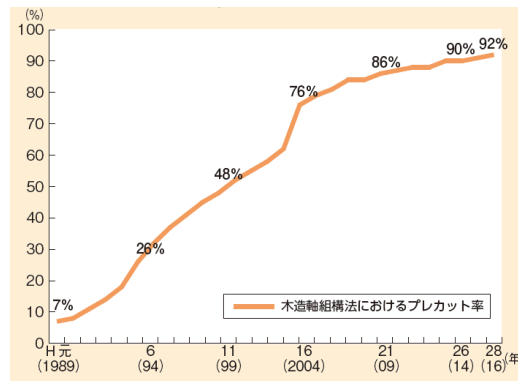


図1：プレカット材を利用した木造軸組構法住宅の割合
(資料：林業白書、全国木造住宅機械プレカット協会調べ)

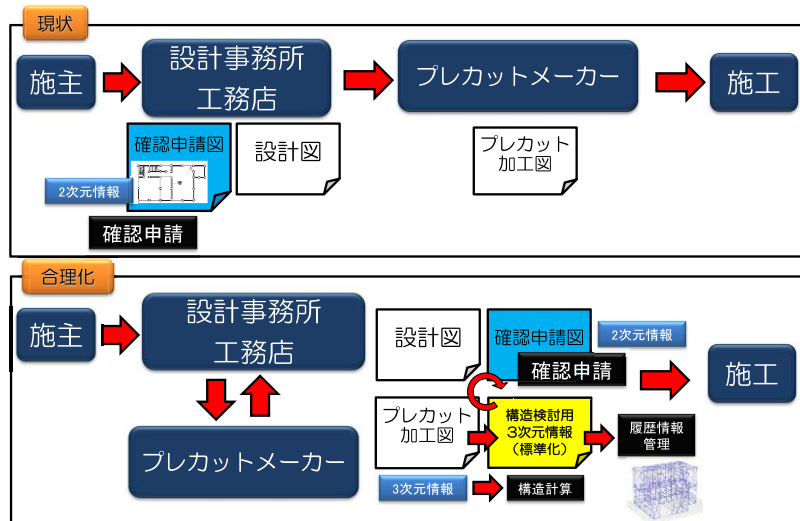


図2：木造住宅の設計・生産の現状と合理化イメージ

2. シーデクセマ (CEDXM) とは

シーデクセマ (CEDXM: Certified exchangeable CAD/CAM data extensible markup definition の略) とは、木造軸組構法住宅に関する建築意匠 CAD とプレカット生産 CAD のデータ連携を目的として構築された標準的なファイルフォーマットである¹⁾。木造住宅用の CAD には、意匠図作成用の CAD、構造図作成用の CAD、プレカット加工図作成用の CAD 等があるが、三次元情報として作成されることが標準的であり、それらの CAD の情報の橋渡しをするのが CEDXM ファイルフォーマットである。三次元情報の中には、プレカット加工の際に必要な下記の情報が含まれている。

①軸組（木材）の架構の情報

木造住宅を構成する軸組の両端部の三次元座標、寸法（幅・高さ）、端部の加工形状など

②接合部の情報

軸組と軸組を繋ぐ継手・仕口の接合部の仕様、金物の種類、三次元座標など

③壁の情報

筋かいや合板釘打ち耐力壁や、内装材・外装材の壁の仕様、三次元座標など

④水平構面の情報

床、小屋組等の水平構面の仕様、面積、三次元座標など

これらの情報は許容応力度計算などの構造計算を行うために必要な情報であり、実際に木造住宅用 CAD ソフトウェアの中には構造図を作成するだけでなく、許容応力度計算を行う機能を持つものも多い。シーデクセマは①～④の情報をファイルとして作成する際の標準フォーマットであり、シーデクセマに従ってファイル出力を行うことで様々な CAD と連携をすることができる。NPO 法人シーデクセマ評議会では標準ファイルフォーマットとして維持管理と更新、さらなる開発及び普及などを目的として活動をしている。長期優良住宅（耐久性等の一定の要求水準を満たす住宅への補助金制度）の重要事項である「構造の安定」及び住宅履歴書の保存が求められているが、シーデクセマファイルを長期優良住宅の履歴情報の保存等に活用することも可能となる。

3. 耐震シミュレーションソフト「ウォールスタット (wallstat)」

本研究で構造性能評価手法として用いたソフトウェアは、筆者が開発した木造住宅用の倒壊解析ソフトウェア (wallstat) である。2010 年 12 月よりインターネット上で公開を開始し、下記 URL から無償でダウンロードすることができる。

ダウンロード URL : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~nakagawa/> (短縮 URL : <http://bit.ly/wallstat4>)

wallstat は木造住宅の建物全体の地震時の損傷状況や倒壊過程をシミュレートする数値解析プログラムであり、パソコン上で建物を立体骨組によりモデル化し、振動台実験のように地震動を与えて (時刻歴応答解析)、計算結果を動画で確認することが出来る (図 3)。従来の解析ソフトウェアでは建物が倒壊するまでを追跡することは困難であったが、wallstat では非連続体解析手法である「個別要素法」を基本理論とすることで木造住宅が地震時に損傷し、完全に倒壊するまでをシミュレーションすることが可能となった。多くの実大木造住宅の振動台実験との比較・検証により解析結果の精度が確認されている。メディア等で紹介されたこともあり、公開開始から現在 (2019 年 6 月) まで、ソフトウェアのダウンロード数は 30,000 回以上、YouTube の動画の再生回数は 70,000 回以上に達している。

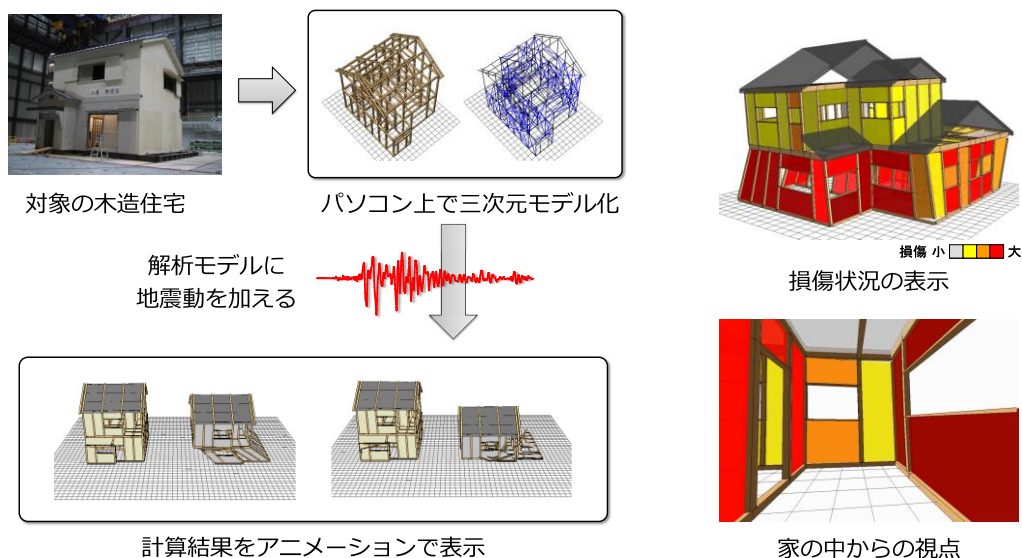


図 3 : 耐震シミュレーションソフト「ウォールスタット」の概要

wallstat は図 4 に示したような windows の GUI (Graphical User Interface) を備えており、画面を見ながら木造住宅の解析モデルを作成し、変形の大きさ、損傷状況、倒壊の有無等の解析結果をアニメーションによって確認することができる。数値解析の専門知識が無くても実際に目で見て地震時の木造住宅の応答挙動や、耐震性能を確認できるため、大学生や構造設計者の教育用ツールとしても使われている。図 5 は振動台実験に用いられた実大木造住宅の解析モデルの一例であるが、一般的な木造住宅を立体骨組で表現する場合、解析モデルでは構造躯体となる骨組 (木材) 1 本 1 本をモデル化し、その中に耐震要素となる壁のパネや、骨組を連結する接合部のパネをモデル化する。壁や接合部のパネの強さは実験の結果や文献のデータから決定して設定する (木造住宅のモデル化については文献参照 2))。図 6 は wallstat による解析結果と振動台実験の倒壊過程を比較した動画のスナップショットである。振動台実験は同じ平面・立面プランで接合部の設計方法のみが異なる試験体の性能比較のために実施された。試験体の接合部が引き抜けて破壊する過程や、1 階が層崩壊する倒壊過程が精度よく再現されているのが分かる。その他、図 7 に示したように地震被害を受けた社寺建築の再現解析や 6 階建の中層木造建築物の構造検討等に活用されている。

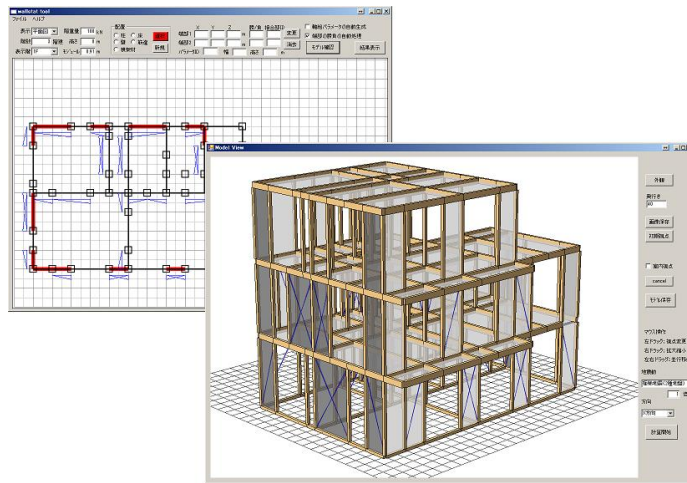
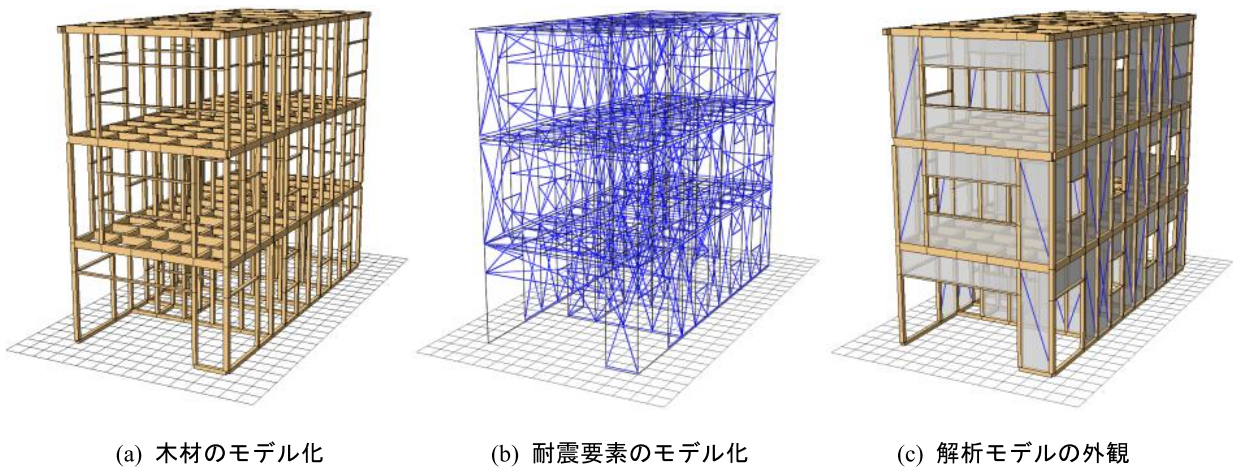


図 4 : ウォールスタットの操作画面



(a) 木材のモデル化

(b) 耐震要素のモデル化

(c) 解析モデルの外観

図 5 : 三次元骨組によるモデル化

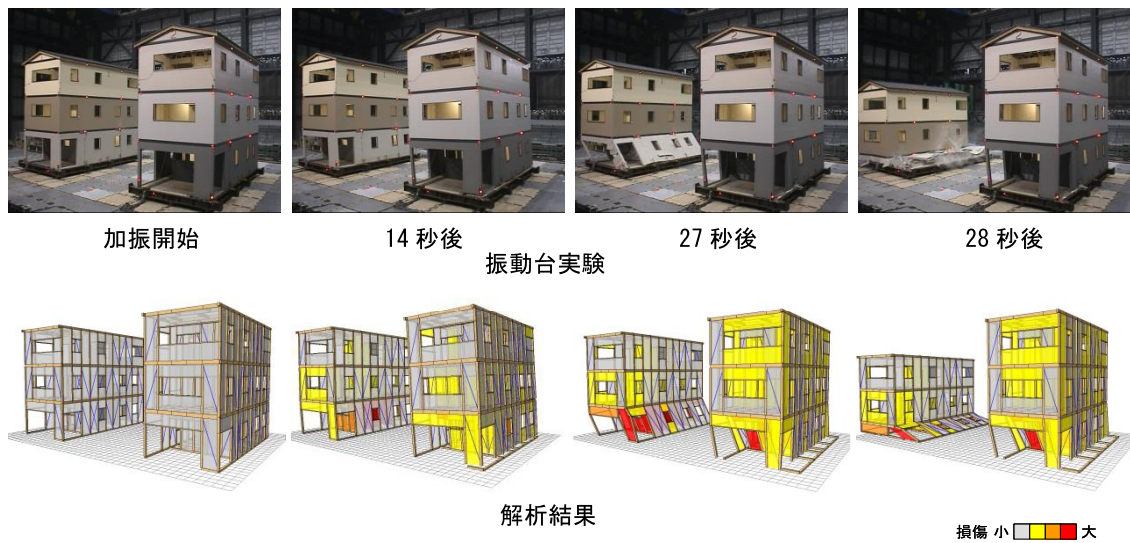
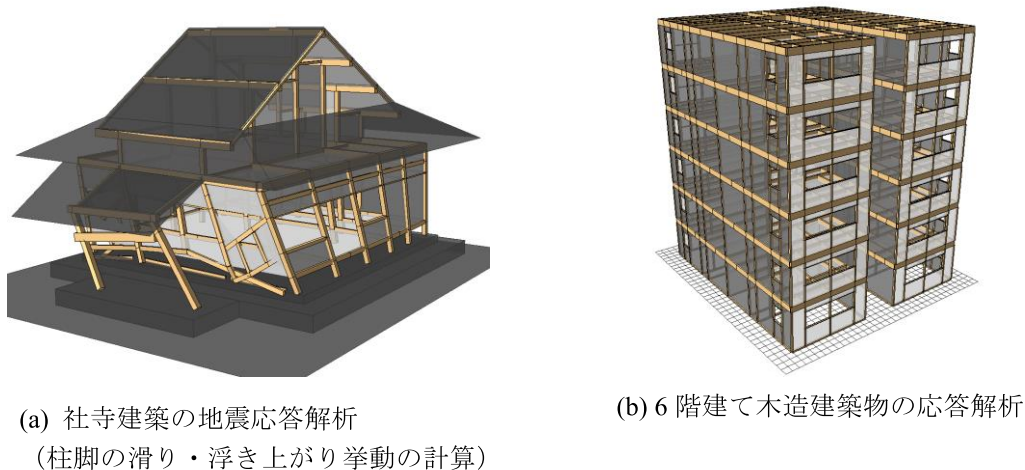


図 6 : 振動台実験の応答解析



(a) 社寺建築の地震応答解析
(柱脚の滑り・浮き上がり挙動の計算)

(b) 6 階建て木造建築物の応答解析

図 7 : ウォールスタットの計算例

4. ウォールスタットとシーデクセマの連携

プレカットの際に作成される三次元 CAD 情報は、構造解析モデルとの親和性が高いということは、プレカット材を用いて生産される木造住宅全てが高度な三次元構造解析を行える状況にあることとなる。本研究ではプレカットの際の三次元情報を活用した木造住宅の耐震性能評価（構造計算）が広く普及することを目指して、CEDXM ファイルを介して wallstat で木造住宅の三次元 CAD 情報を読み込み、自動で耐震シミュレーションを行うことが出来る連携手法の検討を行った。実際の検討作業としては 2013 年度から CEDXM 評議会の開発委員会において、連携に向けた情報の整理や、ソフトウェア開発を行った。

wallstat は解析モデル作成の際に、テキスト入力で軸組や構面の端部の 3 次元座標を入力する必要があり、木造住宅 1 棟分の主要構造部材や耐震要素を全て入力すると、1 日がかりの作業となり、ユーザーの負担となっていた。CEDXM と連携して、三次元座標を自動で解析モデルに変換できれば、この負担が大きく軽減されることになる。CEDXM は XML ファイル形式が採用されており、木造住宅を構成する柱・梁等の軸組の端部の 3 次元座標、断面寸法、樹種、ヤング係数等がテキスト情報とし

て、保存されている。2000 年の開発開始からバージョンアップを継続し、現在バージョン 8 が最新である。木造住宅用 CAD やプレカット CAD で普及しているのはバージョン 4 であるが、各 CAD ソフトによって CEDXM ファイルで出力する際の軸組等の情報の精密さ(解像度)が異なるところがあり、また、wallstat で解析モデル作成の際に必要なとされる情報についても、CAD ソフトで異なるところがあった。そこで、表 1 に示した通り、情報の解像度に応じて、両者の連携により自動でモデル化される項目のレベル分けを行った。レベル 1 では軸組・筋かい耐力壁は自動でモデル化されるが、他の情報は解析モデルに反映することは出来ない。接合部や水平構面の情報は反映されないため変形しないものとして解析を行うこととなる。レベル 2 では筋かい耐力壁以外の鉛直構面もモデル化され、レベル 3 になると、開口部や小壁、レベル 4 になると、接合部や水平構面についても解析モデルに反映されることになる。連携に関する検討で分かったこととして、レベル 1～2 までは標準的な木造住宅用 CAD やプレカット CAD から出力される CEDXM ファイルで連携可能であり、レベル 3～4 となると、出力する CAD ソフト側で、wallstat で必要となる情報の解像度向上が必要となる。各連携レベルに対応する建物を考えてみると、レベル 1～2 は新築の壁量計算を想定した木造住宅（接合部は変形しない。水平構面は剛床と仮定。）であり、レベル 3～4 は性能表示制度や耐震診断を想定した既存、新築木造住宅（接合部、水平構面の構造検討も必要）を対象にしているといえる。

表 1 : wallstat と CEDXM の連携のレベル

モデル化する項目	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4
軸組	○	○	○	○
筋かい耐力壁	○	○	○	○
筋かい以外の耐力壁	×	○	○	○
開口部 (小壁のモデル化)	×	×	○	○
接合部の変形	×	×	×	○
水平構面の変形	×	×	×	○

5. 検討結果（連携機能の実装）

前章の連携に向けた検討結果を反映して、CEDXM ファイルを直接読み込む機能を実装した新たなバージョン wallstat ver.3 を 2015 年 6 月からインターネットで公開を開始している。その後もバージョンアップを重ね、2018 年 7 月に公開した wallstat ver.4 では水平構面や接合部の入力、開口部の入力等も自動化され、レベル 4 の連携が可能となった。様々な CAD ソフトで作成した軸組等の情報をシーデクセマを介して wallstat にインポートし、短時間で耐震シミュレーションを行うことが可能となった。今後、工務店や住宅会社、プレカットメーカー等における実務での活用が期待される。

6. おわりに

埼玉県のある住宅会社では新たに建設する全棟の木造住宅をこのデータ連携機能を用いて wallstat で応答解析をし、安全性能検証を行った結果（耐震シミュレーションの動画）を顧客にプレゼンする取り組みを行っている。顧客は動画から直感的に建設予定の建物の耐震性を知ることができる。耐震

等級や構造計算等の基準の要求する耐震性の水準に対するチェックだけでなく、過去に起きた地震や、今後起こりうる想定極大地震に対しても耐震性を目でみて確認することができる。まさに「耐震性能の見える化」といえる。このような住宅会社の取り組みは徐々に日本各地で広がりつつある。2019年1月に設立した一般社団法人耐震性能見える化協会（代表理事：中川貴文）は wallstat の適切な普及による建築物の地震被害軽減を目的として活動を開始した。組織的なサポートにより wallstat のさらなる普及が期待される。今後もユーザーや共同研究者の意見を反映させて、研究開発を続けていきたい。

参考文献

- 1) シーデクセマ評議会ホームページ <http://www.cedxm.com/>
- 2) 日本建築学会「木質構造基礎理論」第12章、第15章、2011.

著者プロフィール



中川 貴文（Takafumi Nakagawa）

＜略歴＞1998 年東京大学農学部卒業／2003 年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了 博士（農学）／民間企業を経て、2005～2018 年（国研）建築研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所／2018 年～現在 京都大学生存圏研究所准教授／一般社団法人耐震性能見える化協会 代表理事 ＜主な研究＞巨大地震の際の被害軽減を目的とした木造の耐震研究、耐震化推進に資する教育・普及活動