

剪定枝の炭化による有効利用の研究

Study of the Effective Utilization by Carbonization of the Pruning Branch

石田 哲夫 Tetsuo ISHIDA
 川村 和弘 Kazuhiro KAWAMURA
 湯川 茂夫 Shigeo YUKAWA
 三澤 隆弘 Takahiro MISAWA
 飯田 雅敏 Masatoshi IIDA

キーワード：剪定枝，リサイクル，炭化，吸着，土壌改良，燃料

Key words : pruning trees , recycling , carbonization , adsorption , soil improvement , fuel

1 はじめに

市内の公園や緑地，道路の街路樹及び各企業から排出される剪定枝は年に約3,500トンあり，そのほとんどが現在焼却処理されている。循環型社会形成の基本法である「循環型社会形成促進基本法」が2000年6月に公布されたことから，資源循環型社会の構築というニーズが高まり，環境負荷の低減及び資源循環の推進を図るため，剪定枝リサイクルの一方策として，堆肥化が全国的に取り組み始められている。

しかし，大都市における堆肥化は，引き取り手が少ないことや付近住民から臭気に関する苦情が多く発生しているため，どこでも堆肥化ができる状況ではない。

そこで，剪定枝の有効利用として炭化に着目し，吸着剤，土壌改良剤，燃料等へのリサイクルについて基礎的な調査研究を行い若干の知見を得たので報告する。

2 実験方法

2.1 剪定枝の炭化及び活性炭化

2.1.1 炭化条件及び収炭率

適正な吸着量を示す炭化条件を知るために，図1に示すリービッヒ法管状電気炉で450～750の4段階について¹⁾，割り箸をアルゴンガス雰囲気中で140～190分間炭化した。収炭率は16.4～22.1%で，加熱が低温度ほど収炭率はやや高くなる傾向を示した。

割り箸炭によるメソグロ(色素)に対する1g当りの吸着量は表1に示すように550の3.3mg/gから750の41.7mg/gと，炭化温度が高くなるにしたがって多くなる傾向を示した。市販の活性炭に対する吸着比率は，炭化温度が450～650までは2.5～7.5%だったが，750では15～32%の吸着比率を示した。そこで，剪定枝の炭化温度は750とした。

ケヤキ，サクラ，マサシの剪定枝の炭化は8日間風乾後，蓋付きスチール容器の中に入れマッフル炉で，合計12時間かけ徐々に加温しながら，750の低酸素状態で150分間加熱した。収炭率はケヤキが15.3%，サクラが

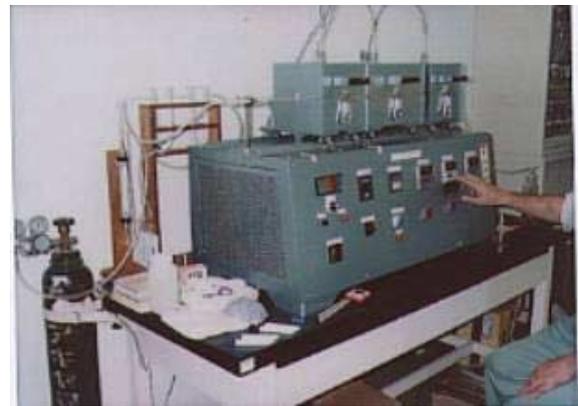


図1 リービッヒ法管状電気炉
 24.7%，マサシが25.6%であった。

仔ヨウ炭は，川崎市が業者に委託したもので，650に設定した電気炉内で7時間炭化した。収炭率は19.7%であった。

表1 割り箸炭の炭化温度別メソグロ吸着量

単位：mg/g

		450	550	650	750	活性炭
メソグロ吸着量	1回目	---	3.3	7.3	41.7	129.9
	2回目	8.1	3.8	9.0	27.6	120.5
	3回目	---	5.3	---	26.2	172.8
活性炭対比率	1回目	---	2.5%	5.6%	32.1%	100%
	2回目	6.7%	3.2%	7.5%	22.9%	100%
	3回目	---	3.1%	---	15.2%	100%

2.1.2 活性炭化及び収率

今回は剪定枝炭の量が十分に得られた仔ヨウ炭について，活性炭化の条件を知ることを主な目的として，図2に概略を示す管状加熱炉(内径20mm，長さ1m)を使い，炭酸ガス及び水蒸気雰囲気中で加熱し活性炭化した。

炭酸ガスの量は毎分 1~1.5 l, 水蒸気発生量は毎分約 2g で, 管状加熱炉には毎分 1 l 程度供給した。

活性炭の収率は, 800~820 加熱(110 分間)が 27%, 800~900 加熱(140 分間)が 16%であった。

吸着試験に供する試料は少なくとも 2g 以上は必要なこと及びこの管状加熱炉では比較的細めの剪定枝炭が約 10g しか入らないため, 収率が 20%以上あった 800~820 を活性炭化温度とした。

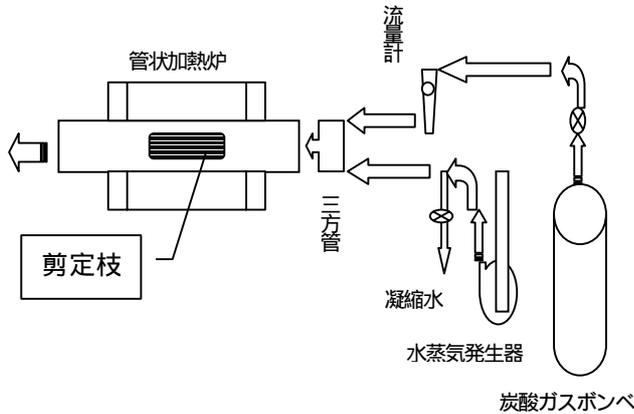


図 2 管状加熱炉を利用した活性炭化装置の概略

2.2 剪定枝炭の吸着試験方法

2.2.1 メチレンブルー(色素)吸着方法

日本工業規格の活性炭試験方法²⁾によるメチレンブルー吸着性能評価は, メチレンブルー濃度 1,200mg/l の溶液 50ml を 0.24mg/l の濃度にする時の, 活性炭量で行うことになっている。

この方法で剪定枝炭の吸着試験を行うには, 試料の量が多く必要なこと, メチレンブルー溶液量が 50ml と比較的小さいため, 試料炭の懸濁状態が長時間続くこと等により, 炭の吸着性能の測定時に多くの煩雑さが伴うため, 次の簡便な方法によって吸着試験を行い, 剪定枝炭の吸着性能を活性炭と比較する相対的評価とした。

250mg/l のメチレンブルー溶液 200ml を入れた 300ml の三角フラスコに試料を入れ, 30 分間マグネチックスターラーで激しく攪拌する。試料が容器の底に十分に沈降する翌日に, 試料溶液の吸光度を測定した。

測定した吸光度から残ったメチレンブルーの量を計算し, 初めのメチレンブルーの量との差から試料に吸着された量を求め, 試料炭 1g 当りのメチレンブルーの吸着量を算出する。

吸光度測定に用いた波長は, 吸着量が少ない試料は残ったメチレンブルー溶液濃度が高いため 705nm で測定し, 残留濃度に応じて 695nm, 685nm, 665nm の 4 波長を用いた。

また, メチレンブルー溶液の希釈には, リン酸塩緩衝液 (pH7.0) を用いた。

2.2.2 よう素吸着方法

JIS 法に準じてよう素吸着性能を, 次の方法で測定した。0.025mol/l のよう素溶液を 100ml 入れた 200ml のフ

ラン瓶に, 試料炭の採取量を 3~4 段階に調整し, 15 分間水平方向に振とうする。試料溶液 10ml を分取し, 吸着されずに残ったよう素量を, 0.05mol/l の珪硫酸ナトリウム溶液で翌日に滴定分析し, 初めのような量の試料炭に吸着されたよう素量を求め, 試料炭 1g 当りのよう素吸着量を算出する。

試料の採取量は, 吸着されずに残ったよう素濃度が 2.5g/l を中心とする濃度となるように試料を 3~4 段階に調整する。試験データから吸着等温線を作成し, よう素残留濃度が 2.5g/l の時を吸着性能とした。

2.3 剪定枝炭による土壌改良実験

炭は土壌改良剤として有効利用できることが知られている。しかし, 詳細な情報が乏しいため, 実際に炭の混入量を変えることで, 作物にどのような変化がみられるかなど, 土壌改良剤としての効果を調べるため, 次の条件でプランターによる野菜の生育実験を行った。

- (1) 約 45 kg の土(黒土を主に, 赤土, 鹿沼土を混合したもの)と 500g の化成肥料をよく混合し, その土を 3 個のプランターに配分した。
- (2) 約 1.5 kg の仔刈炭(街路樹剪定枝を炭化したもの)を約 5mm 以下に粉碎した。
- (3) 炭混入量 0g : PB, 炭混入量 500g : P1, 炭混入量 1,000g : P2 として各プランターに炭を混入させた。
- (4) 各プランターの左半分は表土下の約 2cm に, かぶの種を蒔き, 土を被せ散水した。右半分には小松菜の種を蒔いた。

2.4 剪定枝炭の燃料評価

剪定枝炭及び市販炭(燃料用国産炭)の発熱量, 可燃分・灰分, 主元素(炭素・水素分)を測定した。

発熱量については, ボンブ法熱量計で, 試料約 0.3g を測定した。可燃分・灰分については, マッフル炉で試料約 1.3g を 800 で 2.5 時間灰化して測定した。

炭素・水素分は試料約 0.05g を, 割り箸の炭化にも使用した管状加熱炉中で, 酸素雰囲気中 350~800 に加熱し, U字管に詰めた過塩素酸マグネシウム, 塩化カルシウムで水分, 炭酸ガスを吸収して測定した。

3 実験結果

3.1 剪定枝炭及び剪定枝活性炭の吸着試験

3.1.1 メチレンブルー(色素)吸着性能

仔刈, ケヤキ, サクラ, マハシの剪定枝炭と市販炭についてメチレンブルー吸着試験を行った。その結果を表 2 に示した。

650 で加熱した仔刈炭及び市販炭のメチレンブルー吸着量は 2.0~5.0mg/g と少なく, 活性炭と比べ 1.4~3.6% とほとんど吸着性能は示さなかった。

また, 750 で加熱したケヤキ, サクラ, マハシの剪定枝炭のメチレンブルー吸着量は, 10.5~13.7mg/g で, 活性

炭の約7.6~9.9%の吸着性能であった。

表3に炭酸ガス及び水蒸気中で活性化した仔刈炭の、部位の違いによるメソグロル吸着量を示した。

メソグロルの吸着量は、幹部、樹皮部、灰分の順であり、全体を混合した試料は、樹皮部や灰分の量が少なかったため、幹部の99~105mg/gとほぼ同程度の107mg/gであり、吸着性能は、活性炭平均吸着量の56%であった。

なお、収率が16%しかなかった800~900で活性化した仔刈炭のメソグロル吸着試験は、行わなかった。

以上をまとめると、活性化した仔刈炭混合試料のメソグロル吸着性能は活性炭の56%となり、剪定枝炭の7.6~9.9%と比較して約5~7倍の性能向上を示した。

また、活性炭のメソグロルに対する吸着量は、割り箸炭の実験結果も含めて、120~233mg/gと比較的大きくばらつく傾向を示した。

表2 剪定枝炭のメソグロル吸着量

単位: mg/g

	イチョウ	ケヤキ	サクラ	マテバシイ	市販炭	活性炭
メソグロル吸着量	5.0	13.7	10.5	10.6	2.0	138.0
メソグロル吸着性能	3.6%	9.9%	7.6%	7.7%	1.4%	100%

表3 活性化した仔刈炭各部のメソグロル吸着量

単位: mg/g

	幹部	樹皮部	灰分	全体を混合	活性炭	
メソグロル吸着量	1回目	99	54	22	107	233
	2回目	105	50	22	107	146
メソグロル吸着性能	平均	54%	27%	12%	56%	100%

3.1.2 よう素吸着性能

よう素吸着試験結果は、活性炭及び活性化した仔刈炭混合試料に対して、比較的安定した結果が得られた³⁾。

表4に示すように、活性化した仔刈炭のよう素吸着性能は840~880mg/gで、活性炭と比べ平均65%の吸着性能であった。

参考に行った灰分のよう素吸着性能は、活性炭に比べ約9%で、メソグロルとほぼ同じ程度の吸着性能を示している。

また表には示さなかったが、顆粒活性炭を粉砕して、2及び0.5mmの篩で篩い分けした試料の吸着性能は、2~0.5mmの試料で1,260mg/g、0.5mm未満の試料で1,280mg/gとほぼ同じ吸着性能であった。

次に、イチョウ、ケヤキ、サクラ、マテバシイの剪定枝炭と市販炭についてよう素吸着試験を行った。その結果を表

5に示した。

650~750で加熱した剪定枝炭のよう素吸着性能は、ケヤキ炭が他の剪定枝炭よりやや良い551mg/gで、活性炭と比べ42%を示した。他の剪定枝炭は活性炭の38~39%であった。しかし、市販炭のよう素吸着性能は、250mg/gと実験室で炭化した剪定枝と比較して半分以下の吸着性能であった。市販炭は主に燃料用として販売されており、炭化温度が剪定枝の炭化温度(750)と比べ低いと考えられる。

表4 活性化した仔刈炭及び活性炭のよう素吸着性能

単位: mg/g

		全体を混合	灰分	活性炭
よう素吸着性能	1回目	880	---	1400
	2回目	840	110	1240
活性炭対比率	平均	65%	9%	100%

表5 剪定枝炭及び市販炭のよう素吸着性能

単位: mg/g

	イチョウ	ケヤキ	サクラ	マテバシイ	市販炭	活性炭
よう素吸着性能	501	551	510	508	250	1320
活性炭対比率	38%	42%	39%	38%	19%	100%

3.2 土壌改良実験

3.2.1 浸出水及び炭溶出水のpH

プランターの浸出水は、生育実験の開始以降40日後に採取した。プランターPBのpHは6.80、P1のpHは6.90、P2でのpHは7.10となり、炭の混入量が多くなるとpH値は多少高くなる傾向を示した。

炭の溶出水は、水100g中に3.5gまたは7.0gの炭を入れて攪拌し、1時間放置後のpH値であり、9.40と9.65でいずれもアルカリ性を示した。以上のことから酸性化した土壌に炭を混入させた場合、中性側に傾き野菜等は生育しやすくなり、特にアルカリ性を好む種類の野菜には、好条件になると思われる。

3.2.2 水の流出時間

表6はプランターの上から散水し、プランターの底から水が流出するまでの時間を示した。3個のプランターは、野菜の生育実験をした同一のものであり、屋外の日当たり良好な場所に設置した。

表6 散水量と流出開始時間

プランター別	散水量(l)	開始時間(分)
PB (炭 0g)	2	2
P1 (炭 500g)	3	4
P2 (炭 1000g)	4	5

プランターPBは、2lの水を散水し2分後に水が流出し始めた。しかし、P2では、4lの水で5分後に水が流出し始めた。

PBは、土壌中に多くの水分が初めから保持されているため、散水すると水が押し出されるかたちで流出することになる。逆に、P2は、炭が土壌に多く混入しているため、土と土の間に炭が入り空隙ができることで、水捌けが良くなっている。したがって、土壌中の水分が少なくなっており、散水すると土壌が水分を吸収するのに時間がかかり、さらに炭も水分を吸収するために、水が押し出されてくるまで時間と水量を要したものと考えられる。

3.2.3 野菜の生育及び収穫状況

表7は、かぶ及び小松菜の種を蒔いてからの生育の初期状況を示した。

表7 生育の初期状況

プランター別	かぶ		小松菜		日数
	発芽数		発芽数		
PB(炭 0g)	0		2		3
P1(炭 500g)	7		2		
P2(炭 1000g)	0		1		
	二葉の数	丈(cm)	二葉の数	丈(cm)	6
PB(炭 0g)	170	2.0	130	3.5	
P1(炭 500g)	150	1.5	139	2.5	
P2(炭 1000g)	120	1.0	82	2	
	3枚葉の数	丈	3枚葉の数	丈	10
PB(炭 0g)	81	3.5	40	4.5	
P1(炭 500g)	70	3.0	37	4.5	
P2(炭 1000g)	45	2.5	25	4	

種を蒔いた3日後に小松菜は各プランターで発芽したが、かぶはプランターP1ーの7本のみであった。

種を蒔いてから6日後には、かぶ及び小松菜いずれもプランターPBの二葉本数が、170本、130本と一番多かった。さらに二葉の土からの高さ(丈)は、2.0cm、3.5cmと成績が良かった。

種を蒔いてから10日後には、かぶ及び小松菜は、い

ずれもPBで3枚葉の本数が81本、40本と一番多かった。

プランターP2では、かぶの二葉で50本、3枚葉で36本の差があり、PBと比較して少なかった。

生育初期の状況では、炭が混入していない土壌の方が自然に近いと思われるため、プランターPBの野菜の芽が良好に生育した。逆に、P2の場合は炭が一番多く混入しているため、土壌のpHが発芽に影響を及ぼしたものと考えられる。

図3は、かぶの種を蒔いてから収穫までの生育状況を葉の長さで示した。

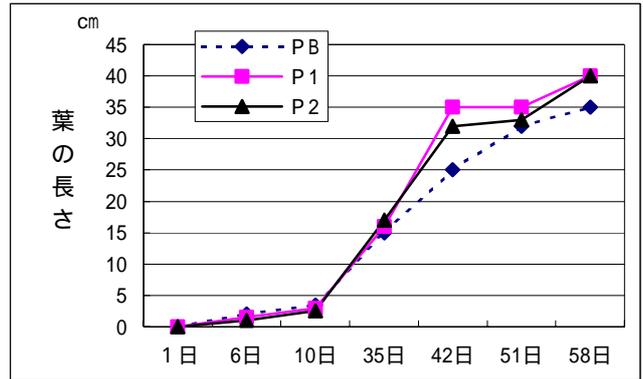


図3 かぶの生育状況

種蒔き後10~35日位までは、4~15cmでありPB、P1、P2とも同じような生育状態であったが、35~42日後においては、P1のかぶの生育が一番良く、3cmのかぶが35cmになり11.6倍の長さになった。一方、PBのかぶは、25cmの長さで42日以降も徐々に生育が認められた。

58日後の収穫時においては、P1、P2のかぶが同じ40cmの長さであった。しかし、PBのかぶは、35cmで5cmの差が出たが、全体的にみると炭を混入したプランターで生育したかぶの葉と比べ、一回り小さかった。

図4は、小松菜の種を蒔いてから収穫までの生育状況を葉の長さで示した。

種蒔き後10日位までは、かぶの生育と同じようにPB、P1、P2とも4.0~4.5cmであり同じような生育状態であった。

種蒔き後10~58日間ではP2の小松菜の生育状態が一番良く、PBと比較すると、常に14cm~29cmの差をつけて生育していたことが分かった。

生育状況では、PBは一番生育が良くなかった。これは土壌に炭が混入していないため、水捌けが悪かったのではないかと考えられる。逆に、P1及びP2は炭が混入しているため、土と土の間に炭が入り込み、空隙ができたことから水捌けが良くなり、さらに炭がアルカリ性を示すことで、土壌改良効果により野菜の生育に適したものと考えられる。

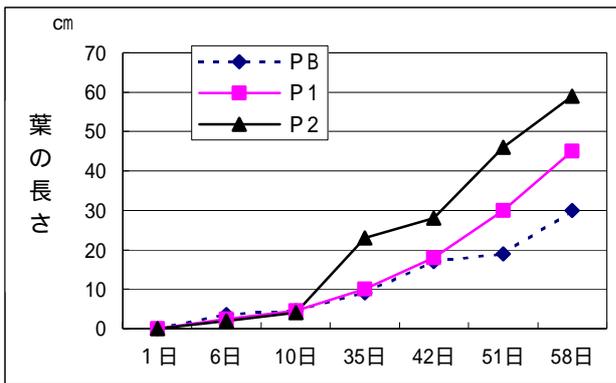


図4 小松菜の生育状況

表8は 種蒔き 58 日後収穫時のかぶの葉と根及び小松菜の生育状況を示した。

葉の長いかぶを 3 本選んで重量を測定した結果、P1 のかぶが 220 g と一番重かった。

小松菜は P2 のものが 330 g と生育が非常に良く、PB の約 8 倍の生育状況であった。

一番大きなかぶの根の大きさ (直径×高さ) を計ったところ、P1 のかぶが一番大きな生育を示し、P2 のかぶが小さかった。

全体的にみて、P1 のかぶ及び小松菜が収穫の量、質とも一番であった。これは、炭が土壤に適当な割合で混入されたことによって土壤改良効果が、収穫に現れたものと考えられる。

表8 収穫時の状況

プランター別	かぶの葉	小松菜	かぶの根	日数
	3本の重量	3本の重量	大きさ	
PB(炭 0g)	115	40	4.2×5.2	58
P1(炭 500g)	220	100	5.3×5.0	
P2(炭 1000g)	92	330	3.0×4.0	

単位：重量は g，根の大きさは、直径 cm × 高さ cm

注1：日数は種蒔き後の日数

注2：重量は大きなもの 3 本の重さ

注3：根の大きさは最大のもの

3.3 剪定枝炭の燃料評価

剪定枝炭の可燃分・灰分，発熱量，炭素・水素分の測定結果を表9に示した。

仔刈炭は可燃分，発熱量，炭素分とも他の剪定枝炭より比較的多く、マテバシ炭は剪定枝炭の中では少なかった。市販炭については、発熱量，炭素分は他の剪定枝炭よりやや少ないものの可燃分，水素分が多いという結果であった。

今回の実験を通して感じたことは、将来的に剪定枝で燃料用炭を製作する場合は、収炭率や熱量を高くすること、炭の火もちを長くすることなどについてさらに検討

する必要があると考えられた。

表9 剪定枝炭の可燃分・灰分，発熱量，炭素分・水素分

	イチヨウ	ケヤキ	サクラ	マテバシイ	市販炭	活性炭
可燃分 (%)	96.0	93.7	92.3	83.3	97.7	98.8
灰分 (%)	4.0	6.3	7.7	16.7	2.3	1.2
発熱量 (cal/g)	8,160	7,510	7,470	7,180	6,860	9,120
(J/g)	34,110	31,390	31,230	30,010	28,680	38,120
炭素分 (%)	85.0	81.1	80.1	77.1	67.8	---
水素分 (%)	3.3	3.7	2.2	2.1	5.1	---

4 まとめ

剪定枝の有効利用を図るため、剪定枝の炭化を行い、その吸着効果，土壤改良効果，燃料評価及び活性化した仔刈炭の吸着性能に関する研究を行い、次のようなことがわかった。

- (1) 剪定枝や割り箸の 750 における収炭率は 15 ~ 26%であった。
- (2) 収炭率は炭化温度が高温度ほど低くなり、メソブルーに対する吸着性能は、炭化温度が高温度ほど高くなる傾向を示すことがわかった。
- (3) 仔刈炭による活性炭化物の収率は、加熱温度が高温度ほど低くなる傾向を示し、820 で 27%、900 で 16%であった。
- (4) 剪定枝炭のメソブルー吸着量は、10.5 ~ 13.7mg/g で、活性炭と比べ 7.6 ~ 9.9%の吸着性能を示した。
- (5) 活性化した仔刈炭のメソブルー吸着量は、樹皮部と灰分は幹部と比べやや低めの吸着量であったが、幹部と粉碎した試料全体を混合した試料のメソブルー吸着量は 99 ~ 107mg/g で、活性炭と比べ 54 ~ 56%の吸着性能を示した。
- (6) 活性化した仔刈炭のメソブルー吸着性能は、活性化していない剪定枝炭と比べ 5 ~ 7 倍の性能の向上を示した。
- (7) 活性化した仔刈炭のよう素吸着性能は、840 ~ 880mg/g で、活性炭と比べ平均 65%の吸着性能を示した。また、よう素吸着性能試験は、メソブルー吸着試験と比較すると活性炭の吸着性能評価に、安定した結果が得られることがわかった。
- (8) 剪定枝炭のよう素吸着性能は、ケヤキ炭が他の剪定枝炭よりやや良い 551mg/g で、活性炭の 42%の性能であった。他の剪定枝炭は活性炭の約 40%であった。
- (9) 炭の性質はアルカリ性のため、炭を土壤に混入させるとアルカリ性側に傾き、また炭が土壤の間に入り込んで水捌けも良くなる。その結果、野菜の生育・収穫状況は、炭 500g を土壤 15kg に混入させたプランターの野菜が良好であったことから、炭は

野菜を栽培する場合の土壌改良剤(水質と水量の安定化効果)として利用できる可能性が確認できた。

- (10) 仔刈炭は可燃分，発熱量，炭素分とも他の剪定枝炭より比較的多く，メバシ炭は少なかった。

5 おわりに

今後の剪定枝のリサイクルに関する研究としては，効率的な炭化プラント実験，細めの剪定枝や廃木材の燃料化，排ガス処理や木酢液に関する評価・検討などを進めていく必要があると考えている。

また，炭の有効利用を検討するとともに，剪定枝を含めた有機系廃棄物のリサイクル施設を建設するような場合，炭化に必要な燃料として廃食用油を利用することが可能ではないかと考えている。

参考文献

- 1) 環境を守る炭と木酢液：炭やきの会編(1994)
- 2) 日本工業規格 活性炭試験方法 (JIS K 1474-1991)
- 3) 芳倉太郎, 上田 博, 藤川輝昭, 平賀 良, 澤地 實, 安部郁夫, 孔井順二, 佐藤尚文, 森 義信, 林 洋史：埋立処分地のメタンガスを利用して製造されたヤシ殻炭，竹炭，木炭による浸出水処理，大阪市立環境科学研究所報告調査・研究年報，62，78～84(2000)