

伝統建築における設計施工一貫 BIM

薬師寺食堂（じきどう）復興事業

本弓省吾

本プロジェクトは、史跡「薬師寺旧境内」において古代とは異なる現代の様々な条件下で「伝統技術」と「現代技術」の融合により実現させた食堂の復興プロジェクトである。食堂は、遺構発掘調査や史料調査などにより外観復元を行い、内部は現代における仏教の多様な布教活動を目的として、伝統と現代の意匠が融合した鉄骨造による大空間とした。伝統的な大工の作図法である「規矩術」を BIM モデル作成のプロセスに導入し、設計施工一貫 BIM により細部まで仮想モデルを作り込み、高い生産性と高い品質の両方を実現した。今回、伝統建築への BIM 導入事例として紹介する。

キーワード：伝統建築，復元，設計施工一貫 BIM，フロントローディング，データ共有，活発なコミュニケーション

1. はじめに

薬師寺は天武9年（680）に、天皇が皇后の病気が治癒することを祈願して発願され、藤原京において7世紀末には造営がほぼ完成していたと考えられる。その後、平城京遷都に伴う移転を経て、8世紀前半には現在地の伽藍が完成したと考えられている。それ以降、数々の災害に見舞われながら、伽藍はそのつど復旧と変化を繰り返してきたが、享禄元年（1528）の兵乱により、主要建造物のほとんどが焼失した。かろうじて東塔は兵火を免れ、昭和26年に国宝指定された。昭和40年代以降、伽藍の復興が進み、昭和51年（1976）に金堂が当初の姿に復興された。その後も境内の整備と復興が進められ、昭和56年（1981）に西塔、平成15年（2003）に大講堂が復興された。また平成10年（1998）には、古都奈良の文化財として東大寺や唐招提寺などとともに世界遺産に登録された。

2. 史跡整備と食堂復興について

薬師寺は、「薬師寺旧境内」として史跡に指定されており、伽藍（白鳳伽藍）の全面復興を目標に、史跡の保存を図りつつ段階的に歴史的建造物の復興等の整備を進めるとともに、指定文化財建造物や復興した伽藍の適切な保存と寺の宝物を収蔵する場としての機能の維持、向上に努めており、建造物の復興は、先行して実施する発掘調査結果に基づき、遺構の保存と復興



図一 伽藍（白鳳伽藍）配置図

の真実性を踏まえて実施している。創建当時の伽藍計画は、古文書などの史料や近年の発掘調査によりその内容が明らかになってきた。

南北の軸線上に、南から「佛」を祀る「金堂」、「法」を示し研鑽する「大講堂」、そして「僧」が一堂に会して齋食をするための場所として「食堂」が配置され、伽藍の主軸を構成している。この「佛・法・僧」は仏教で説いている三宝にあたる。前述の通り、金堂・大講堂はすでに復元され、残る食堂が復元されることによって伽藍の主要堂塔の復興が完成することとなる（図一1）。

3. 食堂の復元計画と設計方針について

(1) 食堂の復元計画

食堂は発掘調査の結果、8世紀前半の創建当時の礎石や雨落ちの位置が明らかになっており、そこから平



図一 2 食堂の外観完成イメージ (計画時)



図一 3 食堂の内観完成イメージ (計画時) (伊東豊雄建築設計事務所)

面規模や柱位置、軒の出などを推測することができた。歴史的建築物の専門家や学識者が、遺構に残されたこれらの手掛かりと縁起等の史料や同時期・同種の現存建造物を基に、食堂の外観の復元考察を行った(図一 2)。食堂は本来、僧侶の食事の場であるが、薬師寺食堂は、現代における仏教の多様な布教活動を目的として、現代の意匠と融合した大空間として計画することが求められた(図一 3)。また金堂は5年、大講堂は7年の工期に対して食堂では実施設計と施工を合わせて3年余りの工程で実施するという時間的制約もあった。遺構保護に十分配慮し、古代木造建築の外観の意匠を忠実に再現しつつ、無柱の大空間を短工期で実現するために、以下の設計方針を設定した。

(2) 設計方針 (図一 4 ~ 7)

設計方針①：鉄骨造による架構の採用

本来屋根を支える地垂木を復元意匠として見せながら、約 16 m × 27 m の無柱空間を実現するために鉄骨造による架構を採用し、鉄骨に木の化粧材を取り付けることで古代の意匠を復元した。

設計方針②：BIM の活用

古代木造建築の様式を踏襲した軒懷が薄く 3 次元的に反り上がる屋根を鉄骨造で

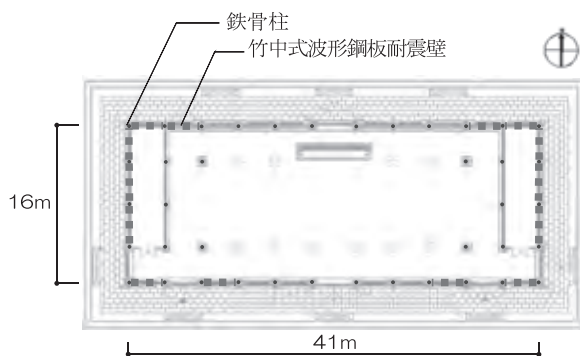
実現するため、最適な 3D-CAD ソフトや BIM ソフトを選定し、設計段階で細部までモデルをつくり込み、設・構・備の各モデルが整合した統合モデルを作成し、施工段階で活用できるものとした。統合モデルにより整合性を確保し、各職能との情報共有や関係者との合意形成に活用し、納まりの理解を深め問題点を事前に解決することで手戻りが発生しない様にすると共に、施工段階の品質向上に役立てた。

設計方針③：構造計画

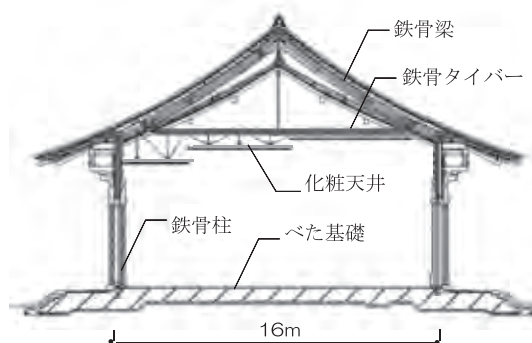
木で化粧をするため、鉄骨の柱を極力細くし、「竹中式波形鋼板耐震壁^{注1)}」により耐震性能を確保した。鉄骨タイバーによるスラスト対策を行い、べた基礎の採用による遺構面への接地圧の低減も行った。

設計方針④：避難安全検証法の採用

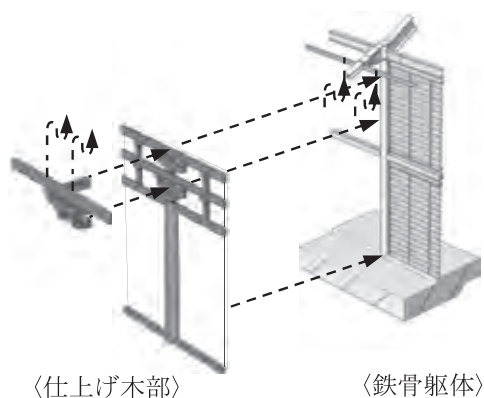
壁で耐震性能を確保するため、実際に開く扉は限定され、建築基準法上の自然排煙を行うには別途排煙口が必要となった。意匠の復元において排煙口の設置は困難であるため、避難安全検証法により、排煙を免除、内装制限なしとし、木化粧材による内部意匠の復元を実現した。



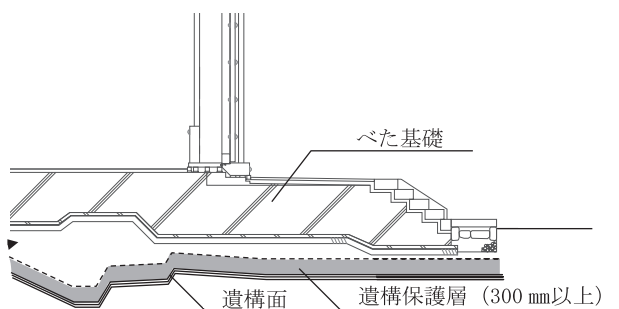
図一 4 食堂計画平面図



図一 5 食堂計画断面図



図一六 鉄骨躯体+仕上げ木部アクソメ



図一七 遺構と基礎の関係

4. 伝統建築における設計施工一貫 BIM

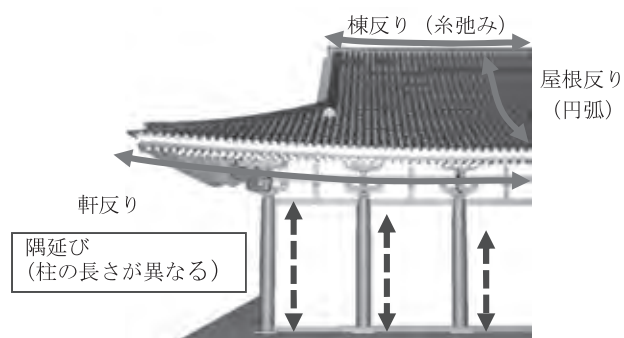
本プロジェクトは、設計施工一貫で BIM を活用した。BIM 効果の一つにフロントローディングがあげられるが本プロジェクトでは設計段階で、工事担当者、堂宮大工や鉄骨ファブリケーターなどの施工者協力会社と BIM モデルにより、設計意図や施工性確認（納まりや施工クリアランスなど）について、活発なコミュニケーションを行った。共有方法としては、関係者が一堂に集まり相互にモデルを確認する意見交換会を実施した。意見交換会以外でもその都度関係者間で確認し、不具合があれば共有し、モデルの作りこみ精度を上げた。複雑で厳しい納まりが要求される条件下でありながら、各職能が一つのモデルを基に活発に議論することで「伝統技術」と「現代技術」の融合を実現した。

(1) 古代木造建築の屋根の特徴と課題

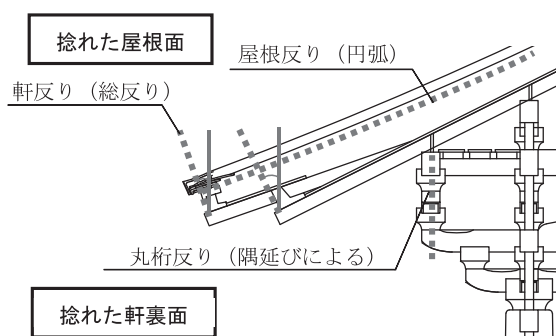
下記に示す屋根の曲線と納まりの通り、複雑で厳しい条件下で鉄骨の架構を納めなければならなかった。

(a) 屋根の曲線について（図一8, 9）

今回の軒先・棟、屋根の反りは全て異なる曲線で構成され直線部分はない。軒裏については、軒先と丸桁（隅延びの影響を受ける）で異なる曲線であるため、屋根面、軒裏面共に捻れた3次元の曲面となる。



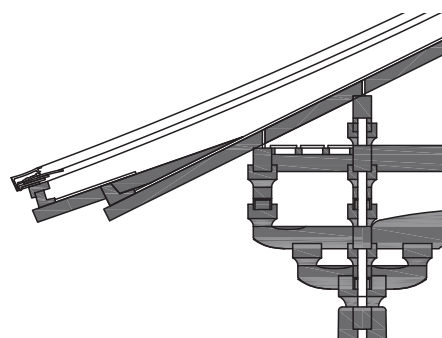
図一八 薬師寺食堂の屋根の曲線（全体）



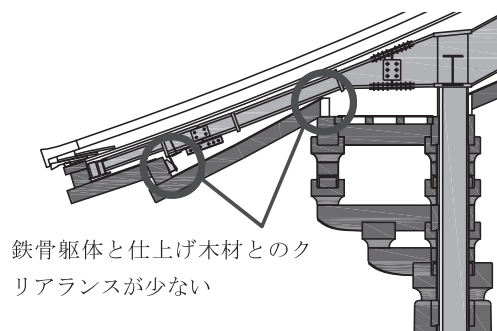
図一九 薬師寺食堂の屋根の曲線（軒先）

(b) 納まり（図一10, 11）

創建当初の復元案では軒の懐が薄いため、躯体と仕上げのクリアランスが極めて少ない。鉄骨の精度がそのまま仕上げの精度に大きく影響するために高い鉄骨精度が求められる。



図一十 復元考察時の軒断面図



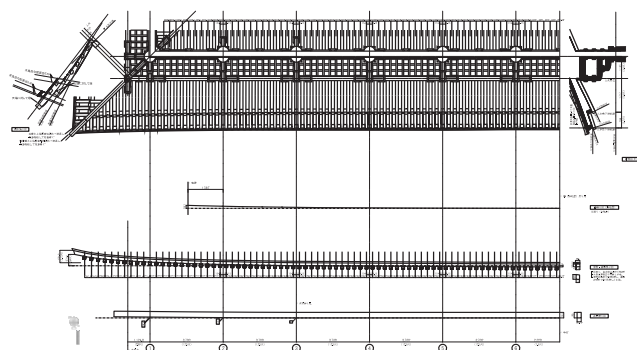
図一十一 躯体を鉄骨とした場合の軒断面図

(2) 規矩術（きくじゅつ）とは

日本において伝統的に使用されてきた曲尺（さしがね）を用いて部材の接合部や構造部の実形を造り出す図式解法で「規矩術」というものがある。その発生はかなり古いと思われるが、当初は経験的なもので、江戸時代に入って和算学を支えとして発展した。日本の伝統建築では、複雑な3次元曲面をもつ屋根の軒反りでさえも、このシンプルな道具である曲尺を巧みに用いた規矩術によって、木部材の加工を行ってきた。

(3) 規矩術による伝統建築のBIMモデル（図—12、13）

この伝統的な規矩術により屋根形状を3D-CADでデータ化することで、木と鉄骨の厳しい納まりを検証した。規矩術の手法を完全に把握した上で、これらをBIMプロセスにおける3D-CAD上で実行し、仮想の3次元空間に規矩術を適用した屋根形状を構築した。具体的には、屋根面は複雑な曲面になるため、鉄骨部材も含めて3次元曲面のデータ化に有効なソフト「Rhinceros^{注2)}」でモデル化し、鉄骨部材の詳細はこのモデルをベースに「Tekla Structures^{注3)}」に変換して詳細情報や属性を付加した。設備関連は「Reblo^{注4)}」これらのモデルを統合し、干渉確認を行い、設計段階で不整合のない統合モデルを完成させた。



図—12 食堂規矩図（軒廻り図）

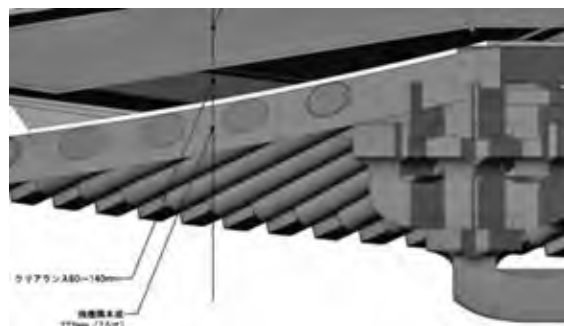


図—13 規矩術を用いた統合モデル（BIMモデル）

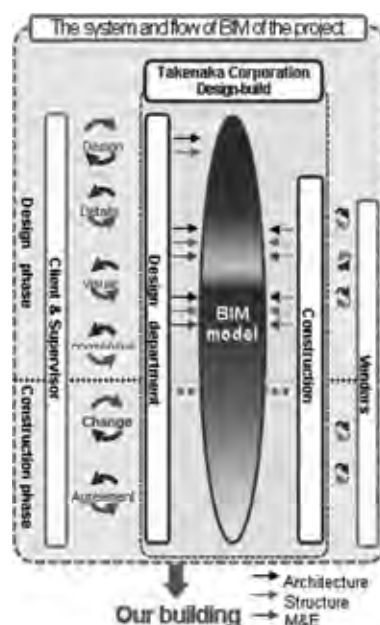
(4) BIMモデルによるフロントローディングと活なコミュニケーション（図—14、15、写真—1）

本プロジェクトのように複雑な厳しい納まりが要求される条件下で、宮大工や鉄骨ファブrikレーターなど、複数の異なる施工業者と施工方法や納まりを調整していくためには、BIMは欠かせない。請負形態による制約・制限もあるが、以下の設計施工一貫BIMフローにみられる通り、フロントローディングを図ることができれば、生産性の向上を品質確保に期待ができる。

建築主や監修者に対しては、このBIMモデルを基に部材プロポーショナルやディテールの納まりについて承認説明を行った。従前の2次元の図面による説明とは違い、実物に限りなく近いモデルを3次元であらゆる方向から提示したため、専門家ではない建築主に対しても、視覚的に理解しやすいという効果があり、スムーズに合意形成を行うことができた。



図—14 木仕上げと鉄骨とのクリアランス確認



図—15 設計施工一貫BIMフロー



写真一 1 BIMモデルを投影した作業所での打合せ（建築主・監修者・設計者・工事担当者・堂宮大工・鉄骨ファブリケーター）

(5) 現寸図検査とBIM（写真一 2）

寺社建築では伝統的に現寸図による目視確認が行われる。今回、現寸検査は設計段階と施工段階の間に行われた。この現寸図検査では、設計段階で関係者と合意形成された3Dモデルを実際の大きさに2次元情報として出力し、板の上に描くことで、屋根の反りや意匠部材の形状、仕上げ材の納まりを最終確認した。現寸図は、一般的に板の上に墨で線を引く板図で行われる場合が多いが、本プロジェクトではBIMモデルを適宜活用し、原寸図作成と検査の効率化を実現した。

この検査により、軒の反り形状や斗組等の仕上り材寸法の微調整が行われ、デザインがブラッシュアップされた。この微調整による変更は、速やかにBIMモデルに映させ施工段階に引き継いだ。前述のように、屋根の仕上げと軒裏間のクリアランスが非常に小さいため、鉄骨の躯体や2次部材である取り付け下地の位置や精度管理が重要となる。そこで、鉄骨ファブリケーターとのデータ共有を行うことで、施工時に2次部材データの位置を決定し、各部材同士の干渉の事前チェックや、その結果発生する本体鉄骨の変更などの3Dモデルへの反映も行った。



写真一 2 現寸図検査状況

(6) 施工段階でのBIMの取組み（写真一 3～6、図一 16、17）

現寸検査の変更を反映したBIMモデルを施工段階に引き継いだ。今回の復興では、前述したように、屋根の仕上げと内装仕上げ間のクリアランスが非常に小



写真一 3 BIMモデルを投影した作業所打合



写真一 4 BIMモデルによる工事打合せ



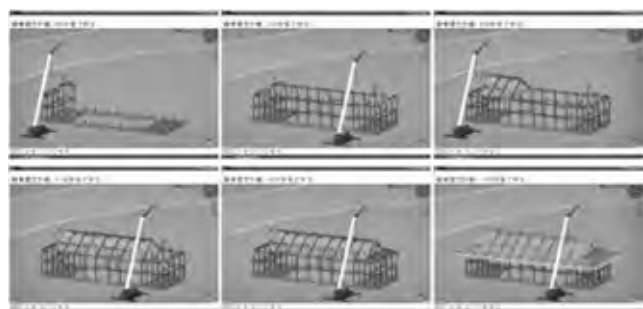
写真一 5 妻面鉄骨組立状況



写真一 6 現寸図型板による屋根曲面確認状況



図—16 BIMモデルの干渉確認



図—17 鉄骨建方ステップ図

さいため、鉄骨の躯体や2次部材である取り付け下地の位置や精度管理が重要となる。そこで、鉄骨ファブリケーターとのデータ共有を行うことで、施工時に2次部材データの位置を決定し、各部材同士の干渉の事前チェックや、その結果発生する本体鉄骨の変更などの3Dモデルへの反映を行った。これらの施工段階での変更も、3Dデータを介して設計図へのフィードバックを即時に行うことができた。これらに加え、施工者は鉄骨の建方手順の確認や、木仕上げ材の取り付け手順の確認にもBIMを活用した。また、施工協力会社との鉄骨建方打合せにおいてもBIMモデルを活用した。3次元で情報を共有することで、安全かつ効率的な作業計画の立案と実施につなげた。最終仕上精度に大きな影響をもたらす鉄骨2次部材及び、仕上部材の精度確認は、3次元測量と現寸型板により実施した。

5. おわりに（表—1、写真—7、8）

社寺建築は、伝統的にその時代の最先端の技術を駆使して作られてきた。薬師寺食堂においても、そうした歴史を理解し、将来を見据え、現代社会が取り巻く様々な条件を解決しながら建築した。本プロジェクトは、意匠的には創建当時の復元としながら、現代の多様な宗教活動を行うための大空間をBIMを駆使して鉄骨造で実現した。このことは、現代における社寺建築の一つのあり方と可能性を示していると考えられる。設

表—1 建築概要

建 物 名 称	薬師寺食堂
建 築 主	宗教法人 薬師寺
建 築 地	奈良県奈良市西ノ京 457 番地
建 物 用 途	寺院
階 数	地上 1 階
構 造 種 別	波形鋼板耐震壁を有する鉄骨造
延 床 面 積	649.79 m ²
建 物 高 さ	14.36 m
監 修	鈴木嘉吉氏 (元 奈良文化財研究所所長)
食 堂 内 仏 画	田淵俊夫氏 (東京藝術大学名誉教授)
復元基本設計／実施設計監修 ／監理監修	(株)文化財保存計画協会
内部基本設計／実施設計監修 ／監理監修	(株)伊東豊雄建築設計事務所
構造・設備設計／実施設計 ／監理	(株)竹中工務店
施 工	(株)竹中工務店
竣 工 年 月 日	2017.5.19



写真—7 完成写真（外観）



写真—8 完成写真（内観）

計及び施工の計画段階で、関係職種の事前調整が十分になされ、干渉や不整合がなく、合意形成が図られた情報を基に工事を進めることができれば、業務が効率的に実施され、技能者・技術者がより良いものづくり

を追求するために必要な時間を確保することができる。
BIM の活用は、そうした伝統技術の継承とサステイナブル社会の実現に繋がると考える。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) 薬師寺『史跡薬師寺旧境内保存整備基本計画』平成 24 年 3 月
- 2) 薬師寺『史跡等における歴史的建造物等の復元に関する専門家委員会
薬師寺食堂復元 検討資料』平成 26 年 3 月 28 日

《注 釈》

注 1) 「竹中式波形鋼板耐震壁」

竹中式波形鋼板耐震壁工法 (WAVY®) は、一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得した耐震壁工法。「波形鋼板耐震壁」は、波形鋼板の高い変形性能と地震エネルギー吸収能力を活かしたもので、粘り強く、しなやかに地震に抵抗する新しい耐震壁。従来の鉄筋コンクリート (以下 RC) 耐震壁と比較して、変形性能及びエネルギー吸収能力が高いのが特徴。また、壁重量が RC 耐震壁の約

1/5 ~ 1/10 と軽量であることから、長期荷重や地震荷重が低減され、合理的な設計が可能。

注 2) 「Rhinoceros」

TLM, Inc. (Robert McNeel & Associates として事業経営中) 社の 3D モデルソフト。詳細なモデリング用途で使用される。

注 3) 「Tekla Structures」

Trimles 社の 3D モデルソフト (IFC 対応の BIM ソフト)。躯体など構造体の BIM モデリングで使用される。

注 4) 「Rebro」

(株) NYK システムズの 3D モデルソフト (IFC 対応の BIM ソフト)。建築設備の BIM モデリングで使用される。

【筆者紹介】

本弓 省吾 (ほんきゅう しょうご)

(株) 竹中工務店 大阪本店 設計部

(株) 竹中工務店 設計本部 アドバンスデザイン部門
伝統建築 G

