

ナノ3Dプリンタを用いた3次元デジタルデータの長期保存技術の確立へ向けて

その1) 二条城唐門のデジタルデータ化とナノ造形物の経年変化の調査方法

佐藤 啓宏(京都先端科学大学 工学部)・榎谷 周平(株式会社キャストム)

石川 涼一・大石 岳史(東京大学 生産技術研究所)

概要: デジタルデータの長期保存における脆弱性の問題は議論されているが、良い解決手段は見つかっていない。本研究は、3次元形状デジタルデータの保存のロバスト性向上のために、ナノ3Dプリンタによる極小の立体造形物をメタデータとして保存することを提案する。ナノ造形物は、非常に精緻で隠面も含めて立体を形成することができるため、実物の1000分の1程度の大きさにして形状を再現性高く表現できるという利点があり、また小さいということは保存しやすさの点で有利である。一方、その化学的・電磁的な影響による変化・劣化については明らかにされていない。そこで、本研究では二条城唐門の3次元デジタルデータのナノ造形物をサンプルとして、実際にいくつかの環境下で長期間保存し観察することにより、その変化を調査する。

キーワード: 文化財、3次元デジタルアーカイビング、デジタルデータの長期保存、ナノ3Dプリンタ

Toward the Establishment of Long-Term 3D Digital Data Preservation Using Nano 3D Printer

Part I: Digitalization of the Karamon Gate of Nijo Castle and a Method to Investigating Changes in Nano-molded Objects Over Time

Yoshihiro Sato(Kyoto University of Advanced Science) / Shuhei Masutani(Castem corp.)
Ryoichi Ishikawa, Takeshi Oishi (Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo)

Abstract: The problem of fragility in long-term storage of digital data has been much discussed, but a good solution has not yet been found. In this study, we propose a new concept for storing 3D digital data using very small 3D objects made using nano-3D printers. This will allow for increased storage robustness, as these objects will provide supporting metadata for 3D data. Nano-molded objects have the advantage of reproducibility, even at 1/1000th of the size of the actual object, because they can accurately reproduce 3D shapes that include otherwise-hidden features. The small size of these objects is also an advantage in terms of ease of storage. However, at present, changes and degradation caused by chemical and electromagnetic effects are not yet clear. In this study, we will investigate changes caused by storing and observing these 3D nano-molded objects for a long period under several different environments.

Keywords: Cultural assets, 3D digital archiving, long-term preservation of digital data, nano 3D printer

1. まえがき

文化財は、その地域の歴史と文化を代表し人々の心の支えとなる「かけがえの無い」ものであり、後年へ無事に引き継ぎ続けられていかねばならない。一方で、近年予期しえない規模の自然災害が各地で多発しており、損傷を受けるリスクが高まっている。かけがえの無い文化財を守るために、その様相を記録するデータを様々な形で計測・保存することは重要な課題である。その技術的手法として、従来は絵図や写真に頼ってきたところが大きいですが、2000年ごろから3次元デジタルアーカイビングの技術が発達し、文化財保存において

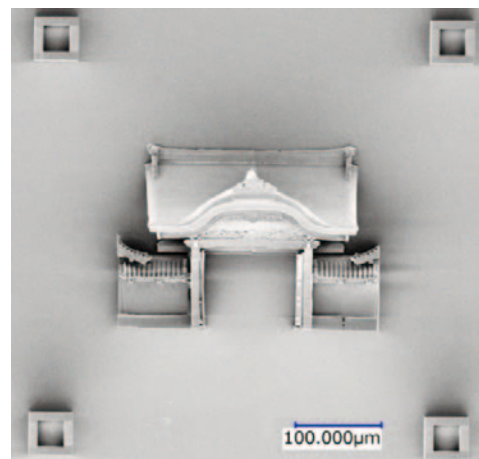


図1 二条城唐門のナノ3D造形結果

も実用的に広く普及しつつある。

しかし、そのデジタルデータを数 100 年に渡るような超長期保存する方法についての課題が見逃されている。古くから紙は千年を超える耐久性を持つメディアとしての実績が有り、現在のわれわれに歴史を伝えることに大きく貢献している。しかしデジタルデータはその誕生から高々数十年程度しかなく、その存在寿命の長さは不明であり、また、多くのリスクを抱えていることが知られている。その脆弱性は問題として認識されているものの、決定的な解決策はまだ存在しない。

デジタルデータを保存する方法として、デジタルデータをデータとしてそのまま保存する方法や、スケールを変更したレプリカを作製するなどがある。ただし、前者にはデータ保存媒体の化学的・磁気的な劣化や、データフォーマットの変更に伴う読み出し方法の喪失などの多くの課題があり、長期間の保存に向かないという指摘が有る。また、レプリカのような大きな物体としての保存は、保存場所の確保の問題や、不慮の事故や災害による損失の可能性が大きいといった問題が発生する。

そこで本論文は新たな手法として、ナノ 3D プリンタを用いて 1000 分の 1 倍程度に極小化した立体造形物によるデータの保存方法を提案する。ナノ 3D プリンタは技術発展の途上にあるが、解像度の高い立体造形物を作り出すことができる利点がある。それを長期保存するデジタルデータのメタデータとして用いれば、データ保存の頑健性を向上できる。

ナノ造形物には、形を形として保存できる点と、小さいために事故や災害を避けての保存がしやすいメリットがある。一方で、現在の造形技術では出力歪みが大きく、造形物の大きさと解像度にトレードオフの関係になる制限がある。そのため、造形工程を経ることで一定のデータの欠落が生じている。また観察するために顕微鏡が必要になるという制限がある。現状では、生データを直接表現することには向かず、デジタルデータを従来の記録媒体を用いて保存するのに並行して、補完的な情報を保持するメタデータとして用いることが、有効な用途であろうと考える。

ナノ造形物には、明らかになっていない特性がまだ多く存在している。材料は、高分子素材であるが、その配合成分はメーカーにより秘匿されている。加工前の材料の保存可能期間はユーザーに限定して公表されているものの、加工後のものについては分かっていない。また、電子顕微鏡(以降 SEM)での観察時に射出される電子によって破壊されないようにするために、高分子素材の造形

後に表面を金属でコーティングするのであるが、極小の世界で高分子素材と金属の接した状態が、機械強度として長期保存においてどのようなふるまいを見せるのか、知見が得られていない。

本研究はその最初の取り組みとして、京都二条城唐門の 3 次元デジタルデータ化を行い、ナノ 3D プリンタを用いてナノ立体造形物を生成した(図 1)。これらの造形物は SEM で観察をすることができ、ガラス基板上にその形状を保持できる。そのため、多数の 3 次元造形物を一カ所にまとめて保存することも容易である。極小であるために外部からの振動や衝撃による影響は受けづらいと予測されるが、化学的・電磁的な影響は不明である。また、経年変化の状況の経過観察が最初の課題で有る。また、ほかにどのようなリスクがあるのかについても興味の対象であり、実際に試行してみることが現時点では最も有効な確認手段であると考ええる。

そこで、本研究では 3 枚の同一条件で印刷された造形物を、異なる環境に長期間保存し、その時間経過を調査する。

2. 関連研究

デジタルデータが消失する要因は様々であり、それらにまつわる物的、人的、災害、情報セキュリティのようなリスクが議論されている[1]。また、デジタルデータの保存のためには、メディア、ハードウェア、ソフトウェアの 3 点が揃っていることが必要であり、それらが失われやすいことも指摘されている[2]。文献[3]では、数多くのデジタルデータのフォーマットが存在しているものの、その多くが長期保存に適合しないことが見て取れる。データフォーマットに限らず、現在の技術では 100 年後にはメディア・ハードウェア・ソフトウェアのいずれも失われている可能性が高いとみられている。

データの損失を防ぐために、定期的なデータ移行やクラウド活用による並列化などの運用も推奨されているが、人材に依存するところが多く、データの存在を知る人がいなくなれば、メディアは価値を成さなくなる恐れがある。パンチカードなどは、デジタルデータがメディアだけでは価値を持たないことの例として挙げられよう。

データを管理する人材を継続的に確保する代わりに、データの概要を示すメタデータの保存の重要性が指摘されており、ISO 規格においても指針が示されている[4]。時間の経過による変化の少ないメディアを用いて、メタデータを残しておくことが、保存の長期化を強化すると言える。文献[5]では、文化財・出版物・Web コンテンツの

それぞれのメタデータについて、管理用、発見用、交換用としての役割が有り、今日ではWebコンテンツのメタデータが他領域に基盤的な機能を提供していることを紹介している。メタデータには、作成者、日時、データの形式などを文字として残しておくことが一般的に考えられているが、言語は長期的にみると変化の大きい記号体系だろう。

3次元形状を伝えるメタデータとして、多視点からの写真や画像を保存することも有効な手段であるが、問題がある。フォトグラメトリが広く一般に使われるようになり、写真からの3次元形状復元は容易であるが、形状の細部の復元のためには、隠れる部分が無いように大量の写真を必要とする欠点があり、そのデータ量はメタデータと呼べる範囲を超える。写真では、画角や解像度の制限により、複数間の写真の撮影位置の関係が曖昧になるため、また別のメタデータの必要性が出てくるなどの冗長性が発生する。

デジタルデータのメリットの一つとして、劣化の無いコピーが容易である点が挙げられる。コピーされたデータを、関連する研究機関等で広く共有すれば、いずれか一方のデータさえ生き延びれば復元可能であるので頑健性は増すと言えるが、文化財の希少性としての価値を失うことや権利侵害の問題に抵触する恐れがある。またデータ保存に責任を持つべき主体が曖昧になることや、データを改ざんされた場合にそれと気が付かない恐れがある。ただし、ブロックチェーン技術を用いて NFT のように履歴を残すデータの管理は有望であるので今後の研究対象になるだろう。

我々の提案は、形状を表すデジタルデータの概要を、ナノ3Dプリンタを用いて、デジタルの対語としてのアナログ化して残そうとする点に新規性が有る。

3. 文化財の3次元デジタルデータ化

我々は元離宮二条城事務所の協力を得て2020年12月に二条城唐門のデジタルアーカイビングを行った。データの例として、門の北側から見た全体像を図2、その欄間彫刻の拡大図を図3に示す。

測定方法は、二条城唐門の外観をレーザーレンジセンサにより地上から形状計測し(図4)、カメラを搭載した小型ドローンにて屋根部分を空撮し写真測量(フォトグラメトリによる3次元復元)した。最終的にそれらを位置合わせして一つのデータとした。この3次元データをナノ3D造形し、実験試料として用いる。

二条城唐門の選定理由は、文化財としての価値が高いこと、大きな建築構造の立派な風格に加えて破風などの細部に施された精緻な装飾彫刻の形状が併存しておりダイナミックレンジが広いこと、我々の研究拠点から距離が近くにあり継続的に現存物の計測や確認が可能であることが挙げられる。

計測データの概要は次の通りである。

計測機材: レーザーレンジセンサ FARO Focus S150, フォトグラメトリ用カメラ DJI Mavic Mini
データ取得方法: TOF 測距, フォトグラメトリによる3次元復元(Metashape)

地上計測地点: 69か所

空撮画像数: 577枚

構成方法: 3次元点群を位置合わせ後、統合処理[6]

データ形式: 点群, 三角メッシュ, 頂点色

点群数: 12,472,881点

データサイズ: 645MB(バイナリ PLY 形式)

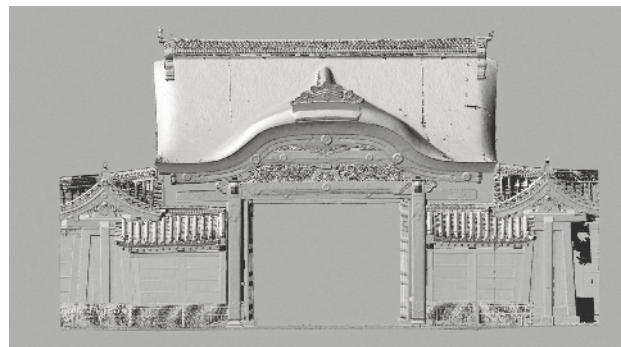


図2 二条城唐門のデータ例(左:色付き点群, 右:点群)



図3 北側欄間彫刻



図 4. 二条城唐門の地上計測風景

4. ナノ 3D 造形

ナノ 3D プリンタには, Nanoscribe 社製 Photonic Professional GT2 (図 5) [7]を用いた. 最大造形容量は 400mm^3 , 最小形状寸法は $XY=0.2\ \mu\text{m}$, $Z=0.3\ \mu\text{m}$ である. 造形材料には, 高分子素材の IP-Dip を用い, ガラス基板上に 2 光子結合により二条城唐門のデータの北側半分を造形した(図 6 左). 出力サイズは, 唐門部分がおよそ縦 $210\ \mu\text{m}$ ×横 $300\ \mu\text{m}$ ×奥行き $130\ \mu\text{m}$ で, 造形時間は 2 時間 20 分であった. 造形後, 表面に厚さ 60nm の白金を蒸着している(図 6 右). この処理は, 本件にだけ適用される特別な工程では無く, SEM での観察時にチャージアップと呼ばれる効果により観察画像に大きな歪みが生じてしまうことを避けるための通常の工程である. また, ナノ 3D プリンタのカテゴリには, 1 視点からの立体を

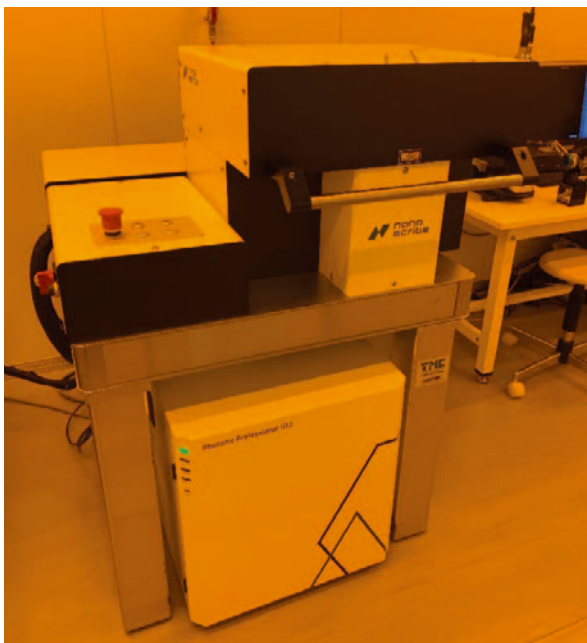


図 5. ナノ 3D プリンタ Photonic Professional GT2

造形する 2.5D 出力の物と, 表面からは隠れて見えない部分も造形する 3D 出力の物があるが, これは 3D 出力である.

SEM にはキーエンス VHX-D510(図 7)を用いた. 図 1 に見られるようにナノ 3D 造形物は精巧ではあるものの, 造形時点で一部に歪みやモアレのような歪み形状が見られる. 歪みの傾向は大局的なものと局所的なものに分類でき, 門の構造に合わせて左右に大きく引っ張るように生じている歪みは, チャージアップによるものだと推測される. また, 門の中央部に, 上から下へ立体構造に合わせて走る断層のような線は, 3D プリンタの機構上の制限から来るものだと推測される. 現状では, これらは試行錯誤による職人的な調整以外では解決できないが, 近い将来ナノ 3D プリンタの進歩により解決されると期待されるので, 本研究ではこれらを問題視しない.

継続観察用に造形した 3 つのサンプルの SEM 画像を図 8 に示す. 大域的には同様に造形されているが, 局所的にはそれぞれに微細な違いがある. また門の右下の構造上弱い部分に破損が見られる. ナノ 3D プリンタの造形がとくに難しい理由は 2 つ挙げられる. 一つは 3D データの準備である. 破損に対しては, 構造上弱いと予想される箇所にサポートを入れるなどの解決策があるが, その予測が難しい. もう一つはレーザーのレンズ等に極微細な汚れが付着するとキャリブレーションに失敗し, 像が正しく結ばれずに造形に失敗することである. 作業はクリーンルーム内で行われているが, なお注意深い清掃や準備が必要である.

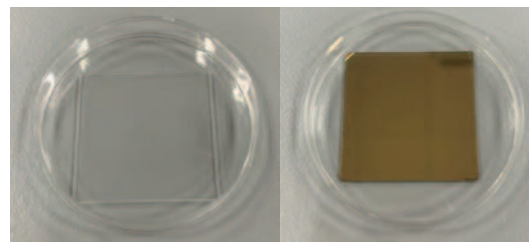


図 6. 造形物(左:造形後, 右:白金蒸着後)

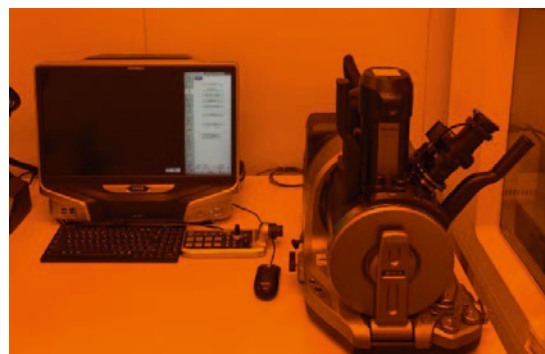


図 7. 電子顕微鏡 VHX-D510

5. ナノ造形物の経年変化の調査方法

ナノ3D造形物の長期間の経年変化に関する調査研究は、現在のところ、見当たらない。本研究ではこれを調査するために、同じ条件で印刷した造形物を異なる環境で保管し、その形状変化を、SEMを用いて定期的に観察する予定であり、本節ではその実験設定の根拠と方法について述べる。

一般的な観点[8]から言えば、高分子の耐久寿命は加水分解するように金属に比べて短い。そのため、造形素材の劣化により、蒸着した金属がはがれるように壊れる局所的な変化が予想される。また、温度に対する膨張率が異なるために、同様の変化の発生が予想される。つまり湿度と温度の影響が大きいと予想され、これらは局所的な変化である。また、建築物の構造に起因とする歪みや破壊も想定される。これらは大きな変化として観察されるだろうと予想される。また、全体の膨張・収縮のような現象が起こる可能性もある。

これらの局所的・大局的な歪みをSEMで観察できるように、造形物の四隅に基準となるキャリブレーションボックスを配置して造形した。キャリブレーションボックスは、 $50\mu\text{m}$ 立方の大きさとし、それぞれのボックス間の距離は $400\mu\text{m}$ の既知の距離として配置する。時間をおいて撮影した結果から、キャリブレーションボックスを基準に合わせて、その差分をとることで変化を計測する。なお、図8のスケールは、画像内で平行移動して門の位置に合わせている。SEMは電子ビームを走査して計測するので透視投影のように画像の端で大きな歪みは生じないが、多少の誤差が発生している可能性は注記しておく。

図9に試料の保管場所を示す。1.湿度温度の変化が大きい通常室内の金庫内、2.湿度40%に保たれるが温度変化の大きい通常室内のドライボックス、3.温度 9°C に保たれたクリーンルーム内の冷蔵庫の3か所とし、計測間隔は約1年毎とする。試料の造形と設置日は2021年10月22日である。温度と湿度の変化の大きさは、1から3の順に小さくなり、この順に試料の変化の大きさも小さいと予想される。

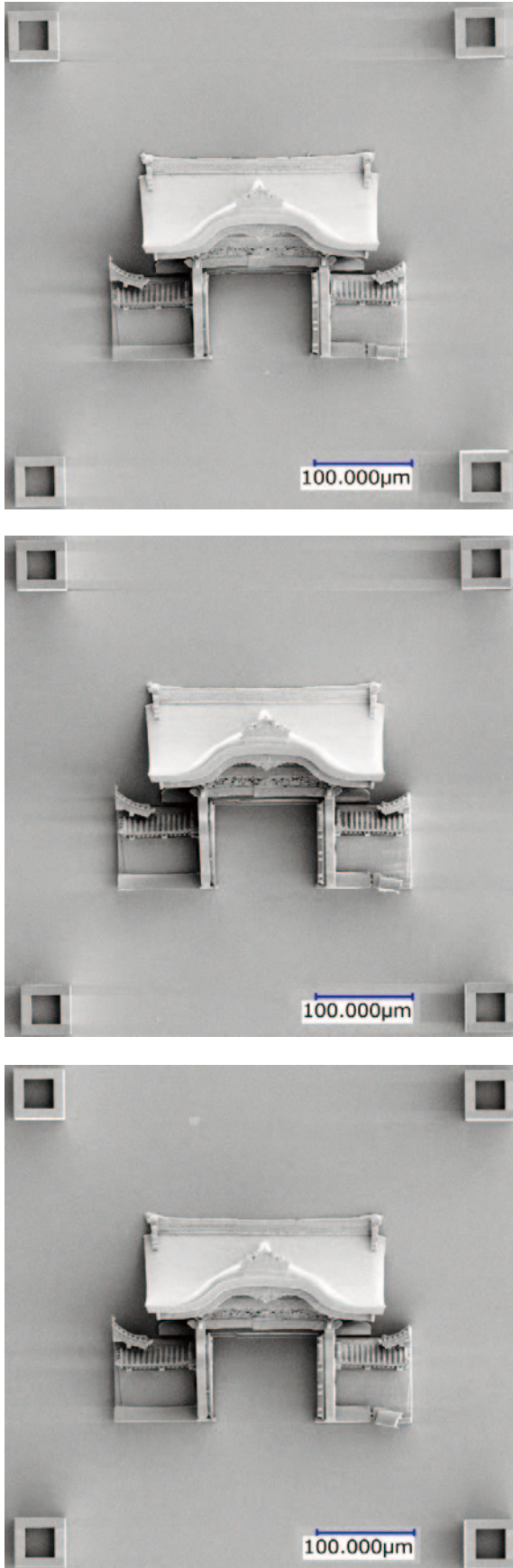


図8. 長期保存観察用ナノ造形物サンプル



図9. 保存環境

6. 議論

本提案の大きな制限として観察のために顕微鏡が必要なことが挙げられる。造形の解像度と大きさはトレードオフの関係にあり、解像度を下げれば本研究で用いたナノ 3D プリンタでも 8mm 角の大きさまで造形できる。そのため、必ずしも SEM が必要になるわけではないが、光学・電子顕微鏡ともに視線方向を変更しづらい問題がある。造形面方向から隠れの位置にある形状を、サンプルを破壊せずに観察する方法は更なる検討が必要である。

ナノ造形物の劣化寿命の理論的な裏付けも必要である。産業用途において、プラスチックやゴムなどの有機材料の寿命予測をする方法として加速試験が知られている。これは、熱劣化を予測するアレニウス式やラーソンミラー式といった数式モデルと、10°C2 倍則のような経験則や同種の材料のデータを元に推定・測定された物性値により計算することができる。しかし、推定結果は、多くの経験から得られた知見に基づいており、ナノのスケールでそれらが適応可能かどうかの基礎的な情報が無い。

また、機械的な強度測定ができると、振動などへの耐性が推測できるが、ナノ素材の直接的な強度測定はまだ研究段階にある。文献[9]では、半導体技術による薄膜やナノ構造体の強度測定方法を紹介しており、カーボンナノチューブの強度測定に成功しているが、特殊な MEMS 引張試験デバイスを作製することで実現している。現状ナノ 3D プリンタのみでは MEMS デバイスを構成することが困難であり、ナノ造形物をガラス基板から持ち上げて移動させることも困難であるため、現実的ではない。

7. まとめ

本稿では、ナノ 3D プリンタを用いて文化財のデジタルデータを造形し、その造形物をデジタルデータのメタデータとして長期保管することを提案した。二条城唐門のデジタルアーカイビングを行って 3 次元形状データを作製し、ナノ 3D プリンタを用いてプレパラート上に極微小サイズで造形した。その長期変化の様子を観察する実験のための問題設定をのべ、製作した試料を示した。継続的にその形状変化を観察する予定である。本技術が確立された際には、「ナノ保存レプリカ」のような親しみのある名前と呼称したい。

現在のマイクロ 3D プリント技術では、色は保存できないため色の保存は今後の研究課題である。色素は主に光や熱により退色劣化を起こすことが知られており[10]、長期間の保存に適さない。

飛鳥高松塚古墳のように、光の届かない一定温度湿度の保たれる環境においては 1000 年を超えて色を保つことも可能であることが知られているが、稀有な例である。一方で、構造色は光や温度による劣化をほとんど起こさず、4700 万年の昆虫の化石が当時の色を褪せることなく伝えている例[11]が知られている。ナノプリンターの特長である微細加工を活かして、色素の色を構造色に変換して保存する技術の開発は重要なテーマになるだろう。ただし、そのためには微細加工技術と材料のさらなる発展が必要である。

謝辞：本研究は、元離宮二条城事務所、京都先端科学大学田畑修教授、沖一雄教授らの協力を受けた。

参考文献

- [1] 高田祐一, “文化財デジタルデータ長期保管の実務” 奈良文化財研究所研究報告, 第 24 冊, p.49-54, <http://hdl.handle.net/11177/7253>(参照 2021-08-14)
- [2] 総務省 “震災関連デジタルアーカイブ構築・運用のためのガイドライン (2013 年 3 月)” 第 4 章, p.95, https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/icts_eisaku/icriyou/02ryutsu02_03000114.html (参照 2021-08-14)
- [3] 高田祐一, “文化財デジタルデータ長期保存のためのファイル形式” 奈良文化財研究所研究報告, 第 24 冊, pp.71-76, <http://hdl.handle.net/11177/7246>(参照 2021-10-19)
- [4] “ISO 14721:2012, Space data and information transfer systems — Open archival information systems (OAIS) — Reference model,” <https://www.iso.org/standard/57284.html> (参照 2021-08-14)
- [5] 秋元良仁, “デジタルアーカイブとメタデータ”, 日本写真学会誌 79 巻 1 号, pp.10-15, 2016.
- [6] K. Ikeuchi, et. al. "The Great Buddha Project: Digitally Archiving, Restoring, and Analyzing Cultural Heritage Objects," IJCV, Vol. 75, No. 1, p. 189-208, 2007.
- [7] Nanoscribe: <https://www.nanoscribe.com/jp/solutions/photonic-professional-gt2> (参照 2021-08-14)
- [8] 澤田祐子, 越前谷大介, 温度と湿度による樹脂材料の強度低下の予測, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.875, 2019.
- [9] 生津資大 “マイクロ・ナノ材料の機械信頼性評価技術”, スマートプロセス学会誌 9(1), 3-8, 2019
- [10] 中澄博行, “色素の退色劣化” 色材協会誌, 63 巻 11 号, pp. 677-684, 1990.
- [11] “The fabulous fossils of Messel - a colourful world of birds and beetles,” <https://www.theguardian.com/science/2016/may/18/the-fabulous-fossils-of-messel-a-colourful-world-of-birds-and-beetles> (参照 2021-10-20)