

AS472885

クイックスキャンによる歴史的建造物の保存活用にむけた試み： カスタマーセントリックな設計を目指した Revit データの VR 等への展開

大石佳知
アーキ・キューブ

安達基朗
シュルード設計

北尾靖雅
京都女子大学

学習の目的

- クイックスキャン（3D レーザーや写真計測）によるデジタル測量
- Recap を使った膨大な点群データの精査
- Revit と Unreal engine を使った保存活用設計システムの提案
- スタンドアロン VR システム「Lenovo Mirage Solo」による差別化提案

説明

近代産業遺産は日本に 4 万 5,000 件存在するとされている。2019 年には文化財保護法が改正になり、それらの産業遺産についても文化財の一分類として保存と活用が求められるようになった。つまり、建物のみならず、建物と共にある機械類や設備機器類などの動産も含めて、それらの歴史性を損なわずに保存し、かつ、安全性を担保しながら活用していくことが必要とされている。近代産業遺産の保存・活用は、簡単なプロジェクトではない。「例えば、歴史的建造物を文化遺産として登録するには、どう補修・修繕して、建物の安全性を担保するかを示す図面が必要である。それを作成するには、建物の状況を把握することが必須であるが、そのための調査には多くの費用と時間がかかる。とりわけ、産業遺産のような巨大な建築物の場合、各所の寸法を測るためには、足場を組むだけでも多大なコストがかかる。ゆえに、“現状把握”という、保存・活用の計画づくりや活用企画につながる初めの一步を踏み出しにくいのが現状である。

私たちの研究は、産業遺産のデジタル測量（クイックスキャン）で取得した点群データから Revit で 3D モデルを生成し、それを産業遺産の保存・活用の計画策定に活かすというものである。プロジェクトチームでは、生成した BIM データを設計者、自治体、地域住民などの関係者と共有する手法を研究した。我々が開発した測定技術は、建物の“クイックスキャン”を実現する仕組みである。レーザーによる非接触調査を可能にし、手作業では数日から数カ月かかる建物の測量を数時間から数日で完了させられるようになった。

また、未公開建築物の公開を目的に、VR（仮想現実）技術の応用も着想した。レノボのVRゴーグル「Lenovo Mirage Solo」デバイスを用いることにより、クイックスキャンで取得した点群データと、画像測量のデータを組み合わせ、位置情報と画像情報をVR空間上で合成し、そのデータをBIMシステムに組み込むことにより、VR空間の中で設計が行えるようにした。

その結果、設計者は、自身の設計した空間を利用者に体験させながら、フィードバックをもらい、設計内容を修正していくことが可能になり、さらにはユーザーの必要性を空間的に把握しながらユーザークライアントと一緒に設計を行う、カスタマーセントリックな設計を効率化させることを実現した。

スピーカーについて

大石佳知 / 有限会社アーキ・キューブ 代表取締役

新築やリノベーションで2010年頃からRevitを積極的に活用する設計事務所の代表。木造建築物等において、Twin motionやVRを用いたプレゼンを行っている。

安達基朗 / 株式会社シェルド設計 代表取締役

3Dスキャナやアーム測定機など高精度なデジタル測定技術の開発や関連する機械設計を行い、測定データの可視化による汎用化に関する技術開発を展開。

北尾靖雅 / 京都女子大学 家政学部 教授 工学博士（東京大学）

近代産業遺産の保存活用、地域計画、建築計画学を研究。デジタル測量技術とBIMの連携の文化的価値の創造を模索。



安達基朗

北尾靖雅

大石佳知

近代産業遺産の保存活用

近代産業遺産は日本に約 4 万 5,000 件存在する。産業遺産についても文化財の一分類となった。群馬県の富岡製糸場は世界遺産に登録された。2019 年に文化財保護法が改正され文化財の保存活用が求められている。近代産業遺産は、建物のみならず、建物と共にある機械類や設備機器類などの動産も含めて、それらの歴史性を損なわずに保存し、かつ、安全性を担保して市民一般に公開し、活用することが求められている。

保存活用の隘路（現状調査と保存活用企画）

近代産業遺産の場合、動産と不動産を一体的に調査するための費用を事前に準備する必要がある。しかし、大規模な産業遺産建造物の調査には多額の費用と時間がかかることが予測される。調査日程や費用はどの程度になるか？どの程度の調査を行う事が適切か？保存の水準はどの水準を目標とするのか？など、調査の前提に不確定な要素が多いので、調査予算の企画ができない。企画ができないから調査予算を起案できない。調査と企画・構想の間に矛盾/隘路がある。この矛盾/隘路をデジタル技術で克服する。

クイックスキャン

保存活用計画や活用企画を構想するために、デジタル技術を投入し、調査日程と費用を最小限に抑制することで、調査から企画へと保存活用プロセスを造り出すことが容易になる。クイックスキャンとは、調査から企画および企画構想に至る道程で一貫した作業として、測量事務所と建築事務所に連携して行う作業である。測量事務所はデジタル測量を行い点群データ（写真測量も含まれる）を作成し、その結果を設計事務所が Revit を使い、BIM で点群を分析し、既存建築物の空間的な可能性を調査して、事業関係者が空間イメージを共有する。この課程を建築文化遺産の「クイックスキャン」とよぶこととする。

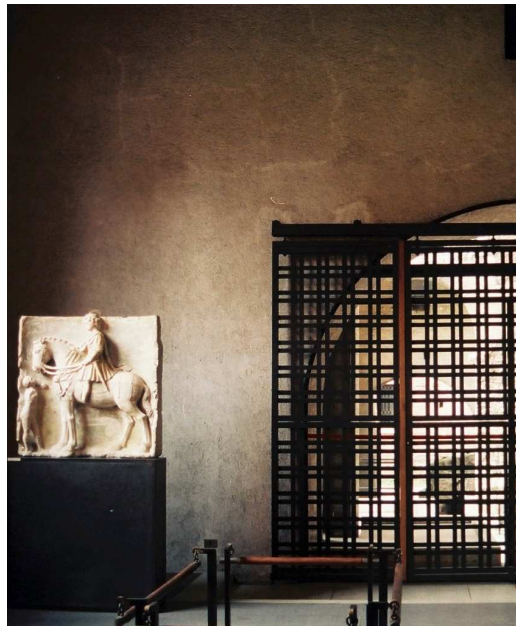
ヴェニス憲章（Venice Charter, 1964 年）

第 9 条

修復は高度に専門的な作業である。修復の目的は、記念建造物の美的価値と歴史的価値を保存し、明示することであり、オリジナルな材料と確実な資料を尊重することに基づく。推測による修復を行ってはならない。さらに、推測による修復に際してどうしても必要な付加工事は、建築的構成から区別できるようにし、その部材に現代の後補を示すマークを記しておかなければならない。いかなる場合においても、修復前および修復工事の進行中に、必ずその歴史的建造物についての考古学および歴史的な研究を行うべきである。

第 12 条

欠損部分の補修は、それが全体と調和して一体となるように行わなければならないが、同時に、オリジナルな部分と区別できるようにしなければならない。これは、修復が芸術的あるいは歴史的証跡を誤り伝えることのないようにするためである。



カルロスカルパが改修したカステロ・ベッキオ（イタリア）
古城を美術館に改修した事例。付加された箇所が明らかにオリジナルと区別されている。

ベクトルデータとラスターデータ

この発表では、建築文化遺産を保存活用するためのデジタル設計システムについて紹介してゆきます。デジタルデータはベクトルデータとラスターデータに大別することができます。ベクトルデータの利点とラスターデータの利点を組み合わせることで、文化財の保存活用設計システムとなります。文化財の保存ではオリジナルの部材を大切にします。

オリジナルと補修した部分の区別

保存活用するためには建築的に何らかの介入をする必要があります。ヴェニス憲章で建築的介入についてのガイドラインが示されており、オリジナルと補修した部分の区別をする改修工事を行うことが求められています。そこで、ヴェニス憲章に適応したデジタルデータを使った保存活用設計方法を提案します。

建造物の保存活用の考え方

リノベーション

建築物はその機能が時間の経過の中で十分に発揮し続けるとは言えない。そこで、建築物の機能性を改善し、同じ用途か、別の用途に建築物を使えるように介入する行為を指す。機能性の改善に重点をおく考え方。住宅で頻繁に使われるのは、住機能が不十分になったので、機能的な改善の必要性に対応した建築的な介入。

コンバージョン

英語で Conversion は通貨の交換、改宗、形・性質・機能などの転換、変換などを意味する。建築物に対応してこの言葉が使われる場合には、用途の変更とともに建築形態の大幅な改造が認められる、用途転換や建築形態の変更に力点が置かれる建築的介入で、改修により、新築の建物としての価値が重視される概念。

リハビリテーション

何らかの建築遺産が機能不全に陥っている場合に、必要箇所を修復して、元のように使用できる状態にする工事を指す。建築遺産をオリジナルの用途から変更し、別の用途にするという意味は含まれない。社寺の修理工事のように、用途変更のない事を前提に劣化や破損した箇所を特定し、部分的な修理をする事を重視する建築的介入。

アダプティブリユース

持続型社会形成や循環型社会現代といった現代社会が直面する課題に対して、歴史的文脈と場所性を尊重して、保存活用するための改修工事を指す。特に建築物の資源の有効活用に力点をおくことで、最小限の建築的介入により建造物に可能な限り付加をかけない改修工事。



アダプティブ・リユースの例（市電の車庫跡、AMSTERDAM, THE NETHERLANDS）

近代産業遺産の保存活用の先進地のオランダでは、保存活用の担い手となる市民グループや企業などを支援する「中間組織」が大きな役割を担う。投資家でもある保存活用の主体が、建物の現状を十分に把握し保存活用計画を作成するなど、運営者が主体的に保存活用事業に関わることで、社会性を持つユニークな保存活用が展開している。

カスタマーセントリックな建築文化遺産の保存活用の促進

市民が参加する文化遺産の保存活用にとって、BIM の役割は極めて大きい。BIM の 3 次元表現の機能により、意匠、構造、設備に関わる建築技術者はもとより、市民が建築文化遺産の保存活用に関わる議論に参加できるようになる。特に、デジタルデータを使う事により、測量/測定、企

画、設計、施工のみならず、維持管理や活用の担い手となる市民が文化遺産の空間イメージを専門家と共有できるので、カスタマーセントリック（或いはユーザークライアント）の概念で、地域の文化遺産の保存活用の進展が期待できる。



建築物の内部に鉄骨フレームが充填され内部から煉瓦造である事が分からなくなっている保存活用事例

建築文化遺産のもつ歴史的価値を毀損する保存活用といえ、事業の意義が問われよう。このような保存活用の工事計画を改めるために、建築物のデータの共有が必要となる。Autodesk の総合的な建築情報を扱う様々なシステム/アプリケーションで BIM データを基軸に異なる専門性を持つ、事業関係者が対等に保存活用設計に関与できることが求められよう。

技術開発のフェーズ

A クイックスキャン

デジタル計測とBIM

デジタル計測技術を用いて、建造物の形状や内部空間などの、建築物のボリュームを点群承応で取得し、Revit上でBIMデータに変換することで、迅速に建築物の基礎データを構築する。

B VR作成

BIMモデルからVR体験へ

クイックスキャンで獲得したBIMの建築物の基礎データをUnreal Engineへと展開することで、スタンドアローン型のVR機器に搭載することができた。このことで、Revitのデータを仮想空間へと展開できた。

C スケールモデル

BIMモデルから3Dプリンターへ

Revitで作成したBIMモデルに基づいて、建築物のスケールモデルの作成を試みた。Revitでは、3Dプリンターのノズルを考慮してBIMモデルを調整することで、スケールモデルが完成した。

D 保存活用設計

ベクトルデータとラスターデータ

写真測量と点群測量を組み合わせることにより、オリジナルの建築物と新たに付加する場合や、建築物の部分を改変する箇所などを、ベクトルデータとラスターデータの違いによりRevit上で表現し、オリジナルの部分の保存を十分に考慮する設計が可能になった。

近代産業遺産と地域；舞鶴市

京都府舞鶴市:城下町と軍港都市

舞鶴市は、舞鶴町として現在の西舞鶴に発足した。現在の西舞鶴には、かつて、田邊藩(細川家、牧野家)があったが、明治維新後には加佐郡の郡庁が設置されていた。豊岡県から京都府へと行政区分が変化し、舞鶴町が設立された。

明治34年(1901年)の舞鶴海軍鎮守府開庁に伴い、海軍工廠が開設された。物資輸送に必要な道路・鉄道等の運輸交通網や、艦艇等への補給用水を確保するための水道施設といったインフラが整備された。

現在の舞鶴市域は新舞鶴(東舞鶴)、中舞鶴、舞鶴と呼ばれるエリアから形成された。

現在の東舞鶴は軍港都市として、市街地が形成されてきた。大東亜戦争(太平洋戦争)後、旧軍港4市(横須賀・呉・佐世保・舞鶴)は、海軍省、海軍工廠等が解体されたので、旧軍港市を平和産業港湾都市に転換し、再建するために「旧軍港市転換法(昭和25年公布施行)」が制定され、旧軍用財産等の転活用を図る中で、平和産業港湾都市として、都市整備が進められてきた。

現在は、海上自衛隊舞鶴地方総監部、第3護衛隊群、第23航空隊、舞鶴警備隊及び舞鶴教育隊等の部隊が所在する。



日本海交通概図(出典:舞鶴市市制記念館資料)



新舞鶴町(1906年～)の市街地(出典:舞鶴市市制記念館資料)

舞鶴旧鎮守府倉庫施設 舞鶴海軍需品庫需品庫（重要文化財）

1901年(明治34年)に開庁した舞鶴鎮守府は、魚形水雷庫、予備艦兵器庫、弾丸庫並小銃庫、雑器庫並預兵器庫の4棟を整備し、舞鶴海軍兵器廠の武器倉庫として、需品庫3棟は、舞鶴海軍需品庫の需品倉庫を1903年(明治36年)までの間に整備された。これらの舞鶴旧鎮守府倉庫施設は、海軍舞鶴鎮守府開庁時に整備された倉庫施設で、海軍鎮守府の施設構成を理解するうえで重要で、設計図書等が完存しており、文化財としての高い価値があると評価されている。



3 棟の需品庫

常時未公開施設となっている需品庫は文部科学省が所管している。舞鶴市が管理団体である。需品庫 3 棟は耐震などが未整備で、屋根や出入り口に設けられていた軒の破損やレンガ目地の劣化がみられる。躯体に埋め込まれた丁番や格子窓などの鉄製品のさびが膨張して、破損する煉瓦が随所ある。躯体の維持のための修繕が急務とされている。



需品庫の内部

内部土間コンクリートの破損箇所は見られない。二階の化粧床板は雨漏りによる腐食が一部見られる。漆喰壁は薄利、ひび割れ、雨漏りなどの汚損が進行している。

建造物のデジタル計測

3 次元測定と B I M

建築産業で既存建屋を測定することについて、3 次元モデルの利活用はあまり知られていない。3 次元測定は、これまでの 2 次元での測定とは大きく異なり、ある一定の対象の空間を全体として測定する手法である。3 次元測定を BIM と連携させる事で、これまでとは異なる設計・監理手法へと展開できる。特に施主と設計者の間で空間イメージが共有できる他、設計者、施主が施工者とも空間イメージを共有して工事計画を策定できる。建築の測定が変化すれば、その後の設計や維持管理のプロセスにも何らかの変化が生じる可能性が十分に考えられる。

レーザー測量

現在のデジタル計測技術は、点群に集約されてゆく。点群データはドローンによる航空測量でも得られる。ドローンはどこでも簡単に飛行して調査できるわけではない。飛行には様々な制限がある。特に一般的な市街地での飛行は容易ではない。そこで、地上での計測作業に利点がある。測定は、レーザー測定と写真測定に分かれる。レーザー計測とはレーザー光（光は電波の一種）をトランジットから建築物に対して照射する際に発射される照射波が建築物に到達し、建築物から反射されて戻ってくる反射波との位相の違いから、空間の3次元座標を取得する方法である。この方法で、撤去予定の京都女子大学の旧E校舎を2018年5月に測定実験した。

レーザー測定実験

デジタル計測は、建物の高さ方向の計測にメリットを発揮する。3次元レーザー測定では、トランジットを地上に置いた状態から高さ25mほどまでは精度よく測定ができることが判明した（後述）。京都女子大学旧E校舎でも地上からの測定だけでも校舎の上部まで測定できた。建物内部の階高や小屋組なども、足場を組む必要もなく測定が可能である。ここでも建築物の測定に大幅なコストの抑制ができる。

レーザースキャナーの性能

レーザースキャナは、水平方向に360度、垂直方向に320度の範囲の座標を一度のレーザー照射で取得できる。一度の照射で、ある地上の定点から100m～300m程度の距離まで座標取得できる機器が一般的。レーザーを建物の表面に照射するので、建築物の裏側や建築物内部の座標点は取得できない。建築物内部は必要に応じて別途測定する必要がある。3次元レーザー測定機を設置した地点から半径300mの球状内に存在する建築物にレーザーが届く箇所すべての座標点を取得できる。



点群測定データの360度展開（VR空間表現）

点群測量したデータを360度展開した図を作成した。VRゴーグルにデータを格納すると360度の擬似空間体験ができる。レーザースキャナで取得された点群データは計測処理を行い、距離を求める事で図面化できる。点群データは3次元データである。メリットを最大限に利用するには、測定結果を3次元で行う事にメリットがある。そこでBIMが対応できる。Revitのような点群利用が可能なBIMソフトなら、3次元レーザー測定からBIMデータへの工程を経て、大幅に迅速且つ安価な現状把握が可能になる。京都女子大学の校舎のように壊される前に調査すれば、建物の記録保存もできる。

歴史的建造物のデジタル計測



舞鶴鎮守府旧海軍需品庫全景の点群表現

本図の角度から写真撮影は行えない。自由に描写のための視点場を定めることができる。図のように点群では質感のある建築物の形態データを再現することができる。建築物の内部と外部を同時に調査しているので、屋根の小屋組が部分的に見える。屋根が全て表現できないことは、レーザーが届く視点場に限界があるためである。こうしたデータを元図とする。

点群表現の利点と不十分な点

レーザースキャナで測定を行い点群データを取得することで、現場での測定漏れを最小限に抑制する事ができる。現場状況、降雨や雑草などの障害物の他、家具などが建屋に残存していることにより、十分に測定データが取得できない場合もあるが、手作業で測定することと比較すると大幅に測定漏れが減少し、設計者は、設計により一層、エフォートをかけることができるようになる。しかし、点群の座標軸は正確だが、必ずしも再現性に優れているとは言えない。そこで、後述する写真計測技術との融合が必要になる。

BIM モデルと文化財の修理・修復

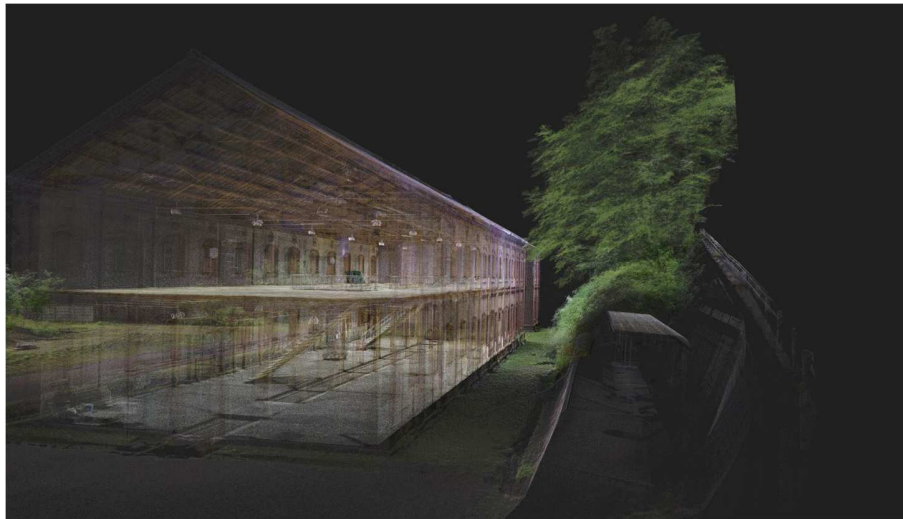
点群を BIM モデルで分析すると上図に示す表現となる。点群表現と比較すれば、質感に乏しい表現といえる。しかし、BIM は部材ごとにデータを構築する事ができる利点がある。文化財の保存では、部材ごとに現状を把握し、部材ごとに修理記録を残しておく必要がある。つまり BIM が基本的に持つもつ性能と文化財の修復とは類似点がある。なお、文化財の工事では触診が重視される。触診で得られる部材のデータは触診後に BIM 上で修整でき、同時に保存蓄積できる。この BIM モデルは、クイックスキャンの結果であるが、同時に、触診に必要な部材データの大まかな形状を表現している。BIM モデルは文化財の保存工事と記録のための野帳（データベース）としても使用できる。



舞鶴鎮守府旧海軍需品庫内部点群表現（内部1階）



舞鶴鎮守府旧海軍需品庫内部点群表現（内部2階）



舞鶴鎮守府旧海軍需品庫内部点群表現 2 (外部)

レーザー光線の密度によって点群表現は変化する。ドットの結合により仮想現実空間上に・配置されているのはドットであるために、ドットとドットの隙間から、それらの背後にあるドットが現れる。内部と外部を含む、空間の全体構成を把握する事ができることも、点群表現のメリットだと言える。点群表現の方法を工夫することで、次の動画のように、整理された空間イメージを作成することができる。

写真測量と点群測量の合成

多視点ステレオ写真測量

多視点ステレオ写真測量 (SFM) の手法は、写真を複数枚撮影し、パソコン上で Recap などの多視点ステレオ写真測量のソフトウェア (以下、SFM ソフト) に複数枚の写真を取り込み、それらの写真を結合処理することで、3次元データを取得する技術。SFM ソフトの内部では、画像中の特徴の抽出、隣接する画像との共通する特徴点を、画像素子、レンズ焦点位置に加え、光線との関係を解析する計算により、立体形状を求めてゆく。

最近は多くの市販の SFM ソフトが販売されている。測定の対象物、利用方法により最適なソフトウェアを選んで使用する。現場で使用する機材はデジタルカメラのみ。デジタルカメラも高画素であればあるほど、精緻な3次元データを取得することができる。レーザー測量と比較すると、機材費はかなり安価になり、撮影の準備も大幅に簡単になる。

こうした特性を考慮して、適切な撮影の順番を考えて、撮影してゆく事も大切。また、タイポイント (後述) を抽出し結合を行っているため、色が一色の壁や床などの特徴点が無い箇所の画像では、結合を行う事が出来ない場合がある。特徴点が写りこむ事を意識して撮影を行うことや、測定対象にマーカー (タイポイントになる目印) を設置し、特徴のある点を準備してから撮影を行うなどの工夫が必要となる。

オーバーラップ

SFM ソフトで複数枚の写真を結合して、3次元データを作成する。そのため、それぞれの写真をひとつに結合するために、画像同士が重なる部分が必要になる。

写真1の撮影箇所から写真2の撮影箇所へ移動して撮影した場合、「電信柱」が写真の右端から左端へ移動している。その際、「扉1」は写真2では写らず、「扉2」が写っている。

3次元データの構築技術

この撮影での移動距離では写真同士のオーバーラップが非常に少ないので、3次元データの作成はできない。そこで必要となってくるのが写真3の撮影である。

写真3を撮影する事で「扉1」と「扉2」が電信柱を挟み、横並びである事がソフトウェア上で認識されるので、写真が結合でき、3次元データへと向かう解析が可能になる。



3次元データの構築技術

タイポイント

SFMソフトは複数の写真と写真を結合するときに、写真の中から特徴的な点(タイポイント)を抽出する。上図で緑の点が抽出されたタイポイントである。これらの点を重ね合わせて複数枚の画像を結合する。上の写真のように、特徴的な点が抽出され、抽出された特徴点同士を結合して写真を数珠繋ぎにしてゆく。使用するSFMソフトにもよるが、同じタイポイントを見つけだす処理は、連続した写真から抽出してゆく作業の流れになっている。



タイポイントの抽出

撮影ルートとオーバーラップ

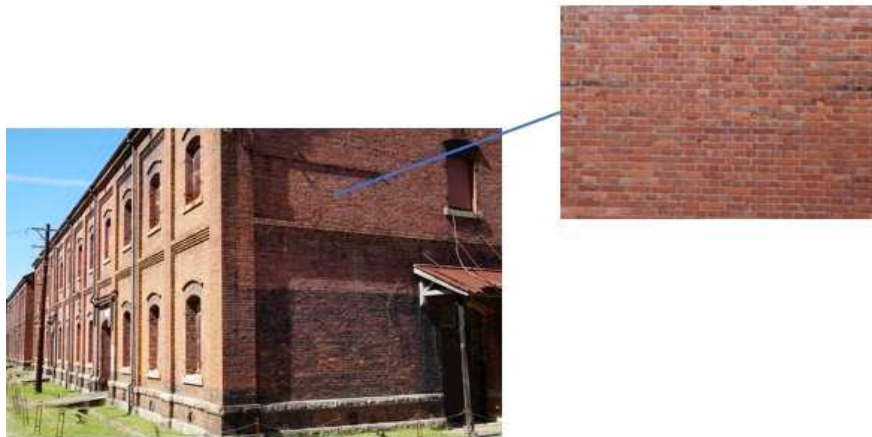
写真を合成するためには、基本的に連続した写真の方がより結合しやすいので、写真撮影ルートを検討することが必要となる。基本的には一定の距離を保ち、画像同士のオーバーラップを意識して、対象物を撮影するための適切な順番とルートで撮影してゆくと、3次元データを作成しやすい画像データを得られる。また、タイポイントを抽出し結合を行っているため、色がや凹凸面殆ど無い壁や床など、特徴点の抽出が困難な箇所の画像では、結合が出来ない場合もある。特徴点が写りこむ事を意識して撮影を行うことや、測定対象にマーカー（タイポイントになる目印）を設置し、特徴のある点を準備してから撮影を行うなどの工夫が必要。



測量的ための撮影ルート

タイポイント抽出が容易な壁面

写真測量を行うために、タイポイント（特徴点）を抽出する。需品庫のように歴史的建造物の壁面は素材や装飾、手造りによる不均質さなど、建築物の表面形状が均一でなく、複雑な形状をしている場合が多いので、特徴点を取得しやすい。一方、現代建築は表面が均一なのえ、壁面などの面の測定は難しい。前述のように写真測定では、測定対象に特徴点を与えるためにマーカーを打つことで対処できる。



タイポイントの抽出

写真測定結果

需品庫を見下ろす視点場から写真撮影は行なえません。しかし、写真測定を行ったあとに3次元データ化する事で、自由に描写のための視点場を定めることができる。写真測定では点群では得られない、再現性の高い建築物の形態のデータを得ることができる。上図では屋根が全て表現できないのは、写真撮影範囲に限界があるため。ドローンによる撮影データを組み合わせることができれば、屋根の形状を再現できる。

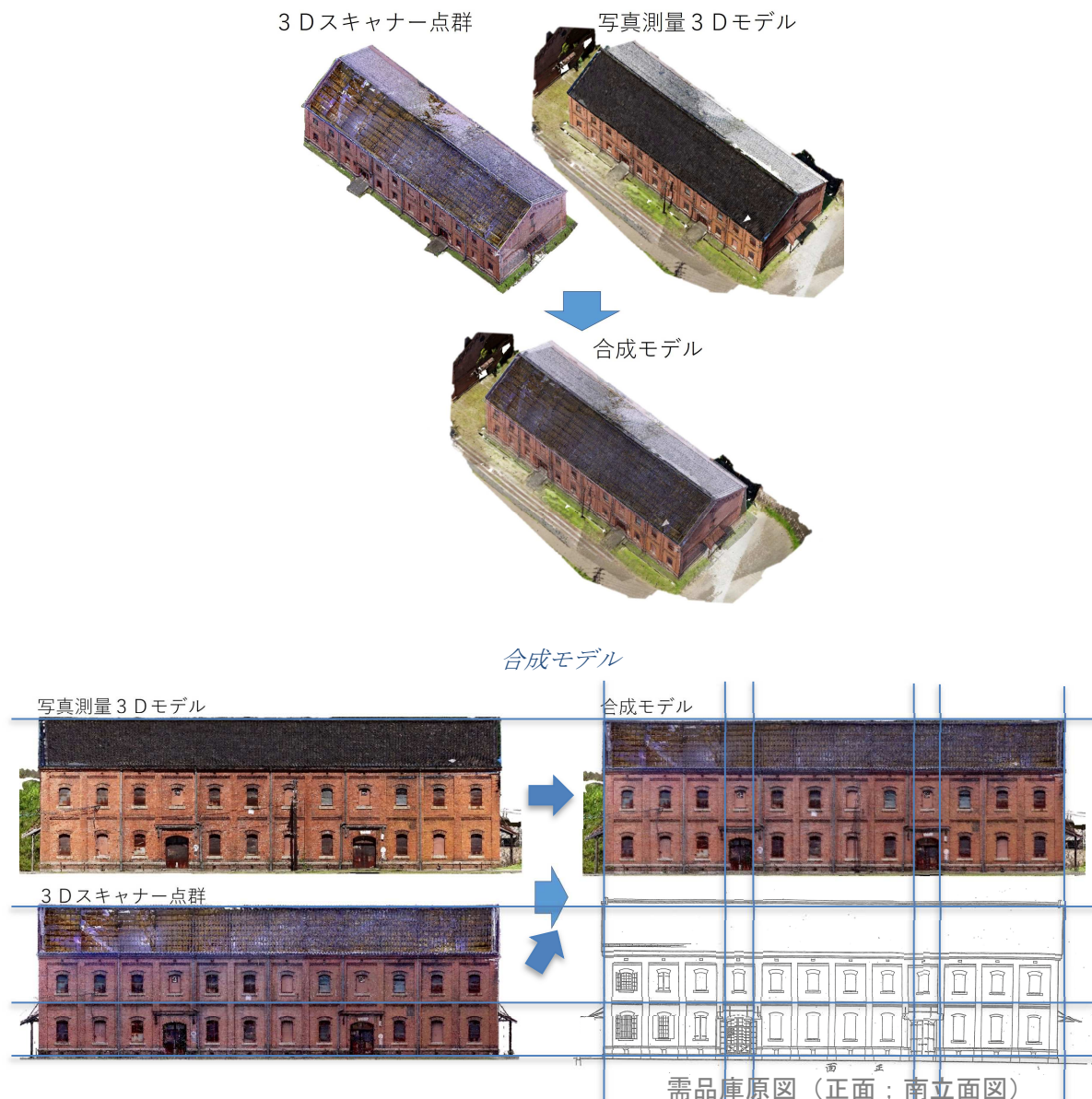


写真計測の結果

写真測定と点群測定の合成

写真測量と点群測量の合成モデルと原図との比較

写真測量は極めて点の密度が高い点群データと言える。しかし、レーザー測量で取得できるほど精度は高くない。一方、レーザー測量で得た点群の測定の精度は極めて高い。そこで、写真測量の精密な3Dモデルを点群モデルと合成することで、再現力と正確さを伴う測定結果を得ることができる。



需品庫の原図と写真測量、3D スキャナ点群との比較

写真測定と点群測定の合成

点群データと画像測定データは、それぞれに弱点がある。点群データは位置情報を細部にわたり仮想空間上に展開できる点の集合なので、仮想現実空間での再現性は必ずしも高いとはいえない。

一方、写真測定で得たデータは細かな点群として扱うことができる。しかしレーザー一点群測量に匹敵する精度の空間情報は得られない。

そこで、レーザー測量のデータと画像測定データを組み合わせ、位置情報と画像情報を仮想現実空間上で合成することで、再現性が高く精緻なデータで構成した合成モデルを造り出すことができる。後述する、文化遺産保存活用設計システムで、Revit 上で BIM と組み合わせ、設計をする時のオリジナルの建築物の状態を示す。設計の基盤となる空間データ。

設計の基盤となる空間データ

設計の視点場を自在に変化させることができる。

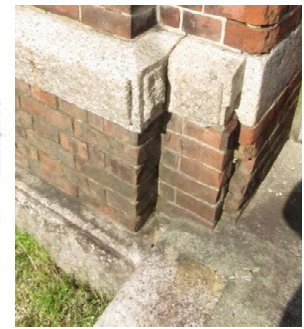
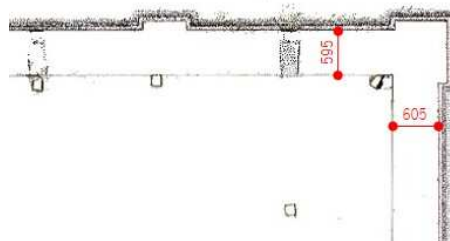
カスタマーは直感的に質感を伴い設計を評価できる

壁厚の測定

デジタル測量では壁の厚みも測定する事が出来る。通常のデジタル測量では、透過測定は出来ない。1回のデジタル測定では壁の厚みを測定するデータは取り出せない。そこで、建物の内側と外側のデジタルデータを、測定箇所を移動させて繰り返し測定する。

内部と外部の測定

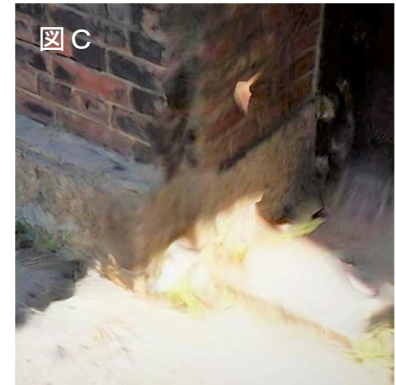
内部と外部のそれらの結果を結合する事により、外部と内部の平面上の数値の差を算出できる。この差が壁厚となる。レーザーや写真測量では地表面や床以外の文化遺産に触れることはない。非接触、非破壊で本来、物理的に測定ができない部分の測定が可能なこともデジタル測定の利点の一つ。



建物の壁厚の測量事例例

SFM ソフトで立体的に再構成

下図Cは、建物を正面からの写真撮影で作成した3次元計測結果。建物の奥行き情報が足りないため、立体的な写真合成が十分にできていない。2次元から3次元データを作成しているため、このようなことが起こる。図Aと図Bを比較する。図Aは点群と写真測定データを合成して得た精度の高い寸法が含まれている画像。図Bは同じ箇所の通常のデジタル写真映像。見分けがつかない。



点群+写真測量 (A 図)、写真 (B 図) と SFM ソフトで生成した 3 次元データの違い

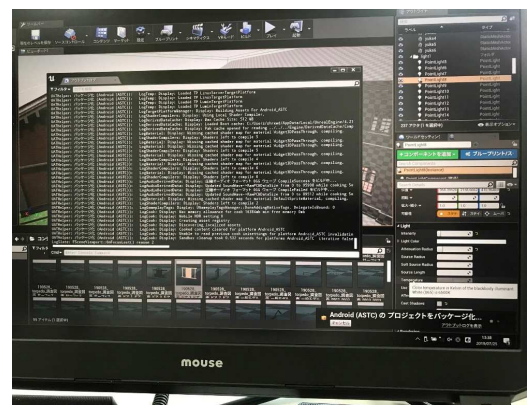
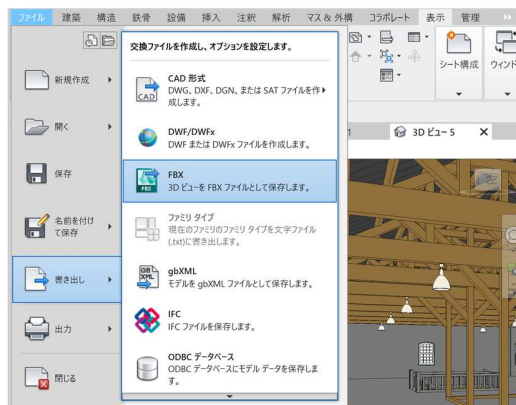
SFM ソフトと Revit の互換性

現場での写真の撮影枚数は、何枚撮影するのが必要で、適切か？という問題に正解はない。写真の枚数が多いと、精度や 3 次元データの再現性の側面からみれば、非常に有利な方向に働く。一方、現場での作業時間が長くなり、SFM ソフトでの処理時間も長くなる。データ取得の目的や用途に応じて適切な撮影枚数を考える事も大事。写真合成したデータは極めて密事な点群データと言えるので、Revit 上の仮想現実空間として表現できる。

BIM の仮想現実空間への展開

Unreal Engine

- (1) FBX データ作成 ; Revit で作成したデータを FBX 形式で出力する。
- (2) FBX データを UNREAL ENGINE へ ; Unreal Engine を起動させ、FBX ファイルを開きインポートする。コンテンツブラウザ内にあるインポートが完了したファイルを全て選択し、操作画面に乗せる。その後、対象物の大きさと、マテリアルごとの表現を設定する。
- (3) Lenovo-VR ゴーグルへ転送 ; アンドロイド上で動作するバッチファイルを作成し、V R ゴーグルへデータを転送する。



FBX 形式を使ったデータ連係

FBX を Lenovo Mirage Solo へ

VR のアプローチで大切なのは、カスタマーに仮想現実空間をストレスなく体験して頂くこと。VR 映像を再生するゴーグルは、カスタマーに対するプレゼンのツールとして、いつでも、どこでも使えるようなデバイスであることが理想。その意味で、高性能でありながら、スタンドアロン／ワイヤレスでの動作が可能な Lenovo Mirage Solo は、VR 設計のコンセプトにフィットした製品と言える。



LENOVO MIRAGE SOLO

Lenovo Mirage Solo は世界初といわれるスタンドアロン型のVR装置。Daydreamに対応するWorldSense搭載のVRヘッドセット。内蔵しているマイクロSDカードに、Revitで作成したBIMデータをUnreal Engineで変換して、データを組み込み、空間表現を調整することで、パソコンやケーブルを必要とせず、空間内の動きを疑似体験できる。

Google Chromecast で外部へ出力

従来、設計中の空間の評価は静止したパースやレンダリングにより作成したアニメーションで行ってきた。廉価なスタンドアロンのVRゴーグルが市場に出てきたことにより、建物のユーザーが空間を疑似体験して空間をどのように感じるのかを設計者は把握できるようになった。カスタマーが体感している空間を設計者などが共有して、カスタマーと対話により空間の評価と検証を行う。

需品庫内部のVR（仮想空間）体験

VRでは単に建物の現状を疑似体験するだけではなく、建物を構成する様々な部材同士の関係など、任意の視点から空間的に建物の状態を把握できる。特に高所など視認調査が容易には可能ではない箇所（この場合は屋根トラス）の状態を体感的に把握できる。改修工事の時の現場での大工や職人との打ち合わせなどに用いることができると考えられる。このことにより安全な作業計画を立てることが可能となるだけでなく、工事現場での文化財のオリジナルな箇所を損傷する可能性を低減できる。



需品庫内部の VR（仮想空間）体験

建築物の維持管理と保存活用

デジタル空間データベース

クイックスキャンで得たデータは様々な表現手法と様々なデバイスで、デジタル空間表現ができる。デジタル表現と表現手法には無限の可能性があり、全てを網羅することは不可能。

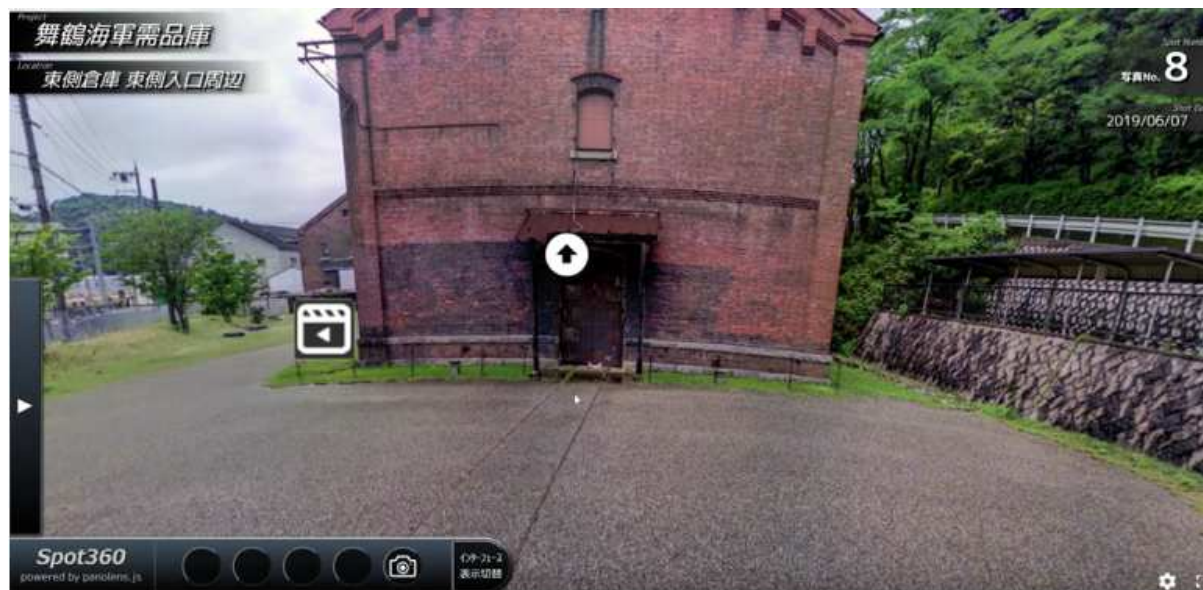
デジタル空間表現として①360 度映像、②点群映像、③BIM-ワイヤーフレーム映像、④VR ゴーグル映像を作成してデータベースとした。

①360 度映像は、空間の定点を中心に 360 度を撮影した映像。無線ロボットで移動する視点から 360 度を撮影して動画記もできる。この映像を VR ゴーグルで再生すれば、人間の頭の動きに応じて、空間の擬似体験ができる。なお、360 度映像は BIM データを構築する際の重要な資料ともなる。

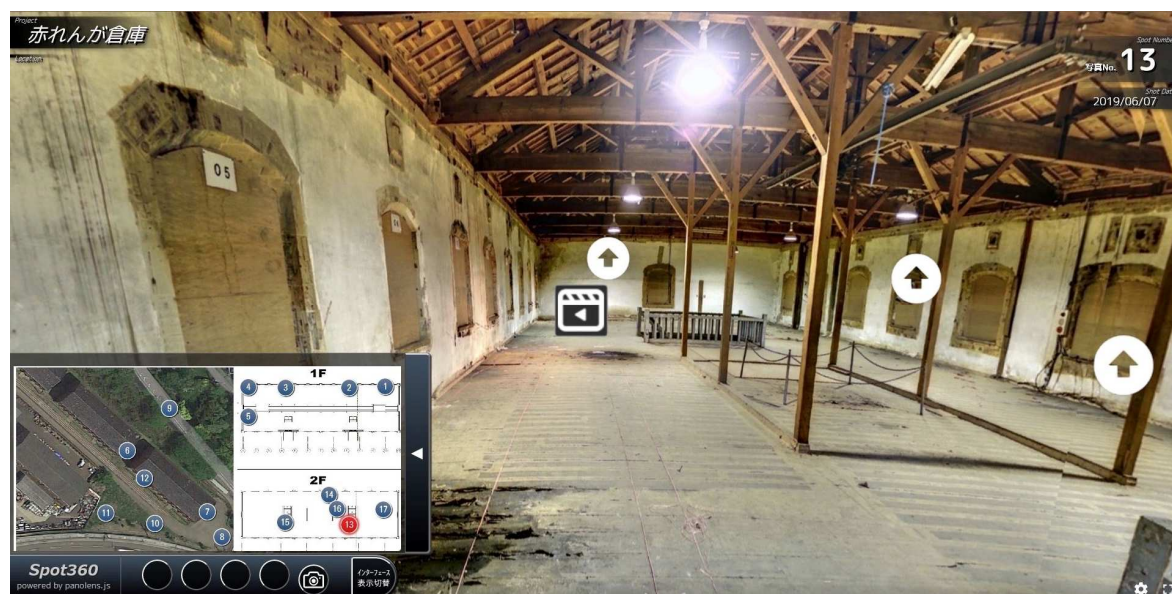
②点群映像はレーザーで調査した点群データを仮想現実空間に再現するものです。仮想現実空間上の視点場を移動させることで移動する視点から建物の姿を再現できます。点群データの座標変換を行えば、VR ゴーグルで再現できる全方位の 360 度の仮想現実空間も作成できます。

③BIM-ワイヤーフレーム映像は点群から作成した BIM データをワイヤーフレームで表現した映像です。

④BIM データを VR ゴーグルで再生できるデータに変換すれば、人の頭の動きに合わせた全方位を映し出す BIM の擬似空間体験映像ができます。



デジタル空間データベースのスクリーンショット 1



デジタル空間データベースのスクリーンショット 2
カスタマーが確認したい場所を選択する



デジタル空間データベースのスクリーンショット 3
カスタマーが必要とする空間イメージを提供

デジタル空間データベース

この空間データベースでは、ユーザーが仮想現実空間に入りたい場所（視点場）を定め、視点場から、どのような空間が展開しているのかを、空間表現の多様性を担保し、ユーザーの必要とする空間イメージにより近い空間イメージを提供できる。

動画やインタラクティブな 360 度画角の疑似体験映像を、パソコンからモバイルフォンまで様々なデバイスと画像の大きさで、映像データとして、空間イメージをカスタマーに提供できるユーザークライアント志向の設計プロセスを支援する。

デジタル測量から企画設計へ

BIM データと工事記録の保存

点群データを BIM で分析

クイックスキャンは非接触の調査方法である。部材ごとの触診はできない。文化材保護のための研究は触診で行う。触診調査を、どの段階で行うのかはクイックスキャンの結果から決めることもできる。触診を加えるとクイックスキャンでは BIM の特性をより発揮できる。触診で気づいたことや発見したことなどを記録して行く事ができる。写真や古い図面など、関連するデータも BIM に集約できる。BIM は工事記録を部位ごとに、時間軸に従って記録することができる。

BIMデータの利点

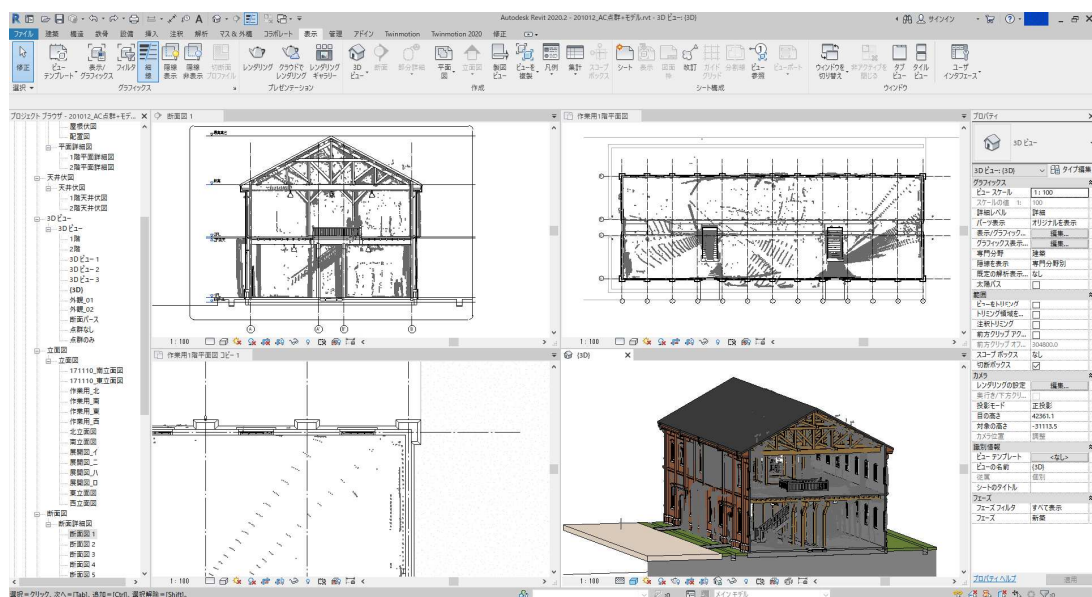
BIMでは部材ごとの属性をデータベース化できるので、触診で得た情報をBIM上で蓄積できる。必要に応じて、部材の厳密な寸法や状態等をBIM上に構築し、部位ごとの形状や状態を記録する。さらにBIMデータは、構造建築士や設備建築士などの専門家とも共有することができるので、建物の環境性能や構造的安定性に関する分析にも用いることが可能になる。

工事記録の保存

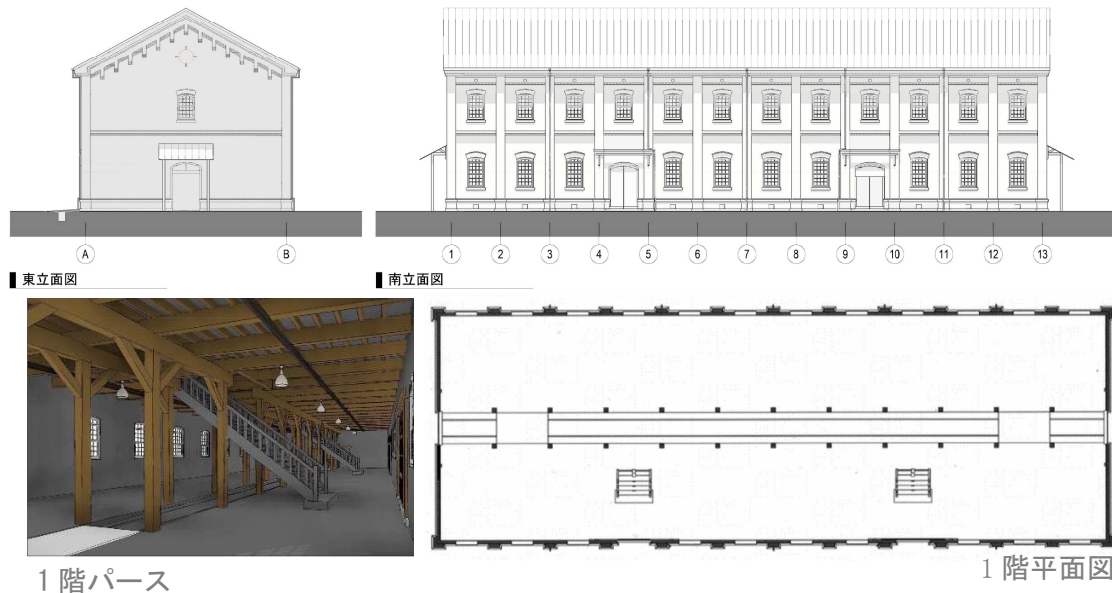
文化遺産建造物の保存の一環として、記録保存という重要な作業がある。現在は、修理報告書として、修理を担った技術者により紙媒体で記録保存されている。BIMを用いることで、冊子媒体では保存しきれない空間情報を保管する為の記録媒体としてBIMデータを使えると考えられる。この課題は今後の課題として課題の所在を示しておく。なお、BIM上で記録・蓄積された建築物の改修工事に関わるデータは記録として維持管理や将来の改修の基礎資料にもなる。

点群データのBIM解析

- ①3D レーザースキャナーによる点群測定を実施し、同時に、測定地点及び周辺の記録のために360° 全天球カメラにて撮影。
- ②測定した点群データの形式を dat 形式から xyz 形式に変換した後、ReCap(Autodesk 社のリアルティキャプチャソフトウェア)にて読み込み、内容を確認
- ③ReCapにて読込んだ点群データを Revit(Autodesk 社の3D CADソフトウェア)内にリンクし、位置・角度を微調整する
- ④同データ及び調査時に撮影した画像を参照し、既存建物の3Dモデル及び図面を作成
- ⑤既存建物の3Dモデル完成および図面(平面・立面・断面・パース)完成



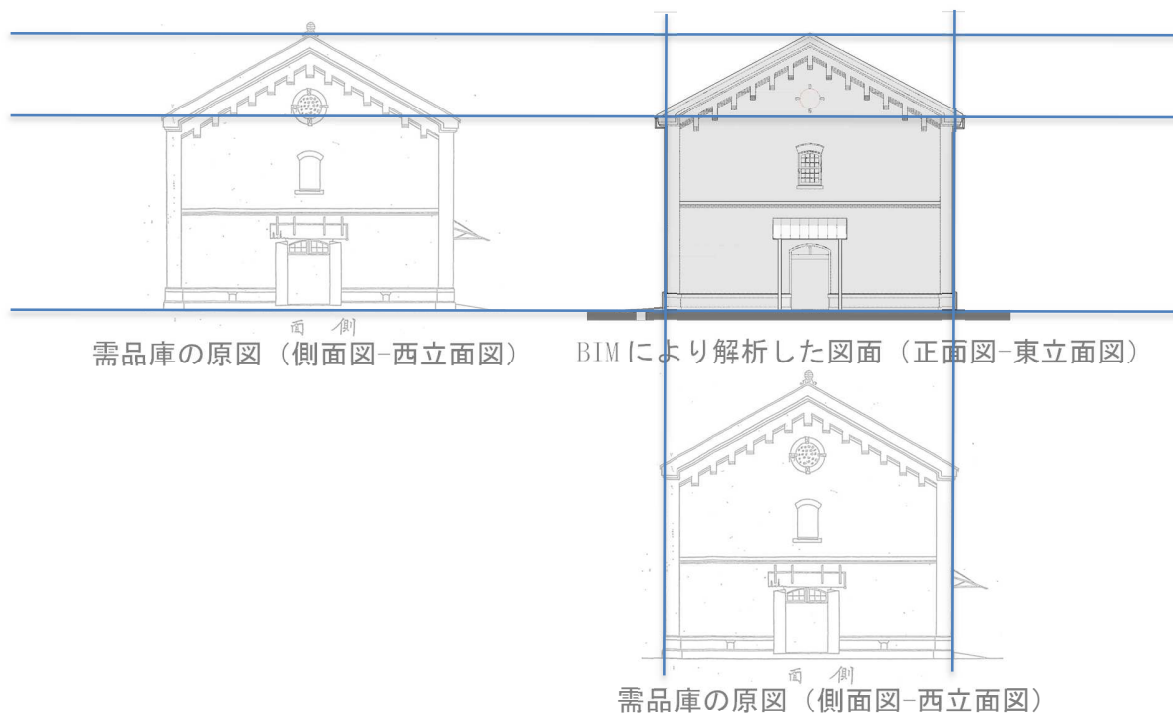
点群トレース作業スクリーンショット



点群から得た需品庫の平面図と立面図

原図と BIM 解析図の比較（側面）

原図（舞鶴市提供資料）と BIM による解析データを比較した。
高さ、幅、柱割りなど、違いは見られない。軒高の違いは見られない。



原図と BIM 解析図の比較（側面）

点群の BIM への展開

デジタル測量から得られた点群データを Revit 上で BIM データへと展開することで、オリジナルの建築文化財の空間的ボリュームの評価のみならず、構造強度の評価、温熱環境の評価が可能になる。改修計画を作成する場合にも、後述する建築物保存活用設計システムと連携して、改修後の建築物の技術的評価を行う事ができる。さらに、改修後は、維持管理データベースとして活用することができる。

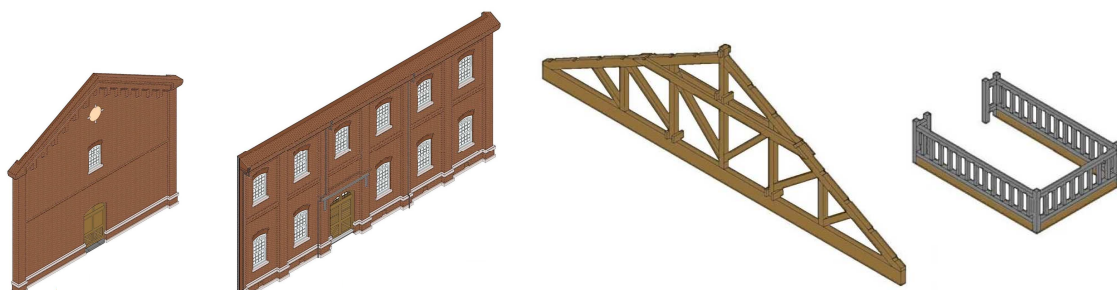


点群データから復元した BIM データ

BIM データのスケールモデル展開

スケールモデル部品の製作

3D プリンターでスケールモデルを制作するために、BIM モデルを、スケールモデルを構成する部品の単位に分解し、それぞれの部品の構成図を Revit を用いて作成した。Revit から sit 型式のデータを書き出すことで、岐阜県情報技術研究所での模型作成に連携できた。IoT の概念を具体化するために Revit は有効であるといえる。

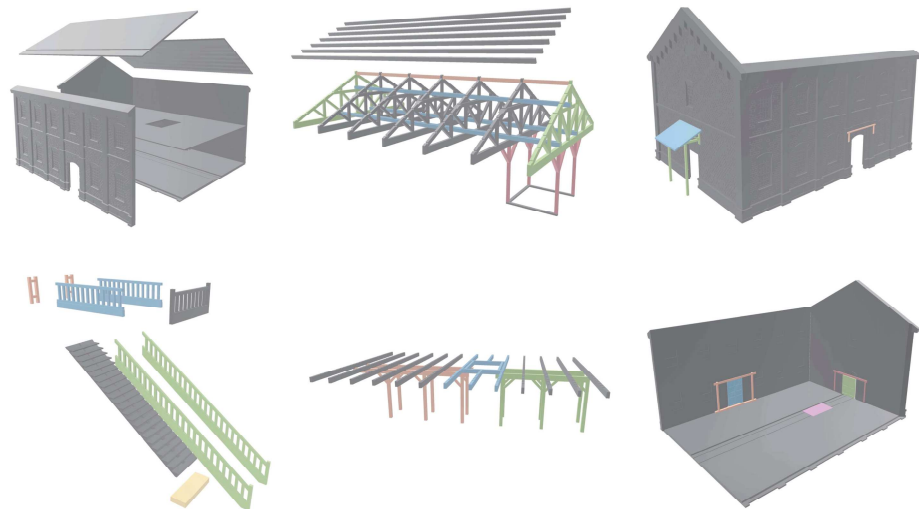


構成図

スケールモデル部品の仮想現実空間上での仮組

作成した 3D モデルを元に、出力用のパーツデータを制作する。いくつかのパーツに分解することで、3D プリンタ出力時の効率を上げる。又、華奢な部位を誤差の範囲程度に大きくし、補強することで、組み立てた際に安定して自立できるようにする。

上記調整後 Revit 内のモデルをパーツ毎に stl 形式に変換する。3D Builder (Microsoft 社の 3D オブジェクトビューアソフト)にて形状を確認、仮組みを行った。



3D BUILDER 上で仮組みをしているところ

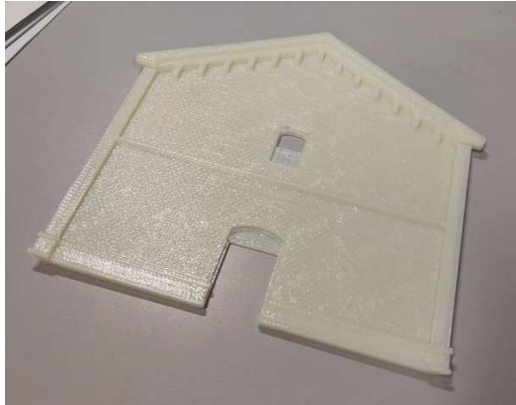
BIM データの調整

3D プリンターの制作に 0.254mm ピッチと 0.127mm ピッチがある。3D プリンターで模型部材を出力する為には 3D プリンターのノズルの太さを考慮する必要がある。この際、模型にはある程度のデフォルメが必要になる。

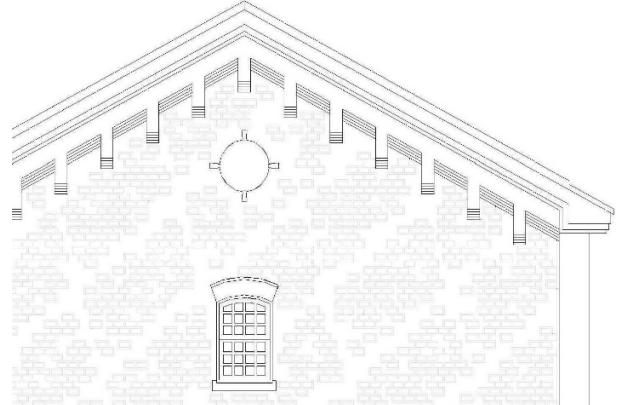
また、3D プリンターの素材の強度を把握することが必要。特にプリンターのノズルの太さに見合った最小限の断面寸法を把握する必要がある。さらに模型部材を組み上げる手順を考慮して部材を制作します。模型の組み立て過程に必要な支保工の部材の制作も必要。

一筆書きでレンガを表現

レンガの表現を BIM モデル通りに 3D プリンターで表現できるが、プリンターの出力時間が大幅に長くなることが分かった。そこで、少しずつ異なる煉瓦を組み合わせたパターンを考案し、ランダムに配置し、デフォルメした壁面の表現を試みた。試作品を製作、煉瓦パターンの調整を行った。壁面の BIM データ上では溝を掘るように煉瓦の目地を入力したが、データ量が大きくなり、煉瓦壁面の表現が増えるごとに、BIM データの操作が鈍くなっていった。建物全体で煉瓦の表情を出すことに注力した。



外壁の試作



一筆書きの煉瓦

三次元造形機（岐阜県産業技術総合センター）

Revitで作成されたSTLデータを元に、立体物を造形する機械。3次元データを水平面で輪切りにした断面データを自動作成し、断面データにあわせて、熱溶解した樹脂（ABS樹脂）を積み重ねて造形物を作成する。三次元造形機を使う事で、手間をかけずに、試作、見本作りが可能になる。切削加工ではできないような中空形状など複雑な形状の造形も可能。

3Dプリンターでの成型

3Dプリンターに出力データを入力する段階も重要である。3Dプリンターの出力範囲や部材の出力の順番など、3Dプリンター内の部材の出力位置を調整したデータを構築する作業が必要になる。こうした調整により出力時間を短縮でき、3Dプリンターから部材を取り出す時に起こり得る部材の破損を抑制できる。3Dプリンターのオペレータの経験に基づいて、合理的な部材の形成過程を考えた部材のデータ入力スケールモデルの制作には必要。



3D プリンター



3D プリンターの出力結果

需品庫内部のスケールモデル

3Dプリンターで成型したところ、右の写真に示すスケールモデルを造り出すことができた。文化財建築物の図面だけでは捉えることのできない、空間の構成関係を明確に把握できる。

CGにより3次元空間としての表現はできるが、電子機器類を用いずに内部空間の構成を把握できるのはスケールモデルである。

建築物の構造がどのようなになっているのかがよくわかる。

1/100のスケールで精度の高いスケールモデルを実現した。

建物の部屋同士の空間関係がよくわかる。

設計者（構造設備を含む）、文化財専門家、運営者、業英担当者など様々な専門性を持つ人々が、オリジナルの空間イメージを共有できる。このスケールモデルを元に、改修後のスケールモデルも作成でき、合意形成の促進や、施工計画などの検討に用いることができる。



需品庫内部のスケールモデル



需品庫のスケールモデル (外観)

長辺 40m、短辺 14m の需品庫の 1/100 のスケールモデルを制作した。床、壁、小屋組、屋根に分けて 3D プリンターで制作した。素材は **ABS 樹脂** である。



需品庫のスケールモデル (内観)

床、壁面、柱、小屋組、屋根に分けて 3D プリンターで出力したので、スケールモデルは解体できるように部材同士の接合部分を Revit 上で組み上げる手順を想定して収まりを調整した。

舞鶴市市政記念館での公開

3Dプリンターで成型したところ、精緻なスケールモデルを造り出すことができた。文化財建築物の図面だけでは捉えることのできない、空間の構成関係を明確に把握できる。

CGにより3次元空間としての表現はできるが、電子機器類を用いずに内部空間の構成を把握できるのはスケールモデル意外に存在しない。常時未公開の施設の空間の様子を伝えるための手段の一つとしてスケールモデルは有効である。

需品庫の長辺の長さが約40メートルあるので、スケールモデルでは2棟に分けている。展示では、壁面をレンガ色、屋根をグレー（舞鶴鎮守府色）に着彩したスケールモデルと無着色のスケールモデルが舞鶴市市政記念館で公開展示された。



2019年6月に一般公開された配水池の模型（写真手前）と需品庫の模型（写真奥）

保存活用設計システム

合成した空間データを BIM システムに組み込みます。すると、建物各部の位置情報を含んだ VR 空間のなかで設計ができます。これを仮想現実空間設計システムと呼びます。

この設計システムの特徴は、オリジナルの建物の部分と改修する箇所の違いが明らかに判断できる状態で、設計作業ができる点にあります。

この設計システムはベニス憲章第 9 条、12 条に示された保存改修の原則の解釈を仮想現実空間上で対応する設計システムです。

つまり、仮想現実空間設計システムでオリジナルな部分は点群または点群と写真測量データの合成データとして表現し、BIM による線や面の表現と区別して仮想現実空間上で設計できます。

1) 簡易的な設計

簡易的には点群データのみを BIM システムに取り込んで設計を行うこともできます。

2) 写真精度での設計

写真精度の仮想現実空間で保存活用設計を行う事ができます。

仮想現実空間設計システム

仮想現実空間設計システムを使うと、ヴェニス憲章にふさわしい構造設計、バリアフリー設計、温熱環境設計、意匠設計などが可能になる。この技術は、リーバーシブルな設計にも応用でき、建物の内装の改修に伴う現状復旧を前提とする設計にも用いることができる。さらに、文化遺産の保存計画や経年変化する建物の状況、改修後の維持管理にも、仮想現実空間設計システムを利用できる。

「記念建造物および遺跡の保全と修復のための国際憲章（ヴェニス憲章）」の第 12 条には「欠損部分の補修は、それが全体と調和して一体となるように行わなければならないが、同時に、オリジナルな部分と区できるようにしなければならない。これは、修復が芸術的あるいは歴史的証跡を誤り伝えることのないようにするためである」と示されている（前述）。

BIM-シェーディング

BIM シェーディング表現では、歴史的建造物に付加しか部分は、オリジナルの部分と、見分けが付きにくい。しかし、BIM で構築したモデルにより、構造計算、環境性能の把握など、建築の物理的側面の評価、及び施工、生産分野などの様々な技術分野の専門家が共同できる可能性が期待できる。技術的検討に必要である。BIM-ベクトルとラスターデータの両方で、技術と文化に対応する、保存活用設計が可能となる。



改修部分とオリジナルの部分の見分けが付かないシェーディング画面

B I M-ベクトルとラスターの対比

シェーディングと比較して、オリジナルと付加した箇所の違いは明確に判断できる。ベクトルデータとラスターデータを対比させることで、歴史的建造物の、どの箇所をどのように保存するのかという、空間表現上の課題を、プロジェクト参加者、特に改正文化財保護法で、担い手として期待されている、市民などが、様々な専門家との協議での合意形成や保存活用に関わる課題の発見と解決に大きな役割を持つと期待できる。



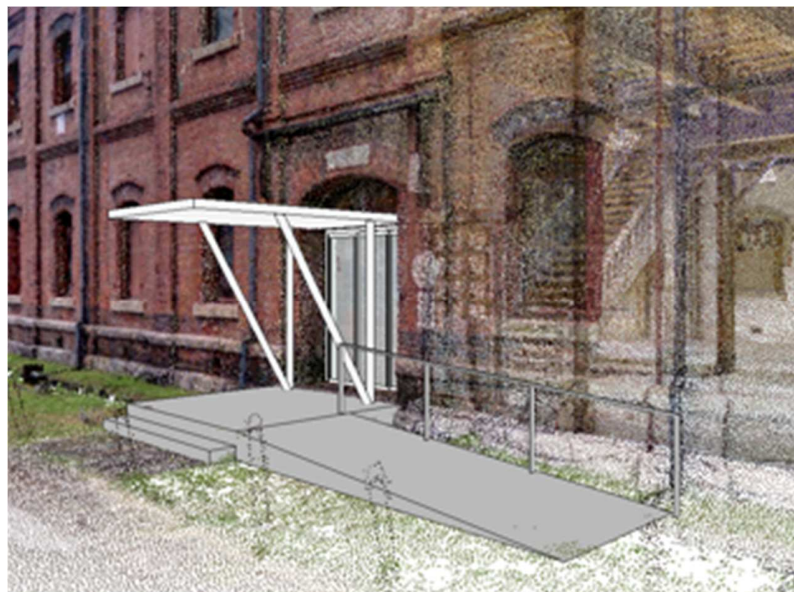
オリジナルと付加した箇所の違いは明確に判断できるベクトル、ラスター対比画面

仮想現実空間での設計表現の比較

産業遺産建築に留まらず、歴史的建造物の保存改修においても、点群モデルと BIM モデルを組み合わせることで、改修箇所を意識した設計を展開することができる。BIM のベクトル表現だけではオリジナルの箇所と、新しく付加された箇所との区別がつかないのは、設計段階でも評価段階でも同じ。構造設計、建築設備設計においても、偽りのない改修工事を行うための保存改修設計システムである。



シェーディング画面



ベクトル、ラスター対比画面
点群の性質から内部と外部を意識した設計ができる



写真測量のデータ上で設計をしている様子
レンダリングした結果と同じなので、完成形を理解しやすい

デジタル測定技術の展開

スケールモデルから創り出すCG

点群測量と写真測量を組み合わせれば、模型からコンピュータグラフィックスを作成することもできる。一連の設計技術を応用すれば、不動産のみならず、動産の保存活用のために用いる事もできる。動産と不動産を一体的に取り扱うことで、産業遺産の全体のシステムを保存活用する事に繋がる。動産の測定に費用がかかるとよそくできれば、模型測量で代替することで、クイックスキャンとなる。



模型測量の様子



模型と模型をスキャンしてモデリングしたデータ

Unreal Engine で異なるスケールの測定結果を一体化

1 / 1 スケールの舞鶴鎮守府需品庫と 1 / 20 のスケールのタグボートのスケールモデルを、Unreal Engine を用いて仮想現実空間上で一体化した。加えて、動産の保存のためにHPシェル（スケールは想定していない）の模型を別途制作した。このHPシェルもデジタル測量により得られた仮想現実空間上の構造物で、タグボートの覆いとなり得るスケールを調べた。全く異なるスケールの対象物をデジタル測量し、再構成することができ、Unreal Engine 上で視点場を自在に移動させながら、保存活用の対象となる空間の評価ができる。なお、このデータをVRゴーグルに格納すれば、前述の実験と同様に、自在に仮想現実空間を旅することができる。このデータはBIM上にも展開できることは言うまでも無い。ここにAutodesk製品の設計環境基盤としての価値がある。



タグボートのスケールモデルを、UNREAL ENGINE を使い仮想現実空間上で一体化した 1



タッグボートのスケールモデルを、UNREAL ENGINEWO を用いて仮想現実空間上で一体化した 2



タッグボートのスケールモデルを、UNREAL ENGINE で仮想現実空間上で一体化した 3

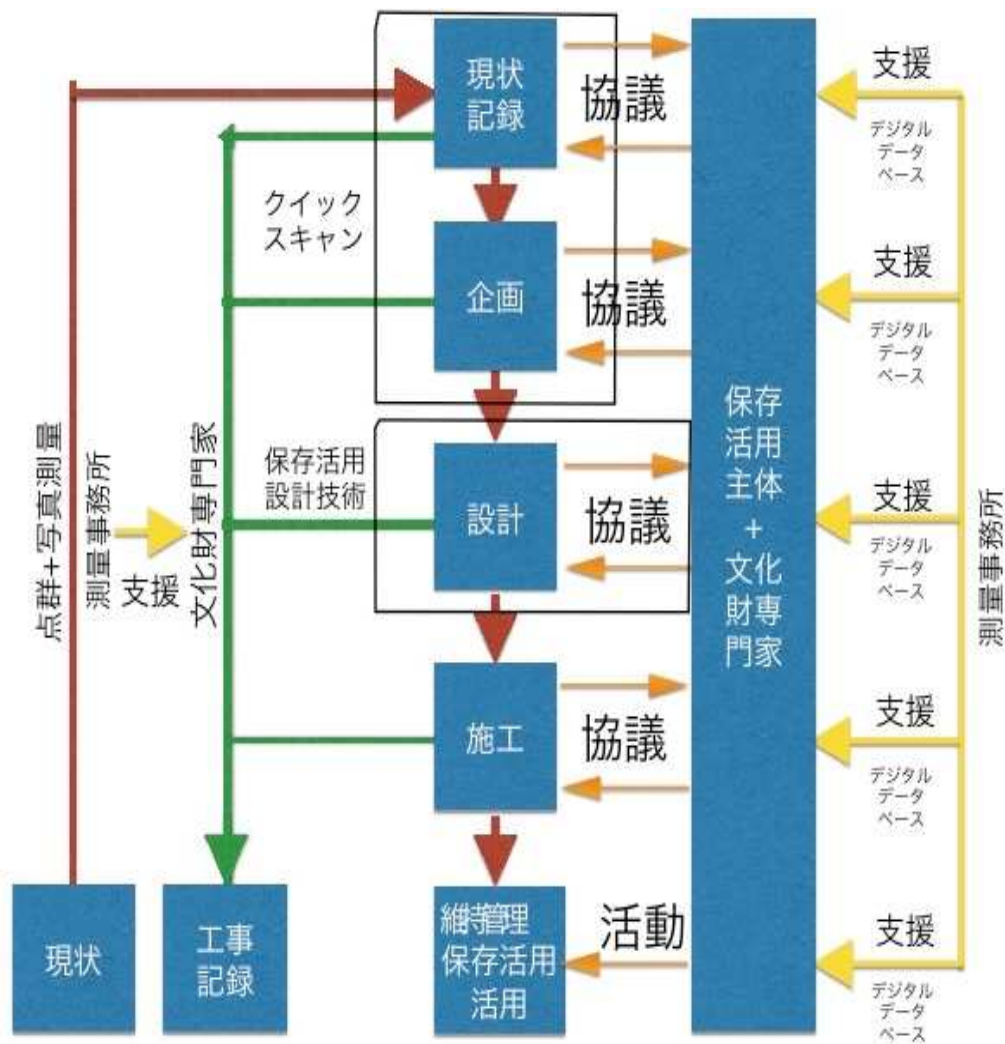
まとめ

近代産業遺産の建造物をクイックスキャンにより、保存活用を検討する可能性を、所有者・市民、建築技術者、文化財専門家が空間のイメージを共有しながら、保存活用設計を展開してゆく技術体系（システム）の一端を構築した。

近代産業遺産をデジタル測量して取得した点群データから BIM モデルを短時間で生成する一連の作業（クイックスキャン）により得られたデータを、仮想現実空間（Virtual Reality）、スケールモデル、デジタル空間データベースへと展開する事ができた。

これらの技術は、保存活用の担い手や文化財専門家が事業企画を構想し、建築設計者や施工者とコミュニケーションをとりながら、保存活用のプロセスを展開して行く事に利用する事ができる。さらに、設計の段階では、ヴェニス憲章に基づいて、建築物のオリジナルの部分と新しく付加する部分を、ラスタデータとベクトルデータの表現の違いにより、設計の段階で切り分けて、設計を行う事ができる。

測量技術者はレーザー測量及び画像測量のデータを記録し、設計者は点群データに基づいて設計を行う。作成した BIM データを設計者、自治体（文化財専門家など）、住民（運営者）などの関係者が協議し共有するために、Autodesk が開発した、様々なソフトウェアの特長を各局面で活かすことで、歴史的建造物の保存活用を推進する事ができる。



デジタル技術により保存活用プロセスの概念図

循環型社会の構築に向けて

2020 年 3 月の建築士法の改正で、既存建築物の有効利用や建築物の性能向上に関わる建築物の総合的な専門家として建築士の実務に調査と評価が追加された。

2019 年の文化財保護法の改正では文化遺産の保存活用が目指されている。

歴史性を損なわず文化財の保存活用を行うために、一般建築物と同様に調査と相応する設計方法が必要となる。

一般建築物でも文化財でも既存建築物の改修設計では建物の現状を把握し工事計画を作成する必要がある。

近年、測量技術のデジタル化による、一般建築物の改修を射程に入れた設計方法の開発が必要になる。

デジタル測量と BIM 設計技術を連携させる、デジタルアーカイビングと仮想現実空間設計システムによる記録保存の方法を確立する事が求められる。

デジタル測量と設計の連携による、既存建築物を有効に活用する設計方法を確立してゆける。その結果、SDGs を考慮した循環型社会の構築に資する建築設計の可能性が広がる。

謝辞

デジタル測量実験の実施には、文化庁及び舞鶴市の協力を得られた。模型制作は岐阜県産業技術総合センター及び京都女子大学の協力を得た。本成果は科学研究費 16H02386 の成果の一部である。

制作および制作支援

アーキ・キューブ； 大石佳知、深尾早希

シュルード設計； 安達基雄、土井 桂、松田真澄、草木沙織

岐阜県産業技術総合センター； 山田俊郎

京都女子大学； 北尾靖雅