

〔報告〕 染織文化財に対するゲル・クリーニングの基礎研究 —硬質ハイドロゲルの物性と処置の効果に関する検証

佐藤 萌*・片岡 真純**

1. はじめに

文化財に対するゲルを用いたクリーニングは、この四半世紀で広く浸透し、特に西洋絵画や紙本、彫刻の保存修復分野では調査研究や実施事例に関する報告が多く見られる。一方で、染織品保存修復においてはその技術の転用に留まり、応用研究は十分になされていない現状にある。さらに国内ではこの領域に関する染織文化財に特化した研究論文や事例報告は皆無に近く、情報共有も課題である。

これまで染織文化財において、軽減あるいは除去することが望ましい「汚れ」が認められた場合には、水溶液や有機溶媒を用いた全体または局所に対する洗浄処置で対処することが第一の選択肢であった。この処置では、洗浄槽や水の浄化・排水設備、排気装置、吸引装置など、専用の設備を要し、また、実施の可否は実技者の経験によるところも大きい。よって、欧米でも設備と人員が十分に整った修復室を備える大規模な文化機関以外は、実施は限られる状況にある。今回研究を行ったゲル・クリーニングは特殊な設備を要しないため、施設の規模に関わらず実践への導入を期待できる。

本稿では、染織品で使用する場合のゲルの調製条件を数値化することを目的として、筆者等が令和6年度に実施した基礎研究について、その成果を報告する。

2. 背景

染織文化財は個々が製作された時代的地理的背景を反映して、多様な有機素材で構成される。動物質や植物質、合成の繊維素材、天然染料はもとより、製作の技法・工程・環境、製品としての機能や使われ方、来歴、後世の活用、経年劣化など、ひとつの作品が辿ってきた歴史に由来する様々な物質と情報を内包するのが常である。これらの多くは、我々人類にとって最も馴染みがあり有用な資源のひとつである「水」の影響を極めて受けやすい性質（＝親水性）を持つ。即ち、作品を水に触れさせることは、意図せずとも、物質と情報の両方を一瞬にして失う危険性を伴う。また、過去に水に潜ったことがない作品は、水分を含ませることで不可逆な変質・変寸に至る危険性が極めて高い。さらに、経年劣化が進んだ繊維素材は分子鎖の切断によって水の物理的な力に耐えられない状態に達しており、水を含ませることが破損にも繋がる。よって、保存の対象となった染織文化財に対する修復処置での水の使用については、倫理的観点から議論を尽くした上で、科学的根拠に基づいて慎重に検討する必要がある。同時に、溶媒の作用をより局所的・限定的に留めることが可能な制御手法を確立して、状況に応じて使い分けることが求められる。

従来の洗浄処置の基本的な原理は、汚れを溶解して洗い流すことであるが、汚れの性質に応じた試薬（界面活性剤、pH調整剤、キレート剤、酵素、漂白剤など）の選択と併せて、スポ

*東京国立博物館、**宮内庁正倉院事務所

ンジや綿棒、吸引装置などを使って適度な力を加えること（＝機械作用）で、繊維と結合した汚れをより効果的に除去する。化学的な作用と物理的な作用を利用して最大限の結果を目指すわけであるが、染織品本体への影響を最小限に抑えるために「いかにコントロールするか」という技術的な課題が常に付きまとう。また、従来の手法は性質上、複合素材や複層・立体構造を有する作品への適応が難しく、諸条件が見合わないを実施は難しい。

今回検証を行った硬質ハイドロゲルは、以下で説明するゲルの網目構造の特性上、極めて少量の水分で物質を溶解し、吸収することが可能であり、染織品に存在する上述の諸課題に対処できる新たな選択肢になり得ると注目される。

3. 硬質ハイドロゲル

ゲルは高分子が三次元に網目構造を形成した状態で、この網目の中に液体、即ち、クリーニング溶媒や溶液を保持する。ゲルを使用する利点として、クリーニング溶液と対象物を長く接触できること、処置を局部的に留められること、機械作用を伴わないこと、人体および環境への負荷を低減する「green chemistry」であることなどが挙げられる^{1),2)}。

ゲルは高い粘性を有すコロイド分散体の総称である³⁾。本稿で定義する硬質ハイドロゲルは、「ハイドロゲル (hydrogels)」^{註1)}のなかの「硬質ゲル (rigid gels)」⁴⁾のことである。ハイドロゲルは水分子を含んで形成されるゲルで、有機溶媒を含んで形成するオルガノゲルと区別する言葉である。加熱および冷却という物理的な作用を必要とする物理架橋ゲルのうち、機械的強度が高いものが硬質ゲルと呼ばれ、それは粘度が高く硬い（＝広がらない）という性質を持つ。尚、欧米圏で使用される「gel」という言葉は粘性溶液まで含むが、日本の化学的定義では「ゲル」とは三次元架橋しているもののみを指している背景があり、文化財修復分野では欧米での知見をもとにゲルを利用するため、「ゲル」という言葉に齟齬が生じやすい現状があることに留意したい。

文化財保存修復分野で使用されるゲルには、粘性液体であるセルロースエーテルやキサンタンガム、化学架橋ゲルである Carbopol[®] や Pemulen[®] などもある⁴⁾が、これらのゲルの粘度と流動性は、染織品上では扱いが難しい。布は平面的ではあるが、実際には糸の撚りや織り目など、表面に無数の細かい凹凸が存在する。よって、ゲル自体の除去が容易で、残留物は微量で許容できる成分であることが要件として挙げられ、硬質ハイドロゲルが該当する。ゲルでは、コロイド粒子が重なりあって網目構造を作り、網目の骨格部分では水分子は水和しているが、大部分の水は骨格の間を満たす形で存在している。そのため、時間が経過すると網目構造が収縮し、その間の水が押し出されて離漿（りしょう）が起こる⁵⁾。染織品での使用においては、輪ジミを防ぐ観点から、ゲルからの水の離漿が少ないことも条件に加わる。さらに実際の処置においては染織品の上にゲルを置き、ゲルを介して繊維の膨潤やクリーニングの効果を観察する必要があることから、ゲルは透明度が高く無色であることが望ましい。

紙本や染織品の保存修復分野で使用実績のある硬質ハイドロゲルであるアガー（寒天、以下アガーとする）、アガロース、ジェランガムはいずれも自然界に存在する多糖類である。アガーは海藻類から得られるゲルであり、中性であるゲル形成能を有する成分のアガロースと、酸性である硫酸基を有するアガロペクチンから構成される⁶⁾。アガロースはアガーからアガロペクチンを除去して精製したものであり、アガロビオースの繰り返し単位で合成される線状高分子である。アガロビオースは、D-ガラクトースと3,6-アンヒドロ-L-ガラクトースから成り、これら2種類の糖が交互に反復結合した中性多糖である⁷⁾。アガロースはタンパク質の分離やDNAの研究などに用いられる電気泳動に使用され、非常に高価である。今回実験に供したア

ガロース Low EEO は、電気浸透圧 (EEO) 値が低く、DNA/RNA 電気泳動により適した試薬である。なお、保存修復分野では、pH や導電率の測定でアガロースのゲルを要する他は、クリーニング処置では予算的な理由でアガロースよりもアガーを選択することが多い。理論上は、ゲル化しないアガロペクチンを含まない分、アガロースの方が残留物は少ないことになるが、いずれのゲルも作品表面から容易に除去することができ、そもそもの残留量も微量のためか、その点に関する議論は見当たらない。なお、筆者らが行った後述の実験では、アガーとアガロースで、クリーニングに有効な濃度とその作用がそれぞれ異なる結果を示したため、異なる性質を有するものとして検証することを勧めたい。

ジェランガムは、アガーをはじめとする海藻由来のゲル化剤に比べて耐熱性や強度が高く、増粘安定剤として各種食品に利用されている。ジェランガムは菌体 *Sphingomonas elodea* の産物であり、グルコース、グルクロン酸、ラムノースを構成糖とする直鎖のヘテロ多糖類である⁸⁾。ジェランガムには、Low Acyl ジェランガム (脱アシルジェランガム、以下 LA ジェランガムとする) と High Acyl ジェランガム (ネイティブジェランガム、以下 HA ジェランガムとする) の2種類がある。両者の違いはグルコースのアシル基置換量の多寡で、LA ジェランガムの方がアシル基含有量をアルカリ処理で下げて加工されている⁹⁾。ジェランガムを用いた紙本保存修復の多くの事例報告では、LA ジェランガムが採用されている。LA ジェランガムには通常カルシウム塩 (主に酢酸カルシウム) を添加する。カルシウム塩を添加することでより硬い、アガロースのような無色透明のゲルとなる。カルシウム塩を添加せずに LA ジェランガムを調製すると、弾力性が多少増す (図1)。この場合に、ゲルは壊れやすくなるとされるが、小さいサイズで使用して、ゲルの厚みも薄ければ、作業上特に問題ないと言われる。ジェランガムからのカルシウム塩析出の程度は貴田等により報告されているが⁸⁾、染織品保存修復においてはカルシウム塩が各種天然染料に及ぼす影響について、いまだ検証されておらず、懸念が残る。

HA ジェランガムにはカルシウム塩の添加は不要である。色は乳白色で、LA ジェランガムより柔軟性があり、表面への密着性が優れる。HA ジェランガムを染織品保存修復に使用した事例報告もある¹⁰⁾。

欧米の事例報告を概観すると、これらの硬質ハイドロゲルは2-6 w/v%あたりの濃度で使用されることが多い。濃度を調整することで、対象物に与える水分の量をコントロールでき、ま



図1 ジェランガム4% Caなし (左) Ca添加 (右) :
Caなしの方が柔らかく、Ca添加はアガーに似た硬さ

た、高い濃度では毛細管現象が作用して、溶解した汚れをゲルの方へ吸い上げる性質がある。例えば、アガーは4 wt%以上で毛細管現象が生じる孔の大きさになる⁶⁾。Laura Mina 氏の言葉を借りれば、ゲルの作用は「Delivery and Pull」であり^{註2)}、ゲルが保持する水を対象物に到達させ、再度ゲルの方へ吸い上げさせるといふ、極めてシンプルなメカニズムをクリーニングでは利用する。

4. 染織品に対するゲル・クリーニング

染織品におけるアガーやアガロースの使用については、本研究でも参照した Schmitt (2016, 2017) の研究^{11), 12)}が初期のものにあたり、国内では宮内庁正倉院事務所の報告 (2025)^{13), 14)}が新しい。正倉院の事例から、従来の洗浄処置では対処できなかった保存状態の悪い脆弱な染織品に対してゲルを使用することで、作品への物理的な負担を抑えて汚れを除去できることが示された。これらに共通する見解は、染織品の場合には、繊維の種類・糸の構造・織組織・織密度・繊維の劣化の程度等によって作品自体の濡れ方も様々で、個々の物性に依じて適切な濃度のゲルを使用しなければ、溶解した物質が染織品の方に広がること挙げられる。即ち、濃度の設定が、処置の効果と悪影響 (= 汚れが広がることによる更なる汚損) のバランスの見極めに直結する。

ゲル・クリーニングに関する理論と技法は、染織品保存修復分野においても数々のワークショップを通して浸透し^{註3)}、実践での応用も進み、欧米ではこの10年で事例報告が相次いでいる。筆者等が参加したワークショップの中で、2024年 Matthew Cushman 氏によるオンライン講義「Introduction to Hydrogels in Conservation」(Restauratoren Nederland 開催)と、2024年 Laura Mina 氏による「Use of Gels in Textile Conservation」(東京国立博物館開催)^{註2)}で得た知識や技術も、本報告には反映されている。

Cushman 氏のオンライン講義では、キサントタンガム・こんにゃくグルコマンナン・アガーの3種混合ハイドロゲルが紹介された。細菌 *Xanthomonas* の産生する多糖キサントタンガムは、増粘安定剤として利用されている。こんにゃくグルコマンナンは、サトイモ科の多年生植物コンニャクイモ *Amorphophallus konjac* から得られる¹⁵⁾。キサントタンガムもこんにゃくグルコマンナンも、中性の pH においては、単独ではゲルを形成しないが、両者を適当な比率で混合するとゲル化することが知られている¹⁶⁾。Cushman 氏は、さらにこれらにアガーを混合することで得られる相乗作用効果について、先行研究¹⁷⁾より着想を得て行った絵画や家具への処置事例に基づく推奨混合比を紹介した。

Mina 氏は、本研究遂行のために筆者等が招聘したテキスタイル・コンサベーションの専門家である。同氏は近年、他の修復分野で先行しているゲルの使用を含めたクリーニング手法を染織品に応用し、実践経験を積んでいる先駆者のひとりである。その見識は欧米の学術誌や、同氏が講師を務めた数々のワークショップを通して広く公表されている。ワークショップの理論編では染織品におけるゲル・クリーニングの多様な処置事例が紹介され、試薬を添加したゲルによる実施例や、全体を浸す洗浄処置と組み合わせた事例等、様々な応用例が示された。実技編では各種ゲルの調製方法から界面活性剤やキレート剤の配合・添加方法まで、分かり易く丁寧な実技指導を受けた。

5. 実験

5-1. 材料・試料準備

硬質ハイドロゲルの中で保存修復分野において使用実績のあるアガー、アガロース、LA ジェ

ランガムに加え、Cushman 氏の講義で紹介されたキサントランガム (X)・こんにゃくグルコマンナン (K)・アガー (A) の3種混合ゲル (X : K : A) を試験対象とした。実験に使用したゲル試薬を表1に示す。ジェランガムには酢酸カルシウムを添加せずに調製した。

テストサンプルにはろ紙 (コットン・リントー、3MM Chr, Whatman 社)、絹羽二重 (14匁、目付52.5 g/m²、株式会社色染社)、綿ブロード (シルケット未加工、目付122.5 g/m²、株式会社色染社) 各8 cm × 8 cm を使用した。テストサンプルに使用した絹布と木綿布は染織文化財でよく見られる材質である。前者は長繊維のフィラメントで、後者は短繊維のステープルファイバーである。繊維の形態的特徴や製糸方法 (撚りの有無) による毛細管現象の作用の違いを確認するため、今回の実験ではこれらを選択した。絹布と木綿布は洗濯機で下洗い (界面活性剤は不使用) を行い、自然乾燥させた。乾燥後、木綿布はアイロンで皺を伸ばした。直径1.1 cm の円定規を使用して、丸いインク染みを各試料に付けた。インクは赤色水性ペンの太型 (洗たくでおとせるふとふとマーカー、株式会社サクラクレパス)・細型 (洗たくでおとせるサインペン、株式会社サクラクレパス) で、水の作用を目視で確認するため、水溶性物質であることが明らかな本品を便宜的に使用した。輪郭を細型で描き、その内側を太型で塗った。テストサンプル作製に使用した材料一式を図2に示す。インク塗布時、ろ紙は色が滲まなかった一方で、絹布と木綿布は毛細管現象が働いて、繊維や糸を伝ってインクが周囲へ滲む様子が

表1 使用したゲル

試薬	品番等	調製濃度等
寒天 (アガー)	CAS : 9002-18-0、富士フィルム和光純薬株式会社	2, 4, 6, 8, 10 w/v%
アガロース Low EEO	CAS : 9012-36-6、Sigma-Aldrich, Co.	2, 4, 6, 8, 10 w/v%
ジェランガム	CAS : 71010-52-1、富士フィルム和光純薬株式会社	2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 w/v% Ca 添加なし
X : K : A (キサントラン : こんにゃく : アガー)	キサントランガム : CAS : 1138-66-2、富士フィルム和光純薬株式会社 こんにゃく精粉 : MR スーパー [特等基準]、株式会社ウエハラ	各2 w/v% X : K : A (2 : 2 : 1) X : K : A (1 : 2 : 2) X : K : A (2 : 1 : 2)



図2 テストサンプル作製に使用した材料 : 上から赤色水性ペン太型・細型、中段左から木綿布・絹布・ろ紙、最下段は円定規

認められた。

5-2. ゲルの調製

各ゲルは表1に示す濃度 (w/v%) で100 mL分を調製した。粉末に少量ずつ純水 (Milli-Q IX 7003、メルク社製装置) を加えながら、ガラス棒でよく混ぜた。本来は常温で最低でも1時間程度置き、十分に膨潤させてから加熱すべきだが、今回は限られた個数のピーカーを使って効率的にゲルを準備する都合、すぐに加熱を行った。加熱には、電子レンジを使用し、900 Wで20秒間の加熱を繰り返した (途中で何度か攪拌した)。通常、電子レンジや湯煎で加熱することが一般的で、本実験では Mina 氏がワークショップで紹介した方法を参考にした。

沸騰後、溶液をシャーレ (ビオラモ細胞培養ディッシュ、直径148 mm×高さ25.0 mm) に流して、室温で冷まして固めた。ゲル100 mLをこのシャーレ2枚に分けて流し込むことで、約3 mm厚のシート状のゲルができた。硬化後のゲルは内径23 mmの丸型 (カンダ18-8パテ抜丸、内径23 mm×高さ45 mm) でくり抜き、実験に供した。

5-3. テスト条件について

所定の大きさにカットしたゲルをインク染みの上に載せて、ヘラで力をかけずにゲルの上面を押してテストサンプルと接触させ、静置した。低濃度のゲルは短時間でも瞬時に水分が広がる一方で、高濃度のゲルは緩やかに作用するため、10分間と30分間を静置時間とした。

個々のゲルについて、濃度と水分の挙動の関係、およびクリーニング効果に着目し、染織品への適性を総合的に評価した。また、接触時間による結果の差異についても比較し、各ゲルの透明度と色味、硬さ、作業性 (= 布に沿いやすいか否か) に関しても適宜確認した。

水分の挙動は、テストサンプル上のインクが周囲に染み移る範囲を目視にて観察・比較し評価した。透明度と色味については、シャーレにキャストした約3 mm厚のゲルをコピー用紙印字の上に置き、目視にて観察・比較した (図3)。硬さと作業性については、指触で確認を行った。

表2の評価項目である「周囲への染み移り」は、テストサンプルの赤色インク (= 染み) の外郭線が試験前後で外側に広がり移動したか否かで判断した。また試験結果を、実際の処置に採用できそうな「目安の濃度」、作品や汚れの状態に応じて採用できそうな「状況次第」、処置には採用できない「使用不可」の3種類に分類した。

6. 結果および考察

各種濃度のゲルについて、その透明度と状態を表2にまとめた。アガーは8%まではやや透明であり、10%では若干不透明で黄味を帯びた。アガロースは2-6%においてやや透明で白味があり、8-10%では無色となった。ジェランガムは4%までは透明であったが、5%から濃度が上がるにつれて透明度が失われ、8%は茶色味を帯びてやや不透明となった (図3)。10%は水の量が不十分で加熱しても溶解せず、使用不可であった。5%以上の濃度でジェランガムが茶色味を帯びたことは、高濃度且つ過熱により熱変性したものと推測するが、詳細な検証が必要である。X : K : A ゲルはやや不透明か白味があり、ゲル上面は平滑ではなかった。

ゲルの硬さについては、アガー、アガロース、ジェランガムのいずれにおいても濃度が高いほど弾力性が強く、硬くなる傾向が見られた。また、いずれの濃度の場合も3 mm厚では柔軟性は乏しく、試験布の凹凸にも沿わない。ただし、柔軟性はゲルの厚みとも関係しており、高濃度でも厚みを薄くすれば、曲面に沿わせることができるほどになる^{註4)}。ゲルの柔らかさは、

表2 試験後（10分間静置）のろ紙に対する各種ゲルの挙動

ゲルの種類	濃度 (w/v%)	使用前のゲルの透明度と状態	ろ紙	
			周囲への染み移り	インク除去
アガー	2	ほぼ透明	多大	×
	4	やや透明	あり	△
	6	やや透明	少しあり	○
	8	やや透明	若干あり	○
	10	若干不透明 (若干黄色味あり)	若干あり	○
アガロース	2	やや透明 (若干白味あり)	多大	×
	4	やや透明 (若干白味あり)	少しあり	○
	6	やや透明 (若干白味あり)	少しあり	○
	8	やや透明	ほぼなし	×
	10	やや透明	ほぼなし	×
ジェランガム	2	透明	多大	△
	4	透明	少しあり	△
	5	やや透明 (若干茶色味あり)	少しあり	△
	6	やや透明 (若干茶色味あり)	若干あり	○
	7	やや透明 (茶色味あり)	若干あり	△
	8	やや透明 (茶色味あり)	若干あり	△
	10	水分量不足で溶けきらない	N/A	N/A
X : K : A (2 : 2 : 1)	2	やや不透明 (白味あり) 上面が平滑ではない	滲みあり (アガー2%よりは滲み少ない)	
X : K : A (1 : 2 : 2)	2	やや不透明 上面が平滑ではない	・滲みあり (アガー2%よりは滲み少ない) ・ゲルがろ紙に貼り付き紙繊維が剥離	
X : K : A (2 : 1 : 2)	2	ほぼ不透明 (白味あり) 上面が平滑ではない	・滲みあり (アガー2%よりは滲み少ない) ・作用にむらあり	

○：良 △：可 ×：不可

■：目安の濃度 □：状況次第 ■：使用不可



4%



6%

図3 ジェランガム4% (左) と6% (右) の透明度の比較

ゲルの着脱のし易さや、対象物との密着性や接触性にも大きく関わるため、厚みの調整も濃度の検証と併せて試すことが有効である。

ろ紙は3種類のテストサンプルのなかでは、それ自体の毛細管現象の作用が最も低く、ゲル自体の性能を理解しやすかったため、ここでは、ろ紙に各種ゲルを10分間静置した実験結果を表2および図4-6に示す。

アガーは6%以上、アガロースは4%以上、ジェランガムは4%以上の濃度でインクの除去が

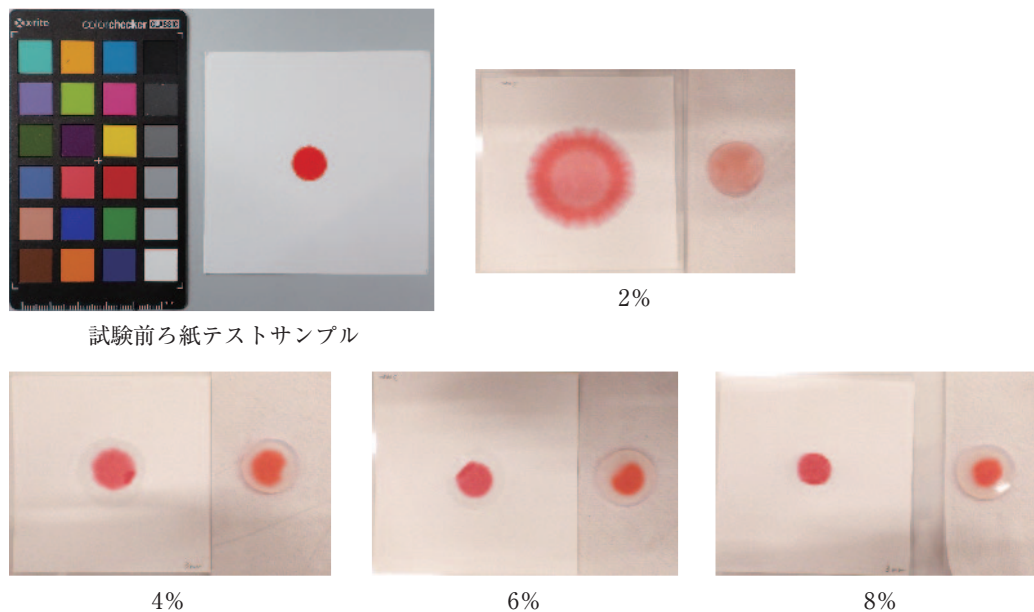


図4 試験後（10分間静置）のろ紙およびアガー

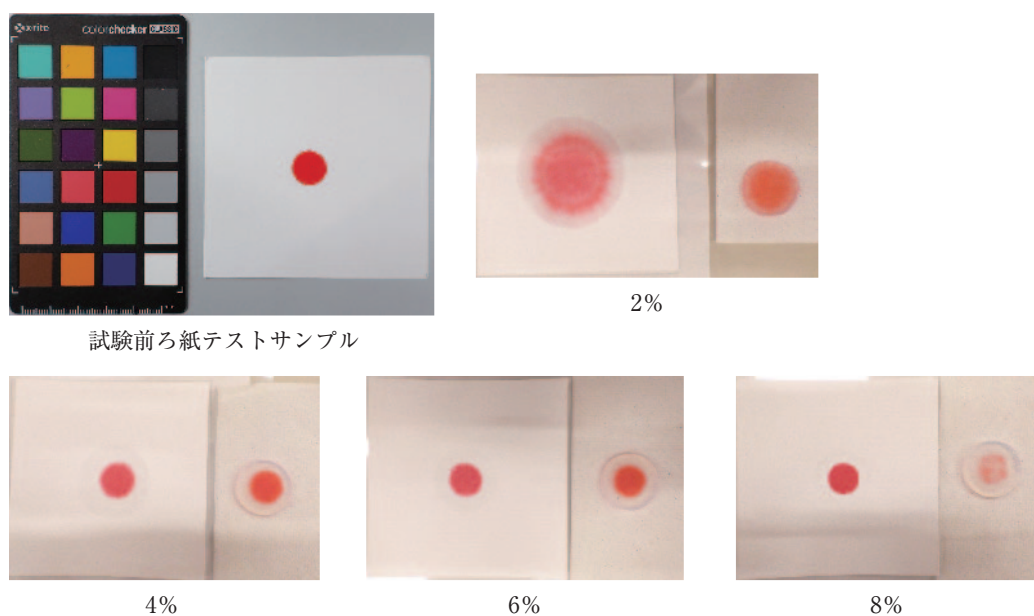


図5 試験後（10分間静置）のろ紙およびアガロース

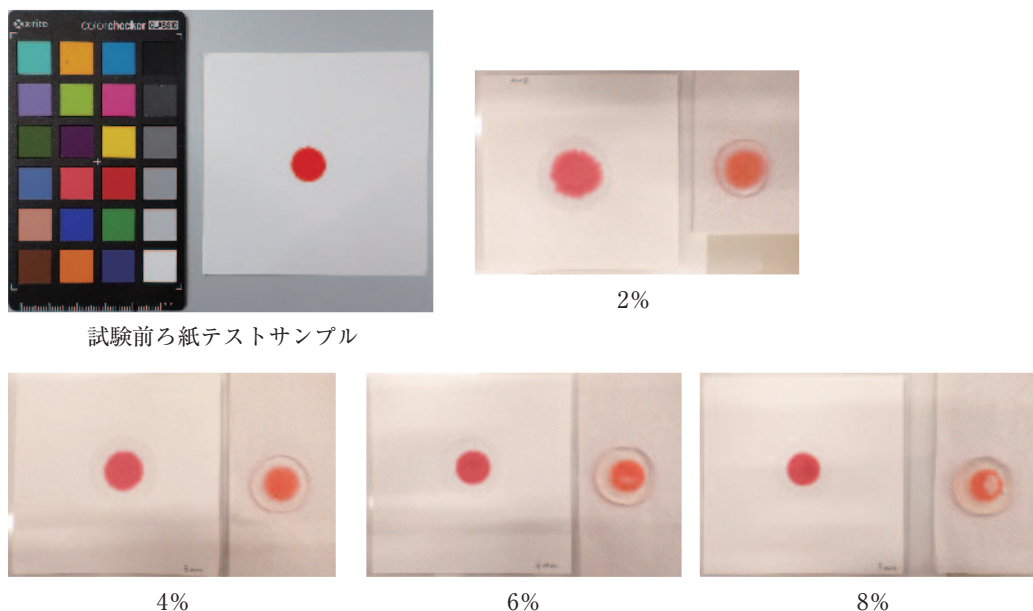
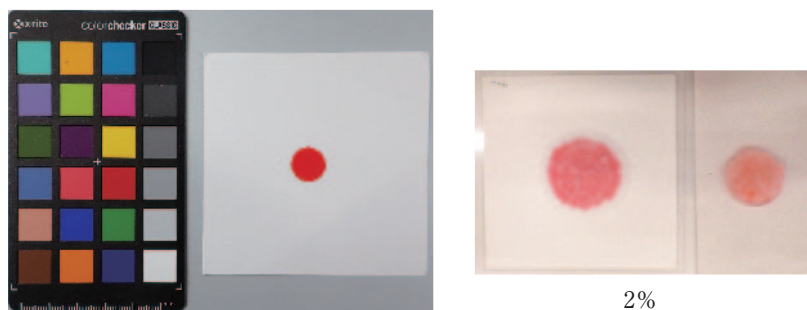


図6 試験後（10分間静置）のろ紙およびジェランガム

観察され、ゲルの毛細管現象の作用を確認できた。アガロースは8%以上になるとインク除去の効果が見られなかった。これは、インクを溶かすのに十分な水分が存在しないことが原因と考えられ、対象物の物性によっては、濃度が高いことが必ずしも有効とは限らないことを認識できた。X：K：Aゲルは10分間静置でいずれも滲みが生じ、一部ゲルがろ紙に貼り付き、表面が荒れ（図7）、インク除去作用にムラが生じたため、今回はろ紙での実験に留めた。以上の結果より、ろ紙においては、アガー6-10%、アガロース4-6%、ジェランガム4-8%が実際の処置への採用を検討できる「目安の濃度」「状況次第」とした。なお、ろ紙にて10分間静置と30分間静置を比較したところ、インク除去の程度に大差はなかった。周囲へのインクの滲みについては、アガーとジェランガムは30分静置後に若干大きく広がった一方で、アガロースは大きく異ならなかった。

高濃度における毛細管現象の作用の違いを確認するため、アガーとアガロースは6%と10%、ジェランガムは6%と8%について、それぞれ絹布・木綿布の上に10分間静置した結果を表3および図8・9に示す。絹布では、アガロース6%が3種のゲルの中では最もインクの滲みが少なく、インクを除去できた。一方で、6%よりも10%の方がインクは大きく滲む結果となったが、この要因については更なる検証が必要である。高濃度ではアガー10%の方がアガロース10%よりも滲みは少なかったが、アガロース6%の結果には劣った。木綿布では、ゲルの種類、濃度によらず、ゲルと接した箇所が濡れたため、その部分でインクが広がった。表3では、アガー10%、アガロース6%、ジェランガム6-8%を「目安の濃度」としたが、対象物の濡れ方によって作用や反応が異なることが明確となり、いずれも「状況次第」とも言える。インクの除去の程度は10分間静置と30分間静置では大差がないことが分かった。長くゲルを置いた場合の方が、滲みは大きくなる傾向にあるため、短時間での処置を繰り返した方が、水分の作用を制御しやすいことも示唆された。



試験前ろ紙テストサンプル

図7 試験後（10分間静置）のろ紙および X : K : A (1 : 2 : 2)

表3 試験後（10分間静置）の絹布と木綿布に対する各種ゲルの挙動

ゲルの種類	濃度 (w/v%)	絹布		木綿布	
		周囲への染み移り	インク除去	周囲への染み移り	インク除去
アガー	6	あり	○	あり	○
	10	あり	○	あり	×
アガロース	6	少しあり	○	あり	△
	10	あり	△	あり	×
ジェランガム	6	あり	○	あり	△
	8	あり	○	あり	△

○：良 △：可 ×：不可

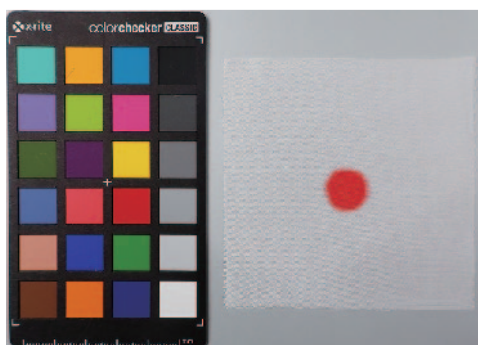
■：目安の濃度 □：状況次第

7. 今後の課題

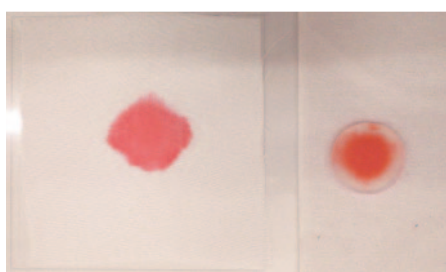
本稿では硬質ハイドロゲルであるアガー、アガロース、ジェランガムについて、ゲルの濃度と水分の挙動の関係、クリーニング効果、処置時間の観点から、染織品への適性を検証した実験の結果について、概要を示した。

硬質ハイドロゲルを使用したクリーニングでは、ゲルの濃度調整によって、汚れを「溶かす」作用と「吸い上げる」作用を制御する。ただし、染織品を対象とする場合には、素材が親水性で水分を吸収しやすい上、布自体も様々なレベルで毛細管現象が発生する構造をしており、作品自体がゲルの作用に大きな影響を及ぼす。今回の実験結果から、いずれのゲルの場合にも、試験布においてゲルの作用を制御できていると見せる下限は6%であり、対象物の物性を考慮しつつ処置の目的に応じて最適な濃度と静置時間を細かく調整する必要があることが改めて認識された。

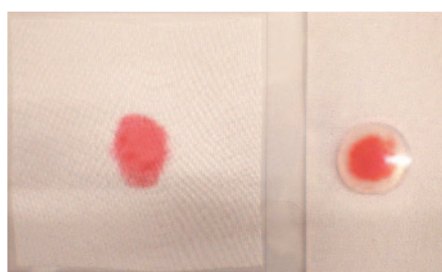
硬質ハイドロゲルにはクリーニングの対象となる「汚れ」の成分に応じて、pH 緩衝液、キレート剤、界面活性剤、酵素、極性の有機溶媒等、様々な試薬を添加して、洗浄効果を更にも高めることができる。実際に、西洋絵画や紙本、彫刻の保存修復分野からの報告の多くにおいて、これらの応用事例を見出すことができる。また、他分野の洗浄に関する研究は pH や導電率の調整等にまで議論が及んでいる。一方で、染織分野では、pH や導電率の調整、キレート剤の使用に関しては一定の隔たりがあり、ゲルを介した界面活性剤や酵素の使用に関しても染織特



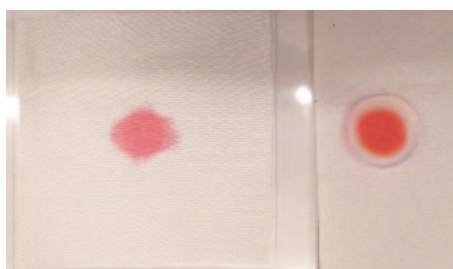
試験前絹布テストサンプル



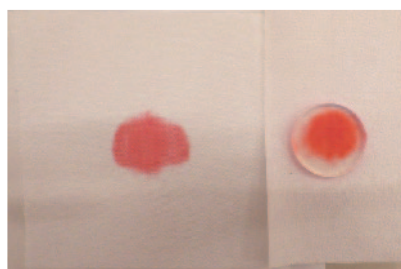
アガー6%



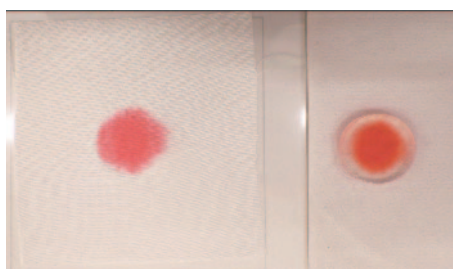
アガー10%



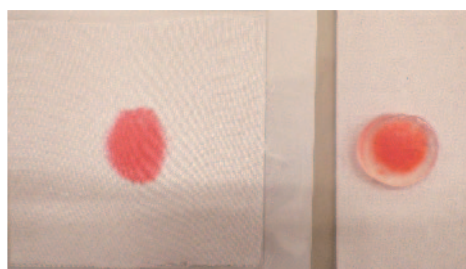
アガロース6%



アガロース10%



ゼランガム6%

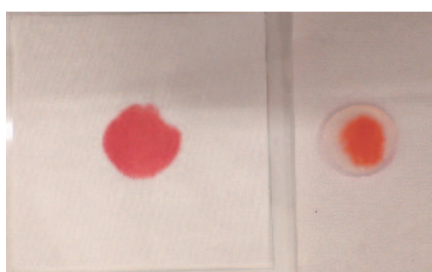


ゼランガム8%

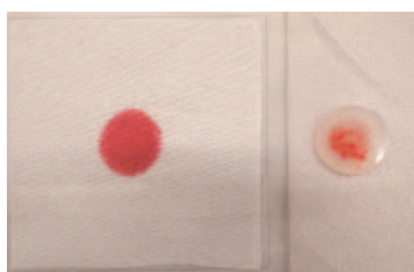
図8 試験後（10分間静置）の絹布および6・10%アガー、アガロースと6・8%ゼランガム



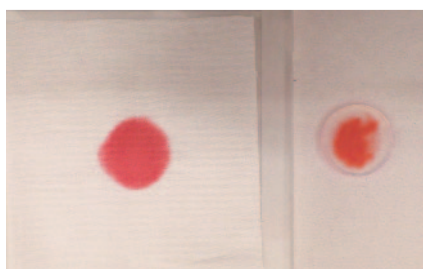
試験前木綿布テストサンプル



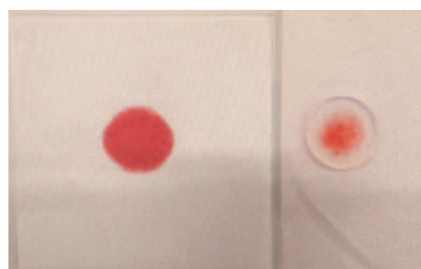
アガー6%



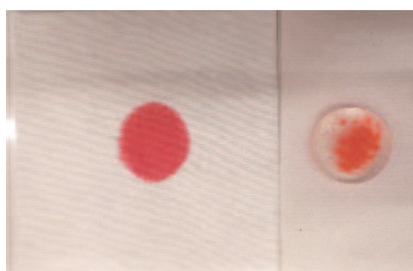
アガー10%



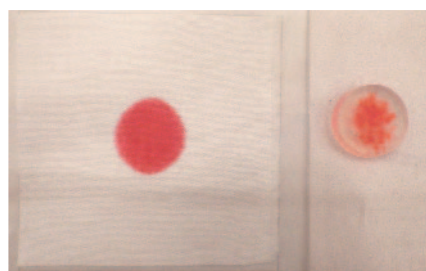
アガロース6%



アガロース10%



ジェランガム6%



ジェランガム8%

図9 試験後（10分間静置）の木綿布および6・10%アガー、アガロースと6・8%ジェランガム

有の課題に対応できる地点には到達できていない。その最大の要因としては、染織分野におけるゲル・クリーニングの実践経験が浅くノウハウが乏しいことと、染織文化財を構成する有機素材と、製作方法や使用に関係する様々な物質、それらに固有の劣化という観点から、ゲルや試薬が作品に及ぼす短期的・長期的な影響を十分に把握できていないことにある。この点に着目した研究の実施と指標を示すことが今後の課題である。引き続き各種ゲル・各種汚れを対象に洗浄効果に関する検証を進めつつ、ゲルに様々な試薬を添加した際に生じる繊維や染料への影響についても精査していきたい。

謝辞：本研究の実施にあたっては、佐藤が公益財団法人ポーラ美術振興財団令和6年度美術館職員の調査研究助成を受けた。Laura Mina 氏（米国 Smithsonian National Museum of African American History and Culture, textile conservator）からは本研究を遂行する上で多くの助言を頂いた。また試料準備には鈴木花子氏（東京国立博物館保存修復室事務補佐員）の全面的なサポートを得た。ここに記して感謝申し上げます。

註

- 註1) ハイドロゲルは架橋した高分子がつくる三次元の網目構造の中に多量の水を保持できる。Matthew Cushman 氏は保存修復で使用するハイドロゲルとして、物理架橋ゲルに加えて化学架橋ゲル（Nanorestore[®]）も紹介した。後掲註3) の2023年と2024年に同氏が行ったワークショップの配布資料（未刊行）より。
- 註2) 公益財団法人ポーラ美術振興財団令和6年度美術館職員の調査研究助成により、ゲルを使用した染織品保存修復のためのワークショップを東京国立博物館で開催した。ワークショップの期間は2024年12月9日から11日までの3日間で、講師に招聘した Laura Mina 氏はアメリカ合衆国 Smithsonian National Museum of African American History and Culture の衣装・染織品担当のコンサバターである。
- 註3) 欧米を中心に多数のワークショップが開催されており、国内では2021年 Paolo Cremonesi 氏による「文化財修復処置に関するワークショップ—ゲルやエマルジョンを使用したクリーニング法—」（東京文化財研究所保存科学研究センター主催）や2023年 Chris Stavroudis 氏による「文化財修復処置に関するワークショップ—モジュラー・クリーニング・プログラムの利用について」（国立アトリサーチセンター/東京文化財研究所保存科学研究センター主催）が記憶に新しい。近年では Matthew Cushman 氏の「Hydrogels in the Cleaning of Paper and Paintings」（2023年、International Academic Projects 開催）や「Introduction to Hydrogels in Conservation」（2024年、Restauratoren Nederland 開催）はオンラインでも配信され、情報収集を行いやすい状況にある。染織の分野を対象としたゲル・クリーニングに関するワークショップは、2011年 Richard Wolbers 氏による「Aqueous Cleaning Methods」（North American Textile Conservation Conference 開催）が初期のものにあたり、近年では Laura Mina 氏^{註2)}が世界各地で行っている。筆者等もこれらのワークショップへの参加を通じて、ゲルを用いたクリーニングについて実践的な学習の機会を得た。
- 註4) 前掲註2) の Mina 氏によるワークショップでは2 mm 厚のゲルシートを調製して、実験を行った。本実験で使用したものは厚さ1 mm の違いではあるが、ある程度の柔軟性があった。

参考文献

- 1) Huges, A. and Michelle, S.: Targeted cleaning of works on paper: rigid polysaccharide gels and conductivity in aqueous solutions. In: *The Book and Paper Group Annual 35*, 30-41 (2016)
- 2) Wolbers, R.: Gels, green chemistry, gurus and guides. In: *Gels in the Conservation of Art*, (eds.), Angelova, L., Ormsby, B., Townsend J. H., Wolbers, R., London: Archetype Publications Ltd, 3-8 (2017)
- 3) Wolbers, R.: Terminology and properties of selected gels. In: *Gels in the Conservation of Art*, (eds.), Angelova, L., Ormsby, B., Townsend J. H., Wolbers, R., London: Archetype Publications Ltd, 381-394 (2017)
- 4) 国立文化財機構東京文化財研究所保存科学研究センター修復材料研究室：文化財に関するワークショップ—ゲルやエマルジョンを使用したクリーニング法—、3章3-2節、37-39 (2021)
- 5) 大谷 貴美子、松本 直子：MCT 添加寒天ゲルの特性、日本家政学会、38(6)、475-481 (1987)
- 6) 国立文化財機構東京文化財研究所保存科学研究センター修復材料研究室：文化財に関するワークショップ—ゲルやエマルジョンを使用したクリーニング法—、3章3-3節、39-41 (2021)
- 7) 流石啓司、石川愛子、伊藤正高、天野記彰、石井康史、北川孝和、臼井雅敏：寒天と電気泳動用アガロースについて、*THE CHEMICAL TIMES* 4(222)、8-14 (2011)
- 8) 貴田啓子、堀まなみ、大場詩野子、古田嶋智子、池田和彦、犬塚将英、早川 典子：ジェランガムゲル処置による紙資料への影響、*保存科学*、57、123-131 (2018)
- 9) Maheux, A. F.: Cross-Disciplinary Uses for Gellan Gum in Conservation. In: *The Book and Paper Group Annual 34*, 69-79 (2015)
- 10) Peranteau, A.: Gellan gum as a material for local stain reduction. *Conserving modernity: The articulation of innovation. 9th North American Textile Conservation Conference, San Francisco, CA. Philadelphia: North American Textile Conservation Conference. 72-85 (2013)*
- 11) Schmitt, E and Foskett, S.: Gelling in theory and practice: an examination of agarose gels in textile conservation. In: *Textile Specialty Group Postprints, Volume 26. AIC 43rd Annual Meeting, Montreal, Canada. May 11-18, 157-170 (2016)*
- 12) Schmitt, E.: Gelling Predictions: The Challenges of Taking Research into Practice. In: *Gels in the Conservation of Art*, (eds.), Angelova, L., Ormsby, B., Townsend J. H., Wolbers, R., London: Archetype Publications Ltd, 92-95 (2017)
- 13) 片岡真純、永田大輔：正倉院染織品におけるゲル・クリーニングの応用、*文化財保存修復学会第47回大会研究発表要旨集*、24-25 (2025)
- 14) 『正倉院紀要』第47号「年次報告」170-172 (2025) <https://shosoin.kunaicho.go.jp/api/bulletins/47/pdf/0476121200> (2025年11月21日参照)
- 15) 宮越俊一：こんにやくとグルコマンナの化学、*化学と教育*、64(6)、292-295 (2016)
- 16) 西成勝好：食品の新しいテクスチャーモディファイヤー 異種食品ハイドロコロイド間相互作用とその利用可能性、*化学と生物* 34(3)、197-204 (1996)
- 17) Qiao, D., Shi, W., Luo, M., Hu, W., Huang, Y., Jiang, F., Xie, F. and Zhang, B.: Increasing xanthan gum content could enhance the performance of agar/konjac glucomannan-based system, *Food Hydrocolloids*, 132, 1-8 (2022)

キーワード：染織品保存修復 (textile conservation) ; ゲル・クリーニング (gel cleaning) ; アガー (agar) ;
アガロース (agarose) ; ジェランガム (gellan gum) ; 毛細管現象 (capillary action) ;
離漿 (syneresis)

Preliminary Study on Application of Gel Cleaning on Historic Textiles: Physical Properties of Hydro-Rigid Gels and Their Effectiveness as Cleaning Medium

SATO Moe* and KATAOKA Masumi**

This paper provides an overview of a preliminary study evaluating the suitability of hydro-rigid gels for use on historic textiles. Gel cleaning for historic artifacts has become widely adopted over the past twenty years, and numerous reports on research and case studies are available, particularly from the field of conservation of paintings, works on paper, and sculpture. Conversely, in textile conservation, its application remains limited to the adaptation of existing knowledge from other fields, and textile-based research in this area is still limited worldwide and none in Japan. The lack of information, coupled with a limited understanding of the short- and long-term effects of gels and various cleaning reagents on textiles make the situation difficult to bring the technique into practice.

In this study, agar, agarose, and gellan gum (low acyl) were tested, and the evaluation focused on the relationship between gel concentration and capillary action, cleaning efficacy, and treatment time. Silk fabric, cotton fabric, and blotting paper all stained with water-soluble ink were used as specimens to understand the impact of capillary force within the fabrics on the efficacy of gels. The gels for this test were prepared at the concentrations of 2, 4, 6, 8, 10 w/v%, and each was placed on the stain for either 10 or 30 minutes. The test was formulated based on the research by Emma Schmitt (2017) and shared knowledge through a gel workshop by Laura Mina in 2024 at the Tokyo National Museum.

Textiles are generally hydrophilic and readily absorb moisture by nature. Capillary actions exist at various levels within a fabric, significantly influencing the gel's properties and interfering with the moisture. This was obvious by comparing the results of blotting paper and silk and cotton fabrics. Based on the results, it was affirmed that for all gels, the minimum concentration at which the gel's action on the fabrics can be considered under control was around 6%.

*Tokyo National Museum

**Office of the Shosoin Treasure House, the Imperial Household Agency