

伝統木造建築保全のためのレーザー計測技術活用の研究

- 柱の傾斜分析及び3次元モデリング手法について -

○館風織*¹ 下川雄一*²

キーワード：木造、レーザー計測、点群データ、モデリング、データベース

1. 目的と背景

近年、BIMの普及に加え、建築・土木分野における地上型3次元レーザー計測技術の活用が徐々に増えつつある。例えば、大規模な建造物の調査や改修工事において既存の建造物や屋外空間をレーザー計測し、そこで得られた点群データをもとに建造物の劣化状況を分析したり、点群データを基に3次元モデルを作成し、改修計画立案に繋がっていったりする事例も見られるようになってきた¹⁾。しかし、その技術的な手法や適用性について報告された例は建築分野においてはまだ比較的少ない。そのような中、現在東本願寺阿弥陀堂（1880年起工、1895年完成）では、大樹の名改修工事が進行中であり、立命館大学を中心とした耐震調査研究委員会が組織され、構造、地盤、材料、建築士、大工などの様々な分野の専門家による調査研究がすすめられており、筆者らの研究室では当該委員会のデータベース・CAD系のWG活動として、阿弥陀堂の主要構造体の3次元データ作成や、建物性状の分析を実施してきた。

今後の大規模な伝統木造建築物の改修工事においては、レーザー計測による点群データの活用がより身近になっていくと予想される。それと同時に、実際の建物保全や改修工事におけるその活用実態や技術的な適用性に関するノウハウを蓄積していくことが求められるものと考えられる。以上のことから、本報では、筆者らが東本願寺阿弥陀堂の改修工事において実施している調査研究の活動内容を、①建物のレーザー計測から得られる点群データの活用、②点群データに基づいた3次元モデリング、および③部材モデルのデータベース化の3つの視点で整理し、その効果や技術的な妥当性について考察する。

2. 柱の傾斜分析について

これまでに東本願寺阿弥陀堂のレーザー計測を使用した調査として小屋組みのレーザー計測（2008年11月）、参詣席のレーザー計測（2009年7月）、参詣席丸柱の詳細なレーザー計測（2010年8月）を実施してきた。また、レーザー計測から得られた点群データを基に、小屋組の破損図作成や参詣席丸柱の傾斜分析、主要構造体の3次元モデリング、3次元上モデル上でのデータベース構築などを随時実施してきた。

3. 破損図の作成と柱の傾斜分析

破損図作成では、小屋組みの梁間、桁行の2方向の断面図を対象として実施した。具体的には、小屋組みの点群データの中から断面図を書きたい部分の点群データを輪切りして取り出し、それらを正投影した状態で部材の輪郭を2次元作図機能でトレースしていった。この作業により得られた断面図を破損図として、別途設計事務所が実測調査に基づいて作成した設計図との比較をした。その結果、設計図では柱割が均等間隔になっているのに対し、破損図では柱割が箇所毎に微妙にずれている点、設計図では水平、垂直に描かれている部材が破損図では微妙に傾いている点などがあつた。同時に、破損図を作成していない参詣席を対象として、設計図と点群データを単純に重ね合わせたところ、設計図内では、丸柱が垂直に描かれているのに対し、点群データの丸柱は、大きく傾斜していることが確認された。参詣席の丸柱は限られた本数で小屋組み全体を支えていることから、その傾斜状況を分析することが重視され、比較的傾斜が大きい丸柱6本を対象として詳細なレーザー計測を再度実施し、点群データによる傾斜分析を実施した。

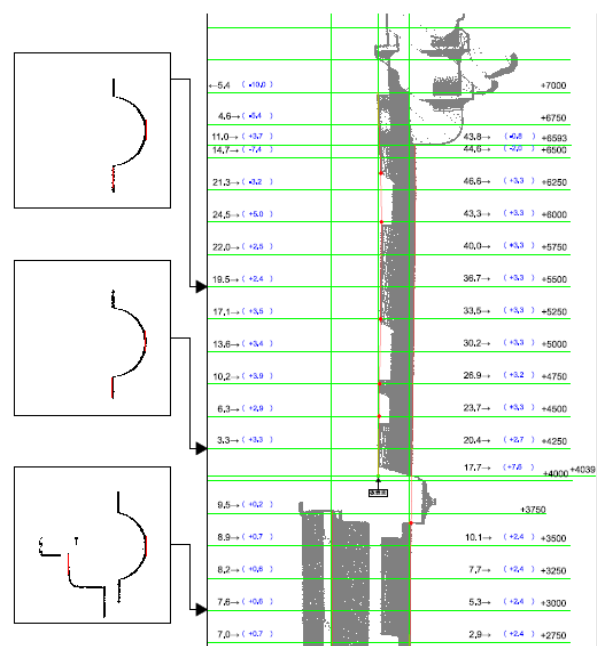


図1. 参詣席丸柱の傾斜分析図

3-1. 傾斜分析の方法

丸柱の点群データを側面から正投影し、その輪郭に沿って描いた立面線（図1の赤線）とその足元から別途描いた垂直線（図1の緑の垂直線）を比較し、250mm間隔の各高さで両者の水平距離（mm）を出していった。図1の左側の図は、主要な高さでの点群データを輪切りにした平面図である。これを各丸柱について東西方向、南北方向の2方向でそれぞれ実施した。

3-2. 傾斜分析結果に関する考察

別途設計事務所で実施された実測（下げ振り）による丸柱（1本のみ）の傾斜分析結果と比較したところ、ほぼ同様の傾斜傾向がみられた。+6000mmの高さで同一方向に点群では43.3mm、実測値では56.3mmの傾斜が確認された。

各高さで双方の傾斜距離を比較したところ、平均8mm程の誤差があった。誤差の発生する傾向としては、柱の足元から上部に上がっていくにつれて大きくなり、下げ振り方式で得られた数値よりも点群を基に分析した値のほうが小さかった。この結果から、レーザー計測の際にトータルステーションを用いて求めた水平・垂直角度に微妙な誤差があった可能性が考えられる。また、現在のレーザー計測の精度では数mm～十数mm程度の誤差が発生してしまう。このため、点群データを活用してより高い精度の傾斜分析を行うには、計測器の精度の向上が期待される。

4. 小屋組み部材の3次元モデリング

4-1. モデリングの目的

耐震調査における構造解析のために、屋根全体の荷重を調べる必要があった。そのアプローチの一つとして、3次元データでモデリングを行い、体積情報から部材の重量を求めるとした。レーザー計測によって得られた点群データから部材をモデリングし、その体積データと比重情報から重量をより実物に近い値で求めることが可能になる。また、得られた重量情報を構造解析や耐震補強のシミュレーション等に利用する。

4-2. モデリング手法

部材の3次元モデリングを行うにあたって、基となる点群データがCADソフト内に表示・操作できること、部材の湾曲や断面形状の変化も再現可能なソフトを使うことが条件となる。検討の結果、CADソフトはAutoCADを用いることとした。ロフト機能によって形状やサイズの異なる断面線を基に1本の部材をモデリングしたり、湾曲した部材も作成できる。且つ、AutoCAD用の点群編集プラグインソフト^{注1)}を使用することでAutoCAD内で点群データを円滑に操作することが可能である。

4-3. 部材モデリングの方法

- ①読み込んだ点群データを輪切りにする（図2）。
- ②次にそれぞれの断面をなぞるようにポリラインで断面

線を描く。この時、形状があまり変化していない箇所では断面同士の間隔を大きくし、形状の変わりやすい部分では断面間隔を短くして湾曲面も再現できるように適宜間隔を調整する。

- ③断面線をロフト機能で連結させることでソリッドモデルとして部材モデルを作成する（図4）。

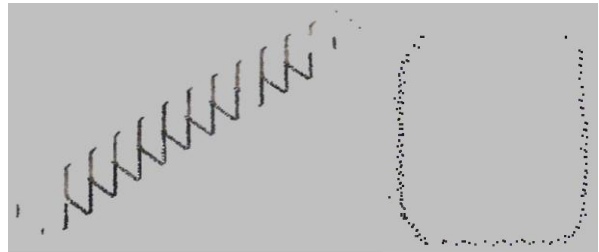


図2. 基となる点群データとその断面

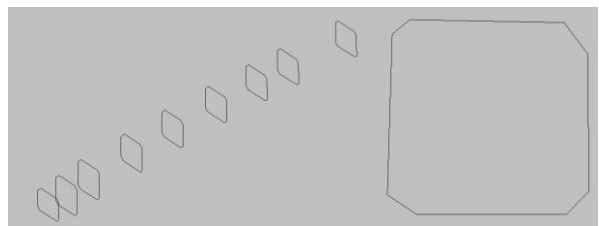


図3. 断面線を引いた状態とその断面

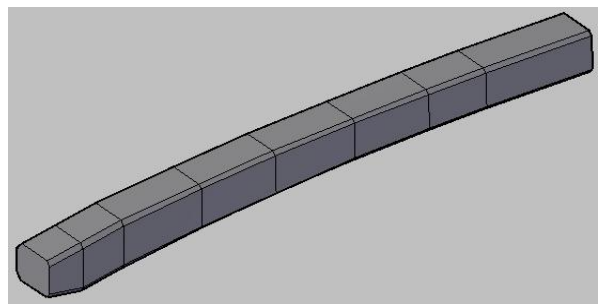


図4. 断面同士をつなげて作成したソリッドモデル

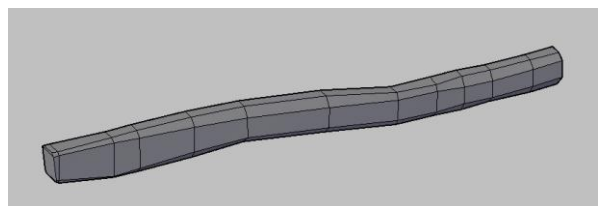


図5. 細かく湾曲した部材

4-4. 仕口のモデリングについて

点群データでは継手の位置や形状が不鮮明な箇所も多いため、それらを考慮せずに作成した部材が多い。これに対し、構造解析の資料として活用するためには、部材モデルが実物と同じところで分割されている必要がある。今回は、その形状が確認しやすい台持ち継の継手のモデリングを、束踏や土居といった比較的断面の大きな部材を対象として実施した。具体的な方法として、設計図等から継手の位置を特定し、ソリッド編集機能で部材端部を台持ち継の形に加工した。その他の比較的断面線の小さい部材に関し

ては、仕口形状の正確さによる体積への影響が低いことや、作業を効率化する点を考慮し、単純に部材方向に垂直な面で切断するだけとした。

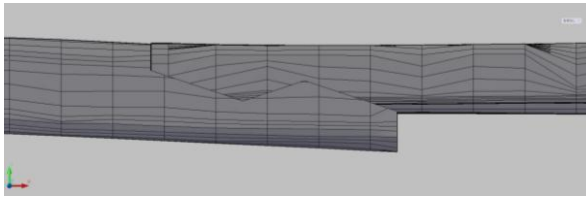


図 6. モデリングした、台持ち継ぎの仕口

4-5. 部材モデリングの考察

点群データを基に作成したモデルに関しては、後述する実測や設計図を基に作成したモデルよりも、より実物に近い形状で再現できたと考えられる。しかし、ポリラインを作成する間隔や形の複雑さによっては、データ量が大きい点や、断面線の作成に時間がかかるといった問題もあり、部材モデリングにおける精度の最適化や、作業の効率化は今後の課題である。

5. 点群が欠けている部分のモデリング手法

これまでに述べたモデリング方法は点群が計測されている部分でのモデリング方法であるが、レーザー計測機が設置できないなどの問題で点群を取得できない部分が多々存在した。そのような部分のモデリング方法として、二つの方法でモデリングを行うこととした。一つは、先行して制作された設計図を基にモデリングする方法である。基本的にこの方法でモデリングを行うが、設計図からも形状を読み取ることが困難な箇所、部材の位置関係が把握しにくい箇所は実際の現場で観測、実測しながらモデリングすることとした。モデリング環境については、現場で限られた時間で作業するために操作性の高さが必要である点などを考慮し、CAD ソフトを SketchUp に変更することとした。バージョン 8 からモデルの体積を求めることができるようになったため、後々重量用算定のデータベース化に応用することもできる。

5-1. モデリング手法

現場での実測の準備として、AutoCAD で作成済みの部材モデルを事前に SketchUp で読み込んで、相対的な位置関係を把握しやすいようにした。また、モデリングに必要な平面図、断面図などを読み込んで 3 次元空間の中に適宜配置した。

現場では、屋根裏にノート PC を持ち込み、柱や部材の立体構成や寸法を確認しつつ図面データや既存の部材モデルを参照しながらその場でモデリングしていく。軒裏など寸法を測ることができない場所などは設計図を参考にした。また、現場から帰っても作業できるように、写真を撮ったり野帳を作成してそれらを参考にモデルを作成し

た。母屋材といった部材は、屋根の両端を結ぶ 1 本の長い部材モデルを作成し、ソリッド編集機能で継手位置での分割を行う。

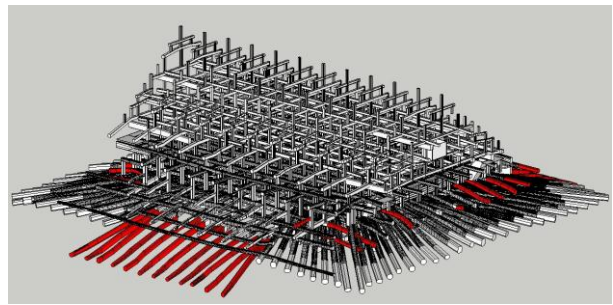


図 7. AutoCAD でモデリングした部材

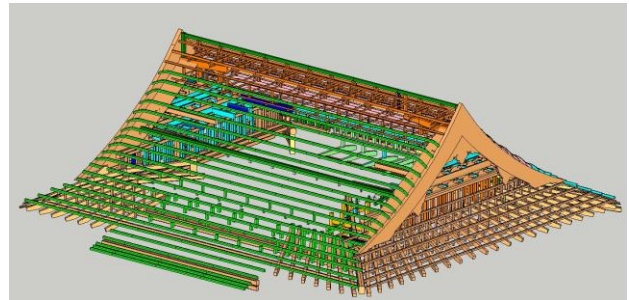


図 8. SketchUp でモデリングした部材

5-2. モデリングの考察

モデリングした部材の多くが直線的な形状をしていたため、4-2 で述べた方法に比べ効率よくモデリングが行えた。しかし、この方法は設計図や実測結果を基にモデリングを行うため、精度の面では点群を基にするよりも若干劣ると考えられる。

また、AutoCAD と SketchUp の 2 種類のデータが存在するため、ネイティブデータとして一元管理ができないという問題もある。

6-1. 部材モデルの統合

部材モデルは数が非常に多く、データも重いいため、AutoCAD はもちろん、SketchUp においても、モデリングしたデータを快適にビューイングすることは困難であった。また、2 つのデータを一元管理し、データベースを構築する必要があることから、部材モデルや部材情報を一元的に集約してデータベースを構築することで情報確認作業を効率化する環境について検討した。使用ソフトは、Navisworks Manage とし、AutoCAD と SketchUp のモデルを読み込んだところスムーズにビューイングできた。

また、このソフトは外部参照ソフトのため、ネイティブデータとリンクしており、部材モデルの形状を修正しても、それが反映されるので、データに修正が発生しても対応することができる。且つ作成したモデルに体積や比重、重量などといった各種情報を付加することが可能である。この

ような特徴から、同ソフト上で部材情報を付加し、データベースを構築することとした。

6-2. 部材モデルへの属性情報付加

AutoCAD の部材データと SketchUp の部材データを統合する。このとき AutoCAD の部材は、データ量の関係から、モデリングの段階で束踏や初重梁といった材種ごとにデータが分割されているため、データ統合は容易である。SketchUp で作成した全部材モデル（約 1360 個）を一つのファイルで NavisWorks に統合することはできなかったため、材種ごとにデータを分割し他の地に統合した。

プロパティ機能でユーザーデータを定義し、部材モデルに属性情報を付加する。付加する属性情報は以下のとおりである。

- ① 部材名
- ② 種材
- ③ 体積 (m³)
- ④ 比重 (mg/mm³)
- ⑤ 重量 (体積×比重、t)
- ⑥ 破損状況
- ⑦ 補修内容
- ⑧ 補修仕様
- ⑨ 締め金物 (枚)

①から⑤までは情報付加が可能だが、⑥から⑨は今後の耐震工事の状況に応じて付加していく情報のため、現段階では未入力とした。

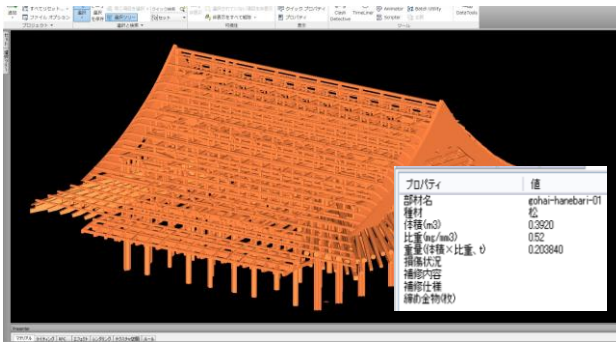


図 9. 統合された部材モデルと付加された属性情報

6-3. 部材の統合と情報付加の考察

CAD ソフトにて全部材モデルを快適に閲覧することはソフト、ハード面で厳しかったが、統合後はスムーズに部材形状や付加された属性情報を確認できるようになった。しかし、情報の付加は、部材ごとに一つ一つ手動で情報を入力する必要があり、その作業に膨大な時間がかかってしまうことが問題であった。また、モデルを修正した際にその形状の変化は反映されるが、体積情報の変化は反映されないため、属性情報の更新もその都度行う必要がある。これら情報の付加、更新の作業をどのように効率化するか今後の課題である。

7. 考察

本報では、東本願寺阿弥陀堂をケース例に点群を基にした建物の傾斜分析、伝統木造建築物の部材モデリング、データベース構築の方法とその結果について述べた。その結果いくつかの問題が明らかになり、今後同様の作業を行う上で以下の条件を満たす作業環境が求められることが分かった。

- ・点群データの閲覧・操作ができる
- ・ロフト機能のような機能による柔軟性の高い部材モデリングができる
- ・体積を調べられるモデルデータのモデリングができる
- ・多数の部材をモデリングしてもスピーディーに扱える
- ・属性情報の定義が柔軟に行える
- ・与えた属性に応じて、柔軟な集計やビューイングができる
- ・仕口のモデリングがパラメトリックに、かつ短時間でできる

また、それらの条件を一つのソフトで満たすことができる、もしくは上記の中のそれぞれ違った条件を満たすソフト間での連携が容易であることが必要なことも分かった。

8. 今後の展開

上記の条件を満たす環境の調査研究を行い、今後同様の活動を円滑に進めるための環境整備について検討を進めていく。

注

注 1) 使用したプラグインソフト、「PointCloud」は点群を AutoCAD 内に表示するためのソフトである。点群の表示だけでなく、分割、点サイズの変更など各種操作が可能である。

[参考文献]

- 1) 田中泉：3次元レーザースキャナによる破損図の作成「唐招提寺金堂」における奈良国立文化財研究所の試み、建築雑誌 2000年11月号, pp64-65
- 2) 1)「町家再生の技と知恵 京町家のしくみと改修のてびき」編著者:京町家作事組-2004年
- 3)「文化遺産のレーザー計測 3D Laser Scanning for Heritage 考古学と建築のレーザー計測に携わるユーザーのためのアドバイスと指針」著者:イングリッシュ・ヘリタージュ-2007年
- 4) 下川雄一・鈴木祥之・須田達：レーザー計測に基づいた伝統木造建築のCADデータ作成手法、歴史都市防災論文集 Vol. 3, pp83-90, 2009. 6
- 5) 加戸啓太・平沢岳人：伝統木造建築物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, 877-886, 2011, 4

*1 金沢工業大学大学院工学研究科建築学専攻 博士前期課程

*2 金沢工業大学環境・建築学部 建築学科 准教授