

木材の保存処理における 分析技術

Analytical Technique in Wood Preservation



栗崎 宏

Hiroshi KURISAKI

富山県農林水産総合技術センター
木材研究所
木質製品課長

木材は強度性能などに優れているだけでなく、森林の炭酸ガス吸収力を維持し、吸収した炭素を貯蔵することを通じて、地球環境の保全に寄与する材料でもある。吸収した炭素は、木材を使用している間貯蔵され続けるが、腐朽菌やシロアリなどの生物によって加害されると、木材は短期間で使用不能となる。木材保存処理は、防腐防蟻成分を木材内部へ加圧注入して生物劣化から保護する技術であり、木材の耐用年数を著しく延長することができる。木材保存処理では様々な機器分析技術を駆使して品質管理がなされており、今後も新しい分析技術の応用が期待される。

Wood is a material, which is not only excellent in terms of strength but also contributes to conserving the global environment through sustaining the absorption of carbon dioxide gas in forests, while storing the carbon itself. Carbon so absorbed remains in wood during its service life, however when wood products are attacked by fungi or termites, they will become unserviceable in a short span of time. Wood preservative treatment protects wood from such bio-deterioration and enables prolongation of its service life, by impregnating wood with fungicide and termiticide. In wood preservation, various instrumental analysis methods have been applied for quality control and further advances in analytical technology are anticipated.

はじめに

木材は、樹木の幹の部分から切り出された材料の呼称である。木材は、材料特性が優れているだけでなく、炭酸ガスの吸収と炭素貯蔵を通じて地球環境保全に寄与する材料でもある。木材の耐久性を向上させて長期間使用していけば、炭素貯蔵期間が延伸し、環境保全への寄与はさらに高まる。本稿では、木材の性質、生物劣化、保存処理技術について概説し、保存処理と分析技術との関係について触れる。

木材の性質

材料としての木材

木材は、軽量でありながら強度が高い、しなやかさがある、加工しやすい、断熱性が高いなど材料として多くの長所があるため、様々な用途に利用されてきた。しかし、木材はこのような材質特性が高いだけでなく、地球環境保全への寄与という点でも優れた材料である。最近、温暖化防止の観点から森林の炭酸ガス吸収機能が注目されている。吸収した炭酸ガスは樹木として貯蔵されるため、伐採樹木を木材として利用すれば、より長期間にわたって炭素を貯蔵することになる。木材利用の意義は、炭素貯蔵期間の延伸だけではない。木材を利用するため森林の樹木を伐採すると、森林の炭酸ガス吸収能力の低下が心配となる。しかし、炭酸ガス吸収力は林齢11~20年がピークで、その後は加齢と

ともに減少していくため^[1]、適齢となった樹木を伐採して木材に利用し、そこへ次代の樹木を植えて森林を更新していくことは、むしろ森林の炭酸ガス吸収機能を高く維持することに繋がる。木材の利用は炭素貯蔵と炭酸ガス吸収力維持の両面で地球環境保全への寄与が期待できる。

木材細胞の構成

木材の優れた材料特性、特に強度性能はその構成に理由がある。樹木の幹は、細胞壁によって仕切られた細胞によって構成される。細胞壁の主要構成成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンの3成分で、これらが90%以上を占める。セルロースは木材全成分の約40~60%を占め、D-グルコースが直鎖状に数千~1万個以上重合した多糖類である。ヘミセルロースはセルロース以外の多糖類の総称で、約15~30%を占める。セルロースのような単純な直鎖ではなく、側鎖を含んでいる。リグニンは環状のフェニルプロパンを主要素とする高分子化合物で、全成分の約20~30%を占める。セルロースやヘミセルロースと違って、三次元的に拡がった網目構造の重合体である。木材の細胞壁は、これら構造の異なる成分が機能的に結合することにより、強固な細胞壁が形成される。その結合様式は鉄筋コンクリートに例えられる。すなわち、直鎖状のセルロースが骨格となる鉄筋、網目構造のリグニンが全体を強固に固めるコンクリート、側鎖を有するヘミセルロースはコンクリートの絡みを良くするため鉄筋に巻かれる金網に相当する。

なお、草本植物の細胞壁の主要成分もこれら3成分であるが、樹木の細胞壁はリグニン含有量が多いため(草本のリグニン含有量は15~25%)、肉厚の鉄筋コンクリートのように堅牢である。

木材と木造住宅

木材の主な用途は、住宅などの建築物である。構造材料に木材を用いる木造住宅は鉄骨プレハブや鉄筋コンクリート住宅の約4倍の炭素を貯蔵すると見積られ^[2]、「都市の森林」「第二の森林」とも称される。木造住宅の炭素貯蔵効果は、住宅の寿命に比例するが、残念ながら日本の住宅寿命は米国の約半分に過ぎず^[3]、住宅の長寿命化へ向けた様々な取り組みが進められているところである。日本の住宅寿命が短い理由は様々であるが、木材の耐久性もその一つである。木材は天然材料であるため、腐朽やシロアリ食害により劣化するという欠点があり、木造住宅の寿命を延ばすには、木材に防腐処理や防蟻処理(総合して保存処理と呼ばれる)を施し、腐朽やシロアリ被害から保護することも重要である。

木材の生物劣化

木材を加害する主な生物

木材に大きな被害をもたらすものは、微生物による腐朽と昆虫による食害である。

木材を腐朽する微生物は、主に担子菌類、いわゆるきのこの仲間、木材腐朽菌と呼ばれる。木材腐朽菌は、木材表面に付着した孢子が発芽し、菌糸を伸長して発育する。腐朽菌の菌糸は木材の細胞内に侵入して、酵素を産生して細胞壁の成分を分解・吸収する。腐朽菌は、分解様式によって、セルロースを選択的に分解する褐色腐朽菌、セルロースとリグニンの双方を分解する白色腐朽菌の2グループに区別されるが、いずれも細胞壁の骨格成分であるセルロースを分解するため、腐朽木材の細胞壁は破れ傘のようにボロボロになり、強度は著しく低下する(**Figure 1**)。

木材を食害する主要な昆虫は、シロアリである。日本で大



Figure 2 シロアリに食害された木材の断面
年輪沿いに、柔らかい場所から食害される。

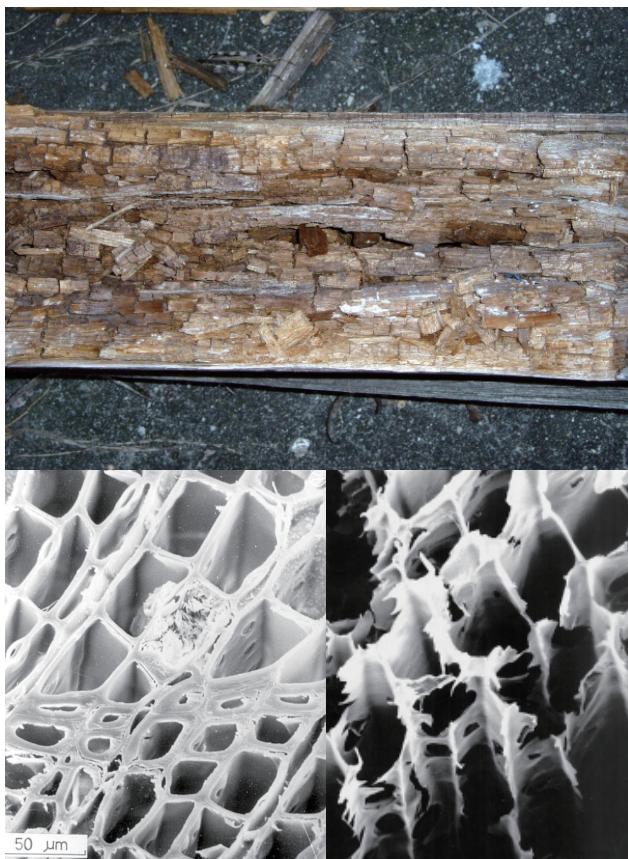


Figure 1 腐朽した木材(上)と細胞壁(下)
腐朽材の細胞壁(右下)は、健全材(左下)より薄く、破れたような状態になっている。(今村祐嗣京都大学名誉教授提供)

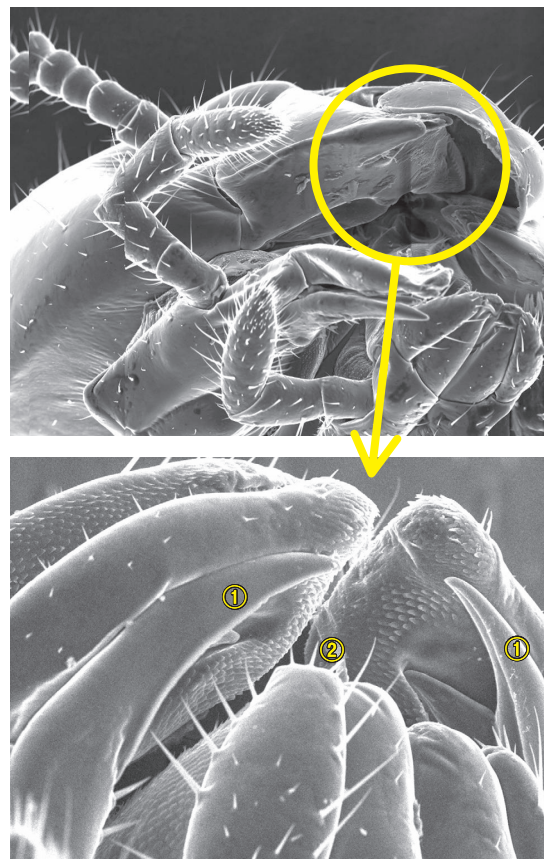


Figure 3 シロアリ職蟻の頭部(上)と口器(下)
鋭い顎①で木材繊維をむしり、やすり状の部分②ですりつぶして飲み込む。

きな被害をもたらすシロアリは、ヤマトシロアリとイエシロアリであり、いずれも数十万頭以上の規模の「コロニー」と呼ばれる集団で生活する。シロアリに食害された箇所は空洞となるため、木材の強度は大きく低下する (Figure 2)。木材を食害するのは、コロニーの大部分を占める職蟻(働きアリ)で、硬いあごで嚙り取った木材繊維をやすり状の口器ですりつぶして飲み込み (Figure 3)、体内に共生する微生物(原生動物)と共同してセルロースを消化する。

木材の保存処理技術

木材を腐朽菌やシロアリから保護するには、殺菌作用や殺虫作用のある成分を配合した木材保存剤で処理する保存処理が効果的である。木材の保存処理の主な方法は、塗布・吹き付けによる表面処理と加圧注入処理の2つであるが、本稿では保護効果が高い加圧注入処理について紹介する。

加圧注入処理

加圧注入処理は、木材を圧力容器中に入れて薬液に浸せきし、ポンプ等で薬液を加圧して(1.4 MPa以上)木材内部まで浸透させる処理である。木材の内部には空気が存在しており、これが薬液浸透の妨げとなるため、実際の処理工程では、予め木材中の空気を脱気した後に薬液を加圧することが多い。

加圧注入処理によって薬剤が浸透する範囲は、木の種類や乾燥状態によっても異なるが、内部まで完全にむらなく浸透させることは難しい。スギ、ベイツガ、ヒノキなど木造住宅で多用される木材の場合、適切な条件で注入すれば少なくとも表面から深さ10 mmまでは浸透させることができる。

木材保存剤

加圧注入処理に用いる木材保存剤は、JIS K1570:2013 木材保存剤で規格化されている。同JISでは、木材保存剤を性状によって水溶性、乳化性、油性の4つの区分し、さらに含まれている防腐防蟻成分の化学構造によっていくつかの化合物群に区分している (Table 1)。JIS規格の木材保存剤は、単独、あるいは複数の有効成分を含み、各種安定剤や界面活性剤などの助剤とともに水や溶剤で規定濃度に調整されている。なお、現在の木材保存剤の使用比率は、Figure 4に示したように水溶性銅系薬剤、すなわち銅・第四級アンモニウム化合物系と銅・アゾール化合物系が最も高く、全体のほぼ半分を占めている。

木材保存剤の目的は、木材に防腐性能や防蟻性能を付与することであり、品質規格はこれを担保するものでなければならない。JIS K1570:2013木材保存剤では、保存剤の性能は各薬剤の指定濃度においてJIS K1571:2013木材保存剤の性能試験方法及び性能基準のラボ試験やフィールド試験の性能基準に適合しなければならない、と規定している。Table 1では省略したが、JIS K1570にはJIS K1571の防腐防蟻性能基準に合格した組成の濃度が規定されている。し

Table 1 JIS K1570規定の木材保存剤の種類

区分	化合物群	記号
水溶性 木材保存剤	第四級アンモニウム化合物系	AAC-1 AAC-2
	銅・第四級アンモニウム化合物系	ACQ-1 ACQ-2
	銅・アゾール化合物系	CUAZ
	ホウ素・第四級アンモニウム化合物系	BAAC
	第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系	SAAC
	アゾール・第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系	AZAAC
	アゾール・第四級アンモニウム・ネオニコチノイド化合物系	AZNA
乳化性 木材保存剤	脂肪酸金属塩系	NCU-E NZN-E VZN-E
油性 木材保存剤	ナフテン酸金属塩系	NCU-O NZN-O
	アゾール・ネオニコチノイド化合物系	AZN
油性木材保存剤	クレオソート油	A

たがって、木材保存剤の品質は、これら防腐防蟻成分の含有量を定量分析して管理される。

木材保存剤の分析方法は防腐防蟻成分ごとに規定されている (Table 2)。有機系成分では高速液体クロマトグラフィ法(以下HPLC法)やガスクロマトグラフィ法(以下GC法)、無機元素、特に金属元素を含む成分では原子吸光分析法(以下AAS法)や高周波誘導プラズマ発光分析法(以下ICP発光分析法)といった機器分析法が用いられる。

保存処理木材

JIS K1570に規定された薬剤を加圧注入処理した木材は、「保存処理木材」と呼ばれる(一般市場では「防腐処理木材」)

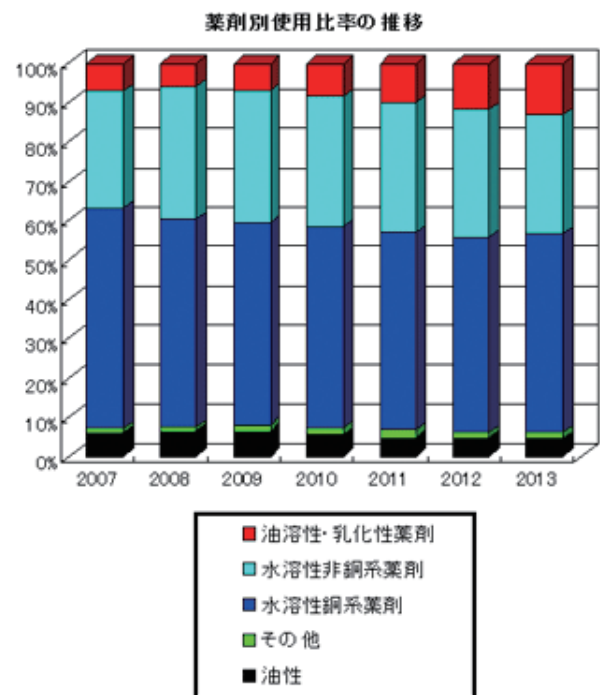


Figure 4 木材保存処理における薬剤使用比率⁽⁴⁾

と呼ばれることも多い)。JISK1570の保存処理剤の防腐防蟻性能は前述のように実証済みであるが、実際に生産された保存処理木材が防腐防蟻効果を発揮するには、明確な品質基準と適切な工程管理のもとでの加圧注入処理が不可欠である。JASでは 製材の日本農林規格 農林水産省告示第1920号で保存処理木材の品質規格を規定し、JIS A9002:2012木質材料の加圧式保存処理方法では加圧注入処理の原則を規定している。

保存処理木材の品質規格

保存処理木材に求められる品質は防腐防蟻性能であるので、前出のJIS K1571:2013木材保存剤の性能試験方法及び性能基準を準用して品質を規定するのが最も直接的である。しかし、JIS K1571は、腐朽菌やシロアリを用いた生物試験であるため、保存処理木材の品質規格への適用は困難である。保存処理木材の防腐防蟻性能は、木材中における薬剤浸透範囲と薬剤分量に依拠する。そこでJASでは、保存処理木材における防腐防蟻成分の浸透面積率(指標値は「浸潤度」と含有量(指標値は「吸収量」)のスペック基準を規定することで、防腐防蟻性能を担保している。

JASの保存処理木材の品質規格の構成はやや複雑で、まず保存処理木材を使用する環境と期待する耐久性レベルによって5つの性能区分に分けられ、さらに樹種や薬剤種類による細かい区分けがなされた上で浸潤度基準と吸収量基準が規定されている。

浸潤度基準

浸潤度基準値は薬剤種類に関係なく共通である。腐朽しにくい環境や長期の耐久性を期待しない性能区分では低い値、腐朽が起りやすい環境や長期の耐久性が求められる性能区分では高い値である。1つの性能区分に2つの浸潤度基準が規定されているものもある。これは、木材本来の(無処理時の)腐朽しやすさが、樹木の種類によって大きく異なるため、腐朽しにくい樹種区分に対しては低め、腐朽しやすい樹種区分に対しては、高めの浸潤度基準値が設定されている。浸潤度は、前述のように薬剤成分の浸透度合いの指標値である。測定方法は、製造した保存処理木材からサンプル材を抽出して中央付近で切断し、断面に各薬剤成分と反応する呈色試薬液を塗布して、薬剤が浸透した領域を発色させ、その面積を計測する。面積計測方法は規定されていないが、一般的には発色した状況をデジタルカメラで撮影し、その画像をパソコン上で解析する。機器分析が用いられることは、ほとんどない。

吸収量基準

吸収量基準値は、各性能区分の薬剤種別に規定されている。浸潤度基準と違って、樹種区分による区別はない。測定方法は、保存処理木材の表面から10 mm深さまでのゾーンから試料を採取し、試料中に含まれる薬剤成分量を定量分析

Table 2 木材保存剤の防腐防蟻成分とその分析法

成分の分類	成分名	略称	薬剤の分析法
第四級アンモニウム化合物	ジデシルジメチルアンモニウムクロリド	DDAC	滴定法 HPLC法
	N,N-ジデシル-N-メチル-ボリオキシエチル-アンモニウムプロピネート	DMPAP	同上
	N-アルキルベンジルジメチルアンモニウムクロリド	BKC	同上
アゾール化合物	α -(4クロロフェニル)- α -(1-シクロプロピルエチル)-1H-1,2,4-トリアゾール-1-エタノール	シプロコナゾール	GC法 HPLC法
	α -[2-(4-クロロフェニル)エチル]- α -(1,1-ジメチルエチル)-1H-1,2,4-トリアゾール-1-エタノール	テブコナゾール	HPLC法
ピレスロイド化合物	3-フェノキシベンジル-2-(2,2-ジクロロビニル)-3,3-ジメチル-1-シクロプロパンカルボキシラート	ベルメトリン	HPLC法
非エステルピレスロイド化合物	4-エトキシフェニル[3-(4-フルオロ-3-フェノキシフェニル)プロピル]ジメチルシラン	シラフルオフェン	HPLC法
	2-(4-エトキシフェニル)-2-メチルプロピル-3-フェノキシベンジルエーテル	エトフェンプロックス	同上
ネオニコチノイド化合物	1-[(6-クロロ-3-ピリジニル)メチル]-4,5-ジヒドロ-N-ニトロ-1H-イミダゾール-2-アミン	イミダクロプリド	HPLC法
無機銅化合物	酸化第二銅, 水酸化銅など	CuO換算	AAS法 ICP発光分析法
ホウ素化合物	ホウ酸	ホウ酸	ICP発光分析法
脂肪酸金属塩	第三級カルボン酸亜鉛	VZN	AAS法
ナフテン酸金属塩	ナフテン酸銅	NCU	AAS法
	ナフテン酸亜鉛	NZN	AAS法
クレオソート油	コールタールの200~400℃留分	A	蒸留試験など

する。木材の単位体積あたりの薬剤成分質量で表され、単位はkg/m³が用いられる。Table 3に、木造住宅で最もよく使用される性能区分であるK3区分の吸収量基準とJAS規定の分析法の概略を抜粋した。分析する薬剤成分はTable 2と同じであるが、木材中の薬剤を分析するために、抽出、分解、精製などの前処理方法が規定されている。分析方法は、Table 2と若干異なる点もあるが、やはり機器分析が多用されている。

木材保存における新たな分析技術の応用

以上のように、機器分析技術は木材保存処理の品質管理に広く利用されているが、研究開発ツールとしても有用性が高い。近年、開催された木材保存分野のシンポジウムの中から、新しい分析技術の応用例などを紹介する。

蛍光X線分析は、銅、亜鉛などの金属の分析方法として実績のある機器分析法であるが、近年いくつかのバリエー

Table 3 保存処理木材(K3区分)の防腐防蟻成分とその分析法

化合物群	記号	吸収量基準	防腐防蟻成分	防腐防蟻成分の測定法の概要
第四級アンモニウム化合物系	AAC-1 AAC-2	4.5 kg/m ³ 以上	DDAC	試料の塩酸-エタノール抽出液を発色処理後、吸光度分析
			DMPAP	(1) 試料のぎ酸-エタノール抽出液を発色処理後、吸光度分析 (2) 同抽出液をHPLC分析
銅・第四級アンモニウム化合物系	ACQ-1 ACQ-2	2.6 kg/m ³ 以上	銅	(1) 試料分解物の溶液をAAS分析 (2) 試料分解物の溶液をICP発光分析 (3) 試料粉碎物を成形後、蛍光X線分析
			BKC	試料の塩酸-エタノール抽出液を発色処理後、吸光度分析
			DDAC	前掲
銅・アゾール化合物系	CUAZ	1.0 kg/m ³ 以上	銅	前掲
			シプロコナゾール	(1) 試料のエタノール抽出液を精製後、HPLC分析 (2) 試料の水-アセトン抽出液を精製後、GC分析
ホウ素・第四級アンモニウム化合物系	BAAC	3.2 kg/m ³ 以上	ホウ酸	(1) 試料分解物の溶液を発色処理後、吸光度分析 (2) 分解物溶液をICP発光分析
			DDAC	前掲
第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系	SAAC	2.5 kg/m ³ 以上	DMPAP	前掲
			シラフルオフェン	試料のぎ酸-アセトニトリル抽出液をHPLC分析
アゾール・第四級アンモニウム・ネオニコチノイド化合物系	AZNA	2.4 kg/m ³ 以上	テブコナゾール	試料のエタノール抽出液を精製後、HPLC分析
			DDAC	前掲
			イミダクロプリド	試料のDMSO-エタノール抽出液をHPLC分析
脂肪酸金属塩系	NCU-E	1.0 kg/m ³ 以上	NCU	銅と同じ
	NZN-E	2.0 kg/m ³ 以上	NZN	銅と同じ
	VZN-E	2.5 kg/m ³ 以上	VZN	銅と同じ
			ベルメトリン	試料のアセトン抽出液をGC分析
ナフテン酸金属塩系	NCU-O	0.8 kg/m ³ 以上	NCU	前掲
	NZN-O	1.6 kg/m ³ 以上	NZN	前掲
アゾール・ネオニコチノイド化合物系	AZN	0.15 kg/m ³ 以上	イミダクロプリド	前掲
			シプロコナゾール	前掲

ションが登場している。X線分析顕微鏡、微小部蛍光X線分析装置などと呼ばれる走査型装置もそのひとつである。このタイプの装置では各種元素の分布を示すマッピング分析が可能である。筆者らは、銅板を取り付けた木材を長期間湿潤条件下に置いておくと、時間とともに銅板から周囲の木材へ銅が移行していくことを、蛍光X線マッピング分析により明かにした^[5] (Figure 5)。また、部分的に腐朽した保存処理木材中の銅の分布を分析し、腐朽菌が処理木材中の銅を集積している可能性を示唆する結果を得ている^[6]。

蛍光X線分析は据え置き型装置が主流であるが、携帯型蛍光X線分析装置も登場している。蛍光X線分析は本来非破壊の分析法であるが、据え置き型装置の場合、製品から試料をサンプリングするため実際には破壊検査となるのに対し、携帯型装置はオンサイト分析なのでサンプリングの必要がなく、完全な非破壊検査法である。既設建築物や貴重な文化財などの現地調査に最適である。西川は、有害なCCA処理廃材(CCA：かつて住宅部材の防腐処理に最も多量に使用されていた。クロム、ヒ素を含むため現在は使用されていないが、住宅解体時に発生する木質系廃材への混入が懸念されている。)の判別への応用の可能性も示している^[6]。

木材中の薬剤を分析するには、Table 3に示したように抽出、分解、精製などの前処理が必要であり、これに多くの時間と労力が費やされる。固相抽出法は、様々な吸着特性の樹脂を充填したカートリッジを用いる抽出法であるが、これを応用することにより各種前処理を軽減することができる。例えば、Table 3に記載されている試料抽出液をカチオン交換樹脂を充填したカートリッジで精製すれば、アゾール系化合物分析を妨害する木材由来成分を効率的に除去でき、弱カチオン交換樹脂カートリッジを用いれば危険な過塩素酸アンモニウムを用いずに第四級アンモニウム化合物BKCの妨害成分を除去できる^[7]。固相抽出システムは、試料液の精製だけでなく試料の濃縮にも利用できる。数ml容量のカートリッジ内での小スケールの処理であるため、従来の前処理と較べて所要時間も短く、溶剤等の使用量も少量で済む。様々な面で、分析の迅速化・効率化への寄与が期待される。

熱分解GCは、元々は高分子試料を加熱分解して生じた低分子物をGCやGC質量分析により分析する方法である。微量の試料で分析可能で、固体の試料を直接測定できることから、中川^[8]は保存処理木材中の薬剤分析への応用を試みている。その結果、500 µgの削りくずを直接熱分解GC質量分析するだけで、加圧注入処理材中のDDACの定量分析やシ

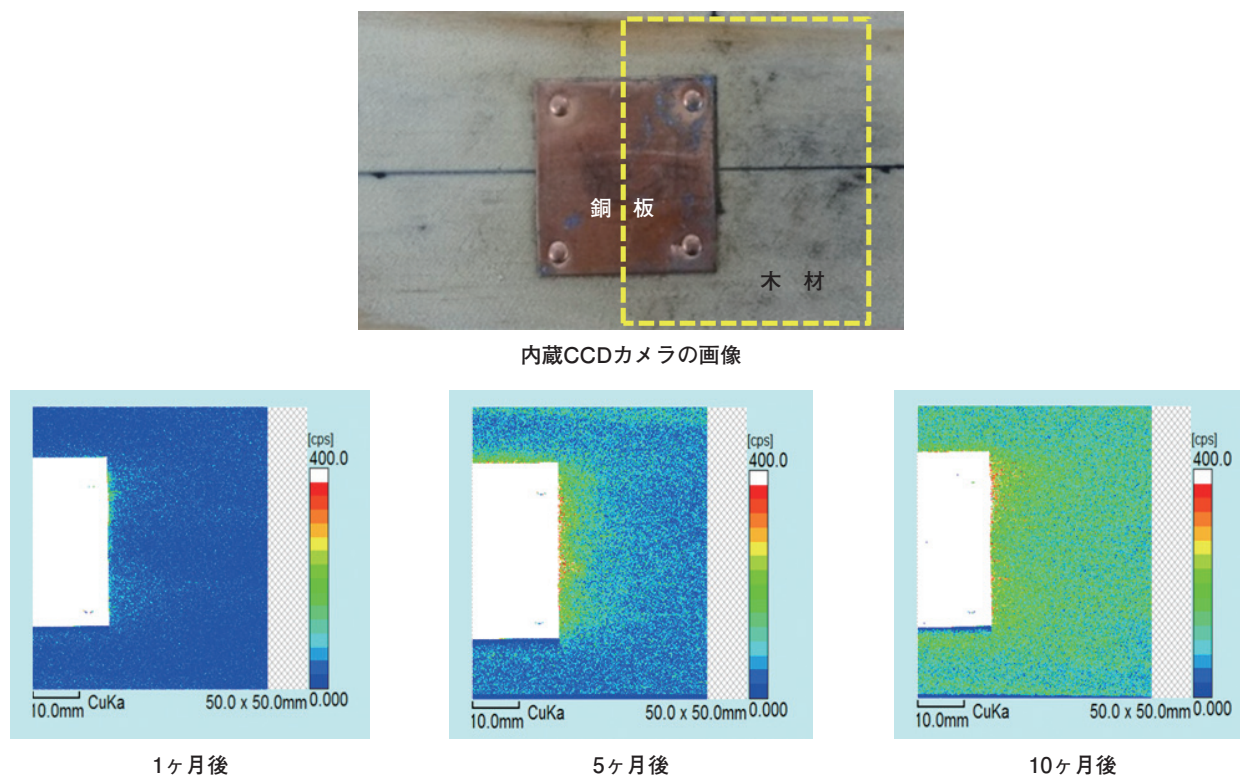


Figure 5 銅板を取り付けた木材の蛍光X線マッピング分析 湿潤条件下1, 5, 10ヶ月後に上図の点線ゾーンを分析

プロコナゾールの確認が可能であった。ごく微量のサンプリングで済むため限りなく非破壊検査に近く、煩雑な前処理も不要であることから、迅速に結果が得られる。このような特徴から、既設建築物の現場調査などへの応用が期待される。

おわりに

木材は、地球環境の保全に貢献する材料である。保存処理による木材の耐久性向上は、環境貢献度をさらに高める。しかし、保存処理がその効果を発揮するためには、保存薬剤や保存処理木材の適切な品質管理が不可欠である。今後、木材保存の品質管理における分析技術、とりわけ機器分析の重要性はますます高まるものと考えられる。

参考文献

- [1] 平成16年度森林・林業白書, 19(2005)
- [2] 岡崎泰男他, 木材工業, 53(4),1998
- [3] 平成20年度国土交通白書, 12(2009)
- [4] 木材防腐工業組合ホームページ-新着情報-<http://www.jwpi.or.jp/shinchaku/index.html>,2015/7/30
- [5] 栗崎宏, 日本木材学会生物劣化研究会 2013年度秋期研究会要旨, 9-13, (2013)
- [6] 西川智子, 日本木材学会生物劣化研究会 2013年度秋期研究会要旨, 1-7, (2013)
- [7] 宮内輝久, 日本木材学会生物劣化研究会 2013年度秋期研究会要旨, 25-32, (2013)
- [8] 中川明子, 日本木材学会生物劣化研究会 2013年度秋期研究会要旨, 39-42, (2013)