

放射光 X 線 CT を用いた染織文化財の構造と材料の研究

奥 山 誠 義
北 井 利 幸

目次

I . はじめに	67
II . 本研究の目的	67
III . 放射光 X 線 CT について	67
IV . 方法	67
V . 測定試料	68
VI . 結果	68
VII . 考察	72
VIII . まとめ	72

論文要旨

発掘によって出土する染織文化財（出土織物）は、金属製品等の腐食の影響によってさびに覆われるなど本来の姿からは大きく変化しているものも少なくない。その場合、表面を観察するだけでは織物の情報は容易に得られない。本研究では、放射光 X 線 CT を利用して非破壊的に出土染織文化財の構造および材質に関する科学的研究を行った。織物を構成する糸の太さ、単糸本数を確認し、材質は織り糸を構成する単糸の形状、太さ、断面積、断面完全度に注目して観察した。測定試料は現代産精練絹布 1 点、古墳出土試料 5 遺跡 5 点、計 6 点である。

本研究に供した試料は、すべて絹製の織物であった。織り糸は古墳時代前期、後期の時期を問わず 200 μ m 前後の径であり時期的な差異は見られなかった。織り糸を構成する絹糸単糸の径は、前期はやや大きく、後期は小さくなる傾向が見られた。本研究において特筆すべき点は、鉄製品に伴う絹織物の繊維断面は、そのほとんどが中空であった点である。繊維実質らしき痕跡が残る繊維も、その周囲に繊維断面形に相似形な皮殻状物質が存在していた。本法により金属や漆などの物質に隠れた織物の調査も可能である。調査試料は無傷で回収できることから、比較研究のため他の分析・調査を行うことも可能である。今後の利用拡大により織物の立体的な復元的研究等の新しい成果が生まれるものと期待できる。

奥山 誠義（おくやま まさよし）

奈良県立橿原考古学研究所 総括研究員

北井 利幸（きたい としゆき）

奈良県立橿原考古学研究所 指導研究員

I. はじめに

筆者らは、奈良県内古墳出土染織文化財の変遷解明に関する研究を目的として、出土染織文化財の材料と構造の変化を時系列で整理し、古墳時代における染織文化財の材料選択と製作技術の一端を明らかにする手法の研究を進めてきた（奥山 2021）。

染織品は、絹や植物繊維の単繊維を複数集めて糸をつくり、糸を交差するなどして「織り」、平面的な広がりを持ちながらも立体構造をもつ「織物」を作り出している。平面的には織り糸が格子状などに交差する様子が観察でき、断面（側面）からは織り糸の連なりや糸の断面を見ることができる。しかしながら、遺跡発掘によって出土する織物は土にまみれていたり、金属製品等の腐食の影響によってさびを伴うなどして、本来の姿からは著しく変化しているものも少なくない。その場合、織物の情報は表面を観察するだけでは容易に得られない。化学的な分析が可能である場合は、赤外分光分析法やクロマトグラフィー等を利用して、材料科学的に織物素材を知ることが可能である。ただし、ここで「化学的な分析が可能である場合」というのは、微量ではあるがわずかに分析のための試料が必要になる。貴重な文化財にとって微量ではあっても分析試料の採取は傷をつけることになるため、望ましい方法ではない。今できないことを「将来へ託す」ことも文化財にとっては重要な点である。

本研究では、非破壊的に出土染織文化財（出土織物）の材料学的研究を行うための一つの方法として、X 線画像、特に X 線 CT を利用した方法について検討したので、その結果と考察を提示する。

II. 本研究の目的

本研究の目的は、染織文化財の材料と構造の調査を目的とした観察に対し、非破壊的な手法を研究・提案することである。とくに古墳時代の刀剣類や甲冑、青銅製品等の器物に伴う織物は、存在（遺存）のみが認められ、糸の作りや糸の材料、織り構造などについての情報はほとんど得られていない。これらの情報は器物の利用や副葬様式に関わるものであり、織物に対する理解を深めることにより、当時の文化をより一層理解する一助になると考えられる。また、材料学あるいは工芸技術の新たな

展開を生む研究である。

III. 放射光 X 線 CT について

X 線 CT (X-Ray Computed Tomography) は X 線照射により試料内部構造の二次元透過像を取得しながら試料を回転させ、得られた連続撮影データから画像を再構築する方法である。

文化財に対する X 線 CT は、1992 年に奈良国立文化財研究所（現独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所）において本格的に導入、利用され（村上 1999）、さらに九州国立博物館により文化財への利用が拡大された（九州国立博物館 2015）。これまでに仏像や青銅器など多様な文化財への利用が進められるとともに、木彫像の樹種調査に応用されるなど応用研究にも利用されている（九州国立博物館 2015）。一方、染織文化財のように平面状を呈し、なおかつ対象が小さく、細かな試料の観察には、X 線 CT が広く利用されているとは言い難い。

放射光とは、相対論的な荷電粒子（電子や陽電子）が磁場で曲げられるとき、その進行方向に放射される電磁波である。放射光は明るく、指向性が高く、また光の偏光特性を自由に換えられるなどの優れた特徴を持っている（SPring-8 web site）。

本研究で利用した放射光 X 線 CT は、SPring-8（大型放射光施設、兵庫県佐用町）が有する実験施設である。SPring-8 は、世界最高性能の放射光を利用することができる大型の実験施設であり、国内外の研究者に広く開かれた共同利用施設として、物質科学・地球科学・生命科学・環境科学・産業利用などの分野で優れた研究成果を挙げている。

IV. 方法

放射光 X 線 CT は、SPring-8 を利用した。X 線 CT は高分解能な計測が可能な BL20XU の投影型マイクロ CT 装置を利用し、8 KeV または 24KeV、実効的なピクセルサイズは 0.523 μm で測定した。測定で得られた画像は、画像処理ソフト ImageJ (Ver. 1.54) で解析し、織物の構造および材質を理解するための基本的情報を得た。構造は、織物を構成する糸（織り糸）の太さ（直径または長軸径）、単糸本数を確認し、材質は織り糸を構成する単糸の形状、本数、太さ（直径または長軸径）、断面積、



図1 大型放射光施設 SPring-8 BL20XU の実験ステーション

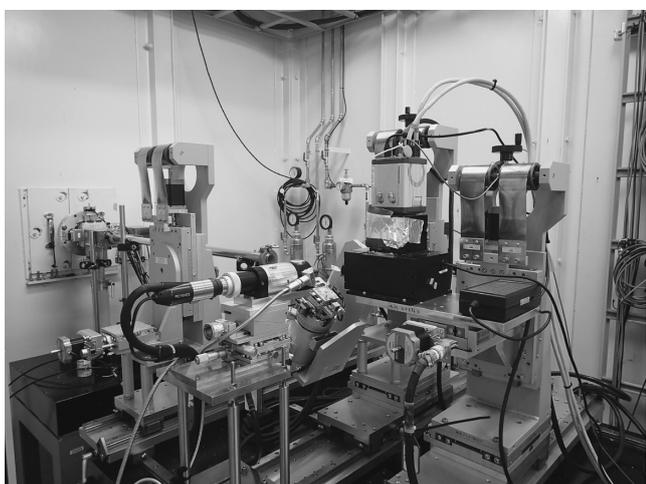


図2 BL20XU の実験装置

断面完全度に注目して観察した。単糸本数は、画像中の織り糸断面中の単糸数を直接読んで計数した。単糸の断面積は、各試料において任意の単糸 20 本～40 本の断面を、ImageJ の面積計算機能により算出した。断面完全度は、布目が示した数式 (布目 1975) を基に算出した。X 線 CT 画像は、X 線吸収が強い部分は白色に、弱い部分は黒色に描画される。

V. 測定試料

測定試料は、技術確認試料として現代産精練絹布 (JIS 染色試験用) 1 点を用い、古墳出土試料は、古墳時代前期の試料として中山大塚古墳出土鉄製品に伴う織物、小泉大塚古墳出土刀子に伴う織物、古墳時代後期の試料として沼山古墳出土带状金具 (胡籙か) に伴う織物、藤ノ

木古墳刀剣類破片 (大刀) に伴う織物、寺口千塚古墳群 15 号墳出土胡籙片に伴う織物の 5 点 (表 1)、計 6 点である。

VI. 結果

結果を表 2 にまとめ、以下に個々の結果について述べる。

(1) 現代精練絹布 (JIS 染色試験用): 図 3-A

技術検討のための試料とした現代産精練絹布は文字通

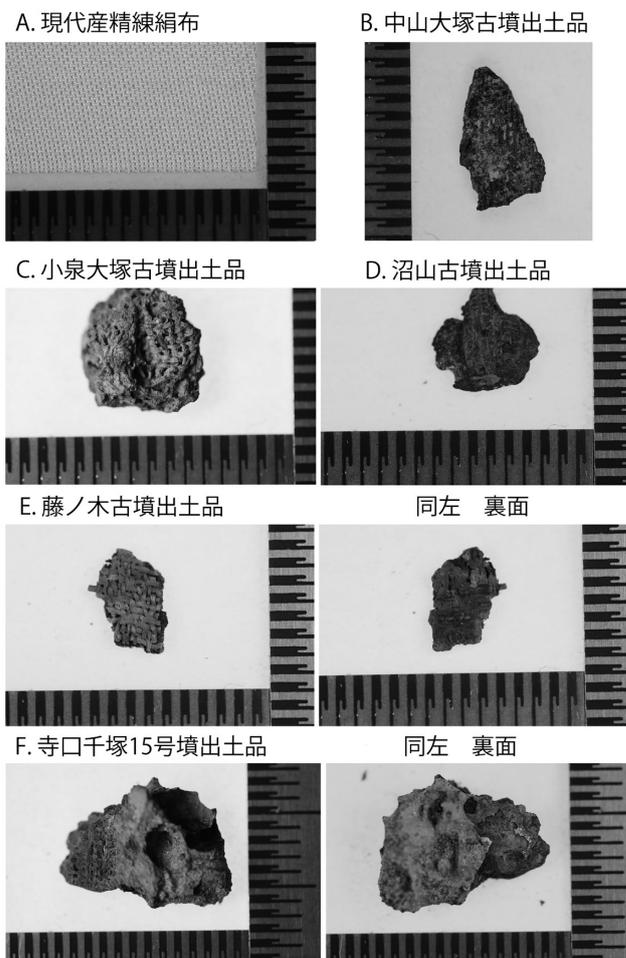


図3 測定試料 (目盛間隔は 0.5mm)

表 1 測定試料一覧 (現代精練絹布は除く)

遺跡名	所在地	時期			墳形 円	資料
		前期	中期	後期		
中山大塚古墳	天理市	●			●	鉄製品に伴う織物
小泉大塚古墳	大和郡山市	●			●	刀子に伴う織物
沼山古墳	橿原市			●		● 带状金具 (胡籙か)
藤ノ木古墳	斑鳩町			●		● 刀剣類破片 (大刀) に伴う織物
寺口千塚 15 号墳	葛城市			●		● 胡籙片に伴う織物

り精練絹糸製で、経糸と緯糸それぞれの 1 cm あたりの糸の密度（織密度と称する）は、60 本×40 本/cm であった。また、表面観察による織り糸幅は経糸 0.3mm (300 μ m)、緯糸 0.5mm (500 μ m) であった。

現代産精練絹布の X 線 CT 画像（図 4）においては、不等辺三角形を呈する糸の断面が確認できた。これは絹糸に特徴的な形状であり、出土絹製品でも同様な形状が観察できる。経糸・緯糸が交差している様子が確認でき、織糸は平均で 100 本ほどの絹糸がひとまとまりとなっていた。単糸径はおおよそ 11 μ m であり、これは現代に利用されている精練絹糸の繊維径（10～20 μ m）にほぼ一致する。

（2） 中山大塚古墳出土鉄製品に伴う織物：図 3-B

本試料は織組織が確認できる面と赤色顔料が付着した面から構成されていた。織組織が確認できる面の光学観察によれば、撚りのない繊維からなる 55 本×46 本/cm の平織りが認められた。織り糸幅は経糸で 0.6～2.0mm 程度の幅があった。

本試料の X 線 CT 画像（図 5）では 2 層の重なりが確認できた。断面画像中には、多数の不等辺三角形を呈する中空の断面がいくつかのまとまりを作って分布している様子が確認できた。また、これら不等辺三角形の中空の断面の周囲は灰色～白色を呈し X 線吸収が強いことを確認した。

X 線 CT による画像解析の結果、不等辺三角形の中空の断面がランダムな配置で 90～100 個程度ひとかたまりとなって集合していた。不等辺三角形の断面は絹糸に特徴的な形状であり、ランダムに分布する状態は精練されていることを示すことから、本試料は精練された絹糸製であることが確認できた。また、織り糸は 210～230 μ m の太さで、織り糸を構成する単糸は長径が 9～20 μ m（平均 14 μ m）であった。絹繊維の断面積は 117 μ m²で、断面完全度は 47%であった。

（3） 小泉大塚古墳出土刀子に伴う織物：図 3-C

本試料の織物は、表面観察によれば、2 枚ないし 3 枚の織物が重なり、織密度は 30 本×30 本/cm、経糸・緯糸ともにその幅（径）は 0.3～0.5mm ほどであった。

本試料の X 線 CT 画像（図 6）では経糸と緯糸が交差

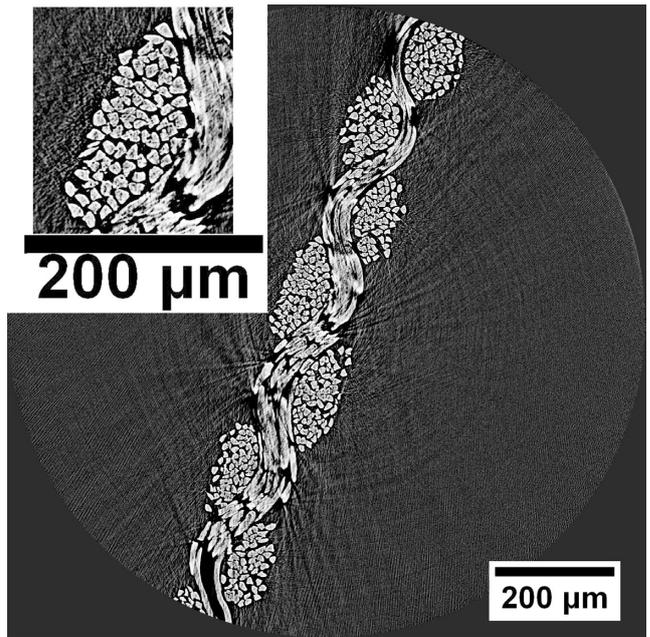


図 4 現代産精練絹布の X 線 CT 画像（左上：部分拡大）

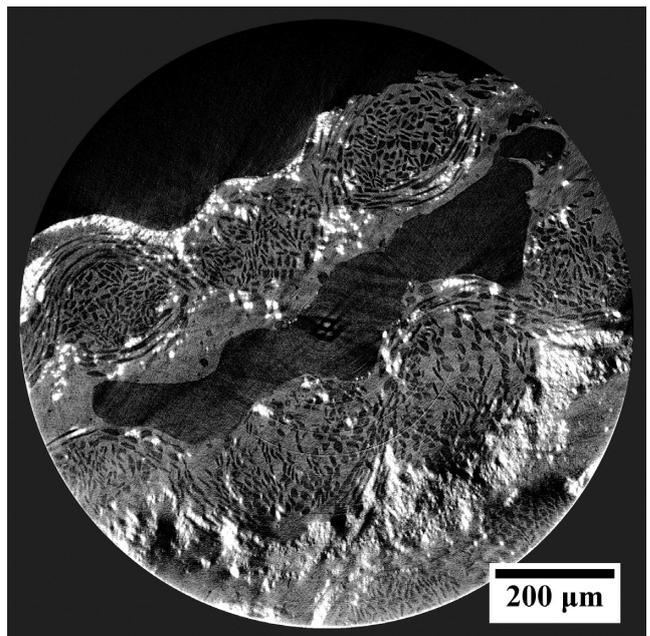


図 5 中山大塚古墳出土鉄製品に伴う織物の X 線 CT 画像

する様子は明確に確認できず、経糸あるいは緯糸の断面が確認できるのみであった。断面画像右半部には、多数の不等辺三角形を呈する中空の断面がいくつかのまとまりを作って分布している様子が確認できた。さらに左上には、まとまりはないものの径の大きな中空の楕円形の断面が確認された。これら不等辺三角形の中空の断面および楕円形の断面はいずれも、その周囲は X 線吸収が強いことを確認した。

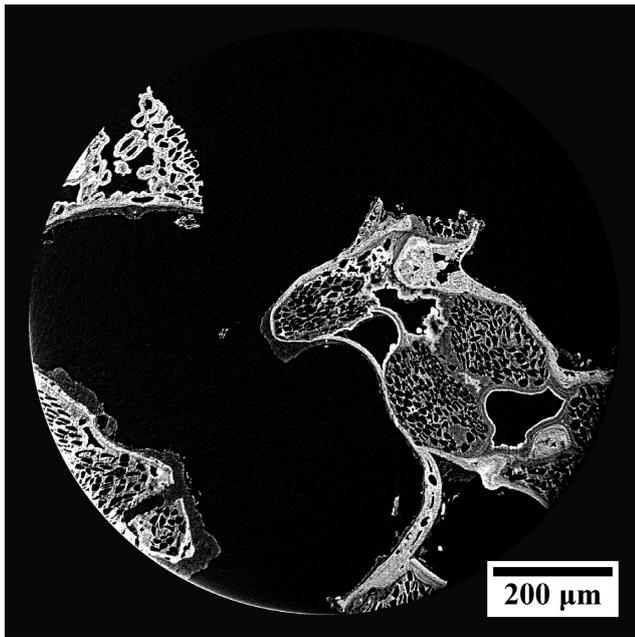


図6 小泉大塚古墳出土刀子に伴う織物のX線CT画像

X線CTによる画像解析の結果、三角形の中空の断面がランダムな配置で80個ないし120個程度ひとかたまりとなって集合していた。三角形の断面は絹糸に特徴的な形態であり、ランダムに分布する状態は精練されていることを示すことから、本試料は精練された絹糸製であることが確認できた。また、織り糸は160μmないし200μmの太さで、織り糸を構成する単糸は長径が9～20μm（平均13μm）であった。絹繊維の断面積は106μm²で、断面完全度は54%であった。

楕円形の断面は植物性繊維の単繊維断面である可能性が考えられるが、確認できる情報が輪郭のみであり内腔など植物繊維の同定に要する情報に欠けていることから、現時点では材質同定が困難である。

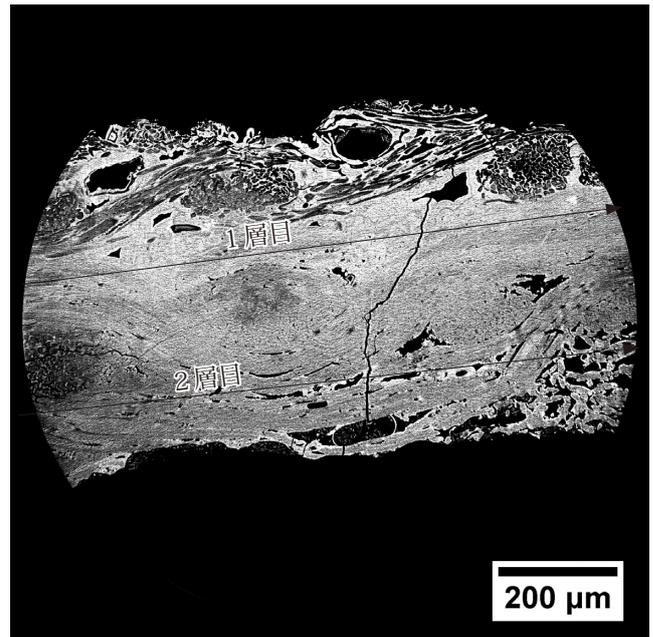


図7 沼山古墳出土帯状金具（胡籙か）に伴う織物のX線CT画像

(4) 沼山古墳出土帯状金具（胡籙カ）に伴う織物：

図3-D

本試料の織物は、表面観察によれば、2～3枚の織物が重なりあい、織密度は50本×30本/cmであった。

本試料のX線CT画像（図7）では2層の重なりが確認できた。断面画像中には、多数の不等辺三角形を呈する中空の断面がいくつかのまとまりを作って分布している様子が確認できた。また、これら不等辺三角形の中空の断面の周囲はX線吸収が強く、周囲を満たすように分布していることが確認できた。

X線CTによる画像解析の結果、図7中の1層目は、不等辺三角形の中空の断面がランダムな配置で120個程度がひとかたまりとなって集合していた。不等辺三角形の断面は絹糸に特徴的な形態であり、ランダムに分布する状態は精練されていることを示すことから、本試料

表2 放射光X線CTによる出土織物測定の結果

遺跡名	所在地	時期			墳形	資料	材質	織り糸径 (最大長：μm)	単糸径 (最大長：μm)	単糸断面積 (μm ²)	断面完全度 (%)	織り糸構成単糸数 単糸数/織り糸 (本)
		前期	中期	後期								
中山大塚古墳	天理市	●			前方後円	鉄製品に伴う織物	絹	210～230	14	117	47	90～100
小泉大塚古墳	大和郡山市	●			円	刀子に伴う織物	絹	160～200	13	106	54	80～120
沼山古墳	橿原市			●	●	帯状金具（胡籙カ）	絹	160～180	10	57	52	120
藤ノ木古墳	斑鳩町			●	●	刀剣類破片（大刀）に伴う織物	絹	220～240	10	48	47	170
寺口千塚 15号墳 (織り糸A)	葛城市			●	●	胡籙片に伴う織物	絹	250～270	11	70	46	370
寺口千塚 15号墳 (織り糸B)	葛城市			●	●	胡籙片に伴う織物	絹	220	15	73	40	81

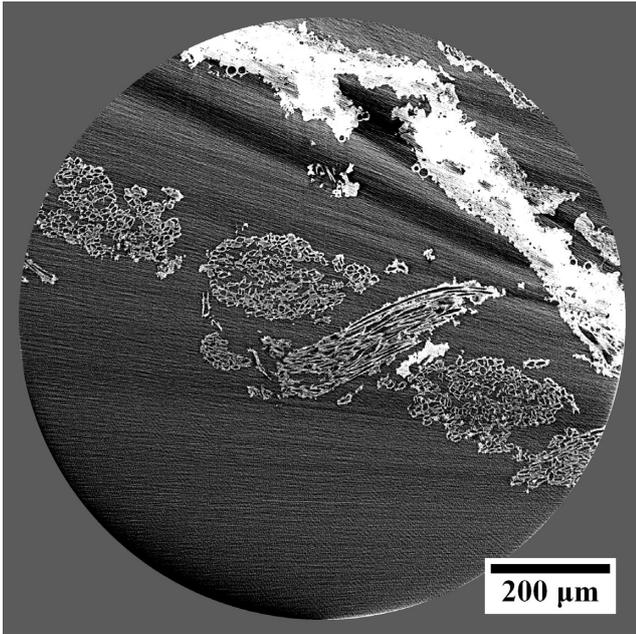


図8 藤ノ木古墳刀剣類破片（大刀）に伴う織物の X 線 CT 画像

は精練された絹糸製であることが確認できた。また、織り糸は 160～180 μm の太さで、織り糸を構成する単糸は、長径が 7～16 μm （平均 10 μm ）であった。絹繊維の断面積は 57 μm^2 で、断面完全度は 52% であった。

(5) 藤ノ木古墳刀剣類破片（大刀）に伴う織物：図 3-E

本試料の織物は、表面観察によれば、2 枚の織物が重なりあい、織密度は 36 本 \times 20 本/cm、経糸の幅（径）は 0.2～0.3mm ほどであった。

本試料の X 線 CT 画像（図 8）では 1 層の織物構造が確認できた（中央部分）。表面観察で確認できた 2 層のうちの 1 層である。断面画像中には、不等辺三角形を呈する中空の断面がまとまりを作って分布している様子が確認できた。不等辺三角形を呈する中空の断面はその輪郭のみ X 線吸収が強く、その周辺にはほぼ何も存在しない状態である。

X 線 CT による画像解析の結果、不等辺三角形の中空の断面がランダムな配置で 170 個ほどがひとかたまりとなって集合していた。不等辺三角形の断面は絹糸に特徴的な形態であり、ランダムに分布する状態は精練されていることを示すことから、本試料は精練された絹糸製であることが確認できた。また、織り糸は 220～240 μm の太さで、織り糸を構成する単糸は長径が 7～

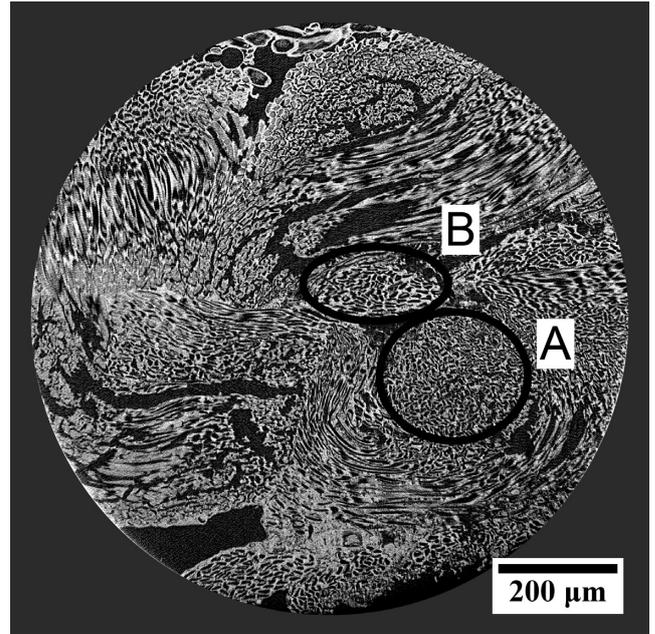


図9 寺口千塚古墳群 15 号墳出土胡籙片に伴う織物の X 線 CT 画像

16 μm （平均 10 μm ）。絹繊維の断面積は 48 μm^2 で、断面完全度は 47% であった。単糸は辺縁部が輪郭として残るのみで、単糸の輪郭のみで形状が維持されている状態であることが確認できた。本試料は既出の試料のように、織り糸及び単糸の周辺が何らかの物質で満たされていないため、構造的に脆弱な状態であることが視認できた。

(6) 寺口千塚古墳群 15 号墳出土胡籙片に伴う織物：図 3-F

本試料は表面観察により、平織り状の織物組織のほか、直線的な繊維が無数に並行する獣毛と思われる組織が確認できた。

X 線 CT による画像解析の結果（図 9）、少なくとも 2 種類の織り糸が確認できた。一つは便宜的に織り糸 A と称し、断面画像の辺縁部に確認できる織り糸で、単糸径が小さく、織り糸径が大きいもの、もう一つは織り糸 B と称し、断面画像中央部に確認できる単糸径が比較的大きく、織り糸径が小さいものである。

織り糸 A、B とともに単糸の断面は中空ないし中実な不等辺三角形を呈しており、絹糸に特徴的な形状である。また、単繊維はランダムに配置しており、精練された絹糸であることを示唆している。

織り糸 A、B を構成する単糸はいずれも絹糸と考えられるが、単糸径は織り糸 A が平均 11 μm であるのに対し、織り糸 B のそれは平均 15 μm であった。両者にはおよそ 1.4 倍の差異がある。また、織り糸 A は 370 本以上の単糸から構成され、織り糸の径は 250 ~ 270 μm であった。織り糸 B は、81 本以上の単糸で構成され、織り糸の径は約 220 μm であった。織り糸 A の絹繊維の断面積は 70 μm^2 で、断面完全度は 46% であり、織り糸 B の断面積は 73 μm^2 で、断面完全度は 40% であった。なお、先述した獣毛は、この断面画像においては明確に確認できなかった。これは計測視野に獣毛部分が含まれていなかった可能性が考えられる。

VII. 考察

結果を基に織物の断面構造、各々の織り糸を構成する単糸の特徴、時期による繊維の傾向という 3 つの視点から考察したい。

(1) 織物の断面構造

織物の表面観察においては、いずれの試料も「織物の構造・つくり(織り)」が視認できる状態で遺存していた。しかし、放射光 X 線 CT による観察では、ほぼすべての試料において、絹糸の成分(繊維実質)が失われ中空になり、単糸の輪郭あるいはその周辺に密度の高い成分が分布していることがわかる(図 10)。

この密度の高い部分は、織物が伴っている鉄製品の主成分である鉄が地下埋蔵中に溶出し、化合物を形成した部分であると考えられる。繊維実質部分は長年の腐朽により分解消失したものと考えられる。すなわち、鉄製品に伴う織物は、地下埋蔵中に繊維実質を失うが、付属す

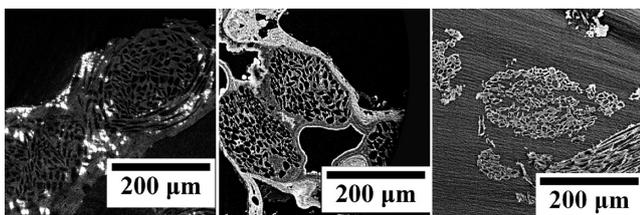


図 10 出土絹織物の断面構造
左から、中山大塚古墳、小泉大塚古墳、藤ノ木古墳の絹織物断面。中空の単糸断面の周辺に吸収が強い輪郭あるいは領域がみられる

る鉄製品から溶出した鉄分によって、輪郭あるいは単繊維間が満たされ、形態が維持されたものと考えられる。

(2) 織物を構成する単糸の特徴(表 2)

織り糸を構成する単糸の径は、10 ~ 15 μm の幅の中にあり前期あるいは後期いずれかが特異な傾向を示すことはなかった。一方、単糸の断面積は古墳時代前期が 100 μm^2 を超えているのに対し、後期のそれは 100 μm^2 を遙かに下回るものであった。単糸の最大長に大きな差異がないことを考慮すると、繊維が細くなっていることが推測される。

(3) 織物を構成する織り糸の差異(表 2)

織り糸は、単糸を集めて構成されるが、古墳時代前期と後期の織り糸の径(織り糸幅)は、前期が 160 ~ 230 μm であるのに対し、古墳時代後期は 160 ~ 270 μm と幅が広くなる。また、織り糸を構成する単糸数は、前期・後期を比較すると後期が比較的多くなっている。

つまり、後期の織物は、前期の織物と比較して、単糸断面積は小さくなくても(前述: VII 考察(2))、織り糸を構成する単糸数が大幅に増加することによって、より太い(径が大きな)糸が形成されたと考えられる。

VIII. まとめ

本研究では、古墳時代前期と後期の織物について、放射光 X 線 CT 計測による構造と材質の研究を行った。

古墳時代の副葬品は時代とともに変化することから、同一種類の器物に伴う織物で比較することができないため、古墳時代全体を共通した器物によって織物利用の変遷を語ることは難しい。そのため本研究では、初歩的に織物に焦点を当て考察した。

織物に利用された繊維は、ほぼ絹糸であった。織り糸は古墳時代前期、後期の時期を問わず、200 μm を下回る径のもの、200 μm を上回る織物が存在し、時期的な顕著な差異は見られない。織り糸を構成する絹糸の単糸は、古墳時代前期はやや大きく、古墳時代後期は小さくなる傾向が見られた。

本研究において特筆すべき点は、鉄製品に伴う絹織物の繊維断面は、そのほとんどが中空である点である。繊維実質らしき痕跡が残る繊維も、その周囲に繊維断面形

に相似形な皮殻状物質が存在している。我々が経験的に見ている鉄製品に伴う絹織物は、このような状況である可能性を示唆している。すなわち、鉄製品に伴う絹織物は繊維の外表面（表面）を残し、その内部はほとんど消滅している可能性が高いということである。

このことから、出土鉄製品に伴う絹織物を扱う場合、織物部分では繊維形状を維持する芯となる繊維実質が失われているため、自重や圧力等で繊維が座屈、損壊する恐れがある。

以上より、織物を伴う鉄製品が出土した場合は、絹織物である可能性も考慮し、取り扱いを十分に注意しなければならない。保存科学的にも慎重な取り扱いを求めめる一つの視点が提案できるものと考えられる。

また、織物が露出する、あるいは鮮明な断面を見せる試料の織りや繊維の同定は比較的容易である。しかし、何らかの物質（金属や漆など）に隠れた織物の調査は容易ではない。しかしながら、本研究に示した放射光 X 線 CT は、透過像を観察することから「隠された（隠れた）」織物の調査も可能である。調査試料は無傷で回収できることから、比較研究のため他の分析・調査を行うことも可能である。さらに、取得画像は三次元可視化することが可能であるため、織物の立体的な構造復元研究なども可能と考えられる。本法の利用拡大により、新しい成果が生まれるものと期待できる。

謝辞

本研究は、SPring-8 のビームライン BL20XU、BL20B2 での測定で多大なるご協力を頂きました。現地での測定に際し、竹内晃久氏、上梶昌之氏、上杉健太郎氏、星野真人氏（以上、JASRI）にご指導いただきました。また、本研究遂行に当たり SPring-8 測定及び試料観察に河崎衣美氏、絹島歩氏、小倉頌子氏（以上、奈良県立橿原考古学研究所）、データ解析に勝川若奈氏（公益財団法人福島県文化振興財団福島県文化財センター白河館まほろん）の協力を得ました。ここに記して深く感謝いたします。本研究は SPring-8 利用研究課題 2016B1807、2017B1339、2020A1302 の成果の一部である。また、日本学術振興会科学研究費補助金（JSPS 科研費）17H02023 の成果である。

参考・引用文献

- 奥山誠義 2021 『2017～2020 年度科学研究費助成事業基盤研究 (B) (課題番号 17H02023) 黒塚古墳から藤ノ木古墳へ至る古墳時代における染織文化財の総合的研究 研究成果報告書』
- 九州国立博物館 2015 『九州国立博物館 10 周年記念シンポジウム X 線 CT を用いた文化財の研究と活用』
- 布目順朗 1975 「正倉院の繊維類について」 『書陵部紀要』 第 26 号 PP. 1～46
- 村上隆 1999 「金属の調査研究法」 『日本の美術』 400 号 PP. 20～32
- SPring-8 website : http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/whats_sr/