

葦山反射炉維持管理事業における光学的計測技術の活用

○味岡 収*¹ 渡邊 弘行*²

キーワード：葦山反射炉 維持管理 光学的計測 SfM レーザースキャナ

1. 葦山反射炉の維持管理における課題

国指定史跡葦山反射炉（以下葦山反射炉）は平成 27 年 7 月に「明治日本の産業革命遺産製鉄・製鋼、造船、石炭産業」の構成資産の一つとしてユネスコ世界遺産に登録され、将来の長きに亘ってその価値を伝えていくための具体的な方法が委員会などを通して模索されている。葦山反射炉は安政 4 年の竣工当時、煙突外壁の煉瓦面は全て漆喰に覆われていたが操業を終え長年放置される中で劣化し、昭和 5 年に発生した伊豆地震による損傷の修理工事が昭和 32 年に実施される際に、剥落する危険性のある漆喰は削り落とされている。結果、ほとんどの煉瓦が露出し、その後風雨に晒されることで更に劣化が進行した。平成元年に実施された保存修理工事（以下前回工事）の際に侵食の進行した煉瓦及び昭和 32 年に補修された煉瓦は新たに補修用煉瓦に差し替えられたため、オリジナルの煉瓦の喪失が懸念されている。将来的に再度煉瓦面を漆喰によって保護するという案も検討されているが、そのための工法や効果を検証する上でも現状における煉瓦の劣化状況に関する基礎資料の取得とモニタリングは必須と言える。他方煙突内部の煉瓦については、通常煙突は銅板製の天蓋で閉じられ、前回工事以来一度も開けられていないため 30 年近くその状態が確認されていない。そのため、今後の基礎的な資料としても現状を記録し、劣化の進行の有無等の判断を行う必要がある。

また、葦山反射炉は前回工事において更新された補強鉄骨に覆われており、その耐震性については現在でも問題ないとされているため次の大規模工事まで更新されることはないが、幾多の地震等の被害のためにその全体形状には倒れや捻れが発生している。その進行の有無や変形の把握も煉瓦の劣化と同様にモニタリングの観点からは重要である。

これらの葦山反射炉の維持管理に関する課題について筆者らは平成 24 年度から現在に至るまで光学的計測技術を活用して必要なデータを取得し、葦山反射炉の現況を可視化する成果を生み出してきた。ここで用いている光学的



図1 葦山反射炉外観

計測技術とは主にデジタル画像の解析とレーザースキャニングによって取得した点群データの解析である。本稿は、葦山反射炉の今後の維持管理において筆者らが平成 24 年より取り組んできた光学的計測技術を活用した文化財調査に関する一連の取り組みと成果について報告するものである。

2. 超高解像度画像撮影システム

葦山反射炉の外壁を構成する煉瓦の現況を把握するために平成 24 年度に超高解像度画像撮影システムを用いてデータの取得を実施した。通常、外観の調査を行う際は足場を設けて近接目視調査を実施するが、足場建設に関わる工期やコストの問題に加えて、煉瓦の劣化状況の判断に関する客観性と再現性が課題となっている。つまり異なる担当者あるいは同じ担当者であっても同一の判断基準を現場作業において保つことは困難であり、評価にバラつきが発生するリスクがある。本システムは撮影範囲を超高解像度の画像として記録することが出来るため、PC 上で各煉瓦を確認し、劣化状況の判断を行うことが出来る。データとして記録が残るために客観的な判断に基づきやすく、結果の再現性も高い。また、撮影画像が一つの画像に合成されるため、閲覧管理ともに取扱い易く作業効率の向上にも寄与している。



カメラ	SONY α 65
画像素子	CMOS 23.5mm×15.6mm
画素数	2470 万 (6000×4000pix)
焦点距離	150-500mm (35mm 換算)

図2 高解像度画像撮影システム及び撮影状況

本システムは2軸のモーター付きの雲台とデジタル一眼レフカメラを組み合わせたもので、画像一枚あたりの画角に応じて撮影範囲を分割し自動で撮影を行う。煉瓦の劣化状況を判断するために近接目視調査と遜色のない品質の画像が必要であったため望遠レンズを用いて 1 面あたり、

150~200 枚程度の撮影を行った。それらの画像を専用ソフトで 1 枚に合成し、約 18~20 億画素の巨大な画像を作成した。北炉南炉の各面を撮影し、8 枚の画像を閲覧ソフトに格納した。この画像を元に各煉瓦の損傷状態やオリジナルの漆喰の残存状況を記録した。

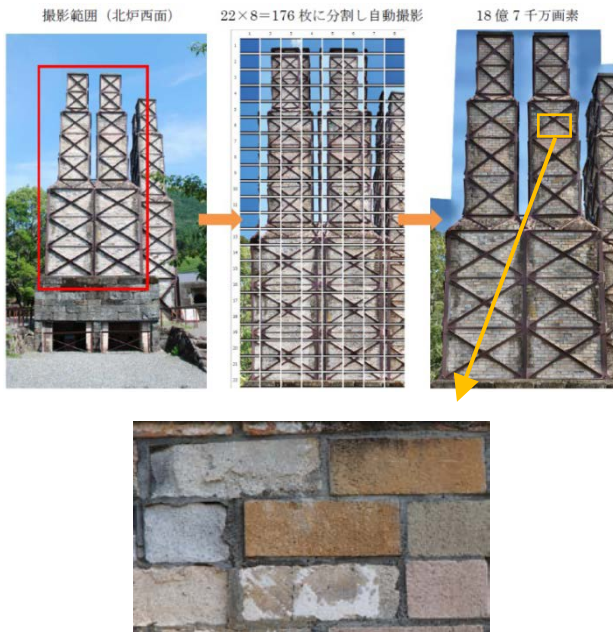


図3 高解像度画像作成プロセス

合成された画像は通常数十億画素にもなり、そのままの形式では画像を閲覧する際に PC に大きな負荷を掛けるまたは閲覧が不可能な場合もある。それを避けるために、画像データを図4のようなタイル構造とピラミッド構併せ持つ構造に変換する。具体的には元の画像を、画素数を段階的に縮小した幾つかの階層に分け、それぞれの階層の画像を 256×256pix のような細かいタイルに分割する。画像を PC で表示する際は画像のズーム度合いによって最適な階層の画像が読み込まれ、モニターに表示されている範囲のタイル画像だけを呼び出すために、常に全体画像を読み込む一般の表示方法に比較して PC への負荷は格段に下がり、閲覧には通常の Web ブラウザのみを使用するための PC でも使用可能である。

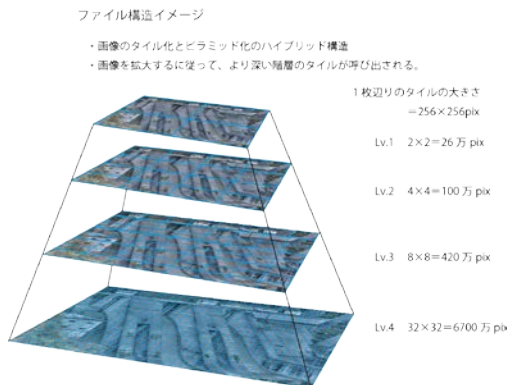


図4 超高解像度画像のタイル化・ピラミッド化イメージ

3.多視点画像解析

多視点画像解析は超高解像度画像撮影システムでデータの取得が出来なかった煙突内部及び煙突股部（煙突2基の間の向かい合う面）の煉瓦のオルソ画像（正投影画像）を作成するために平成 27 年度に実施した。

多視点画像解析とは、対象を多数の方向から重なり合うように撮影した画像群に、SfM（Structure from Motion）や MVS（Multi-View Stereovision）と呼ばれる手法を用いて撮影時のカメラの位置姿勢（外部パラメータ）並びにキャリブレーションデータ（内部パラメータ）を推定し、自動抽出されたタイポイントから生成された点群データを元に対象の 3 次元形状を復元する技術である。一旦 3 次元モデルが生成されれば、そこに撮影画像を貼付け、オルソ画像を作成することが出来る。多視点画像解析の一般的なフローを図5に示す。

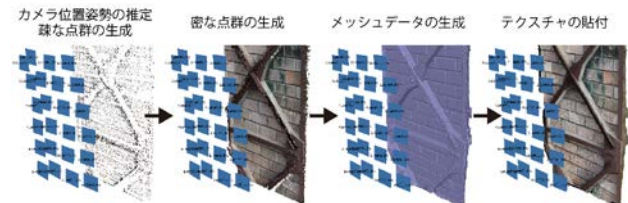


図5 多視点画像解析の解析フロー

煙突の内部は 1 辺が約 680mm の正方形の断面であるため人が直接立ち入って撮影を行うことは容易ではない。そのためクレーン車に撮影機材一式を吊るし、煙突上部から内部に下ろしながら撮影を行う計画とし、そのためのカメラ配置、照明の配置及び治具の設計を行った。多視点画像解析に使用する画像は隣り合った画像とのラップ（オーバーラップ、サイドラップ）が一定以上求められるため、撮影距離、レンズの焦点距離、画像素子サイズ等を考慮しカメラの選定、台数、間隔を設定した。使用したカメラの諸元を図6に示す。



カメラ	Panasonic DMC-GM1
画像素子	Live MOS センサー 17.3mm×13mm
最大画素数	約 1600 万 (4592×3448pix)
焦点距離	24-64mm (35mm 換算)

図6 使用カメラ諸元

撮影治具は並列に配置したカメラを 3 台、LED ライトを 4 台搭載し、全体を煙突断面に合わせたフレームとアジャスター用として車輪を搭載したものを作成した（図7）。撮影はカメラに搭載されたインターバル撮影機能を使用し、

これをクレーン車で毎秒3cmの速度で下ろしながら3秒に1回の間隔で撮影を行った。撮影画像は図8上下左右ともにラップをした連続画像で1壁面につき約1000枚程度となった。これを元に多視点画像解析を行い、図9のようなオルソ画像を作成した。股部についても内部と同様の検討過程を経て治具を作成し、撮影・解析を実施、図のようなオルソ画像を得た。

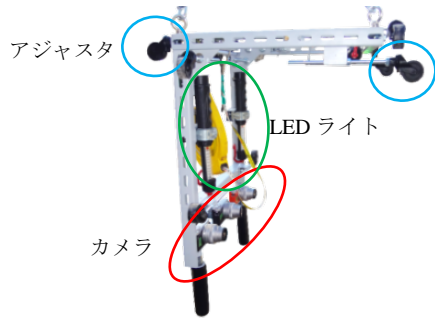


図7 煙突内部撮影用治具及び撮影状況

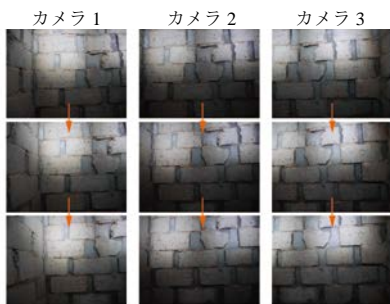


図8 内部壁面の連続撮影画像

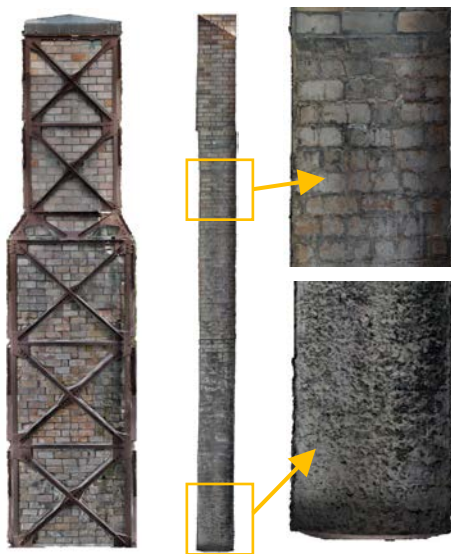


図9 オルソ画像 (左：股部, 右：内部壁面)

4. 煉瓦画像の電子カルテの構築

超高解像度撮影システムと多視点画像解析により得られた各壁面画像には合計約2万枚の煉瓦の画像が含まれている。これらを一枚ごとに確認して知り得た個々の煉瓦の劣化状況やオリジナルの漆喰の残存状況及びその他目地やクラックの情報は膨大な数に上るため、これらに関係者間で共有しやすくアクセスの容易な情報として一元的に管理することの出来る電子カルテを構築した。



図10 電子カルテのWebページ

この電子カルテには識別番号の割り振られた2万枚余りの煉瓦それぞれの拡大画像と共に、「位置」「劣化」「漆喰」「クラック」「割れ」「目地やせ」「汚れ」「刻印」「メモ書き」の有無や程度が紐付けられており個々の煉瓦の状況を把握することが出来る。また、データベースにアクセスして各項目に関する検索や抽出機能も有し、今後実施される補修設計の支援をすると共に将来を見据えた維持管理の初期データとしても活用でき、今後の継続的なデータの蓄積が期待される。

5. レーザースキャニング

韮山反射炉は現在、創業当時には存在していなかった補強鉄骨に覆われている。これは昭和5年の伊豆地震で大きな被害を被った反射炉の補修として昭和32年工事に初めて取り付けられたもので前回工事において更新がなされている。現在、この補強鉄骨を含めた韮山反射炉全体の耐震性について大きな問題はないとされているが今後の長期的な維持管理の観点からは煉瓦の劣化状況同様に反射炉全体の形状のモニタリングを行っていくことは必要と思われる。平成24年度に実施された調査の際には3Dレーザースキャナを用いて伊豆石で構築された炉体の内外を含む反射炉全体の詳細な3次元形状を取得した。これをもとに図面作成を行った他、部分的に断面形状を抽出しその形状を把握した。目視観察の通り、部分的な倒れや捻じれ、煉瓦の孕み出しが確認された。今後の経年変化及び地震に対するリスクの観点からも今後も定期的にデータを取得

し、微細な変化を見逃さないよう観察を行っていくべきであろう。



機種名	FARO社 PHOTON120
測定範囲	0.6~120m
スキャニング角	垂直320° ×水平360°
スキャニング速度	976,000pts/秒
レーザー強度	クラス3R
測定精度	標準±3mm @25m

図 11 3D レーザースキャナによる計測状況と諸元

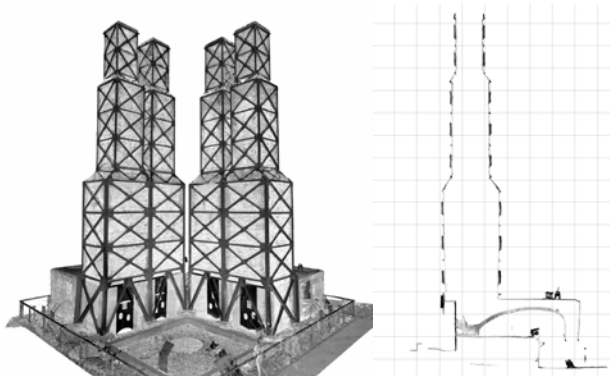


図 12 スキャニング結果および任意断面

6.まとめ

本稿では、葦山反射炉の維持管理を目的とした光学的計測技術を用いた一連の取り組みについて報告を行った。文化財の維持管理のプロセスには概念的な要求事項はあるにせよ、具体的な調査項目や方法およびそれらを踏まえた設計・補修方針については個々の文化財の特徴や価値基準を踏まえた上の議論がなされるため、時間的にも予算的にも限りがある中で効率的かつ効果的な手法が求められる。筆者らは平成 24 年度からこのプロジェクトに取り組んでいるが、その時々に必要なデータをその時代の先端の技術を用いて取得してきた。それらは従来の調査手法と比較して客観性が高く信頼のおける成果を得られるとともに、デジタルデータである利点として、他の解析にも上手く流用出来る点にある。例えばレーザースキャナで使用した点群データは、全体形状の把握を目的としていたが、現在このデータを再活用して個別の煉瓦の凹凸を数値的に解析し表示をしようという試みも検討されている。筆者らが葦山反射炉に携わった 5 年の間にも多視点画像解析のように

様々な計測・解析手法が広まっており、従来の手法では得ることが困難であった知見が比較的容易に得られるようになってきている。今後文化財の維持管理においてこうした計測・解析技術の必要性はますます増していくものと思われる。

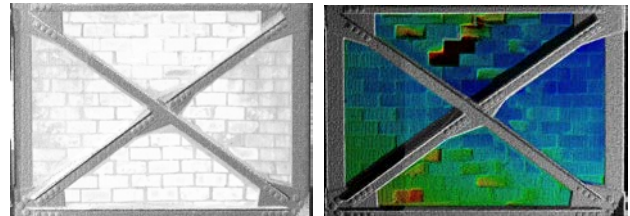


図 13 煉瓦の凹凸解析

[注釈]

1) 本報告は、伊豆の国市が(公財)文化財建造物保存技術協会に委託した「平成 24-25 年度 葦山反射炉維持管理事業 葦山反射炉調査業務」の成果及び(株)計測リサーチコンサルタントに委託した「平成 27 年度 葦山反射炉維持管理事業 葦山反射炉調査業務(壁面画像記録・温湿度計測・電子カルテ作成)」および「平成 28 年度 葦山反射炉維持管理事業 葦山反射炉調査業務(温湿度計測・電子カルテ作成)」の成果を元に作成したものである。

[参考文献]

- 1) 味岡収: 葦山反射炉維持管理事業における調査報告その 1 デジタルカメラを用いた煉瓦画像記録, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016. 8
- 2) 葦山町教育委員, (財)建材試験センター, 史跡葦山反射炉保存修理事業報告書, 葦山町, 1989. 03
- 3) 浜田稔: 葦山反射炉保存工事について, 建築雑誌, 日本建築学会, 1958. 2, pp15-17

*1 (株)計測リサーチコンサルタント 東京事業部 博士(工学)

*2 (株)計測リサーチコンサルタント 東京事業部