

竹炭による有機リン化合物類、フタル酸エステル類および 多環芳香族炭化水素類の除去

張野 宏也^{*1}、末松加奈子^{*2}、八束 絵美^{*3}

Removal of Organophosphorus Compounds, Phthalic Acids
and Polyaromatic Hydrocarbon Compounds in Water Samples by Bamboo Charcoal

HARINO Hiroya^{*1}, SUEMATSU Kanako^{*2}, YATSUZUKA Emi^{*3}

*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 教授

*2 神戸女学院大学 人間科学部 環境・バイオサイエンス学科 卒業生

*3 神戸女学院大学 人間科学部 環境・バイオサイエンス学科 嘱託教学職員

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

要 旨

竹炭を用いて、有機リン化合物類10種類、フタル酸エステル類8種および多環芳香族炭化水素類8種の吸着性について検討した。竹炭1gに対して、トリフェニルフォスフェイト (TPP) は約3mg、トリス (2-クロロエチル) フォスフェイト (TCEP) は約1.5mg、クロロピリフォスは約2.5mgであったが、その他の有機リン化合物類は4-5mg吸着した。フタル酸エステル類については、ジエチルフタレート (DEP)、ジ-n-ヘキシルフタレート (DHP) およびジシクロヘキシルフタレート (DCHP) は2.5-3.5mgであったが、その他の化合物は4-5mgが吸着した。多環芳香族炭化水素類については、ベンゾ[a]フェナンスレン (B[a]PH)、3,4-ベンズピレン (B[a]P) およびペリレン (PARY) は2.5-3.5mgであったが、その他は約4mgと高かった。

次に平衡濃度と吸着量の関係のみた。有機リン化合物類は、平衡濃度が高くなるにつれ、吸着量が減少する傾向がみられた。フタル酸エステル類については、DEPとジプロピルフタレート (DPrP) は、平衡濃度が高くなるにつれ吸着量が増加したが、それ以外の物質は有機リン化合物類と同様減少した。多環芳香族炭化水素類は、平衡濃度が高くなるにつれ、吸着量が増加する傾向が認められた。

0.002mg/Lの有機リン化合物類を含む試験水500mLに竹炭を10g加え24時間攪拌後の除去率を算出すると、有機リン化合物類は95-100%、フタル酸エステル類はジ-n-ブチルフタレート (DBP) とDCHPを除き98-100%であった。多環芳香族炭化水素類は86-100%であった。このように、水中に存在する有機リン化合物類、フタル酸エステル類および多環芳香族炭化水素類のほとんどを、竹炭を用いて除去することができた。

キーワード：竹炭、水処理、有機リン化合物類、フタル酸エステル類、多環芳香族炭化水素類

Summary

Water is the essence of life, however, millions of people are suffering from a shortage of drinking water. Industrialization, population expansion and urbanization have largely contributed to severe water pollution due to the discharge of untreated toxic industrial and municipal wastes, the dumping of industrial effluent and runoff from agricultural fields. In order to reuse the limited amount of available water, many water treatment systems have been developed.

The applications of bamboo charcoal as a water treatment material for organophosphoric compounds (OPs), phthalic acid esters (PAEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were investigated and the relationships between the equilibrium concentrations of their chemical compounds and the absorbed amounts by bamboo charcoal were discussed. Although the equilibrium concentrations of OPs and most PAEs increased as the absorbed amount decreased, the equilibrium concentrations of PAHs decreased. Removal rates of OPs ranged between 95% and 100%. Removal rates of PAEs except for Di-n-butyl phthalate (DBP) and Dicyclohexyl phthalate (DCP) were in the range of 98-100%. Removal rates of PAHs were in the range of 86-100%. It was found that bamboo charcoal is an important item for the removal of harmful chemical compounds in water samples.

Keywords: bamboo charcoal, water treatment, organophosphoric compounds, phthalic acid esters, polycyclic aromatic hydrocarbons

1. 研究の背景と目的

地球上に存在する水のうち人間が消費できる淡水量は0.01%と少ないにもかかわらず、水は地球上を循環しているのみで増減はない。一方、世界の人口は年々増加傾向にあり、2019年までには80億人に到達すると予測されているため、一人当たりの使用できる水の量は年々減少することが予測される。インド、イラン、サウジアラビア、中国などをはじめ世界の各地で水不足が深刻化している¹⁾。

近年、化学物質による生物への影響が注目され、さまざまな物質に対して使用の規制、基準値が設けられた。しかし、比較的高濃度で至るところで検出され続けているにも関わらず、なお基準が設けられていない化学物質が多く存在する。有機リン化合物類、フタル酸エステル類および多環芳香族炭化水素類はその代表的な例である。有機リン化合物類は、有機リン酸トリエステル類と有機リン系農薬類に分類できる。有機リン酸トリエステル類はプラスチックの可塑剤、潤滑油やワックスの添加剤など幅広い分野で使用されている物質である。廃棄された製品からこれらの物質が環境水中に溶出し、有機リン酸トリエステル類が琵琶湖・淀川水系、大阪市内河川や大和川では490-22,000ng/L、京都府舞鶴湾では3-62ng/Lで検出された²⁻³⁾。有機リン系農薬であるダイアジノン、フェントロチオンやクロロピリフォスなども京都府の舞鶴湾から3.6-21ng/L、琵琶湖から<5-19,300ng/Lで検出された³⁻⁴⁾。フタル酸エステル類もプラスチックの可塑剤や塗料などの添加剤等、有機リン酸トリエステルと同様家庭内外の至る所に使用されている物質である。これらの物質が環境中に溶出し、廃棄物処分地から造成された埋め立て地の浸出水から9.8-8,100ng/Lで検出されている⁵⁾。また、環境省の調査でフタル酸ビス(2-エチルヘキシル)(DEHP)が全国23地点中13地点から110-1,700ng/L、フタル酸ブチルベンジル(BBP)が23地点中2地点から140-190ng/L検出されたと報告されている⁶⁾。多環芳香族炭化水素類は炭素化合物の燃焼により生じるため、自動車や工場などの排ガスなどに含まれる。また、重油の不純物としても含有されている。多環芳香族炭化水素類16種がアメリカのミシシッピ川の表層水から、62.9-144.7ng/L、台湾のGao-ping川から10-9,400ng/Lで測定されたと報告されている⁷⁻⁸⁾。このように、河川域からのこれら化学物質の検出は、そこに棲む水棲生物に対する影響のみならず、その河川が水道水源となる場合は、前述の物質は水道の基準項目には含まれていないことから、水道水を通しての人間への健康への影響が危惧される。

最近「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような開発」という“持続可能な開発”に基づく社会の在り方が問われる中、バイオマスへの注目が高まっている⁹⁾。バイオマスの中でも、廃材や間伐材などを利用した木質系炭化物である炭についての研究は広くなされている¹⁰⁻¹¹⁾。炭は木材と同様の組織構造であるが、原材料よりも約3分の1に縮小された各種孔の集合体である¹²⁾。多くの細孔によりさまざまな物質が吸着することがわかり、昔から吸着材として利用されてきた。水質浄化に最もよく用いられている炭は活性炭であ

り、石炭や廃棄物などの人工物由来のもの、ヤシ殻やおが屑といった自然由来のものから作られており、形状も粉末から繊維状まで様々である。活性炭はその原料をガスや薬品を用いて賦活化処理を行い作られた人工物の炭であり0.7-3nmの多くの細孔を有する¹³⁾。この活性炭はノニルフェノールやビスフェノール A¹⁴⁾、六価クロム¹⁵⁾、水中の染料¹⁶⁾、鉛やニトロベンゼン¹⁷⁾を効率よく吸着することがわかっており、すでに実用化されているものもある¹⁸⁾。

竹はアジア温帯や熱帯湿潤地域に分布し、成長が3～5年と早いため、昔から様々な用途で使用されてきた。しかし現在、プラスチック等の代替材やタケノコの輸入増により国内の竹材需要は減少し¹⁹⁾、管理されていない放置竹林が増加している²⁰⁻²¹⁾。竹資材の有効的な活用法のひとつとして竹炭がある。活性炭と同様、水質浄化剤としての竹炭の利用が研究されているが、現在は重金属吸着に関するものが主であり²²⁾、有機化学物質に対する吸着に関する研究はほとんどない²³⁾。

本論文では環境水中から検出される報告例の多い有機リン酸トリエステル類6種類、有機リン系農薬4種、フタル酸エステル類8種および多環芳香族炭化水素類8種を対象として竹炭への吸着性について検討した。

2. 実験

2.1 化学分析

2.1.1 試薬

表1に示す有機リン化合物類10種は関東化学株式会社または和光純薬工業株式会社より購入した。フタル酸エステル類は和光純薬工業株式会社から販売されている8種のフタル酸エステル混合標準液(100 μ g/mLヘキサン溶液)を用いた(表2)。多環芳香族炭化水素類は、表3に示す8種を東京化成工業株式会社または和光純薬工業株式会社より購入した。これらの薬品は特級グレード以上および測定に使用した溶媒類は残留農薬試験用を用いた。

2.1.2 測定方法

有機リン化合物類、フタル酸エステル類および多環芳香族炭化水素類は、検水100mLまたは500mLを1Lの分液ロートに入れ、その溶液中にジクロロメタン50mL加え、振とう機で10分振とう後、10分間静置した。ジクロロメタン層を、無水硫酸ナトリウムを入れた漏斗に通水することで脱水し、200mL容ナスフラスコに採った。再びジクロロメタン50mLを加え振とうしジクロロメタン層を脱水後ナスフラスコに合わせた。ロータリーエバポレーターと窒素気流下で濃縮し、内標準物質として2mg/LのAtrazine-d₅を100 μ L添加後1mLに定容した。この溶液をバイアル瓶に詰め、質量分析計付きガスクロマトグラフィー(GC/MS)で測定した。

検量線の作成は、表1に示す10種類の有機リン化合物類を各々50mg採取し、メスフラスコを用いて50mL定容とし1,000mg/Lの有機リン化合物標準原液を調製した。この標準原液から0.5mL採取し100mL定容とし5mg/Lの有機リン化合物混合溶液を調製した。検量線用の標準試料は5mg/Lの有機リン化合物類を含む標準溶液をヘキサンで希釈して0.01mg/L、0.05mg/L、0.1mg/L、0.5mg/Lおよび1mg/Lに調製し、各々をGC/MSに注入した。表2に示すフタル酸エステル類や表3に示す8種類の多環芳香族炭化水素類も有機リン化合物類と同

表1 有機リン酸トリエステル類および有機リン系農薬類の種類と GC/MS のモニターイオン

Abbreviation	IUPAC Name	Quantitative ion	Identification ion
TEP	Triethyl phosphate	155	127
TBP	Tributyl phosphate	211	155
TCEP	Tris(2-chloroethyl) phosphate	249	251
TDCP	Tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate	191	381
PTPP	Triphenyl phosphate	326	325
TCP	Tricresyl phosphate	368	367
Diazinon	O,O-diethyl-O-2-isopropyl-6-methylpyrididin-4-yl) phosphorothioate	179	304
Iprobenfos	S-benzyl O,O-diisopropylphosphorothioate	91	204
Fenitrothion	O,O-dimethyl O-(3-methyl-4-nitrophenyl) phosphorothioate	277	125
Chlorpyrifos	O,O-diethylO-(3,5,6-trichloropyridin 2-yl) thiophosphate	314	197

表2 フタル酸エステル類の種類と GC/MS のモニターイオン

Abbreviation	IUPAC Name	Quantitative ion	Identification ion
DEP	Diethyl phthalate	149	222
DPrP	Dipropyl phthalate	149	250
DBP	Di-n-butyl phthalate	149	278
DPP	Di-n-pentyl phthalate	149	306
DHP	Di-n-hexyl phthalate	149	334
BBP	Benzyl butyl phthalate	206	312
DEHP	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	149	167
DCHP	Dicyclohexyl phthalate	279	149

表3 多環芳香族炭化水素類の種類と GC/MS のモニターイオン

Abbreviation	IUPAC Name	Quantitative ion	Identification ion
ANTL	Acenaphthylene	152	151
ANS	Acenaphthene	153	154
FL	Fluorene	166	165
FLAN	Fluoranthene	202	101
PY	Pyrene	202	201
B [a]PH	Benzo[a]phenanthrene	228	114
B [a]P	3,4-Benzopyrene	252	126
PARY	Perylene	252	125

様の操作で標準原液を調製した。標準原液をヘキサンで希釈し、フタル酸エステル類の検量線の標準試料は0.01mg/L、0.1mg/L、0.5mg/L、1 mg/L および 5 mg/L に、多環芳香族炭化水素類は0.005mg/L、0.01mg/L、0.05mg/L、0.1mg/L および 1 mg/L に調製し、各々を GC/MS 用試料とした。

ガスクロマトグラフィーは、Agilent Technologies 社、6890N Network GC System、質量分析計は5973 Network Mass Selective Detector を用いた。GC/MS のカラムは InertCap 5MS-NP

(30mx0.25mm×0.25μm)を用いて、昇温条件は、有機リン化合物類は50℃で1分保持し、20℃/minで280℃まで昇温し、10分間保持した。フタル酸エステル類は60℃で1分保持し、10℃/minで270℃まで昇温し、8分間保持した。多環芳香族炭化水素類は50℃で2分保持し、20℃/minで120℃まで、さらに7℃/minで310℃まで昇温した後10分間保持した。いずれの物質群も注入口温度は270℃、注入量は1μLで、スプリットレス方式により行った。質量分析計への取り込みはSIMモードで行った。表1には有機リン化合物類、表2にはフタル酸エステル類、表3には芳香族炭化水素類の定量用および確認用マススペクトルを示す。

2.2 浄化方法

2.2.1 吸着量と平衡濃度試験

10mg/Lの有機リン化合物類、フタル酸エステル類または多環芳香族炭化水素類を含むアセトン溶液2mLを200mL容のビーカーに加え、蒸留水を加え100mLとして、各々の化学物質の濃度が0.2mg/Lになるように調製した。竹炭0.05～2gを各々のビーカーに各々加えて24時間マグネティックスターラーで攪拌した。経時毎にろ過後各々の化学物質の濃度を測定した。

2.2.2 吸着率

1mg/Lの有機リン化合物類、フタル酸エステル類および多環芳香族炭化水素類を含むアセトン溶液1mLを1,000mL容のビーカーに加え、蒸留水を加え500mLとして0.002mg/Lに調製した。各々のビーカーに竹炭10gを加えて24時間マグネティックスターラーで攪拌した。濾過後、各々の溶液の濃度を測定した。

3. 結果・考察

3.1 吸着量と平衡濃度

有機リン酸トリエステル類に対する竹炭への吸着量と平衡濃度との関係を図1に示す。本実験条件で最も多い吸着量に注目すると、有機リン酸トリエステル類は、トリフェニルフォスフェイト (TPP) とトリス (2-クロロエチル) フォスフェイト (TCEP) を除き竹炭1gに対して約5mg吸着していることがわかる。TPPはこれら化合物より若干低く約3mg、TCEPは約1.5mgであった。有機リン系農薬類は、クロロピリフォスを除き、有機リン酸トリエステル類と同様、竹炭1gに対して、約4-5mgを吸着した (図2)。クロロピリフォスについては、他の農薬類に比べ若干吸着力が低く、約2.5mgであった。フタル酸エステル類についても有機リン化合物類と同程度で、ジエチルフタレート (DEP)、ジ-n-ヘキシルフタレート (DHP) およびシクロヘキシルフタレート (DCHP) を除くと竹炭1gに対して、4-5mgが吸着した。DEP、DHP および DCHP は2.5-3.5mgであった (図3)。多環芳香族炭化水素類に対する吸着量も他の物質群と同程度で、ベンゾ[a]フェナンスレン (B[a]PH)、3,4-ベンズピレン (B[a]P) およびペリレン (PARY) を除き約4mgと多く、高分子量になると低下し B[a]PH、B[a]P および PARY は2.5-3.5mgであった (図4)。疎水性を表す指標として、n-オクタノール・水分分配係数がある。オクタノール・水分分配係数の値が大きいほど、疎水性を示す。本研究で用いた有機リン酸トリエステル類の n-オクタノール・水分分配係数は0.8-5.1、有機リン系農薬類

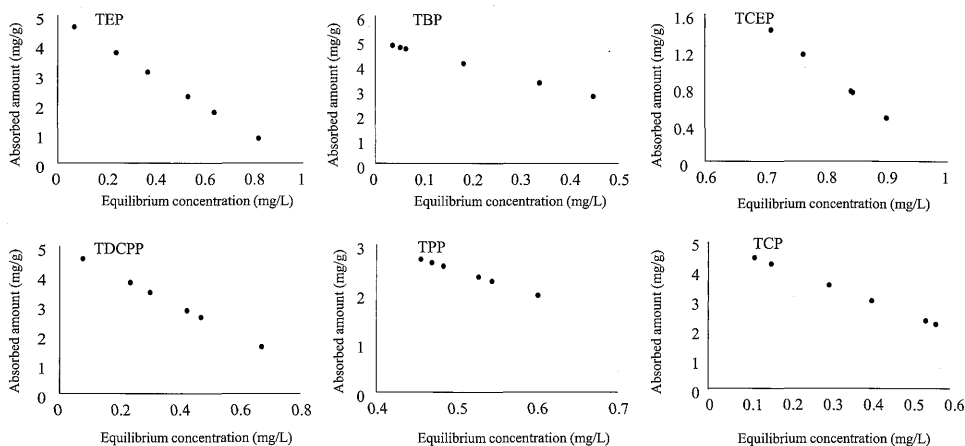


図1 竹炭に対する有機リン酸トリエステル類の平衡濃度と吸着量との関係

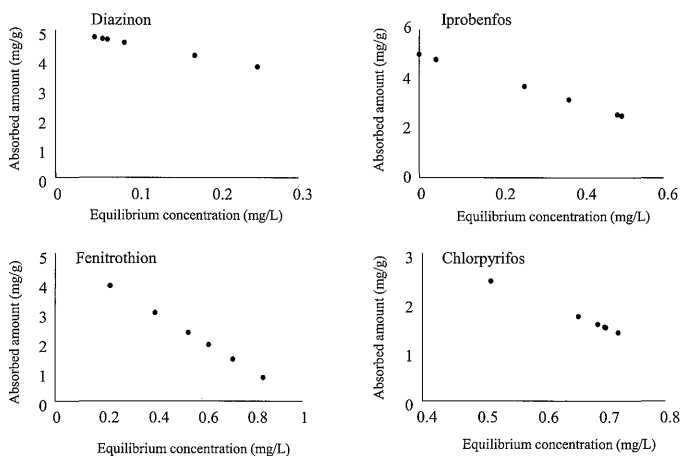


図2 竹炭に対する有機リン系農薬類の平衡濃度と吸着量との関係

は3.1-4.7、フタル酸エステル類は2.4-5.6、多環芳香族炭化水素類は3.9-5.3であった。各々の化学物質群の吸着量は、有機リン化合物類、フタル酸エステル類および多環芳香族炭化水素類ともに同程度であった。また、有機リン酸トリエステル類に注目すると、本研究で用いた物質群の n -オクタノール・水分配係数は0.8-5.3と幅が広いにも関わらず、ほとんどの物質の吸着量は4-5 mgと変わらなかった。これは、疎水性相互作用のみだけで化学物質と竹炭が吸着しているとは限らないことを示す。つまり、ベンゼン環の有無や分子サイズ等いくつかの要因が絡みあい吸着していることが推察できる。また、竹炭1gに対して5mg吸着すると仮定すると、通常これら物質が環境水で検出される濃度は1mg/L以下であるので、1Lの汚染水を浄化するのに竹炭0.2gを用いれば可能であると試算できる。

次に、有機リン酸トリエステル類の平衡濃度と吸着量の関係を見ると、図1に示すように平衡濃度が低いときは竹炭の単位重量当たりの吸着量が多く、平衡濃度が増加すると吸着量が減少する傾向が認められた。有機リン系農薬類についても有機リン酸トリエステル類と同様、平衡濃度が高くなるにつれ、吸着量が減少する傾向がみられた(図2)。フタル酸エステル類に

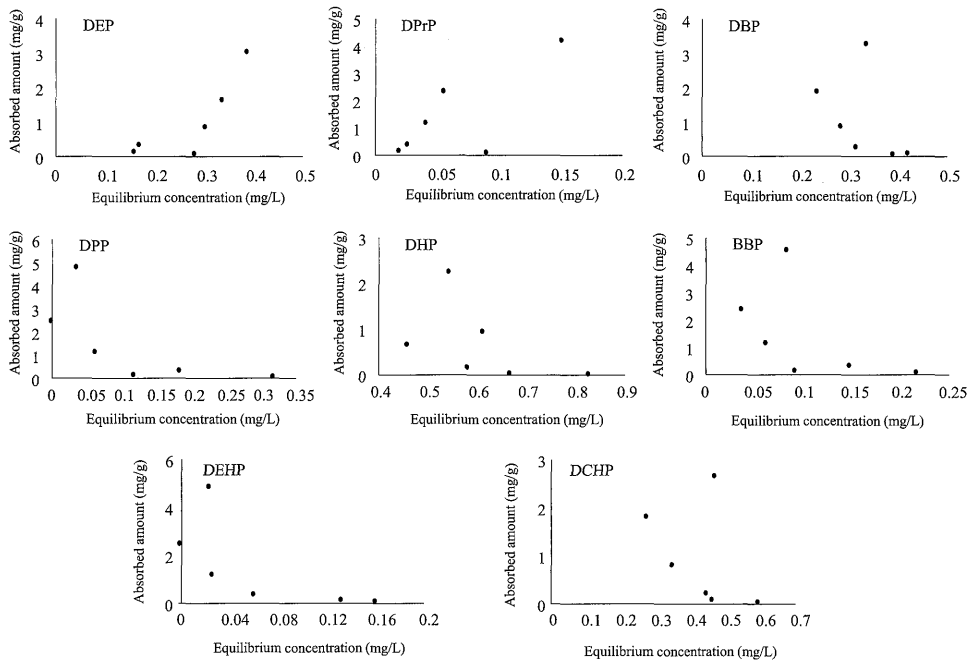


図3 竹炭に対するフタル酸エステル類の平衡濃度と吸着量との関係

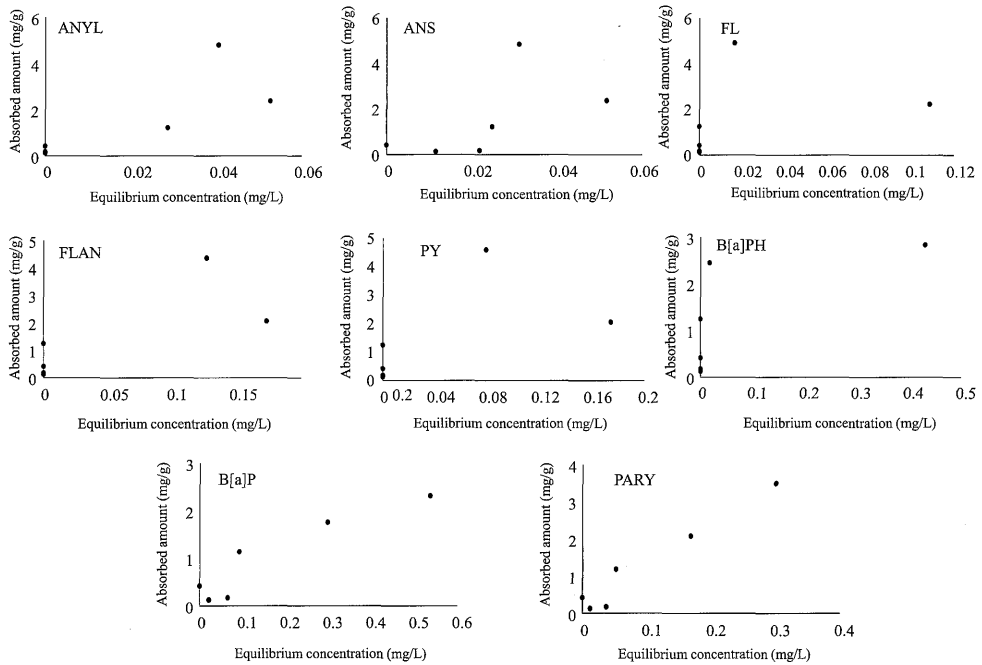


図4 竹炭に対する多環芳香族炭化水素類の平衡濃度と吸着量との関係

つについては、DEPとジプロピルフタレート(DPrP)は、平衡濃度が高くなると吸着量が増加したが、それ以外の物質は有機リン化合物類と同様減少した(図3)。また、図4に示すように、多環芳香族炭化水素類については、平衡濃度が高くなるにつれ、吸着量が増加する傾向が認められた。平衡濃度が増加すると吸着量が少なくなる傾向が認められる物質は、もっとも低い平衡濃度では吸着容量に達し、それ以上濃度を高くすると脱着する傾向があることを示す。それに反し、平衡濃度が増加すると吸着量が増加する物質は、なおも吸着容量に達せず、さらに濃度を上げると吸着量が増すことが予測される。これらのことを考慮し、今後は最適化を考える必要がある。

3.2 除去効率

0.002mg/Lの有機リン化合物を含む試験水500mLに竹炭を10g加えた後24時間攪拌後の除去率を算出した(図5)。有機リン化合物類の除去率は95-100%と良好であった。有機リン化合物類は環境水からは $\mu\text{g/L}$ レベルで検出されるため²⁻³⁾、この吸着材を用いると十分にこれら化合物を除去できることがわかる。

つぎに、フタル酸エステル類8種の除去率を算出した(図6)。ジ-n-ブチルフタレート(DBP)とDCHP以外の物質は98-100%除去することができたが、DBPとDCHPは竹炭からの溶出が認められた。Zhaoら²⁴⁾は竹炭1gを用いて0.025mg/Lに調製された水溶液からのフタル酸エステル類の除去を検討している。DBPの除去率はほぼ100%となっている。炭は同じ材料を用いても燃焼温度で大きく性質が異なることが報告されている¹²⁾。Zhaoらが用いた竹炭と本研究で使用した竹炭の焼成温度の違いが、異なった結果になった要因の一つと考えられる。また、フタル酸エステル類は環境中に多く存在しており、炭を保存している間に大気中の

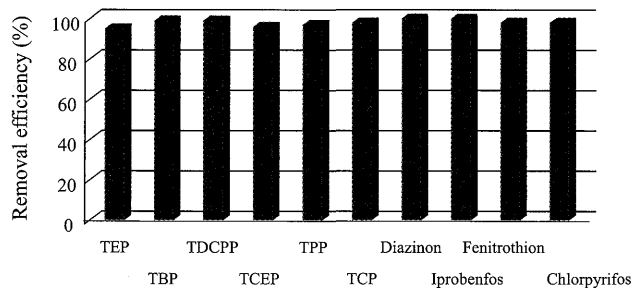


図5 有機リン化合物類の除去率

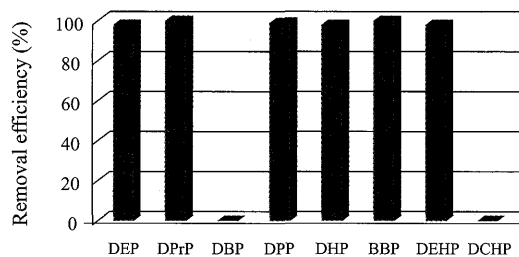


図6 フタル酸エステル類の除去率

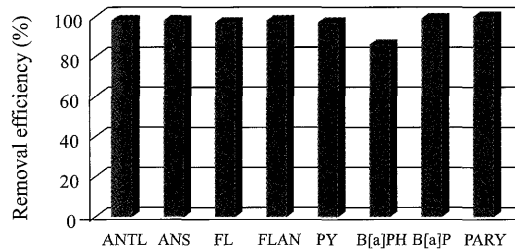


図7 多環芳香族炭化水素類の除去率

フタル酸エステル類を吸着する。それゆえ、本研究で用いた竹炭はすでに大気中のDBPやDCHPを吸着していたのかもしれない。竹炭をフタル酸エステル類の吸着材として使用する場合は、使用前に高温で再度加熱する等、すでに吸着しているフタル酸エステル類を除去しておく必要がある。公共用水域からのフタル酸エステル類の検出率は6/130で最大値1.1 μ g/Lと報告されている²⁵⁾。本研究で検討した濃度は、水中の濃度に近いことから、公共用水域中に含まれるフタル酸エステル類をこの竹炭を用いて十分除去できると考えられる。

多環芳香族炭化水素類の除去率は86-100%であった(図7)。多環芳香族炭化水素類は一般に大気や土壌で検出され、水中からの検出頻度は低いと報告されているが、下尾ら²⁶⁾は山口県内の河川水域中の多環芳香族炭化水素類17種を調査し、19地点中11地点で検出されたと報告している。このように、公共用水域中でも検出されるので、竹炭は水からの多環芳香族類の除去を行ううえで、重要な浄化材となることが予測される。

4. 結論

竹炭による水中に含まれる物質の除去率をみるために有害化学物質として有機リン化合物類、フタル酸エステル類および多環芳香族炭化水素類について検討した。物質によってばらつきがあるが、水中に存在するこれら物質のほとんどを、竹炭を用いて除去することができた。今後、条件の最適化や化学物質の吸着メカニズムを解明し、実用化に向けた方法を開発する必要がある。

5. 謝辞

本研究は2012年度神戸女学院大学研究所研究助成にサポートされて行われたものである。本研究を遂行するにあたり、竹炭を提供していただいたNPO法人京都発・竹・流域環境ネットの永田寛治氏と吉田博次氏に感謝の意を表す。また、分析機器を使用するにあたり助言をいただきました金陵電気株式会社の池田正明氏に御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 橋本敬行、水循環システムのしくみ、伊藤雅喜編著、ナツメ社、10-13、2010年
- 2) 福島実、有機リン酸トリエステル類の水環境中での動態、水環境学会誌、19、692-699 (1996)
- 3) Harino H., Yatsuzuka E., Yamao C., Ueno M., Ohji M., Current status of organophosphorus compounds

- contamination in Maizuru Bay, Japan, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 94, 43-49 (2013)
- 4) 津田泰三、河川及び湖沼の水及び魚類中の殺虫剤、環境化学、17、603-627 (2007)
 - 5) 行谷義治、鈴木茂、安原昭夫、毛利紫乃、山田正人、井上雄三、廃棄物埋立地浸出水および処理水中の無機成分、ジオキサン、フェノール類およびフタル酸エステル類の濃度、環境化学、12、817-827 (2002)
 - 6) 環境省 環境保健部 環境安全課、平成25年度版化学物質と環境、160-168、平成26年 3月
 - 7) Zhang S., Zhang Q., Darisw S., Ehie O., Wang G., Simultaneous quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyl (PCB), and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Mississippi river water, in New Orleans, Louisiana, USA, *Chemosphere* 66, 1057-1069 (2007)
 - 8) Doong R. A., Lin Y. T., Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment water from Gao-ping River, Taiwan, *Water Research*, 38, 1733-1744 (2004)
 - 9) 長谷川有紀、八束絵美、張野宏也、ファイトレメディエーションによる水質浄化、神戸女学院大学論集、60(2)、20-30 (2013)
 - 10) 炭やきの会環境を守る炭と木酢液、社団法人炭の光協会、25 (1998)
 - 11) 張野宏也、八束絵美、炭を用いた水質浄化、神戸女学院大学論集、59(2)、35-46 (2012)
 - 12) 安倍郁夫、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、3-13 (2009)
 - 13) Harry M. and Francisco R.-R. 活性炭ハンドブック 構造制御とキャラクタリゼーション、林昌彦、川下由加記、丸善株式会社、3-5、平成23年 1月31日
 - 14) 安倍郁夫、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、184、234-235 (1998)
 - 15) Babel S. and Kurniawan T., Cr (VI) removal from synthetic wastewater using coconut shell charcoal and commercial activated carbon modified with oxidizing agents and/or chitosan. *Chemosphere*, 54, 951-967 (2004)
 - 16) Iqbal M. J. and Ashiq M. N., Adsorption of dyes from aqueous solution on activated charcoal. *Journal of Hazardous Materials B*139, 57-66 (2001)
 - 17) 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、231、18-20 (2008)
 - 18) 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、39-46 (2009)
 - 19) 林野庁 竹関係資料 <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/tokusan/megurujoukyou/pdf/4take.pdf> (2011)
 - 20) 鳥居厚志、井鷲裕司、京都府南部地域における竹林の分布拡大、日本生理学会誌、47、31-41 (1997)
 - 21) 鳥居厚志、周辺二次林に侵入拡大する存在としての竹林、日本緑化工学会誌、28、412-416 (2003)
 - 22) 張野宏也、八束絵美、炭を用いた水質浄化、神戸女学院大学論集、59、36-46 (2012)
 - 23) 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、平成23年度水環境学会講演要旨集、591 (2012)
 - 24) Zao R. S., Wang X., Yuan J. P., and Lin J. M., 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*, 1183, 15-20 (2008)
 - 25) 環境省、「化学物質の環境リスク初期評価第3巻」第一編、<http://www.env.co.jp/chemi/report/h16-01/index/html> (2004)
 - 26) 下尾和歌子、下濃義弘、田中克正、山口県内における PAHs 類の濃度分布、山口県環境保健センター所報、51、52-57 (2008)

(原稿受理日 2014年 9月16日)