

# 竹炭による界面活性剤含有排水の吸着処理に関する研究

伊原靖二、赤坂尚美、上杉和愛

## Adsorption of Surfactants from Aqueous Solution onto Bamboo Charcoals

Yasuji IHARA, Maomi AKASAKA, Kazue UESUGI

### Summary

The adsorption isotherms of anionic and nonionic surfactants onto bamboo charcoals were measured in aqueous solution at 35 °C. The bamboo charcoals used were different types of refinement degree prepared from different route temperature. The surfactants used were sodium dodecylbenzenesulfonate (NaDBS) and polyoxyethylene nonylphenylether (E910). In general, the adsorption affinities for the both surfactants increased with decreases in the refinement degree of bamboo charcoals. E910 adsorbed about 100 times greater than NaDBS. The results indicated that fine pores size of bamboo charcoals played an important role of the adsorption. The relationship between adsorption affinities and chemical properties were also discussed in order to determine preferred adsorption behaviors of surfactants onto bamboo charcoals.

### 1. 緒言

近年、工場や家庭から排出される水質汚濁物質による水質の悪化が問題とされている。その水質汚濁物質の原因の1つに界面活性剤が挙げられる。界面活性剤は水に溶解されると、親水基が電離しイオンになるイオン性界面活性剤と電離しない非イオン性界面活性剤に分類される。さらに、イオン性界面活性剤は電離した時のイオンの性質によってマイナスに電離する陰イオン性界面活性剤、プラスに電離する陽イオン性界面活性剤、プラスにもマイナスにも電離する両性界面活性剤に分けられる<sup>1)</sup>。日本での界面活性剤の生産量は陰イオン性界面活性剤と非イオン性界面活性剤の割合がほとんどである。それらの界面活性剤が含まれている製品を私たちは様々な場面で利用している。例えば、シャンプーやリンス、歯磨き粉、各種家庭用洗剤や化粧品等に界面活性剤は含まれている。その中でも、洗剤に注目してみると、日本で使用されている洗剤の量は、平地面積あたりになると世界でもっとも多く、河川に流出する量が多いといわれている。さらに日本の大部分の河川は流れが急で短く、水量が少ないので、河川で分解される洗剤の量は少ない。そのために閉鎖系の内

海や内湾、湖沼などの汚染がしだいに進みつつある<sup>2)</sup>。下水処理場や工場において、河川に排出する前に界面活性剤を除去する必要がある。

今回、界面活性剤を除去する方法として、竹炭による吸着処理を目的に、研究を行った。竹を密閉した窯の中で加熱して炭化という現象で作り上げた竹炭は、脱臭・吸湿・浄化・吸着などの優れた性能を発揮することが分かっており、最近、TVや書籍などで竹炭製品をよく目にする。水質の浄化に竹炭を利用した例はすでにあり、不純物の吸着のみならず、藻の発生を防ぐ、有用微生物のすみかとなるなどの理由から注目されている。

山口県は県面積の約71%を森林面積が占め、このうち3% (11,255ha) が竹林であり、全国では、鹿児島に次いで、2位の広さを持つ<sup>3)</sup>。しかし、全国的に竹材市場の低迷や、竹林産業地域の過疎化・高齢化などの背景のもと、竹林の多くが荒廃している現状がある。竹林が放置されると、竹が畑や植林に広がり、土壌の養分を奪い取り、植生の単一化が進み、土砂崩れの危険性も高まる<sup>4)</sup>。こうした中、山口県では竹の繁殖対策や未使用資源の活用方法として、アサリ漁業の回復のために竹格子を干潟に設置している。また、その他にも竹製品の開発や大型の

竹炭窯を新設するなど積極的に取り組みを進めている<sup>3)</sup>。

イネ科に属する竹は、タケノコとして食材になるほか、建築材や竹かごなどの日用品の材料にも使われており、竹材の生産量は、プラスチックの代替品や安い輸入品の登場によって年々減少し、県内でも過去10年で3分の1に減っている。一方、タケノコも全国の年間消費量32万トンの約9割は輸入ものでまかなわれており、山口県のタケノコ生産量は全国17位で、竹林面積の割には収穫されていない<sup>5)</sup>。

竹炭は土壌改良や畜産分野への利用等農業的用途の他に、地球にやさしい環境づくりとして酸性雨対策への利用、木質系廃棄物の炭化による地球温暖化防止への貢献、木質系廃棄物の再利用化、水質浄化等への応用が期待されている。しかしその効用が科学的に解明されておらず、またその利用に関する研究は散発的であり本格的な取り組みは皆無である。

筆者らは界面活性剤含有廃水の吸着処理に関する基礎的知見を得る目的で、活性炭を含む種々のイオン性及び非イオン性吸着剤に対する界面活性剤の吸着性に関して一連の研究を行ってきた<sup>6-15)</sup>。前報においては竹炭を用いた廃水中のフェノールやビスフェノールAのような環境汚染物質の除去技術開発の研究を試み、その基礎的データを得た<sup>16)</sup>。本研究は、上記研究の一環として、吸着剤に山口県産の竹材を利用した竹炭を用い、界面活性剤を効果的に吸着処理するための指針を得ることを目的とし、陰イオン性界面活性剤と非イオン性界面活性剤を製造時の煙道温度の異なる7種類の竹炭によって吸着させた。その結果をもとに、吸着等温式を用いて吸着作用を解析し、竹炭の製造時の煙道温度が2種類の界面活性剤の吸着にどのような変化をもたらすかを比較検討した。環境破壊が大きな社会問題となっている現在、竹炭の持つ水質浄化・土壌改良作用等の特徴を生かし、水質浄化技術の開発の可能性を追求するものである。

表1 竹炭の物理的性質 (1)

	煙道温度 [°C]	表面電気抵抗値 [Ω/cm]	精錬度	炭化温度 [°C]
竹炭300	300	∞	7.68	500以上600以下
竹炭350	350	2116000	5.86	600以上700以下
竹炭400	400	4220	4.14	700以上800以下
竹炭450	450	35.8	1.50	800以上900以下
竹炭500	500	7.7	0.70	900以上

表2 竹炭の物理的性質 (2)

	煙道温度 [°C]	精錬度	JIS-M-8821 分析[%]			
			水分	灰分	揮発成分	固体炭素
竹炭550	550	5-7	8.9	3.9	6.8	83.5
竹炭610	610	0-3	8.1	3.3	3.7	84.9

## 2. 実験

### 2-1 吸着剤

#### 1) 竹炭

山口県山口市小鯖産モウソウ竹からの竹炭を用いて実験を行った。製造時の沿道温度 (300, 350, 400, 450, 500°C) が異なる竹炭をデジタルマルチテスタと木炭精練計を使い、竹炭の物性を測定した。その結果を表1に示した。(竹炭300, 350, 400, 450, 500は、ドラム缶式竹炭窯で製造した。佐古山氏設計) そして、竹炭をそれぞれ軽く純水で洗い、定温乾燥機にて110°Cで24時間乾燥させた。また、各沿道温度の竹炭をそれぞれ竹炭300, 350, 400, 450, 500とし、そして、フォースミルでなるべく粉末状になるまで粉碎し使用した。

上記の竹炭とは別に、産地の異なる山口県山口市宮野産モウソウ竹からの竹炭550と竹炭610の物性を表2に示した。また、これらの竹炭は、粉末状でそのまま使用した。(ドラム缶式竹炭窯：佐古山氏設計)。

#### 2) 石炭系粒状活性炭 (DIAHOPE)

活性炭は三菱化成社製の石炭系粒状活性炭 (DIAHOPE) で、比表面積1150m<sup>2</sup>/g、ヨウ素吸着量1070mg/gの物性値のものを使用した。

### 2-2 アニオン及び非イオン性界面活性剤

ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム (1、Na-DBS) は市販試薬特級品 (半井化学薬品株式会社) をエタノール-水混合溶媒より繰り返し再結晶することによって精製後使用した。非イオン界面活性剤は花王アトラス社製のポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル (2、E910) で、そのまま精製せずに使用した。



剤として、アニオン性のドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム (Na-DBS) と非イオン性のポリオキシエチレンノニルフェノールエーテル (エマルゲン910) の2種類の35℃における吸着に及ぼす時間的变化を求めた。一例として図2に一定量の竹炭300及び竹炭500によるNa-DBSとE910の吸着変化の結果を示した。図からも明らかなように、E910の場合、時間経過に伴い吸光度が減少し、それぞれ竹炭の種類により吸着能の違いがあるものの、約48時間で平衡吸着状態に達し、吸光度の減少割合からかなりの吸着が認められた。それに反して、NaDBSの吸着の場合は約24時間で平衡吸着状態に達したが、吸着量はE910と比べ少ない結果が得られた。E910の分子量はNaDBSの2倍以上の大きさがあり、前報の環境阻害物質の結果では、竹炭は小さい分子をより多く吸着したが、今回の場合は逆の結果が得られた。

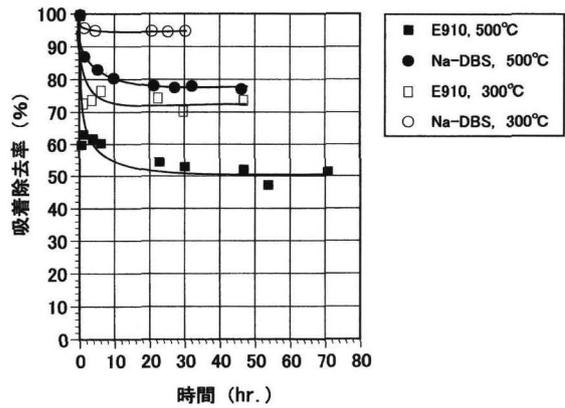


図2 竹炭による界面活性剤の吸着に及ぼす時間的变化  
35℃, 竹炭0.2g,  
[NaDBS]= $9.45 \times 10^{-5}$  M, [E910]= $9.33 \times 10^{-5}$  M, 40ml

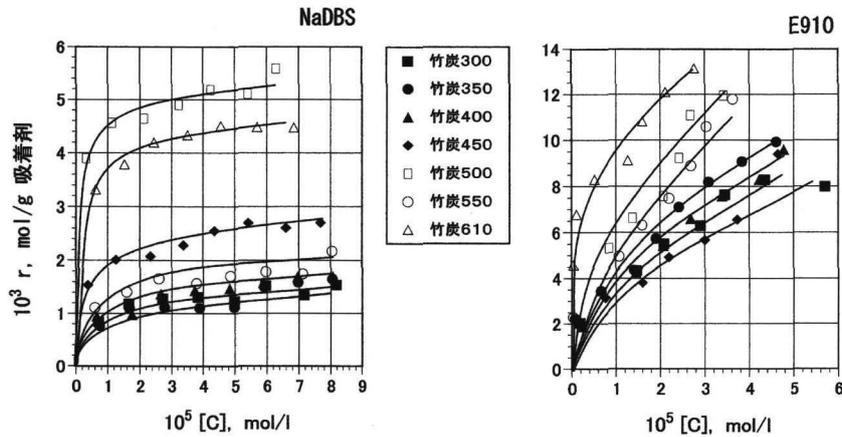


図3 竹炭による界面活性剤の平衡吸着等温線 35℃

次に、上記の平衡到達時間を基に、各竹炭に対する界面活性剤の水溶液中、35℃における等温吸着曲線を求めた。図3に竹炭によるNaDBS及びE910の吸着等温線を示した。この図において、横軸は平衡時の界面活性剤の濃度 [C] (mol/l)、縦軸は竹炭1g当たりの吸着量 [r] (mol/g 吸着剤)を示す。これらの吸着等温線より明らかなように、いずれの場合もNaDBS及びE910濃度の増加とともに増加し、ある濃度になるとほぼ一定となり平衡に達するようである。吸着量は竹炭の精練度が低くなるにつれて多く吸着されるようである。図3の竹炭によるNa-DBSの等温吸着曲線は濃度の増加とともに増加し、ある濃度になるとほぼ一定となり平衡に達することが認められたが、E910の等温吸着曲線は測定濃度範囲においては濃度の増加とともに増加し、その吸着量はNaDBSの吸着量の約2倍であった。

上記液相吸着での測定データは、Freundlich型吸着等温式またはLangmuir型吸着等温式で表されることが多い。どちらの式がよく適合するかは吸着系によって異なる。活性炭は疎水性吸着剤であり、一般的に疎水性有機化合物の吸着に適しており、Freundlich型吸着等温式がよく適合するといわれている。最近では、数多くの実験データを両式に当てはめ、Freundlich型吸着等温式の方がよく適合するといわれている<sup>17)</sup>。今回、竹炭及び活性炭の吸着を解析するため、まずはFreundlich型吸着等温式を利用した。

Freundlich型吸着等温式は吸着剤単位質量あたりの吸着量 r は界面活性剤の平衡時濃度 C の関数として表すことができ、吸着平衡定数を k(1/g)、定数を 1/n とし、次の(1)式のように示される<sup>18)</sup>。

$$r = kC^{1/n} \quad (1)$$

K : 平衡定数

1/n : 定数

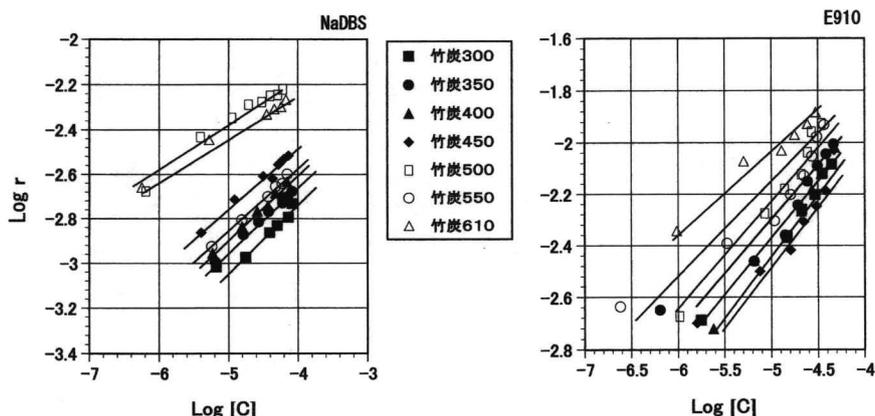


図4 竹炭による界面活性剤の吸着の対数プロット 35℃

$$\log r = 1/n \log [C] + \log K \quad (2)$$

なお、これらのデータをさらに定量的に取り扱うために、(2)式のように  $\log [C]$  と  $\log r$  の関係をプロットすると、図4に示すように、それぞれよい直線関係が得られ、Freundlich型吸着に相当する関係が成立し、したがって Freundlich 式で整理することができた。

K 及び  $1/n$  の値は先の対数プロットの勾配及び切片から求めることができるが、本研究では非線形最小自乗法を用いて算出した。その求めた平衡定数 K と定数  $1/n$  の結果を、比較のために活性炭の結果とともに表3及び表4に示した。

表3 竹炭と活性炭による NaDBS 水溶液の吸着結果<sup>a)</sup>

吸着剤	吸着平衡定数 (K) (l/g)	係数 (1/n)
竹炭300	0.0228	0.273
竹炭350	0.0285	0.276
竹炭400	0.0360	0.288
竹炭450	0.0398	0.267
竹炭500	0.0414	0.200
竹炭550	0.0433	0.298
竹炭610	0.0285	0.174
活性炭	8.79	0.293

a) Freundlich 吸着定数、35℃

表4 竹炭と活性炭によるエマルゲン910水溶液の吸着結果<sup>a)</sup>

吸着剤	吸着平衡定数 (K) (l/g)	係数 (1/n)
竹炭300	1.33	0.506
竹炭350	2.01	0.532
竹炭400	2.34	0.557
竹炭450	3.67	0.611
竹炭500	4.88	0.586
竹炭550	2.26	0.521
竹炭610	0.246	0.283
活性炭	2906	0.712

a) Freundlich 吸着定数、35℃

表3及び表4から明らかなように、Freundlichの式から得られた、吸着の強さを示す吸着平衡定数 K に着目すると、NaDBSでは竹炭300から竹炭500にかけては製造時の煙道温度の上昇とともに吸着平衡定数は高い値を示した。だが、竹炭610では吸着平衡定数は急激に低下し、竹炭350と同じくらいの値が得られた。エマルゲン910については竹炭300から竹炭500にかけては NaDBS と同様に製造時の煙道温度の上昇とともに吸着平衡定数が高くなった。竹炭610は竹炭7種類のなかでもっとも低い値であった。活性炭については NaDBS、エマルゲン910ともに高い値を示した。吸着質に着目すると、エマルゲン910が NaDBS よりも、竹炭の種類によって差はみられるが、平均して約100倍、活性炭では約320倍、吸着平衡定数が高かった。

$1/n$  値については製造時の煙道温度の差による顕著な傾向は見られなかった。 $1/n$  値は高ければ、低濃度で飽和吸着に達したことを表し、低ければ高濃度で飽和吸着に達したことを表す。一部を除いてはほぼ同じ値であったが、NaDBSでは、竹炭500と竹炭610において低い値を示し、エマルゲン910では竹炭610が低い値を示した。NaDBS、エマルゲン910ともに、竹炭610が最も低い値であった。活性炭は K 値では他の7種の竹炭に比べると、非常に高い値を示したが、定数  $1/n$  は他の竹炭とあまり差が見られなかった。

ここでは、各吸着剤の界面活性剤の吸着を解析するにあたり、Freundlich型吸着等温式を利用した。しかし、Freundlich型吸着等温式は比較的狭い濃度領域では多くの吸着系でよく適合するが、非常に低濃度から高濃度までの吸着データをあてはめようとすると外れてくる傾向がある<sup>17)</sup>。また、Langmuir型吸着等温式は Freundlich 型吸着等温式では算出されない飽和吸着量を求めることができる。そこで、Langmuir型吸着等温式での解析も試みた。

Langmuir型吸着等温式<sup>19)</sup>では(3)式に示すよ

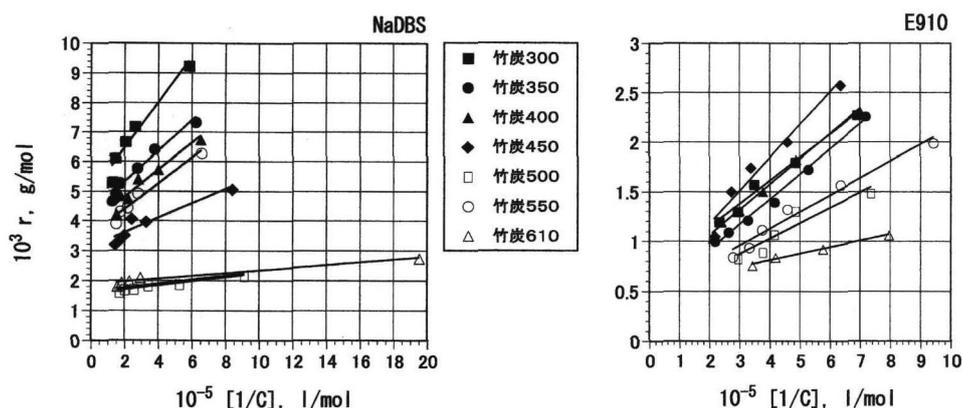


図5 竹炭による界面活性剤の吸着の逆数プロット 35°C

うに $1/r$ と $1/C$ の関係、すなわち逆数プロットを求めると直線関係が得られる。本実験においても図5に示すように、ほぼ直線関係が得られ、みかけ上Langmuir型吸着に相当する関係が成立した。したがってLangmuirの式(3)で整理できることがわかった。しかしこれらの吸着剤系においてはLangmuirの単分子層吸着理論が成立していることにはならず、吸着等温線の型が単にLangmuir型であるに過ぎない。(3)式はさらに(4)式のように変形でき、ここで $\alpha$ は $C=0$ における $r/C$ 、であり吸着量とバルク水溶液中の界面活性剤濃度の比すなわち無限希釈における吸着性を示しており、吸着能の尺度として用いることが出来る。また、濃度変化に伴う最大(飽和)吸着量を求めることが出来る。

$$1/r = 1/\alpha [C] + 1/a \quad (3)$$

$\alpha$  : 吸着定数

$a$  : 飽和吸着量

$$[C]/r = 1/\alpha + [C]/a \quad (4)$$

この $\alpha$ を吸着の尺度として用いることができる。また $a$ は飽和吸着量を示しているの、以下 $\alpha$ 及び $a$ を用いて吸着機能を比較検討することにした。 $\alpha$ 及び $a$ 値は先の逆数プロットの勾配及び切片から求めることができるが、本実験においては非線形最小自乗法を適用し算出した。その求めた結果を表5及び表6にまとめた。

表5及び表6より明らかなように、飽和吸着量を示す $a$ についてはNaDBSでは竹炭300から竹炭500にかけては製造時の煙道温度の上昇とともに高くなる傾向が見られた。竹炭500が竹炭7種類の中で最も値が高く、竹炭500は竹炭500の約1/2の量であった。竹炭610は竹炭500に続いて2番目に高い値であった。エマルゲン910は竹炭300から竹炭500までは竹炭400を除いて、製造時の煙道温度の上昇とともに飽和吸着量は増加する傾向が見られ、竹炭610につ

図5 竹炭による界面活性剤の吸着の逆数プロット 35°C

表5 竹炭と活性炭によるNaDBS水溶液の吸着結果<sup>a)</sup>

吸着剤	飽和吸着量 (a) ( $\times 10^{-2}$ mol/g)	吸着平衡定数 ( $\alpha$ ) ( $\times 10^4$ l/g)
竹炭300	0.183	12.0
竹炭350	0.224	10.5
竹炭400	0.243	11.7
竹炭450	0.321	15.5
竹炭500	0.582	58.5
竹炭550	0.267	11.6
竹炭610	0.505	106
活性炭	24.5	198

a) Langmuir 吸着定数、35°C

表6 竹炭と活性炭によるエマルゲン910水溶液の吸着結果<sup>a)</sup>

吸着剤	飽和吸着量 (a) ( $\times 10^{-2}$ mol/g)	吸着平衡定数 ( $\alpha$ ) ( $\times 10^4$ l/g)
竹炭300	1.34	3.57
竹炭350	1.71	2.96
竹炭400	1.46	3.35
竹炭450	1.96	1.63
竹炭500	2.22	3.27
竹炭550	2.18	2.88
竹炭610	1.27	44.9
活性炭	59.6	37.0

a) Langmuir 吸着定数、35°C

いては竹炭7種類の中で最も低い値であった。活性炭についてはNaDBS、エマルゲン910の両方で高い値が示された。吸着質に注目すると、エマルゲン910がNaDBSよりも、竹炭では種類によって差はみられるが、平均して約10倍、活性炭では約2倍、吸着量が多かった。また、竹炭550と竹炭610に着目すると、NaDBSでは竹炭610が高い値を示しているのに対して、エマルゲン910では反対に竹炭550が

高い値を示した。

$\alpha$  値については製造時の煙道温度の差による、顕著な傾向は見られなかったが、NaDBS では竹炭500、610、活性炭の値が高かった。エマルゲン910では竹炭610、活性炭が特に高く、竹炭610が活性炭の値以上であった。

以上の2つの式で吸着作用を比較した結果、竹炭300から竹炭500までは Freundlich 型吸着等温式の吸着平衡定数  $K$  と Langmuir 型吸着等温式の飽和吸着量  $a$  は竹炭製造時の煙道温度の上昇とともにその値が高くなる傾向が見られた。

活性炭は両方の式において、 $K$  値、 $a$  値は大変高かったが、 $1/n$  値は竹炭7種類と同じくらいの値であった。しかし、 $\alpha$  値はそれぞれ竹炭の中で最も高い値を示した竹炭610と比較して、NaDBS は約2倍、エマルゲン910では若干低い値を示した。

### 3-2 吸着能と界面活性剤の構造との関係

Na-DBS 及び E910の竹炭に対する水溶液からの吸着性は、両者それぞれの物性の相互作用により種々変化する。吸着性におよぼす吸着物質の物性の主なものは、親水性・疎水性のバランス、分子サイズ、及び親水基の電気的性質である。

前報<sup>16)</sup>で示したように、竹炭によるフェノールとビスフェノールAの吸着結果では分子量の小さいフェノールの方が分子量の大きいビスフェノールAより吸着された。竹炭の内部表面積は約250~300 m<sup>2</sup>/g程度であり、これらの事実からも分子の構造が大きくなると表面の吸着サイトを妨害することが推定でき、ビスフェノールAのように分子サイズが大きいものは内部の細孔に入りにくいことを示している。その結果、全体の吸着能が減少したものと考えられる。活性炭の場合はその表面積が約1100 m<sup>2</sup>/g程度であり、その結果分子が大きく、疎水性のBPAの方が吸着されやすい結果となった。

本実験の竹炭による界面活性剤の平衡吸着実験の結果では、 Freundlich 型吸着等温式、Langmuir 型吸着等温式の両式において、竹炭300から竹炭500までは製造時の煙道温度の上昇に伴い、吸着作用を示す各値が高くなる傾向が見られた。一般的に、竹炭の製造時の煙道温度が上がるにつれて、細孔の壁の厚さが薄くなり細孔の大きさが大きくなるといわれているため、それらの値が大きくなったと考えられる<sup>19)</sup>。本研究で使用した竹炭もその傾向が見られた。また、本研究で使用した竹炭の物性を測定した結果、竹炭の製造時の煙道温度を変えることで表面電気抵抗や精練度が大きく異なることが分かった。表面電気抵抗と精練度の数値は、よく炭化され不純物の少ない炭化物ほど小さいといわれている<sup>20)</sup>。本研究で使用した竹炭は煙道温度の上昇に伴い、表面

電気抵抗値と精練度の値は小さくなったことから煙道温度を上げることで、竹炭の炭化が進み、不純物が少ないことが分かり、吸着作用に炭化度合いも影響したと考えられる。しかし、竹炭550と竹炭610は、本研究ではその傾向を示さなかった。竹の生産地が異なる事が原因として挙げられる。竹の大きさや組成に、生産地が異なることにより生じた土壌や気候等の自然環境の違いが影響していると考えられる。その違いのある竹を炭化させて製造した竹炭であったことが、吸着作用にも現れたと思われる。また、全種類の竹炭を粉末状で使用したが、竹炭300から竹炭500の5種類では粗い粉末状の竹炭が見られたのに対して、竹炭550、竹炭610の2種類では細かい粉末状の竹炭が見られた。その粉末状態の違いの原因として、竹炭は煙道温度の上昇により、壁が薄くなることで、竹炭特有の細孔や壁がもろくなりやすい傾向があるのではないかと考えられる。その傾向は顕微鏡写真でも確認できた。

本研究で使用した界面活性剤、NaDBS は分子量が348であり、エマルゲン910は分子量704である。そのため、分子量が小さい NaDBS の方がエマルゲン910よりも竹炭の細孔に吸着されると思われたが、実際はエマルゲン910の方が Freundlich 型吸着等温式より求めた吸着平衡定数も、Langmuir 型吸着等温式で求めた飽和吸着量でも高い値を示した。その原因としては、エマルゲン910は分子量が大きいため、その分子間に働く力が強い点が挙げられる。特定のエマルゲン910分子が吸着された後、その分子間力により、他の分子も重なるように吸着されたのではないかと考えられる。また、それぞれの界面活性剤水溶液中での溶質と溶媒の親和力が影響したと考えられる。親水基にスルホン酸を持つ Na-DBS はフェニル・エーテル結合を持つエマルゲン910に比べて、水との親和力が強く、吸着に影響したと思われる。さらに、竹炭の主成分である、炭素はマイナスイオンを多く持つことから、界面活性剤の水溶液中でのイオン性も影響したと考えられる。

なお、 Freundlich 型吸着等温式で求めた吸着の強さを示す吸着平衡定数と Langmuir 型吸着等温式で求めた飽和吸着量は、全ての竹炭においては、同じ傾向を示さなかった。よって、吸着の強さと飽和吸着量の各視点に注目し、それぞれの視点から竹炭の吸着作用について理解する必要がある。

### 3-3 結論

本研究では界面活性剤を効果的に吸着処理するための指針を得る目的で、山口県で生産・製造された、製造時の煙道温度が異なる7種類の竹炭と活性炭を吸着剤に、また、吸着質として、陰イオン性界面活性剤と非イオン性界面活性剤を使用し、平衡吸着実

験を行った。

竹炭は活性炭ほどの吸着作用は見られなかったが、界面活性剤に対して選択的な吸着作用が見られた。また、竹炭製造時の煙道温度の差による、吸着作用にも違いが見られた。界面活性剤の多様化が進む中、それらの界面活性剤の除去に適応できる吸着剤が必要とされる。本研究で得られたような竹炭特有の吸着作用を、更に改良・研究を重ねることで、界面活性剤の除去率を高めた吸着処理が可能になると期待できる。

はじめに述べたように、竹林は現在、様々な問題を抱えている。だが、今回用いた竹炭のように少し加工を施すことで水質浄化に役立つ資源になり得る。竹炭を始め、まずは身の回りの資源への理解を深めることが、自然環境を保全する大切な一歩に繋がると考える。

本研究の遂行にあたり、竹炭を製造・供与して頂いた山口県在住の佐古山進氏と、山口県立大学附属地域共生センターの石川正一先生に深く感謝申し上げます。本研究は平成18年度文部科学省科学研究費(課題番号18500580)により行なわれた。

## 参考文献

- 1) 日本界面活性剤工業会, <http://www.jp-surfactant.jp/index.html>
- 2) 保田 仁資, 「新版 やさしい環境科学」(株)化学同人, (2003年3月)
- 3) 山口県企画振興部統計課, <http://www.pref.yamaguchi.jp/gyosei/tokei/omosiro/z19.htm>
- 4) 竹炭工房・竹仁, <http://www2.wbs.ne.jp/~chikujin/index.html>
- 5) 山口県, “第19回続・おもしろ統計ウォッチング”
- 6) Y. Ihara, *J. Appl. Polym. Sci.*, **32**, 5665 (1986).
- 7) Y. Ihara, *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 3087 (1987).
- 8) Y. Ihara, *J. Appl. Polym. Sci.*, **36**, 891 (1988).
- 9) Y. Ihara, *J. Appl. Polym. Sci.*, **44**, 1837 (1992).
- 10) 伊原靖二, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書 (1985).
- 11) 伊原靖二, 斎藤真澄, 山口女子大学特別研究費補助金研究成果報告書 (1987).
- 12) 伊原靖二, 山口女子大学研究報告 家政学部 **17**, 1 (1991).
- 13) 伊原靖二, 山口女子大学研究報告 家政学部 **18**, 57 (1992).
- 15) 伊原靖二, 山口女子大学研究報告 家政学部 **22**, 9 (1996).
- 15) 伊原靖二, 山口県立大学生生活科学部研究報告 **25**, 23 (1999).
- 16) 伊原靖二, 青山和也, 今村主税, 山口県立大学大学院論集 **7**, 81-88 (2006).
- 17) 近藤精一・石川達雄・安部郁夫, “吸着の科学”, 九善株式会社 (平成13年)
- 18) 伊原靖二, 文部省科学研究補助金研究成果報告書, 平成6年度
- 19) I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.*, **40**, 1361 (1918).
- 20) 鹿児島県林業試験場刊行物刊行規定(2000年5月) <http://www.kpfes.ecnet.jp/kankoubutu/kenhou8-2.pdf>