

# 中性子イメージングを用いた平泉に関する陶磁器の分析

研究代表者：岩手大理工 桑静

共同申請者・研究分担者：岩手大平泉 佐藤嘉広

研究分担者：東北大金研 藤田全基 杉山和正 藤澤敦

日本原子力研究開発機構 篠原武尚

Analysis of porcelain artifacts from Hiraizumi Using neutron CT

1

Sang Jing<sup>1</sup>, Yoshihiro Sato<sup>2</sup>, Masaki Fujita<sup>3</sup>, Kazumasa Sugiyama<sup>3</sup>, Atsushi Fujisawa<sup>3</sup>, Takenao Shinohara<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Faculty of Science and Engineering, Iwate University, Morioka 020-8550

<sup>2</sup>Center for Hiraizumi Studies, Iwate University, Morioka 020-8550

<sup>3</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577

<sup>4</sup>Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1184

Keywords: Hiraizumi, porcelain, celadon, neutron CT, production technique

## Abstract

Excavations at the Hiraizumi site, which served as the political center of the Oshu Fujiwara clan in the 12th century, have yielded a large number of imported porcelains. These artifacts constitute important evidence of interregional exchange with Song-dynasty China. Although previous archaeological studies and analytical approaches such as X-ray fluorescence (XRF) have clarified their chemical compositions, the pathways by which these porcelains reached Hiraizumi and their production technologies remain insufficiently understood. In particular, key technological parameters of porcelain production, such as firing temperature and processing conditions, vary significantly depending on the production region. Therefore, provenance cannot be reliably determined based solely on stylistic features or compositional analysis. However, conventional analytical techniques are often limited to surface information and are further constrained by the need to preserve these culturally valuable and fragmentary artifacts. To overcome these limitations, this study employs non-destructive neutron imaging techniques, including neutron computed tomography (CT) and dark-field imaging, to investigate the three-dimensional internal microstructure of excavated porcelains. By integrating internal structural information with existing compositional data, this approach aims to provide new scientific insights into production technologies and to improve the accuracy of provenance analysis. In this study, particular attention is given to a comparative analysis of celadon and bluish-white porcelain, in order to elucidate their differences through neutron-based characterization.

## 1. 緒言 (Introduction.)

12世紀に繁栄した平泉では、発掘調査によって陶磁器が多数出土している。当時、磁器は日本列島内では製作されていなかったため、中国又は朝鮮半島で製作され、平泉にもたらされていた。したがって、それらは為政者の権力や財力を相当程度反映していると考えられている。

平泉から出土する磁器はその多くが中国産であり、色調や形状の特徴などから、白磁、青磁、青白磁に分類されている。これまで日本国内において行われてきた研究は、おもに、その特徴などから考古学的に分類して産地や年代を特定しようとするもので、その成果は研究者間でおおむね共有されていた。また、磁器の産地を詳細に特定することを目的として、蛍光 X 線などによる元素分析も行われ、考古学的な研究成果との対応が試みられている。

一方、原料採取から加工・焼成をへて製品化に至るまでの、磁器の製作技術や技法についての研究はほとんど行われてこなかったことから、成形過程などは推測によっている部分が多い。また、製作の途上でどのように不具合が生じ、具体的に最終成果品の品質にどのように影響していたかも明らかでない。平泉に搬入された磁器が、博多や京都においてどのように評価され選択されたのかについても不明である。

以上の課題を踏まえ、平泉出土磁器の技術的特徴を明らかにすることは、当時の流通や選択の実態を理解し、平泉の歴史的な位置を再評価するうえで重要である。とりわけ、焼成温度や焼成時間といった製造条件は、産地や窯、製品の種類によって異なる重要な指標であり、国内生産以前の磁器流通モデルの再構築にも寄与すると考えられる。さらに、半独立的な政治体制を有していた奥州藤原政権の権力基盤や財源を再検討することで、文献史料では捉えきれない新たな情報提示が期待される。

しかしながら、従来の分析手法で得られる情報は主に表面に限られ、かつ試料は貴重な文化財であるため、非破壊分析が求められる。そこで本研究では、内部の微細構造を三次元的に可視化することを目的として、中性子 CT および暗視野イメージングを適用し、磁器の製作技術に関する新たな知見の獲得を試みる。

## 2. 研究方法 (Research procedure)

平泉及び京都から出土した磁器（白磁、青磁、青白磁）についての製作技術を明らかにするため、大強度陽子加速器施設の物質・生命科学実験施設 J-PARC MLF に設置されたエネルギー分析型中性子イメージング装置 BL22 螺鈿 (RADEN) および日本原子力研究開発機構 (JRR-3) に設置された中性子イメージング装置を使用した。

測定条件はまず、すべての試料に対して白色中性子ビームを用いた CT 測定を実施し、密度分布の評価お

よび内部構造の特定を行う。測定条件は、視野 (FoV) 6 cm、空間分解能 50~60  $\mu\text{m}$  とし、これは RADEN における標準的な CT 測定条件である。1 試料あたりの測定時間は約 6 時間とする。次に、RADEN 装置にタルボ・ラウ干渉計 (Talbot-Lau interferometer) を設置し、透過ビーム像の取得を行う。可視度画像の取得にはフリンジスキャン法 (fringe scan method) を用い、G2 格子をそのピッチ 1 周期分だけ 10 ステップ以上に分割して移動させ、各ステップでモアレパターン像 (moire pattern images) を記録する。試料と G2 格子間距離 ( $Z_{S-G2}$ ) を変化させながら、青磁および青白磁の試料片について予備測定を実施した。

データ解析については共同研究者である篠原博士が担当する。CT 再構成は、Astra-toolbox を用いた再構成プログラムにより実施する。暗視野画像についても、フリンジスキャンにより取得した画像データをもとに、画像処理プログラムを用いて再構成を行う。これらの再構成手法は、RADEN ビームラインの担当研究者により既に確立されている。

以下の画像は、試料と G2 格子間距離 ( $Z_{S-G2}$ ) を変化させながら得られた二次元の測定結果である。

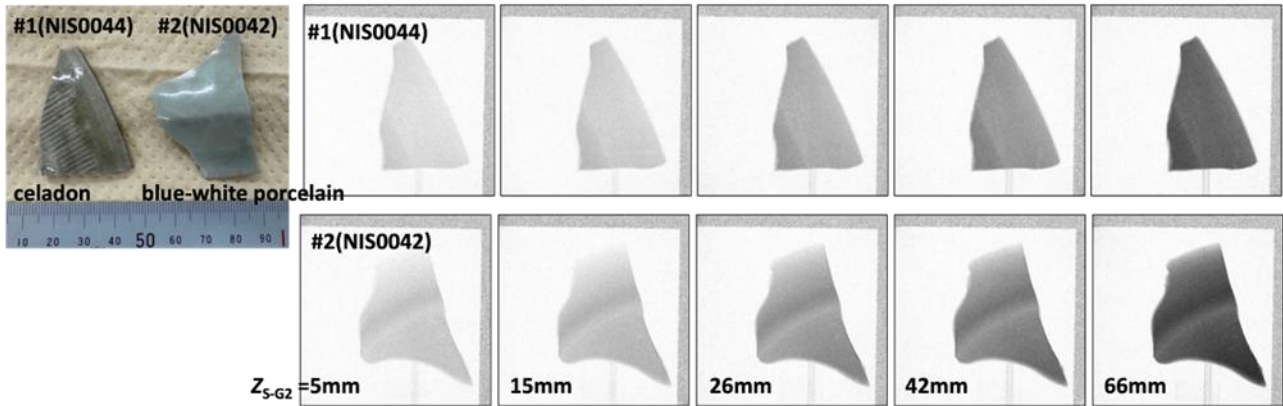


図 1 青磁、青白磁とその 2 種類磁器の中性子暗視野イメージング

### 3. 結果および考察 (Results and discussion)

本研究において中性子イメージングにより観察されたのは、磁器内部の構造的特徴である。ビームタイムの制約により測定は 2 回に分けて実施しており、現在も解析を継続中である。本稿では、その中間結果として、青磁および青白磁の 2 試料について得られた検討結果を報告する。

距離に対する可視度の減衰挙動は良好に取得され、青磁試料は青白磁に比べてより短い距離で可視度が減衰する傾向が確認されていた。この結果は、両試料における内部微細構造の違いを反映している可能性が想定された。これに関して、青磁試料では中性子散乱に寄与する不均一構造が存在し、その結果として可視度がより短い距離で低下したと考えられる。これは、気孔の分布、粒子界面、釉薬層と胎土の境界構造、あるいは焼成条件の違いに由来する内部構造の差異を反映している可能性がある。したがって、 $Z_{S-G2}$  に対する可視度の減衰挙動は、磁器試料内部の微細構造を非破壊的に評価する有効な指標となり得る。陶磁器試料の特性評価に応用可能であると考えられる。特に、青磁と青白磁の間に見られた減衰挙動の差異は、焼成条件や原料組成の違いに起因する内部構造の差異を反映している可能性がある。

現在、 $Z_{S-G2}$  を段階的に変化させた暗視野イメージングを実施し、各試料の可視度減衰挙動の詳細な比較を進めている。さらに、すべての試料において十分な可視度が得られる  $Z_{S-G2}$  条件を選定し、その条件下で暗視野トモグラフィーを実施することにより、三次元的な微細構造分布の可視化を試みている。

また、JRR-3 における中性子イメージングによって得られた画像では、白磁水注の注ぎ口内部の中空構造が外形の湾曲に対応しながら平行して連続的に成形されていることが観察できた。画像の濃淡は資料の重なりによる厚み、すなわち中性子の透過距離を反映したものであり、両側の器表面部から中央の中空部周辺にかけてコントラストが連続的に変化している様子が観察された (図 2)。今後は異なる磁器の中性子イメージングデータとの比較および解釈を行う予定である。

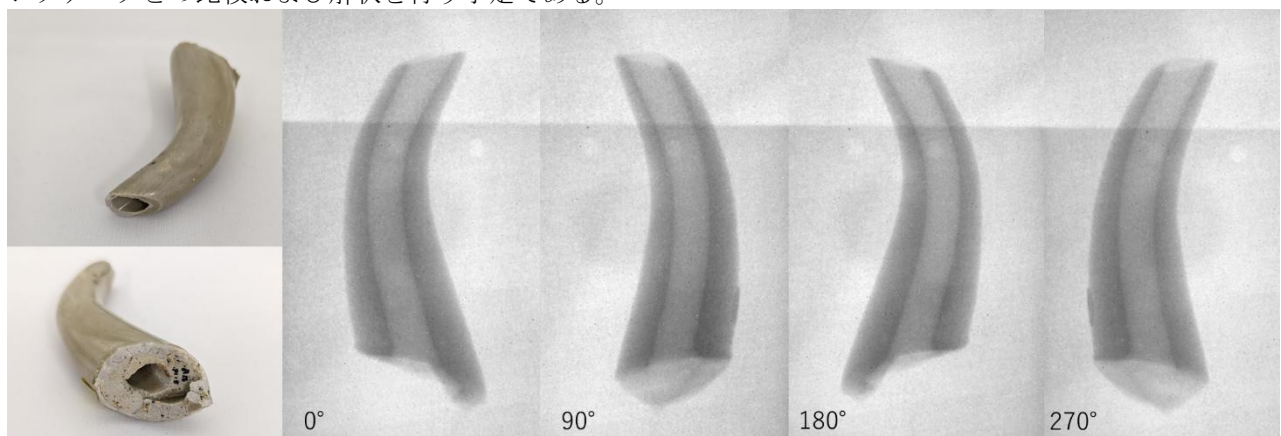


図 2 JRR-3 において撮影した中性子イメージング画像 (白磁水注 (京都市内出土))

今後はさらに、三次元の分析を進めながら、JPARC-MLF に設置された中性子イメージングを行っていくほか、東北大学において X 線 CT 撮影、高エネルギー加速器研究機構（KEK）において X 線吸収微細構造解析（XAFS）を行う予定としている。今後、これらの測定結果と対応させることにより、中性子イメージングによって得られた成果を解釈していきたい。

#### **4. まとめ (Conclusion)**

今回、磁器試料を中性子イメージング CT 装置により観察することが可能となったことで、これまで十分に検討されてこなかった磁器の製作技術・技法に関する側面に対し、非破壊的にアプローチできる可能性が示された。特に、暗視野イメージングにより取得される可視度減衰挙動は、内部微細構造を反映する新たな評価指標として有効であることが示唆された。

さらに、本手法は、従来の考古学的分類や元素分析では把握が困難であった焼成条件や内部構造の違いを可視化し、磁器の製作技術の差異を明らかにするための有力な手段となり得る可能性がある。加えて、XAFS、X 線 CT、デジタル顕微鏡などの補完的手法と組み合わせることで、構造・組成・機能の多角的な解析が可能となり、より合理的な解釈へとつながることが期待される。

#### **謝辞 (Acknowledgement)**

本研究は、学際ハブとの連携によって進めているもので、藤田全基先生をはじめとする研究分担者及び学際ハブ関係者には広くご指導・ご協力をいただいた。特に、日本原子力研究開発機構篠原武尚氏には中性子 CT 装置の使用に便宜をおはかりいただいた。

磁器内部の構造解明に欠かせない XAFS については、東北大学の杉山和正先生、KEK の丹羽尉博氏にご配慮いただいた。

また、出土磁器の使用について、岩手県櫻井友梓氏、平泉町島原弘征氏、京都市新田和央氏・赤松佳奈氏に便宜をおはかりいただいた。各地における磁器の出土状況や磁器 X 線 CT 画像撮影結果の解釈などについては、加えて、福岡市田上勇一郎、鎌倉市鈴木弘太、宮城県高橋透、岩手県西澤正晴、平泉町鈴木博之、出光美術館徳留大輔の各氏にご議論・ご検討いただいた。