

雨天時道路排水中の汚濁物と 炭化物を混入した路盤による処理特性

POLLUTANTS IN THE ROAD DRAINAGE AND TREATMENT BY SUB-BASE COURSE
SPECIMEN CONTAINED WITH CHARCOAL

貫上佳則*・山田 優**

by Yoshinori KANJO and Masaru YAMADA

1. はじめに

平成12年に公布された建設リサイクル法により、リサイクル率の低い木質系廃棄物の有効利用方策を検討することが強く求められている。その新しい有効利用用途の1つとして、木質系廃棄物を炭化し、再生炭として利用する方法がある。その効果は、焼却処理と比べて大幅にCO₂の発生量を削減でき、かつダイオキシン類や道路排水中の汚濁成分の吸着材として有効利用できる¹⁾ことである。

一方自動車の排ガス中には有害物質や浮遊粉塵等の様々な物質が存在し、路面上に堆積したこれらの物質が降雨によって流出する。そのため雨天時道路排水には浮遊物質濃度(以下、SS)や過マンガン酸カリウムを用いた化学的酸素要求量(以下、COD_{Mn})等が排水基準値より高い値を示すことがある。また発ガン性が懸念されている多環芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: 以下、PAHsと略す)が含まれている場合もある。透水性舗装の場合、この汚染された道路排水が舗装表面から路盤や路床に浸透し、地下水を汚染する恐れがある。ここでPAHsとは、2個以上のベンゼン環から構成された化合物の総称である。これらは道路排水の流出に伴い、多くが懸濁物質に付着する形で流出していると考えられている。PAHsには変異原性・発癌性・生物蓄積性を有する物質が多く、生態系への悪影響が危惧されている。アメリカ合衆国の環境保護庁(United States Environmental Protect Agency: 以下、U.S.EPAと略す)では、16物質を要注意物質としてリストアップしている。

そこで本研究では、採水調査によって雨天時に道路面から排出される道路排水中の汚濁物濃度を測定するとともに、街路樹剪定枝由来の炭化物(以下、木炭とする)を透水性舗装の路盤材に混入し、道路排水中の汚濁物質の吸着除去能について検討した。

*: 大阪市立大学教授 大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)、**: 都市リサイクル工学研究所代表、大阪市立大学名誉教授 (〒530-0055 大阪市北区野崎町 1-25-801)

2. 道路排水の水質分析調査

2-1 調査概要と分析方法

本研究では、交通量の多い幹線道路であることと、降雨初期の道路排水を確実に採取するために、大学に近い表1に示す大阪市内の一般道路橋の排水口を選定し、雨天時において路面から排出される道路排水を排水開始時より経時的に採取した。調査日とそれぞれの降雨関連データを表2に示す。調査日①と調査日②では、降り始めから30分ほど経過した後、降雨量が多くなり、その後次第に降雨量が減少した。これに対して、調査日③では、降り始めに強く雨が降り、その後、徐々に降雨量が減少した。

採取した道路排水は、JIS K0102 14.1(ガラス繊維ろ紙法)によるSSと、アメリカ Standard Methods 508 B (Close Reflex, Titrimetric method)による二クロム酸カリウムを用いた化学的酸素要求量(以下、COD_{Cr})を測定した。なお、SS測定時のろ液のCOD_{Cr}(以下、S-COD_{Cr})も測定し、COD_{Cr}との差から粒子状化学的酸素要求量(以下、P-COD_{Cr})を算出した。

また、PAHs濃度は、固相カラム(VARIAN社、Bond Elut Jr. C18)を用いて固相抽出した後、ガスクロマトグラフ質量分析装置GC/MS(GC: Agilent Technologies HP6890, MS: Agilent Technologies HP5973MSD)のSIMモードを用いて分析した。カラム槽温度は50°Cで1分保持し、その後20°C/minで昇温し、300°Cで30分間保持して分析した。分析に際してサロゲート物質(SUPELCO、Base-neutral surrogate spike mix 4-8925)を用いて回収率の補正を行った。なお、U.S.EPAによって指

表1 調査地の概要

調査地点		大阪府道28号線吾彦大橋
平均* 交通量	平日(台/昼間)	27100
	平日(台/1日)	40500
	休日(台/昼間)	29300
	休日(台/1日)	42600
舗装種類		密粒度アスファルト舗装
集水面積(m ²)		150

* 平成11年現在(大阪府土木部より)

表2 調査日とそれぞれの降雨関連データ

調査日	調査時刻	総降雨量 (mm)	先行晴天日数(日)*		
			1mm	5mm	10mm
①10月26日	5:25-6:52	2.0	5	6	6
②11月11日	11:00-12:24	2.0	9	10	10
③11月26日	21:27-23:01	9.0	6	6	7

*1日の総降水量がそれぞれ1mm以上、5mm以上、10mm以上あった日から調査日までの日数

定された 16PAHs のうち、予備実験により測定可能で 70%以上の回収率が得られた 8 種類を対象に考察を行った。

2-2 水質分析結果

SSとP-COD_{Cr}の経時変化を図1に示す。SS、P-COD_{Cr}は流出初期に高濃度を示すファーストフラッシュ現象²⁾が顕著に表れた。ファーストフラッシュ時におけるSSおよびP-COD_{Cr}の値は先行晴天日数の長さに応じて高くなっており、懸濁態物質の排水流出初期の濃度は先行晴天日数の長さ依存すると考えられる。

排水流出初期後の水質変化は、調査日によって異なっており、これは主に降雨パターンに依存していたものと考えられる。また、SSとP-COD_{Cr}の経時変化には強い相関性(相関係数:0.737~0.989)があり、SSが増加すればP-COD_{Cr}も増加する傾向がみられた。

S-COD_{Cr}、電気伝導度(以下、EC)の経時変化を図2に示す。SSやP-COD_{Cr}では初期排水の濃度が最低濃度の20倍もの高い濃度を示したが、S-COD_{Cr}やECのような溶存態物質では8倍程度であった。また、調査日③では明確なファーストフラッシュ現象が認められなかった。排水流出初期以降の経時変化は若干の上下動はあるものの、概ね緩やかな減少傾向を示した。また、降雨強度と各項目の濃度との間には、

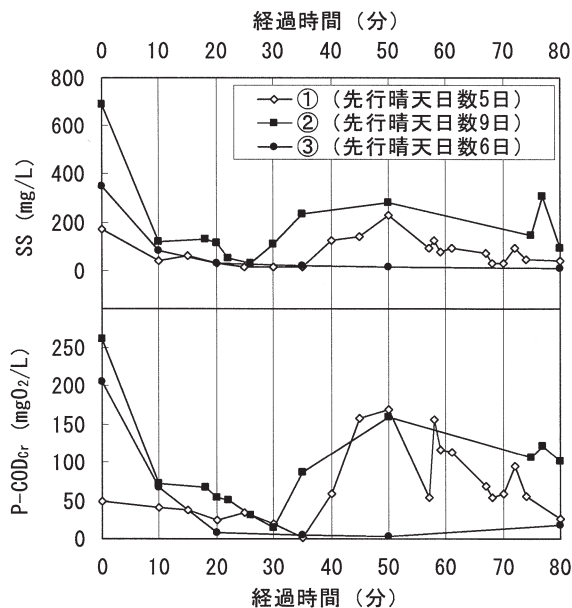


図1 道路排水中の SS および S-COD_{Cr} の経時変化

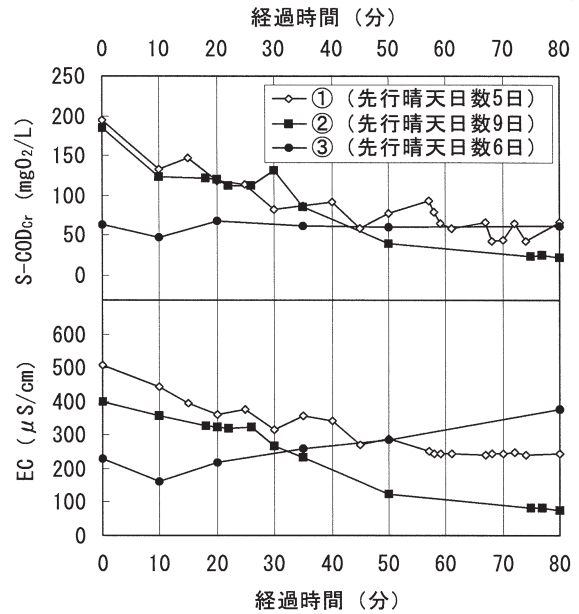


図2 道路排水中の S-COD_{Cr} および EC の経時変化

顕著な相関関係は見られなかった。その中で唯一、調査日③のECが時間とともに増加した。この日は降雨初期以後に流量が急激に減少したことから、路面と雨水との接触時間が相対的に増加したため、路面上の物質からの溶解が進んだものと考えられる。さらに、先行晴天日数の長さ依存して濃度が高くなるような傾向は溶存態物質ではみられず、懸濁態物質とは異なる流出特性を有することがわかった。

つぎに、調査日②の道路排水に含まれる PAHs 濃度の定量分析結果を表3に示す。なお、分析に際して、道路排水の流出開始から0~20分を初期、20~50分を中期、50~80分を後期と定義し、それぞれの時間区分における排水のコンポジット試料を分析対象とした。

分析の結果、AcenaphtheneとPyreneを除くPAHs成分で、排水初期の濃度が最も高かった。他の水質項目と同様に、PAHs濃度も初期に高濃度を示す傾向があることがわかった。特にBenzo[a]Pyreneで顕著にあらわれており、初期濃度は中期の3倍もの値を示していた。逆に他のPAHs成分

表3 道路排水中のPAHs濃度(調査日②)

物質名	【略称】	初期	中期	後期
Acenaphthene	【Ace】	N. D.	0.15	N. D.
Acenaphthylene	【Act】	N. D.	N. D.	N. D.
Benzo[a]Pyrene	【BaP】	1.58	0.45	0.82
Benzo[g, h, i]Perylene	【BghiP】	1.56	0.98	1.45
Fluoranthene	【Flt】	3.24	2.45	2.96
Fluorene	【Flu】	0.50	N. D.	N. D.
Indeno[1, 2, 3-cd]pyrene	【IP】	0.74	0.46	0.65
Pyrene	【Py】	4.35	3.28	5.04

注) N. D. : 定量限界値以下、単位: μg/L

の初期濃度は、他時間帯との濃度差が1.6倍以下と小さく、PAHsの流出特性は成分ごとに異なっていた。

道路排水中における各PAHs成分の存在割合を図3に示す。図3から、Pyreneの割合がもっとも高く、Fluorantheneと合わせて6割以上を占めていた。Pengchai³⁾はこのようなPAHs各成分の存在割合の差異はPAHsの発生源の違いから生じ、PyreneとFluorantheneを多く含むのは主にディーゼル車排ガスによる寄与であり、Benzo[g,h,i]peryleneとIndeno[1,2,3-cd]pyreneの割合の増加は、タイヤかすからの溶出による影響の可能性が高いと述べている。この知見に基づくと、全調査日の全時間帯においてPyreneとFluorantheneの存在割合が高かったことから、PAHsの主たる排出源はディーゼル車排ガスであると推測される。

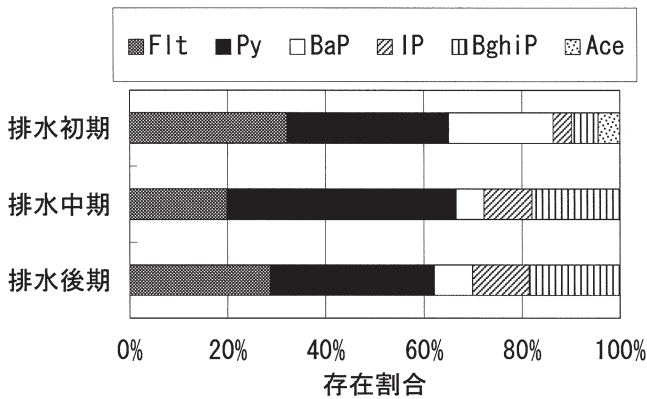


図3 道路排水中のPAHsの割合の例(調査①)

3. 路盤に混入させた木炭の特性

3-1 使用した木炭の物理性状

本研究では、街路樹剪定枝を炭化して作成した木炭を用い、比較試料として市販の粒状活性炭(カルゴン社製)を用いた。表4に試料のpHと比表面積を示す。表1から、木炭は活性炭に比べ比表面積が約4分の1であり、弱アルカリ性であった。また木炭の溶出試験の結果から、重金属濃度は土壤環境基準値以下であった。

試料名	木炭	活性炭
pH	8.85	8.03
比表面積(m ² /g)	247	882

3-2 使用した木炭の吸着性能

木炭による道路排水中の有機物の吸着性能を調べるため、以下の3種類の道路排水を使用した。

排水①: 新設の透水性舗装面からの道路排水

排水②: 既設の排水性舗装面からの道路排水A

排水③: 既設の排水性舗装面からの道路排水B

表5にこれら3種類の排水の水質分析結果を示す。分析方法は上述と同様にJISあるいはStandard Methodsに従った。また、排水中の全有機性炭素(以下、TOC)濃度も測定した。

表5 道路排水の性状

試料名	排水①	排水②	排水③	
pH	7.08	7.11	7.08	
SS(mg/L)	5.00	24.8	27.0	
TOC(mgC/L)	21.5	39.8	91.0	
COD _C (mg/L)	40.9	153	253	
S-COD _C (mg/L)	50.6	129	229	
PAHs (ng/L)	Acenaphthene	9.3	-	N.D.
	Fluoranthene	N.D.	-	108
	Pyrene	N.D.	-	135

注)N.D.:検出限界値以下、-:未測定

用いた木炭の吸着性能は、JIS K 1474で規定された吸着試験方法に従い、排水①、②および③を用いて20℃の恒温状態で実施した。そして、吸着平衡時のTOC濃度:Cと平衡吸着量:qとの関係を式(1)に示すフロイントリッヒ型吸着等温式で整理し、吸着係数を求めた。

$$\log q = \log k + \frac{1}{n} \log C \dots \dots (1)$$

kおよび1/nは吸着定数を表し、1/nの値が小さいほど高濃度から低濃度にかけてよく吸着することを意味する。またkの値が大きければ吸着能が優れていることを意味する⁴⁾。Cとqとの関係を図4に、吸着定数の値を表6に示す。木炭では、試料水のTOC濃度が上がるにつれて1/nの値は小さくなり、吸着能はよくなることがわかった。

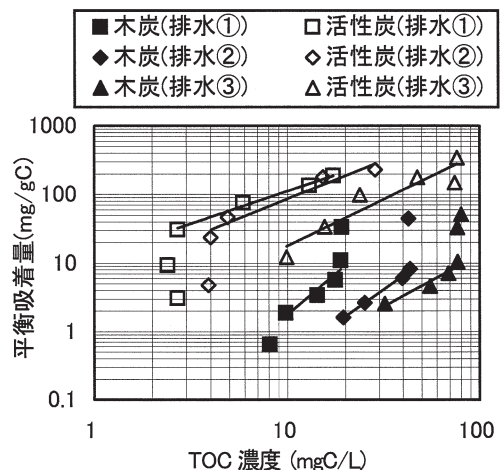


図4 木炭と活性炭の吸着等温線(20℃)

表6 各炭化物の吸着定数

使用水	1/n			k		
	排水①	排水②	排水③	排水①	排水②	排水③
木炭	2.39	1.98	1.52	0.007	0.004	0.013
活性炭	0.95	1.13	1.36	12.6	6.46	0.78

4. 模擬路盤による道路排水の処理実験

4-1 模擬路盤の作成方法とその物性

上述の木炭を混入した路盤を用いて、道路排水の吸着処理実験を実施した。実験に用いた模擬路盤は、下層路盤に使用されるクラッシュラン C-20 の規定粒度の範囲内に収まるように粒度調整したものを基準配合とした(表 7 参照)。基準配合の乾燥重量に対して、外割で 1~8%の木炭を添加して混合した。また、活性炭は外割で 2%のみ添加し混合した。これらの試料を、JIS A 1210 に準拠する方法で直径 150mm のステンレス製モールドを用いて締め固め、供試体を作成した。これら供試体の最適含水比と修正 CBR を測定した。結果を表 8 に示す。各供試体の修正 CBR の値はいずれも 80% 以下であったが、30%以上を満たしていることから、下層路盤として適用できるものと判断できる。

また、表9にJIS A 1218に従って実施した各供試体の透水試験の結果を示す。木炭の添加割合が増加するにつれて透水係数は低下することがわかる。これは木炭の添加量を増やすと、締め固めた際に粒子強度が弱い木炭が破壊され細粒分が増加して骨材間隙に充填されたためであると考えら

表7 路盤の基準配合

骨材	粒径(mm)	配合割合(重量%)
クラッシュラン C-20	13.0~20.0	25
	5.00~13.0	40
	2.50~5.00	15
	~2.50	20

表8 各供試体の修正 CBR と最適含水比

供試体の配合	修正 CBR(%)	最適含水比(%)
基準配合	60	4.8
木炭	1%	62
	2%	65
	4%	60
活性炭	2%	34

表9 供試体作製時の 15°C換算透水係数

供試体の配合	15°C換算透水係数(cm/s)	
基準配合	1.05×10^{-3}	
木炭	1%	1.63×10^{-3}
	2%	8.11×10^{-4}
	4%	5.96×10^{-5}
	8%	1.66×10^{-5}
活性炭 2%	7.66×10^{-4}	

れる。一般的に透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ で透水性が低いとされ、 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ では非常に低いと評価される⁵⁾。このことからどの添加率の時も透水性は低いと考えられる。木炭を4%以上添加すると、透水性舗装の本来の性質を損なう恐れがあると判断できる。

4-2 通水試験の方法と条件

通水試験の概略図を図5に、通水条件を表10に示す。4-1で作成した供試体を20°Cの恒温室内に設置し、供試体内での目詰まりを防ぐためにろ過した排水②と③をダウンフローで供試体に通水した。通水速度は日本における降雨時の平均的な降雨強度である 3mm/日(72mm/日)とし、最長44日間通水した。日本の年間平均降雨量が1700mmであることから、約2年間の降雨に相当する水量を44日間で通水させ多ことになる。そして、2-1もしくは3-2と同様に、供試体から流出した水に対して、TOCとPAHs濃度を測定した。

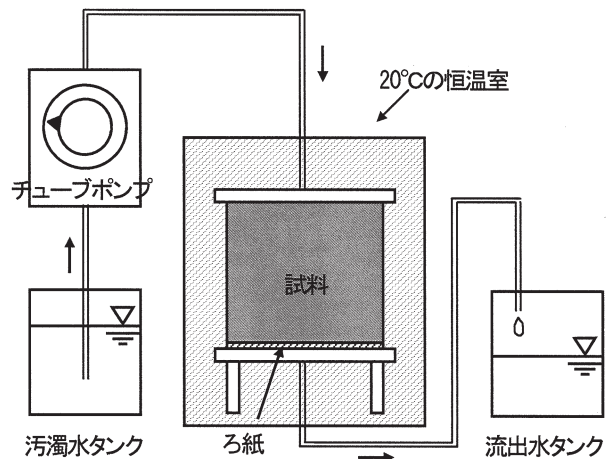


図5 通水試験概略図

表10 通水試験の条件

試料		木炭		活性炭	
通水速度(mm/日)		72			
通水期間(日)		44	20		
使用水		排水②	排水③	排水②	排水③
添加率(%)	添加なし	○	-	○	-
	1	-	○	-	-
	2	-	○	-	○
	4	○	○	○	-
	8	-	○	-	-

注) 通水速度72mm/日は降雨日における平均降雨強度を表す
○:試験実施、-:未実施

4-3 試験結果と考察

木炭を4%混合した模擬路盤に対する44日間の通水試験の結果を図6に示す。図に示すとおり、通水当初は原水中の約半分の有機物を供試体が吸着していることがわかる。

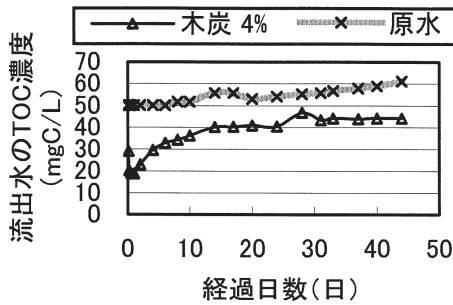


図6 通水試験の結果

その後、通水量が増えるにつれて流出水中のTOC濃度が増加したが、15日目以降は流出水のTOC濃度が40~43mgC/L程度ではほぼ一定値を示した。すなわち、15日目以降、原水中のTOC濃度を10~15mgC/L吸着除去したことがわかった。上述の通り、日本の年間平均降雨量を1700mmとすると、約2年間に相当する降雨量によって発生する道路排水中の有機物を25~30%近く除去したことがわかった。

図7に式(2)によって算出した供試体によるTOC除去率と式(3)によって算出した炭1gあたりのTOC除去量を示す。

$$\text{TOC除去率 (\%)} = 100 \times \frac{\text{供試体による除去TOCの積算値}}{\text{流入TOCの積算値}} \quad (2)$$

$$\text{炭1gあたりのTOC除去量 (mg/g木炭)} = \frac{\text{供試体によるTOC除去量} - \text{添加なしのTOC除去量}}{\text{供試体内の炭の量}} \quad (3)$$

炭を添加しない場合、20日間でTOC除去率は9.0%であった。炭の添加率を上げるとTOC除去率は上がることがわかった。木炭4%と8%の炭1gあたりのTOC除去量は活性炭の約4分の1であった。使用排水の濃度が高い方がTOC除去率は高くなることがわかった。

また、図8に通水初期流出水中のPAHs濃度の結果を示す。

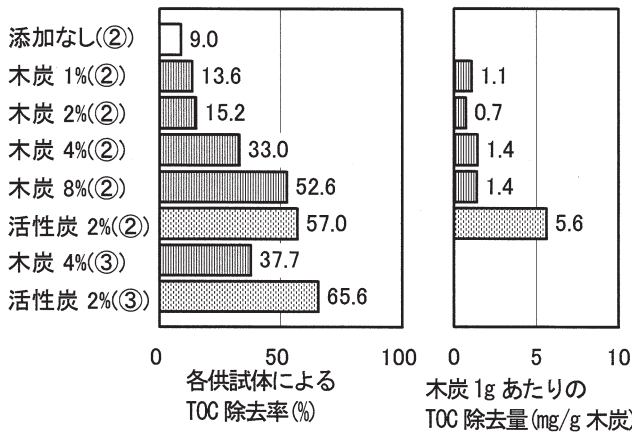


図7 各供試体のTOC除去率と木炭1gあたりのTOC除去量
注) 供試体名：用いた炭の種類と添加率(使用排水番号)

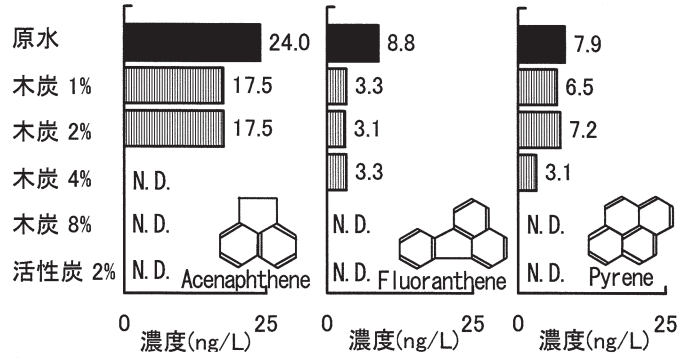


図8 供試体通水初期流出水中のPAHs濃度

図8から各PAHsが除去され、木炭の添加率を上げると除去量も高くなることがわかった。また排水③を用いた試験では初期流出水中のPAHs濃度はいずれも検出限界値以下であった。

5. まとめ

- (1) 排水中のPAHs濃度の多くは排水流出初期で高かった。また、PAHsの各成分ごとに流出特性が異なることがわかった。
- (2) PAHsの主たる発生源がディーゼル車排ガスである可能性が示唆された。
- (3) 通水試験による木炭の吸着能は活性炭に比べると4分の1であった。また使用排水の濃度が高くなるとTOC除去率は高くなった。
- (4) 初期流出水中のPAHs濃度は原水に比べ低く、炭が道路排水中のPAHsを除去したことがわかった。
- (5) 木炭を4%地盤材料として混入した場合には、約2年間道路排水中の汚濁物を25~30%除去したことがわかった。

謝辞

実験を行うにあたって、国土交通省 近畿技術事務所の援助を受けた。また、当時学生であった宮部正登君(現(株)西日本技術コンサルタント)と林直人君(現関西電力(株))の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Y. Kanjo, N. Yurugi and M. Yamada: Treatment of roadway drainage by sub-base course specimen prepared with charcoal derived from waste wood, Water Pollution VII (ed. C.A.Brebbia, D.Almorza and D.Sales), WIT Press, Southampton, Boston, pp.201-210 (2003)
- 2) 市木敦之: 河川・高速道路での雨天時調査、滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究報告書、

- pp.272-275 (2001)
- 3) Petch Pengchai、古米弘明、中島典之:自動車排出物、
タイヤおよび道路舗装材の PAHs プロファイルとそれ
らの側溝堆積物中 PAHs への寄与、環境科学会誌
Vol.15, No.6, pp.433-442 (2002)
 - 4) 井出哲夫:水処理工学-理論と応用-, pp.412-467
(1990)
 - 5) 社団法人地盤工学会:土質試験の方法と解説、p.335
(2001)

(2007年4月受付 2007年11月受理)