

〔報告〕 デジタルマイクロスコープによる3次元計測値の補正方法について —繊維計測の精度向上のための事前検証—

山田 祐子・安永 拓世・菊池 理予・早川 典子

1. はじめに

文化財分野において、非破壊非接触で情報を得ることができるデジタルマイクロスコープによる調査は有益な調査方法として現在広く活用されている。高倍率での観察、画像撮影だけでなく近年は観察対象の寸法計測も一般的となっており、2次元計測、3次元計測ともに利用されている。2次元計測は画像上の任意の2点間の距離や角度、面積などの計測が可能で、3次元計測では立体物の厚みや体積を測定するなど、形状の記録も可能である。考古遺物や彫刻などの立体分野だけでなく絹本文化財のような細かな凹凸に対しても有用であるとされ、注目が高まっている。¹⁻⁴⁾

一方で、3次元計測は深度の異なる複数枚の画像を合成し3次元データを取得するため、被写界深度の深さによりその測定値には誤差が生じる可能性がある。測定誤差は観察対象や観察条件の違いによって変化することが予想され、信頼性のあるデータを取得するための基準が難しいとされてきた。とくに観察対象が微細な形状を有する場合、測定誤差が計測結果に大きな影響を与える可能性が懸念される。また、同様の機能を搭載した別機種のデジタルマイクロスコープで同一試料を計測すると数値が異なる場合があり、例えば大和文華館所蔵の「雪中帰牧図（騎牛）」を植松らはキーエンス製 VHX-1000で測定し、経糸の厚みを21.07 μm と報告している³⁾が、同じ作品を HiROX 製 RH-2000で調査した早川らの報告では経糸31.2 μm と記載しており⁴⁾、計測方法や機材により、測定値が大きく異なることが明らかとなっている。デジタルマイクロスコープによる繊維測定は今後広く活用が期待される方法であり、このような誤差をできるだけ小さくできるような事前検証方法が必要と考えられるため、この点を検討することとした。

本報告では3次元計測で得た数値からより正確な値を割り出すべく、破壊調査が可能な同じ試料について繊維のクロスセクション（研磨断面）試料の2次元計測と繊維表面からの3次元形状計測を行い比較検証した。

2. 検証方法

本研究では、絹本文化財の基底材に用いられた絹糸の厚み計測を目的とし、2種類の画絹の測定値をもとに測定精度向上のための補正についての検証を行った。検証方法は、クロスセクション試料を撮影した画像を用いて2次元計測で断面寸法を測定し、これを実際の値に近い数値と考え実測値とした。対する表面からの測定では3次元計測で試料の厚みを測定し、実測値との差を比較した。この検証を使用機材にてあらかじめ行っておくことにより、実際の作品調査にて非破壊で行う3次元計測値の信頼性を高めるだけでなく、2次元計測という異なる測定方法によって得られた数値を使って補正することが可能となる。また、異なる測定機器で測定した計測値間の差についても補正を行うことができると考えた。

2-1. 試料

2-1-1. 試料の組成

下記表1, 図1, 2に示す「現代技法画絹」と「在来技法画絹」を試料として使用した。「現代技法画絹」は自動繰糸機で繰糸された糸を用いて機械織で製作された日本画用画絹二丁樋（日本画材料店得応軒にて購入）, 「在来技法画絹」は手回し座繰器で繰糸された糸を用いて手織で製作された画絹（勝山織物(株)絹織製作研究所製）を使用した。

2-1-2. クロスセクション試料の作製

絹糸の実際の断面形状の観察および2次元計測のため, エポキシ樹脂（株式会社三啓製常温硬化埋込樹脂53型（冷間埋込樹脂））に各試料を包埋し経糸緯糸それぞれについてクロスセクション試料を作製した。

包埋試料の切断にはダイヤモンドカッター（BUEHLE 製 Isomet 自動精密切断機アイソメット）, 表面研磨には卓上半自動研磨機（マルトー製ドクターラップ ML180型）を使用し, 耐水研磨紙 Sic-Paper, grit #800, #1200, #2400（Struers 製）およびポリシングクロス（マルトー製 STS4硬質）, 液体アルミナ懸濁液（バイコウスキージャパン製）にて研磨した。なお, 試料は包埋前に食用色素（紅不二化学工業製赤色102号）によって染色して用いた。画絹の糸は解かずに織られたままの状態では包埋し, 切断位置や角度は作製者が目視で確認しながら糸の方向に対して垂直に切断研磨した。なお, 経糸と緯糸の交差箇所付近は糸が斜めに傾き垂直に切断することが難しいと考え, 本検証においては糸が交差していない箇所の断面を用いた。

ただし, 織目間隔の密な画絹の場合には, 経糸が常に上下に傾いた状態になる可能性が高く, そのような際には交差箇所の頂点で切断研磨するのが望ましいと考える。

2-1-3. 背景色との色差の小さい試料の作製

3次元計測機能では, 取り込んだ複数枚の画像からピントの合う部分で合成処理を行うため,

表1 計測評価に使用した試料

	経糸				緯糸		
	1本の糸を形成する繭糸	より <small>よ</small> り <small>り</small> 織 <small>※</small>	引き揃え本数	おさめ <small>め</small> 箆目 <small>め</small> に通す本数	1本の糸を形成する繭糸	より <small>よ</small> り <small>り</small> 織 <small>※</small>	引き揃え本数
現代技法画絹	7~8粒	有	2本	2本	7~8粒	有	3本
在来技法画絹	10粒	無	—	2本	12粒	無	—

※織：繭糸から生糸を繰糸する際に糸同士を捩じり合わせて1本の糸とすること。繰糸時に生糸内の水分を脱水し抱合性を高める効果があるとされている。

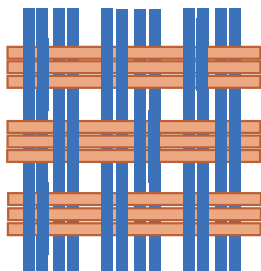


図1 現代技法画絹試料織組成図

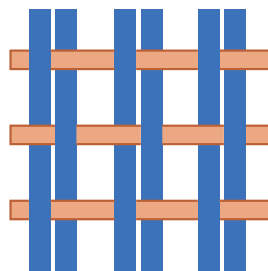


図2 在来技法画絹試料織組成図

背景色と試料の色差が小さい画像の場合、画像処理の自動認識が不十分となり誤差が生じやすい可能性が懸念された。そこで、各試料に楮紙（長谷川製3匁）で裏打ちを施し背景色と画絹の明度および彩度のコントラストの低い試料を作製し、比較検証することとした。裏打ちには小麦デンプン糊を使用した。

裏打ちを施し背景色と繊維の色差の小さい試料の画像を図3に、裏打ちを施さず画絹を直接デジタルマイクロスコープの試料台に設置し撮影した画像を図4に示す。図4撮影時の試料台は透過照明用の試料台（白色の照明板の上にガラス板が設置された二重構造）を用い、下方からの照明を点灯せずに撮影を行った。これを背景色との色差の大きい画像として比較対象とした。

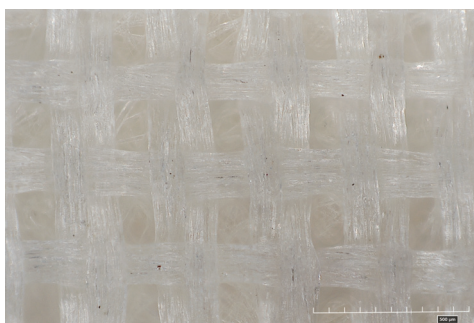


図3 背景色との色差の小さい画像
（裏打ちを施した現代技法画絹）

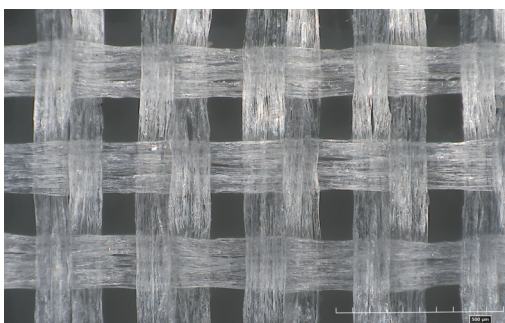


図4 背景色との色差の大きい画像
（裏打ちを施していない現代技法画絹）

2-2. 計測

2-2-1. クロスセクション試料による2次元計測値の測定

本検証には2次元計測機能と3次元計測機能が搭載されたデジタルマイクロスコープ（HiROX 製 RH-2000, ACS レボズームレンズ【35～2500倍】MXB-2500REZ）を使用した。クロスセクション試料の長さ測定には、試料を撮影した画像（倍率：1000倍、光の条件：リング照明（暗視野照明））を使って2次元計測機能（「平行な2辺間の距離を測定」設定）上で計測を行った。計測者の目視による確認で平行な2辺を決定し、断面の最大長さを幅、幅に対して垂直方向の最大値を厚みとして計測を行った。現代技法画絹は22点、在来技法画絹は26点の測定を行った。計測例を図5、6に示す。

2-2-2. 表面からの3次元計測による厚み測定

現代技法画絹と在来技法画絹について、それぞれ裏打ちを施した（背景色との色差の小さい）試料および裏打ちを施していない試料の表面から撮影、画像合成し、3次元計測機能にて経糸、緯糸の厚み測定を行った（倍率：200倍、光の条件：リング照明（暗視野照明）、3次元合成設定：標準）。1本の絹糸から1箇所測定とし、3～7枚の画像から経糸緯糸それぞれ20箇所の測定を行った。なお、本機の計測機能では高倍率、「高精細」合成設定での計測が推奨されているが、筆者らの絹本作品調査では機材の設置状況や計測作業の効率から200倍、「標準」設定で撮影することが多い。そのため、本検証においても実際の作品調査に即した上記倍率、設定での測定を行った。

3次元計測では、撮影合成した画像上で糸が交差する部分を挟むように2点を選択し（図7、8

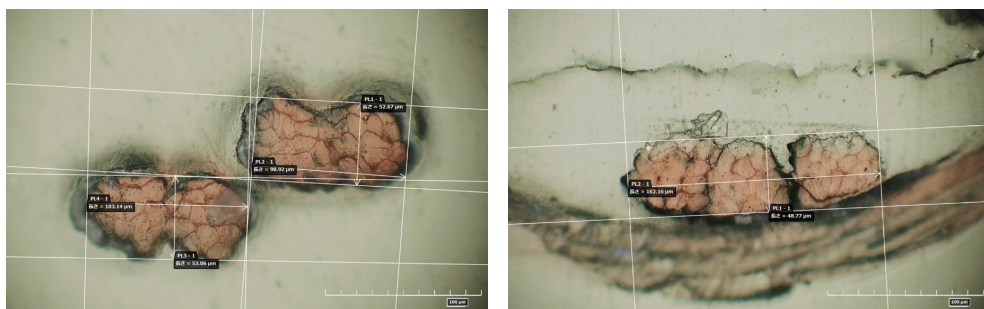


図5 クロスセクション試料による2次元計測例（現代技法画絹 左：経糸，右：緯糸）

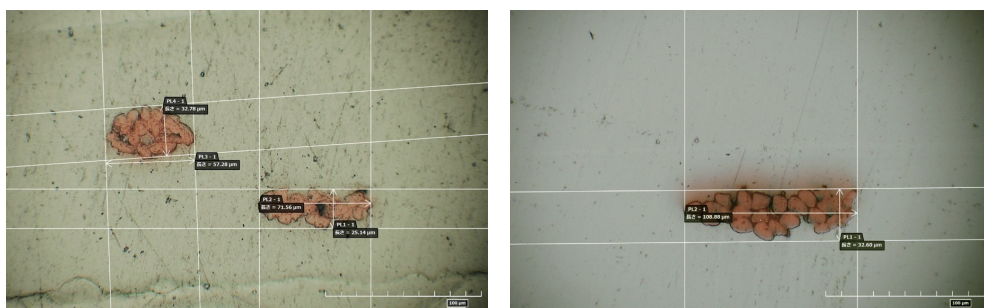


図6 クロスセクション試料による2次元計測例（在来技法画絹 左：経糸，右：緯糸）

上部図）その2点を結ぶ線上の断面波形（図7，8下部図）の底辺と頂点の高さの差から糸の厚みを割り出す方法をとった。本検証では，画絹の経糸と緯糸が交差した箇所では計測を行い，重なった下側の糸の頂点から上側の糸の頂点までを厚みの測定値とした。計測位置は画像を確認しながら計測者が手作業で決定した。試料の設置状況によっては画絹が全体に波打った状態で撮影されることもあり，断面波形の左右底辺の高さが水平面からずれる場合がある。その際には「傾き補正」設定で左右底辺の高さを揃える，画像で画絹の構造を確認するなどの方法で底辺位置を判断した。

また，糸幅の計測は同じ画像を用いて2次元計測にてそれぞれ20箇所の測定を行った。2次元計測は，図9，10に示すように糸幅に対して垂直方向に糸の端と端を結ぶ直線を引き，その起点と終点の距離を幅の測定値とした。測定箇所の選択は画像を確認しながら計測者の手作業にて行った。

なお，背景色との色差の小さい画像での計測は，色差の大小による3次元計測値の差異を検証することを目的とするため，3次元計測のみ行い2次元計測による幅の測定は行わなかった。

3. 結果と考察

得られたデータから最大値と最小値を除いた上で平均を求め，各試料の測定値とした。また，標準偏差と変動係数で測定値の不規則性を評価した。結果を表2，表3に示す。クロスセクション試料の2次元計測値を試料の実測値と見なし，3次元計測による幅と厚みの計測値との差異を検証した。

現代技法画絹，在来技法画絹ともに3次元計測から得られた厚みの数値は実測値よりも低い値となる傾向があり，かつそれぞれの試料でその割合が異なる結果となった。在来技法画絹（裏

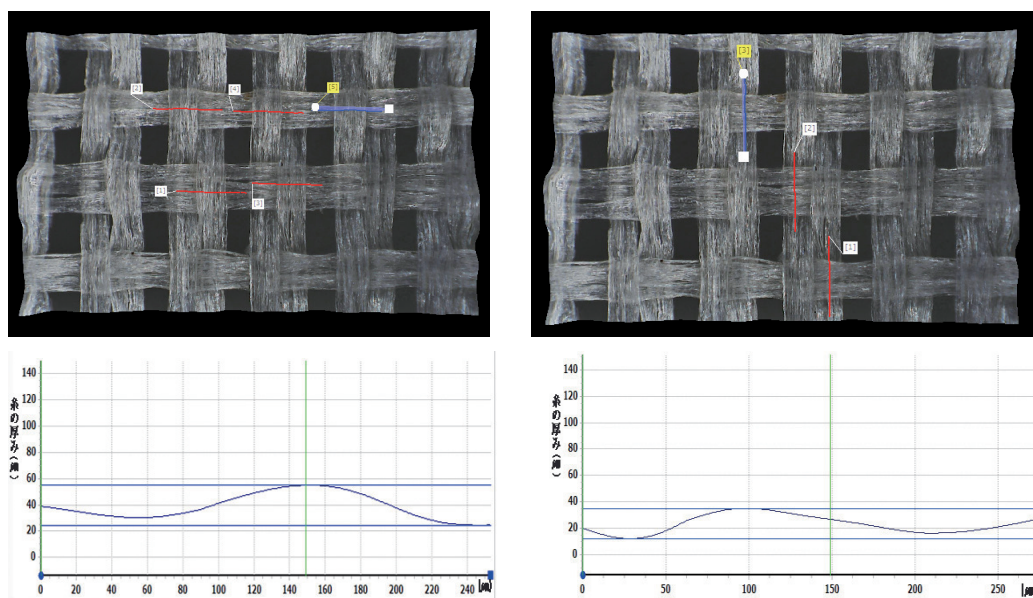


図7 3次元計測による糸厚み計測例（現代技法画絹）

左：経糸計測例，右：緯糸計測例（上部画像上で選択した2点間の断面が下部図に示される）

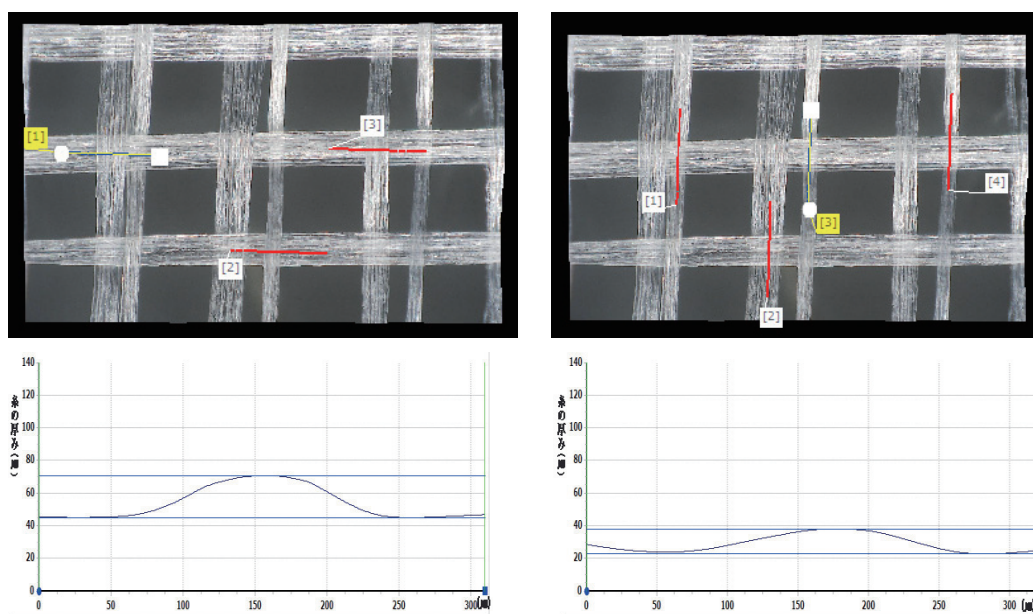


図8 3次元計測による糸厚み計測例（在来技法画絹）

左：経糸計測例，右：緯糸計測例（上部画像上で選択した2点間の断面が下部図に示される）

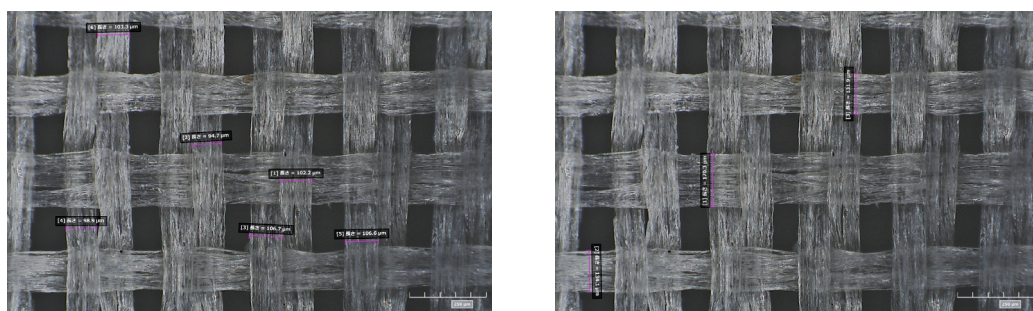


図9 2次元計測による糸幅形状例（現代技法画絹）

左：経糸計測例，右：緯糸計測例（画像上で選択した2点間の長さが示される）

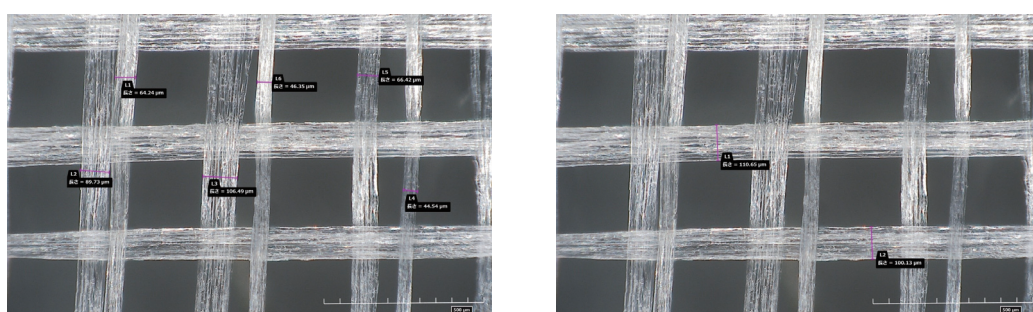


図10 2次元計測による糸幅形状例（在来技法画絹）







左：経糸計測例，右：緯糸計測例（画像上で選択した2点間の長さが示される）

打ちを施していない試料）の経糸では3次元計測値は実測値の約81%であったが、緯糸および現代技法画絹では51～57%程度にとどまった。実測値との差が開いた原因として、絹糸は柔らかく撮影時にわずかに動く可能性があることや、透明で光を通すために正確な形状を捉えきれなかったことなどが考えられる。また、今回の計測では交差した糸同士の接する高さを上側の糸の底辺として厚みを計測したが、糸が上下に配される画絹の織構造から考察すると、画像で確認できる接点よりも低い位置まで上側の糸が沈み込み、その分が計測値に組み込まれなかった可能性も推察された。

背景色との色差の小さい試料ではさらに低い値となる傾向があり、3次元計測による正確な厚みの計測が難しいことが明らかとなった。本検証では、背景と糸の高さの差ではなく交差した糸と糸の高さの差を糸の厚みとして計測した。この計測値の精度は、自動認識で糸の形状が把握しやすければ向上することになる。今回測定した絹糸は透明であり、画面上では糸の色は背景色の影響を受けた色を呈する。そのため糸と近い色の背景の場合、糸の外形状の把握がしにくくなり、自動認識の精度が低下する一方、糸の色と大きく色差があるような背景の場合は、自動認識の精度が向上し、実測値に近づく結果となったと考えられる。

次に、在来技法画絹と現代技法画絹の比較では現代技法画絹のほうが全体的に3次元計測値と実測値との差が大きい結果となった。2つの試料の違いとして、2次元計測結果に示されるように実際の値では現代技法画絹は幅と厚みが近似値の正円に近い断面形状であり、対する在来技法画絹は薄い扁平な断面形状であることが挙げられる。かつ、現代技法画絹は在来技法画絹と比べると緻が強く繭糸同士がしっかり抱合され、糸表面が平滑であることがクロスセクショ

表2 現代技法画絹試料の断面寸法

		クロスセクション試料 (2次元計測) (実測値と見なす)		裏打ちを施していない 試料 表面から計測 (厚み：3次元計測, 幅：2次元計測)		背景色との色差の小さい (裏打ちを施した) 試料表面から計測 (厚み：3次元計測)	
		経糸	緯糸	経糸	緯糸	経糸	緯糸
幅	平均 (μm)	107.83	153.47	104.12	140.33	—	—
	標準偏差 (μm)	9.16	11.02	5.53	13.16	—	—
	変動係数 (%)	8.49	7.18	5.32	9.38	—	—
	クロスセクション 試料(実測値) を100としたと きの百分率(%)	100	100	96.56	91.44	—	—
厚み	平均 (μm)	53.27	54.40	30.24	27.93	19.77	17.11
	標準偏差 (μm)	3.97	4.01	4.32	5.02	4.30	4.58
	変動係数 (%)	7.44	7.37	14.28	17.97	21.76	26.75
	クロスセクション 試料(実測値) を100としたと きの百分率(%)	100	100	56.77	51.34	37.11	31.45
得られた数値を 反映した断面模式図							







※色差の小さい試料では幅計測を行わなかったため、断面模式図で示す幅は裏打ちを施していない試料の幅の値を適応させている。

ン画像からも確認できた。現代の製糸で用いられる自動繰糸機には織度感知器が組み込まれており、糸の太さを均一にする目的で一定の隙間に糸を通す工程がある。そのため、織度感知器の摩擦により糸の表面がなだらかになったと考えられる。平滑な試料を撮影した場合、細かな凹凸のある試料と比べると1枚の画像上でピントの合う深さの範囲が広がる。従って、3次元合成を行うと各画像で認識される深度認識が曖昧な状態で合成されることが予想される。これらのことから、現代技法画絹は厚みがあるにもかかわらず画像ではその変化を捉えきれなかったことが低い値となった要因として推察される。

また、在来技法画絹の経糸と緯糸で3次元計測値と実測値との差の割合が異なる結果となった理由として、画絹の立体構造による影響が考えられる。画絹は製作時に緯糸の通り道を作るために経糸を綜統で上下に上げ下げしながら織られるため、織りあがった画絹は経糸が緯糸を挟む形で上下に交互に配される構造となる。そのため、経糸は緯糸に比べ立体的な動きが大きく3次元画像として認識されやすいことがうかがえる。今回試料に使用した画絹は織の掛けられていない糸で織目間隔の隙間も大きく、糸の形状が乱れやすかったことも経糸と緯糸の結果に差異が生じた一因と考えられる。経糸は両端から引っ張られた状態で筥に通されて織られるため、緯糸に比べて比較的形状が安定しており、すべての試料において緯糸よりも経糸のほうが変動係数の値が小さい、あるいは同等であったことから、概して経糸のほうが安定して計測できることが認められた。

現代技法画絹の3次元計測で経糸と緯糸の差が現れにくかったことについては、現代技法画絹が機械織のため、経糸緯糸ともにテンションのかかった状態で製作されたためと推察される。

表3 在来技法画絹試料の断面寸法

		クロスセクション試料 (2次元計測) (実際の値と見なす)		裏打ちを施していない 試料 表面から計測 (厚み：3次元計測 幅：2次元計測)		背景色との色差の小さい (裏打ちを施した) 試料表面から計測 (厚み：3次元計測)	
		経糸	緯糸	経糸	緯糸	経糸	緯糸
幅	平均 (μm)	76.72	98.58	70.34	96.76	—	—
	標準偏差 (μm)	14.17	23.12	11.24	19.41	—	—
	変動係数 (%)	18.48	23.46	15.98	20.06	—	—
	クロスセクション 試料(実測値) を100としたと きの百分率(%)	100	100	91.68	98.15	—	—
厚み	平均 (μm)	26.59	38.24	21.06	21.48	21.16	15.16
	標準偏差 (μm)	3.81	7.69	2.92	4.51	7.09	4.57
	変動係数 (%)	14.34	20.11	13.89	20.99	33.52	30.16
	クロスセクション 試料(実測値) を100としたと きの百分率(%)	100	100	81.23	56.17	79.58	39.64
得られた数値を 反映した断面模式図							

※色差の小さい試料では幅計測を行わなかったため、断面模式図で示す幅は裏打ちを施していない試料の幅の値を適応させている。

また、在来技法画絹は実測値の変動係数が大きく試料そのものの不均一性が大きかったことがわかる。一方の現代技法画絹では、実測値の変動係数が低いことから実際の試料の断面形状は比較的均一であり、ここで示された3次元計測値の変動係数は計測方法による測定誤差範囲を示唆していると考えられる。

実際の作品調査の際には、調査対象作品に使用されている画絹の製作技法や裏打紙の色などを踏まえた模擬試料を用いて本検証を実施することで、3次元計測値と実測値との差を推定することが可能となる。また、他の測定機器で測定した場合においても、同じ試料を用いて本検証を行うことで実測値を導き出し情報を補完することができると考える。

4. まとめ

基準試料の断面実測値と3次元計測値の差を求めることで、3次元計測値を補正し実測値を推察することが可能となった。これにより、クロスセクション試料による断面観察などの破壊調査が許されない状況においても、3次元計測値からより実際の値に近い数値を導き出すことができると考えられる。ただし、画絹の種類等により3次元計測値の結果が異なることを踏まえて、基準試料には調査対象作品の性状に近いものを用いる必要がある。また、織物の場合は緯糸よりも経糸の測定値を手掛かりにすることで安定した計測結果を得ることが期待できる。

さらに、本検証手法を利用すれば、他社別機種のデジタルマイクロスコプで計測した3次元計測値においても同一のクロスセクション試料で同様の検証、補正を行うことにより両者のデータをともに扱うことが可能になると考える。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科学研究費19H01365「絵画に使用された絹・自然布の非破壊分析方法の開発と製法・修復に関する総合的調査」(研究代表者:早川典子)を使用して遂行されました。また、東京国立博物館と東京文化財研究所の共同研究「美術工芸品に用いられた画絹及び染織品の組成にかかる共同研究」の一環として本研究を進めるにあたって東京国立博物館の沖松健次郎氏、土屋貴裕氏、植松瑞希氏、古川攝一氏にご協力いただきました。試料として使用した在来技法画絹は株式会社勝山織物絹織製作研究所様よりご提供いただきました。株式会社ハイロックスジャパンの根岸秀貴氏にはご助言を賜り、趙依寧研究補佐員にはクロスセクション試料作製にご協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森田早織, 志村明, 秋本賀子: 近世～近代を中心とした絹本作品における絵絹の織り後世に関する研究―山形美術館所蔵「長谷川コレクション」の調査をととして―, 文化財保存修復学会第38回大会研究発表要旨, 236-237 (2016)
- 2) 森田早織, 志村明, 秋本賀子: 山形美術館所蔵絹本作品調査における絵絹後世のまとめ, 文化財保存修復学会第40回大会研究発表要旨集, 248-249 (2018)
- 3) 植松瑞希: デジタルマイクロスコープによる大和文華館所蔵宋代絵画画絹の観察, 大和文華125, 29-44 (2013)
- 4) 早川典子, 岡部迪子, 濱田翠, 山府木碧, 菊池理予, 古川攝一, 秋本賀子, 志村明: 画絹の物性に及ぼす断面形状・殺蛹方法の影響―大和文華館所蔵作品調査データ含めて―, 保存科学58, 1-20 (2019)

キーワード: デジタルマイクロスコープ (digital microscope); 3次元計測 (three-dimensional measurement); クロスセクション (研磨断面) (polished-section); 画絹 (painting silk); 補正方法 (correction method)

A Correction Method of Three-Dimensional Measurement Values Attained by Digital Microscope —Preliminary Verification to Improve the Accuracy of Fiber Measurements—

YAMADA Yuko, YASUNAGA Takuyo,
KIKUCHI Riyo and HAYAKAWA Noriko

These days, surveys using digital microscope are common methods in the field of cultural properties. Especially, a three-dimensional measurement can get values of object's height. It is useful not only for three-dimensional objects such as archaeological remains and sculptures, but also for objects with microscopic differences in elevation such as silk painting.

However, there are concerns about measurement differences in three-dimensional measurement methods due to sample conditions or measurement conditions. It is necessary to correct differences in three-dimensional measurements.

The aim of this verification was to exactly measure the height of the threads of painting silk using the three-dimensional measurement function. Two types of samples were used in this experiment.

Both samples were measured by three-dimensional measurements. Then, the two samples were buried in resin, the cross sections were polished, and the length of the thread cross section was measured by two-dimensional measurements. (The values obtained in this measurement were treated as the actual measurements.) The values obtained by the two measurement methods were compared with the values by the three-dimensional measurements. Thereby, the corrections of the three-dimensional measurement values based on the two-dimensional measurement values could be made.

There are other issues regarding the values attained by digital microscopes. For example, the values measured by different models of digital microscopes could not be compared with each other. However, the correction method examined in this study made it possible.