

レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法を用いた防腐剤（CCA） 処理木材の判別方法の開発 第2報

高橋 徹, 富田 恵一, 若杉 郷臣

Development of Distinction Process of CCA Treated Wood from House Demolition using Laser Induced Breakdown Spectroscopy method Part II

Touru TAKAHASHI, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI

抄 録

レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法（以下LIBS法とする）を用いたCCA（クロム、銅およびひ素）処理木材の判別方法を開発するため、LIBS測定における最適測定条件を決定し、実試料を用いた判別試験を行い、現場のニーズに応えた判別方法について検討した。減圧加圧処理によりCCA標準試料を作製し、クロム、銅およびひ素の測定を行い、クロムと銅は数mg/kgまで、ひ素は200mg/kgまで、正確に測定できることが分かった。さらに、ベイツガ、カラマツなど樹種の違いが分析値に大きな影響を及ぼさないこと、また、土壌等の表面汚れの影響を受けない正確な測定ができることを確認した。銅またはクロム測定による最適判別方法および判別条件を決定し、実試料（クロム、銅含有量：200～3600mg/kg）の場合でも、精度良く判別できることが分かった。また、光ファイバー等を用いた装置でも同様に測定可能であり、実試料の判別ができることを確認した。さらに、検出器内蔵小型分光器を用いたLIBS装置でも、クロムおよび銅の測定が可能であることから、CCA処理木材の判別に特化した装置の可搬型、小型化の可能性を見出した。

キーワード：LIBS法、防腐剤（CCA）処理木材、建築廃材、発光スペクトル

Abstract

It is necessary to distinguish the CCA treated wood from building debris, in order to recycle as safe woody biomass. The emission spectrum of Chromium, Copper and Arsenic are detected through analysis of the CCA standard wood, by using the LIBS (Laser Breakdown Spectroscopy) method. The content determination limits of Chromium, Copper were about 10mg/kg, which are sufficient value to distinguish CCA treated woods. And, the analysis result by using the LIBS was not affected by wood species and soil dirty. Result of analyzing building debris from dismantling site, LIBS method under the best conditions were able to distinguish in high accuracy. It has been understood to be able to measure chrome and copper similarly even with the LIBS installation that uses the optical fiber.

KEY-WORDS : Laser Induced Breakdown Spectroscopy, CCA Treated Wood, House Demolition, Emission spectrum

1. はじめに

CCA（クロム、銅、ひ素）処理木材は1965年頃から住宅の土台として広く用いられてきたが、CCA処理木材を焼却・埋立等する際の有害金属であるクロムおよびひ素の揮散、溶出が問題とされ、1997年以降はその使用量が激減している。

しかし、木造建築物の平均寿命は30～35年と推定されているため、今後木造住宅の解体が進み、北海道だけでも今後20年間にわたり1万m³/年のCCA処理木材が発生すると予想されている^{1, 2, 3)}。現在、森林バイオマス（間伐材、工場廃材）のみでは、敷料および木質ペレット等に使用される木質バイオマスの必要量は確保できないため、安全で質の高い再資源

事業名：公募型研究

課題名：防腐剤（CCA）処理木材の自動判別方法および有効利用に関する研究（H20～22年度）

化原料が必要となり、建築廃材利活用への要望が高まっている。しかし、建築廃材には有害物質を含有しているCCA処理木材等が混入している恐れがあり、再資源化率があまり向上していないのが現状である。CCA処理木材は燃焼時に有害ガスを発生し、燃焼灰中にも有害物質を含むことから高精度の判別法の開発が必要である。現在使用されている目視による判別法、薬品による呈色法および研究開発されている近赤外線法は、経験・熟練が必要であること、試薬調製・反応時間等の煩雑さが伴うこと、さらに判別精度が低いこと等により、誤判別が多く、あまり普及されていないのが現状である。

一方、レーザーを利用した非接触、リアルタイム計測法として、レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法（以下LIBS法とする）を用いた計測技術が開発されている^{4,5,6,7,8}。LIBS法は前処理無しで、気体、液体および固体中の主成分から微量成分までの元素含有量をリアルタイムで計測可能である^{9,10,11}。

本研究では高感度元素分析かつ現場分析に適しているLIBS法を用いてCCA処理木材を高精度に判別できる装置の検討を行った。前報¹²では、CCA標準試料を用いて、クロム、銅およびひ素の発光スペクトルを検出し、良好な検量線が得られた。得られた検量線を用いて、実試料を測定した結果、蛍光X線分析結果と同等であったことから、正確に定量できることを確認した。さらに、LIBS法の諸条件（レーザー照射時間、レーザー出力、レーザー焦点距離および遅延時間）の最適化を図った。本報では、各元素の定量下限値、樹種による影響、表面の汚染による妨害等について検討し、実試料による判別を行った結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 標準試料の作製および実試料

重クロム酸カリウム、硫酸銅および60%ひ酸溶液を1Lに定容し、表1に示す濃度のCCA標準溶液（旧JIS K1554 CCA標準組成表 1号相当）を調整した。60℃で48時間乾燥したベイスギ、ベイツガ、カラマツおよびトドマツ（30×36×10mm）を10倍から500倍に希釈したCCA標準溶液に浸漬し、90kPa雰囲気で15分間減圧し、さらに5 kg/cm²で1時間加压処理した。加压処理した標準試料を恒湿乾燥機60℃で24時間乾燥し、クロム、銅およびひ素の含有量が異なるCCA標準試料を作製した。作製した各標準試料のクロム、銅およびひ素の含有量を確認するため、過去に用いられていた針葉樹構造用製材の日本農林規格（旧JAS）の保存処理薬剤の定量法に準じて分析を行った。

建築物の解体現場および中間処理施設では、土壌等の汚れが建築廃材に付着するため、現場での判別を考慮し、土壌汚れ模擬試料を作製し、汚れた試料における正確性を確認した。土壌汚れ模擬試料は、土壌スラリー（30g/100mL）にCCA

標準試料を浸漬し、乾燥して作製した。また、判別試験に使用したCCA処理木材試料は、中間処理施設ならびに家屋解体現場から収集し、針葉樹構造用製材の前述した規格（旧JAS）に準じて分析を行った。

表1 CCA標準溶液の各元素濃度

試薬	1L中(g)	元素	溶液濃度(g/L)
K ₂ Cr ₂ O ₇	137.5	Cr	49
CuSO ₄ ・5H ₂ O	83.75	Cu	21
H ₃ AsO ₄ (60%)	30.7	As	16

2.2 LIBS測定装置

装置概要を図1に示す。レーザーをレンズで集光し、試料に垂直に照射し、プラズマを発生させ、プラズマの熱エネルギーにより発生する元素特有の発光スペクトルを集光し分光器で計測した。装置の仕様および基本条件は以下のとおりである。レーザー発振装置はNd:YAGレーザー（タレス社製半導体励起レーザー）を用い、発振波長は1064nm、レーザー出力は20mJ/pulseを用いて実験を行った。分光器はMS3504i（SOLAR社製）、ICCD検出器はiStarDH73418F03（ANDOR社製）を使用した。さらに、測定部と計測部を離して設置する遠隔操作LIBS装置を開発する目的で、コア径200μmの石英製光ファイバーを10本まとめ、試料からの発光信号を分光器に直接導入するLIBS装置を試作した。また、小型化を図るため、小型分光器MMS-UV（カールツァイス社製）とCCDリニアイメージセンサ（浜松ホトニクス社製）を組み込んだLIBS装置を試作した。

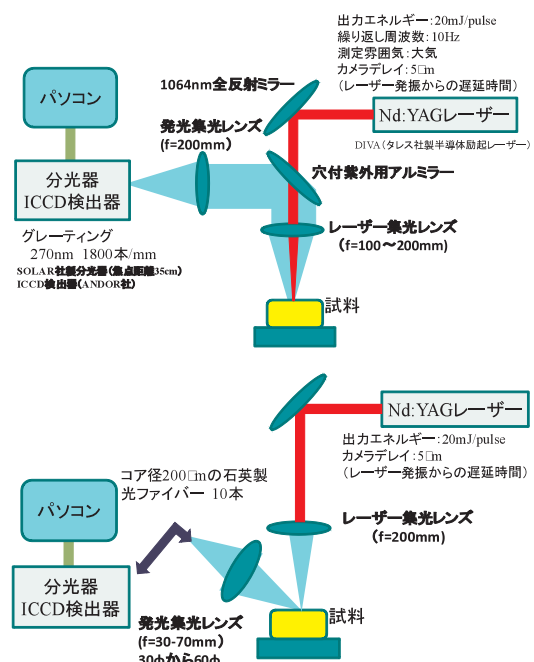


図1 LIBS法の装置概念図
（上図：縦方向に集光 下図：光ファイバー使用）

2.3 LIBS法による最適条件の決定

LIBS法による最適条件を設定するため、各元素の測定波長における定量下限値および感度を調べ、さらに各樹種による定量下限値、および相関係数の比較を行った。LIBS法は、測定高さによる影響が大きいことから¹³⁾、焦点距離50,100および200mm集光レンズによる発光強度と焦点深度の関係を検討し、レンズの最適化を図った。

2.4 判別実験

LIBS法により実試料の判別試験を行った。判別試験はクロム(425.4nm, 359.3nm)、銅(324.8nm)およびひ素(235.0nm)について行い、実用性および正確性について調べた。現場では木口面ではなく木端面が露出していることが多いため、LIBS法の測定面は木端面とし、実試料も木端面で測定した。基本的に、実試料のLIBS測定は、建築廃材処理施設に持ち込まれた試料をそのままの形態で測定した。100×100×300~500mmもしくは90×90×300~500mmの実試料(角材)を試料台に載せ、レーザー焦点を合わせるため、試料の高低のみ精密ラボジャッキにより設定し、測定した。

3. 結果および考察

3.1 作製したCCA標準試料の各元素濃度

標準試料の濃度計算値は、希釈したCCA標準溶液の吸収量から算出した。吸収量は各試料片の処理前後の重量差から求めた。ベイスギ、ベイツガ、カラマツおよびトドマツの各樹種の気乾比重は、それぞれ0.31, 0.51, 0.54および0.34であり、それに伴い溶液吸収量も約630, 790, 500および650kg/m³と異なっている。そのため、実際のCCA処理木材標準試料も樹種による濃度差があると推定される。CCA標準溶液の吸収量から算出した各樹種の標準試料の含有量を表2に、クロムの計算値と実測値の関係を図2に示す。カラマツを除いた樹種の元素含有量は、クロム：約8,000~9,500、銅：約3500~4000mg/kg、ひ素：約2500~3000mg/kgとほとんど同じであるが、カラマツの各元素含有量は、これら樹種の半分程度の濃度であった。カラマツの溶液吸収量は、樹種の中で、最も低く、気乾比重は最も高いため、2-1項で記述した減圧・加圧条件では全量が吸収できなかったためと考えられる。通常、予備試験により樹種にあった減圧・加圧条件をあらかじめ設定しているが、本実験では溶液吸収量の高いベイスギの条件により標準試料を作製したためと考えられる。図2から、クロム測定における各樹種の計算値と実測値の関係は、すべて相関係数：0.9以上であり、各樹種における計算値の元素濃度は実測値に近いことが分かった。旧JAS法により標準試料を分析するには、粉碎する必要があるため、以下の実験では各元素の含有量は計算値を使用することとした。

表2 各樹種の吸収量から算出した各樹種のCCA標準試料中の含クロム、銅及びひ素の含有量 (mg/kg)

	Cr	Cu	As
ベイスギ	9480	4160	3160
ベイツガ	7610	3340	2540
カラマツ	3840	1680	1280
トドマツ	8730	3830	2910

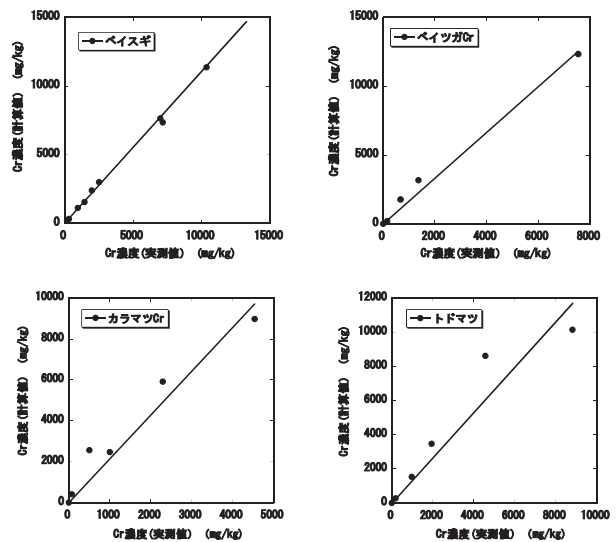


図2 計算値と実測値の関係(クロム)

3.2 レーザー焦点距離とプラズマ発生領域

レーザー用集光レンズと焦点深度(プラズマ発生領域)、ビームスポット径(測定部位の面積)およびエネルギー密度(単位面積あたりのエネルギー mJ/cm^2)の関係を図3に示した。焦点距離の異なるレンズを使用した場合、焦点深度(プラズマ発生領域)およびビームスポット径(測定部位の面積)に影響を与える。焦点深度を深くするためには焦点距離の長い集光レンズを使用し、ビームスポット径を小さくするためには焦点距離の短い集光レンズを使用する必要がある。レーザー焦点距離と発光強度の関係を図4に示した。発光強度は最高発光強度を1.0として換算した。359.3nmのクロム測定について、レンズ焦点距離100mmの場合、レーザー焦点距離が±2mmずれると発光強度が20%減少したのに対し、レンズ焦点距離150mmの減少量は15%、レンズ焦点距離200mmの減少量は10%であり、レンズの焦点距離を長くすることにより、レーザー焦点距離の発光強度に与える影響が軽減された。同様に、324.8nmの銅測定についても、レンズ焦点距離100mmの場合、レーザー焦点距離が±2mmずれると発光強度が40%減少し、レンズ焦点距離150mmの減少量は30%、レンズ焦点距離200mmの減少量は20%まで軽減された。現場測定時において、異形状の試料を連続的に測定する場合、プラズマ発生領域は広い方が有利である。発光強度の低下は、レーザー焦点距離がずれることにより、プラズマ発

生に影響を与えるためと考えられる。焦点距離が短い場合は、試料手前のガスがプラズマ化し、バックグラウンドを高め、S/B比（目的元素の発光強度/バックグラウンドの発光強度）が低下する、また、焦点距離が長い場合はレーザーエネルギーの分散によるプラズマ温度の低下が起り、強度が低下すると報告されている¹³⁾。

焦点深度とエネルギー密度は、相反する条件である。本測定は、正確な判別方法を目的としているため、発光強度に与える影響が少なく、測定誤差が小さくなるレンズ焦点距離200mmを選択した。

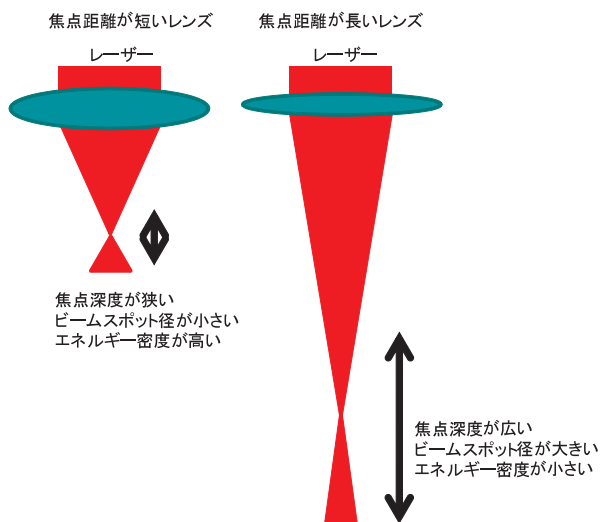


図3 レンズ焦点距離と焦点深度、ビームスポット径、エネルギー密度の関係

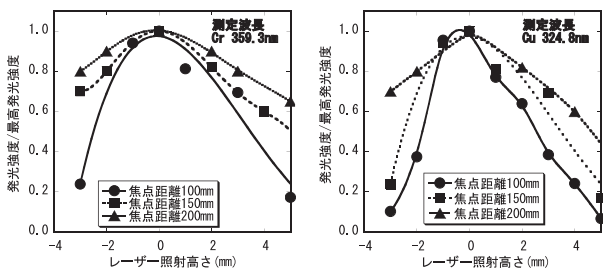


図4 焦点距離を変えた場合のレーザー照射高さのずれと発光強度の関係

3.3 LIBS法による各元素の定量下限値と感度

LIBS法における各元素（測定波長）の定量下限値と感度を表3に示した。定量下限値はブランク試料を10~20回測定したときのバラツキと低濃度のCCA標準試料の測定結果から算出した。感度は各CCA標準試料の含有量と発光強度の関係から算出した。測定時間10secの定量下限値からクロム、銅は数mg/kgまで測定可能であるが、ひ素はいずれの波長も感度が悪く、数百mg/kgまでしか正確に測定できないことが分かった。これは、感度の良いひ素の測定波長が長波長側には無く、吸収・散乱等による感度低下の影響を受けやすい短波長測定（200nm近辺）によるものと考えられる。LIBS測定の感度は積分時間（測定時間）の増加により、ほぼ比例的に増加した。積分時間5secの定量下限値は10secに比べ、2~6倍の値を示し、 $1/\sqrt{n}$ 倍（nは回数）よりも高くなっている。これは、発光強度のバラツキ（繰り返し精度）の影響によるためと考えられる。

3.6項で詳しく記述するが、実際のCCA処理木材のクロムおよび銅の最低濃度は40~60mg/kg程度と極端に低い場合もあるため、安全面を考えると測定時間は10sec必要であることが分かった。また、実際のCCA処理木材の最低ひ素含有量は40mg/kg程度であることを考えると、ひ素測定では正確に判別できないことが分かった。

表3 LIBS法における各測定波長の定量下限値と感度

測定元素(波長)	定量下限(mg/kg)		感度(counts)	
	測定時間		測定時間	
	10(sec)	5(sec)	10(sec)	5(sec)
Cr 359.3nm	17	54	12	8
Cr 425.4nm	6	35	24	14
Cu 324.8nm	6	16	16	8
Cu 327.4nm	8	12	10	6
As 228.8nm	200		4	
As 235.0nm	400		4	

* 定量下限: mg/kg
* 感度: 1mg/kgあたりのカウント数

3.4 各樹種の測定結果

作製した各樹種のCCA標準試料を用いてLIBS法における定量下限値と相関係数を表4に、各樹種のクロム検量線を図5に示す。表から、ひ素の定量下限値はどの樹種も数百mg/kgと高く、ひ素測定では正確に判別できないことを再確認した。銅およびクロムの定量下限値はベイツガが他の樹種よりも高い。2~3倍の定量下限値の差による判別誤差はあまり影響がないと考えるが、現場でのCCA標準試料をベイツガ試料に合わせることで、樹種の影響を受けずに判別可能である。図に示す各樹種のクロム検量線から分かるように相関係数はすべての0.79以上であり、正確に測定できることが分かった。

樹種による感度（検量線の傾き）の差はあるが、先に記述したとおり、CCA標準試料を感度の悪い試料に合わせることで、判別可能である。

表4 各樹種の定量下限値および相関係数

	樹種	定量下限	相関係数
As 235.0nm	ベイスギ	400	0.77
	ベイツガ	440	0.84
	カラマツ	160	0.90
	トドマツ	770	0.85
Cu 324.8nm	ベイスギ	7	0.97
	ベイツガ	65	0.78
	カラマツ	11	0.86
	トドマツ	25	0.83
Cr 425.4nm	ベイスギ	6	0.97
	ベイツガ	18	0.94
	カラマツ	6	0.79
	トドマツ	8	0.92

* 定量下限: mg/kg

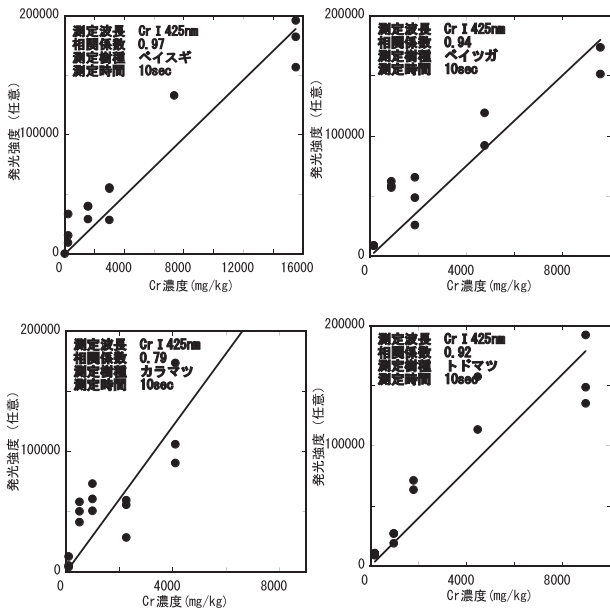


図5 各樹種のクロム含有量と発光強度との関係

3.5 LIBS測定後の試料部位および土壌汚れ試料の測定

図6にLIBS測定における測定部位写真および図7に360nm付近の土壌汚れCCA標準試料の時間ごとの発光スペクトルを示す。LIBS法による測定面積はφ200~300μmと非常に小さいため、非破壊分析に近く、小さい試料にも対応できる利点を有するが、試料の偏析による測定値のバラツキが大きくなると考えられる。測定時間10secの場合、木材試料の測定深さは約500μmであり、深さ方向の分析が可能となり、表面汚れの影響を軽減できる。図に示した時間分画による発光スペクトルからも、測定初期に、土壌に含まれている鉄のピークが検出され¹⁴⁾、時間の経過とともにピーク強度が小さくなっており、逆にCCA処理木材中に含まれるクロムのピークは強度が大きくなっていることが分かる。CCA標準試料を土壌スラリー（30g土壌/100mL）に浸漬して作製した土壌汚れCCA標準試料の分析結果を表5に示す。表からクロ

ム、銅およびひ素の標準試料濃度とLIBS法の分析結果は良く一致しており、LIBS法は表面汚れが激しいCCA処理木材にも十分対応できることが分った。

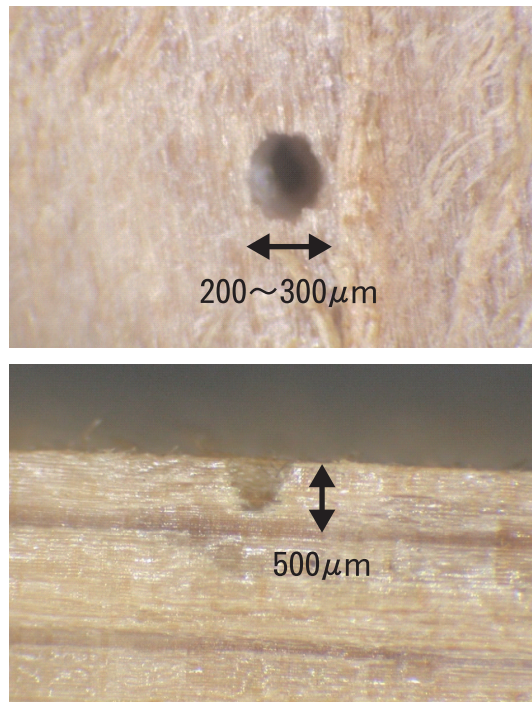


図6 LIBS測定部位写真 測定時間10sec

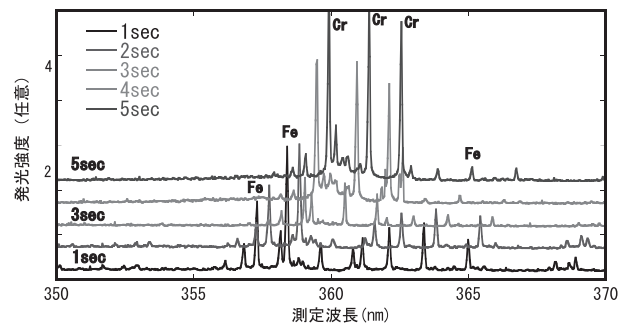


図7 土壌汚れCCA標準試料の発光スペクトル

表5 土壌汚れCCA標準試料分析結果

	標準試料濃度 (mg/kg)	LIBS法(mg/kg)
Cr	15500	15400±1800
	7400	9800±3600
	3000	4800±800
Cu	6800	6500±2800
	3200	4700±2000
	1300	1800±600
As	5200	5600±900
	2500	2500±500
	1000	1500±500

3.6 実試料を用いた判別試験

判別試験に使用したCCA処理木材は、処理施設ならびに家屋解体現場から収集し、針葉樹構造用製材の日本農林規格(旧JAS)の保存処理薬剤の定量法に準じて分析を行った。実試料の集計結果および写真を表6および図8に示す。実試料中の各元素は、ともに数10mg/kgから約5000mg/kgまでの含有量で、平均値は約1000mg/kgであった。正確に判別するためには数10mg/kgまで測定可能な高感度・高精度な分析が必要となることが確認された。実試料を用いて判別試験を行った結果を図9に示す。ひ素235.0nmを用いた判別は、CCA処理木材と無処理木材の発光強度にほとんど差が無く、ひ素含有量が1000mg/kgの試料でも無処理木材と同じ発光強度の場合もあった。先述したようにひ素の定量下限値は、400mg/kgであり、微粒子の散乱を受けやすい測定波長であるため判別精度が著しく悪かったと考えられる。銅324.8nmを用いた判別の場合、CCA処理木材と無処理の判別精度はひ素よりも良く、無処理の発光強度を下回るCCA処理木材は無かった。しかし、銅含有量が1000~1500mg/kgの試料で、無処理と同程度の発光強度を有する場合もあった。このことは、CCA処理木材を安全と誤判別する可能性もあることから、注意しなければならない。クロム359.3nmを用いた判別の場合、CCA処理木材と無処理の判別精度が悪く、無処理木材の発光強度を下回るCCA処理木材がいくつか存在した。試料の測定位置の影響もあるが、その原因を精査する必要がある。一方、クロム425.4nmを用いた判別の場合、CCA処理木材と無処理の判別精度が良く、無処理の発光強度を下回るCCA処理木材は無かった。この結果から、銅(324.8nm)またはクロム(425.4nm)の測定条件で、発光強度3000cpsで境界線を引くことにより、高い精度で判別できることが分かった。しかし、先述したように高いクロムおよび銅含有量にもかかわらず、発光強度が低くなる場合は、CCA処理木材が安全な建築廃材として誤判別される可能性があるため、注意する必要がある。このような試料について、樹種、測定部位の形状、バラツキ、表面含有量の偏析等を精査し、LIBS測定による高い発光強度が発生した要因を解明し、対処する必要がある。



図8 収集した実試料

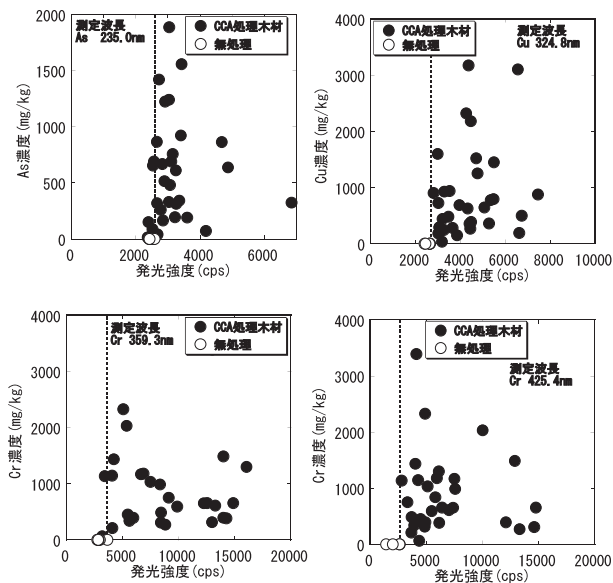


図9 各波長における実試料の判別結果

表6 収集した実試料の集計

	クロム	銅	ひ素
試料数(本)	34	34	34
平均値(mg/kg)	1299	919	927
最大値(mg/kg)	6315	4052	5268
最小値(mg/kg)	65	37	40

3.7 光ファイバーを用いたLIBS測定

本測定法を現場へ活用するため、LIBSシステムの可搬化の検討を行った。まず、測定部と検出部を離して設置し、光ファイバーを用いた遠隔操作による測定法を検討するため、レーザー照射後に発生するプラズマ発光を50mm径両凸レンズで集光し、光ファイバーで分光器およびICCD検出器に導入する光学系を検討した。図10に光ファイバーを使用したシステムによるクロム425nmおよび銅325nm付近の発光スペクトル測定結果を示す。図からCCA標準試料中のクロムおよび銅の高いピーク強度が認められ、光ファイバーを使用しても十分な測定ができることを確認した。さらに、図11に示すような光ファイバーの先に30mm径集光レンズを組み込んだシステムを試作し、3-6項の実験と同様に、実試料による判別試験を行った。その結果を図12および13に示す。図12および13から光ファイバーを用いたシステムによる実試料の判別は、先の結果と同様に判別できることが分かった。しかし集光レンズ内蔵光ファイバーを用いたシステムの発光強度は、レンズの小径化の影響もあり、固定型光ファイバーに比べて発光強度が減少し、強度不足が懸念される。レーザー出力の向上、光ファイバー径を大きくする、または本数を増やす等による発光強度の向上が必要であることが分かった。

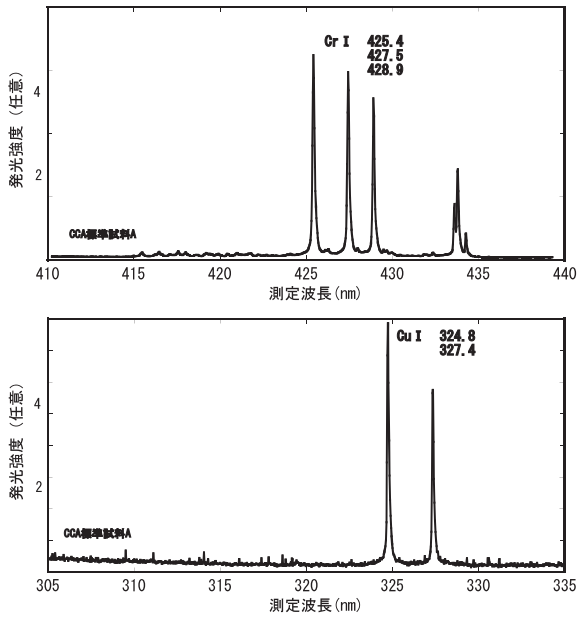


図10 光ファイバーを用いたLIBSによる発光スペクトル (上段：クロム425nm付近、下段：銅325nm付近)

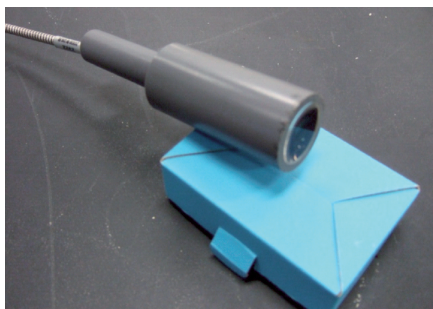


図11 30mm径集光レンズを組み込んだシステム

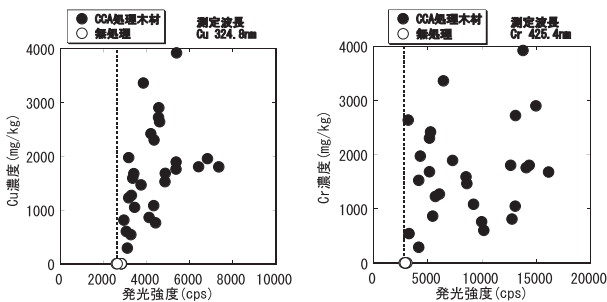


図12 光ファイバーを用いた判別結果 (銅324.8nm、クロム425.4nm)

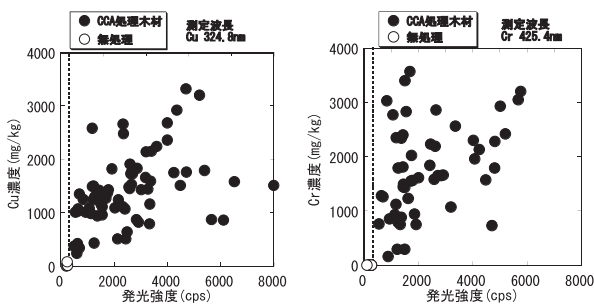


図13 集光レンズ内蔵光ファイバーを用いた判別結果 (銅324.8nm、クロム425.4nm)

3.8 検出器内蔵型の小型分光器を用いたLIBS装置の小型化

分光器、検出器の小型化について、図14に示すような装置を試作し、CCA処理木材判別用LIBS装置の小型化の可能性を調べた。金属クロム、金属銅およびCCA標準試料（クロム16000mg/kg、銅6000mg/kg）の測定結果を図15および16に示す。図から金属中の銅320nmおよびクロム360nm付近の発光スペクトルが認められ、さらにCCA標準試料中の銅およびクロムの発光スペクトルが確認された。小型分光器を用いたLIBSシステムによるCCA判別の可能性があることから、携帯型、小型化が期待される。

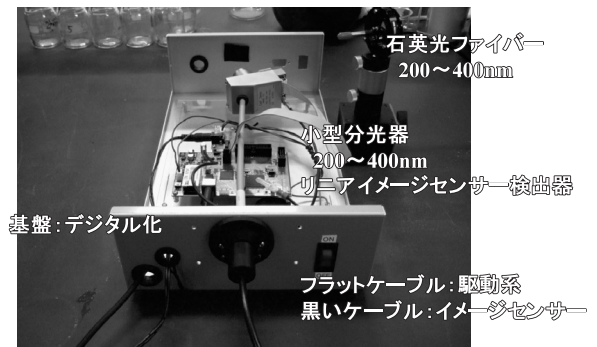


図14 試作した検出器内蔵型小型分光器

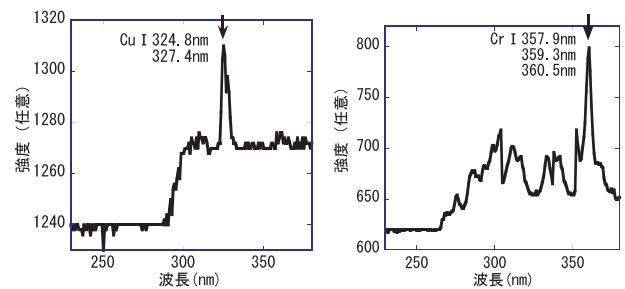


図15 小型分光器を用いた発光スペクトル (左：金属銅、 右：金属クロム)

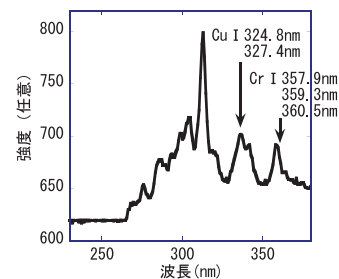


図16 小型分光器を用いた発光スペクトル (CCA標準試料)

4. まとめ

LIBS法を用いたCCA処理木材の判別方法を開発するため、LIBS測定における最適測定条件を決定し、実試料を用いた判別試験を行い、現場のニーズに応えた判別方法について検討した結果を下記に示す。

1) 減圧加圧処理によりCCA標準試料を作製し、クロム、銅およびひ素のLIBS測定を行い、クロムと銅は数mg/kgまで、ひ素は200mg/kgまで、正確に測定できることが分かった。

2) 樹種による発光強度の差異について検討した。銅およびクロムの定量下限値はベイツガが他の樹種よりも高いが、現場でのCCA標準試料をベイツガ試料に合わせることで、樹種の影響を受けずに判別可能である。また、各樹種の検量線の相関係数はすべて0.79以上であり、正確に測定できることが分かった。

3) CCA標準試料を土壌スラリーに浸漬して作製した土壌汚染CCA標準試料を分析した結果、クロム、銅およびひ素の標準試料濃度とLIBS法の分析結果は良く一致しており、LIBS法は表面汚れが激しいCCA処理木材にも十分対応できることが分かった。

4) 銅 (324.8nm) およびクロム (425.4nm) の判別条件を用いて、実試料の判別試験を行った結果、精度良く判別できることを確認した。

5) 光ファイバー等を用いた装置でも同様に測定可能であり、実試料の判別ができることを確認した。さらに、検出器内蔵小型分光器を用いたLIBS装置でも、クロムおよび銅の測定が可能であることから、CCA処理木材に特化した可搬型、小型化装置の可能性を見出した。

謝辞

本研究で使用したICP発光分光分析装置および蒸留水製造装置は(財)JKA補助事業により整備されました。記して感謝いたします。また、本研究は循環型社会形成推進事業科学研究費の補助金により研究を行いました。

引用文献

- 1) 清野新一：建物の解体・新築でどれだけ廃木材が発生するのか、林産試だより、8月号 (2002)
- 2) (財)日本建築センター：CCA処理木材の分別方法および処理技術に関する調査研究、(2002)
- 3) 国土交通省：建設副産物適正処理推進要項 (2002改訂)
- 4) 大畑昌輝：レーザーを励起源とした発光分光分析法、ぶんせき 6月号, p266-271 (2006)
- 5) 出口祥啓：微量金属モニタリング技術、化学工学会誌、

Vol.70, No.7, p351-353 (2006)

- 6) 安田憲二, 田中勝, 出口祥啓：CCA処理木材の連続選別技術に関する研究、第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p575-577 (2005)
- 7) 毎田充宏, 濱田智広, 桑子彰：レーザーブレイクダウン分光法による堆肥分析装置、東芝レビュー, Vol.60, p45-48 (2005)
- 8) 吉川典彦, 菅野望, 内藤昭仁, 金光一, 水野喜紀：レーザー誘起ブレイクダウン分光法による土壌微量元素と金属材料元素の濃度計測、金研ワークショップ要旨集, p12-14 (2008)
- 9) 島田温彦, 我妻和明：レーザー誘起プラズマ発光分析法における鉄-クロム合金の原子化及び励起挙動の解析と検量線の作成、分析化学, Vol.60, No.1, p59-65 (2011)
- 10) 原田明, 澤田嗣郎：レーザー分光分析, 丸善, (2009)
- 11) 蓼沼克嘉, 名取ゆり, 黒澤きよ子, Steve BUCKLEY：レーザー誘起分光分析法, ぶんせき, 第9号, p458-463 (2010)
- 12) 高橋徹, 富田恵一, 若杉郷臣：レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法を用いた防腐剤 (CCA) 処理木材の判別方法の開発、北海道立工業試験場報告, No308, p33-39 (2009)
- 13) 香川喜一郎, IDRIS Nasrullah:レーザープラズマ分光法による元素分析, The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Vol83, No5, p401-412 (2007)
- 14) A.Uhl, K.Loebe, L.Kreuchwig :Fast analysis of wood preservers using laser induced breakdown spectroscopy, Spectrochimica Acta Part B 56, p795-806 (2001)
- 15) 財団法人機械システム振興会：土壌環境汚染計測モニタリング機械システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書, (2006)