

# 炭を用いた水質浄化

張野宏也<sup>\*1</sup> 八束絵美<sup>\*2</sup>

## Water Treatment by Charcoal

HARINO Hiroya<sup>\*1</sup> YATSUZUKA Emi<sup>\*2</sup>

### Abstract

Although water is an important source of life and energy, millions of people worldwide are suffering from a shortage of fresh and clean drinking water. Industrialization, population expansion and urbanization have largely contributed to the severe water pollution. Namely, the main sources of water pollution can be attributed to the discharge of untreated toxic industrial and municipal waste, the dumping of industrial effluent and runoff from agricultural fields. In order to reuse the little available water, many water treatment systems have been developed.

Among the various water treatment technologies, the adsorption process is considered as a better method, because of convenience, lower cost, ease of operation and simplicity of design. In particular, charcoal is re-examined as an adsorbent. In this paper, the characteristics of charcoal, mechanism of adsorbing and application of activated carbon, wood charcoal and bamboo charcoal are reviewed.

**キーワード**：活性炭、竹炭、木炭、吸着、水質浄化

**Key words**： Activated carbon, bamboo charcoal, wood charcoal, absorption, water treatment

---

\*1 本学人間科学部環境・バイオサイエンス学科教授

\*2 本学大学院人間科学研究科博士前期課程

連絡先：張野宏也 〒662-8505 西宮市岡田山4-1 神戸女学院大学人間科学部環境・バイオサイエンス学科  
harino@mail.kobe-c.ac.jp

## 1. 研究の背景と目的

地球上に存在する水の97%が海水、3%が淡水であり、湖沼や河川水など我々が利用できる水は、地球上に存在する水のわずか0.01%にすぎない<sup>1)</sup> (図1)。そして地球上の水は、雨となり陸上や河川にふりそそぎ、それを人間が利用後排水として河川に放流し、最終的には海に辿りつき、再度蒸発することで雲となり雨に戻るというように循環しているのみで、限りある資源として考えなければならない。さらに、日本は雨の多い国であると思われがちであるが、降水量を人口数で割ることで一人当たりの水の量を算出すると、世界中でも水の資源量が少ない国に該当する<sup>1)</sup>。このように、水は貴重な資源であるため、汚した排水は可能なかぎり浄化した後環境に戻さなければ、いつか水不足が生じることはまちがいない。現在の水処理は沈殿、凝集、殺菌が一般的な流れであり、凝集剤や殺菌剤には塩化第二鉄や塩素といった化学物質を使用している<sup>2)</sup>。化学物質の使用はコストがかかるのみならず、消毒するために必要不可欠な次亜塩素酸ナトリウム処理を行うと、塩素と水に残留している有機物が反応しトリハロメタンという発がん性物質を生成する。

炭は、古来から火鉢に入れる等の暖房用として使用されてきた。また、炭火を灰の上に出し火力を強くしたり、灰の中に埋めることで火持ちを長持ちさせるように火力をコントロールすることができるため、炊事用にも用いられてきた。その他にも仏像制作等の金属加工等さまざまな用途に使用されたため、炭の消費量は奈良時代、平安時代にかけて年々増加してきたが、近年電気製品やガス製品が流通してきたため炭はほとんど使われなくなってきた<sup>3)</sup>。しかし、1980年の国連環境計画に盛り込まれた持続可能な発展という概念が人々に浸透してきたため、環境にやさしい素材つまり炭が見直されてきた。また、炭の利用についても変化があり、エネ

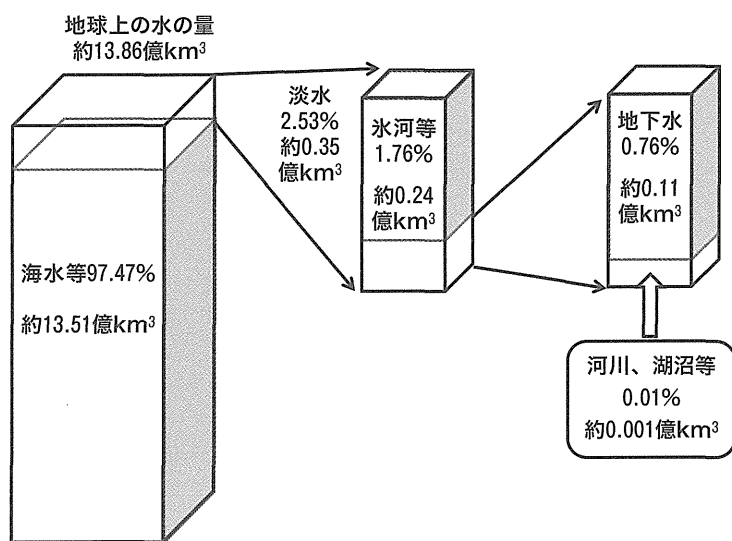


図1 地球上に存在する水の量

ルギー源のみではなく、土壌改良剤、消臭、浄水処理および空気浄化などにも応用されるようになった。

本論文では、持続可能な発展のための重要な要素である非枯渇性資源の有効活用を考慮して、木材等を炭化することにより生成する炭に注目し、水処理材としての使用の現状および将来の可能性についてレビューする。

## 2. 炭とは

炭を想像するとバーベキューなどに使う木炭を思い出す。木炭はたき木などに残る黒く焦げた残り木とは異なり、燃えやすく火持ちがよい。これは、表面積が通常の木よりも大きく、炭の内部に酸素が多く入り込んでいるためである<sup>3)</sup>。また、炭は見た目が似ているため石炭ともまちがわれやすいが、石炭は数億年前に茂っていたシダ類の植物が湖や沼に堆積し、腐敗することで泥炭となり地熱と土の圧力により固形化したもので、炭のような穴は石炭には空いていない<sup>3)</sup>。

木材などを、酸素遮断または貧酸素状態で加熱処理し、熱分解させることでガスを揮発させ原料中の炭素の成分をできるだけ多くの固体として残留させる操作を炭化処理という(図2)。有機性原料を100℃前後で加熱すると、ガスや水蒸気が発生する。さらに昇温すると熱分解がおこり、熱分解ガスの発生や液体成分の流出が起こり、重量が減少する。分解温度は、ヘミセルロースは200-260℃、セルロースは240-340℃、リグニンは280-500℃で分解する。分解生成物の一部は縮重合により高分子化し炭化物となり、分解せず残留した炭化物に加わる。500℃以上になると縮合多環芳香族構造が発達し、炭化物中の固定炭素分が増加する。800℃くらいまでは炭化が進行し、1600℃で黒鉛化する<sup>4)</sup>。このように燃焼温度により炭の内部に生じる微細孔の大きさや数を変化させたり、原料の性質を維持することができるため、原材料の選択や燃焼温度を制御することで目的にあった炭を生産することができるようになった。

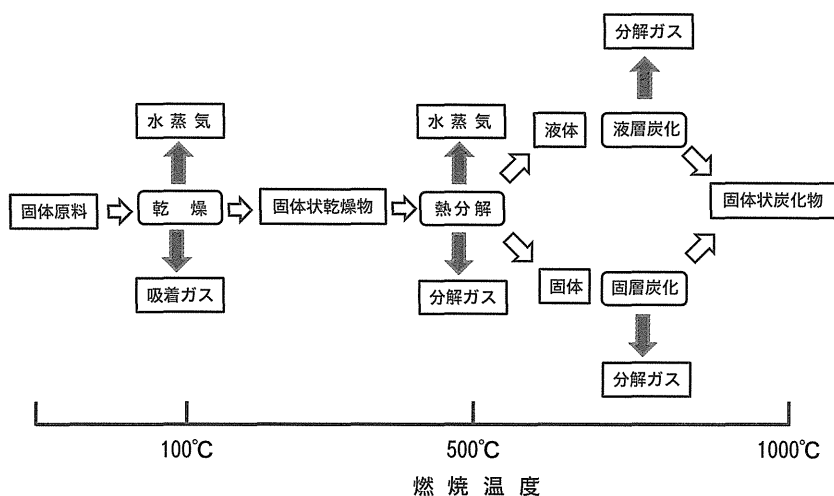


図2 燃焼温度と炭化の状態

文献4)の図1を改変

### 3. 物質の吸着メカニズム

炭には孔が多く空いており、直径10-40  $\mu\text{m}$  をマクロ孔、1-5 nm の孔をミクロ孔、その中間をメソ孔と呼んでいる (図3)。マクロ孔は木の仮導管孔で、ミクロ孔は細胞壁が炭化する時にできたもので、基本的には原料となる木材の構造を留めている。広葉樹を原料とする炭はマクロ孔が多いため、着火すると酸素がマクロ孔に多く含まれているため火がつきやすい。針葉樹を原料とする炭はミクロ孔が多いため、取り込まれた酸素が徐々に使われ、火はつきにくいという性質を有する<sup>3)</sup>。

水の浄化における吸着メカニズムとしては、大きく分けて物理吸着と化学吸着がある。物理吸着とは、表面積の大きさおよびこの微細孔によるもので、ミクロ孔、メソ孔およびマクロ孔に汚染物質を閉じ込めることとである。化学吸着は、炭表表面が親水性か疎水性かという化学的な極性である。また、木炭などは、燃焼温度により、表面に残っている官能基の種類が異なり、低温炭の場合は、カルボキシ基やフェノール性水酸基が残っていて、これらはすべてカチオン交換樹脂的な性質を有するため、カチオン性の物質、たとえばアンモニアなどを吸着する。高温炭では、カルボキシル基やフェノール性水酸基が還元分解されて、残留官能基はカルボニル基が主になり、アニオン交換樹脂的な性質を示す。そのため、無機酸や有機酸の酸性物質を吸着するようになる<sup>5)</sup>。

液層の吸着を表す場合、図4に示すように吸着剤への飽和吸着時間を求めることから始める。飽和吸着時間を求めた後は、ラングミュア (Langmuir) の吸着等温式またはフレンドリッヒ (Freundlich) の吸着等温式に適合するかどうかを実験で求める (図5)。ラングミュア吸着等温式は、Langmuir が導いた理論式であり、1) 吸着サイトと吸着質が1対1で結合する、2) 吸着質は単層で吸着する、3) 吸着した吸着質間に相互作用はないということが前提となっている (図6)。つまり、Sは吸着サイト、Aは吸着質として式(1)を仮定し、それに対して平衡式(2)が導かれる。

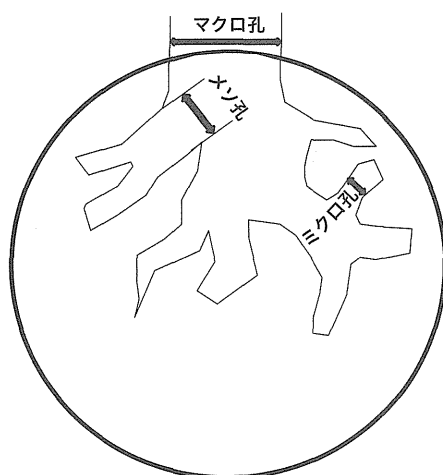


図3 炭の表面構造

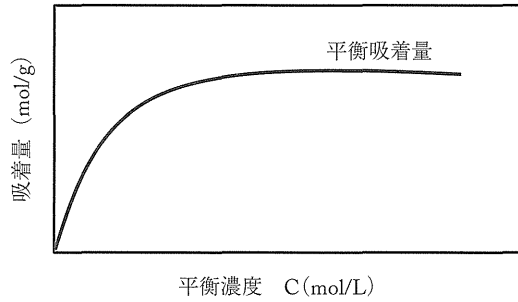


図4 平衡濃度と吸着量との関係

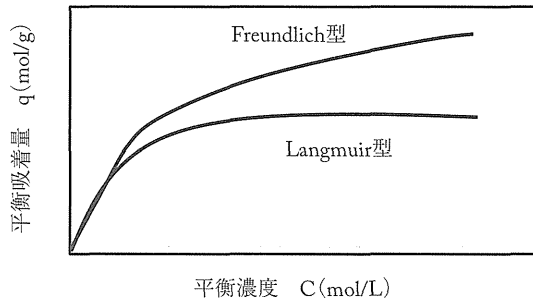


図5 Langmuir と Freundlich 型吸着等温線

文献6) の図を改変

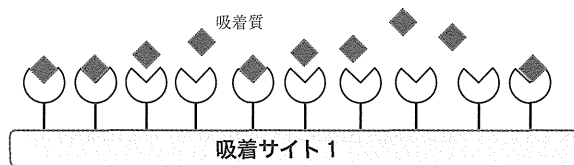


図6 Langmuir 型の表面上の吸着サイトと吸着質

文献6) の図を改変

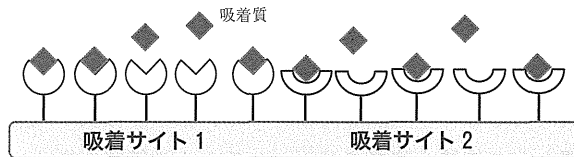
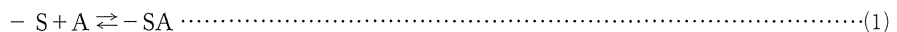


図7 Freundlich 型の表面上の吸着サイトと吸着質

文献6) の図を改変



$$K = q / ((q_m - q) C) \dots\dots\dots(2)$$

$$1/q = (1/q_m K) (1/C) + (1/q_m) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $q_m$  (mol/g) は最大吸着量、 $C$  (mol/L) は吸着質の平衡濃度および  $K$  (L/mol) は吸着定数である。式(2)を変形すると式(3)のようになり、縦軸に  $1/q$  を、横軸に  $1/C$  をとると、右上

がりの直線になる。フロインドリッヒ吸着等温式の場合は、実験結果から得られた式で明確な理論的な裏付けはないが、図7に示すように複数種の吸着サイトが1種類の吸着質を奪い合う場合はこの式にフィットする。フロインドリッヒ吸着等温式は式(4)に示すもので、図5のような曲線を示す。両辺の対数をとると式(5)になる。

$$q = KC^{1/n} \dots \dots \dots (4)$$

$$\ln q = 1/n \ln C + \ln K \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $q$  は吸着係数で、この値が大きいほど吸着サイトと吸着質の吸着能力は大きい<sup>6)</sup>。測定データから水処理における吸着係数を求める際はラングミュアールとフロインドリッヒで表現されることが多い。しかし、さらに複雑な系を想定して、3つの吸着係数を含む式であるBET式、Randke-Prausnitz式、一般化Langmuir式またはGibbsの吸着式があるが、計算が複雑になり、それを解くにはコンピュータが必要となることから一般に使用されていない<sup>7)</sup>。水溶液中の有機物の活性炭への吸着の場合は、フロインドリッヒの吸着等温式が適合している場合が多い。

## 4 炭を水浄化の吸着剤とした応用例

### 4.1 活性炭

活性炭は石炭、木質炭化物、果実殻炭化物、繊維や樹脂炭化物を熱処理することで活性化(賦活化)させ、0.7-3 nmの細孔を作ったものである。この賦活化する方法は大きく分けてガス賦活化法と薬品賦活化法がある<sup>8)</sup>。ガス賦活化法は、揮発分を10-30%含む炭化物を700-1000℃の温度範囲で水蒸気、炭酸ガス、燃焼排ガスなどに接触させて炭素の部分的なガス化を行うことで空隙の生成や拡大を行う。薬品賦活化法は揮発分30%の炭化原料に対して塩化亜鉛、リン酸、硫酸などの脱水剤を原材料の数倍量添加し、500-700℃の温度で脱水縮合反応をさせる方法である。賦活化の過程では、はじめにマクロ孔が生じ、さらに加熱することでメソ孔やマイクロ孔が生成する。

活性炭は形状により分類することができ、粉末原料では粉末活性炭、破砕原料では粒状活性炭と呼ばれている。粉末活性炭は、回分吸着装置で使用することができるため設備費が安いですが、使用期間が短期間であるという欠点がある。一方、粒状活性炭は大量吸着処理に適しているが、固定層吸着装置などの連続式装置で использоватьсяため設備費が高く、処理液の濃度変化に対応することが困難であるという欠点がある。その他にも、繊維状活性炭、ハニカム状活性炭、ビーズ状活性炭などもあり、それぞれの特徴を有する。

粒状活性炭に微生物を付着することで、活性炭吸着と同時に微生物の分解機能を利用して浄化するという手法が考案され、これを生物活性炭という。微生物はマクロ孔よりもマイクロ孔に住みやすいため、マイクロ孔の多い活性炭ほど微生物による処理能力は向上する<sup>9)</sup>。1992年以後カビ臭物質であるジオスミンや2-メチルイソボルネオールや塩素処理によって生成するトリハロメタンおよびその前駆物質の除去、アンモニア性窒素の硝化を目的で、浄水処理場で生物活性炭が導入され、高度浄水処理水として販売された。この生物活性炭処理はオゾン処理後に使

表1 活性炭を用いた水処理の最近の報告例

吸着剤	対象物質	対象水	備考	文献
ヤシ殻炭、活性炭	クロム(VI)	合成した排水	硝酸のような強酸化剤で処理すると吸着力が増加する。	10)
活性炭	染料8種	蒸留水	pHや温度が増加すると、吸着力が低下する。	11)
活性炭	鉛イオン、ニトロベンゼン	蒸留水	粒径を変えても対象物質の吸着容量と吸着親和性は同じ。	12)
活性炭	有機化合物、重金属(カドミウム)	蒸留水	有機物はpHが上昇すると吸着力が減少するが、カドミウムは増加する。	13)
活性炭	ノニルフェノール、ビスフェノールA	蒸留水	平衡濃度が $\mu\text{g/L}$ の低濃度でも吸着力が高い。	14)
活性炭 ( $\text{ZnCl}_2$ 賦活)	鉛(II)	蒸留水	$\text{ZnCl}_2$ および賦活の温度はメソ孔の発達に重要な因子である。	15)

用されることが多く、活性炭による残存しているオゾンの除去と、オゾンが分解されることで生じる酸素が活性炭に付着している微生物を活性化させることができるという利点をもつ<sup>9)</sup>。

活性炭の下廃水分野への利用については、浄水分野に比べ水質や量が安定しないということで浄水処理に比べて研究が進んでいないが、有機物量(COD)などは活性炭が新しい時期には80%除去することができるという報告がある<sup>9)</sup>。化学物質に対する除去に関しても、内分泌かく乱物質の一つとして考えられているエストロゲンを90%以上除去することができた、界面活性剤として使用されている直鎖アルキルベンゼンスルホン酸(LAS)の除去率が生物活性炭を用いることで57%から87%に増大したという報告がある<sup>9)</sup>。その他にも表1に示すように、活性炭の水処理への適用例は数多く報告されており、合成した生活排水からの六価クロムの除去<sup>10)</sup>や染料として使用されている8種類(アリザリンレッドS、プロモフェノールブルー、フェノールレッド、メチレンブルー、メチルバイオレット、マラカイトグリーン、エリオクロムブラックT、メチルブルー)の物質の除去<sup>11)</sup>などが検討されている。このように下廃水分野に対しても多くの研究成果が蓄積されつつあり、今後下廃水に対しても活性炭の実用化が有望である。

#### 4.2 木炭

木炭は原料である樹木の種類により分類され、大きくは針葉樹炭、広葉樹炭となる<sup>5)</sup>。針葉樹炭はスギ、ヒノキ、広葉樹はナラ、クヌギが代表的な原料である。また、炭化温度でも分類され、黒炭は400-800℃、白炭は800℃以上となる。よく用いられている備長炭は白炭に含まれる。針葉樹は明瞭な導管組織が並んでおり、炭化後もこの構造が保たれ空隙が多い。それに反して広葉樹は空隙の少なく、密な組織構造を有するため硬い。木炭の表面には、吸着のメカニズムの項でも述べたように、炭化温度が低いと水酸基、カルボキシ基が多く残っており、酸性を示すが、炭化温度が高くなると、カルボニル基が増えるためアルカリ性になる。細孔に関しては、針葉樹炭は容量が1.5 ml/g(スギの場合)と大きい、広葉樹単であるカシ、クヌギ、

表2 木炭を用いた水処理の最近の報告例

吸着剤	対象物質	対象水	備考	文献
木炭（松）	芳香族炭化水素3種	5 mMCaCl（イオン強度）と200 mg/LのNaN <sub>3</sub> （滅菌）が含まれた蒸留水	炭化するほどPAHsの分配係数は増加する。	17)
粒状炭	カチオン界面活性剤（セチルピリジニウムクロライド）	希釈した水路の水	吸着力は、粒状炭の量、温度、攪拌速度の増加に比例する。	18)
ハーディンググラス、オーストラリアリバーガム	ベンゼン、トルエン	Milli-Q水	吸着剤の表面の孔の大きさ、カチオン含量により親和性が変わる。	19)
黒炭、灰	トリブチルスズ	pHを調整した蒸留水	黒炭の吸着力はpH6-7で高く、灰はpH>6であった。	20)
木炭（ヒノキ）	フェノール、直鎖型ドデシルベンゼンスルホン酸	蒸留水	900℃の炭化時間で、マイクロ孔が多く生成した。	21)
Ca含有木質炭化物	硝酸性窒素	蒸留水	イオン交換が吸着の原理である。	22)

ナラなどでは、0.3-0.5 ml/gで小さい。このように、木炭は細孔特性や表面化学特性を有するため、吸着剤としての利用はされているが、活性炭と比べると比表面積や細孔容量が小さいため、大量や高濃度の物質の吸着除去には適していない。

木炭の水処理に関する事例を表2に示す。木炭は重金属イオン特に鉛イオンの除去に対し有効に働くことがわかっており、粒径が200 μm以下になると、急激に吸着率が上昇することが報告されている<sup>16)</sup>。松を原料として生成した木炭を用いて、芳香族炭化水素3種類（フェナンスレン、アントラセン、ピレン）の除去を試みている<sup>17)</sup>。また、粒状木炭を用いて、水路の水からのセチルピリジニウムクロライドの除去<sup>18)</sup>、ハーディンググラスとオーストラリアリバーガムを原料とした木炭からベンゼンとトルエンの除去<sup>19)</sup>、黒炭と炭化の際生成する灰を用いてトリブチルスズの除去を行っている<sup>20)</sup>。ヒノキを原料とした木炭は、フェノールや直鎖ドデシルベンゼンスルホン酸を吸着することも報告された<sup>21)</sup>。さらに木炭にカルシウムを含浸させた吸着剤を用いて硝酸性窒素の除去も検討している<sup>22)</sup>。

#### 4.3 竹炭

竹はアジアの温帯や熱帯湿潤地域に分布し、かつては材木、パイプ、容器等さまざまな用途に使用されてきたが、プラスチック等の化学製品が増加したことや、タケノコの輸入が増加し消費価格が下落したことで、竹の重要が減少し、管理されてきた竹林が放置されるようになった。この放置された竹林が植生へ侵入し、広葉樹や針葉樹の成長を妨げている。さらに、放置竹林は、密になって荒れると同時に、竹林内には落葉がたまり薄暗く、そこに生育する植物相は多様度が低くなり単調となる。倒れた稈や切り株などの節間の空隙には雨水がたまりやすく、蚊の大量発生や地滑りを起こしやすくなる。そこで、自然に大量に存在する竹の有効活用の一つとして考え出されたのが、炭化である。



表3 竹炭を用いた水処理の最近の報告例

吸着剤	対象物質	対象水	備考	文献
竹炭	フタル酸エステル 4種類	雨水、水道水	固相抽出剤としての応用	23)
竹炭	カドミウム (II)	蒸留水	バッチ式では6時間に平衡に達し、 pH8以上での吸着力がよい。	24)
竹炭	有機物、全窒素、 陰イオン界面活性剤、 全リン	生活排水	全リンには除去効果はみられなかつた。	25)
粉末竹炭	硝酸性窒素	飲料水	活性炭に比べて、吸着力は強く、温度依存も少ない。	26)
過酸化水素 処理竹炭	水銀	蒸留水	過酸化水素の量を増加すると吸着効率の向上と高温でも使用できる。	27)
チトサン 処理竹炭	マイクロシステイン-LR	飲料水	除去率はpHや中性有機物質に影響をうける。	28)
NaOH 処理竹炭	クロラムフェニコール	排水	吸着はNaOH処理による $\pi-\pi$ 相互作用の増加である。	29)
竹活性炭	メチレンブルー	蒸留水	単層で孔に吸着	30)
竹活性炭	水酸化テトラメチル アンモニウム	蒸留水	イオン交換吸着分離 (pHの増加により、吸着量の増加)	31)
活性竹炭と 竹炭	鉛 (II)	二段蒸留水	竹炭より活性竹炭の方が除去率が高い。	32)
カーボンナノ チューブ/竹炭	銅イオン	蒸留水	pH6以上で除去率が向上	33)

竹炭は細孔半径が3.7-25 nmのメソ孔が多いのが特徴で、その傾向は孟宗竹で顕著である。竹炭の性質は炭化温度でも変わり、炭化温度200℃では酸性 (pH5.14)を示すが、炭化温度が1000℃ではpHが9.05となりアルカリ性になる<sup>5)</sup>。また、炭化温度が高いほど炭化が進み不純物が少なくなるとともに比表面積も増加し、800℃で最大となる。1000℃になると比表面積は減少する。

竹炭を吸着剤として使用した例を表3に示す。竹炭を使って、雨水や水道水に含まれているフタル酸エステル類の4種 (ジメチルフタル酸、ジエチルフタル酸、ベンジルフタル酸、ジ-n-ブチルフタル酸)の除去を行っている<sup>23)</sup>。また、カドミウム (II)を除去するため、蒸留水にカドミウムを添加して除去率を検討するという基礎研究も行っている<sup>24)</sup>。さらに、竹炭を生活排水中に入れ攪拌することで、生活排水中のBOD、全窒素および陰イオン界面活性剤を減少させることができたと報告されている<sup>25)</sup>。粉末状の竹炭を用いて、飲料水からの硝酸性窒素の処理を検討している<sup>26)</sup>。活性炭と除去率を比較しているが、硝酸性窒素に関しては、活性炭よりも吸着力がよく、温度の差異による影響も少ないという結果を得ている。竹を炭化するのみならず、それを過酸化水素処理したものをを用いて水銀の除去を行う<sup>27)</sup>、チトサン処理をしてマイクロシステインの光学異性体の処理をする<sup>28)</sup>、水酸化ナトリウム処理をして排水からクロ

ラムフェニコールの除去を試みる<sup>29)</sup>等、竹炭を化学物質で処理した吸着剤も作られ、水処理に応用されている。また、炭化後、賦活化処理をして、水酸化テトラメチルアンモニウムおよびメチレンブルーの除去も試みている<sup>30-31)</sup>。前者の場合はイオン交換メカニズムが分離に働き、後者の場合は孔への吸着が主となっていることが解明されている。また、鉛(Ⅱ)の除去に関しては、活性竹炭の方が、除去率が高かったと報告されている<sup>32)</sup>。竹炭単独使用ではなく、カーボンナノチューブとの掛け合わせにより銅イオンの除去も試みている<sup>33)</sup>。

活性炭と同様、生物竹炭も研究されており、メソ孔が主であるにもかかわらず、一月程度で微生物膜が表面に形成され、排水中の有機炭素や窒素が減少したという報告もある<sup>34)</sup>。また、このシステムが排水処理システムに組み入れた際、2年近く竹炭を交換しなくても廃水処理能力は減少せず、長期間使用の可能性が示唆されている。

## 5. 将来の炭の水質浄化への期待

炭の材料として再生可能なバイオマス資源である木材や廃棄物を使用することは、使用後焼却しても植林さえすれば焼却の際に出る二酸化炭素は植木の吸収により消去できるため、最終的には二酸化炭素の大きな増加にはつながらず、環境にやさしい原料ということができる。近年、炭の生成技術はかなり進歩しており、表面積、細孔の大きさなどを賦活化等の方法でコントロールできるようになってきた。さらに、炭は原料の性質を有しているため、それぞれ固有の特性を有している。個々の炭の特徴を知ること、汚染の対象物質の性質から鑑み、炭生成の制御やさまざまな種類の炭を混合することにより、もっとも除去効率の高い吸着剤を作ることができるようになってきている。本稿では触れなかったが、炭の材料として、通常はゴミとして捨てられようとしているコーヒーかす、リンゴの絞りかすや醤油しぼりかすなども炭化させて、吸着剤として使用することが検討されている。これらの材料から得られた炭はイオン交換能を有しており、硝酸性窒素を吸着する性質を有しているものもある。このように、再生可能な資源のみならず、廃棄物を炭化することにより持続可能な開発にむけた吸着剤の新たな開発研究が進められている。また、吸着剤は拡散した汚染物質を回収することはできるが、その物質を分解することはできない。そこで、吸着剤の再生を考慮し、使用した炭を土壌改良材に使用するまたは植物を用いて分解し再生するといった効率的な再生方法、廃棄物の有効利用を考えていく必要がある。

現在社会は、めざましい技術進歩のため、生活が快適になった。この反面、環境容量を超えるような汚染物質が排出され環境が悪化すると同時に、枯渇および非枯渇性資源が乱用され総合的に資源が減少してきた。発展途上国では、このような状況を重く見て、最近では環境を考慮していない企業は生存競争には勝てない時代となり、ほとんどは環境にやさしいという言葉がキーワードとしている。しかし、発展途上国ではまだまだ産業の発展が優先となり、環境保全を考えるにはほど遠い状況である。我々の住むような先進国では、もう一度産業革命以前の生活を思いだし、有効な資源活用を現在社会に適用していく必要がある。また、発展途上国に対しては、貧富の差が大きい、すべての人々に安全な生活を送っていくことができるよう、低コストでどこの家庭でも容易に使用できる炭のような資源の有効利用を目的とした浄化技術を

提供し、地球全体で資源の保護と環境の保護を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 伊藤雅喜、水循環システムのしくみ、ナツメ社、2010
- 2) 和田洋六、ポイント解説水処理技術、東京電機大学出版局、2011
- 3) 炭活用研究会、今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしい炭の本、日刊工業新聞社、2002
- 4) 安部郁夫、多孔質炭素の製造法と評価法、炭の製造と利用技術 多孔質炭素の拡がる用途、NTS、2009：3-13
- 5) 岩崎訓、木炭、竹炭の製造条件と特性、炭の製造と利用技術 多孔質炭素の拡がる用途、NTS、2009：113-121
- 6) 化学工学分離プロセス部会、吸着技術の基礎とこう分離精製への応用のマスター、[http://elsic.fish.hokudai.ac.jp/~seki/lecture/seisan/slide\\_ads.pdf](http://elsic.fish.hokudai.ac.jp/~seki/lecture/seisan/slide_ads.pdf)、2010
- 7) 近藤政精一、石川達雄、安倍郁夫、吸着の化学、丸善株式会社、2001
- 8) 桑垣整、活性炭の工業的製造法と装置、炭の製造と利用技術 多孔質炭素の拡がる用途、NTS、2009：27-38
- 9) 福原知子、生物活性炭の高度水処理への利用、炭の製造と利用技術 多孔質炭素の拡がる用途、NTS、2009：39-46
- 10) S. Babel and T. A. Kurniawan Cr (VI) removal from synthetic wastewater using coconut shell charcoal and commercial activated carbon modified with oxidizing agents and/or chitosan. *Chemosphere* 2004; 54: 951-967.
- 11) M. J. Iqbal and M. N. Ashiq Adsorption of dyes from aqueous solutions on activated charcoal. *Journal of Hazardous Materials* 2011; B139: 57-66
- 12) 山中慎也、町田基、相川正美、立本英機 活性炭の細孔構造と粒径が鉛イオンおよびニトロベンゼン吸着の律束段階に及ぼす影響. 炭素、2008；231：18-20
- 13) 加藤雄一、町田基、錢慶栄、立本英機 有機化合物および重金属の活性炭吸着における表面官能基とpHの影響. 炭素、2006；223：215-219
- 14) 安部郁夫、岩崎訓、福原知子、中西俊介、川崎直人、中村武夫、棚田成紀 ノニルフェノールおよびビスフェノール A の活性炭吸着特性. 炭素、1998；184：234-235
- 15) 吉原知矢、相川正美、町田基 活性炭による重金属イオンの吸着に及ぼす溶液の pH および共存電解質の影響. 炭素、2009；237：61-66
- 16) 町田基 木炭類の汚染物質除去材料としての利用技術、炭の製造と利用技術 多孔質炭素の拡がる用途. NTS、2009：163-170
- 17) H. Sun and Z. Zhou. Impacts of charcoal characteristics on sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chemosphere* 2008; 71: 2113-2120
- 18) M. M. Saleh On the removal of cationic surfactants from dilute streams by granular charcoal. *Water Research* 2006; 40: 1052-1060
- 19) L. C. Bornemann, R. S. Kookana and G. Welp Differential sorption behaviour of aromatic hydrocarbons on charcoals prepared at different temperatures from grass and wood. *Chemosphere* 2007; 67: 1033-1042
- 20) L. Fang, O. K. Borggaard, H. Marcussen, P. E. Holm, H. Christian and B. Hansen. The pH-dependent adsorption of tributyltin to charcoals and soot. *Environmental Pollution* 2010; 158: 3642-3649
- 21) 安部郁夫、人見充則、幾多信生、川舟功郎、計良善也 ヒノキ材から調製した多孔性炭素の物性-900℃における炭化時間の影響. 炭素、1996；171：18-23
- 22) 横山理英、林聡、中西真、高田潤 Ca を導入した木質炭化物による硝酸性窒素吸着特性. 水環境学会誌、2008；31：47-52
- 23) R.-S. Zhao, X. Wang, J.-P. Yuan and J.-M. Lin Investigation of feasibility of bamboo charcoal as solid-phase extraction adsorbent for the enrichment and determination of four phthalate esters in environmental water samples. *Journal of Chromatography A* 2008; 1183: 15-20

- 24) F. Y. Wang, H. Wangjian and W. Ma Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent-Bamboo charcoal. *Journal of Hazardous Materials* 2010; 177: 300-306
- 25) 八束絵美、山尾千晶、永田寛治、張野宏也 竹炭を用いた生活排水の浄化. 第46回日本水環境学会年会講演集、2012 : pp. 591 .
- 26) K. Mizuta, T. Matsumoto, Y. Hatate, K. Nishihara and T. Nakanishi Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresource Technology* 2004; 95: 255-257
- 27) Z. Tan, J. Qiu, H. Zeng, H. Liu and J. Xiang Removal of elemental mercury by bamboo charcoal impregnated with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> *Fuel* 2011; 90: 1471-1475
- 28) H. Zhang, G. Zhu, X. Jia, Y. Ding, M. Zhang, Q. Gao, C. Hu and S. Xu Removal of microcystin-LR from drinking water using a bamboo-based charcoal adsorbent modified with chitosan. *Journal of Environmental Sciences* 2011; 23: 1983-1988
- 29) Y. Fan, B. Wang, S. Yuan, X. Wu, J. Chen and L. Wang Adsorptive removal of chloramphenicol from wastewater by NaOH modified bamboo charcoal. *Bioresource Technology* 2010; 101: 7661-7664
- 30) B. H. Hameed, A. T. M. Din and A. L. Ahmad Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials* 2007; 141: 819-825
- 31) A. Yamaguchi, S. Nishihama and K. Yoshizuka Separation of tetramethyl ammonium hydroxide in waste water with ion exchange using activated carbon prepared by bamboo. *Journal of Ion Exchange* 2010; 21: 375-381
- 32) H. Ialhrualtuange, K. Jayaram, M. N. V. Prasad and K. K. Kumar Lead(II) adsorption from aqueous by raw and activated charcoals of *Melocannabaccifera Roxburgh* (bamboo) – A comparative study. *Journal of Hazardous Materials* 2010; 175: 311-318
- 33) J. Zhang, Z.-H. Huang, R. Lv, Q.-H. Yang and F. Kang Effect of growing CNTs onto bamboo charcoals on adsorption of copper ions in aqueous solution. *Langmuir* 2009; 25: 269-274
- 34) 吉澤秀治 炭担体による排水の微生物処理—炭による微生物群の増殖と排水処理の実証事例一、炭の製造と利用技術 多孔質炭素の拡がる用途、NTS、2009 : 171-178

(原稿受理日 2012年9月20日)