

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：34603

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H01828

研究課題名(和文) X線CTを核にした3Dデータの活用に基づく文化財の新研究基盤創設

研究課題名(英文) Establishment of a new research base of cultural properties based on utilization of 3D data centered on X-ray CT

研究代表者

今津 節生 (IMAZU, SETSUO)

奈良大学・文学部・教授

研究者番号：50250379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,200,000円

研究成果の概要(和文)：X線CTを使って取得した3Dデータは博物館の重要性を更に高めた。本研究を契機に、東アジア各国の国立博物館を中心に10台のX線CTが導入され、研究が大きく発展した。3Dデータは健康診断をはじめ、保存修復・運搬・防犯・防災など多方面に活用できる。特に本研究では文化財の健康診断を重視した。研究成果として、興福寺乾漆像のCTデータを解析して700頁におよぶ研究報告書をまとめた。また、一般市民を対象に、2017年に『阿修羅像シンポジウム』を東京・奈良・福岡で開催し、2018年には『阿修羅像のひみつ』を出版した。また2020年には『3Dデータを活用した文化財研究の可能性』と題する講演会を開催した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で進めたCTを使って取得した3Dデータの活用は、保存修復・運搬・防犯・防災・博物館展示や学校教育へ広がっている。本研究から発展した研究成果は多方面におよぶ。人工知能(AI)を使って仏像の樹種を推定する技術はすでに実用化の段階にある。修復の専門家の知見もから破損箇所や破損箇所を検索することも可能である。仏像や工芸品に使われた木材の年輪を解析して年輪年代を測定することも可能である。文化財のCTデータの活用は研究資料や博物館だけではなく、やがて観光にも役立つことも期待される。

研究成果の概要(英文)：The 3D data acquired with X-ray computed tomography (CT) have further increased the importance of museums. This study prompted the introduction of 10 X-ray CT machines, mainly in national museums in East Asian countries, leading to significant developments in research. The 3D data can be used in many fields, from health checkups to preservation and restoration, transport, crime prevention, and disaster prevention, among others. This study particularly focused on health checkups for cultural assets, and it produced a study report reaching 700 pages, which summarized an analysis of CT data from the deactivated dry-lacquer statues. In addition, for the general public, an "Ashura Statue Symposium" was held in 2017 in Tokyo, Nara, and Fukuoka, and Ashura no himitsu [Secrets of the Ashura statues] was published in 2018. Furthermore, a lecture meeting titled "The Possibilities of Cultural Asset Research Using 3D Data" was held in 2020.

研究分野：文化財科学

キーワード：文化財の健康診断 CT 3Dデータ 保存修復 防犯 防災 AI

1. 研究開始当初の背景

1978年に我が国で初めてX線CTスキャナ(以降、X線CT)が文化財の調査に応用された。その後、国立歴史民俗博物館や奈良文化財研究所がX線CTを導入し3Dデータを使った文化財の調査が始まった。特に、2006年に文化財用の大型X線CT・高精細3Dデジタイザ・フルカラーの3Dプリンタを九州国立博物館が導入して本格的な活動が始まった。その後、東京・京都・奈良・北海道の国立博物館をはじめ10の文化財関係機関にX線CTが導入され3Dデータが蓄積されている。

日本の積極的な研究活動によって、中国や韓国でもX線CTを文化財研究に活用しようとする動きが広がり、各国の中核的な博物館や研究所に導入されるようになった。X線CTを使った文化財の調査研究は、欧米ではまだ本格化していないので、いまや東アジア地域の文化財研究者は世界に向けて新しい研究成果を発信できる絶好の機会を得ている状況にある。

2. 研究の目的

医療用X線CTを使って開始されたわが国の文化財の研究は、三次元計測機器(X線CT、3Dデジタイザ、3Dプリンタなど)の発達によって文化財の科学的な調査研究にとって不可欠な存在になりつつある。特に、X線CTを用いた文化財の調査研究は文化財の保存・活用・教育を目的とした博物館の重要性を更に高めることが期待できる。CTデータは文化財の健康診断をはじめ、保存修復・運搬・防犯・防災などの基礎情報として役立つ可能性がある。また、博物館の展示や学校教育への活用などに幅広く役立つ可能性がある。

文化財はその内部に文化財が生まれるに至った経緯や技術、使われ方や修理などの歴史、信仰や願いなど多くの情報を抱えている。しかし、これまで文化財の内部構造調査は文化財修理のような限られた機会に、特定の研究者が観察して記録するか、X線透過や超音波探傷検査のような二次元の画像調査が行われてきた。ところが、近年X線CTを核にして、3Dデジタイザや3Dプリンタ等の三次元計測機器を使い、文化財を調査することによって、非接触・非破壊で目には見えない文化財の内部情報を多くの人が共有することができるようになった。しかも、計測した詳細な三次元データを繰り返し再現し、時には3Dプリンタで出力したデジタル模型を手元に置いて多くの研究者が共通認識しながら検討することもできるようになった。

X線CTを核にしたこの新しい研究方法によって、写真や実測などの二次元的な記録方法からでは導き出すことができない製作技術の解明や修理の履歴、材料の違い、さらには施主や制作者の信仰や願いにも通じる文化財情報を記録できる。文化財の三次元情報は二次元で表現するよりも豊富な情報を内包している。3Dデータは実物と同じく観察する人の発想と視点によって様々な情報を引き出すことができる。

3. 研究の方法

私達はX線CTで取得した三次元情報を様々な分野の研究者が共有し、繰り返し観察することによって、議論と共に新しい研究基盤を構築できると考えている。その結果、市民への研究の還元と文化財の活用がよりいっそう進展することを期待している。これまでに蓄積してきた3Dデータを美術史・工芸史・考古学・保存・文化財科学・修復技術など多分野の研究者が共同で解析して活用することによって、これまでにない新しい研究基盤を構築できる可能性がある。具体的には、文化財の構造・技法や材質の解析、保存・修復に関する情報の蓄積、博物館展示や学校教育への活用の可能性などである。文化財の3Dデータを蓄積し、解析して活用する研究は3つの方向に集約できる。

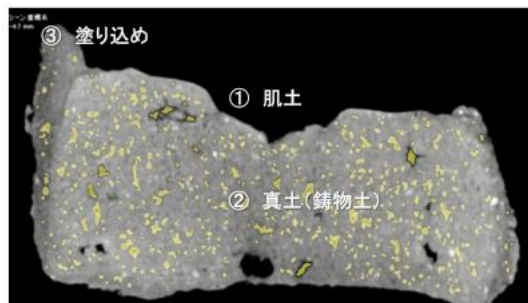
まず、文化財の内部構造や制作技法に関する研究を飛躍的に進展することが期待できる。CTデータの最小単位となるボクセルは位置情報とX線の透過度情報をもつので、輝度解析やパターン解析を行うことによって文化財の材質を推定することが可能になる。また、「文化財の健康診断」として保存・修復必要な基礎情報を得ると共に、予防的保存に役立てることも可能になる。さらに、3Dデータを使って博物館展示や学校教育への活用が可能になる。3Dプリンタで作成したデジタル複製品は、本物を理解するための最適なハンズオン資料として、市民や学生が文化財を理解するために広く役立てることも可能になる。また最近では、3Dプリンタで作成したデジタル複製品を使って過疎地域の文化財防犯に役立てる動きも活発化しており、多様な活用方法が模索できる。

4. 研究成果

研究の方法で述べた3つの方向性について、代表的な研究成果の概要を記載する。

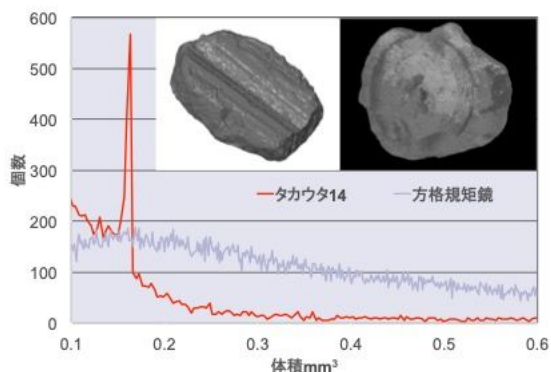
内部構造、製作技法の解析

CTデータを使って目には見えない空間を解析した例として、青銅器の鑄造に使われた土製鑄型のガス抜き構造の解析を紹介する。福岡県春日市須玖タカウタ遺跡から弥生時代中期の銅剣の土製鑄型が発見された。青銅器を鑄造する時に発生するガスを効率よく逃がすための微細な空隙の有無を調べる目的で、土製鑄型の内部に存在する空間を抽出して可視化した。この空間解析によって土製鑄型の製作時に混合した有機物が焼けて空洞化した空間の形状を認識することができた。この空間は鑄造時のガス抜きに効果を発揮すると考えられる。さらにこの空間の形状を詳細に観察すると、多くは断片化しているが、一部にストロー状の形態（直径2.2mm、長さ9.6mm）を確認した。これは粉碎されずに残った植物の茎の可能性がある。再現実験として籾殻を真土に混入した土製鑄型と須玖タカウタ遺跡の土製鑄型について、閉鎖空間の体積ヒストグラムを算出した。その結果、須玖タカウタ遺跡出土土製鑄型の閉鎖空間の体積分布は $0.1 \sim 0.2\text{mm}^3$ の間に強く現れ、一方で籾殻を混入した再現実験の鑄型では、 $0.5 \sim 0.6\text{mm}^3$ に籾殻由来する閉鎖空間の体積分布を確認することができた。この結果から、須玖タカウタ遺跡出土の土製鑄型の閉鎖空間は籾殻を混入した再現実験品よりも体積が小さく高密度に存在すると考えられた。また、同様に中国漢代の鏡（方格規矩鏡）の鑄型を解析したところ、様々な粒状の有機物を真土に混入していることが判明した。このように、文化財の調査にX線CTを用いることによって、非接触・非破壊で構造調査を行うことができると共に、見えない空間を可視化して定量化することによって制作技術の解明に繋げることができた。



- ① 細かな粒子の土を用いて肌の写りを良くする。
- ② 粘土質の鑄物土、空隙が多く、鑄造時に発生するガスを抜く。
- ③ 二枚の鑄型を合わせて固定、隙間から溶湯が漏れるのを防ぐ。

タカウタ遺跡土製鑄型の断面構造



タカウタと中国鏡鑄型の空隙比較

保存・修復に関する情報の蓄積 “文化財の健康診断”

X線CTによる内部構造の調査によって文化財の亀裂や劣化状態を記録し、さらには記録の無い過去の修復歴までも明らかにすることができる。3Dデータの解析によって解体修理の現場でも観察が困難な内部の構造を自由に観察することもできる。まさに、文化財内部の3Dデータの解析によって、“文化財の健康診断”が可能になる。さらに、医療分野で実施されているように特定部位の形状を3Dプリンタで造形することによって、難易度の高い保存・修復作業のシュミュレーションを行うこともできる。

X線CTによる内部構造の調査で最も期待されるのは文化財の状態把握である。私たちの日常生活の中で、病院で定期的に健康診断を行い、安心して日常生活をおくることが定着しているように、国民の宝である文化財の健康診断を定期的に行うことは重要である。

たとえば、興福寺の阿修羅像は製作されてから1280年の間に、厳しい環境変化に置かれ、幾多の災害を乗り越えてきた。明治以降の修理は記録されているものの、それ以前の記録はない。記録のない過去にどのような修理が行われてきたのか？長年の間に虫食いは進んでいないのか？構造的に脆弱な部分は存在しないのか？表面



阿修羅像の肩と第一手付近の修理痕跡

に見える細かな亀裂はどこまで進んでいるのか？ このように表面の観察からではわからない健康状態を把握できれば、今後の維持管理に重要な情報となる。さらに、定期的に健康診断を行えば、小さな変化を発見することが可能となり、将来の修理計画を立案する上でも役立つことが期待できる。

奈良興福寺の阿修羅像は奈良時代以来、火災や地震、戦災などをくぐり抜けて現在に伝えられてきたが、転倒などで6本ある腕のうち数本が損なわれている。1888年に撮影された諸仏の集合写真でも合掌手の手先が欠損しているのが確認できる。現在の阿修羅像は1902～1905年に日本美術院の新納忠之介氏らが修理した。この修理で最も正面に近い左右2本の腕(第一手)のうち、ひじから先がなくなっていた右腕などが木彫で補われた。2本の腕は体の正面より僅かに左寄りの位置で合掌する姿になり現在に伝えられている。X線CTの計測値から見ても現在の合掌した両手は正中線から22mm左寄りに位置しているのがわかる。ところが、修理前の1894年に撮影された写真を見ると、阿修羅像の右の第一手が欠失している。他にも、現在の阿修羅像との違いが見える。左手の位置が身体を中心から左にずれていること、修理前の写真の左手の手ひらは外にむかって開いており合掌していたにしては不自然なこと、修理前は両脇がしまりひじが下がっているのに対して現状はひじが外に広がるように張っていることなどである。

CTデータの解析によって阿修羅の修理履歴が明らかになった。第一手の両腕は明治の修理以前に破損していたことが判明した。修理前に撮影された明治27年の写真に写っている亀裂部分をX線CTで観察すると、同じ場所に接着した痕跡を確認した。おそらく、修理前の写真を撮影した時点では、阿修羅像の第一手は両腕がぐらつく状態だったと考えられる。

さらに、両腕のわきの下に木屎漆と思われる接着剤が詰められており、両ひじを外側へ開き気味に押し上げていたことが判明した。さらに左肩の内部を見ると、肩と腕を固定する釘が抜けて隙間ができていた。釘穴の位置を元に戻すと両腕は脇が締まり左腕は斜め右上に13mm移動する。これらの観察結果から阿修羅像を当初の形に復元すると、両腕は脇が締まり、左腕は斜め上に移動することになる。その結果、両手は正中線にほぼ合致すると推定される。

博物館展示や学校教育への活用

X線CTや3Dデジタルから取得した三次元情報を3Dプリンタで造形したデジタル複製品は、従来のような“本物の代用”ではなく“本物を理解するための道具”として活用できる。また、拡大・縮小・断面などを自由に製作でき、従来のシリコンの型取りでは不可能な複製品を安価で精巧かつ短時間に製作できるという特徴がある。これまでに何度か展示にデジタル複製品を活用する試みを行い、その展示効果を検証した。

観覧者はデジタル複製品を手に取りながら本物の文化財を観察することで、文化財の複雑な図像や制作技法を楽しく学び、作品を手取るように理解することができる。

このように文化財の基準作品のデジタル複製品を用いて学生や社会人に対して実践的な教育研究を行うことができる。デジタル技術を文化財科学や考古学・美術史を学ぶ学生教育のために活用する。具体的には、実物を調査した研究者のみが知りえた情報を実物と同じように観覧者が観察できる展示や視覚の不自由な人も参加できる教育システムを構築することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Setsuo IMAZU	4. 巻 2018
2. 論文標題 “Condition diagnosis and 3D-data analysis of cultural property using X-ray CT at a Japanese museum”	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IX International Scientific Conference, “Ancient Cultures of Mongolia, Baikal Siberia and Northern China	6. 最初と最後の頁 167-169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 今津節生	4. 巻 0
2. 論文標題 CTスキャナによる阿修羅像の調査	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 興福寺仏教文化講座	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今津節生	4. 巻 0
2. 論文標題 CTスキャンによる阿修羅像の健康診断	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 興福寺中金堂再建記念・興福寺 シンポジウム『阿修羅像を未来へ受け渡すために』	6. 最初と最後の頁 3-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 楠井隆志, 赤田昌倫	4. 巻 0
2. 論文標題 CTスキャンで阿修羅像の内部を探る	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 興福寺中金堂再建記念・興福寺 シンポジウム『阿修羅像を未来へ受け渡すために』	6. 最初と最後の頁 5-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山崎隆之	4. 巻 0
2. 論文標題 阿修羅像、六つの顔に秘められた制作者の意図	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 興福寺中金堂再建記念・興福寺 シンポジウム『阿修羅像を未来へ受け渡すために』	6. 最初と最後の頁 8-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今津節生	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 X線CTを用いた土製鋳型の構造解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 駒沢考古学	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Setsuo Imazu, Koji Ito, Aizawa, Andras Morgo	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 The pre-conservation issues in the conservation of the wrecked ships and remains of the Mongol fleet from 1281	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 WET ORGANIC ARCHAEOLOGICAL MATERIALS CONFERENCE 2016	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 今津節生	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 X線CTを用いた鋳型の構造調査	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 春日市須玖タカウタ遺跡調査報告書3	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今津節生	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 X線CTを核にした文化財の三次元構造調査と健康診断	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 韓国文化財保存科学会	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 杉山智昭、赤田昌倫、鳥越俊行、長田佳宏、大江克己、今津節生
2. 発表標題 アイヌ民族文化財保存修復体制の確立に向けたX線CTによる資料状況調査
3. 学会等名 文化財保存修復学会第40回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今津節生、山崎隆之、矢野健一郎、楠井隆志、赤田昌倫、金子啓明
2. 発表標題 X線CTデータから見た興福寺阿修羅像の修理痕跡
3. 学会等名 文化財保存修復学会第34回大会研究発表要旨集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Setsuo IMAZU
2. 発表標題 Clarification of the Conservation and Restoration History of Cultural Property Using X-ray CT
3. 学会等名 Symposium of Conservation of Cultural Heritage in East Asia in Shanghai
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Setsuo IMAZU
2. 発表標題 Condition diagnosis and 3D-data analysis of cultural property using X-ray CT at a Japanese museum
3. 学会等名 ICOM 24TH GENERAL CONFERENCE MUSEUMS AND CULTURAL LANDSCAPES MILAN, ITALY (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今津節生
2. 発表標題 X線CTを核にした文化財の三次元構造調査と健康診断
3. 学会等名 韓国文化財保存科学会 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今津節生
2. 発表標題 X線CTで探る阿修羅像の修理歴
3. 学会等名 興福寺シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今津節生
2. 発表標題 X線CTは文化財を探るタイムマシン
3. 学会等名 北海道平取町立二風谷アイヌ文化博物館公開セミナー
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今津節生
2. 発表標題 阿修羅の健康診断
3. 学会等名 奈良大学世界遺産講座
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 多川俊映、今津節生、楠井隆志、山崎隆之、矢野健一郎、杉山淳司、小滝ちひろ、	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝日新聞出版	5. 総ページ数 198
3. 書名 『阿修羅像のひみつ』興福寺中金堂落慶記念、朝日選書975	

1. 著者名 多川俊映・今津節生・楠井隆史・赤田昌倫	4. 発行年 2017年
2. 出版社 共同精版印刷（株）	5. 総ページ数 14
3. 書名 興福寺中金堂再建記念・興福寺『阿修羅像を未来へ受け渡すために』	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西山 要一 (Nishiyama Youichi) (00090936)	奈良大学・その他部局等・名誉教授 (34603)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	楠井 隆志 (Kusui Takashi) (30446885)	福岡県立アジア文化交流センター・その他部局等・課長 (87108)	
研究分担者	杉山 淳司 (Sugiyama Junji) (40183842)	京都大学・生存圏研究所・教授 (14301)	
研究分担者	井手 亜里 (Ide Ari) (50232939)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	鳥越 俊行 (torigoe toshiyuki) (80416560)	独立行政法人国立文化財機構奈良国立博物館・その他部局等・室長 (84603)	
研究分担者	成瀬 正和 (Naruse Masakazu) (90778630)	東北芸術工科大学・文化財保存修復研究センター・客員教授 (31501)	
研究分担者	赤田 昌倫 (Akada masanori) (90573501)	独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部博物館科学課・客員研究員 (87106)	