

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分：環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）

研究実施期間：2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号：1MF-2201

体系的番号：JPMEERF20221M01

研究課題名：廃棄建材表面の石綿の可視化による迅速検出・画像解析法の開発と災害現場実証

Project Title：Study on Detection and Image Analysis of Asbestos on the Surface of Waste Building Materials and Its Application to Disaster Sites

研究代表者：田端 正明

研究代表機関：佐賀大学

研究分担機関：

キーワード：アスベスト、色素染色、検出、画像解析、災害及び解体廃棄建材

注：研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



環境研究総合推進費
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人
環境再生保全機構
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
研究課題情報.....	3
<基本情報>	3
<研究体制>	3
<研究経費の実績>	4
<研究の全体概要図>	5
1. 研究成果.....	6
1. 1. 研究背景	6
1. 2. 研究目的	6
1. 3. 研究目標	6
1. 4. 研究内容・研究結果	8
1. 4. 1. 研究内容	8
1. 4. 2. 研究結果及び考察	8
1. 4. 3. 代表的な研究結果の詳細	8
1. 5. 研究成果及び自己評価	32
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	32
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価	33
1. 6. 研究成果発表状況の概要	37
1. 6. 1. 研究成果発表の件数	37
1. 6. 2. 主要な研究成果発表	38
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動	38
1. 7. 国際共同研究等の状況	39
1. 8. 研究者略歴	39
2. 研究成果発表の一覧	41
(1) 産業財産権	41
(2) 論文	41
(3) 著書	41
(4) 口頭発表・ポスター発表	42
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	43
(6) マスメディア等への公表・報道等	44
(7) 研究成果による受賞	44
(8) その他の成果発表	44
権利表示・義務記載.....	44

Abstract

研究課題情報

<基本情報>

研究区分：	環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）
研究実施期間：	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研究領域：	統合領域
重点課題：	【重点課題5】災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発
行政ニーズ：	
課題番号：	1MF-2201
体系的番号：	JPMEERF20221M01
研究課題名：	廃棄建材表面の石綿の可視化による迅速検出・画像解析法の開発と災害現場実証
研究代表者：	田端 正明
研究代表機関：	佐賀大学
研究分担機関：	
研究協力機関：	京都大学

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

<研究体制>

サブテーマ1「建材表面の染色による災害廃棄物中の石綿建材の識別に関する研究」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	佐賀大学	理工学部	特任教授	田端正明	
協力者	京都大学	工学部	教授	勝見 武	
協力者	佐賀大学	大学院理工学研究科	博士後期課程、学生	原口 椋多	
協力者	佐賀大学	大学院理工学研究科	博士後期課程、学生	Chen Zewei	2022 年 4 月 ～ 2024 年 3 月
協力者	鹿児島大学	連合大学院農学研究科	博士後期課程、学生	Dai Huanghuang	2024 年 4 月 ～ 2024 年 9 月
協力者	佐賀大学	大学院農学研究科	修士課程課程	Zong Shichen	2024 年 11 ～ 2025 年 3 月

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

サブテーマ2「染色前後の建材表面の石綿と素材の微細構造解析と染色機構解明」

＜サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者＞

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	佐賀大学	理工学部・理工学研究科	教授	矢田光徳	
協力者	佐賀大学	理工学部・理工学研究科	学生	西口瑞朔	2023 年 4 月 ～ 2025年3月
協力者	佐賀大学	理工学研究科	学生	古川瑞翔	2023 年 4 月 ～ 2025年3月
協力者	佐賀大学	理工学部	学生	梅原智也	2022 年 4 月 ～ 2023年3月
協力者	佐賀大学	理工学部	学生	林 結衣	2023 年 4 月 ～ 2024年3月
協力者	佐賀大学	理工学部	学生	末廣結衣	2024 年 4 月 ～ 2025年3月

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

サブテーマ3「染色後の建材表面の画像解析による石綿検出法の開発」

＜サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者＞

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	佐賀大学	理工学部	教授	皆本晃弥	
協力者	パナソニックコネクト株式会社	SaaSビジネスユニット開発部 開発1課		富田光向	2022 年 度 ～ 2023年度
協力者	佐賀大学	大学院理工学研究科	博士前期課程 2年	西島颯希	2024年度

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

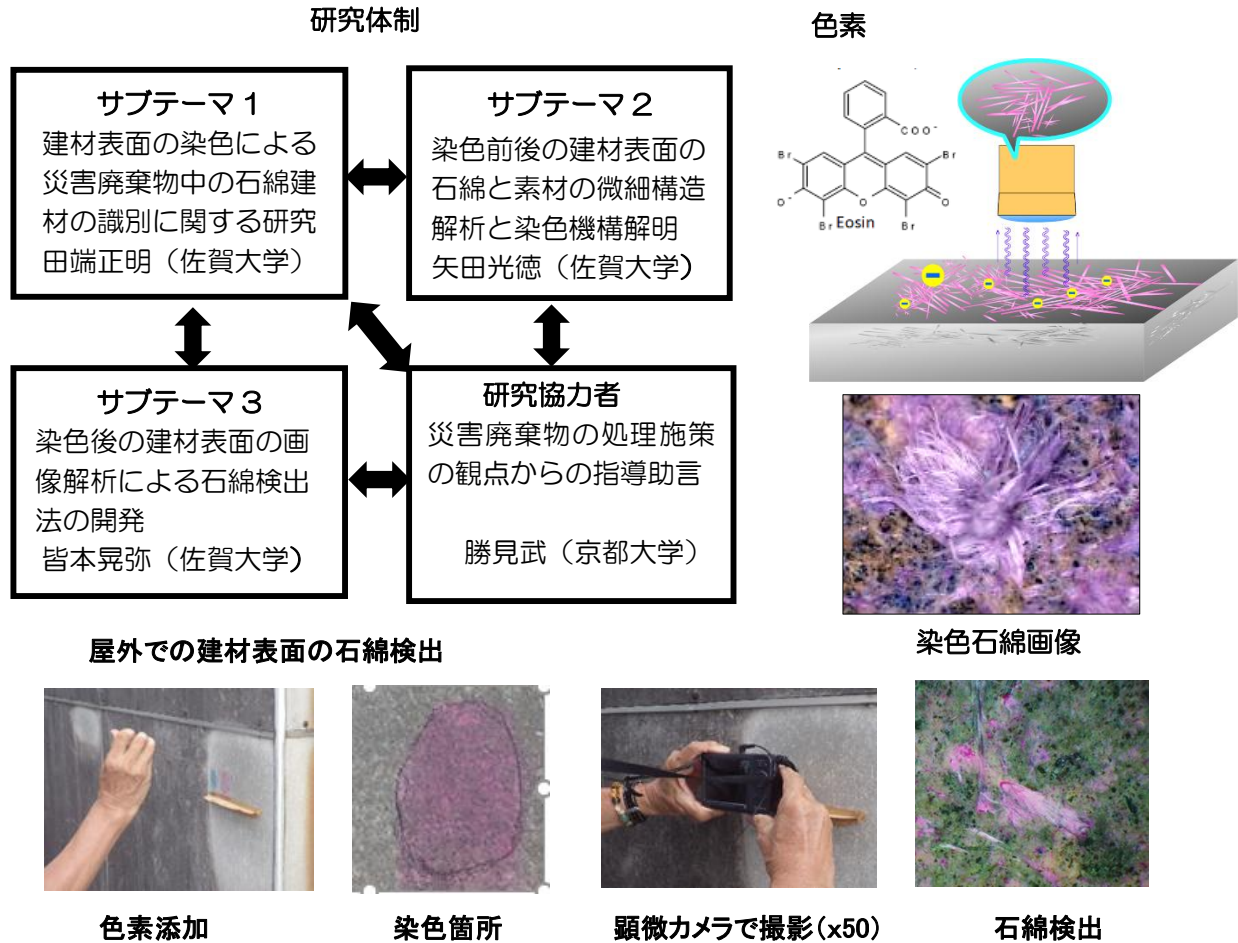
＜研究経費の実績＞

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2022	14,482,622	4,342,378	18,825,000	
2023	12,863,350	3,857,650	16,721,000	
2024	9,447,693	2,834,307	12,282,000	
全期間合計	36,793,665	11,034,335	47,828,000	

注： 環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

<研究の全体概要図>

【目的・目標】建材を粉砕しないで建材表面を色素染色し、実体顕微鏡またはデジタル顕微鏡で石綿建材を画像として識別する方法を開発する。その方法を災害廃棄物仮置場の建材に応用し、10分以内で石綿建材の識別（検出限界、0.1%未満）を実現する。その結果に基づいて石綿建材の仕分法を提案する。石綿分析コストは1件当たり公定法の50分の1（1000円/検体）以下にする。



石綿検出手順

試料採取→水洗（汚れを取る（1分））→乾燥（2分）→色素染色（1分）→水洗・乾燥（2分）→顕微カメラによる撮影（2分）→モニターに画像表示（1分）→石綿を確認（1分）

【災害廃棄物仮置場の現状】

1. 建材と石綿含有建材が混在
2. 建材の石綿検査はなされていない
3. 石綿含有建材の仕分けが不十分
4. 仮置場からの石綿飛散の恐れ有り



【本研究の環境施策への貢献】

1. 災害廃棄建材の迅速な石綿検査
2. 石綿建材の円滑・迅速な仕分け処理
3. 仮置場からの石綿の飛散防止
4. 作業従事者の安心・安全の確保

1. 研究成果

1. 1. 研究背景

地震、水害、台風など大規模災害が全国的に頻発している。そのたびに廃棄される多量の災害廃棄物は環境問題となっている。災害後の廃棄物処理は、迅速な後片付けだけでなく有害廃棄物と再利用可能な廃棄物を円滑・迅速に分別処理することが重要である。廃棄物の分別の障害となっている要因は、外見では判断出来ない有害な物質の混在である。有害廃棄物の一つに石綿含有建材がある。石綿含有建材の製造・販売は 2006 年に禁止されたが、まだ約 280 万棟の建築物には石綿含有建材が使われており、2050 年頃まで建物解体等に伴う排出が続く。災害時においては、建物の倒壊や破損、家屋への濁流の浸水等で石綿含有建材が災害廃棄物として仮置場に搬出される。仮置場での石綿建材の分別には迅速な識別が必要であるが、現行の公定石綿分析法は専門技術員と分析時間と経費がかかるため災害現場での石綿検出法として使われていない。

我々は、このような課題を解決するために、石綿を迅速に検出できる色素染色分析法（基本原理）を確立した（分析化学，2019，68，401-409）。その後、建材を粉砕せずに表面を染色して石綿を直接検出する方法を確立した（廃棄物資源循環学会講演要旨集 p.415-416（2020）、同学会要旨集 p.413-414（2021）；Waste Management，2022，138，180-188）。本分析法を仮置場に集積された建材、特に屋根材や壁材、その他のボード類、に適用することで、石綿含有建材の迅速な識別と石綿含有建材の安全で円滑な処理は可能となる。そのために、災害現場に適した分析操作の簡便性や分析時間、検出限界を検証し、本法の社会実装化を目指している。更に、建築物の解体・改修工事に取り掛かる前の石綿検査が令和 5 年に義務付けられたので、建材の石綿検査の需要は一層増加している。

1. 2. 研究目的

色素染色による石綿検出法を災害時の仮置場に集積された建材や解体予定の家屋・建材に適用することで、石綿建材の迅速な識別と石綿建材の安全で円滑な処理ができるようにする。これによって、災害時の仮置き場や家屋解体時での作業従事者の石綿による健康被害を防ぐ。さらに、石綿含有建材の分別処理によって、みなし石綿含有建材の廃棄量を減少させ、最終廃棄物埋め立て施設の耐用期間の延長と石綿非含有建材の再利用を促進する。万一南海トラフ地震のような大規模災害が発生した時には、埋め立て施設に廃棄建材を保管できない恐れがある。できるだけ多くの廃棄建材に対して迅速・簡便な本法の適用によって、石綿非含有建材の分別を徹底する。

本研究は【重点課題5】災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発に対応する課題である。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	廃棄建材表面の石綿の可視化による迅速検出・画像解析法の開発と災害現場実証
全体目標	<p>建材を粉砕しないで建材表面を色素染色し、実体顕微鏡またはデジタル顕微鏡の画像を解析することで石綿建材を検出する手法を実用化する。その方法を災害廃棄物建材に応用して、実用上必要な課題の抽出と改善を図る。主要な目標は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建材の染色顕微画像による石綿検出 ・ 染色顕微画像の画像解析による石綿の自動・遠隔検出 ・ 建材表面の石綿の色素染色機構の解明 ・ 石綿含有率の検出限界： 0.1%未満 ・ 検査時間：1 検体当たり10 分以内 ・ 分析コスト：公定分析法の分析費用より安価

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	建材表面の染色による災害廃棄物中の石綿建材の識別に関する研究
---------	--------------------------------

サブテーマ1 実施機関	佐賀大学・・・
サブテーマ1 目標	<p>災害廃棄物中の石綿含有建材を現場で迅速に識別する手法を確立するため、以下に目標と年次計画を列記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・災害廃棄物仮置場において、実際の建築廃材を対象とし、申請者らの色素染色による石綿検出法の適用実験を行い、シビアな災害現場レベルでの適用性を検証する。 ・オンサイト測定における課題を抽出し、操作手順や器具の改善等を図る。そして、改善点を整理し一連の測定手順を確立する。 ・石綿建材の検出に要する時間が1 検体当たり10 分以内になるようにする。 ・検出される石綿の画像より石綿の占有表面積率を求め、公定法による石綿分析結果と比較し、面積率から石綿濃度を推定する方法を確立する。 ・石綿含有率の検出限界濃度、0.1%未満を達成する。 ・分析コストを公定法の分析費用（5～6 万円）の50 分の1 以下にする（1,000 円）。

<サブテーマ2の研究目標>

サブテーマ2 名	染色前後の建材表面の石綿と素材の微細構造解析と染色機構解明
サブテーマ2 実施機関	佐賀大学
サブテーマ2 目標	<p>染色前後の建材表面の微細構造解析と石綿の染色機構を解明するため、以下に目標と年次計画を列記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・染色前の建材表面の微細構造解析により混入した石綿の種類と大きさを建材ごとに決定する。また、色素の分光学的解析を行う。 ・建材表面の微細構造から表面を染色するための色素の条件を提示する。 ・染色した建材表面中の石綿と建材素材への着色状態を解析する。 ・色素の着色状態から、染色における静電相互作用と疎水性相互作用の寄与の大きさの違いを明らかにし、色素と石綿との相互作用の機構を解明する。 ・建材色素染色法による石綿の検出限界を0.1%未満とするための最適染色条件を表面構造解析と色素の特性から明らかにする。

<サブテーマ3の研究目標>

サブテーマ3 名	染色後の建材表面の画像解析による石綿検出法の開発
サブテーマ3 実施機関	佐賀大学
サブテーマ3 目標	<p>染色後の建材表面のウェーブレット解析や機械学習手法による石綿画像解析法を開発し、建材中の石綿を効果的に検出する画像解析法を確立するため、以下に目標と年次計画を列記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ウェーブレット解析や機械学習手法により、染色表面画像から石綿の形状に着目した特徴抽出法を開発する。 ・抽出した特徴を定量化する手法を開発する。 ・提案した特徴抽出法や定量化手法の有効性を検証する。 ・検証結果に基づき、石綿の検出率を向上させるためのデータクレンジング手法や新たなウェーブレットフィルタの開発を行う。 ・石綿の自動検出精度をより高めるための、ウェーブレットフィルタや特徴量定量化手法の有用性を実証する。

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

災害および家屋解体時の廃棄建材を粉碎しないで建材表面を色素染色し、実体顕微鏡で画像を直接観察し染色繊維状物質の色調と形状から石綿を識別・検出した（サブテーマ1）。更に、画像をウェーブレット解析や機械学習手法による石綿画像解析法を開発し、建材中の石綿を効果的に検出する画像解析法を確立した（サブテーマ3）。サブテーマ2では、サブテーマ1で染色法により検出した石綿の精度保証およびサブテーマ3での機械学習にもとづく画像解析により石綿と判別した画像の精度を保証するためにSEM・EDS（走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型X線分析装置）やFTIR（フーリエ変換赤外分光高度法）、XRD（X線回折法）などの機器分析法により物質構造の研究を行った。このように、サブテーマ間の相互研究により個々のサブテーマの研究の充実と進展を図った。サブテーマ1では、石綿検出のための最適染色条件を決め、それに基づいて178個の災害地や家屋解体現場で採取した廃棄建材中の石綿検出を実施した。そして、着色の安定性、繊維状物質の識別、検出限界を調べた。検出困難な試料が1検体（p-タイル）あった。38検体について公定法と比較した結果、本法において石綿検出が疑わしい検体も含めて全て公定分析法による石綿有無の結果と一致した。

1. 4. 2. 研究結果及び考察

全体として、廃棄建材表面の色素染色によって石綿を迅速に特別な技術を必要とせずに選択的に石綿を簡単に検出できる方法を確立した（成果1, 2, 7）。サブテーマ1では採取した178個の建材について、色素染色による石綿検出の実験を実施した。そのうち、38検体を選別し公定分析法を依頼し比較した。1検体（p-タイル）で石綿検出が困難であった。他はすべて公定分析法と一致した（一致率は97%）。公定分析法の位相差顕微鏡による石綿有無の検査結果よりも明瞭な画像として、検出限度0.05%まで石綿を検出できた。

染色された石綿は、通常の実験室内放置で3ヶ月以上脱色せず安定であり、災害現場での光による退色の心配はなかった。サブテーマ2では、建材の表面組成分析（XRD、SEM・EDS、FT-IR）によって石綿が染色されることを確認した（成果3）。96検体について、染色法による石綿確認実験の結果とX線解析（XRD）を比較すると、不一致試料が1検体あった（XRDでは石綿なし、染色法では石綿有）。そのうち、公定分析法を実施した試料6検体では色素染色法と公定分析が全て一致した（成果2, 7）。XRDとの不一致の原因は、石綿以外の繊維物質を多量に含む試料ではXRD強度が弱く、建材の母材成分のXRD強度大きいため、石綿のパターン識別が困難であったためである。サブテーマ3では、ウェーブレット関数や機械学習による石綿の識別法を色素染色した試料に適用して、石綿を自動的に検出する技術を確立した（成果4, 5, 6）。従って、色素染色による石綿の検出と自動画像解析による石綿の判別法は、国や地方自治体による石綿含有建材の把握や除去に際し、信頼性の高い技術として活用が可能である。専門的な知識を持たない作業員や自治体職員でも直感的に操作可能となっており、研究成果の社会実装という観点から見ても、実効性と波及性に優れた取り組みである。

1. 4. 3. 代表的な研究結果の詳細

サブテーマ1「建材表面の染色による災害廃棄物中の石綿建材の識別に関する研究」

災害地や家屋解体現場で採取した廃棄建材（178検体）の表面汚れを金ブラシで落とし、表面を色素染色するだけで簡単・明瞭に石綿を検出できる方法を確立した（図1）。以下に詳細な研究結果を記す。

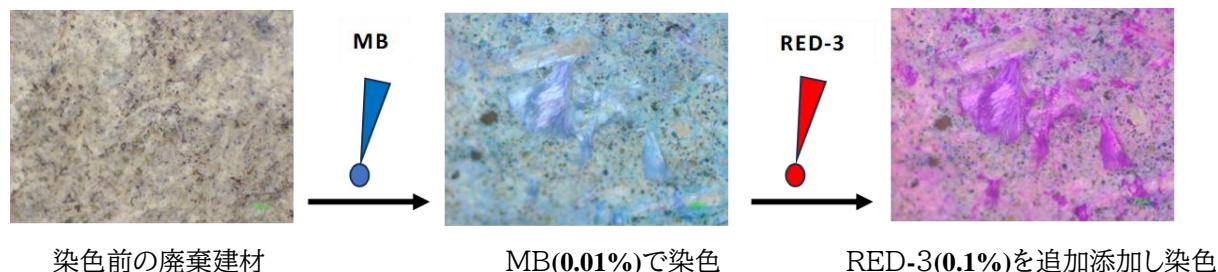


図1(成果7より引用)． 廃棄建材の色素(MB、RED-3)による染色
建材はクリソタイルを含み、実体顕微鏡で観察(x 50)。

① 測定用試料の調製

採取した廃棄建材は大きすぎると顕微鏡観察が困難であるので、水に浸し湿潤状態でペンチを用いて約1 mm x 2 mmの細片に破碎した。その細片試料を用いて実験を行った。

② 色素による石綿の染色

石綿が電荷を有していることに着目して、陽イオン性色素と陰イオン性色素を用いて建材表面を染色した。陽イオン性色素として、メチレンブルー(MB)、ローダミンB、陽イオン性ポルフィリン(TMPyP)を、陰イオン性色素として、エリスロシン(RED-3)、エオシンY、赤色1号、インジゴカルミン、陰イオン性ポルフィリン(TPPS)、銅クロコフィルを用いて染色した。また、アモサイトを染色するために、ポリリジンやポリエチレンジイミンのような陽イオン性高分子で建材表面を修飾した。MBとRED-3による染色が石綿を最も明瞭に着色した。MB、ローダミンB、RED-3、インジゴカルミン、ポリリジン及びポリエチレンジイミンの化学構造式を図2示す。

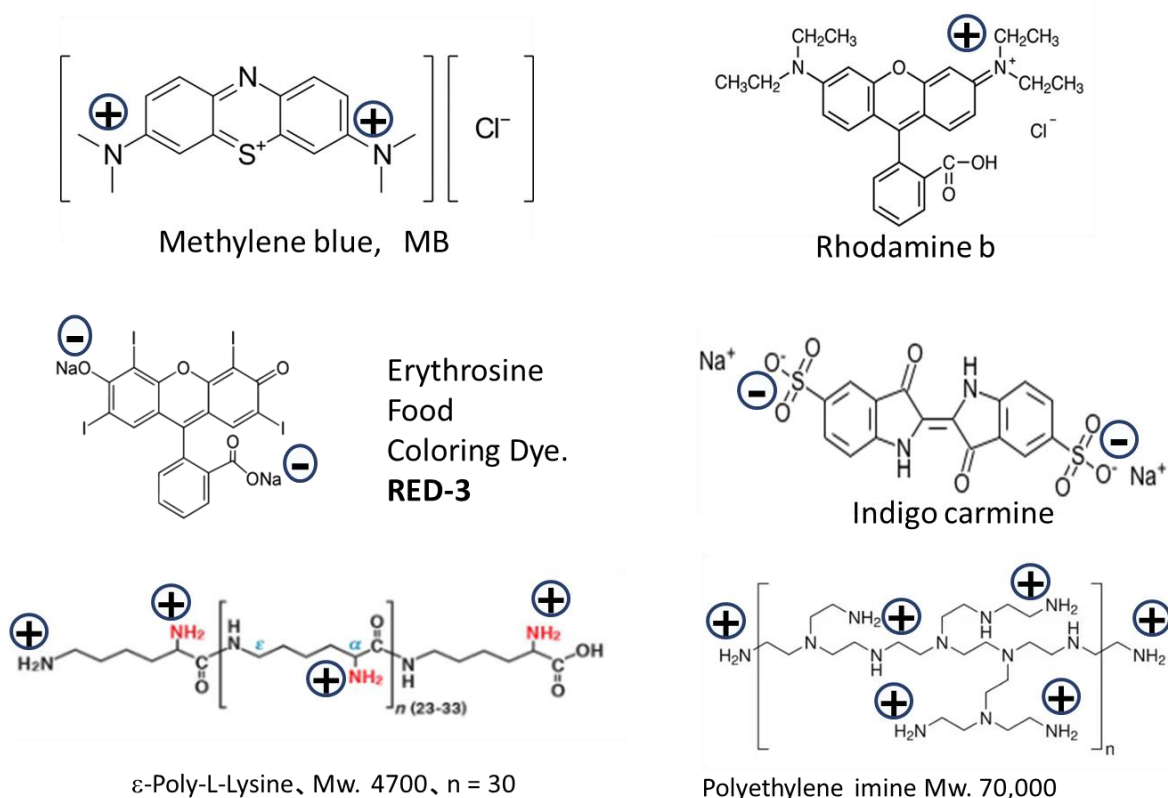


図2. 廃棄建材の染色色素試薬

③ 建材表面の汚れを落とし

採取した廃棄建材は泥や油で汚れているので、次の方法で建材表面を洗浄し、色素で染色した。5種の市販の洗浄剤（台所洗剤、油汚れ用洗剤、浴室水垢用洗剤、外壁クリーナー、シリカスケール用洗剤）、ガラスエッチング剤、1M 塩酸溶液、20% 蟻酸溶液、アセトン溶液、更に金ブラシで処理した。

廃棄建材を洗浄液に10～10分間浸した。台所洗剤ではそれほど汚れは落ちなかった。酸の溶液に建材を浸すと、建材表面から小さな気泡が発生した。建材素材のカルサイト（炭酸塩）が溶解していることが確認できた。次亜塩素酸を含む壁洗浄剤はそれほど表面の汚れは落ちなかった。コケなどの有機物に効果的と思われる。フッ化カリウムを含むガラスエッチング剤やお風呂湯のシリカ落とし洗剤は石綿表面をきれいにした。台所用以外の洗剤は建材表面の汚れを落としたが、これらの溶液は建材母材に浸透し、その後の染色色素の着色に影響を及ぼした。（図3）。即ち、洗浄力が強い洗剤では石綿は明確になるが、建材素材の母材がMBでは青の着色あるいはRED-3では赤の着色が強くなった。汚れ落としに効果的であったフッ化カリウムを含む洗剤や酸は、災害現場での使用は好ましくないと判断した。そのために、小さな金ブラシで汚れを落とし、水洗いした。その方法は、染色の着色への影響はなく、現場での洗浄方法として最適であった。一方、金ブラシで洗浄した試料は、染色後母材の着色は薄く、石綿は明瞭に染色された（図3 h, H）。

即ち、金ブラシでこすり水洗する方法が、操作も簡単で石綿は着色し、安全で災害現場での使用に適している。以降の実験では、廃棄建材は金ブラシでこすり水洗した。

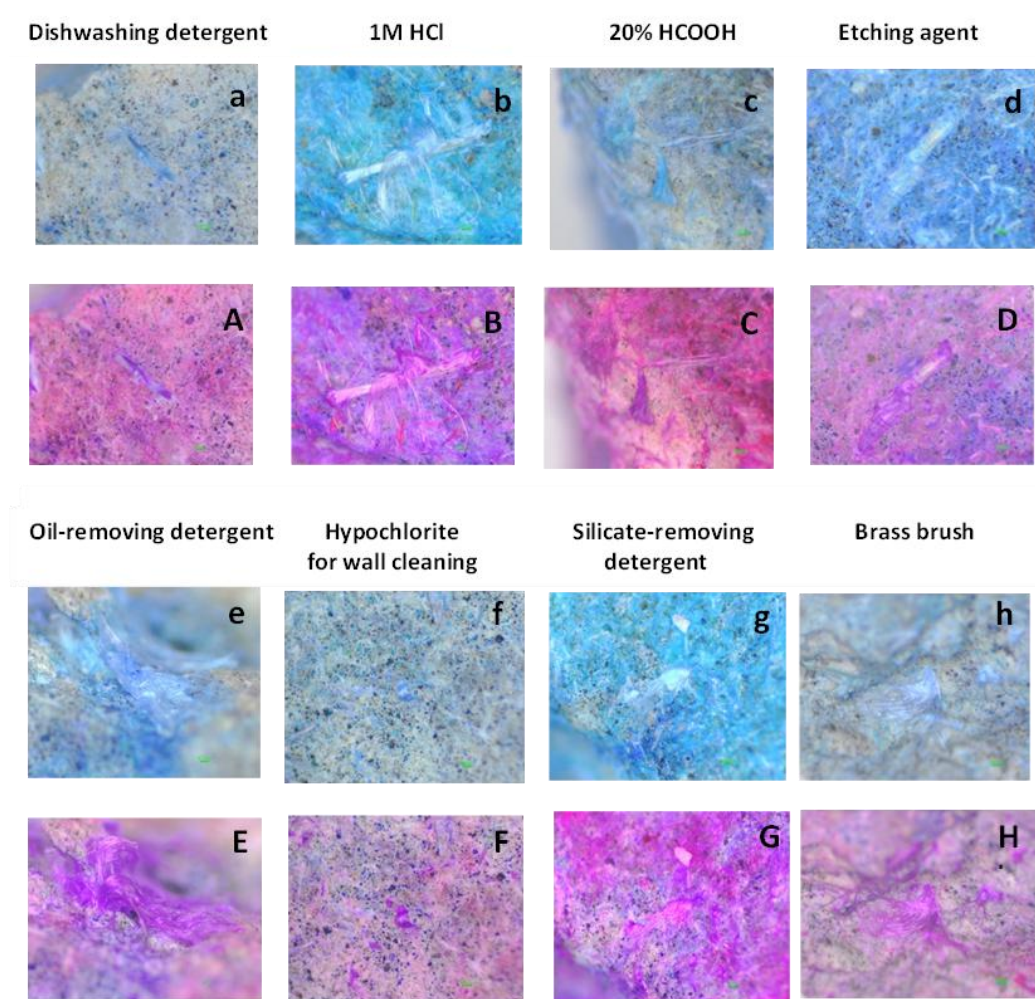


図3(成果2から引用). 石綿染色に及ぼす建材洗浄法の影響。

建材を次の方法で洗浄後、0.01% MB (a - h) 及び 0.01% MB + 0.1% RED-3 (A - H) で染色した。食器洗い洗浄剤 (a, A)、1M HCl (b, B)、20% HCOOH (a, c)、エッチング (d, D)、油落とし洗剤 (e, E)、外壁洗浄液 (f, F)、シリカ除去洗剤 (g, G)、金ブラシでこする (h, H)。

④ 色素による石綿の染色

a) 廃棄建材中の石綿（クリソタイル）の染色

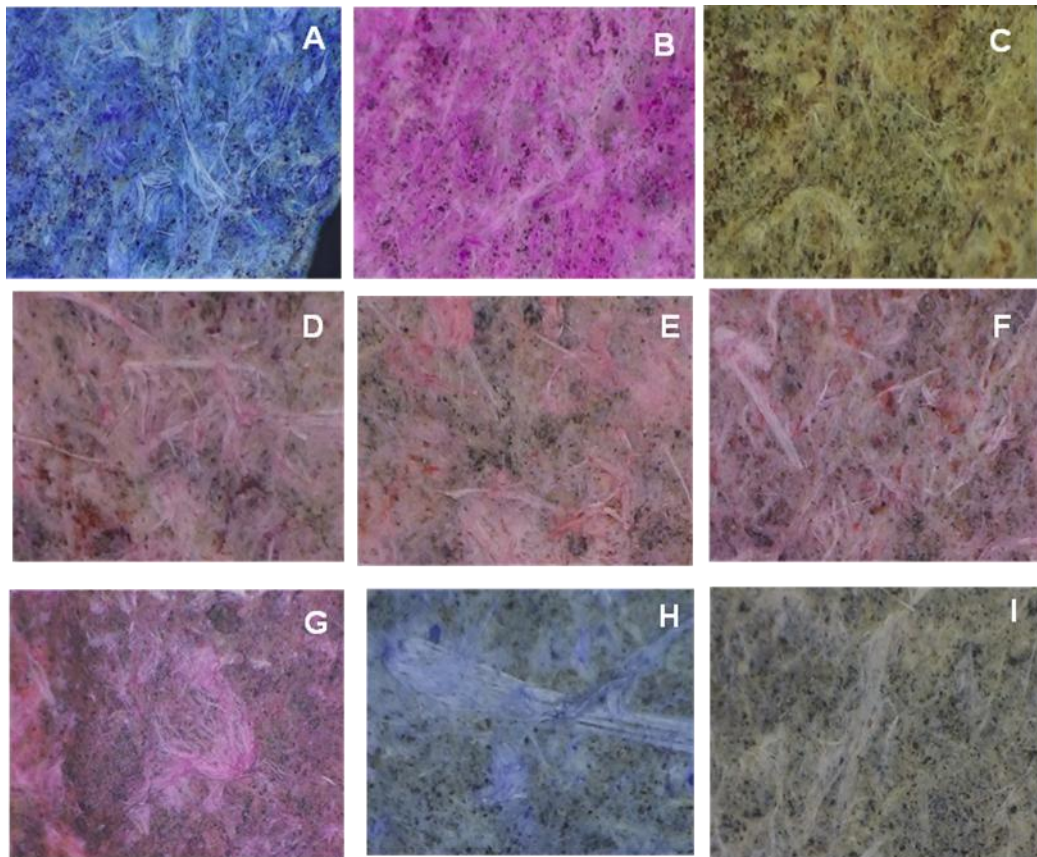


図4. 単一色素による廃棄建材表面の石綿の染色

A、MB（メチレンブルー）； B、ローダミンB； C、TMPyP ； D、食用赤色1号； E、食用赤色101号； F、食用赤色103号（エオシン）； G、食用赤色3号（エリスロシン、RE D-3）； H、インジゴカルミン； I、TPPS

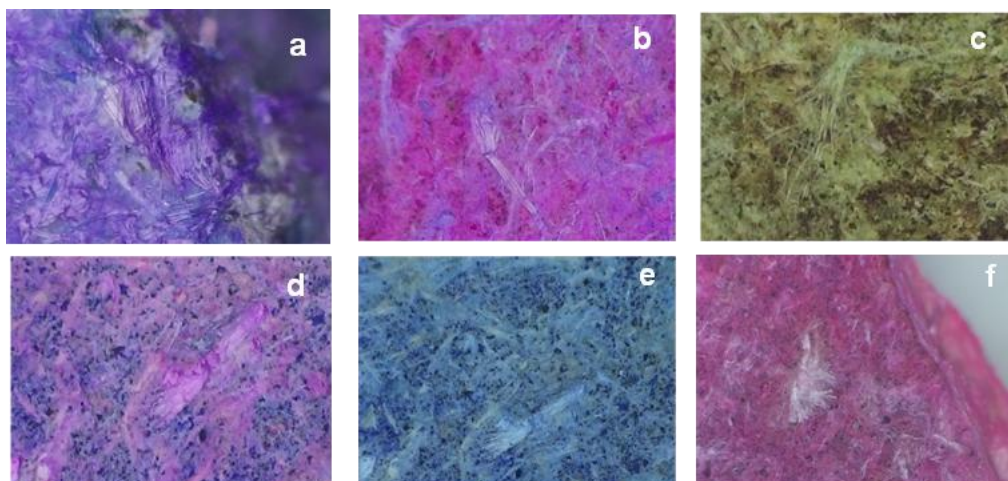


図5. 2種の色素による廃棄建材表面の石綿の染色

a、MB(水)+RED-3(水)； b、Indigo carmine + Rhodamine B； c、Indigo carmine + TMPyP； d、MB(EtOH)+RED-3(EtOH)； e、MB(EtOH)； f、RED-3(EtOH)

クリソタイルは正電荷を帯び、建材母材は負電荷を帯びているので、陽イオン性色素（図2）と陰イオン性色素で建材表面を染色した（図4、図5）。ここで、MBはメチレンブルー、TPPSはテトラスルホフェニルボルフィリン、TMPyPはテトラ（ピリジル-N-メチル）ボルフィリンを示す。図4A～4Cは陽イオン性色素で、図4D～4Iは陰イオン性色素で染色した結果である。陽イオン性色素は、石綿を十分に染色せず、建材母材を青色、ピンク色、あるいは黄緑色に染色した。一方、陰イオン性色素は、建材母材に比べて石綿を薄いピンク色、青色、灰色に染色した。特に、食用赤色3号（エリスロシン、RED-3）は石綿を濃いピンク色に染色した（図4G）。この染色結果の違いは、石綿と建材母材との表面電荷の違いである。陽イオン性色素と陰イオン性色素による染色を比較すると、メチレンブルー（MB）とエリスロシン（RED-3）が最適であった（図4A、図4G）。即ち、RED-3は石綿を、MBは母材を良く染色した。

次に、電荷が違う2種の色素（陽イオン性色素と陰イオン性色素）を用いて染色した。最初に建材を陽イオン性色素で染色し、次に、陰イオン性色素で石綿を染色した。MB+RED-3、インジゴカルミン+ローダミンB、インジゴカルミン+TMPyPの組み合わせである。色素添加順序は青色の母材の上にピンク色の石綿を表示させるためである。その染色結果を図5a～5dに示す。MB（水溶液）とRED-3（水溶液）による染色でクリソタイルは明瞭に染色された（図5a）。しかし、色素のエタノール溶液（MB（EtOH）、RED-3（EtOH））で染色すると、石綿は薄いピンク色になった。色素の水溶液の方が濃く石綿を染色した（図5e、図5f）。MB（EtOH）あるいはRED-3（EtOH）で建材を染色すると、石綿は薄く染色された（図5e、図5f）。特にRED-3（EtOH）では石綿が白色となった（図5f）。これは、RED-3が石綿に付着してもRED-3がエタノールに溶解しやすいために、染色後のエタノール洗浄でRED-3が剥離したためである。従って、以降、建材中の石綿染色には、水溶液のMBと水溶液のRED-3を用いた。

MBは細胞の染色や観賞魚の水槽の消毒液として、RED-3は食品の着色色素として市販され広く使われており、安価で取り扱い上安全な色素である。しかも、色素の使用量は微少であるので、購入（MB（25 g）、RED-3（5 g））後は、数年は使える。

b) 廃棄建材中の石綿（アモサイト）の染色

ほとんどの廃棄建材にはクリソタイルを含んでいたが3建材にはアモサイトが検出された。アモサイトは比表面積が小さく（ $2.378 \text{ m}^2/\text{g}$ ）クリソタイル（ $48.896 \text{ m}^2/\text{g}$ ）に比べて染色されにくかった。アモサイトは負電荷を帯びているので、陽イオン性ポリマー（ポリリジンまたはポリエチレンジイミン）で建材表面を修飾してから、MBとRED-3で染色し、アモサイトを検出した。ポリリジンの濃度を変えて建材を染色した。その染色結果を図6に示す。アモサイトはMBでは染色さないがRED-3添加によって赤色に染色された。ポリリジンの濃度が薄くなると建材素材が赤色化しアモサイトが検出しにくくなった。一方、クリソタイルはMBで青色に着色し容易に検出された。ポリリジンは静電荷を帯びた高分子であり、アモサイトの表面には薄く付着していると考えられる。その結果、アモサイトはMB（陽イオン性色素）では染色されず、RED-3で赤色に染色される。共存するクリソタイルはMBで青みに染色され、続くRED-3で赤紫に染色される。この操作でクリソタイルとアモサイトが区別できた。

アモサイトの表面電荷は負であるので、ポリリジン（正電荷）で表面を修飾後、最初にRED-3（負電荷）で染色し、次にMBで染色した。予想通りに、アモサイトは赤色に着色したが、MBによってアモサイトの着色が薄くなった。これは後述するように、色素RED-3は色素MBと結合しナノ粒子を生成するほど強く相互作用するので、染色されにくいアモサイトに弱く結合したRED-3がMBとの結合により脱離したためと考えられる。

ポリリジンによる建材表面の修飾によってアモサイトを染色することができた。そこで、ポリリジンへのアモサイトへの吸着を徹底させるために、ポリリジンの建材表面修飾後の放置時間について調べた。アモサイトの着色にはポリリジンの放置時間には大きな影響がなかった。ポリリジンのアモサイトへの吸着は直ちに進行する。しかし、ポリリジン添加後の放置時間が長くなると、建材の母材の着色が少し濃くなった。

他の陽イオン性高分子、臭化セチルトリブチルアンモニウム（CTAB）、ポリエチレンジイミン（PEI）ではRED-3添加によってアモサイトは赤色に染色されるが、建材の母材も赤色になるので、アモサイトが識別しにくかった。また、中性高分子であるトライトン-X（Triton-X）やポリエチレングリコールおよび陰イオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム（SDS））を用いた建材表面修飾では、アモサイトは染色されにくかった。また、建材母材はカルサイトや石膏であるので、これらによってアモサイト表面が覆われていると考えられたので、0.1M EDTA溶液に浸漬後ポリリジン添加し、MBとRED-3で染色したが大きな変化は見られなかった。

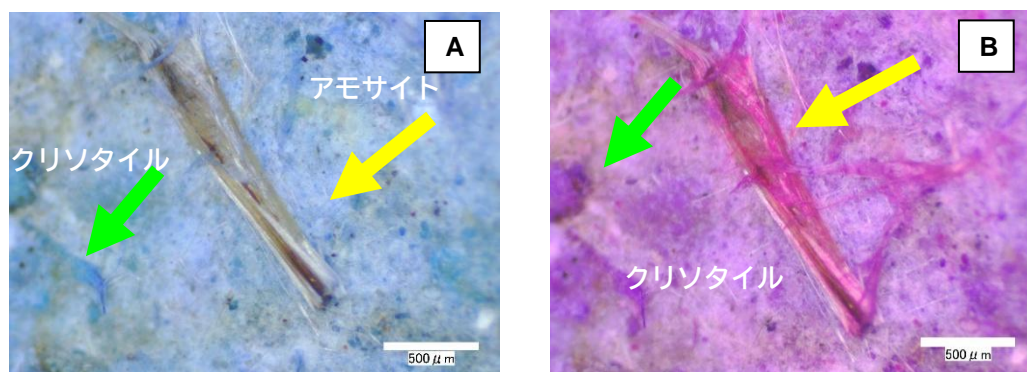


図6 (成果7からの引用). ポリリジンによる建材表面修飾後のアモサイトの着色
試料に最初に1% ポリリジン (A, B)を添加、その後MBで染色(A)、更にRED-3で染色(B)。MB = 0.01%、RED-3 = 0.1%

⑤ 色素染色による建材の分別

建材には、石綿以外に繊維状物質が混入している。従って、染色しないと外観からは、石綿かそれ以外の繊維状物質かの区別は困難である。色素染色によって、石綿と繊維状物質の区別について調べた。

a) クリソタイルと繊維状物質の識別

廃棄建材はMBとRED-3の染色によって、石綿のみを含む建材 (Group 1)、石綿と非繊維繊維状物を含む建材 (Group 2)、及び非石綿繊維状物のみを含む建材 (Group 3)に分けられた (図7)。

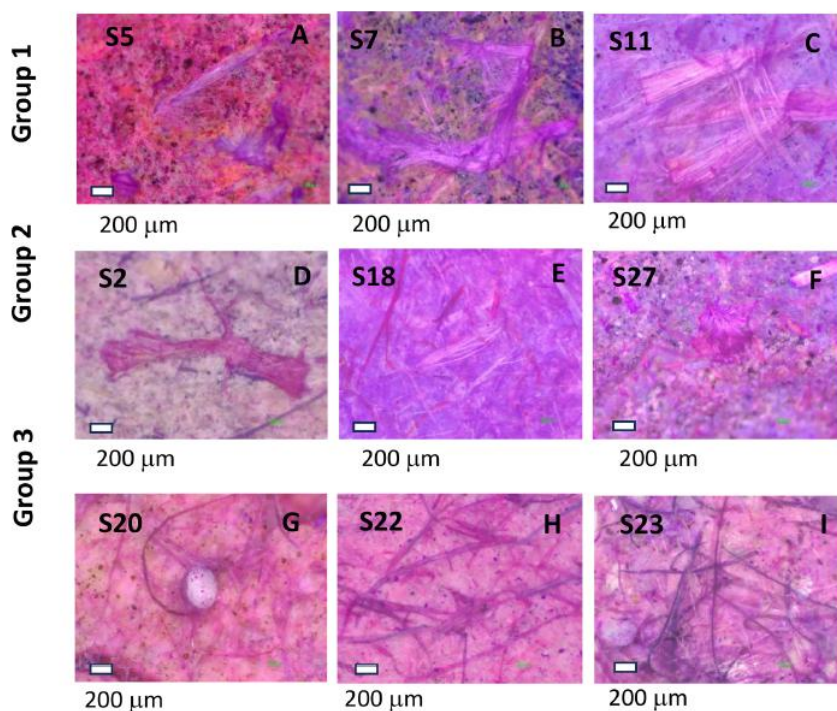


図7(成果2からの引用). MBとRED-3で染色した廃棄建材の顕微画像(x 50)
Group1、石綿のみを含む建材(A, B, C); Group 2、石綿と非石綿繊維物を含む建材(D, E, F); Group 3、非石綿繊維物のみを含む建材(G, H, I)。

b) クリソタイルとアモサイトの識別

クリソタイルはMBとRED-3を用いて染色されるが、アモサイトはポリリジンで建材表面を修飾後でMBとRED-3で染色することができた。試料52には、クリソタイルとアモサイトの両方を含んでいたため、クリソタイルとアモサイトとを色素染色によって識別できるかどうかを確認した。ポリリジンで染色後MBとRED-3で染色した。クリソタイルはMB添加後青に着色し、RED-3添加によって

赤紫に着色した。一方、アモサイトはMBでは染色されなかった。RED-3を加えると少し赤くなった。

⑥ 着色物質の偏光分析、X線分析、ラマンスペクトルによる同定

着色した物質が石綿であるかどうかを、偏光顕微鏡法、X線回折法、走査電子顕微鏡法、ラマン分光法で確認した。

a) 偏光顕微鏡法

石綿に偏光した光を照射すると偏光面の角度により石綿画像が出現したり消滅したりする。試料台を45°回転する度に石綿画像は出現・消滅を繰り返した。一方、赤色に着色した繊維状物質は、試料台の回転にかかわらずいつも画像に現れた。染色によって石綿と石綿以外の繊維状物質の区別を偏光顕微鏡法で確認できた。

b) X線回折による石綿の確認

図7に示したように、建材には、石綿のみを含有する建材、石綿と繊維状物質を含む建材及び繊維御物質のみを含む建材があることが色素染色法で示された。それを確認するために、同じ試料について建材表面のX線回折を行った。3種類の建材について測定したX線回折の結果を図8に示す。Group 1、2にはXRDパターンとして、クリソタイルの第1ピークと第2ピークのパターンがそれぞれ12.3°、24.5°に観測された。しかし、繊維状物質はXRDパターンを示さなかった。建材母材のXRDを観測した(図13-Group 3)。

アモサイトを含む廃棄建材にはクリソタイルも含まれていた(試料52, 62)。その試料のX線回折を測定し、組成を確認した。また、それぞれの建材母材の組成は、試料2は石膏、試料52、62はカルサイトであった。

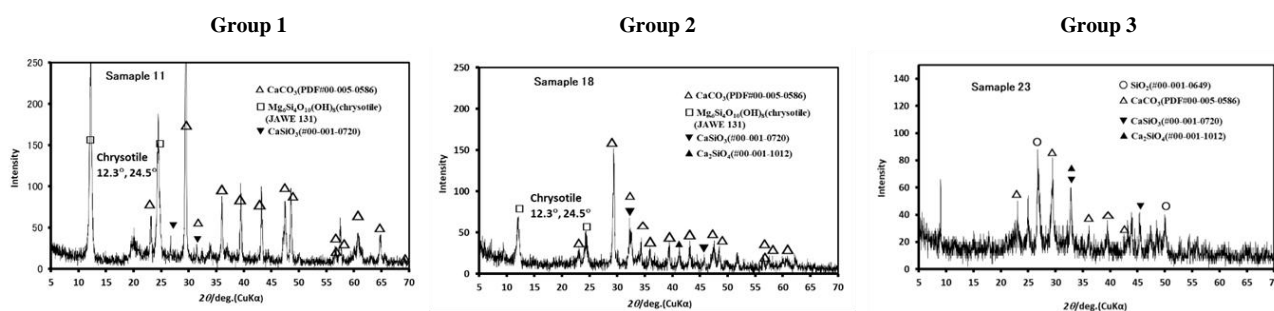


図8(成果2からの引用)。建材のXRDパターン

Group 1、クリソタイルを含有；Group2、クリソタイルと繊維状物質を含有；Group 3、繊維状物質をのみ含有。図11と比較。

c) SEM/EDSによる着諸物質の同定

走査型電子顕微鏡(SEM)およびエネルギー分散型分光法(EDS)で着色物質の同定を行った。その結果を図17に示す。図17のMBとRED-3で青紫に着色した物質(黄色の矢印)はクリソタイルである。湾曲しているので、顕微鏡の光で散乱し白く見えている。EDSより、黄色示した物質はクリソタイルの特徴であるMgおよび、Si、Oを含む。ピンクの矢印の物質は、Ca、OとCを含む炭酸塩である。

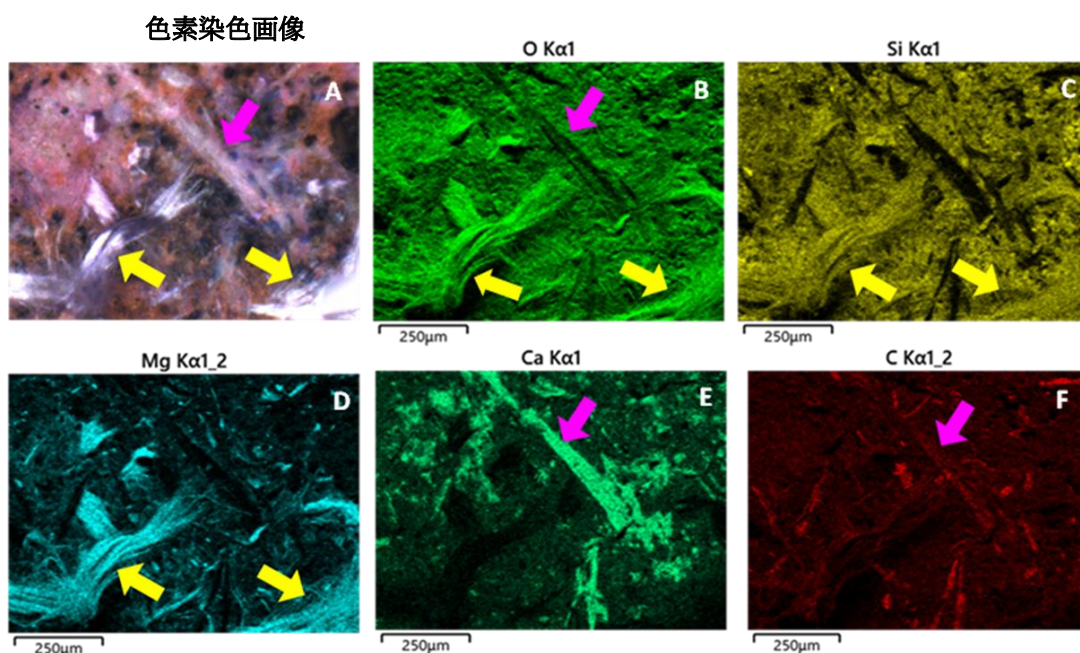


図9(成果2から引用)。 廃棄建材の色素染色画像とSEM/EDS画像
黄色の矢印の物質はクリソタイル、光散乱のために顕微鏡画像では白く反射している。ピンクは炭酸塩。

d) ラマンスペクトルによる石綿の確認

・廃棄建材中の石綿のラマンスペクトル

色素染色のよってクリソタイル及びアモサイトと推定された石綿のラマンスペクトルを測定した。色素が付着した物質のラマンスペクトル測定では、レーザ光で色素が焦げたりあるいは色素のラマンスペクトルが重なったりしたので、未染色の同一試料を用いて、色素染色時と類似の箇所のラマンスペクトルを測定した。その結果を図10に示す。試料80に含まれている石綿はクリソタイルであることが確認された。

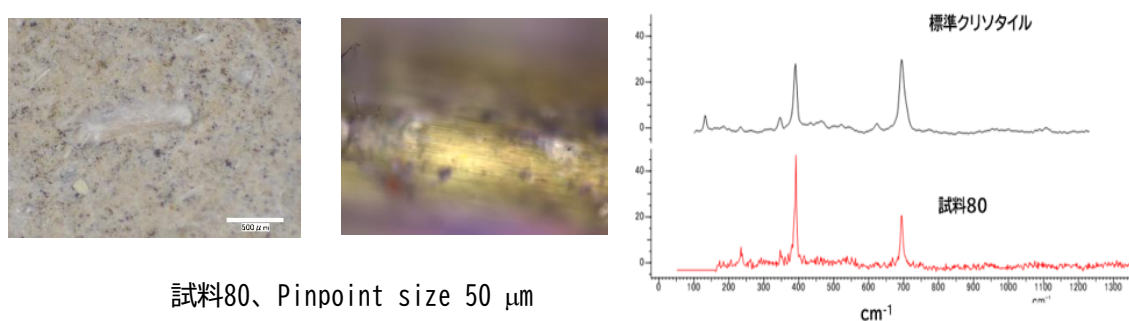


図10(成果7からの引用)。 廃棄建材中の石綿のラマンスペクトルによる帰属。 励起波長 785 nm

⑦ 建材中の石綿と他の繊維状物質との識別

a) 石綿と繊維状物質が混在した廃棄建材の染色とラマンスペクトル

建材には、石綿以外に繊維状物質が混入している。色素染色によって、石綿と繊維状物質が区別できるかどうかを確認した。染色しないと外観からは、石綿かそれ以外の繊維状物質かは区別が困難である。しかし、本法色素染色法では、石綿と他の繊維状物質とは識別が可能であった(図11)。石綿はMBで薄い青色に着色し、RED-3を添加すると赤紫に着色した。一方、セルロースやプラスチックは異なった色に着色もしくは染色されなかった。同様に、ガラス繊維、やロックウールも染色されなかった。建材中の

植物繊維はMBで他の繊維状物質とは著しく異なった色に着色された。色素染色によって3種の繊維状物質が廃棄建材中に確認された。着色よりAはクリソタイルと判定されたが、他の繊維状物質名は不明である。ラマンスペクトルを測定し物質の同定を行った。測定結果を図12に示す。着色した3種の繊維状物質はそれぞれ異なったラマンスペクトルを与えた。それぞれのラマンスペクトルは、Aはクリソタイル、Bは色素由来で帰属不能、Cはポリプロピレンと帰属された。建材素材のカルサイトも観測された。

b) 廃棄建材中のその他の繊維状物質の染色

廃棄建材中には石綿の代わりに繊維物質が使われている。能登半島地震地域の氷見市（富山県）で採取した災害廃棄建材（壁材）を、MBとRED-3で染色した結果を図13に示す。これらは、染色結果と形状を観ると石綿ではないようであるが、ラマンスペクトル測定から物質の同定を試みた。A、Bは同じ組成であるがCは別の物質であることが分かる。A、Bはラマンスペクトルよりポリエステルであった（図13）。壁材等にはセメントなどの素材間のつなぎ物質として石綿以外に繊維状物質が混合されている。しかも、それらの繊維は断熱や防音効果の役割もある。繊維状物質のなかでもっと効果的な物質が石綿である。石綿が混ざっていない建材はもろくて破碎しやすくなる。

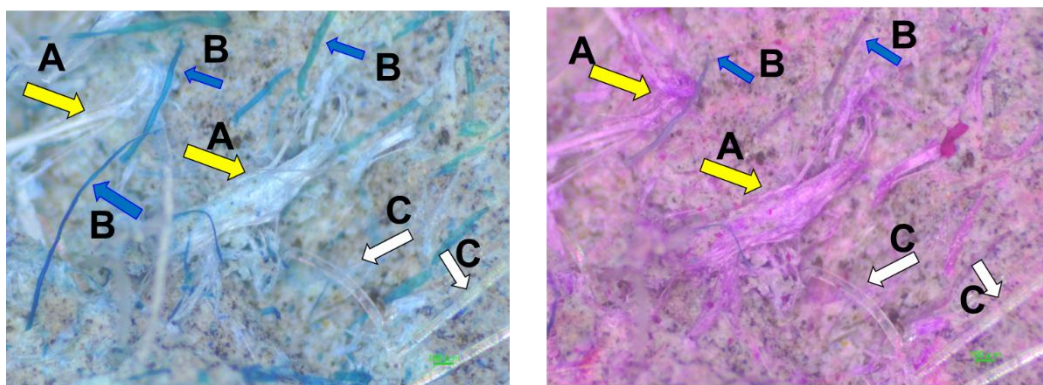


図11(成果7からの引用)。複数の繊維状物質が混在する建材

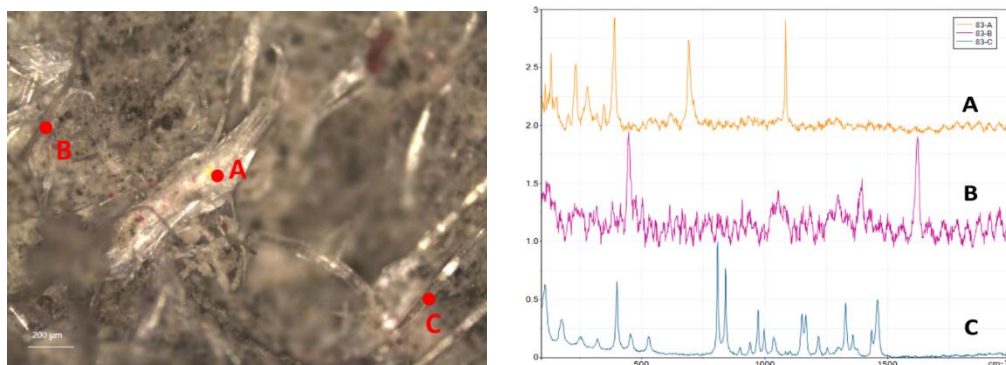
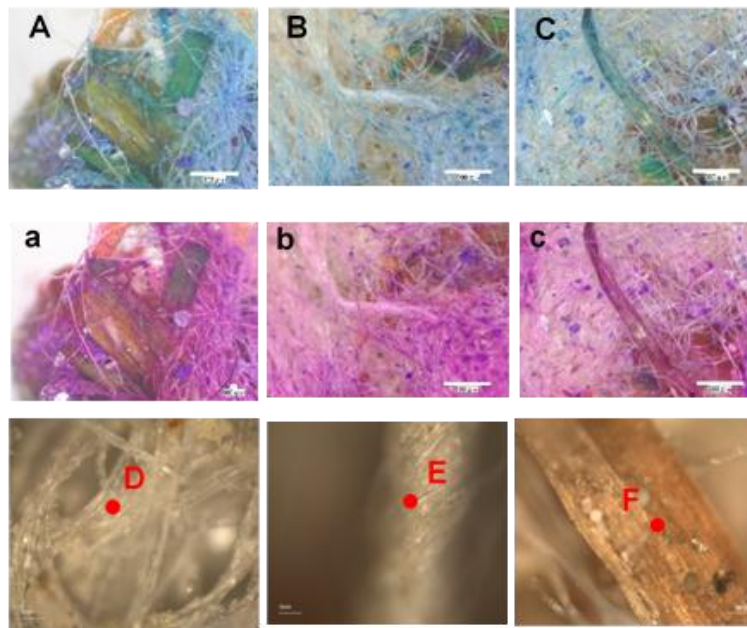


図12(成果7からの引用)。建材中の繊維状物質の測定点とラマンスペクトル
繊維状物質Aはクリソタイル、Bは不明、Cはポリプロピレン



Waste building-material, No. 108

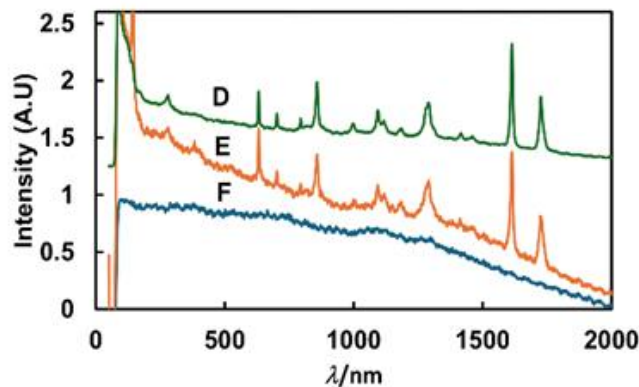


図13(成果7からの引用). 能登半島被災地で採取した廃棄建材中の繊維状物質のMBとRED-3による染色結果とラマンスペクトル

(A, B, C)はMBで染色、(a, b, c)は続いてRED-3で染色。繊維状物質、D, Eはポリエステル、Fは不明。

⑦ 着色した色素の安定性とその要因

多くの色素は光（自然光）で退色しやすいが、MBとRED-3で染色した建材付着色素は3ヶ月室内で放置しても退色しなかった。

a) 色素混合溶液の特性

着色色素の安定性の要因を調べるために、MBとRED-3の混合溶液を調製しその特性を調べた。図14に示すようにMB溶液とRED-3の混合溶液は、チンダル現象を示した。従って、その溶液のゼータ電位と動的光散乱を測定した。その結果、その溶液では二つの色素分子が会合・凝集し、電荷は-30 mV、大きさは152 nmのナノ粒子を生成していることが明らかになった（図14）。従って、ナノ粒子が石綿の表面に付着し、外側のRED-3の層が内側のMB層を覆い、光退色を防いでいると思われる。

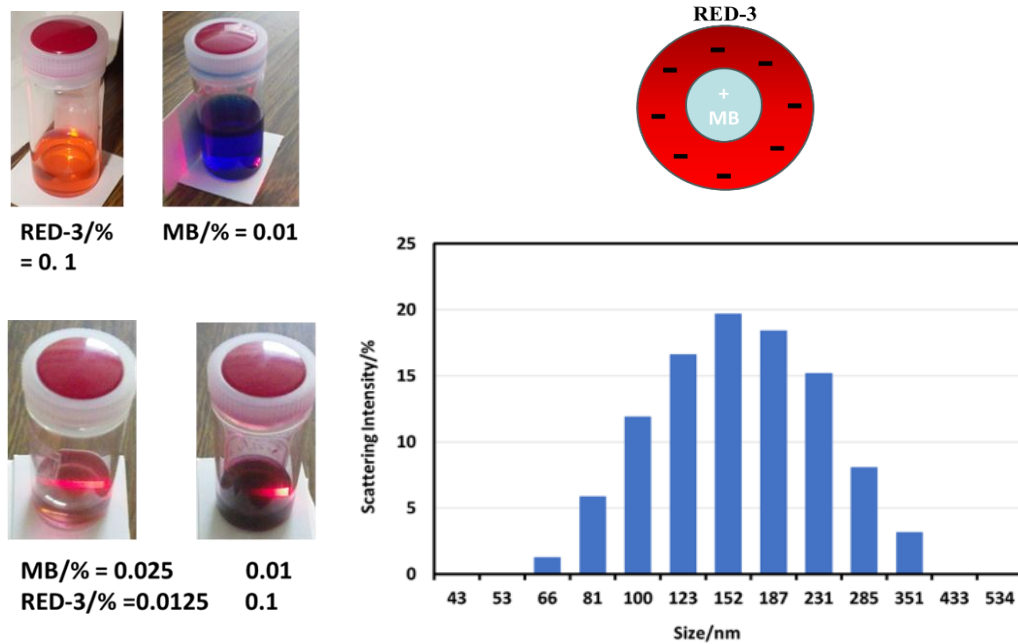


図14(成果2からの引用、一部修正). 色素混合液中のナノ粒子の生成

b) 混合色素による石綿の染色

MBとRED-3の混合溶液はナノ粒子を生成することが明らかになったので、二つの色素の混液を用いて建材表面の石綿を染色した。その結果を図29に示す。

溶液CがMB (0.01%)とRED-3 (0.1%)を含む混合溶液である。溶液Cに比べて、溶液AはMB、RED-3のそれぞれの濃度が2倍、溶液BはMBの濃度が2倍である。溶液D～溶液Fは、MB (0.01%)の濃度が一定でRED-3濃度が減少した混合溶液である。二つの溶液を別々に加えた画像Gと比較すると、A～Dまでは染色に大きな変化がなかった。即ち、混合色素溶液でも同じように石綿を検出できた。ただし、RED-3の濃度が薄いと石綿（クリソタイル）は明瞭に染色されなかった。混合溶液を用いて石綿の検出が可能であることが明らかになった。このことは、染色時間の短縮にもなる。検出結果が不明瞭である場合は、MB溶液とRED-3溶液をそれぞれ別々に加えて、それぞれにおける染色結果を比較するほうが、石綿検出は正確になる。

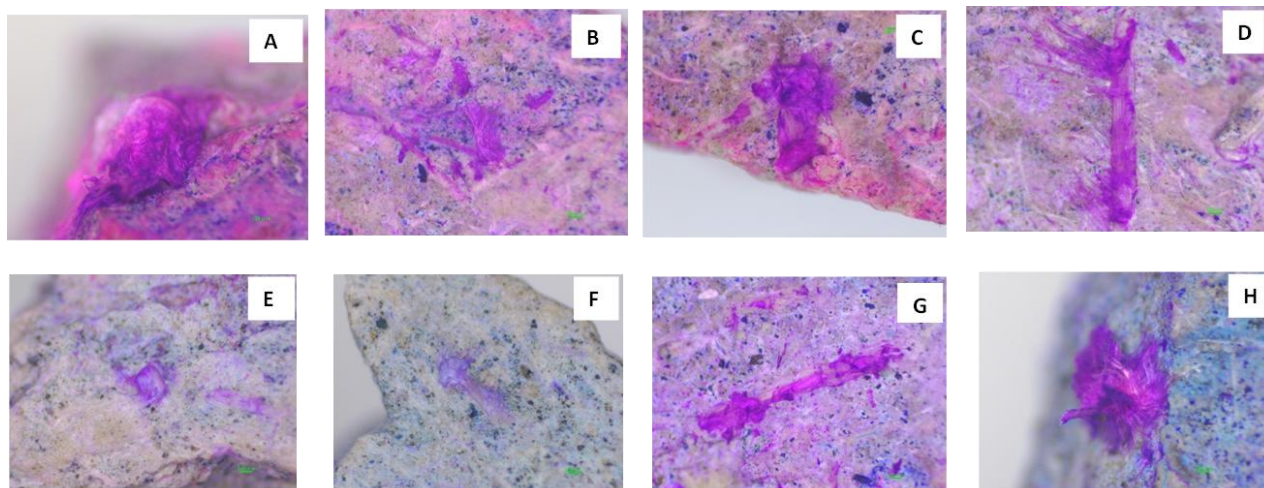


図15(成果2からの引用). MBとRED-3の混合溶液による廃棄建材の染色

A、MB = 0.02% + 0.2 % RED-3; B、MB = 0.02% + 0.1% RED-3; C、MB = 0.01% + RED-3 = 0.1%; D、MB = 0.01%, RED-3 = 0.05%; E、MB = 0.01% + RED-3 = 0.025%; F、MB = 0.01% + RED = 0.0125%. G とH はMB (0.01%)と RED-3 (0.1%)の溶液を別々に添加した。HはRED-3(0.01%)を最初に加えた。

⑧ 色素染色法による石綿の検出結果とXRD及び公定分析法との比較

採取試料の石綿検出結果をX線回折による石綿検出結果および公定分析法の結果と比較した。X線回折法は、試料を粉砕せずに試料面を直接測定した。また、公定分析には高度な専門技術と資格が必要であるので、民間の分析会社に依頼した。また、分析費用が高価（8万円/検体）であったので、採取試料178件のうち38検体を選別し分析を依頼した。その分析結果を表1, 2に示す。

表1(成果2からの引用). 廃棄建材の染色法による石綿検出とXRDおよび公定分析法との比較

No.	Samples	Staining method	XRD	Official Method /%	No.	Samples	Staining method	XRD	Official Method /%
1	Wall in use	◎	○		18	Board at demolition site	◎, △	○	
2	Board at flood site	○, △	○, ●	8.4	19	Board at demolition site	○	○	3.5
3A	Board at flood site	△	X	x	20	Board at demolition site	○, △	○	2.7
4	Wall in use	◎	○		21	Celling at demolition site	X	X	
5	Wall of a hut	◎	○		22	Board at flood site	△	X	
6	Roof at demolition site	○	○		23	Wall at disaster site	△	X	x
7	Roof at demolition site	◎	○	6.1	24	Board at demolition site	△	X	x
8	Roof at demolition site	○	○		25	Cover of electric furnace	X	X	
9	Roof in Sri Lanka	◎	○		25_P	p-Tile at demolition site	○	○	
10	Wall in Sri Lanka	◎	○		26	Board at demolition site	○, △	X	2.8
11	Slate at earthquake site	◎	○		27	Board at demolition site	○, △	○	
12	Board at earthquake site	○	○	1.8	28	Board at demolition site	◎, △	○	
13	p-Tile at demolition site	○	○		29	Board at demolition site	○, △	○	
14	Roof, slate in use	◎	○		30	p-tile at demolition site	○, △	○	1.2
15	Wall of electronic furnace	◎	○		31	Cover of electronic furnace 1	X	X	
16	Board at Tsunami site	◎	○		32	Cover of electronic furnace 4	X	X	
17	Board at demolition site	○, △	○		33	Cover of electronic furnace 5	X	X	

Staining method detected asbestos strongly (◎) and normally (○), and organic fibrous compounds (△), and did not detect anything (x). XRD detected chrysotile (○) and amosite (●), and did not detected asbestos (X).

色素染色法における記号はつぎのことを示す。◎、石綿が多数検出された；○、石綿（クリソタイル）が検出された；●、石綿（アモサイト）が検出された；△、石綿以外の繊維状物質が検出された；X、ガラス繊維など非着色物質であった。XRD測定結果においては、○、石綿の回折パターンが観測された；X、石綿は観測されなかった。6 検体については、XRDでは石綿が未検出であり、色素染色法では検出された。公定分析法と比較すると、そのうち4検定は石綿が含まれていた（2検体は公定分析なし）。即ち、色素検出法の結果は

公定法と一致した。色素検出法とXRD測定の結果との不一致の試料には繊維状物質が多数含まれており、XRD測定の強度が弱く、ノイズが多く、石綿の検出精度が低かったためであると考えられる。

表2(成果7からの引用). 廃棄建材の染色法による石綿検出とXRDおよび公定分析法との比較

No.	Samples	Dyeing method ^{a)}	XRD ^{b)}	Official method/% (asbestos)	No.	Samples	Dyeing method ^{a)}	XRD ^{b)}	Official method/% (asbestos)
34	Wall plate at demolition site	△	X		50	Board C at a driving school	○, △	○	
35	Wall plate at demolition site	○, △	○	4.8 (chrysotile)	51	Board A in front of hut	◎, △	○	
36	Calcium carbonate plate	○, △	○		52	Board B in front of hut	◎, △, ●	●	4.0 (chrysotile)
37	Calcium carbonate plate	○	○	7.2 (chrysotile)					10.3 (amosite)
38	Ceiling panel, glass wool	△	X		53	Board C in front of hut	◎, △	○	
39	Calcium carbonate plate	△	X		54	Board D in front of hut	◎, △	○	
40	Calcium carbonate plate	○, △	○		55	Board A at the site of old refining proce	○, △	○	
41	Calcium carbonate plate	○	○	11.9 (chrysotile)	56	Board B at the site of old refining proce	○, △	○	
42	Calcium carbonate plate	○, △	○	10.4 (chrysotile)	57	Board A at demolition site 1	○, △	○	
43	Ceiling panel	◎, △	○		58	Board B at demolition site 1	○, △	○	
44	Cotton-like substance at parking	X	X		59	Board A at demolition site 2	○, △	○	8.6 (chrysotile)
45	Board at demolition site	○, △	○	11.8 (chrysotile)	60	Board B at demolition site 2	○, △	○	17.0(chrysotile)
46	Board A at demolition site	◎, △	○		61	Calcium carbonate plate at building 2	○, △	○	
47	Board B at demolition site	○, △	○		62	Calcium carbonate plate at building 3	○, △, ●	●	2.3 (chrysotile)
48	Board A at driving school	◎, △	○						9.5 (amosite)
49	Board B at driving school	○, △	○		63	Rock wool at building 3	△	X	0

a) The symbols (◎, ○, X) indicate strong detection, normal detection, and no detection of asbestos by the dyeing method, respectively. The symbols ● and △ indicate the detection of amosite and non-asbestos fibrous materials, respectively.

b) The symbols (○, ●, X) in XRD indicate the detection of chrysotile, amosite, and no detection of asbestos, respectively.

⑨ 建材表面積における石綿占有率と公定分析法との比較

建材小片の表面の石綿占有率を解析ソフト（WineRoof）で求め、公定分析の定量値と比較した。建材の表面積と石綿分布画像より建材の表面積割合を求めた。石綿占有率を表3に示す。石綿占有率は石綿濃度に比例し、ほぼ近い値となった。これは、建材（スレート）のX線3CT測定結果が示すように、石綿は建材表面に分布しているためである。

表3. (成果2からの引用) 廃棄建材の石綿表面占有率と公定分析法による石綿濃度(%)との比較

試料番号	試料名	色素染色法による検出	表面積率	公定法濃度(%)	石綿の種類
2	ボード、災害仮置き場	○、△	5	4.1	クリソタイル
3	屋根、コロニアル	◎	8.2	8	クリソタイル
5	板、ケイカル	◎	7.8	8.1	クリソタイル
7	泥付き屋根	○	6.5	6.1	クリソタイル
12	ボード、災害地	○	3.7	1.8	クリソタイル
13	p-タイル	○	4.4	3.8	クリソタイル
20	家屋解体廃棄物	○	3.1	2.7	クリソタイル
23	外壁材	△	0	0	非石綿繊維状物
24	ボード（家屋解体）	△	0	0	非石綿繊維状物

◎、○は石綿検出の程度を示す。◎は多く、○は普通。△は繊維状物質の検出を示す。

⑩ 災害現場および解体前の建物での石綿検出

能登半島の災害地の仮置き場（氷見市、輪島市）と市街地（七尾市、輪島市朝市通り）で試料を採取して、色素染色法で石綿含有の有無を調べた。災害地や解体現場で、建材表面の色素染色によって石綿の有無を決定することができた。

以上の結果より、色素染色による石綿検出は、建材表面を染色し、顕微鏡で観察するだけで高感度に石綿を検出できる分析法である。検出された石綿は、SEM/EDS, XRD, ラマンによって確認され、混入する繊維状物質も染色の違いと形状から石綿との識別も容易であった。専門的知識や技術を必要としないので、現場での分析に適しており、分析器具・薬品は低コストである。

(2) サブテーマ2「染色前後の建材表面の石綿と素材の微細構造解析と染色機構解明」

・クリソタイル標準試料の基礎的物性の評価と色素染色挙動

6種のアスベストの中でもクリソタイルは世界で使われたアスベストの9割以上を占めるとされており、クリソタイルの検出方法の確立は重要である。本研究課題申請時、クリソタイルと赤色3号（エリスロシンイオン）（図2）とが静電的な相互作用で結合することによって複合体が形成されることでクリソタイルが赤紫色に染色されていると推定していたが、明確な証拠はなく、また、どれぐらいの量の赤色3号がクリソタイルに結合しているかも不明であった。我々が提案する方法、すなわち、廃棄建材表面の色素染色によるアスベストの迅速検出法を実用化するためには、アスベストと色素との反応を定性・定量的に明らかにし、反応機構を明確にすることで、我々が提案する方法の信頼性を高めることが重要である。そこで、はじめに、クリソタイルの標準試料と赤色3号との反応を定性・定量的に調べ、反応機構を解明することを目的とした。

クリソタイルとして（公社）日本作業環境測定協会のJAWE131標準試料を用いた。なお、このJAWE131標準試料は、短繊維クリソタイルを95%以上含み、夾雑物としてブルーサイト($\text{Mg}(\text{OH})_2$)、石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)、磁鉄鉱(Fe_3O_4)をそれぞれ1%以下含むとされている。0.1 wt% の赤色3号水溶液100 mlにクリソタイル標準試料100 mgを加え、数分間超音波分散を行った後に、ウォーターバス中で30℃で3時間保持した。その後、混合溶液を遠心分離機を用いて固液分離して、液相を捨てた後に固相に蒸留水を加えて固相を蒸留水中によく分散させるという一連の操作を繰り返すことにより、固相を洗浄した。最終的に得られた固相を真空乾燥して、染色されたクリソタイル/赤色3号複合体の粉末を得た。

本研究におけるクリソタイルと赤色3号水溶液との反応条件では、反応後の遠心分離により得られた液相は反応前とほとんど変わらない赤色であり、クリソタイルに対して赤色3号が大過剰に加えられていたことがわかった。白色のクリソタイル（図16a挿入図）と赤色のエリスロシンとの複合反応により、赤紫色のクリソタイル/エリスロシン複合体粒子（図42b挿入図）が得られた。図16aの背景を黒色としたクリソタイルのデジタルマイクロスコープ像では白色の綿状のクリソタイルの塊や繊維状のクリソタイルの集合体が観察された。一方、図16bの背景を白色としたクリソタイル/エリスロシン複合体のデジタルマイクロスコープ像では、すべての粒子が赤紫色であり、すべてのクリソタイルがエリスロシンとの複合化で赤紫色に染色されたことが分かった。

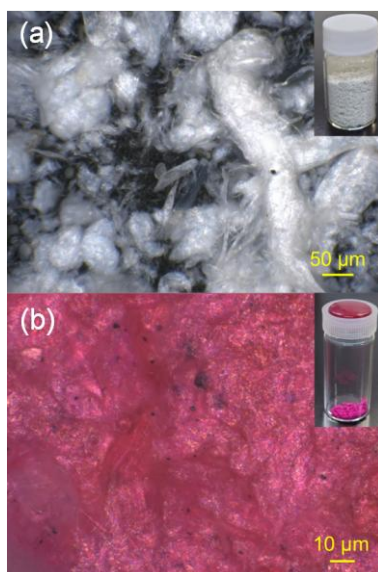


図16 クリソタイル(a)とクリソタイル/赤色3号複合体(b)のデジタルマイクロスコープ像とデジタルカメラ写真（挿入図）

クリソタイル及びクリソタイル/赤色3号複合体のSTEM観察の結果を図43に示す。いずれの像でもクリソタイルに特有の多数の繊維状の粒子が観察された。また、クリソタイル特有の中空構造も観察された。クリソタイル/赤色3号複合体においても、クリソタイルと同様な多数の中空繊維状粒子が観察され、赤色3号との複合反応後でも反応前の繊維状形態が保持されていることがわかった。また、本研究における観察の倍率では、複合反応後でもエリスロシンの結合による繊維の径（幅）の増加は認められず、赤色3号のみの塊状の粒子は全く観察されなかった。

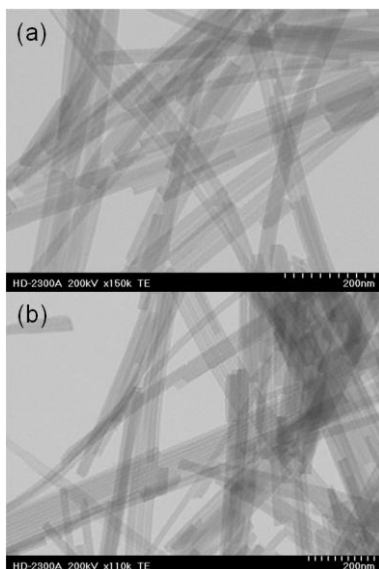


図17 クリソタイル(a)とクリソタイル/赤色3号複合体(b)のTEM像

次に、これらの像（視野）のEDSスペクトルを図17に、定性及び定量の結果を表1に示す。クリソタイルでは、クリソタイル ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) に起因すると考えられる多量のMg、Si、Oが検出された。クリソタイル/赤色3号複合体においても、クリソタイルに起因する多量のMg、Si、Oが観測されるとともに、ごく少量のCとIが観測された。これらのCとIは赤色3号に起因すると考えられる。図18のEDSスペクトルにおいても、クリソタイルではIは全く検出されなかったのに対して、クリソタイル/赤色3号複合体では強度は小さいものの明確にIが検出された(図18挿入図)。これらの定性・定量分析結果(表7)をもとに、Mgを基準としてクリソタイル($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)に対する赤色3号の結合量を計算すると、クリソタイル1 molに対して赤色3号が0.0061 molが結合していることがわかった。(なお、CはSTEM観察に用いたマイクログリッドの支持膜にも用いられているため、計算には用いなかった。)

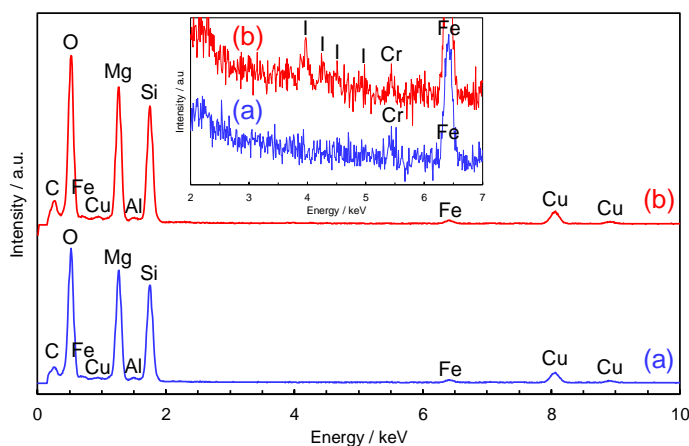


図18 クリソタイル(a)とクリソタイル/赤色3号複合体(b)のEDSスペクトル（挿入図は2 keV～7 keVのエネルギー範囲での拡大図）

表4 図17の像におけるクリソタイルとクリソタイル/赤色3号複合体の定性及び定量分析結果

element	chrysotile (At %)	chrysotile/erythrosine composite (At %)
C	11.20	12.93
O	45.28	45.56
Mg	22.02	20.96
Al	0.26	0.34
Si	18.47	17.31
Fe	0.50	0.51
Cu	2.27	2.22
I	-	0.17

図19にクリソタイル/赤色3号複合体の元素マッピング像を示す。Mg、Si、Oの像では、Mg、Si、Oが明確に繊維状粒子がある位置に検出され、これらの繊維状粒子のほとんどがクリソタイルであることがわかる。Cの像でも、Mg、Si、Oの像と同様に、繊維状粒子の位置にCが検出された。しかし、ごく一部の繊維状粒子においてMgとSiとOが検出されずにCだけが検出され、この繊維状粒子は観察時に用いたマイクログリッドの高分子膜に由来すると考えられる。Iは定量分析の結果でも検出量が少なかったためか、繊維状粒子の位置にかろうじて検出された。以上の結果より、クリソタイルの表面に均一に薄くエリスロシンが分布していることがわかった。

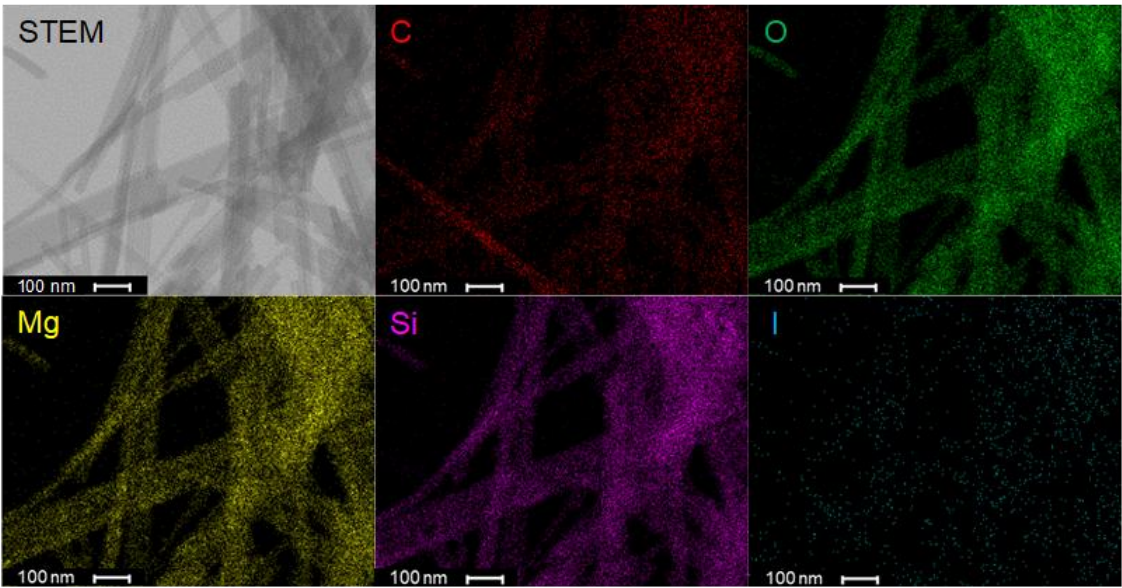


図19 クリソタイル/エリスロシン複合体の元素マッピング像

クリソタイル、赤色3号、クリソタイル/赤色3号複合体のFT-IRスペクトルを図20に示す。クリソタイルのFT-IRスペクトルは、 3688 cm^{-1} と 3646 cm^{-1} 付近のピークはOH基の伸縮振動に、 1078 cm^{-1} と 1022 cm^{-1} と 961 cm^{-1} 付近のピークは SiO_4 四面体の振動に、 611 cm^{-1} と 438 cm^{-1} 付近のピークはOH基と SiO_4 四面体の変角振動に帰属される。また、エリスロシンのFT-IRスペクトルは、 1602 cm^{-1} 、 1541 cm^{-1} 、 1455 cm^{-1} の吸収帯はベンゼン環の伸縮振動に、 963 cm^{-1} の吸収帯はC=C-Hの官能基に帰属される。クリソタイル/赤色3号複合体のFT-IRスペクトルの形状は、クリソタイルのスペクトルと赤色3号のスペクトルを合わせたようなものとなっており、それぞれの構造が大きく変化することなく複合化していることがわかった。

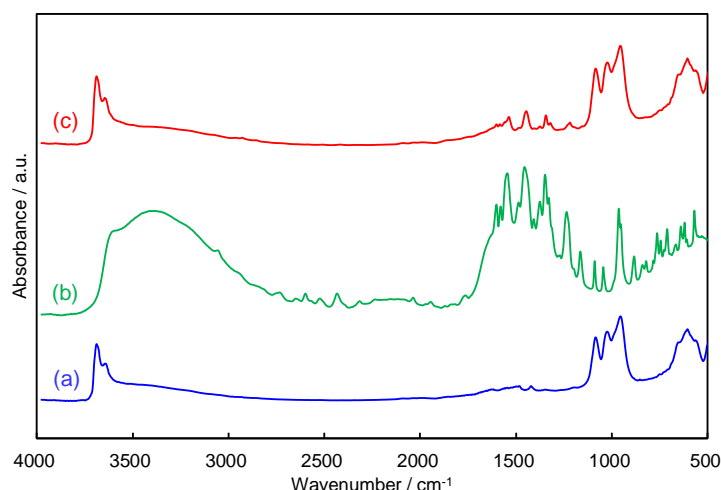


図20 クリソタイル(a)と赤色3号(b)とクリソタイル/赤色3号複合体(c)のFT-IRスペクトル

図21にクリソタイルとクリソタイル/赤色3号複合体のTG-DTAの結果を示す。約300～450℃ぐらいに見られるわずかな吸熱を伴うわずかな重量減少は、夾雑物として含まれているブルーサイト ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) からの脱水と考えられる。約500～670℃での大きな吸熱を伴う重量減少は蛇紋石（主としてクリソタイル）からの脱水であると考えられる。（なお、約500～555℃ぐらいまではリザルダイトからの脱水、約555～670℃での重量減少はクリソタイルからの脱水による重量減少であると考えられている。）さらに、約600～700℃での重量減少には夾雑物として含まれている CaCO_3 からの脱炭酸も含まれているとされている。約824℃に見られる質量変化を伴わない鋭い発熱ピークはエンスタタイトの結晶化によるものと考えられている。室温から900℃までの重量減少は14.0%であった。一方、クリソタイル/赤色3号複合体では、クリソタイルと同様な位置での重量減少や発熱・吸熱ピークとともに、クリソタイルでは観測されなかった約380～470℃の範囲での発熱を伴う大きな重量減少が観測され、これは主に赤色3号の燃焼脱離に起因すると考えられる。なお、室温から900℃までの重量減少は15.6%であった。これらの考察をもとにクリソタイルへの赤色3号の結合量を計算したところ、クリソタイル1 molに対して赤色3号分子が0.0081 molが結合していることがわかった。この値は、先述のEDS-STEM分析の結果から得られた結果、すなわち、クリソタイルに1 molに対して赤色3号分子は0.0061 molが結合しているという結果とまずまず一致していた。また、クリソタイルの窒素吸脱着等温線測定の結果を図7に示す。吸着等温線からBET法により解析して得られた比表面積は $48.9 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ であった。また、BJH法により解析して得られた細孔径分布測定（図22挿入図）では、ナノチューブ構造を有するクリソタイルのチューブの内径に起因すると思われる約7 nmの細孔が観測された。また、細孔径分布は幅広いものとなっていたが、これは繊維状粒子間の間隙に起因すると考えられる。比表面積をもとにしてアスベスト表面の 1 nm^2 当たりのエリスロシンの結合個数を計算すると、EDS分析の結果から導出された値は0.27個、TG-DTAの結果から導出された値は0.36個となり、これらの結果より、エリスロシンはクリソタイルの表面におおよそ単分子層を形成していると考えられる。

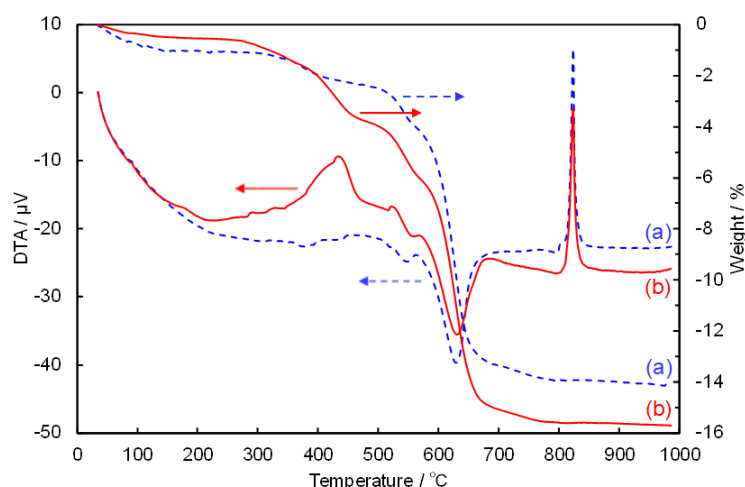


図21 クリソタイル(a)とクリソタイル/赤色3号複合体(b)のTG-DTA曲線

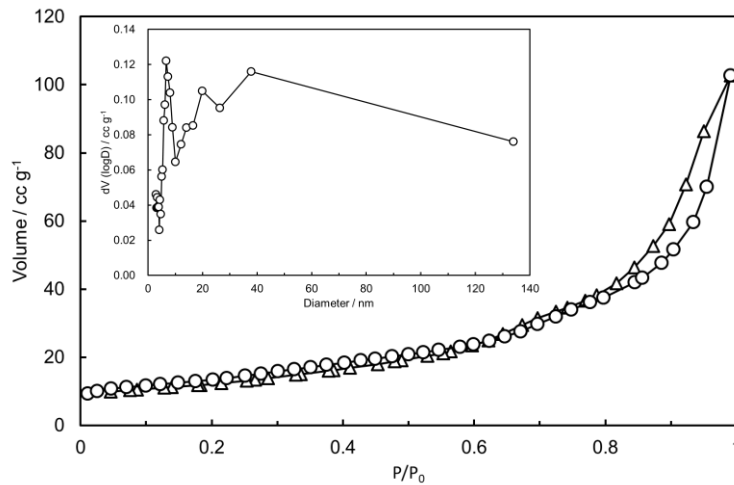


図48 クリソタイルの窒素吸着脱着等温線と細孔径分布（挿入図）

（2）サブテーマ3 「染色後の建材表面の画像解析による石綿検出法の開発」

サブテーマ3では、染色処理が施された建材表面の顕微鏡画像から石綿を自動的に検出するための画像解析手法を開発した。具体的には、Dyadic Wavelet Transform (DYWT)、Dyadic Wavelet Packet Transform (DYWPT)、Empirical Wavelet Transform (EWT) の3種類の周波数解析手法を用いて特徴を抽出し、Support Vector Machine (SVM) などの機械学習モデルにより分類を行うことで、高精度な石綿検出を実現した。特に、EWTに基づくアプローチでは分類精度が顕著に向上し、ROC曲線やF1スコアにおいても高い性能を示した。さらに、研究成果を基に、GUIを備えた分類支援ツールをPython環境上で試作し、Web経由でも利用可能な形で試行的にデプロイを行った。3年間の研究結果を以下に示す。

【令和4年度】

建材中の石綿検出においては、まず色情報の前処理として、成果4においてRGB画像をCIE Lab色空間に変換し、a*成分（赤緑軸）を利用して赤色染色領域の強調を行った。成果5ではRGB画像をYIQ色空間に変換し、Y（輝度）、I（橙）、Q（紫）の各チャネルから統計的特徴量を抽出し、色成分に関する定量的な特徴を得た（図23）。これにより、構造と色彩の両面から石綿の検出に有効な前処理を施すことができた。

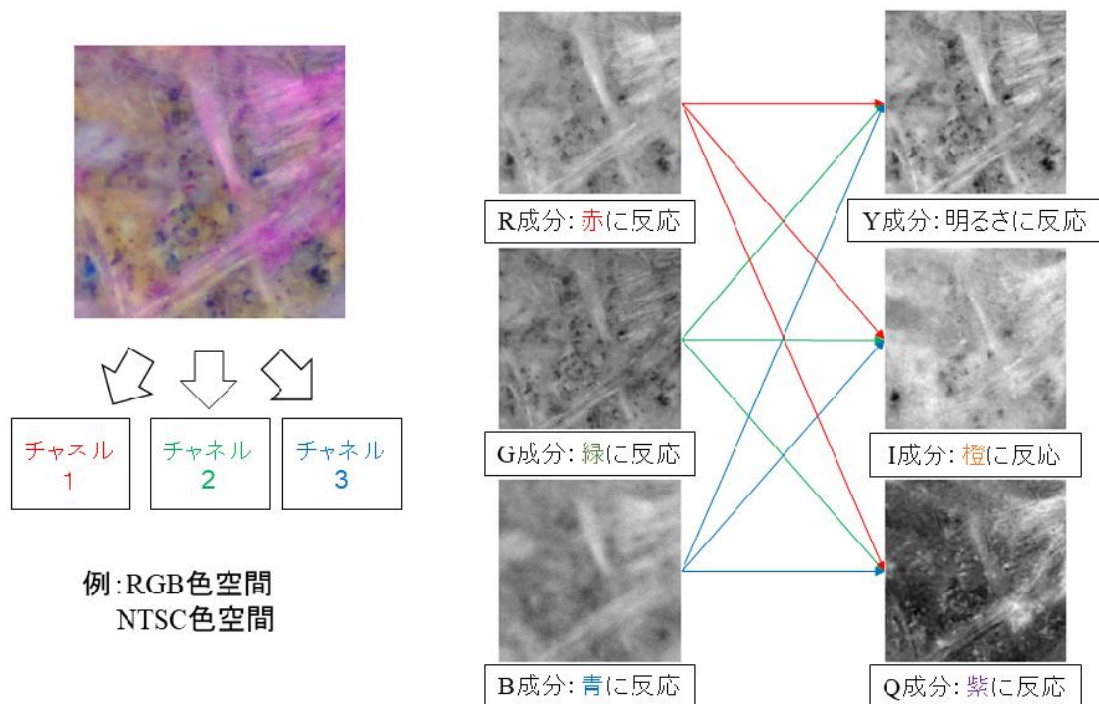


図23：RGB色空間からNTSC色空間（YIQ色空間）への変換

その後、線状構造の特徴抽出を目的として、Dyadic Wavelet Transform (DYWT) を適用し、高周波成分からのエッジ情報を強調した（成果4、図24、図25）。

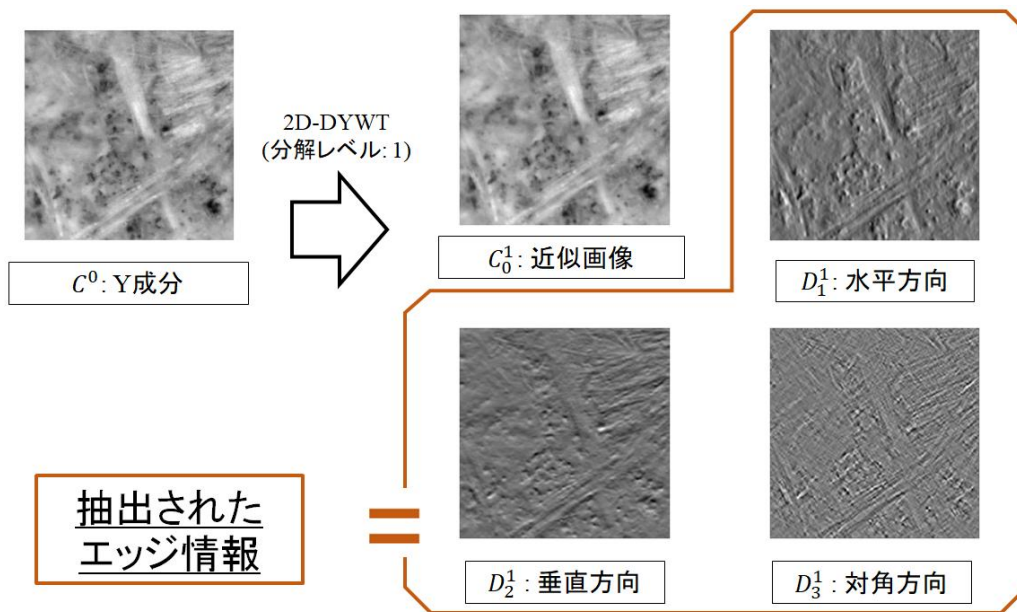


図24：Y成分にDYWTを適用した例

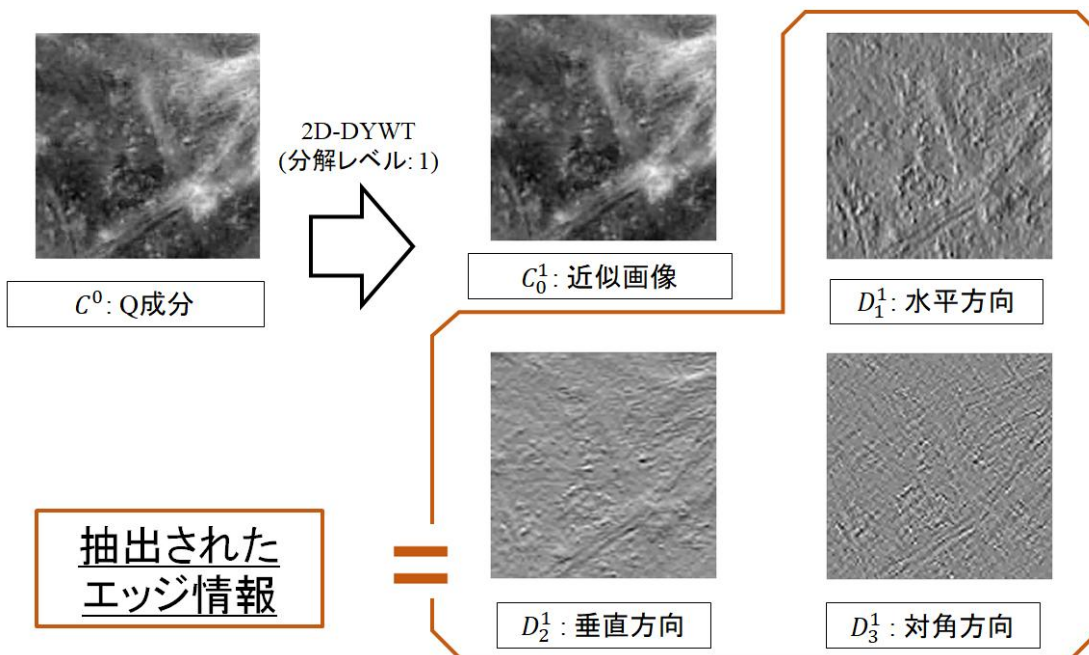


図25：Q成分にDYWTを適用した例

さらに、より多段階の周波数分解を可能とするDyadic Wavelet Packet Transform (DYWPT) を用い、局所構造を捉えるHessian行列に基づく固有値解析と組み合わせることで、石綿特有の繊維構造をより明瞭に捉える特徴抽出手法を開発した（成果4、図26、図27、図28）。

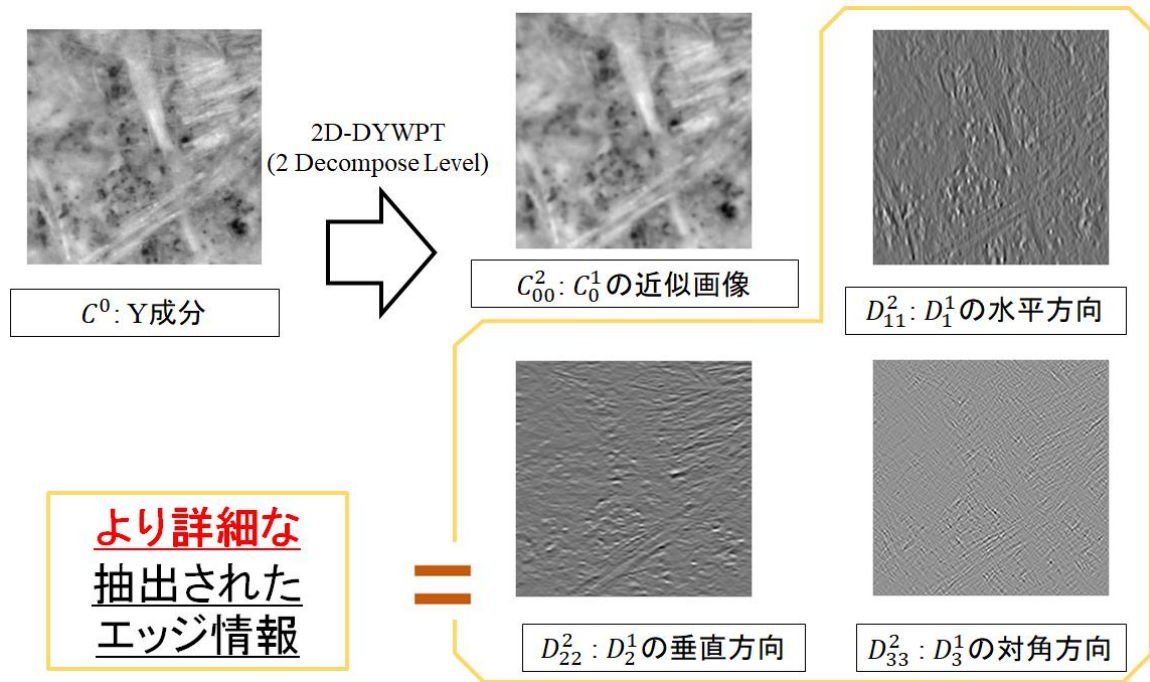


図26：Y成分にDYWPTを適用した例

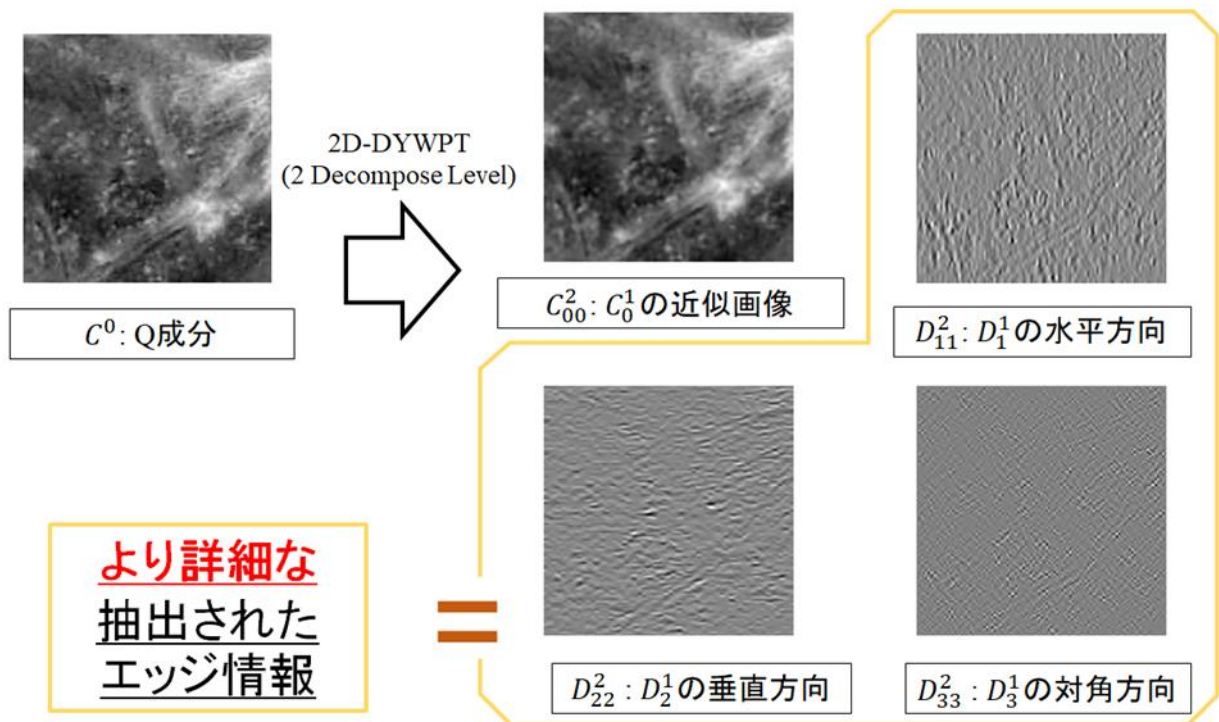


図27：Y成分にDYWPTを適用した例

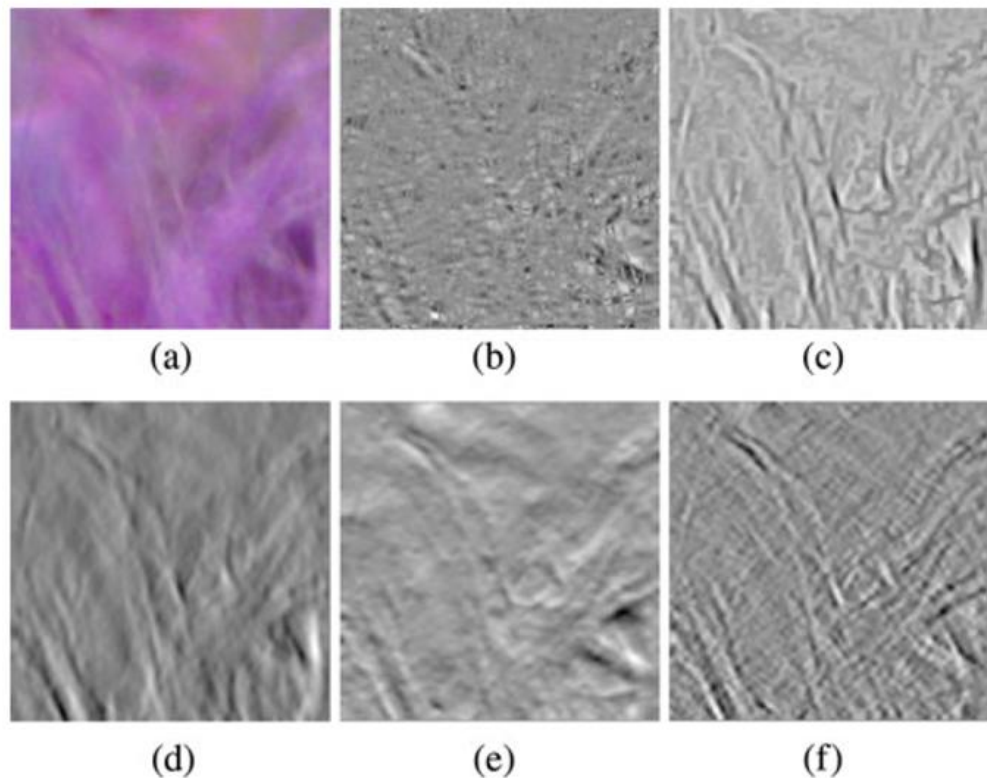


図28：Hessian行列の固有値解析により石綿特有の繊維構造を明瞭にした画像例. (a)が現画像、(b)～(f)が変換後の画像例

得られた特徴量を用いて、Support Vector Machine (SVM) による分類を行い、90%以上の分類精度を達成した（成果5）。当初計画に含まれていた離散ウェーブレット変換（DWT）については、比較検討の結果、DYWTおよびDYWPTの方が分類性能において優れていると判断されたため採用を見送った。また、機械学習手法については、特徴量の解釈性と分類精度のバランスを重視し、CNNではなくSVMを主たる分類器として用いた。

【令和5年度】

Empirical Wavelet Transform (EWT) を導入し、画像のスペクトル構造に応じた適応的なフィルタ設計を実現することで、石綿の構造的特徴をより効果的に抽出可能な処理を開発した（成果6）。とくに2D-EWTによる高周波成分の多段階分解により、分類に有効な特徴抽出能力が向上した（図29）。

画像内の特徴的な模様を抽出するフィルタを自動で作成

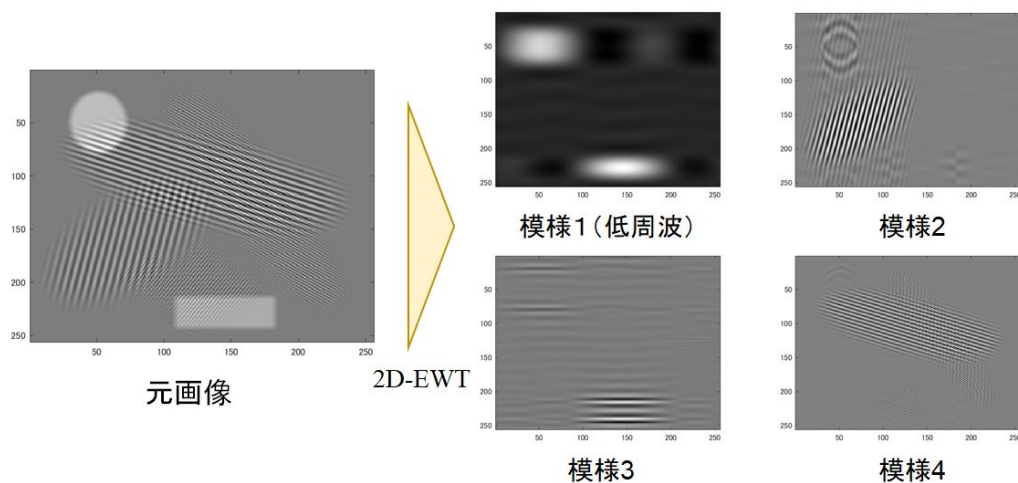
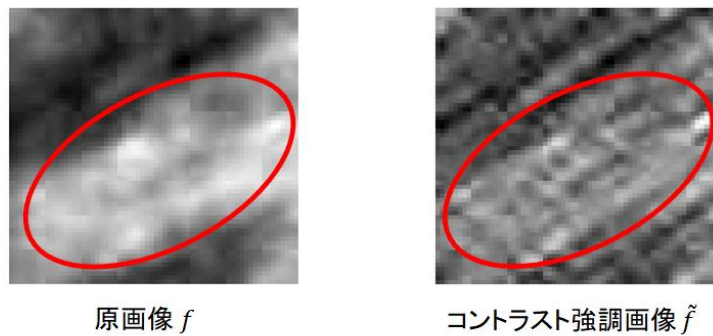


図29：2D-EWT（2次元EWT）の例

色情報の抽出に関しては、M2およびM3においてRGB色空間からYIQ色空間への変換を行い、Y（輝度）、I（橙）、Q（紫）の各チャネルに対して統計的特徴量を抽出した。これにより、構造的特徴と色的特徴を組み合わせた高精度な分類が可能となった（成果6）。

さらに、スペクトルの振幅成分を制御することで石綿繊維を強調し、背景模様を相対的に抑制する処理を導入した（図30）。

アスベストの繊維形状を**強調**し、その他建材部の模様を**ぼかす**



アスベスト含有部だけが強調される

図30：繊維部を強調した画像

加えて、コントラスト強調処理を施し、濃淡ヒストグラム特徴量、GLCM（Gray Level Co-occurrence Matrix）、GLRLM（Gray Level Run Length Matrix）、濃淡エントロピーなどを組み合わせ、石綿の有無に関わる微細な情報を捉える42次元の特徴量ベクトルを構成した（図31）。

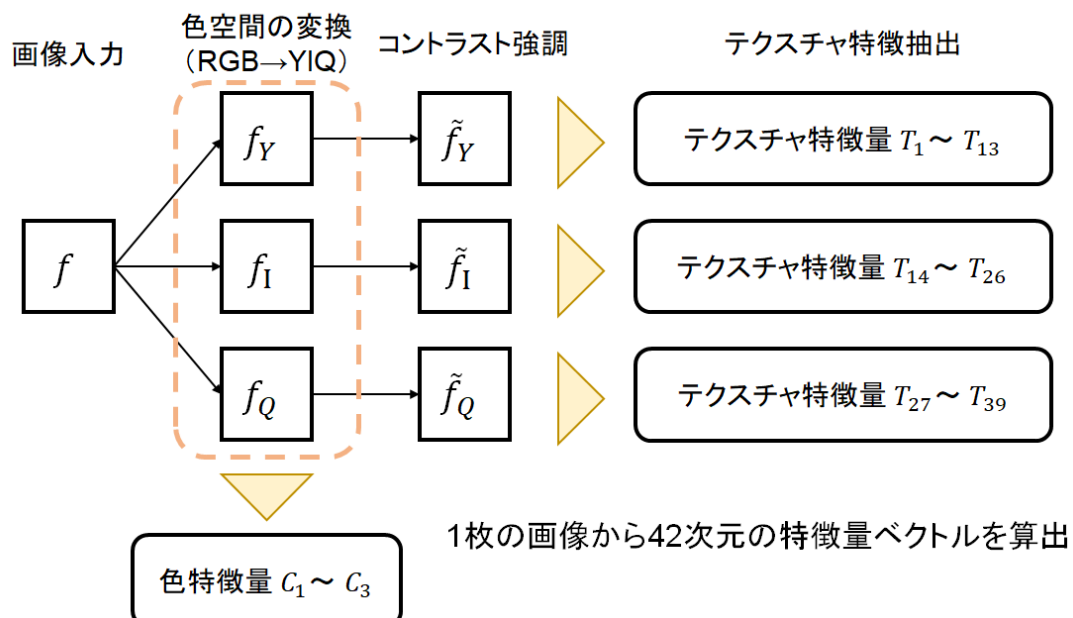


図31：特徴量抽出の流

このベクトルを用いてカーネルSVMによる分類を実行した結果、分類精度は99.5%、F1スコアは0.9955に達し、過去最高水準の性能を記録した（成果6、図32）。

ブロック画像(64 × 64 pixel)に対する提案手法の分類精度を確認

訓練:8084枚, テスト:2020枚(石綿:その他=1:1)

分類器と各評価値

	Accuracy	Recall	Specificity
Logistic Regression	0.9599	0.9528	0.9671
Decision Tree	0.9594	0.9587	0.9602
Naive Bayes	0.9114	0.9075	0.9153
Kernel SVM	0.9955	0.9970	0.9940

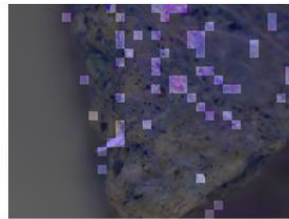
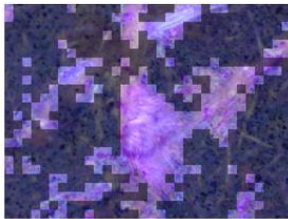
明: **アスベスト**と予測暗: **その他**と予測

図32: 分類結果

一方、当初計画に含まれていたフラクタル次元解析や位相的データ解析 (Topological Data Analysis: TDA) については、補助的手法として検討を行ったが、石綿の線状パターンを捉えるにはウェーブレット変換および統計的特徴量のほうが安定性と実装性の面で有利であると判断され、本研究では採用を見送った。

【令和6年度】

令和5年度に開発したアルゴリズムおよび特徴抽出手法を基に、Python環境において分類支援システムの実装と評価を行った(図33, 図34)。MATLAB環境における分類では Accuracy 99.5% を記録していたが、Python による再実装および Web アプリケーション化に伴い、運用環境や処理方式の違いにより、分類精度は約92%となった。

本システムは GUI を備えた分類支援ツールとして Web ブラウザ上で動作し、ユーザーが顕微鏡画像をアップロードすることで、自動的に特徴抽出と分類が行われ、石綿の存在確率が可視化される。これらの機能を統合したシステムは、試行的にデプロイされたプロトタイプとしてWeb経由で利用可能な段階にあることを確認した。専専門知識を持たない現場ユーザーでも操作可能なツールとして、実用的な応用展開が視野に入る段階に至った。

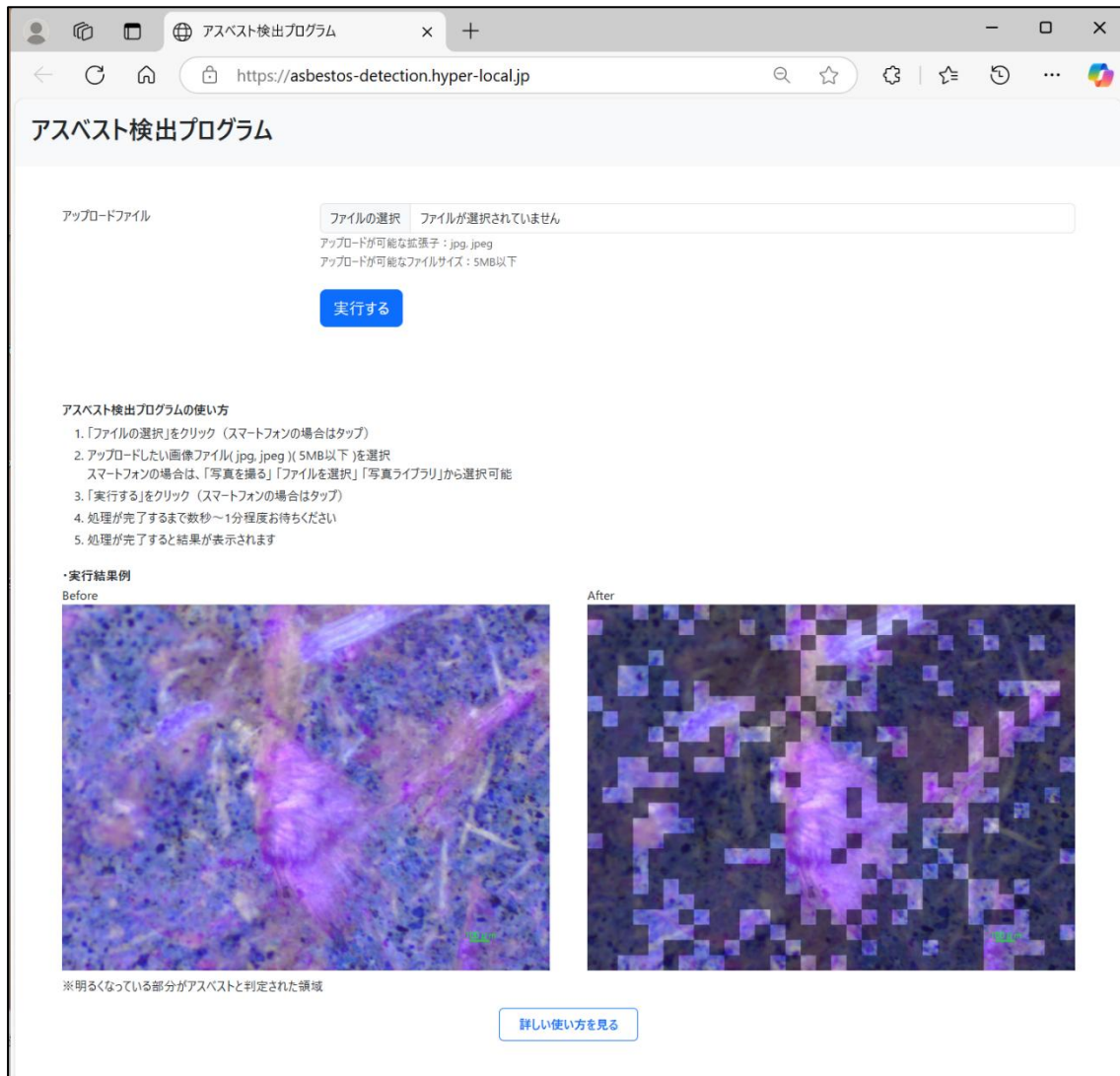


図33：アスベスト検出システム実行例（PC画面）

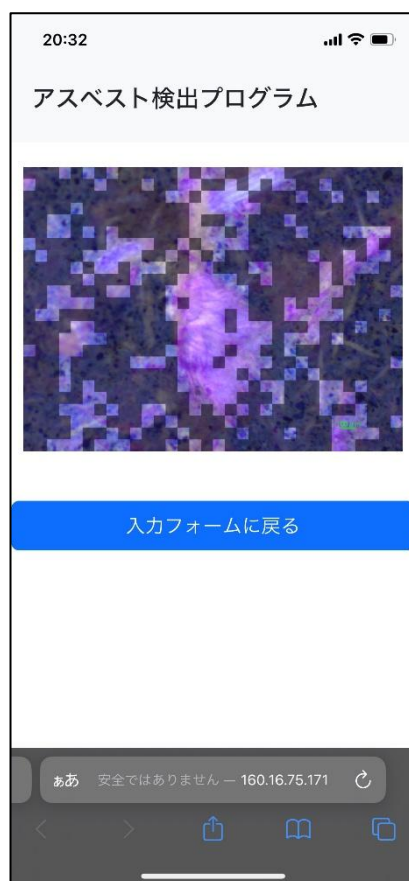


図34：アスベスト検出システム実行例（スマホ画

1. 5. 研究成果及び自己評価

1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

災害地や家屋解体現場で採取した廃棄建材の表面を色素染色するだけで簡単・明瞭に石綿を検出できる技術を確認した。サブテーマ1の研究成果は次の点において革新的・独創的な学術的意義と発展性を有する。

1) 廃棄建材のX線CTより石綿は建材表面に分布・濃縮されていることを突き止め、建材を粉碎せずに建材表面の色素染色によって石綿を実体顕微鏡で検出できた。

2) 石綿が電荷を有していることに着目して、2種の色素（陽イオン性色素と陰イオン性色素）を用いて、建材表面の石綿を色素で染色できた。

3) 公定分析法より簡単な分析手順で、石綿を高感度に明瞭に低倍率（x 50倍）で検出できた。公定分析法では試料を粉碎して分析するので、石綿は建材素材で希釈され、高倍率（x 400倍）の位相差顕微鏡で石綿有無が検査される。

4) 低コスト、迅速、簡便な色素染色法であるので、現場での石綿検出法に適している。

5) 偽陰性は公定分析法と比較して1検体であり、着色した色素は安定であるので、災害現場など屋外での石綿検査に適している。

6) 建材中に含まれる微小な繊維物（プラスチック、セルロース、ポリエステル）も色素染色法で検出できるので、大気捕集後のフィルターの染色によって、大気浮遊物環境分析として今後の発展の可能性がある。

本研究成果を論文誌(Waste Management (成果2))に発表したところ、Editorは

「The authors have applied an interesting and novel approach to detect asbestos in CnD waste. In conclusion, the manuscript is innovative and worth publishing in Waste Management」と評価した。ここで、CnD wasteは廃棄物管理の指針として、廃棄物の埋め立て処分を減らすことを目的とした「Zero Waste to Landfill」の取り組みである。

サブテーマ2では、

1) 石綿にメチレンブルーと赤色3号の2種の色素が同時に吸着できることを初めて見出した

- 2) 石綿検出は、石綿だけでなく、石綿と建材の母材の両方の化学的性質の差異が色の違いとなっていることを明らかにした。
- 3) 石綿検出における偽陽性、偽陰性の可能性についてSEM・EDSの微細構造の測定結果から明らかにした。
- サブテーマ3では、
- 1) 入力画像のスペクトル構造に応じて特徴的な周波数帯域を動的に分離・強調することにより、高精度な分類性能を実現した。
- 2) Hessian行列の固有値に基づく局所エッジ抽出を導入し、従来の画像特徴量設計を超えた高次の幾何学的情報の活用を可能とした。
- 3) CIE Lab色空間のa*成分を用いて染色による赤色成分の強調を実現し、YIQ色空間への変換により輝度・色相・彩度の情報を分離して統計量を抽出した。
- 4) 分類モデルがAccuracy 99.5%、F1-score 0.9956 という極めて高い精度を示し、色・形状・質感といった複合的な画像特徴の有効性を実証した。
- 5) 石綿検出という社会的に喫緊かつ重要な課題に対し、数理的手法と情報技術を融合した信頼性の高い解決策を提案・実装したものであり、今後の環境リスク対策の高度化および関連技術分野の発展に大きく貢献する。

＜環境政策等へ既に貢献した研究成果＞
「特に記載する事項はない。」

＜環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果＞
本法は、廃棄建材を粉砕せずに、建材表面を色素染色するだけで簡単に石綿を検出できるので、次の点において、災害現場での石綿含有建材の分別処理における環境施策への貢献が見込まれる。

1) 石綿有無の迅速な判定、2) 災害現場での作業従事者の石綿被害の防止、3) 低コストの検出で多くの検体のチェックが可能、4) 疑わしい建材の簡単なチェック、5) 見落とし石綿含有建材の減少、6) みなし石綿建材の減少による廃棄物物埋め立て地耐用年数の延長、6) 災害廃棄建材の石綿分別の徹底によってサーキュラーエコノミーへの寄与、である。

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

＜全体達成状況の自己評価＞・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「廃棄建材表面の石綿の可視化による迅速検出・画像解析法の開発と災害現場実証」（佐賀大学、田端 正明）

全体目標	全体達成状況
建材を粉砕しないで建材表面を色素染色し、実体顕微鏡またはデジタル顕微鏡の画像を解析することで石綿建材を検出する手法を実用化する。その方法を災害廃棄物建材に応用して、実用上必要な課題の抽出と改善を図る。主要な目標は以下の通りである。 ・建材の染色顕微画像による石綿検出 ・染色顕微画像の画像解析による石綿の自動・遠隔検出 ・建材表面の石綿の色素染色機構の解明 ・石綿含有率の検出限界： 0.1%未満 ・検査時間：1 検体当たり10 分以内 ・分析コスト：公定分析法の分析費用より安価	達成状況 ・災害地や家屋解体現場で採取した建材について、建材表面を2種の溶液で染色し、石綿を実体顕微鏡で検出することができた（図4,5）。 ・画像解析に石綿の自動解析が可能となった（図83, 84）。 ・着色した物質が石綿であることをXRD、SEM・EDS、Raman分光法、FTIR法で確認した（図8, 9, 10, 19）。また、石綿の種類による染色の難易は比表面積および電荷に依存することが明らかになった。 ・標準アスベストをポルトランドセメントに混合して、検出限界を求めた。0.05%まで検出可能であった。 ・二つの色素の混合溶液を用いることにより染色、検出時間を短縮した。10分以内で可能であった（図15）。 ・市販の色素の利用量は少なく済むので、試薬代は安く（5g、3,000円の色素で3年以上使えた）、器具もプラスチック製であるので安価に実験が実

	<p>施できた。</p> <p>達成状況の選択理由</p> <p>上記のように目標を十分に達成し、次の点において目標以上を達成することができたと考える。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 建材に混入している石綿以外の繊維物質を石綿と着色の違いで区別することができた。同時に、建材中のマイクロ繊維状物質（プラスチック、セルロース、ポリエステル繊維など）を着色により検出できた（図11）。 2) 比表面積が小さく染色されにくいアモサイトを、陽イオン性高分子の添加によって染色できた。しかも、着色色はクリソタイルと異なった（図6）。 3) 公定法の位相差顕微鏡（x 400倍）よりも低倍率の実体顕微鏡（x 50倍）で石綿を明瞭に検出できた。 4) 着色した石綿は3ヶ月以上退色しなかった。その原因は、二つの色素が結合してナノ粒子（150 nm）が生成し、石綿に付着した色素粒子が光に対して安定となるためであると考えられた。 5) 解体業者によるアンケートでは、「石綿検出が容易である」との回答だった。
--	---

<サブテーマ1 達成状況の自己評価>・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「建材表面の染色による災害廃棄物中の石綿建材の識別に関する研究」（佐賀大学、田端正明）

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 達成状況
<p>災害廃棄物中の石綿含有建材を現場で迅速に識別する手法を確立するため、以下に目標と年次計画を列記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・災害廃棄物仮置場において、実際の建築廃材を対象とし、申請者らの色素染色による石綿検出法の適用実験を行い、シビアな災害現場レベルでの適用性を検証する。 ・オンサイト測定における課題を抽出し、操作手順や器具の改善等を図る。そして、改善点を整理し一連の測定手順を確立する。 ・石綿建材の検出に要する時間が1 検体当たり10分以内になるようにする。 ・検出される石綿の画像より石綿の占有表面積率を求め、公定法による石綿分析結果と比較し、面積率から石綿濃度を推定する方法を確立する。 ・石綿含有率の検出限界濃度、0.1%未満を達成する。 ・分析コストを公定法の分析費用（5～6 万円）の50 分の1 以下にする（1,000 円）。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 災害地や家屋解体現場で採取した廃棄建材について、石綿含有有無を判別することができた（目標範囲内）。 2. 採取した建材の汚れを落とすために、市販の5種類の洗剤、塩酸溶液、蟻酸溶液、フッ化水素を含むガラスエッチング剤、シリカ除去剤を用いて表面をクリーンにした。これらの洗浄液で石綿は染色され易くなるが、建材母材に浸透するので、染色色素の発色に影響し、石綿検出が困難となった。その結果、建材表面を金ブラシでこすって汚れを落とし水洗いした。色素の発色に対する影響はなかった。簡単な洗浄法が最適な方法であった（目標以上、図3）。洗浄液が建材に浸透し、染色に影響するとは予想していなかった。 3. 現場での染色は太陽光により退色すると考えられたが、染色された石綿の着色は安定で、石綿検出への影響はなかった。実験室では、3ヶ月以上退色しなかった（目標以上）。その理由は上記全体達成状況5の通り。 4. 2種の色素の混合溶液を用いても石綿は同じように染色された（目的以上、図15）。2種混合液を用いた染色により、染色時間が短縮され、10分以内で石綿検出が一層可能となった。但し、2種の色素を順次用いる方が、それぞれの

	<p>色素による着色の違いにより、建材に混入する他の繊維状物質との区別が容易となった。</p> <p>5. 石綿検出画像の占有面積率は石綿含有濃度に比例した（目標範囲内、表8）。</p> <p>6. 石綿検出限界濃度は0.05%まで可能であった（目標範囲内）。その理由は上記全体達成状況5（図28）の通り。</p> <p>7. 1検体あたりの石綿検出費用は、少量の色素溶液の使用（約1 mL）とプラスチックスポイトの使用により原価で1,000円以下であった（目標範囲内）。</p> <p>内訳：RED-3（5g、3,500円）は1,000検体分、メチレンブルー（25g、5,000円）は2.5x10⁵検体分である。ピペットスポイト（1 mL）100本、529円。</p> <p>顕微カメラ：1台 10万円以下（長期間使用可能）。1,000検体では100円／検体。</p>
--	--

<サブテーマ2達成状況の自己評価>…………… 3. 目標どおりの成果をあげた

「染色前後の建材表面の石綿と素材の微細構造解析と染色機構解明」（佐賀大学、矢田光徳）

サブテーマ2目標	サブテーマ2達成状況
<p>染色前後の建材表面の微細構造解析と石綿の染色機構を解明するため、以下に目標と年次計画を列記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・染色前の建材表面の微細構造解析により混入した石綿の種類と大きさを建材ごとに決定する。また、色素の分光学的解析を行う。 ・建材表面の微細構造から表面を染色するための色素の条件を提示する。 ・染色した建材表面中の石綿と建材素材への着色状態を解析する。 ・色素の着色状態から、染色における静電相互作用と疎水性相互作用の寄与の大きさの違いを明らかにし、色素と石綿との相互作用の機構を解明する。 ・建材色素染色法による石綿の検出限界を0.1%未満とするための最適染色条件を表面構造解析と色素の特性から明らかにする。 	<p>1. 染色前後の建材表面をデジタルマイクロスコープ観察で明らかにするとともに、それらのデジタルマイクロスコープ像に対応するEDS-SEM観察を行って元素マッピング像を取得し、さらに、X線回折測定データのデータを考慮することによって、建材表面に存在する物質の種類・形状・サイズを明らかにした。分光学的解析としては、FT-IR測定が色素及び建材の分析に有効であることを明らかにした。</p> <p>2. 建材表面の染色を行う前の前処理方法を、デジタルマイクロスコープ像、X線回折図、蛍光X線分析をもとに検討し、金ブラシを用いた水洗浄が最も良いことを明らかにした。また、クリソタイル、アモサイト、クロシドライトのゼータ電位を測定して表面電荷を明らかにし、それらに対応する色素を明確にした。</p> <p>3. 染色した建材に対してデジタルマイクロスコープ観察で石綿と建材素材の着色状態を明らかにするとともに、それらに対応する元素マッピング像をEDS-SEM観察により取得し、建材表面に存在する物質の種類・形状・サイズを明らかにした。</p> <p>4. 色素染色したクリソタイルを各種溶液（水、エタノール、アセトン）に分散することによる固相と液相の色の变化から、また、クリソタイルにエリスロシン（赤色3号）が吸着する際の吸着等温線を測定し、色素と石綿の相互作用を明らかにした。</p> <p>5. サブテーマ2のグループはセメント固化体の製造技術を持っていることから、サブテーマ1に対して各種クリソタイル濃度のセメント固化体の作製方法を指導して作成してもらい、色素染色挙動を調べてもらい、検出限界を調べてもらった。サブテーマ</p>

	1で記載の通り、検出感度は0.05%であり、今回の方法で十分に目標を達していることを明らかにした。
--	---

<サブテーマ3 達成状況の自己評価>・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「染色後の建材表面の画像解析による石綿検出法の開発」（佐賀大学、皆本晃弥）

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 達成状況
<p>染色後の建材表面のウェーブレット解析や機械学習手法による石綿画像解析法を開発し、建材中の石綿を効果的に検出する画像解析法を確立するため、以下に目標と年次計画を列記する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ウェーブレット解析や機械学習手法により、染色表面画像から石綿の形状に着目した特徴抽出法を開発する。 ・抽出した特徴を定量化する手法を開発する。 ・提案した特徴抽出法や定量化手法の有効性を検証する。 ・検証結果に基づき、石綿の検出率を向上させるためのデータクレンジング手法や新たなウェーブレットフィルタの開発を行う。 ・石綿の自動検出精度をより高めるための、ウェーブレットフィルタや特徴量定量化手法の有用性を実証する。 	<p>サブテーマ3では、染色処理が施された建材表面の顕微鏡画像から石綿を検出するための画像解析手法を開発した。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 周波数解析に基づく特徴抽出の確立（成果4、5） 建材中の石綿繊維は線状の構造を有し、周波数領域では特徴的な高周波成分を持つ。これに着目し、まずDyadic Wavelet Transform (DYWT) を用いて複数スケールのエッジ情報を抽出した（成果4）。さらに、Hessian行列に基づく局所構造の検出を組み合わせることで、石綿の方向性に依存しない抽出手法を提案した（成果5）。加えて、Dyadic Wavelet Packet Transform (DYWPT) を用いて、より多段階の周波数分解に基づく高精度な特徴抽出を実現した（成果5）。 2. Empirical Wavelet Transformによる適応的周波数分解の導入（成果6） Empirical Wavelet Transform (EWT) は、対象画像の周波数スペクトルに応じて適応的にフィルタバンクを構築できる手法である。本研究では、EWTを用いて石綿繊維の構造的特徴をより精密に捉える周波数分解を行い、従来の固定フィルタバンク型ウェーブレット手法（DYWTやDYWPT）よりも柔軟かつ高精度な特徴抽出を実現した（成果6）。この結果、分類モデルのロバスト性と検出精度の向上が確認された。 3. 特徴量の定量化とベクトル化（成果5、6） DYWPTやEWTにより得られた画像の高周波成分に対し、GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix: 共起行列) に基づくテクスチャ特徴、グレースケールヒストグラム統計量、エントロピー、GLRLM (Gray Level Run Length Matrix) などの複数の特徴量を抽出した（成果5、6）。これらの特徴は正規化処理を施したうえで統合され、42次元の特徴ベクトルとして構成された（成果6）。この定量化により、建材中の石綿繊維とその他の建材領域との特徴分布の違いに着目し、分類モデルが両者を高精度に識別することが可能となった。 4. 機械学習による分類と性能評価（成果5、6） 構成された特徴ベクトルに対し、ロジスティック回帰、決定木、ナীবベイズ、Kernel SVMなどの分

	<p>類器を適用し、その分類精度を比較検討した（M3）。特にKernel SVMが最も高い性能を示し、Accuracy 0.9955、F1-score 0.9956、感度 0.997、特異度 0.994 の結果が得られた（成果6）。</p> <p>5. 分類支援ツールの試作実装と動作デモ 研究成果に基づき、分類支援処理をGUI付きのPythonアプリケーションとして試作実装した。ユーザーが顕微鏡画像を入力すると、内部で特徴抽出と分類処理が行われ、石綿の存在確率を可視化する出力が得られる。この支援ツールは、成果の実用化に向けた展開可能性を示す成果の一つである。（図33, 図34）</p> <p>自己評価 以上の成果から、サブテーマ3に掲げた技術目標はすべて達成されたと評価できる。特に、周波数解析に基づく特徴抽出と多様な特徴量による定量化、さらに高精度な分類結果に加え、分類支援ツールの実装により、研究成果の現場応用への展開が期待できる段階に至った。したがって、本サブテーマの自己評価は「2. 目標を上回る成果をあげた」とする。</p>
--	---

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	1
査読付き論文	6
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	4
口頭発表・ポスター発表	18
マスコミ等への公表・報道等	1
成果による受賞	0
その他の成果発表	0

1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋)
2	Masaaki Tabata, Ryota Haraguchi, Mitsunori Yada, Tomoya Umehara, Mizuha Furukawa, Clear and simple detection of asbestos stained with two dyes for building materials collected from disaster and demolition sites using a stereomicroscope Waste Management, 2023, 171, 653-661. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.020
3	Mitsunori, Yada, Masaaki Tabata, Mizuha Furukawa, Synthesis and characterization of chrysotile/erythrosine composite to detect asbestos, Journal of the Ceramic Society of Japan 2023, 131, 906-691. https://doi.org/10.2109/jcersj2.23099
4	Hikaru Tomita, Teruya Minamoto : Detection of Stained Chrysotile in Microscopic Images Using Wavelet-based Texture Features, Proceedings of the 2022 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition , 6 pages, DOI: https://doi.org/10.1109/ICWAPR56446.2022.9947130
5	Hikaru Tomita and Teruya Minamoto : A Detection Method for Stained Asbestos Based on Dyadic Wavelet Packet Transform and a Locally Adaptive Method of Edge Extraction, Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, volume 1445), 2023, pp.73-78, DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-28332-1_9
6	Satsuki Nishijima, Hikaru Tomita, Teruya Minamoto : Detection of Stained Asbestos in Building Material Microscopic Images Using Empirical Wavelet Transform, Proceedings of the 2024 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition , 6 pages, Code 206890, DOI: https://doi.org/10.1109/ICWAPR63074.2024.10870511
7	田端正明, 原口椋多, 矢田光徳, 西口瑞稀, 末廣結衣, 梅原智也. 災害・解体現場での廃棄建材の色素染色によるアスベスト及び繊維状物質の検出・識別分析法. 分析化学, 74, 2025, 9月25日, 受理済.

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動は以下の4件を行った。

○佐賀大学 肥前セラミック研究センター 研究成果報告会

「セラミックス廃棄物の検知と有効利用」

日 時：令和5年9月19日(火)15:00～17:00

会 場：オンライン

○「国民との科学・技術対話」の実施

令和6年3月23日(土)、会場、佐賀大学。

表題、国民との対話「災害と廃棄物処理」、講演：災害廃棄物処理の現状(福岡大学 鈴木慎也)、遠隔操作による災害廃棄物処理(富士建、角田和樹)、災害廃棄物中の石綿の迅速簡易検出法(佐賀大学、田端正明、矢田光徳、皆本晃弥)。講演終了後30分の参加者との総合討論を実施した。参加者：企業17名、一般10名、大学13名、県庁・団体組合2名、計42名。新聞報道(佐賀新聞)「災害時の非器物の処理どうする？」3月20日、開催案内と記事掲載。(添付ポスターと新聞記事参照)

○JST新技術紹介

令和6年12月3日、会場、JST東京本部サイエンスプラザ。

表題「廃棄建材表面の石綿の可視化による迅速検出・画像解析法の開発と現場実証」(分野、環境)についてオンラインとインターネットで発表。聴取者からのアンケートでは、「大変興味ある研究である。会社に戻ってからビジネスとしての取り組みについてについて検討する。」との回答が多かった。

○「TSUNAGIコンベンション」参加

令和7年3月26日(水)、会場、ガーデンテラス佐賀ホテル&リゾート(佐賀市)。佐賀県主催で佐賀県と大学及び企業との産学連携・交流が行われた。ブースで展示発表を実施した。「災害・解体現場でのアスベストの簡易検出法(佐賀大学、田端正明)」。企業、佐賀県環境課、佐賀保健所、佐賀県政策部の関係者がブースに集まった。関心が高く、我々の方法を検討したいという企業もあった。

佐賀大学 肥前セラミック研究センター
研究成果報告会
「セラミックス廃棄物の検知と有効利用」

日時:2023年9月19日(火) 15時～17時
開催方法:オンライン(参加アドレスはお申し込み後、連絡いたします。)
参加費:無料
申込方法:下記のQRコードまたはURLよりお申し込みください。
(2023年9月18日まで受け付けいたします。)



<https://forms.office.com/r/T5gNIW3G6T>

(プログラム)
15:00-15:05 開会挨拶 佐賀大学 肥前セラミック研究センター 部門長 矢田光徳
15:05-15:35 1. 廃石膏型枠を主材とする低環境負荷型薄板の作製と設置・モニタリング
佐賀大学 理工学部・肥前セラミック研究センター 講師 堀上武仁
15:35-16:15 2. 廃棄物中のアスベストの色素染色法による検知
佐賀大学 名誉教授 特任教授 肥前セラミック研究センター客員研究員 田端正明
3. アスベストの色素染色原理の解説
佐賀大学 理工学部・肥前セラミック研究センター 教授 矢田光徳
16:15-16:45 4. 陶磁器関連廃棄物等の難溶性産業廃棄物の可溶性化処理による農業利用の促進技術の開発
佐賀大学 総合分析実験センター 准教授 児玉宏樹
16:45-17:00 閉会挨拶・ご連絡等 佐賀大学 肥前セラミック研究センター 部門長 矢田光徳

お問い合わせ: 佐賀大学 肥前セラミック研究センター
〒844-0013 佐賀県西松浦郡有田町大字 2441-1
TEL 0955-29-8888 eメール h2cenceric@staff.adm.in.saga-u.ac.jp
主催: 佐賀大学 肥前セラミック研究センター

災害時廃棄物の処理どうする？


23日 佐賀大で講演会 参加無料

災害時に生じる災害廃棄物の処理をテーマにした講演会が23日午後1時から、佐賀市の佐賀大本庄キャンパスの理工学部6号館で開催される。能登半島地震をはじめ各地で災害が相次ぐ中、処理の現状と対策に関して理解を深める。無料でも参加できる。

佐賀大の日端正明准教授(分析化学)ら3人が、災害廃棄物に含まれるアスベスト(石棉)を簡易・迅速に検出する方法について講演する。建材表面の汚れを溶剤として染色し、顕微鏡カメラで確認する流れなどを説明する。

福大の研究者らは災害廃棄物の現状や処理作業の課題をテーマに話す。参加者を定員100人限りとし、先着順で参加者を募集する。問い合わせは田端准教授、電話0955-29-8888(佐賀大)へ。

佐賀新聞2024年3月20日



TSUNAGI コンベンション会場での説明状況

国民との対話 「災害と廃棄物処理」

能登半島地震をはじめ各地で災害が発生しています。佐賀では2019年、2021年に大雨による洪水が発生しました。防災後は災害廃棄物の処理が課題となります。本講演会では災害廃棄物処理の現状と対策について講演をもとに参加者と意見交換を行います。

日時:令和6年3月23日(土)、13時00分～15時50分
会場:佐賀大学本庄キャンパス理工学部6号館1階・大講義室
対象:一般

プログラム:
12:30～ 受付開始
13:00-13:05 開会挨拶
13:05-13:45 (質疑10分)
講演1. 災害廃棄物処理の現状
福岡大学・鈴木徹也氏
13:45-14:25 (質疑10分)
講演2. 遠隔操作による災害廃棄物処理
(株)富士建・角和樹氏
14:25～14:35 休憩
14:35～15:15 (質疑10分)
講演3. 災害廃棄物中の石綿の迅速・簡易検出法
佐賀大学・田端、矢田、皆本
15:15～15:45 総合討論
15:45～15:50 閉会の挨拶

参加費:無料
申込締切:3月15日(金) (定員100名)
申込:下記のアドレスまたは右のQRコードからGoogle formに登録してください。
<https://docs.google.com/forms/d/1PjWRB0dRaibLOEplgKK6k6Ve6j5fWUdgXrIudrH5Uy>
主催:環境省・ERCA、環境研究総合推進費(1 MF 2201)
「廃棄物処理法の石綿の可視化による迅速検出・顕微鏡解析法の開発と災害現場実証」代表 田端正明
後援:佐賀大学理工学部、佐賀県●●課、佐賀市●●課
問合せ:田端正明(佐賀大学理工学部) tabatam@cc.saga-u.ac.jp、0952-28-8560



1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

<相手機関・国・地域名>	
機関名(正式名称)	(本部所在地等の)国・地域名
「国際共同研究を実施していない。」	

注:国・地域名は公的な表記に準じます。

1. 8. 研究者略歴

<研究者(研究代表者及びサブテーマリーダー)略歴>	
研究者氏名	略歴(学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等)
田端正明	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 名古屋大学大学院理学研究科化学専攻、修士課程修了 理学博士、トロント大学(カナダ)博士研究員 名古屋大学理学部文部技官を経て、佐賀大学助手、助教授、教授を経て佐賀大学名誉教授、特任教授。 現在、佐賀大学名誉教授、産学連携研究員、日本分析化学会名誉会員、錯体化学会名誉会員 専門は分析化学、廃棄物処理学。災害時の有害物質の検出・分析、シンクロトロン蛍光X線分析法による古陶磁器の胎土組成と産地推定法に取り組んでいる。。
矢田光徳	サブテーマ2リーダー 九州大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程修了 東京工業大学 博士(工学) 宮崎大学助手、佐賀大学講師、助教授、准教授を経て

	現在、佐賀大学教育研究院自然科学域理工学系 教授、副学系長 専門は無機材料化学、特に、セラミックスナノ粒子の合成や地域貢献のための新しい陶磁器材料の開発に取り組んでいる
皆本晃弥	サブテーマ3リーダー 九州大学数理学研究科数理学専攻単位取得退学 博士(数理学) 九州大学大学院システム情報科学研究科助手、佐賀大学理工学部講師、同学部准教授を経て、 現在、佐賀大学理工学部教授 専門は応用数学、特に、機械学習や数値解析などの応用数学的手法を、画像・信号処理の問題に適用する研究に取り組んでいる。

2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
1	2023年 8 月	田端正明	国立大学法人	1	2023年 8 月

(2) 論文

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
2	2023	Tabata et al., Clear and simple detection of asbestos stained with two dyes for building materials collected from disaster and demolition sites using a stereomicroscope Waste Management, 2023, 171, 653-661. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.020	1	有
3	2023	Yada et al., Synthesis and characterization of chrysotile/erythrosine composite to detect asbestos, Journal of the Ceramic Society of Japan 2023, 131, 906-691. https://doi.org/10.2109/jcersj2.23099	1,2	有
4	2022	Hikaru Tomita, Teruya Minamoto: Detection of Stained Chrysotile in Microscopic Images Using Wavelet-based Texture Features, Proceedings of the 2022 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition , 6 pages, DOI: https://doi.org/10.1109/ICWAPR56446.2022.9947130	3	有
5	2023	Hikaru Tomita and Teruya Minamoto : A Detection Method for Stained Asbestos Based on Dyadic Wavelet Packet Transform and a Locally Adaptive Method of Edge Extraction, Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, volume 1445), 2023, pp.73-78, DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-28332-1_9	3	有
6	2024	Satsuki Nishijima, Hikaru Tomita, Teruya Minamoto : Detection of Stained Asbestos in Building Material Microscopic Images Using Empirical Wavelet Transform, Proceedings of the 2024 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 6 pages, Code 206890, DOI: https://doi.org/10.1109/ICWAPR63074.2024.10870511	3	有
7	2025	田端正明, 原口椋多, 矢田光徳、西口瑞稀, 末廣結衣, 梅原智也. 災害・解体現場での廃棄建材の色素染色によるアスベスト及び繊維状物質の検出・識別分析法. 分析化学, 74, 2025, 9月25日, 採択.	1, 2	有

(3) 著書

<著書>

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
	特に記載する 事項はない		

(4) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ	査読 の有無
8	2023	Masaaki Tabata, Ryota Haraguchi, Mitsunori Yada, Tomoya Umehara, 2023. Detection of Asbestos of Wasted Building-Materials by Staining for On-site Analysis, 3RINCS2023 Kyoto, Japan, 13 th -18 th March, 2023.	1, 2	無
9	2024	Masaaki Tabata, Ryota Haraguchi, Mitsunori Yada, 2024. Simple Detection Method of Asbestos for Disaster Waste Materials, 3RINCS2024 Sydney & online, 15-17 th March, 2024.	1, 2	無
10	2025	Masaaki Tabata, Ryota Haraguchi, Mitsunori Yada, Misaki Nishiguchi, Yuri Suehiro, 2025. Surface Staining Method for Detecting Asbestos in Waste Building Materials Collected at Disaster and Demolition Sites, iwwg-ARB 2025, Philippine, 0-12 th March, 2025	1, 2	有
11	2023	田端正明、原口椋多、矢田光徳、梅原智也、古川飛翔、災害・建物解体時に廃棄された建材の表面色素染色による石綿検出法、第34回廃棄物資源循環学会研究発表会、大阪、2023年9月11-13日	1, 2	無
12	2024	田端正明、原口椋多、矢田光徳、西口瑞朔、災害・建物解体時に廃棄された建材中のアモサイトの色素染色による検出法、つくば、2024年9月9-11日	1, 2	無
13	2023	田端正明1、原口椋多、矢田光徳、梅原智也、古川瑞翔、電荷の異なる二つの色素を用いる廃棄建材表面の石綿分析と染色機構、日本分析化学会第72年会、熊本、2023年9月13～15日	1, 2	無
14	2023	田端正明、まだあるアスベストどうする「災害・解体時の廃棄建材中の石綿の検出・分析法」、日本分析化学会第72年会、熊本、2023年9月13～15日	1, 2	無
15	2024	田端正明1、原口椋多、矢田光徳、災害廃棄建材中のアスベストの迅速検出法、第84回分析化学討論会、京都、2024年5月18-19日	1, 2	無
16	2025	田端正明 他、繊維状物質が混入した廃棄建材の表面色素染色によるアスベストの選択的高感度検出法、第84回分析化学討論会、愛媛 2025年4月31日-5月1日	1, 2	無
17	2022	アスベストの可視化のためのクリソタイル/エリスロシン複合体の合成と評価、矢田光徳、田端正明、	1, 2	無

		梅原智也、古川瑞翔、磯野健一 2023年3月8日		
18	2023	色素染色による廃棄建材中のアスベスト検知の前処理方法の検討、2023年度 日本セラミックス協会九州支部秋季研究発表会、古川瑞翔、梅原智也、田端正明、磯野健一、矢田光徳、2023年11月13日	1, 2	無
19	2024	アモサイトを含む廃棄建材表面の微細構造解析、第61回 化学関連支部合同九州大会、西口瑞朔、矢田光徳、磯野健一、田端正明、2024年06月29日	1, 2	無
20	2024	アスベストへの色素吸着機構の解明、(公社)日本セラミックス協会 第37回秋季シンポジウム、古川瑞翔、林結衣、磯野健一、田端正明、矢田光徳、2024年9月10日	1, 2	無
21	2025	廃棄建材表面の石綿の色素染色による誤検知の要因、第62回 化学関連支部合同九州大会、末廣結衣、梅原智也、林結衣、磯野健一、田端正明、矢田光徳、2025年07月05日	1, 2	無
22	2022	Hikaru Tomita, Teruya Minamoto : Detection of Stained Chrysotile in Microscopic Images Using Wavelet-based Texture Features, the 2022 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition , Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, 9-11 September, 2022.	3	有
23	2023	Hikaru Tomita, Teruya Minamoto : A Detection Method for Stained Asbestos Based on Dyadic Wavelet Packet Transform and a Locally Adaptive Method of Edge Extraction, The 20th International Conference on Information Technology: New Generations, Las Vegas, USA, April 24-25, 2023 (ZOOM presentation) .	3	有
24	2024	Satsuki Nishijima, Hikaru Tomita, Teruya Minamoto : DETECTION OF STAINED ASBESTOS IN BUILDING MATERIAL MICROSCOPIC IMAGES USING EMPIRICALWAVELET TRANSFORM, the 2024 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition , Miyazaki, Japan, 20-23, September 2024.	3	有
25	2025	色素染色による廃棄建材中のアモサイトの検知、(公社)日本セラミックス協会 第38回秋季シンポジウム、西口 瑞朔、磯野 健一、田端 正明、矢田 光徳、2025年9月17日	1, 2	無

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
26	2023	研究成果報告会「セラミックス廃棄物の検知と有効利用」の開催 佐賀大学 肥前セラミック研究センター 研究成果報告会 「セラミックス廃棄物の検知と有効利用」 日時：令和5年9月19日（火）15:00～17:00 会場：オンライン	1, 2
27	2024	「国民との科学・技術対話」の実施、令和6年3月23日、会場、佐賀大学。表題、国民との対話「災害と廃棄物処理」、一般社会	1, 2, 3

		人、企業関係者と質疑を行った。	
28	2025	佐賀県主催「TSUNAGIコンベンション」参加、令和7年3月26日、佐賀県と大学及び企業との産学連携・交流のブースで研究成果の展示発表。企業及び行政関係者との質疑を行った。	1, 2
29	2025	JST新技術紹介で成果発表、表題「廃棄建材表面の石綿の可視化による迅速検出・画像解析法の開発と現場実証」（分野、環境）、令和6年12月3日、会場、JST東京本部サイエンスプラザ	1, 2

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
30	2025	新聞報道（佐賀新聞、3月20日）「災害時の廃棄物の処理どうする？」、開催案内と廃棄物処理に関する記事掲載。	1, 2, 3

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
	特に記載 する事項 はない		

(8) その他の成果発表

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
	特に記載 する事項 はない		

権利表示・義務記載

特に記載する事項は無い。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に代表者又は分担者として参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及び独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）のロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
ERCAは、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract**[Project Information]**

Project Title : Study on Detection and Image Analysis of Asbestos on the Surface of Waste Building Materials and Its Application to Disaster Sites

Project Number : JPMEERF20221M01

Project Period (FY) : April, 2022 ~ March 2025

Principal Investigator : Masaaki Tabata

(PI ORCID) : ORCID0000-0001-9578-1046

Principal Institution : Saga University,
1, Honjo-machi, Saga-city, Saga, 840-8502, JAPAN
Tel: +81-952) 28-8560
E-mail: tabatam@cc.saga-u.ac.jp

Cooperated by : Kyoto University

Keywords : Asbestos, Detection, Dye staining, Image analysis, Building materials in disaster and demolition.

[Abstract]

Asbestos was simply detected by dyeing the surface of wasted building materials collected at disaster and demolition sites. Positively charged chrysotile was stained red purple with methylene blue (MB) and erythrosine (RED-3). On the other hand, negatively charged amosite was stained red with MB and RED-3 after the addition of positively charged poly lysine. Cellulose fibers and plastic fibers involved in building materials were stained a different color from asbestos, and glass fibers were not stained. Furthermore, since asbestos has a different shape than other fibrous materials, asbestos was clearly and selectively detected for building materials involving other fibrous compounds at a detection limit of less than 0.1% using a stereomicroscope (x 50). The present method was also applied to building materials collected at disaster sites and house demolition sites. Detected asbestos was confirmed by polarized light microscopy (PL), X-ray diffraction (XRD), a scanning electron microscope with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), Raman spectra and Fourier transformation infrared spectra (FT-IR). For 38 samples, the results in asbestos detection were compared with the results of official method of asbestos analysis recommended by Ministry of Environment, Japan. Only one sample (p-tile) showed different results between the official method and the staining method. Since this method can be performed outdoors, the application of this method facilitates the management and separation of waste building materials at disaster sites and demolition sites.

To make it easier and simpler to detect asbestos at disaster and demolition sites, AI program was developed by using a combination of wavelet analysis and machine learning. To extract structural

features of asbestos, dyadic wavelet transform (DYWT) and dyadic wavelet packet transform (DYWPT) were applied to emphasize linear components in the high-frequency bands. Furthermore, empirical wavelet transform (EWT) was introduced to dynamically adapt to spectral properties, improving robustness to background variations. From the transformed images, a 42-dimensional feature vector was constructed using GLCM, GLRLM, histogram statistics, and Hessian-based edge descriptors. Classification was performed using a support vector machine (SVM), achieving 99.5% accuracy and 0.9956 F1-score. A GUI-based classification support tool was also implemented in Python, allowing users to upload microscopic images and obtain visualized asbestos detection results in approximately 22 seconds. The system provides a fast, non-destructive, and practical solution for asbestos screening and has the potential for deployment in field inspection.

[References]

Tabata M., Haraguchi R., Yada M., Umehara T., Furukawa M. (2023) "Clear and simple detection of asbestos stained with two dyes for building materials collected from disaster and demolition sites using a stereomicroscope", *Waste Management*, 171, p.653-661. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.09.020

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund of the ERCA (JPMEERF) funded by the Ministry of the Environment.