

論文

燃料としての木炭の品質評価に関する考察

兵道 健太*・藤井 義久**

Consideration about quality evaluation of charcoal as fuel

Kenta HYODO* and Yoshihisa FUJII**

本研究では、現在の木炭の評価方法である電気抵抗値から求める精練度や硬度の測定方法と同等の簡便さを確保しながら、より正確で、かつ非燃焼状態で燃料としての木炭の性能（炭化率や燃焼速度）を推定する新規な手法を検討した。

その結果、弾性波の伝搬速度が炭化率と共に増大する傾向があり、これを指標とすることで、硬度よりも客観的で、また電気抵抗測定よりも広範囲で炭化率を推定できることが示唆された。また木炭の断面空隙率が燃焼速度や時間と相関することが明らかになった。さらに木炭中を伝わる弾性波の周波数スペクトルの特徴から空隙の程度やさらには燃焼速度を推定できる可能性が示唆された。本研究から、木炭を軽く打撃し弾性波を発生および伝搬させ、その伝搬速度や周波数スペクトルを測定することで炭化率と燃焼速度を一度に推定できると考えられる。

キーワード：木炭、品質管理、燃焼速度、画像解析、弾性波

Nobel methods for the evaluation of wood charcoal as fuel were investigated. Speed of the elastic wave increased in accordance with the increase of carbonization degree. It was suggested that the carbonization degree could be estimated more precisely and in a wider range with the speed in comparison with the electric conductivity. The characteristics of the frequency spectrum of the elastic wave propagated in the charcoal revealed to change in correlation with the amount of cavity in the charcoal and as the result with the speed of combustion. It was suggested, both of the carbonization degree and the combustion speed could be estimated at once from the propagation speed and the frequency spectrum of the elastic wave generated and propagated in the charcoal by hammering.

Key words: Charcoal, quality evaluation, combustion speed, image analysis, elastic wave

はじめに

国産材、とりわけ未利用間伐材の有効利用の途を開くことが議論され始めて久しい。近年では間伐材を中心とする木質バイオマスのエネルギー利用に関する研究や開発も盛んである。その一方で、これらの利用では、設備投資や技術開発にかかるコストとエネルギーコストとのバランスが課題となると考えられ、より低コストでのエネルギー変換の途が求められる。日本で石油などの化石資源に依存する近代以前には薪や木炭利用が主流であった。特に木炭は、熱源として優れた性能を持つと考えられる。本研究では、まず未利用間伐材の燃料炭としての可能性を検討し、さらにそのために必要となる燃料としての木炭の品質の推定のための新規な指標の確立を目的とした。論文の前半では、未利用間伐材の生産量と、これから製造した木炭を、災害時の緊急時の熱源利用することを想定して、木炭の家庭用調理燃料としての可能性

を検討する。後半では、安定した高品質の燃料源としての木炭の確保のために必要となる燃料としての性能の推定方法について検討する。

1. 林地残材を原料とする木炭の利用の可能性

1.1. 国内の樹種別林地残材量の推定

林地残材とは、立木を丸太にする際に出る枝葉や梢端部分、森林外へ搬出されない間伐材等、林地に放置された残材である（林野庁 2013）。林業白書等によると、未利用間伐材等の林地残材は乾燥重量で年間約 800 万トン発生している（林野庁 2011a, 農林水産省 2010）。一方、本研究では、林地残材の木炭利用の可能性を詳しく検討するため、林地残材の樹種別量発生量（重量ベース）を推定した。なお推定には平成 20 年度のデータを用いた。

年間の立木伐採材積（主伐と間伐の合計量（立木から枝葉をとり、樹皮は残した状態、民有林は推定値））は

* 兼房株式会社、愛知県丹羽郡大口町中小口

** 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻、京都市左京区北白川追分町

* Kanefusa Corporation Nakakoguchi 1-1, Oguchi, Niwa, 480-0192, Aichi, Japan

** Graduate School of Agriculture, Kyoto University Kitashirakawa, Oiwake, Sakyo, 606-8502, Kyoto Japan

4119 万 m³であった（林野庁 2011b）。間伐材の利用量は 566 万 m³で、伐採量に対する利用割合は約 3 割とされている（林野庁 2011a）。間伐材利用量を 0.3 で除すると、間伐材の伐採量として 1887 万 m³が得られる。さらに伐採量と利用量との差である 1321 万 m³が、未利用の間伐材の総量と推定される。さらに間伐材積の樹種別量は人工林の樹種別割合（林野庁 2011b）に準ずると考えると、未利用間伐材における針葉樹（スギ、ヒノキおよびマツ類・その他）と広葉樹の 4 種のカテゴリーの割合が推定できる。具体的には人工林の樹種別蓄積割合に応じて先の 1321 万 m³を按分することによって、未利用間伐材の樹種別量（材積ベース）が求められる。さらにこれにそれぞれの容積密度数（「マツ類・その他」はアカマツ、広葉樹はブナとミズナラの平均値をそれぞれ代表値として用いた）（伏谷賢美他, 1985）を乗じて、樹種別の絶乾重量を求めた。その結果未利用間伐材の発生量として 837 万トン（絶乾重量）を得た（表 1）。

表 1 林地残材の乾燥質量の推定値（単位：万トン）
Table 1. Estimated total weight (dry) of forest residues (10 thousand ton).

計	針葉樹			広葉樹
	スギ	ヒノキ	マツ類・その他	
837	421	189	187	40

1. 2. 木質燃料の形態

木質燃料のうち最も一般的なものは薪である。その他に木材を細かく砕いたチップ、おが粉等を 15mm 程度の小さな円筒状に成形した木質ペレット、木材を炭化させた木炭がある。薪、チップ、木質ペレットはいずれも木材を燃料として利用しやすいように加工したものであるが、これらは保存中に腐朽するといった劣化のリスクがある。それに対し木炭は炭化しているため腐らず保存性がよい。1kg 当たりの発熱量は薪、チップで 1890kcal/生 kg、木質ペレットで 4000kcal/kg、木炭で 8000kcal/kg である（林野庁 2011a, 福山伍郎他 1953）。また木炭は他に比べて比重が低い、管理・運搬しやすい、安定した火力で燃焼が持続する、燃焼時の煙と臭いが少ないなどの利点をもつので、林地残材を燃料として利用する場合には、木炭としての利用が有効な一つの手法と考えられる。

1. 3. 林地残材を燃料炭としたときの生産量と発熱量の試算

仮にすべての林地残材を木炭に代えられと仮定し、そこから生産できる木炭の質量と発熱量を試算した結

果、以下のようになった。

$$\begin{aligned} \text{生産可能な木炭の重量（年間）} &= \text{林地残材の重量} \times \text{木炭の収率} \\ &= 838 \text{ 万トン} \times 0.25 = 209 \text{ 万トン} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{木炭の発熱量（年間）} &= (1) \text{ 式} \times \text{木炭の重量あたり発熱量} \\ &= 209 \times 10^7 \times 32.6 \times 10^6 = 6.8 \text{ 万 TJ} \quad (2) \end{aligned}$$

ここで林地残材の重量には表 1 の推定値を用いた。なお木炭製造時には通常、丸太から樹皮は除かず枝葉は除くが、前述のように表 1 の値を計算する過程もこれを前提としており、木炭化しうる林地残材の絶乾重量の推定値として表 1 の値を用いて差し支えないと考えられる。収率については、絶乾状態のスギ、ミズナラを無酸素状態、最高温度 1000℃で炭化した時の収率がそれぞれ 25%、25.1%であったという知見がある（鹿野厚子 2004, 福山伍郎他 1954）。針葉樹と広葉樹に収率の差が認められなかったため、(1) 式では収率を 25%とした。さらに 1000℃で炭化した木炭の 1kg 当たりの発熱量として約 7800cal/kg が得られた（福山伍郎他 1954）。熱量の単位を J で換算し（1cal=4.184J）、(2) 式では 1kg 当たりの発熱量を 32.6MJ/kg とした。以上の計算から林地残材を燃料炭としたときの生産量として 209 万トン、発熱量で 6.8 万 TJ を得た。

1. 4. エネルギー需給からみた木炭の利用可能性

試算された 6.8 万 TJ が日本のエネルギー需要に対し、どれほど寄与できるかを確認するために、資源エネルギー庁の統計表の「エネルギーバランス表、2010 年度」（資源エネルギー庁 2012a）および「エネルギー白書 2011」（資源エネルギー庁 2012b）を参考にして検討した。これらによると、日本の総供給エネルギーは 2312 万 TJ であり、そのうち民生部門エネルギーは 497 万 TJ で、さらにそのうち家庭部門エネルギーは 215 万 TJ であった。家庭部門エネルギーのうち、厨房用エネルギー消費量は家庭部門エネルギーの 8.1%で 17.4 万 TJ であった。木炭すべてを家庭調理用燃料としたとき、木炭は厨房用エネルギー消費量の約 39%を賄えることになる。しかし、これは十分な量であるとは言えない。また現代人の生活スタイルを鑑みると、木炭を日常の燃料、特に家庭用燃料として利用することは難しい。

前述したように木炭は保存性がよく、1kg 当たりの発熱量が大きいので、「日常」に対して「非常」の場合の燃料としての可能性があると考えられる。すなわち、木炭には災害時に電気やガスなどの供給が停止した時に用いることのできる熱源としての可能性があると考えられ

る。木炭の災害時の利用については東日本大震災発生時、木炭・木炭コンロ等が被災地に提供されたという事例がある。林地残材を山土場などで炭にし、これを都市などに供給・保存し、災害時のための備蓄燃料として用いることが考えられる。

2. 木炭の性質に関する知見

2. 1. 木炭の種類

木炭は、黒炭、白炭、オガ炭に分類される。黒炭や白炭は、原木を切る、割るなどして長さや太さをそろえて炭化したもの、オガ炭は原料を一度おがくずとしたものを整形し、炭化したものである。

黒炭と白炭では製造方法が異なる。木炭の製造方法や窯は地域によって様々であるが、原料を炭化する工程は、点火、炭化、精煉（ねらし）および冷却からなる。原木は一般に、窯内に立てて敷き詰められ、焚き口で焚き木を燃やして窯内の温度を上げ（点火）、温度が十分に上がった後窯口を閉め空気を絶つ（炭化）。さらに十分時間が経った後、炭化の仕上げに窯口を開け空気を送り込み、燃焼を促進させ温度を上げる（精煉）。黒炭の精煉では窯内の温度を約 800℃にした後、窯口や煙突などの穴を完全に塞ぎ、自然冷却する。白炭の精煉では黒炭と比較してより多くの空気を入れ、窯内の温度を約 1000℃にする。その後、高温のまま木炭を窯から取り出し、消し灰と呼ばれる湿った灰をかけ、一気に冷却する。この灰が木炭表面に付き、木炭が白くなるので白炭と呼ばれる。黒炭と白炭で精煉、冷却の工程が異なるため木炭を製造する窯も異なる。どちらの窯も大部分が粘土で作られており、窯口など一部が石で作られている。黒炭窯には冷却時などに発生する水分を排出するための排水口がある一方、白炭窯は煙突の径が小さく、高温に耐えるために石が多く使われている（谷田貝光克 2007）。精煉で木炭はより均質、高炭素含有率になる、とされている。

2. 2. 木炭の炭化温度と性質

木炭を炭化したときの最高温度を炭化温度という。木炭の性質は炭化温度によって変化することが知られている。炭化温度上昇に伴う変化には、炭素化収率（以下、炭化率）の増加、質量の減少、寸法収縮、単位重量当たりの発熱量の増加、硬度の増加、電気抵抗の減少などがある。木材の道管や仮道管などから成る構造は収縮しているがそのまま残っている。

炭化温度 600℃までは炭化率と発熱量はともに大きく増加し、それぞれ約 90%、約 32.2MJ/kg となる（福山

伍郎他 1954）。それ以降炭素含有率は緩やかに増加し、炭化温度 1000℃で約 96% となるが、発熱量はほとんど変化しない。炭化温度が上がるほど炭化率が高くなり、不純物の少ない上質な木炭ができるといえる。

これまで炭化温度と電気抵抗との関係が調べられており（岸本定吉他 1951、遠藤昌之他 2010）、比抵抗（電気抵抗率（ $\Omega \cdot m$ ））、接触抵抗（端子間隔 1cm で測定した表面電気抵抗（ Ω / cm ））が明らかになっている。炭化温度約 800℃までは電気抵抗は小さくなり、それ以降は炭化温度上昇に伴わずかに小さくなっていく。これは炭化温度上昇に伴い炭化率が増加し、不純物が少なくなり、電気を通しやすくなるためである。

2. 3. 木炭の燃料としての品質評価法の現状と本研究の目的

木炭の製造、特に針葉樹をはじめとする広葉樹以外の原料からの木炭の製造では品質の管理や改善が求められる（佐藤清仁他 2001、大竹哲也他 2009）。管理、改善すべき項目として単位重量当たりの発熱量が挙げられる。また木炭を炊事などに利用する場合には、いかに発熱量が高くても短時間で燃え尽きてしまうのでは利用に値しないので、いわゆる火持ちも重要である。よって燃料としての性能の指標としては発熱量と火持ちが考えられる。以下これらについて考察する。

木炭の発熱量は炭化率と関係すると考えられる。炭化率に関係し、簡便的にその推定方法として用いられる量としては、電気抵抗値から求める精錬度やひっかき法によって求めた硬度がある。上述のように炭化温度上昇に伴い炭化率が高くなること、電気抵抗が小さくなることがわかっている。精錬度はこれを利用した指標で（岸本定吉他 1951）、端子間隔 1cm で測定した表面電気抵抗値の常用対数値である。精錬度は木炭の炭化率を 0 から 9 の 10 段階で推定する。精錬度の数字が小さいほど、電気抵抗値は低く、炭化率が高い。木炭の電気抵抗値は、炭化率が低いときは高抵抗計で測定しなければならない程の高い値を示し、炭化温度の上昇にともない急激に低くなり、測定には低抵抗計が必要になる。特に炭化温度が約 800℃を超えると炭素含有率の変化が小さくなり、電気抵抗値の変化も小さくなり、測定が難しくなる。

一方、炭化率が低い炭では不純物の分布は材の組織構造の異方性と関係して存在し、電気抵抗率の異方性が強く現れ、炭化率が増すと不純物の量が減り電気抵抗率の異方性が低下すると考えられる。電気抵抗率と炭化率との関連性は明確ではないとされているが、上述の仮定が正しければ、電気抵抗率の異方性が炭化率と関連して変化する可能性があると考えられる。さらに電気抵抗率の

異方性の値は、1桁の変化範囲に収まり、変化幅の大きな電気抵抗率に比べて数量化が容易になると考えられる。本研究ではまず電気抵抗率の異方性による炭化率の推定の可能性を検討した。

また木炭は、炭化温度上昇に伴い硬さが増すと述べたが、それを利用した指標に硬度がある。硬さは炭化温度だけではなく原料にも左右され、原料に硬い木材を使用した木炭ほど硬い。また硬度の判定は所定の金属片でひっかいたときに傷ができるかを目視でおこなうため、測定者によって結果に差が出るという問題点がある。本研究では続いて、木炭の硬度や弾性に関する量として弾性波の伝搬速度を検討した。

木炭の火持ちといった概念や、それを推定する手法は現状ではみあたらない。木炭が発火後、一気にその熱量を消費しては使いにくいし、長時間燃焼したとしても瞬時に発生する熱量が低すぎては使いにくい。木炭には、総発熱量が一定であれば、調理などに必要な熱量が持続的に安定して発生することが期待される。これが火持ちの実態と考えられる。火持ちに関係すると考えられる量としては、燃焼時間や燃焼速度を挙げうる。これらの量は実際に木炭を燃焼しないと求めることはできないが、その一方でこれらに関係する量としては木炭内部の空隙率や表面積が考えられる（山田善之他 2003）。すなわち木炭とその燃焼に必要な空気との接触面積の大小が燃焼速度に関係すると考えられる。本研究では非燃焼状態で推定できる空隙率や表面積と燃焼速度との関係を検討した。さらに空隙量を簡便に推定する方法として、木炭中を伝わる弾性波の周波数スペクトルの特徴と燃焼速度との関係を検討した。

3. 炭化率の測定方法の検討

本節では木炭の燃料としての2つの性能のうち、発熱量と関連する炭素化収率（以下、炭化率）について、これと相関すると考えられている電気抵抗率や硬度の他に、新規に弾性波の伝搬速度を検討した。試料には、3種類の白炭（紀州備長炭（原料：ウバメガシ、和歌山県産）、日向備長炭（カシ類、宮崎県産）、神鍋白炭（広葉樹、兵庫県産））および3種類の黒炭（ナラ木炭（ナラ類、岩手県産）、土佐木炭（カシ類、高知県産）、切炭（ヒノキ、岐阜県産））を用いた。

3.1. 測定方法

各木炭ごとに一辺10mmの立方体の試料を5個ずつ切り出し、乾燥機中で2日間以上乾燥させ、絶乾状態とした。試料の繊維方向L、半径方向R、接線方向Tの長

さを測定し、続いて電気抵抗値を絶縁抵抗計（HIOKI, 3454-11, 最大表示値4000M Ω 、分解能4桁）および低抵抗計（HIOKI, 3540 ミリオームハイテスタ、分解能4桁）を用いて測定した。電気抵抗値の測定は、試料をステンレス板で挟み、ミノムシクリップ線を介し各種抵抗計に接続しておこなった。得られた電気抵抗値から、電気抵抗率（ $\Omega \cdot m$ ）およびその異方度を求めた。

硬度の測定には、木炭硬度計を用いた。木炭硬度計は、木炭等の生産者や研究者からなる研究会である「炭やきの会」（東京都）から販売されているもので、小刀状の6種類の金属片で構成されており、それぞれ硬さの異なる金属で製造されている。金属片には柔らかい順に1～6の番号が振られている。木炭を割って現れた木口面を各金属片でひっかいたときに、木炭表面に傷ができるかどうかを目視で判断し、傷ができた最大の番号と傷ができなかった最小の番号との平均値を硬度とする。硬度の値が大きいほど硬いことを示す。

弾性波伝搬速度の測定では、まず木炭の繊維方向と半径方向（長径）の長さをメジャーで測定し、可搬型の弾性波伝搬時間測定装置ウッドポールテスター（岩倉電線製）を用いて各方向の弾性波伝搬時間を測定した。長さを伝搬時間で除して、伝搬速度（m/s）を求めた。

3.2. 結果

3.2.1 電気抵抗率とその異方性

表2に、各木炭の電気抵抗率と変動係数を示す。白炭類の電気抵抗率はおおよそ $10^2 \Omega \cdot m$ 程度であり、黒炭類では、ナラ木炭で 10^6 から $10^7 \Omega \cdot m$ であった。切炭は電気抵抗値が非常に大きく今回用いた抵抗計では測定できなかった。紀州備長炭と日向備長炭の変動係数は20～40%であったが、その他では100%を超えた。紀州備長炭と日向備長炭では個体間の電気抵抗率の差は小さかったが、神鍋白炭、ナラ木炭や土佐木炭では個体間で電気抵抗率に10～1000倍の差があった。

続いてすべての試料について、電気抵抗率の6種類の異方度（R/L, T/L, L/R, T/R, L/T, R/T）を計算した（表3）。このうちR/LとL/Rなどのように分子と分母が入れ替わった組み合わせについては、異方度が1以上になっているR/L, T/L, T/Rの3つを検討した。すべての試料についての異方度R/L, T/L, T/Rの平均値はそれぞれ1.33, 1.27, 1.14であり、このことから電気抵抗率には明らかな異方性があると推定できた。これを統計的に検証するために、正規確率プロットを用いて、標本データの正規性を吟味した結果、異方度は正規分布に従うと判断できた。異方度の平均値が1に対して有意な差をもてば、異方度が存在すると考えられる。異方度

表2 電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$) の測定結果
Table 2 Measured values of electric resistivity ($\Omega \cdot m$) of charcoal.

種類	名称	原木	産地	電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$)			変動係数 (%)
				平均値	最大値	最小値	
白炭	紀州備長炭	ウバメガシ	和歌山	1.58×10^2	3.64×10^2	6.31×10^3	38
白炭	日向備長炭	カシ類	宮崎	1.25×10^2	2.13×10^2	5.88×10^3	24
白炭	神鍋白炭	広葉樹	兵庫	5.85×10^2	3.57×10^2	7.20×10^3	104
黒炭	ナラ木炭	ナラ類	岩手	1.70×10^6	1.10×10^7	8.53×10^1	155
黒炭	土佐木炭	カシ類	高知	1.22×10^7	5.39×10^7	6.95×10^4	124
黒炭	切炭	ヒノキ	岐阜	—	—	—	—

切炭（ヒノキ）は電気抵抗値が大きく、測定限界外であった。

表3 電気抵抗率の異方度
Table 3. Anisotropy in electric resistivity

	R/L	T/L	L/R	T/R	L/T	R/T
標本数	360	360	360	360	360	360
平均値	1.33	1.27	0.89	1.14	0.91	1.06
標準偏差	0.62	0.51	0.35	0.55	0.37	0.44
中央値	1.15	1.15	0.87	1.00	0.87	1.00
最大値	4.77	3.07	2.25	3.73	2.86	2.75
最小値	0.45	0.35	0.21	0.36	0.33	0.27
範囲	4.33	2.72	2.04	3.37	2.53	2.49
変動係数 (%)	47	40	39	48	40	42

L: 繊維方向, R: 放射方向, T: 接線方向

の平均値の95%信頼区間を求めた結果、R/Lでは1.26～1.39、T/Lでは1.22～1.32、T/Rでは1.08～1.19となり、異方度が存在すると判断した。続いて電気抵抗率の異方度が炭化率（ここでは便宜的に電気抵抗率）に伴って変化するかを検討するにあたり、試料を白炭（グループ1）、電気抵抗率の低い黒炭（同2）、高い黒炭（同3）の3グループに分けた。図1に各グループの電気抵抗率と異方度との関係を示すが、両者の間に傾向はみられなかった。

3.2.2 硬度および弾性波伝搬速度

図2上に硬度と炭化率の指標としての電気抵抗率との関係を示す。電気抵抗率は各木炭の平均値を用いた。切炭は電気抵抗値が非常に大きく測定できなかったため、ここでは電気抵抗値を測定限界値の4000M Ω と仮定し、そのときの電気抵抗率である $4 \times 10^7 \Omega \cdot m$ をプロットした。電気抵抗率が低い木炭のほうが硬度は大きく、またその硬度は約4.5～6.5の範囲にあり、電気抵抗率の高いものは約0.5～2.5の範囲にあった。図2下に弾性波伝搬速度と炭化率の指標としての電気抵抗率との関係

を示す。電気抵抗率が低いほど弾性波伝搬速度が速くなる傾向がみられた。その傾向は繊維方向のほうが半径方向よりも強くみられた。

3.3. 考察

切炭（ヒノキ）の電気抵抗率は、測定限界の電気抵抗率 $4 \times 10^7 \Omega \cdot m$ よりも大きかった。このことは、スギやヒノキなどの針葉樹間伐材でできた木炭の炭化率の推定には電気抵抗計以外の方法を考案する必要があることを示唆している。また神鍋白炭、ナラ木炭や土佐木炭で個体間の電気抵抗率のばらつきが大きく、変動係数が100%を超えた。この原因としては、原料の品質や炭化プロセスの差が考えられる。さらに電気抵抗率がきわめて限られた範囲での測定値から得られたものあることや、測定端子の接触のさせ方によって値が変動しやすいことなども影響していると考えられる。このことは電気抵抗率による炭化率の推定方法には改善が必要であることを意味する。

各グループの異方度から電気抵抗率L、R、Tの大小関係をみると、グループ1では $T \geq R > L$ であり、グループ2では $T > R > L$ であり、グループ3では $R > T \approx L$ であり、炭化率の変化にともない異方度にはある程度の変化が認められる。炭化率に依らず繊維方向Lの電気抵抗率は他の2方向の電気抵抗率より小さいが、炭化率の上昇にともない接線方向Tの電気抵抗率と他の2つの電気抵抗率の大小関係に変化が生じている。このことから木炭は繊維方向に電流を流しやすい異方性をもっていること、炭化率の上昇による電気抵抗率の低下の様子は各方向で異なることが考えられる。しかし、図1が示すように全体的には電気抵抗率と異方度との間には明らかな傾向は認められなかった。この理由として、炭化によって木材組織が収縮した結果、繊維方向、放射方向および接線方向の各断面における炭化部分の存在比率の差が小さくなり、各断面で電気抵抗を担う要素の割合の

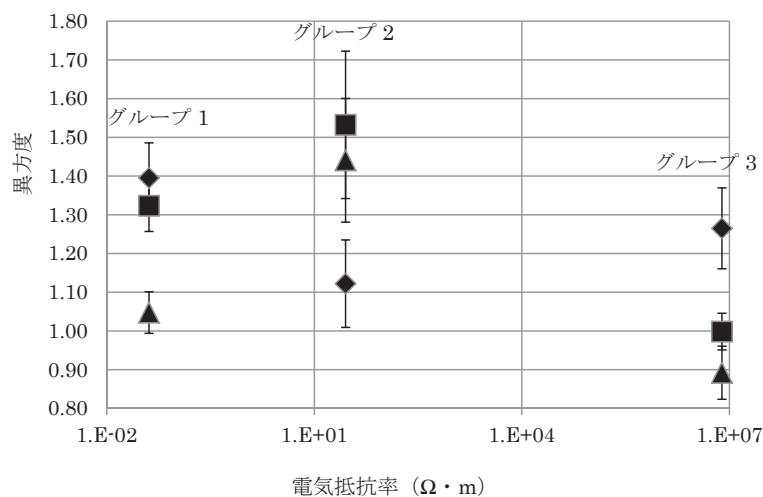


図1 木炭の電気抵抗率と異方度
Figure 1. Electric resistivity and its anisotropy of charcoals.
(◆ : R/L, ■ : T/L, ▲ : T/R)

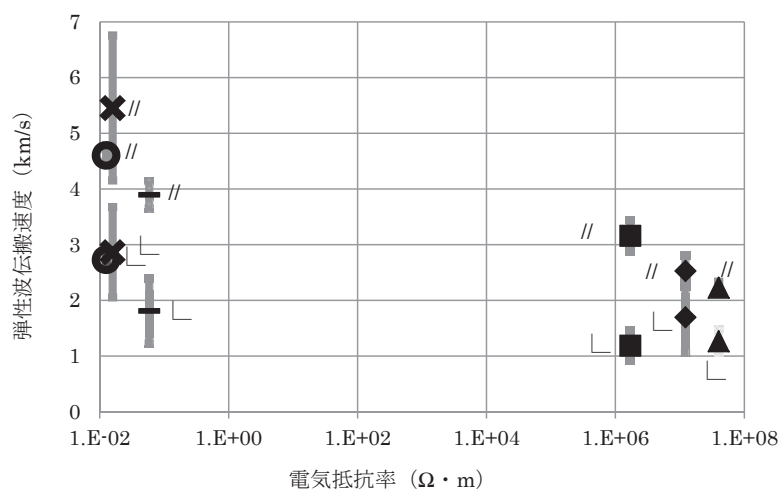
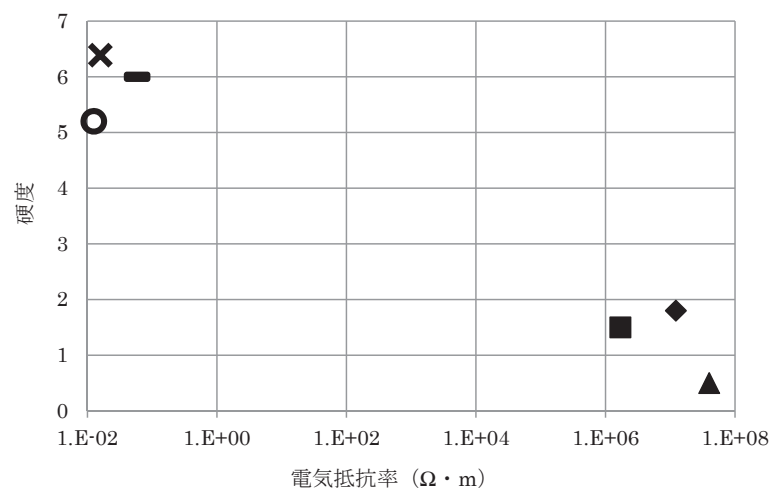


図2 木炭の電気抵抗率と硬度（上）および弾性波伝搬速度（下）との関係
Figure 2. Relationships between hardness (upper), speed of elastic wave (lower) and electric resistivity

// は繊維方向, / は半径方向の弾性波伝搬速度を示す.

× : 紀州備長炭, ○ : 日向備長炭, - : 神鍋白炭,

■ : ナラ木炭, ◆ : 土佐木炭, ▲ : 切炭

※切炭は測定限界である $4 \times 10^7 \Omega \cdot m$ の位置にプロットした.

差が小さくなったこと、さらにこのことが炭化率によらず発生したことが考えられる。

弾性波伝搬速度は電気抵抗値が測定できなかった切炭でも測定が可能であったため、電気抵抗率よりも測定範囲の広い推定方法であるといえる。またひっかき試験による硬度よりも客観的な測定ができ、精度が高いと思われる。弾性波伝搬速度は体積変形のしにくさである体積弾性率と相関があり、弾性波伝搬速度の速かった炭化率の高い木炭ほど変形しにくい、つまり硬い炭であるといえる。これは炭化率が上がると硬度が増すことと一致している。

本研究では、炭化率に関係すると考えられるいくつかの推定方法を比較検討した。それぞれの手法に誤差があることや、また本研究では真の炭化率との関係で各手法を検証したわけでないことから各手法の優劣を述べるのができないが、従来用いられてきた硬度や電気抵抗以外に、弾性波の伝搬速度も指標となりうることが示唆された。

4. 火持ちの推定方法の検討

前節では木炭の燃料としての2つの性能のうち、発熱量と関連する炭素率の計測方法について検討した。また2節では、火持ちについて検討し、これと関連する量として燃焼時間や燃焼速度があり、さらにこれらは木炭と空気との接触面積に依存すると考察した。そこでまず木炭内部の空隙量を画像処理によって推定し、画像処理のパラメータと燃焼速度との関係を考察した。さらに木炭中を伝わる弾性波の周波数スペクトルの特徴から、木炭中の空隙の存在量や燃焼速度を推定する手法の可能性を検討した。

4.1. 画像処理による木炭の空隙量の推定

木炭内部の空隙の量を、X線CT画像や顕微鏡による観察画像を画像処理によって推定した。ここで木炭の木口断面の画像から得られる空隙の面積や周囲長は、内部の空隙の体積や表面積と相関すると考えられるので、木炭の各横断面画像において空隙部分を抽出し、空隙部の総面積や総周囲長を空隙の体積や表面積の指標とした。試料には前節と同じ木炭を用いた。木炭の組織構造を観察するために、マイクロフォーカスX線CT装置(SMX-160CTS, 島津製作所)モニタマイクロスコープ(VW-6000, KEYENCE)および走査電子顕微鏡(JSM-6060, 日本電子株式会社)を用いた。

X線CT撮像は2種類の倍率(低倍, 高倍)でおこなった。低倍の撮像条件はSIDを400mm, SODを26mm

とし、高倍ではSIDを400mm, SODを6mmとして、いずれも管電圧60kV, オフセット無し, ビュー数1200, 平均回数16, ハーフスキンの条件で撮像した。モニタマイクロスコープでの撮影では、倍率150倍と倍率800倍の2種類でおこなった。SEM撮影では、一辺10mmの立方体の試料を超音波洗浄機を用いて、洗浄した後、乾燥機中で2日間以上乾燥させ、絶乾状態としたものを用いた。白炭についてはそのまま、黒炭については表面を金蒸着し、倍率は50倍と500倍とでおこなった。

3種類の方法で、木炭の組織構造を観察したが、モニタマイクロスコープ画像は被写界深度が浅く、十分鮮明な画像を得ることができず、画像処理には適さなかった。X線CT画像は、画像のグレースケール値のヒストグラムにおいて空隙部分のピークと木炭実質のそれが重なり、画像処理において両者を区別することは困難であった。結果的に両者のピークの分離性の高いSEM画像について画像処理を行った(図3)。

本実験で得られたSEM画像は1280×960pixelであり、50倍および500倍で撮影した画像のピクセルサイズはそれぞれ1.97 μm , 0.197 μm となる。一方炭化温度1000℃の木炭の空隙は、原料の細胞を直径10 μm の円とし、製炭による半径方向および接線方向の収縮率がそれぞれ32.1%, 41.3%(福山伍郎他 1954)であることを考慮すると、長径6.79 μm , 短径5.87 μm 程度の楕円となりうる。この楕円の短径は50倍の画像上でも約3pixel, 500倍の画像では約30pixelに相当し、どちらも画像処理によって定量的な解析が可能と考えられる。本研究ではより平均的な空隙量を求めるために50倍の画像で推定した。

画像処理ソフトImageJ®で50倍のSEM画像を二値化処理し、空隙部分を閉曲線の集合体として認識し、さらにAnalyze Particlesコマンドを用いて処理し、空隙部分の総面積と総周囲長を得た。さらにこれらを画像の面積で除して木炭の木口面積1mm²当たりの空隙の面積(断面空隙率)と周囲長(比周囲長)を求めた。処理後の画像とその拡大画像を図4に示す。図中の黒線は、画像処理によって認識された個々の空隙の外周である。拡大画像から、空隙部が適切に認識されていることがわかる。

4.2. 弾性波の周波数スペクトルの分析

木炭の一方の木口面にFFT分析器(SA-78, リオン株式会社)に接続した圧電式加速度ピックアップ(PV-41, リオン株式会社)をクランプで固定した。反対側の木口面を金属棒で軽く打撃し、木炭中を繊維方向に伝搬する弾性波をピックアップで検出し、その時間軸波形および

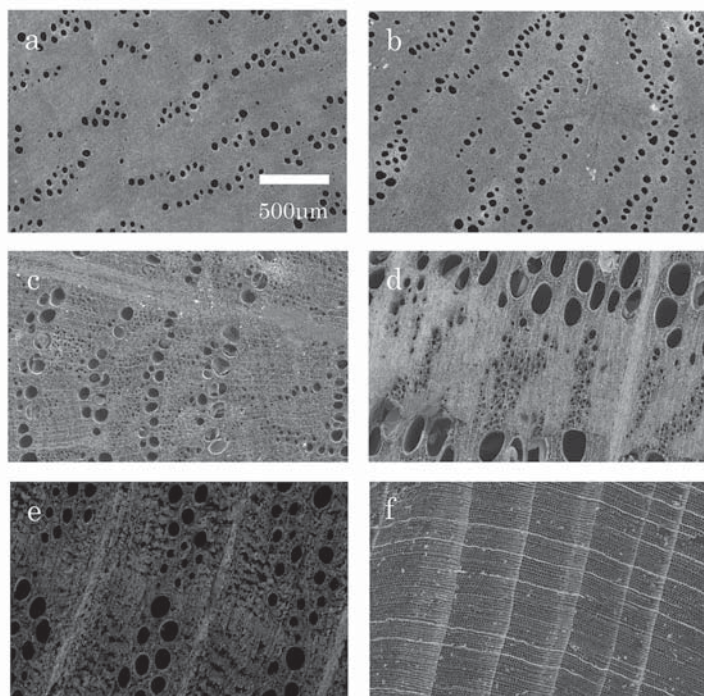


図3 木炭の木口面のSEM画像

Figure 3. SEM image of crosscut section of charcoal.

a: 紀州備長炭, b: 日向備長炭, c: 神鍋白炭, d: ナラ木炭, e: 土佐木炭, f: 切炭

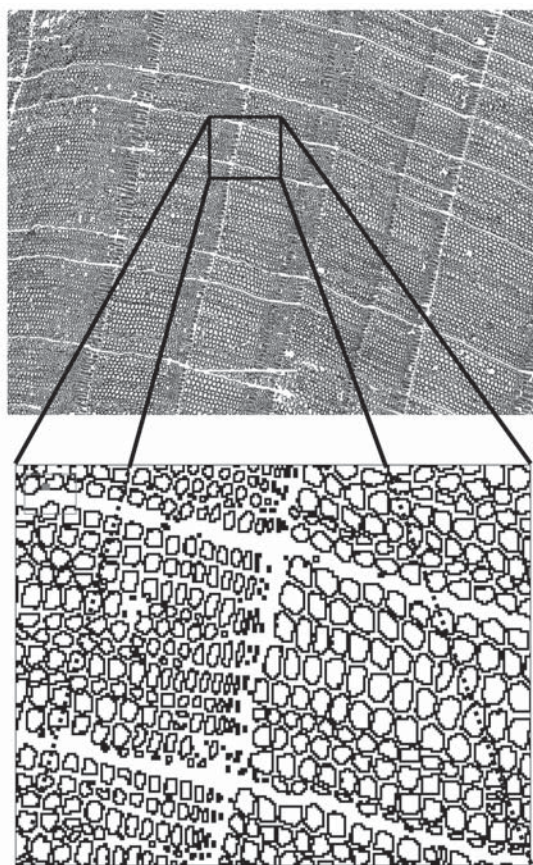


図4 切炭木口断面の画像処理結果

Figure 4. Result of image analysis of crosscut section of charcoal.
処理後の画像（上）とその拡大画像（下）

周波数スペクトル（20回平均）を記録し、保存した。

4.3 燃焼実験

質量を測定した木炭をマッフル炉（KDF S90，株式会社デンケン）で燃焼させた。設定温度500℃，昇温時間10分，保持時間0分に設定して炉の運転を開始すると同時に，木炭の木口面をガスコンロで加熱し着火した。昇温を経て自然冷却状態になった炉に着火した木炭を入れ，ファンで空気を送り込み，炉内温度を測定しながら60分間放置した。その後，木炭を取り出し，燃焼状態のまま質量を測定し，水に浸けて消火した。60分間の放置前後の質量の差から，木炭の質量減少量を求め，放置時間で除して燃焼速度を求めた。また放置前後の温度の差を放置時間（60分）で除して温度減少速度も求めた。

4.4 結果と考察

4節の冒頭において，木炭の燃焼速度は木炭と空気との接触面積に依存するため，木炭内部の空隙量と燃焼速度との関係を検討する意義を説明した。ここでは，まず空隙量と炭化率の指標としての電気抵抗率を介して空隙量と燃焼速度との関係を検討した（図5）。図5上は，空隙量と電気抵抗率との関係を示す。電気抵抗率の低い木炭で断面空隙率は小さくなる傾向が認められた。一方，図示していないが，電気抵抗率と比周囲長との間に相関は認められなかった。電気抵抗値が測定できなかった切炭

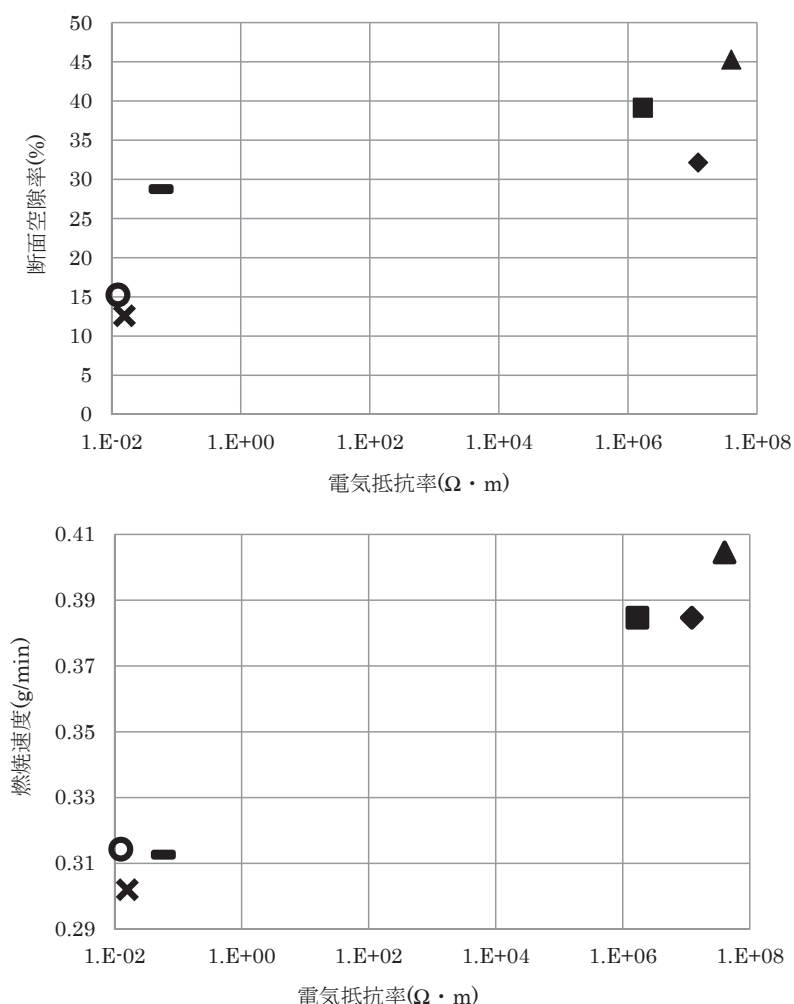


図5 電気抵抗率と断面空隙率（上）や燃焼速度（下）との関係

Figure 5. Relationships between void ratio of crosscut section, combustion speed and electric resistivity
 プロットは図2参照. ※切炭は測定限界である $4 \times 10^7 \Omega \cdot m$ の位置にプロットした.

(ヒノキ) も空隙量は測定できたため、空隙量は電気抵抗率よりも推定できる範囲が広いといえる。白炭のうちカシ類を原料とする紀州備長炭や日向備長炭は、カシ類以外を原料とする神鍋白炭より空隙率は小さかった。電気抵抗率では白炭間の差は明らかではないが、断面空隙率では原料の違いによる差が検出されることが示された。

図5下に得られた燃焼速度と電気抵抗率との関係を示す。燃焼速度は電気抵抗率の低い白炭で遅く、抵抗率の高い黒炭で速かった。一方、図示していないが、温度減少速度と電気抵抗率との間に相関は認められなかった。これは今回の実験では、燃焼実験に用いた木炭片の大きさが一定ではなく、燃焼中の炭の温度変化が、空隙量のみには依存しなかったためと考えられる。今後より厳密な実験によって検証する必要があると考えられる。

図6に断面空隙率と燃焼速度との関係を示す。断面空

隙率の増加とともに燃焼速度が速くなることがわかった。一方、図示していないが、比周囲長と燃焼速度との関係は明らかではなかった。黒炭のような空隙率の大きな木炭は、空気と触れやすく、燃焼速度が速く、火持ちは悪いと考えられる一方、空隙率の小さな白炭は火持ちはよいと推定されうる。図はこの推定を支持していると考えられる。以上のように空隙の体積（率）で燃焼速度を推定できる可能性が示唆されたが、顕微鏡画像から断面空隙率を求めるのは簡便とはいえない。

そこでより簡便な空隙率の推定の手法として、本研究では空隙率によって変化すると考えられる弾性波の伝搬特性に着目した。一般に均質で稠密な材料であれば、材料内を伝搬する弾性波は材料の密度や弾性定数に依存して決まるいくつかの単純なモード（固有振動モード）によって構成される。一方、大きさの異なる多数の空隙の存在する材料では、空隙の分布によって振動モードが複

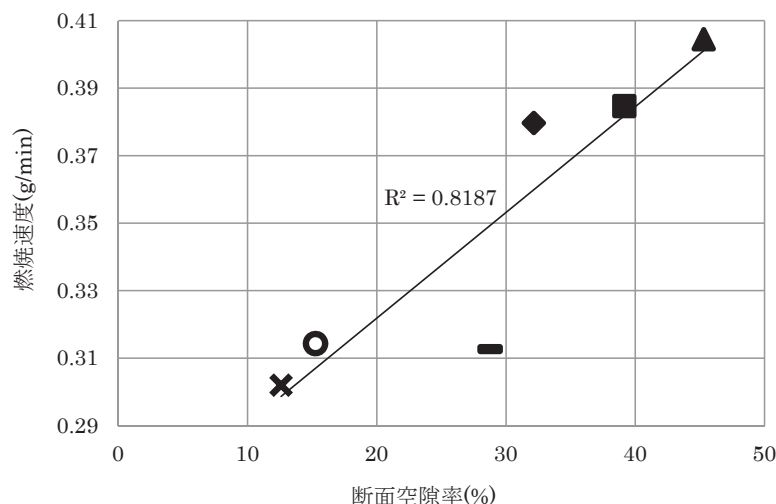


図6 断面空隙率と燃焼速度との関係
 プロットは図2参照. ※切炭は測定限界である $4 \times 10^7 \Omega \cdot m$ の位置にプロットした.
 Figure 6. Relationship between void ratio of crosscut section and combustion speed.

雑になり、また材料中を伝搬する弾性波は空隙部での反射や回折などによって乱れ、特徴的な振動モードは現れにくくなると考えられる。

図7に得られた弾性波の周波数スペクトル例を示す。より均質で稠密に近いと考えられる白炭の周波数スペクトルには急峻なピークが認められたが、黒炭ではピークは認められなかった。白炭を打撃すると、金属を打撃した時のような澄んだ音がするが、これは白炭が単純な固有振動モードでしか振動していないことを示している。一方、黒炭では、大小様々な空隙によって弾性波の反射、回折や干渉が発生し、これらの特徴的な固有振動モードでの振動が起きにくく、スペクトルには倍音関係になるような特徴的なピークは現れず、共鳴音はしないと考えられる。さらにヒノキの切炭では空隙が非常に多く、実質部分の硬度も低いと考えられるため、木炭中を伝搬する弾性波の減衰も他の炭に比べて大きく、この傾向は高周波数ほど顕著に現れている。このことは、図示していないが、ヒノキのスペクトルが著しく右肩下がりになっていたことから窺える。以上の結果から、木炭中を伝わる弾性波の周波数スペクトルに現れる尖鋭なピークやスペクトル形状の特徴は、木炭中の空隙度と関係することが示唆され、これによって燃焼速度が推定できる可能性があると考えられる。

前節では、木炭の炭化率を弾性波の伝搬速度で推定できることを示した。さらに本節では、弾性波の周波数スペクトルから燃焼速度を推定できることを示した。これらのことから木炭を軽く打撃して、弾性波を発生および伝搬させ、その速度やスペクトルを測定すれば、炭化率と燃焼速度を一度に推定できると考えられる。

おわりに

本研究では、現行の木炭の品質のうち炭化率に關係すると考えられる量として電気抵抗計を用いて測定した電気抵抗値（精煉度）や、ひっかき法によって求めた硬度よりも簡易で、かつ正確な方法で、かつ非燃焼状態で火持ちに關係すると考えられる燃焼速度を推定する方法として、弾性波の伝搬速度や打撃時の縦振動のスペクトル形状をとり上げ、これらの手法で6種の市販の木炭の性能を推定し、その結果を比較検討した。

その結果、弾性波伝搬速度は電気抵抗率が低くなるほど速くなる傾向がみられ、これによって電気抵抗値よりも広い炭化率の範囲で、かつ硬度よりも客観的に、炭化率を推定できる可能性が示唆された。また火持ちについては、断面空隙率が燃焼速度に相関することが明らかとなった。さらに木炭中を伝わる弾性波の周波数スペクトルの特徴から木炭中の空隙の度合いや燃焼速度を推定できる可能性が示唆された。

以上から、より簡易で、正確、かつ非燃焼状態で燃料としての木炭の性能を推定する方法として、木炭を軽く打撃し弾性波を発生および伝搬させ、その伝搬速度や周波数スペクトルを測定することで炭化率と火持ちに關係する燃焼速度を一度に推定することが考えられる。

参考文献

- 1) 遠藤昌之, 前田貴昭 (2010) 木炭の焼成温度と吸着物質との關係解明及び選択的吸着性を活かした利用方法の開発. 熊本県林業研究指導所研究報告 36号, 35-48.
- 2) 大竹哲也, 太田嶺, 宋戸昌広, 安藤則男 (2009) 建築廃木材

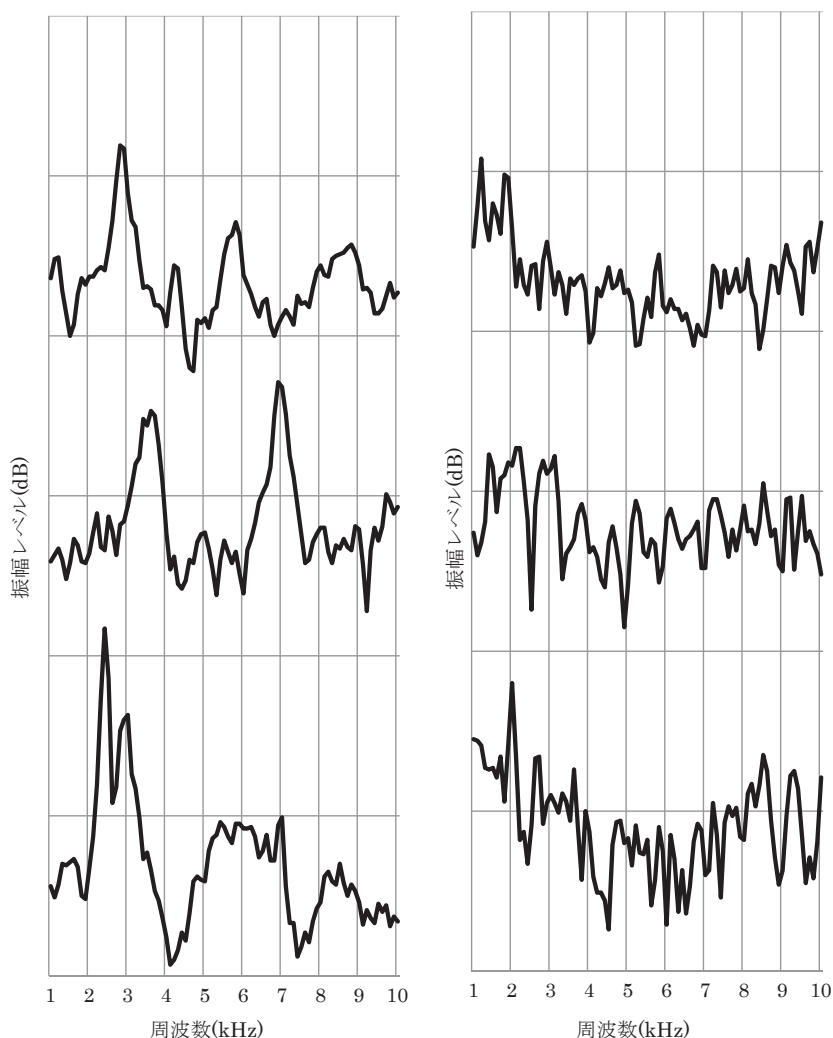


図7 弾性波の周波数スペクトル
 左：紀州備長炭，右：土佐黒炭，縦軸は1目盛10dB
 Figure 7. Frequency spectra of elastic waves propagating in charcoal.

- 炭化物による成型木炭の調製とその特性評価．廃棄物資源循環学会論文誌 20 (2), 133-140.
- 3) 岸本定吉，古谷剛，雲林院源治（1951）木炭の電気抵抗による品質の判定に就いて．日本林学会誌 33 (4), 144-147.
 - 4) 佐藤清仁，八木紀依，岡本裕行，井上雅夫，阿尻雅文，芝田隼次（2001）ピール粕炭化物の物性と燃焼特性．資源・素材学会誌 117 (7), 587-590.
 - 5) 鹿野厚子（2004）スギ木炭の空隙構造に及ぼす炭化時の温度，酸素濃度，温度保持時間の影響．岩手林技セ研報 No.12.
 - 6) 資源エネルギー庁（2012a）エネルギーバランス表 2010 年度．
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/resource/xls/2010fy.xls>
 - 7) 資源エネルギー庁（2012b）エネルギー白書 2011．
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2011energyhtml/>
 - 8) 農林水産省（2010）バイオマス活用推進基本計画．p.11.
 - 9) 福山伍郎，里中聖一（1953）木材炭化物の性質．北海道大学農学部演習林研究報告書 16 (2), 299-316.
 - 10) 福山伍郎，里中聖一（1954）木材炭化温度と生成物．北海道大学農学部演習林研究報告書 17 (1), 127-149.
 - 11) 伏谷賢美，木方洋二，岡野健，佐道健，竹村富男，則元京，有馬孝禮，堤壽一，平井信之（1985）木材の物理，文永堂，東京，p.16.
 - 12) 谷田貝光克（2007）炭・木竹酢液の用語辞典．木質炭化学会編，創森社，東京．
 - 13) 山田善之，後藤邦彰，西村龍夫（2003）向流操作における充填層燃焼に対する固体燃料形状の影響．化学工学論文集 29 (4), 500-507.
 - 14) 林野庁（2011a）森林・林業白書 平成 23 年版，p.4, 28, 29, 57-58, 95-101, 参考付表 4.
 - 15) 林野庁（2011b）森林・林業統計要覧 2011，p.10-11, 105, 107, 116.
 - 16) 林野庁ホームページ（2013）
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/21hakusyo_h/material/m09.html