文化財の歴史継承を支えるデジタルツイン
―大本山永平寺重要文化財19棟における点群測量と利活用への取組み―

池内（いけうち）　匠（たくみ）
清水建設㈱ 設計本部 社寺・文化承継設計部

1　はじめに：歴史的建築の現状記録の意義

我が国の歴史的建造物は木造建築が多く、経年劣化や、火災、地震等による消失のリスクと常に隣り合わせにある。したがって、不測の事態に備えた「精緻な記録」の有無が、その後の保全や修復、復元において極めて重要な役割を果たす。

2016年の熊本地震により甚大な被害を受けた阿蘇神社において、当社は楼門等の復旧工事に携わった。倒壊した膨大な部材を一つひとつ調査し、往時の姿へと戻していく緻密な作業において、事前の正確な記録がいかに重要であるかを認識させる事例となった。

2019年には世界遺産のパリ・ノートルダム大聖堂、そして沖縄の首里城正殿と、国内外で象徴的な建築の火災が相次いだ。ノートルダム大聖堂では事前に取得されていた3次元点群データが迅速な修復計画を支え、首里城においても消失した姿を再現するためにデジタル技術を用いた再構築の試みがなされるなど、現状を精密に記録しておくことの重要性が、文化財保護の現場において改めて社会的に共有されることとなった。

歴史的建造物の修理や復旧の現場では、過去の図面や写真を根拠に検討することが多い。拠り所となる根拠が正確であれば、学術的妥当性の検討や合意形成は円滑に進み、より合理的な意思決定が可能となる。一度失われた姿を修復・復元し、次世代へ確実につないでいくためには、損壊の前にミリ単位の精度を持つ立体データを保存しておくことが一つの有効な手段となる。

こうした課題に対し、今回当社が取り組んだのが3次元点群計測である。これはレーザーを用いて対象物の座標と色情報を取得し、建物の歪みや微細な形状変化を「事実」として記録する技術である。

これまで当社では施工支援で用いることは多くあったが、今回初めて将来に備えて文化財を点群デジタルツインで保存することになった。

2　伝統を先端技術で守る大本山永平寺の意志

福井県の山深い地に座す曹洞宗大本山永平寺は、道元禅師の開創から800年近い歴史を誇る禅の修行道場である。現存する伽藍は、七堂伽藍を含む回廊で結ばれた重要文化財19棟を含む壮大な堂舎群であり、今なお多くの修行僧が厳格な規律のもと、日夜修行に励んでいる。

永平寺の長い歴史は火災との絶え間ない戦いで


写真1　永平寺七堂伽藍


写真2　永平寺唐門


写真3　永平寺山門


写真4　永平寺仏殿


写真5　永平寺大庫院


写真 6　永平寺唐門外部の点群計測


写真 7　永平寺仏殿内部の点群計測


写真 8　永平寺での小屋裏の点群計測

もあった。過去に 8 度もの火災に見舞われ、現存する最古の建物である山門ですら、約270年前の江戸時代に再建されたものである。

永平寺の各建物は、冬期の豪雪や土砂崩れ、倒木、さらには山間部特有の湿気による腐朽など、過酷な自然条件に日々晒されている。2010年には実際に倒木によって鐘楼が損壊する事象が発生しており、有事の際の迅速な復旧は、修行の場を守る寺内において極めて切実な課題であった。

そこで当社は、 3 次元点群計測によるデジタルツインの構築を提案した。ノートルダム大聖堂では、火災による屋根焼失以前に偶然にも取得されていた高精度の点群データが、再建にあたっての唯一無二の根拠となった。この事実に基づいた当社の提案に対し、永平寺側は、先端技術を活用して伝統を次世代へ確実に伝えていくことが「現代に生きる我々の責務である」と英断を下された。この修行の場を未来へとつながんとする強い意志に応えるべく、当社もデジタル技術による文化財保護の社会的使命を掲げ、本プロジェクトは両者の「共同調査」という形で実施されるに至った。

3　建築の知見に基づく計測計画の策定

本プロジェクトの本質は、計測そのものではなく、その先の「分析」と「対策」にある。当社は例えるなら「数値だけを測定する検査機関」ではなく、専門医が診察から執刀までを一貫して引き受ける「総合病院」としての役割を担っている。

計測は、社寺建築に精通した当社の設計者が、宮大工の技能を有する協力業者と一体となり実施した。宮大工の専門技能を当社の計測体制に組み込むメリットは、以下の 2 点である。

第一に、設計ニーズに対する深い理解である。宮大工が計測を担うことで、当社の設計者が真に必要とする「力の伝達点」や「変位の要所」を的確に捉えることができる。これは、設計意図を即座に汲み取れる高度な技能者との連携があって初めて成し遂げられるものである。

第二に、圧倒的な現場踏査能力である。軒先の先端や複雑な小屋裏、狭隘な床下など、進入や据え付けが困難な難所においても、宮大工の構造への深い知見と経験を活かすことで、建物全域にわたる精細な計測が可能となる。

このように、社寺建築をよく知る技能者が的確にデータ化し、それを当社の構造設計者が精査して耐震評価や将来の修理計画へとつなげていく。この一貫した責任体制があるからこそ、点群データは単なる記録を超え、建物を守り続けるための生きた「カルテ」となる。

4　寺院の日常に寄り添った計測の実践

共同調査は2023年 7 月から翌年 3 月まで実施された。最初の 3 ヵ月間で現地計測を行い、その後は膨大なデータの解析・編集期間に充てた。永平寺は厳格な修行の場であり、多くの参拝者もおり、計測にあたっては技術以上に「現場での配慮」が求められた。法要や参拝者の動線を妨げたり景観を損うおそれがある箇所では、閉門後の夜間に足場を組み、深夜には撤収するという工程で対応した。

現地計測後の数ヵ月に及ぶデータ編集により、取得した数億点のデータを結合・補正し、ノイズを除去して「建築情報」へと昇華させた。伝統建築の構造を知り尽くした技能者が、将来の修理に必要な構造の急所を捉えて編集することが、一般

的な測量会社との決定的な違いである。

5　高精細な点群による精密な空間再現

本プロジェクトで構築された点群データは、永平寺の重要文化財19棟すべてを、ミリ単位の精度で写し取った国内最大級のデジタルアーカイブである。取得データは1,200億点以上、約４テラバイトに及ぶ。図面では直線で描かれる部材も、点群では木の反りや柱の傾き、微細な歪みまでを忠実に記録する。この「現状の精緻な記録」を保存することは、物理的な修繕と並ぶ「デジタルの護持」であり、災害時の迅速な復旧を支える確かな根拠となる。３次元点群測量のメリットは以下のとおりである。

1)　自由自在な断面抽出

PC 上で任意の場所を即座に切断し、内部構造や部材の重なりを可視化できる。図面ではデフォルメされがちな小屋裏も、点群なら極めて忠実な再現が可能である。

2)　空中部材や複雑な形状への対応

巻尺では困難な曲がり材や、足場が必要な高所も、地上からのレーザー照射で正確に計測できる。彫刻などの複雑な立体物ほどその威力を発揮する。

3)　非接触による文化財の保護

部材に触れず機器を据え置くだけで計測できるため、貴重な文化財への負荷をゼロに抑えつつ、危険箇所の数値化も安全に行える。

4)　調査の効率化と再調査の不要化

現場作業を短縮し「早く、安く」精緻なデータを構築できる。空間を丸ごと記録するため、後から別の箇所の寸法が必要になっても、事務所の PC 上で即座に確認できる。

5)　図面作成の高度化

歪みのない正面画像(オルソ画像)を出力し、足場なしで正確な立面図や見上げ図を作成できる。これにより修理方法の検討や設計業務が大幅にスピードアップする。

6　点群活用や３D モデル化、展示体験会への展開

構築されたデータは、科学的根拠に基づいた「建物の健康診断」や、価値の再発見に活用されている。

1)　変形分析への展開

従来の変形調査は「点」の計測であったが、点群データから生成する「ヒートマップ」では、建物全体の歪みを色の濃淡で直感的に把握できる。これにより、柱の微細な傾きや積雪荷重による梁の沈み込みが数ミリ単位で可視化され、客観的データに基づいた精度の高い維持管理計画の策定が可能となった。

2)　高層文化財への測量技術展開

国宝明通寺の三重塔では、ドローンによるフォトグラメトリと地上型レーザースキャナーを融合させた「ハイブリッド計測」に成功し、高層文化財の記録手法として実用化した。



©永平寺・清水建設共同調査　測量：T&I3D

図１　永平寺仏殿点群画像(手前四分の一カット)

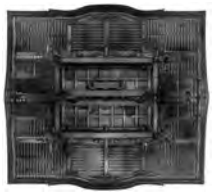


図２　永平寺唐門見上げ点群画像



図３　永平寺山門点群スライス画像



図４　永平寺山門四天王点群画像

3） 点群を高速で閲覧するソフトの開発

点群データは重く、扱いにくいため、iPad でもスムーズに閲覧できる「高速点群ビュワー」を開発した。これにより現場への展開が容易になった。

4） 点群から重量を算定するソフトの開発

AI を用いて点群データから建物の体積を算出し、総重量を算定して構造設計へ活かす「AI 重量算定ソフト」を開発した。

5） 3D モデル化への展開

永平寺山門・大庫院では、点群データから「3D ソリッドモデル」を構築した。これは将来、構造検討に移行する際の重要なステップであり、耐震診断・改修における解析や補強検討につながる確かな指針となる。

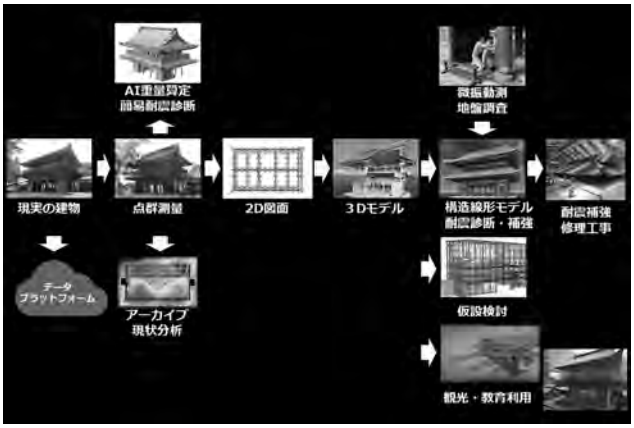


図 8　デジタルツインを起点とする文化財保護の一貫プロセス

6） 現場への展開

永平寺の後、当社の社寺現場でも広く点群計測が広まった。点群データによる足場・構造・設備検討が今では普通に行われるようになった。

7） 展示体験会への展開

点群が可能にした伝統建築の魅力を社会に発信するため、福井で 3 件、フランスで 1 件の展示体験会を通じてデータを公開した。点群画像や動画展示、点群 VR や立体モニターでの点群体験、犬型ロボットによる測量体験などを実施した。通常は見えない部分を可視化することで、教育・観光へ展開し、次世代を担う子供たちに建築文化への興味を抱いてもらい、将来の文化財保存の担い手を育む種まきとなるものである。



図 5　国宝明通寺三重塔点群画像



写真 9　永平寺唐門犬型ロボット点群計測



写真10　パリ日本文化会館での点群 VR 体験



図 6　永平寺山門 3D モデル



図 7　永平寺大庫院 3D モデル

7　結び：計画的な維持管理体制の確立に向けて

私たちの志は、こうした知見を結集し「日本の全文化財建築を測量し、デジタルで後世に遺す」ことにある。将来的には、全国の文化財データを一元管理し、活用できる「文化財データプラットフォーム」を構築し、国内外へと活動を広げたい。

日本の多くの文化財建築においては、不具合が顕在化してから対応することが少なくないと感じる。本来あるべき姿は、精緻な現状把握に基づいた長期的な修繕計画を立て、それに合わせて資金を確保し、実施に移していく計画的な管理体制である。今回のデジタルアーカイブ化は、合理的かつ持続可能な維持管理体制へと移行するための、最大の「礎」となる可能性を示した。永平寺が示された先進的な判断と行動は、日本の文化財保護における理想的なモデルを先駆けて示すものとなったと思う。アナログな職人技と現代のデジタル技術を共生させ、日本の建築文化が次の千年へと歩みを進める一助となりたいと願っている。