

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02014

研究課題名（和文）古代青銅器の高精度3Dデジタルデータを活用した凝固解析による注湯技術の解明

研究課題名（英文）Study on casting technology by casting simulation using 3D digital data of ancient bronze ware

研究代表者

長柄 毅一（Nagae, Takekazu）

富山大学・学術研究部芸術文化学系・教授

研究者番号：60443420

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：古代の青銅鑄物の製作技術を解明することを目的に、青銅文化財を3Dスキャナによりデジタルデータ化し、これを用いた鑄造シミュレーションを行った。殷周青銅器のような複雑精緻な鑄物のほか、日本の銅鐸（岐阜県久々利銅鐸）、仏像（法華経寺大仏）、和鏡（國學院大學博物館所蔵品）を対象とし、鑄造における湯流れの状態や温度分布、凝固の進行状況等を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鑄造技術は、1000 以上に溶けた銅合金を型に流し込んで成形する方法であり、熟練した技法が必要な金属加工技術のひとつである。高温でかつ液体の金属を扱う危険でかつ難しい技術を人類は古代より活用しており、紀元前2千年紀には、中国殷周青銅器に代表される複雑精緻な鑄物の製作を可能にした。こうした金属加工技術は、古代の国家が存立、維持、発展していくための鍵となっており、その詳細を明らかにすることで、古代における国家形成の仕組みを明らかにするための重要な手がかりを得ることを可能にする。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify ancient casting techniques, 3D digital data of ancient bronze castings were collected with a 3D scanner. A casting simulation was performed to know how the melt metal were poured into mold and solidified.

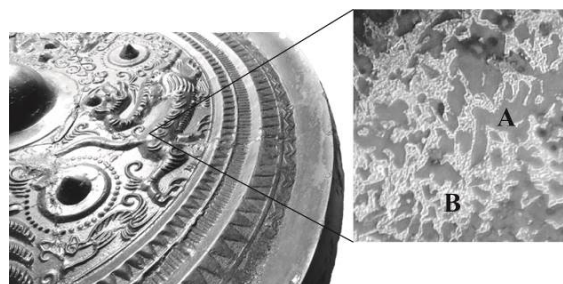
研究分野：文化財科学

キーワード：青銅 鑄造シミュレーション 3Dデジタルデータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

鑄型のどこからどの角度で注湯するかは鑄物の出来を決定する重要工程であるにもかかわらず、これまで古代青銅器の注湯技術を説明した者はいない。その説明には素材成分の解明と注湯方法の推定、湯流れの解析が必要である。図1に青銅鏡の鏡背面から直接検出した金属組織を示す。濃いグレーのAの領域



（ $\alpha$ 相）と薄いグレーのBの領域（共析相）がある。平成27年度から実施した挑戦的萌芽研究「青銅組織を用いた画像解析定量分析法の確立」ではこの金属組織からそれぞれの相の面積率を求め、その割合から主要三元素（銅、錫、鉛）の定量値を非破壊で導くことを可能とするに至った。蛍光X線分析より高精度に成分値を知ることができ、鑄造技術解析における溶融金属の物性値を与えることが可能になった<sup>1)</sup>。

図1 三角縁神獸鏡（黒塚古墳出土）から直接、デジタルマイクロスコップで検出(非破壊)した金属組織  
A部：銅84%、錫16%、B部：銅74%、錫26%  
各々の相の面積率から全体の成分が分かる。

中国古代の殷周青銅器の製作方法は、安陽殷墟出土鑄型から砂型を用いた分割鑄型の鑄造法と分かっている。多数の鑄型が出土しているがいずれも破片であり、未だに鑄型をもとに古代の注湯技術を解明できていない。図2は研究協力者の中国社会科学院考古研究所の岳占偉研究員が出土鑄型片をもとに作成した爵の鑄型想像図である。複雑形状の鑄物を13個の分割鑄型で構成する案だが、構造が複雑で検証鑄造実験は行われていない。そのため、どこからどのように注湯したのかは未だ不明だ。また、これまで鑄型形状を想定できた例はわずか3例（爵、卣（ゆう）と鬲鼎（れきてい））であり、いずれも検証ができていない。

我々は、別の研究で日本国内50点弱の殷周青銅器全形を3Dスキャンした。青銅器の全形と鑄造欠陥のくぼみまで再現する高精度3Dデータを利用して鑄造シミュレーションを行い、個々の青銅器の注湯技術を解明できないかと着想した。新しい非破壊分析手法、3Dデジタルデータ、鑄造シミュレーションを効果的に利用した研究は他に例がなく、画期的な成果を得ることができる。

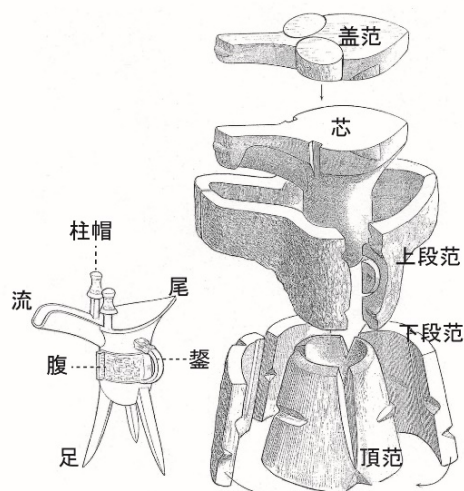


図2 爵（しゃく）の鑄型想像図（岳占偉）  
この鑄型を天地逆にして頂范の足の部分から注湯したのではと推定されている。

### 2. 研究の目的

本研究は、3Dスキャナでデジタルデータ化した古代青銅鑄物について、鑄造シミュレーションによって、その製作技術を明らかにすることを目的としている。そのため、3Dデジタルデータの取得と共に、シミュレーションのベースとなる青銅器の成分値を取得していく。次に、3D形状データをもとに鑄型形状を推定し、成分データを使用して鑄造時の湯流れ・凝固シミュレーションを行い、古代東アジアの注湯技術を明らかにする。注湯技術は青銅成分と青銅器形状の変化とともに変遷した可能性が高く、成分・形状・注湯技術の関係を検証し古代の技術を解き明かすことが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

鑄造方案は、比較的簡単な形状の青銅鏡の注湯方案（青銅を流し込む方法）から検討した。青銅鏡の鑄型は1997年から山東省臨淄で前漢鏡鑄型群が出土しておりそれらをベースとして鑄型設計ができるためである。注湯方法が古代の方法に近いか否かの手ごかりは鑄造欠陥の位置である。欠陥には熔けた金属の凝固収縮によって外形にへこみがみられる外引けや鑄物内部に発生する内引け、湯が鑄型を充てんする前に凝固する湯回り不良、ガスが原因となる気泡巣や朦朧肌などがあり、外部の欠陥は表面観察により、内部欠陥はX線撮影によって判明する。これらの欠陥位置が鑄造方案を決定する際の手ごかりとなる。泉屋博古館の青銅鑄物はX線CTによる内部欠陥に関する情報が多くあり、さらに必要に応じて二次元のX線写真撮影を追加する。3Dデジタルデータに出土鑄型の情報を加え、鑄型の形状（素材、厚さ、堰、ガス抜き形状と位置）をデザインし、CADソフトで湯口や揚りを付加する。これをもとに、鑄造シミュレーションソフトウェア（JSCAST）を用いて解析を行い、想定される欠陥位置を、鑄物に残された欠陥痕跡と比較し、古代の技法を明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究プロジェクトにおいては、図2に示した殷周青銅器（泉屋博古館所蔵品）の解析を端緒に、銅鐸（久々利銅鐸）、仏像（法華経寺大仏）、和鏡（國學院大學博物館所蔵）の解析を行ってきた。ここでは、研究の主な成果の一部として、和鏡において行った研究成果を報告する。

#### 4. 1 研究の主な成果 【和鏡の鑄造シミュレーション】

##### 4. 1. 1 分析資料と方法

鑄造シミュレーションを実施した資料は、平安時代の鏡3点、室町時代の2点、江戸時代の3点の鏡である。平安時代の鏡は面径が10 cm前後で重量も100 gを下回る。室町時代の鏡は面径が15~18 cmで重量は500 g前後である。江戸時代の鏡は大型でその重量は1 kgを超える。解析したものでは、最大5 kg、面径37 cmの大型鏡も含まれる。

鑄造シミュレーションの準備として、それぞれの鏡の3Dポリゴンデータに湯口系を設けた。（この作業はシミュレーションソフト内で行った。）湯口の位置は、鏡に正対したときの真上の位置としたが、持ち手つきの鏡は持ち手側とした。いずれも、揚りは設けていない。なお、鑄造シミュレーションの際、鏡の物性値が結果に大きな影響を及ぼすことから、鑄物の成分を明らかにしておかなくてはならない。これまで、國學院大學博物館所蔵和鏡については、一部について、蛍光X線分析が行われている<sup>2)</sup>。本研究においては、鉛入り青銅のうち、CAC603を比較的近いものとして選定し、解析を行った。

##### 4. 1. 2 結果および考察

解析結果の一例として12世紀後半の和鏡である州浜柳樹双雀鏡の結果を図3に示す。湯流れシミュレーションのカラーバーは温度を示しており、注湯温度の1200°Cから凝固開始温度（液相線温度）の930°Cまでを橙から青までのグラデーションで表現している。また、凝固シミュレーションにおいては、カラーバーは注湯終了直後から凝固開始時の時間（秒）を表している。（温度を示しているわけではないことに注意が必要である。）なお、青は注湯終了後、最初に凝固するまでの経過時間であり、橙は最終的に凝固が終わるまでの経過時間を示している。凝固が完了した部位については、白色で表示している。

○ 湯流れシミュレーション

熔湯は鏡中央部直上からまっすぐ注いでおり、鑄型内で液体金属の攪拌が起こっている様子が確認された。注湯終了時においては先に湯が注がれた中央底部付近の湯の温度は、真っ先に温度低下するわけではなく、左右周辺部などよりも、比較的高くなっている。なお、この鏡は小型鏡であり、湯の温度が低下するのも早い。そのため、凝固終了時において、その一部は凝固開始寸前の液相線温度（青色領域）にまで冷却されている様子が見られる。

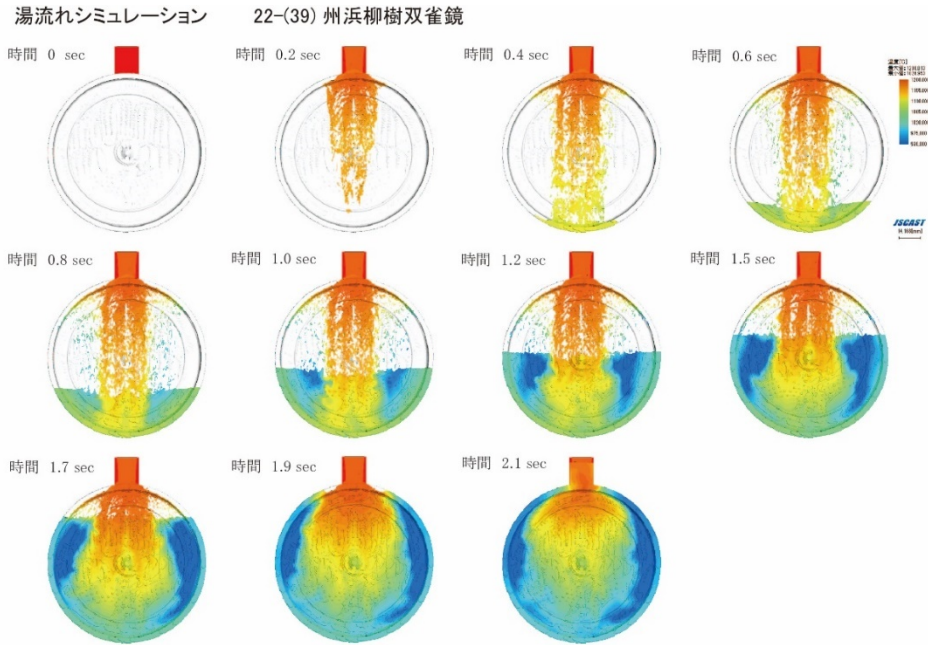


図3 平安時代の和鏡（州浜柳樹双雀鏡、國學院大學所蔵）における湯流れ解析結果

○ 凝固シミュレーション

注湯終了後、3.2秒で凝固が開始する。外周縁部をきれいに残し、面内部から凝固が進んでいく。9秒経過時点では紐と外周部がきれいに残されており、湯道と反対側の縁が鏡体における最終凝固域となる。紐やこの部分に引けが発生しやすいと思われる。鏡全体の凝固は、ほぼ25秒

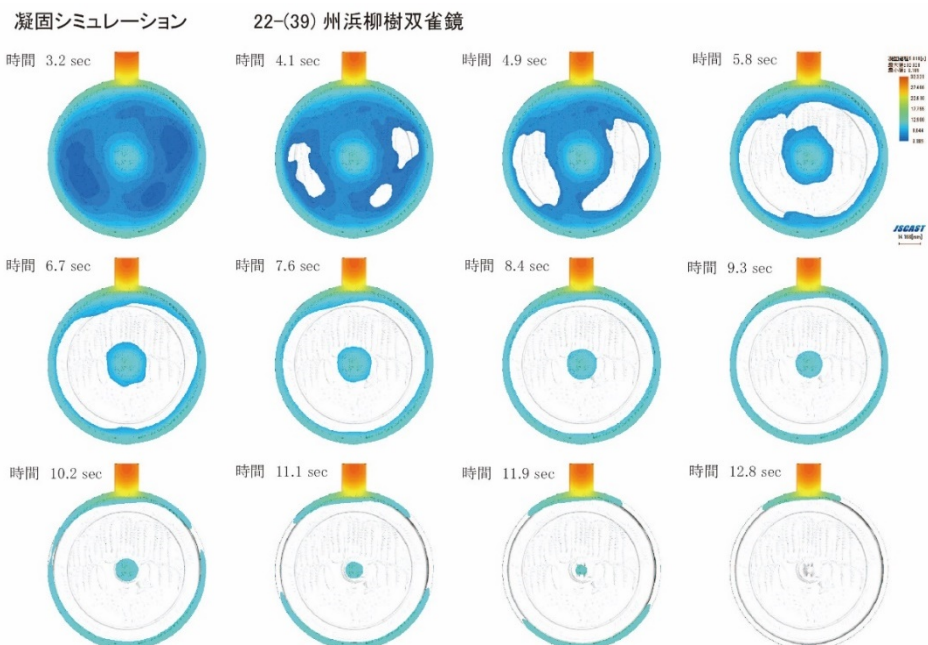


図4 平安時代の和鏡（州浜柳樹双雀鏡、國學院大學所蔵）における凝固解析結果

で完了する。湯道側は堰の内部で凝固が完了するため、鏡への影響は少ないものと考えられる。表面観察から1時方向の鏡縁内側面に铸造欠陥の窪みがあったことを報告しており<sup>3)</sup>、この位置の反対側が堰となっていたのではないかと想定される。

#### 4. 1. 3 和鏡における解析のまとめ

3D スキャナにより得られたポリゴンデータをもとに、和鏡の铸造シミュレーションを行った。湯流れシミュレーションでは、注湯時における鑄型内での熔湯の攪拌状態がよくわかり、注湯終了時における熔湯の温度分布も明らかにすることができた。凝固シミュレーションにおいては、注湯終了後、凝固が始まるまでの時間と完了するまでの時間がわかった。また、凝固が鑄型内でどのように進んでいくのかを明らかにし、引けなどの欠陥が出やすい最終凝固域を特定することもできた。

#### 4. 2 得られた成果の国内外における位置付けとインパクト

本研究により、古代の铸造技術の詳細を解明できることが明らかとなった。古代の鑄物への铸造シミュレーション技術の適用例としては、平尾、大中らによる銅鐸の铸造凝固過程の解析研究<sup>4)</sup>があり、文化財への適用はそれ以降ほとんど見られない。この研究から20年以上経過した現在、近年の高精度な3D スキャナの普及とPCの性能が飛躍的に向上したことによる铸造シミュレーションの高精度化によって、今後ますます、文化財科学領域を活性化する研究に進展することが期待される。

#### 4. 3 今後の展望

铸造シミュレーションが、古代青銅制作の技法を解明する有効な手法であることが分かったことで、今後、様々な鑄物の铸造方案を解明していくことができるようになった。すでに三角縁神獣鏡の铸造解析を実施しており、その成果は本年度、アジア铸造技術史学会において発表する予定にしている。さらに、ミューオンを用いた非破壊分析を取り入れることで、分析精度を上げ、シミュレーションを精密に実行していく計画である。

#### 参考文献

- 1) 長柄毅一、廣川守ほか「古代青銅鏡の鏡面から取得した金属組織画像による非破壊定量分析」銅と銅合金 57 (1) (2018) pp.30-36
- 2) 田口智子、水元和美、桐野文良、内川隆志、中世和鏡の基礎的研究 分析編、國學院大學博物館、國學院大學学術資料センター、2019
- 3) 内川隆志、三宮千佳、長柄毅一、檜山満照、三船温尚、中世和鏡の基礎的研究 分析編 2、國學院大學博物館、國學院大學学術資料センター、2020
- 4) 平尾良光、古代東アジア青銅製品铸造に関する基礎的研究、1995 年度科学研究費実績報告書

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 長柄毅一, 廣川守, 奥山誠義, 飯塚義之, 三船温尚, 菅谷文則, 横田勝	4. 巻 57
2. 論文標題 古代青銅鏡の鏡面から取得した金属組織画像による非破壊定量分析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 銅と銅合金 (日本銅学会)	6. 最初と最後の頁 31-41
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 -

1. 著者名 山本貴文, 湯田稜也, 長柄毅一	4. 巻 57
2. 論文標題 レーザー積層造形により作製したCu-Sn系合金造形体の金属組織と機械的特性に及ぼす熱処理の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 銅と銅合金 (日本銅学会)	6. 最初と最後の頁 137-147
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 -

1. 著者名 長柄毅一	4. 巻 -
2. 論文標題 古代青銅鏡金属組織の直接観察と定量分析の試み	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 保存科学研究集会「金属製遺物の調査・研究に関する最近の動向」	6. 最初と最後の頁 28-31
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長柄毅一, 山本貴文, 湯田稜也
2. 発表標題 金属3Dプリンタを用いた古代高錫青銅器復元の可能性
3. 学会等名 アジア鑄造技術史学会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長柄毅一、野原悠暉、廣川守、飯塚義之、三船温尚
2. 発表標題 古代高錫青銅器における金属組織と非破壊分析
3. 学会等名 アジア鑄造技術史学会（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長柄毅一、廣川守、奥山誠義、飯塚義之、三船温尚、菅谷文則、横田勝
2. 発表標題 古代青銅鏡の鏡面から取得した金属組織画像による非破壊定量分析
3. 学会等名 日本銅学会第57回講演大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 奈良県立橿原考古学研究所	4. 発行年 2018年
2. 出版社 八木書店	5. 総ページ数 586
3. 書名 黒塚古墳の研究	

1. 著者名 Akinori Uesugi, Vivek Dangi, Rajesh SV, Gregg Jamison, Takekazu Nagae	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Research group for south Asian Archaeology	5. 総ページ数 213
3. 書名 Current Research on Indus Archaeology	

1. 著者名 内川隆志、三宮千佳、長柄毅一、榎山満照、三船温尚	4. 発行年 2021年
2. 出版社 國學院大學博物館、國學院大學学術資料センター	5. 総ページ数 102
3. 書名 中世和鏡の基礎的研究 分析編 2	

〔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	三船 温尚  (Mifune Haruhisa)  (20181969)	富山大学・学術研究部芸術文化学系・教授    (13201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------