

## 河川地形が微粒状有機物の流下距離に及ぼす影響

玉 基英\*・竹門康弘

\*京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

河川地形が流下粒状有機物の捕捉率に与える影響を調べるため、水路形態や水理条件が単純な琵琶湖疏水でプランクトンをトレーサーとして流下距離を推定した。その結果、鴨川運河でプランクトンの50%減耗距離は19-154km、疏水分線では1.5-2.2kmだった。またこれらの人工水路と砂州地形が発達している木津川や河床低下によって砂州が減少した宇治川における流下距離と比較を行なった。その結果、木津川の流下距離は疏水分線に、宇治川は鴨川運河に近かった。微粒状有機物の流下距離は河道の径深と正の相関を示したので、河道の巾が広く浅いほど微粒状有機物の捕捉率が高くなると考えられた。

**キーワード：** 流下粒状有機物，流下距離，河道地形

### 1. はじめに

河川では水、土砂、粒状有機物、栄養塩、各種生物がそれぞれ流下、捕捉、滞留の過程を繰り返していると考えられる。このうち、粒状有機物 (Particulate organic matter, POM) は河川生態系のエネルギー源として重要であるが、世界各地の河川では有機物や栄養塩の人為的負荷による富栄養化を生じ、粒状有機物の組成に大きな変化を生じている。このため、基礎科学としてのみならず応用科学の課題としても粒状有機物の生産起原に着目した研究が広く内外で行われつつある (Webster and Meyer, 1997, 吉村ら, 2006)。たとえば、河川生態系では上流から下流に向けて陸上生態系から供給される他生性有機物 (Allochthonous POM) と水生植物や藻類によって生産された自生性有機物 (Autochthonous POM) の寄与率が連続的に変化しているとする河川連続体仮説 (River Continuum Concept, Vannote et al., 1980; Newbold et al., 1982)、粒状有機物の起源としては他生性有機物が多

い河川でも生態系の栄養起源としては自生性有機物の寄与率が高いとする河川生産性仮説 (Riverine productivity model, Horp and Delong, 2002) や、河川生態系の二次生産者は栄養源として分解者であるバクテリアに多くを依存しているので起源的には他生性有機物の寄与率が高いとする河川生産性修正仮説 (Revised riverine productivity model, Moulton, 2006) などが提案されている。いずれの説も誤りという訳ではなく、河川の条件によって顕在化する特性が異なると考えられる。

このように、河川生態系内の粒状有機物の挙動や機能についてはまだ解明すべきテーマが多いが、中でも河道内の流下粒状有機物 (SPOM, Suspended POM) がどのくらいの距離を流れるかは重要な課題である (Paul and Hall, 2002)。河道の規模、勾配、流量、地形などの条件の違いによって SPOM の流下距離を予測できれば、有機物負荷による人為インパクトを評価するためにも、あるいは汎用性のある生態系モデルを構築する上でも有用で

ある。

ただし、粒状有機物の流下距離は粒子の単純な沈降過程だけではなく、岸際や土砂間隙における濾過や生物による濾過・摂食などの過程も関わっているため、モデル化のために実現象の解明が不可欠である。とくに、近年の研究では、有機物起原の流程的な変化は必ずしも一様的ではなく、樹冠などの河岸環境や河床地形に応じて数10〜数100mのオーダーで変化していることが知られるようになった(Doi et al., 2007)。したがって、粒状有機物の流下距離に与える河床地形の影響を検討することは、応用的な意義が大きいと考えられる。例えば、河川に流入した負荷物質の浄化に要する距離を短くするための河川環境条件の検討などに役立つだろう。さらに、これらの知見は、流域の総合土砂管理において、河床にどのような粒径の土砂がどのくらい移動滞留することが河川環境上好ましいかといった課題に対して一つの回答を与えることが期待される。

そこで本研究では、河川の地形が流下粒状有機物の捕捉率に与える影響を調べるために、水路形態や水理条件が単純な京都市内の琵琶湖疏水で琵琶湖由来のプランクトンをトレーサーとして流下距離を推定した。琵琶湖疏水には鴨川運河と疏水分線とがあり、いずれもU字形または矩形の断面構造をしているが、鴨川運河では河床や側壁がコンクリートで流量が多く流速も大きいのにに対し、疏水分線は緩勾配で流量が少なく流速が小さい特性がある。いずれも流路の蛇行は殆どなく、土砂の堆積した砂州地形も欠いているので、河床材が多様で蛇行する自然河川に比べて、粒状有機物が捕捉されにくいと考えられるが、流下粒状有機物の捕捉率を自然河川と人工水路とで定量的に比較した例は未だ少ないのが現状である。そこで、本研究では、これらの人工水路で新たに推定した流下距離と竹門ら(2006)が宇治川と木津川で推定した流下距離とを比較し、流下距離の変異と径深との関係を分析した。

## 2. 調査地と観測方法

河道地形の違いによる比較研究のために、京都市内を流れる人工水路である琵琶湖疎水のうち、鴨川運河と疏水分線を調査地に選ん

だ(Fig.1)。また、土砂の堆積した砂州地形が発達し、河床材が多様で蛇行する自然河川の代表として木津川を、さらに自然河川でありながら、河床低下によって砂州が減少し岩盤や粘土層が露出した流程をもつ宇治川をそれぞれ比較対象に選んだ(Fig.1)。

### 2.1 京都市琵琶湖疏水

京都市内の琵琶湖疏水には鴨川運河と疏水分線とがあり(Fig.1)、上水用水、発電用水、環境維持用水の供給において重要な役割を担っている。鴨川運河は、鴨川に沿って約14kmの長さがあり、冷泉-塩小路の区間(約3km)は暗渠、それ以外は開水路として流下し(Photo 1)、伏見区の墨染発電所を経て宇治川へ流出している。鴨川運河は鴨川沿いではすべて三面張りのコンクリート水路になっているが、南禅寺から鴨川までの区間は一部石積みの壁面で、河床には泥や礫が堆積し、水生植物も繁茂している。

いっぽう、疏水分線は、南禅寺や哲学の道を経て、最終的には高野川へ合流する約5kmの長さの開水路である。南禅寺から哲学の道までには三面張りの狭いコンクリート水路区間があるが、哲学の道以降は川底が砂、砂利、礫底の浅い開水路となっている(Photo 1)。本研究では、流下粒状有機物の採集地点として、鴨川運河の暗渠区間を除いた開水路区間に計7ヶ所、疏水分線に計5-6ヶ所をそれぞれ選定した(Fig.1)。

### 2.2 宇治川と木津川

宇治川は河床低下によって砂州が減少し岩盤や粘土層が露出した流程が卓越している河川であり(Photo2)、平均河床勾配は1/1151、平水時の水面幅は100mから120m程度である。調査対象区間は、天ヶ瀬ダム直下から三川合流地点までの16kmとした(Fig.1)。宇治川発電所放流口からの流入水量は本川流量に影響しているが、その他の河川流入量は宇治川河川流量に影響を与えるほど大きいものはない。

木津川は、河床材料の粒径が比較的小さく、三川合流地点から20km地点付近を境に上流域と下流域に区別され、とくに下流域では1km程度の長さの砂州が発達している河川である(Photo 2)。上流域の平均河床勾配は1/926、下流域の平均河床勾配は1/1130であ

り、平水時の上流域での水面幅は 20~50m 程度、下流域での水面幅は 200~300m 程度である。調査対象区間は高山ダム直下から三川合流までの 47km とした (Fig. 1)。ダム直下から 26km 地点までの上流域の河岸は樹林植生が

発達している (山本, 2006)。

なお、Table 1 には、4 つの調査対象河道の平均川幅、平水時における水深、流速、流量、径深の平均値を示している。

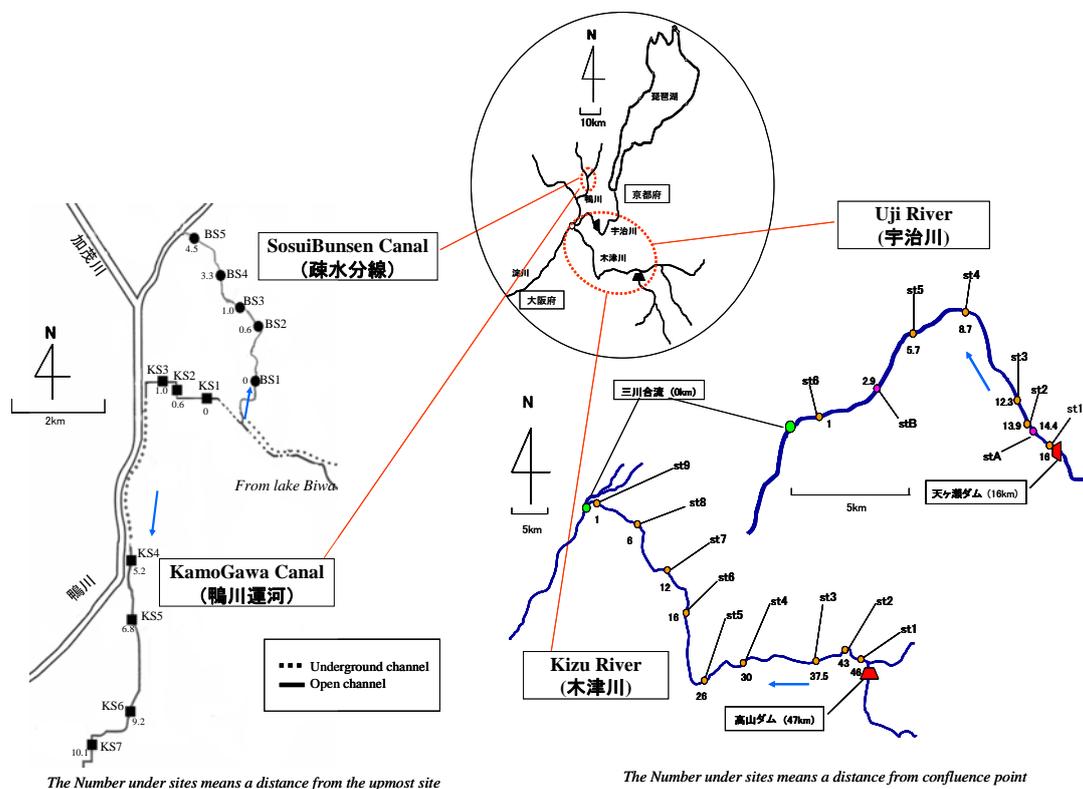


Fig. 1 Map of Study areas and SPOM sampling sites in Kyoto. Left: two artificial canals directly connected from the lake Biwa. Right: two river channels with dam reservoirs in upstream

Table 1 Hydro-morphologic properties of four channels under normal flow conditions.

Target channels	No. of sites	Width (m)	Depth (m)	Velocity (m/s)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Hydraulic radius(m)
Deep Canal (Kamogawa C.)	7	14.93 (±3.05)	1.77 (±0.63)	0.52 (±0.38)	10.71 (±2.78)	1.42 (±0.81)
Shallow Canal (SosuiBunsen C.)	5	3.40 (±0.89)	0.25 (±0.24)	0.41 (±0.13)	0.27 (±0.13)	0.18 (±0.12)
Deep River (Uji R.)	6	99.80	2.07	0.90	130.00	1.34
Shallow River (Kizu R.)	9	164.58	0.50	1.32	33.60	0.48

\*Values of canals were the averages(±SD) of all sites, while those of rivers were measured at the representative cross section.



Photo 1 Representative channel landscapes in Kamogawa Canal (right) and Sosuibunsen Canal (left).

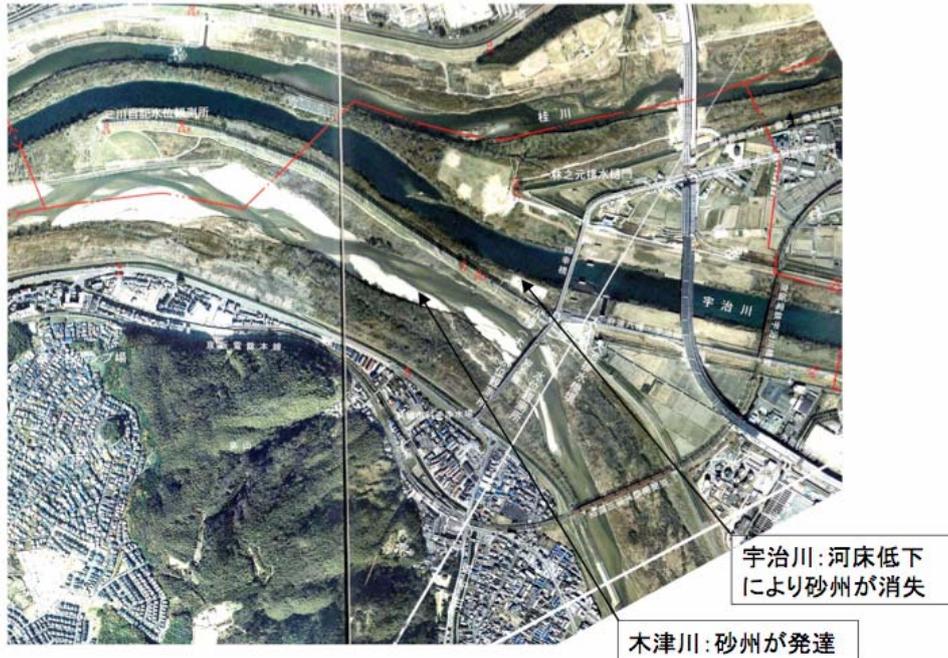


Photo 2 Differences in channel morphology between Uji River(upper) and Kizu River (lower) near confluence point.

### 2.3 観測方法

流下粒状有機物の採集は、竹門ら(2006)と同様の流下粒状有機物採集用ネット(口径30cm, メッシュサイズ 100 $\mu$ m)を用いた。このネットを河川の流水中に沈めてを濾して流下有機物を採取した(Photo 3)。サンプリングは2-3分間とした。ネット内を通過した河川水量を算定するために、採取中にネット内に流入する部分の平均流速をプロペラ式流速計(CR-7, コスモ理研)を用いて測定した。また、鴨川運河のように一部アクセスしにくい地点ではバケツで採水してからメッシュサイズ25 $\mu$ mのネットを用いて濾過をした。試料は、ホルマリン溶液を2%になるように添加して

試験室に持ち帰り保存した。

鴨川運河では2007年7月16日と10月9日(平均流量が各10.71 $m^3/s$ と12.21 $m^3/s$ ), 疏水分線は7月24日と10月10日(平均流量が各0.27 $m^3/s$ と0.40 $m^3/s$ )に各2回実施した。Table 2-3には、それぞれ鴨川運河ならびに疏水分線における調査時点の環境条件を示す。木津川と宇治川のデータは竹門ら(2006)のデータを利用した。本研究の一環として、2008年1月27日と28日には宇治川で、また2008年4月4日と5日には木津川で、それぞれ同様の調査方法で安定同位体比分析用の試料を採集したが、これらについては現在分析中であり、本報告書には含めなかった。



Photo 3 Scene of SPOM sampling using POM net in running waters taken in Uji River

Table 2 Hydrologic and morphologic properties of the Kamogawa Canal under normal flow conditions on 16<sup>th</sup> July 2007.

	Distance (km)	Width (m)	Depth (m)	Velocity (m/s)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Hydraulic radius(m)
KS1	0.00	18.50	2.20	0.25	10.18	1.78
KS2	0.60	18.00	2.30	0.25	10.35	1.83
KS3	0.95	18.00	2.70	0.19	9.23	2.08
KS4	5.22	13.00	1.00	1.30	16.90	0.87
KS5	6.80	12.00	1.50	0.55	9.90	1.20
KS6	9.15	12.40	1.40	0.54	9.37	1.14
KS7	10.10	12.60	1.30	0.55	9.01	1.08
平均		14.93	1.77	0.52	10.71	1.42

Table 3 Hydrologic and morphologic properties of the Sosuibusen Canal under normal flow conditions on 24<sup>th</sup> July 2007

	Distance (km)	Width (m)	Depth (m)	Velocity (m/s)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Hydraulic radius(m)
BS1	0.00	1.80	0.73	0.30	0.39	0.40
BS2	0.62	4.50	0.20	0.51	0.46	0.18
BS3	1.97	3.80	0.20	0.33	0.25	0.18
BS4	3.27	3.30	0.10	0.35	0.11	0.09
BS5	4.49	3.50	0.10	0.62	0.22	0.09
平均		3.38	0.27	0.42	0.29	0.19

Table 4 Classification of suspended FPOM and identification of lake originated plankton

Category	Genus	Species	Lake origin	Category	Genus	Species	Lake origin
デトリタス		Detritus	-	植物プランクトン (Phytoplankton)	ミクラステリアス属	<i>Micrasterias mahabuleshwarensis</i>	0
植物片		Plant Tissues	-		オエドゴニウム属	<i>Oedogonium sp</i>	X
水生昆蟲殻片		Insect Tissue	-		バンドリナ属	<i>Pandorina morum</i>	0
動物プランクトン遺体		zooplankton skin	-		ペディアストルム属	<i>Pediastrum boryanum</i>	0
鉱物		Mineral Particles	-		ペディアストルム属	<i>Pediastrum duplex</i>	0
藍藻 (Cyanobacteria, Cyanophyceae)	アナベナ属	<i>Anabaena macrospora</i>	0		ペディアストルム属	<i>Pediastrum simplex</i>	0
	アナベナ属	<i>Anabaena spiroides</i>	0		プレオドリナ属	<i>Pleodorina californica</i>	0
	ゴンフォスフェア属	<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	0		セナデスムス属	<i>Scenedesmus opoliensis</i>	0
	メリスモペディア属	<i>Merismopedia elegans</i>	0		スフェロキスチス属	<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	0
	マイクロステイス属	<i>Microcystis sp</i>	0		スポンジロウム属	<i>Spondyliosium moniliforme</i>	0
	オンシトリア属	<i>Oscillatoria kawamurae</i>	X	スタウラストルム属	<i>Staurastrum arcticon</i>	0	
	ワロニチニア属	<i>Woronichinia naegelianum</i>	0	スタウラストルム属	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>	0	
	アカントセラス属	<i>Acanthoceras zachariasii</i>	0	テトラスボラ属	<i>Tetraspora lacustris</i>	0	
	アステリオネラ属	<i>Asterionella formosa</i>	0	ホルボックス属	<i>Volvox aureus</i>	0	
	アウラコセイラ属	<i>Aulacoseria ambigua</i>	0	ナベカムリ属	<i>Arcella sp</i>	X	
珪藻 (Diatom, Bacillariophyceae)	アウラコセイラ属	<i>Aulacoseria granulata</i>	0	シボカワリ属	<i>Diffugia sp</i>	0	
	ココネイス属	<i>Cocconeis placentula</i>	X	ウロコカマリ属	<i>Euglypha sp</i>	X	
	キンベラ属	<i>Cymbella sp</i>	X	シボウムシ属	<i>Brachionus sp</i>	0	
	フラギラリア属	<i>Fragilaria crotonensis</i>	0	ハナビウムシ属	<i>Collotheca mutabilis</i>	0	
	メロシラ属	<i>Melosira varians</i>	X	カメノコウアウムシ属	<i>Keratella cochlearis</i>	0	
	ハネケイソウ属	<i>Pinnularia sp</i>	X	カメノコウアウムシ属	<i>Keratella quadrata</i>	0	
	スリレラ属	<i>Suriella sp</i>	X	シキガタウムシ属	<i>Lecane sp</i>	0	
	シネドラ属	<i>Synedra sp</i>	0	エナガウムシ属	<i>Monostyla sp</i>	0	
	セラチウム属	<i>Ceratium hirundinella</i>	0	ハネウデウムシ属	<i>Polyarthra vulgaris</i>	0	
	トラケロモナス属	<i>Tracelomonas hispida</i>	0	ネズミウムシ属	<i>Trichocerca sp</i>	0	
鞭毛藻 (Flagellates)	ディモルフオコックス属	<i>Dimorphococcus lunatus</i>	0	ゾウムシコ属	<i>Bosmina longirostris</i>	0	
	エレレラ属	<i>Ererella bomheimiensis</i>	0	ミジンコ属	<i>Daphnia sp</i>	0	
	ユードリナ属	<i>Eudorna elegans</i>	0	カイアシ亜綱	COPEPODA	X	
動物プランクトン (Zooplankton)	原生動物 (Protozoa)						
	ワムシ (Eurotorea)						
	節足動物 (Arthropoda)						

## 2.4 実験室内の分析方法

採取した流下粒状物質は研究室に持ち帰り、メッシュサイズ 1mm の篩で濾過して 1mm 以下の微粒状有機物 (FPOM: Fine POM) を分離した。つぎに、顕微鏡 (×400, ×100 の倍率) を用いてデトリタス, 植物片, 水生昆虫殻, 鉱物, プランクトンに種分けした。このうち, プランクトンについては, 水野 (1984), 水野・高橋 (1991), 田中 (2002), 一瀬・若林 (2005) を用いて, 種または属のレベルまで分類した。その上で, さらに湖沼由来プランクトンと河川由来付着藻類や底生性甲殻類などとの区別を行なった (Table 4)。その際, 琵琶湖環境科学研究センターで毎週調査されている琵琶湖プランクトンの調査結果資料 (<http://www.lberri.jp/asp/bkkc/plankton/bkkcPlanktonKekkaJoken.asp>) を参考にした。なお, 分類が不明の種や止水性と流水性の区別の不明な種については, 滋賀県立衛生環境センターの一瀬諭氏にご教示いただいた。プランクトンの流下距離推定のために, 各地点から得られたプランクトン試料を少なくとも 500 個の細胞, 群体または個体を同定, 計数し, 各分類群の個体数割合を求めた。

## 3. 結果

### 3.1 流下粒状有機物の組成の流程変化

琵琶湖疏水分線ならびに鴨川運河で採集された微粒状有機物の組成は Table 4 のように分類された。いずれの水路でも最上流調査地点 (KG1 と SB1) に出現したプランクトンの種組成は共通の特徴を示した。7 月の調査時にはいずれも優占種は糸型の珪藻類である *Aulacoseria granulate* で, 次優占種は粒状群体の藍藻類である *Woronichinia naegelianum* であった。また琵琶湖固有種である *Pedisastrum biwae* も多く確認された (Photo 4)。

いっぽう, 10 月の調査結果は 7 月と比べて種組成が大きく変化した。鴨川運河の優占種

は *Aulacoseria granulate* で, 次は糸型の緑藻類である *Dimorphocossus Lunatus*, *Spondylosium moniliforme*, *Woronichinia naegelianum* (藍藻類) の順に多く出現した (Fig. 2)。これに対して, 疏水分線の優占種は, *Dimorphocossus Lunatus* であり, 次いで *Spondylosium moniliforme*, *woronichinia naegelianum*, *Aulacoseria granulate* の順に多かった (Fig. 2)。

次に, 琵琶湖環境科学研究センターで毎週調査されている琵琶湖プランクトンの調査結果資料を参考にして, 琵琶湖由来プランクトンの占める割合を地点間比較した。その結果, 疏水分線と鴨川運河のいずれにおいても最上流調査地点の流下粒状有機物中には琵琶湖由来のプランクトンが多いことがわかった。いずれの水路でも, 毎回下流へ行くほど琵琶湖由来のプランクトンの割合が減少し, 河道の付着藻類が増加した。とくに, 疏水分線の BS4 から下流では, 琵琶湖では出現しない *Cymbella* sp, *Melosira varians*, *Pinnularia* sp, *Surirella* sp のような珪藻が多く現われた (Fig. 2)。これらは疏水の水路内で生産されたと考えられる。

Fig. 2 の結果から, 調査時期によって種組成に変化があるものの, いずれの時期にも下流ほど湖沼由来のプランクトンの割合が減少する傾向が認められた。ただし, 7 月と 10 月のいずれにおいても疏水分線の減少率が, 鴨川運河の減少率に比べて明瞭に大きかった。これは調査時期による種組成や流量変異の影響よりも, 両水路の流量や地形の違いの影響が大きいことを意味している。

Fig. 3 は, 竹門ら (2006) が, 木津川と宇治川で今回と同様の方法によって調査した結果を示している。今回琵琶湖疎水の最上流地点で観測された湖沼由来プランクトンの割合は, 鴨川運河では約 70%, 疏水分線では約 80% であった。これらは, 木津川の約 10%, 宇治川の約 20% に比べてきわめて高い値であった。

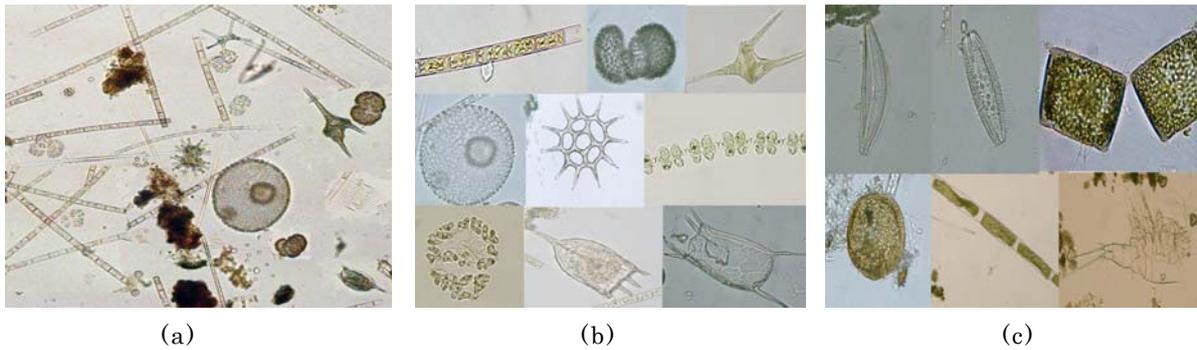


Photo 4 Optical microscopic images of suspended FPOM: (a) An example for the mixture of FPOM image (x100). (b) The lake originated Plankton; from left-up to clockwise *Aulacoseria granulata*, *Woronichinia naegelianum*, *Ceratium hirundinella*, *Spondylosium moniliforme*, *Pediastrum simplex*, *Volvox aureus*, *Dimorphococcus lunatus*, *Keratella cochlearis*, *Keratella quadrate* (x400). (c) The Instream originated algae; from left-up to clockwise *Cymbella* sp., *Surirella* sp., *Melosira varians*, COPEPODA *Oedogonium* sp., *Arcella* sp. (x400).

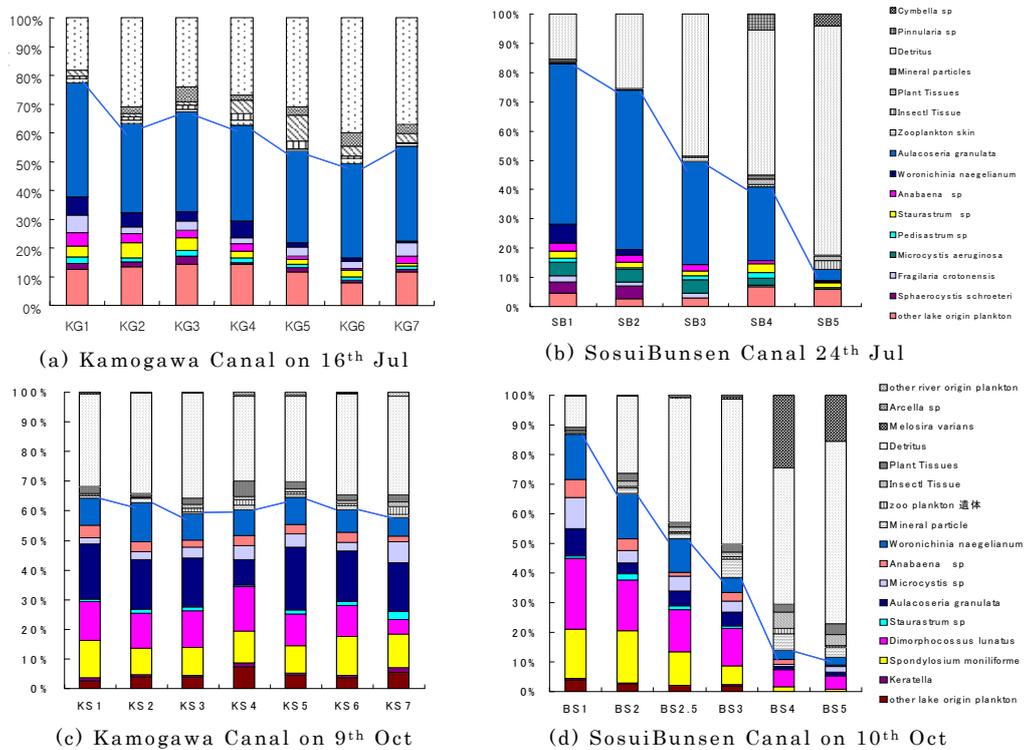


Fig. 2 Longitudinal patterns of SPOM composition under normal flow in the lake Biwa Canals: Kamogawa Canal (a) and (c), and SosuiBunsen (b) and (d). The lower part of inner line in each figure corresponds to the fraction of the lake originated plankton

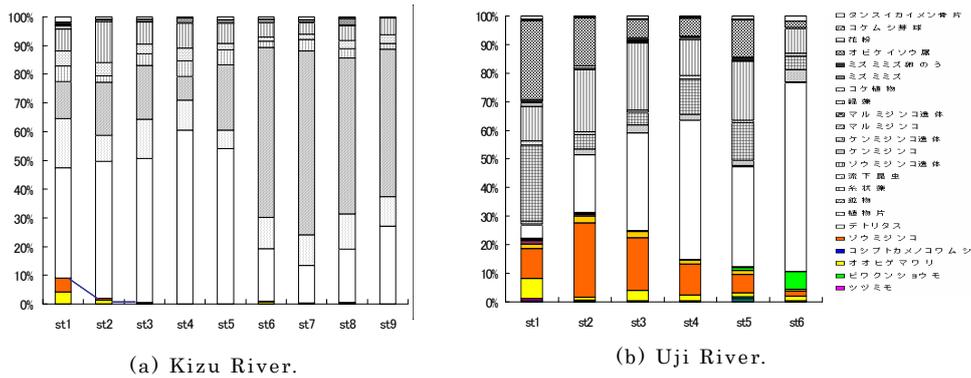


Fig. 3 Longitudinal changes in SPOM composition under normal flow conditions in the Uji River and the Kizu River (Takemon et al., 2006). The lower part of inner line in each figure corresponds to the fraction of the lake originated plankton.

この特性は、琵琶湖疎水の場合、琵琶湖から管路や開水路で直接つながっており、平水時には残流域からの希釈がないためと考えられる。これに対して、宇治川の場合には、天ヶ瀬ダムまで瀬田川の流程で各支川からの希釈や河床で捕捉される結果、琵琶湖由来のプランクトン割合が減少するのに加えて、天ヶ瀬ダム湖での滞留時間が短いためにプランクトンの増殖に至りにくいことも関係しているかもしれない。実際、天ヶ瀬ダム直下地点よりも、関電の放流水の方が多くの湖沼由来プランクトンを含んでいたことからこれらのことが示唆される。また、木津川では、高山ダム直下で上流にダム湖のない木津川本川が合流するため、希釈の効果が大きいと考えられる。

### 3.2 流下粒状有機物の流下距離推定

#### (1) 琵琶湖由来プランクトンの種別流下距離推定

鴨川運河と疏水分線における微流下粒状有機物の流下距離を推定するために、Fig. 2のデータのうち最上流地点(KS1とBS1)における湖沼由来のプランクトンの割合を100%として、各調査地点までの流程で湖沼由来のプランクトンが減少する割合を減耗率として算出した。また、指数関数の近似曲線を利用して最上流地点から50%、90%に減耗する距離を推定した。その際、両疏水を流下するプランクトンのうち、琵琶湖由来の指標種として、7月には *Aulacoseria granulate*, *Anabaena*

*sp.*, *Woronichinia naegelianum* を、10月にはさらに *Dimorphocossus lunatus* と *Spondylosium moniliforme* を加えた。

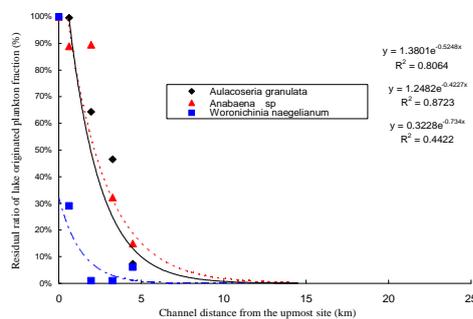
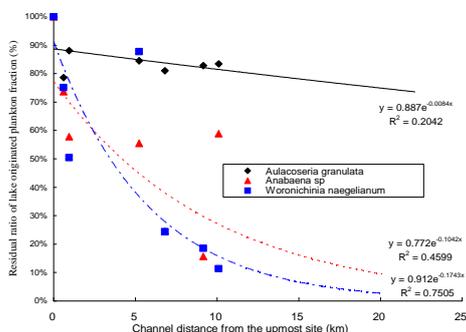
7月調査の結果、鴨川運河では *Aulacoseria granulate* が非常に低い捕捉率であったのに対して、*Anabaena sp.* と *Woronichinia naegelianum* は比較的早く低減し、50%減耗距離はそれぞれ68.2km, 4.2km, 3.4kmであった。いっぽう、疏水分線では鴨川運河に比べて高い捕捉率を示し、*Aulacoseria granulate*, *Anabaena sp.*, *Woronichinia naegelianum* の90%減耗距離はそれぞれ5.0km, 1.6km, 6.0kmであった(Fig. 4)。10月にも同様に、鴨川運河では *Aulacoseria granulate* が低い捕捉率を示したのに対して、疏水分線では逆に高い捕捉率を示した。また *Dimorphocossus lunatus* や *Spondylosium moniliforme* は高い捕捉率を示した(Fig. 5)。

#### (2) 琵琶湖疎水と木津川・宇治川の流下距離の比較

鴨川運河ならびに疏水分線における琵琶湖由来プランクトンの合計出現率と流下距離との関係について、対数関係を仮定して最小自乗法で求めた較正曲線を描いた。これらに、竹門ら(2006)が木津川や宇治川において同様の方法で得た較正曲線を併せて比較した(Fig. 6)。その結果、鴨川運河は宇治川よりもさらにプランクトンを捕捉しにくい河道であり、疏水分線は木津川よりもさらにプランクトンを捕捉しやすい河道であることが示

唆された。そこで、これらの較正曲線から各事例における 50%減耗距離ならびに 90%減耗距離を求めたところ、湖沼由来プランクト

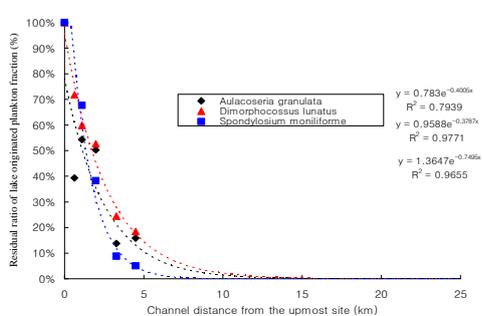
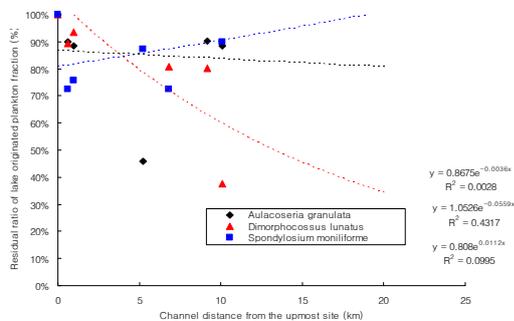
ンの流下距離は疏水分線が一番短く、ついで木津川、宇治川の順で、鴨川運河が最も長いことが分かった (Table 5)。



鴨川運河		減耗距離 (km)	
指標種	減耗率	50%	90%
<i>Aulacoseria granulata</i>		68.2	259.8
<i>Anabaena sp</i>		4.2	19.6
<i>Woronichinia naegelianum</i>		3.4	12.7

疏水分線		減耗距離 (km)	
指標種	減耗率	50%	90%
<i>Aulacoseria granulata</i>		1.9	5.0
<i>Anabaena sp</i>		-	1.6
<i>Woronichinia naegelianum</i>		0.4	6.0

Fig. 4 Longitudinal changes in the lake originated plankters fraction ( $f_L$ ) of indicator species in the lake Biwa Canal on July 2007. Left: Kamogawa Canal, Right: Sosuibunsen Canal. Lower tables show the estimated 50% and 90% transport distance by calculated as the distance where the ratio of  $f_L$  decreased to exactly 50% and 10% comparing with that of the upmost site, respectively.



鴨川運河		減耗距離 (km)	
指標種	減耗率	50%	90%
<i>Aulacoseria granulata</i>		153.1	600.1
<i>Dimorphocossus lunatus</i>		13.3	42.1
<i>Spondylosium moniliforme</i>		-	-

疏水分線		減耗距離 (km)	
指標種	減耗率	50%	90%
<i>Aulacoseria granulata</i>		0.4	5.1
<i>Dimorphocossus lunatus</i>		1.7	6.0
<i>Spondylosium moniliforme</i>		1.3	3.5

Fig. 5 Longitudinal changes in the lake originated plankters fraction ( $f_L$ ) of indicator species in the lake Biwa Canal on Oct 2007. Left: Kamogawa Canal, Right: Sosuibunsen Canal. Lower tables show the estimated 50% and 90% transport distance by calculated as the distance where the ratio of  $f_L$  decreased to exactly 50% and 10% comparing with that of the upmost site, respectively.

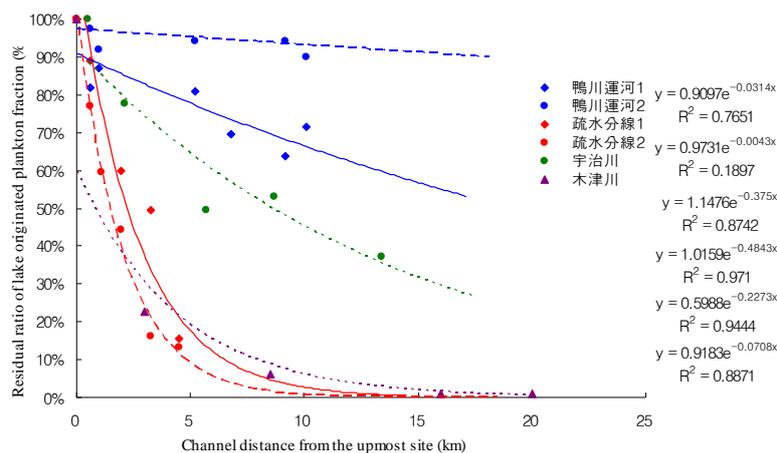


Fig. 6 Comparison of longitudinal changes in the lake originated plankton fraction in four channels.

Table 5 Comparison of FPOM transport distance of target channels under normal flow conditions. 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> corresponds to the filed survey July and Oct 2007, respectively.

	Kamogawa Canal 1 <sup>st</sup>	Kamogawa Canal 2 <sup>nd</sup>	Sosuibunsen Canal 1 <sup>st</sup>	Sosuibunsen Canal 2 <sup>nd</sup>	Kizu River	Uji River
Estimated 50% transport distance	19.1 km	154.9 km	2.2 km	1.5 km	3.1 km	9.8 km
Estimated 90% transport distance	70.3 km	529.1 km	6.5 km	4.8 km	10.1 km	30.5 km

## 4. 考察

### 4.1 河床による微粒状有機物の捕捉率

河川における粗粒状有機物 (CPOM) の挙動に関する研究は、その流域に生じないイチョウの葉などをトレーサーとして人為的に流して分布や流下距離を測定する研究がされてきた。いっぽう、微粒状有機物 (FPOM) の挙動については、トレーサーの選定は粗粒状有機物ほど簡単ではない。現場河川の実験例としては、イースト (Paul and Hall, 2002), 胞子 (Wanner and Pusch, 2000), とうもろこし花粉 (Georgian et al., 2003; Miller and Georgian, 1992) などが知られているものの、それらは河道位数 1-2 クラスの小規模な河川に限られている。これは、河道位数が 4 以上のような中・下流域での実験は投入量を莫大にしなければ検出できないなどの限界があるためと考えられる。この点、本研究で微粒状有機物のトレーサーとして用いた湖沼由来のプ

ランクトンは、湖沼やダムで大量に生産される自然物なので実験のためのコストが小さいというメリットがある。ただし、人為的に投入するトレーサーの場合はワンショットの現象として評価できるが、プランクトンの場合には、継続的に流下しつづける事例として位置づけざるを得ない。これは、河床の捕捉効率だけを単独で評価しにくいというデメリットにつながるが、逆に河床への捕捉や蓄積と再流出の過程が平衡したときの流下距離を推定できるという意味では大きなメリットと考えられる。すなわち、捕捉と再流下の平衡後の流程変化を捉えることができれば、プランクトンが河川生態系で栄養段階に組み込まれる流程範囲を実質的に推定できることになる。

Fig. 4-6 によれば、湖沼由来プランクトンの割合は河道距離によって指数的に減耗している。これは湖沼由来のプランクトンが河道

内に流下、捕捉、滞留の過程を繰り返して減少するとともに、河川及び陸上起原の微粒状有機物が相対的に増加することによる。そこで、湖沼由来プランクトンの単位距離当りの捕捉率を算定するために、Fig. 6からの近似式 (Equation 1) のように式変形した (Equation 2)。

$$Y = a \cdot e^{bx} \quad (1)$$

$$\text{Trapping efficiency} = -d/dx Y = -ab \cdot e^{bx} \quad (2)$$

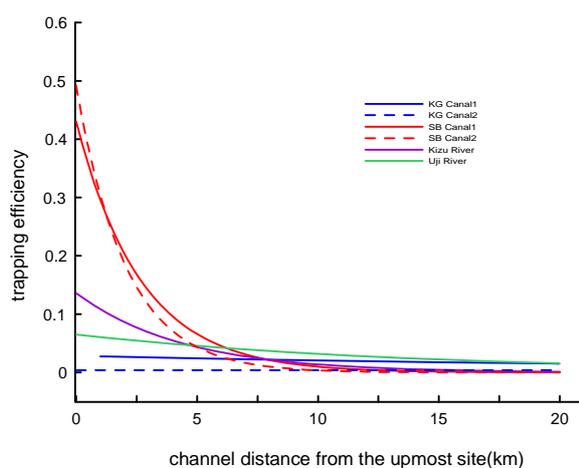


Fig. 7 Comparison of FPOM trapping efficiency in each channel

ここで、Yは流下距離 x 地点での湖沼由来プランクトンの出現率を示す。式(2)に本研究で推定された4河道ごとの係数を用いてプランクトンの捕捉効率を求めたところ、Fig. 7の関係が得られた。本図における河道間の違いは、Fig. 6からも予測されるように、疏水分線、木津川、宇治川、鴨川運河の順に捕捉効率が高いことを表している。また、これらの結果のうち、木津川と宇治川の違いについては同流量条件のときの比較結果であり、河道地形によって捕捉率が異なること示している。いっぽう、鴨川運河と疏水分線の大きな違いは2つの水路の形態及び水理条件に原因があると考えられる。鴨川運河は疏水分線より急勾配で流量が多いため流速が大きいことが流下距離の増加に影響していることは明らかである。しかし粒状有機物が河床に捕捉されやすい原因には、流速の違いだけではなく、次節で述べるように疎水分線の経深が小さいことも関係していると考えられる。

なお、本研究では流下距離の定量的な分析のために、琵琶湖由来のプランクトンは流れる水では繁殖しないと仮定したが、種によっては河床に堆積又は捕捉されてからも生長・繁殖する可能性も否定できない。もし、このような種が含まれていると、河床の捕捉効率は実際よりも小さく見積もられることになる。こうした現象による推定誤差を修正する方法として、以下の二つが考えられる。まず、流水中や河床に付着した状態では生長や繁殖のできないことが確実なボルボックスやゾウミジンコのような特定種に的を絞る方法が考えられる。ただし、動物プランクトンの場合には、魚類や底生動物が選択的に捕食することも考えられるので捕捉効率の解釈にあたっては、河道地形と水理条件に加えてこれらの動物による捕食効果を考慮する必要があるだろう。また、植物プランクトンであっても動物による捕食効果を考慮する必要がある点では同様であるが、植物プランクトンを利用する動物は、造網性トビケラ類や二枚貝類など濾過食者の底生動物が対象となるので、河床の物理的な捕捉過程と同様に、河床との接触機会や河床への沈降機会が増すほど捕捉効率が高まる可能性が考えられる。いっぽう、このような濾過食者の底生動物の中には、餌となるプランクトンの多いダム貯水池や湖沼の流出部下流域で個体数密度や現存量が増大する現象が知られている (谷田・竹門, 1999 for review)。Fig. 7のように流下直後の流程の方が捕捉効率の高い様式が見られた理由として、このような生物的過程が働いていると考えられる。

#### 4.2 微粒状有機物の流下距離と水理条件・地形条件との関係

Speaker et al. (1984)及び竹門ら(2006)の研究によれば、粒状有機物の流下距離は河道地形の複雑性と関連があり、その定量的指標として径深を用いている。径深は断面面積に対する潤辺の比であり河道地形が横断方向に平たく遠浅であるほど小さい値となる。疏水分線の平均径深(0.18)は鴨川運河の(1.42)より顕著に小さい特徴があった。疏水分線のプランクトンの捕捉率が大きかった原因として、前節で述べた流量や流速の小ささとともに、径深の小さいことが重要であると考えられる。Fig. 8は、各河道について流量別に横断面と

経深を (Table 1-3 参照), 径深の流程変化を示したものである。さらに, プランクトンの 50% 流下距離と経深の関係性を調べた結果, 有意な指数関数関係性が認められた (Fig. 9; Equation 3)。

$$y = 2.3831 e^{1.2468x} \quad (R^2 = 0.4200, p < 0.05) \quad (3)$$

これらの結果は, 河道地形の複雑性が増加するほど微粒状有機物の捕捉率が高まり, 流下距離が短くなることを示している。

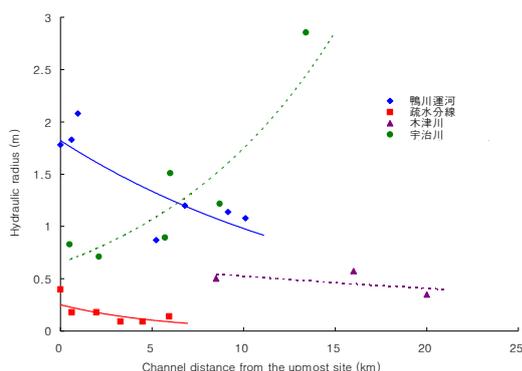


Fig. 8 Comparison of hydraulic radius in each channel. The Range of hydraulic radius in the Kizu River, the Sosuibensen Canal and the Kamogawa Canal shows comparatively smaller than the Uji River. Hydraulic radius in Uji River increased with channel distance due to riverbed degradation.

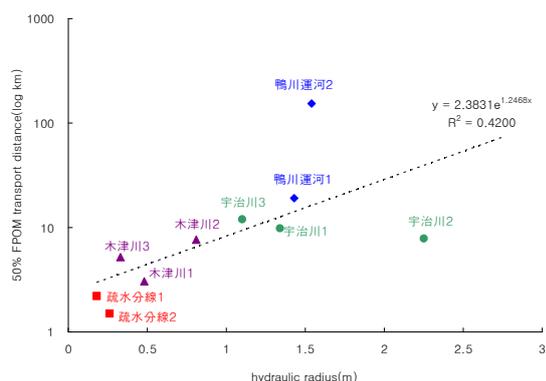


Fig. 9 Relationship between transport distance of FPOM and hydraulic radius

## 5. おわりに

湖沼由来のプランクトンを微流下粒状有機

物のトレーサーとして利用してダム下流生態系における FPOM の流下距離を定量的に推定した。そのような研究は CPOM と比べて流下有機物の動態研究が難しいと知られた FPOM を対象で実の中規模以上の河川におけるダム由来の粒状有機物の動態を定量的に分析したという意義があった。

河道地形が異なる人工水路の 2ヶ所と実際河川の 2ヶ所を対象として現場調査を行った。そして河道地形の複雑性の指標として径深を選定し, 河道地形の複雑性が増加するほど FPOM の捕捉率も高くなるから流下距離が短くなることを証明した。

今後のダム由来の粒状有機物の流下距離が河川生態系の機能に及ぶ影響を調査するために安定同位体の分析研究を計画されている。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって, プランクトンの同定や生産起源の判定を滋賀県琵琶湖環境科学研究センターの一瀬論氏に御教示いただいた。また, 木津川と宇治川の流下距離については, 山本佳奈氏の修士論文データを使用させていただいた。以上の方々に感謝の意を表す。尚, 本研究の遂行のために以下の助成金を使用した。科学研究費補助金基盤 B19360224, 河川生態学研究会木津川グループ研究費, ならびに国土交通省建設技術研究開発補助金。

## 参考文献

- 一瀬 論・若林徹哉 (2005): やさしい日本の淡水プランクトン図解ハンドブック, 滋賀県立衛生環境センター, 150pp.
- 滋賀県立衛生環境センター (1991): 琵琶湖プランクトンデータ集 (植物プランクトン), 93pp.
- 滋賀県琵琶湖環境科学研究センターのホームページ, ([http://www.lberi.jp/root/jp/06db/plan\\_ktonzukan/bkjindex.htm](http://www.lberi.jp/root/jp/06db/plan_ktonzukan/bkjindex.htm)).
- 竹門康弘, 西ふき野, 加藤智子, 谷田一三 (2003): 木津川砂州における堆積粒状有機物の分布様式. 河川生態学術研究会木津川研究グループ編. 木津川の総合研究, pp. 243-262.

- 竹門康弘 (2005):底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価. 日本生態学会誌, Vol. 55, pp 189-197.
- 竹門康弘, 山本佳奈, 池淵周一 (2006):河川下流域における懸濁態有機物の流程変化と砂州環境の関係, 京都大学防災研究所年報 49B, pp677-690.
- 谷田一三・竹門康弘 (1999): ダムが河川の底生動物へ与える影響. 応用生態工学, Vol. 2: pp153-164.
- 田中正明 (2002): 日本淡水水産動植物プランクトン図鑑, 名古屋大学出版会, 602pp.
- 広瀬弘幸 (1977):日本の淡水藻図鑑, 内田老鶴圃, 933pp.
- 水野寿彦 (1984): 日本淡水プランクトン図鑑, 保育社, 602pp.
- 水野寿彦・高橋永治編(1991):日本淡水動物プランクトン検索図説. 東海大学出版会.
- 山本加奈 (2006): 宇治川・木津川における流下粒状有機物の動態と河川間比較, 京都大学大学院工学研究科修士論文.
- 吉村千洋, 谷田一三, 古米弘明, 中島典之 (2006):河川生態系を支える多様な粒状有機物, 応用生態工学 9: 85-101.
- Doi, H., Takemon, Y., Ohta, T., Ishida Y. and Kikuchi, E. (2007) Effect of reach scale canopy cover on trophic pathways of caddisfly larvae in a Japanese mountain stream. *Marine and Freshwater Research*, 58:pp811-817.
- Fisher S. G. (1998): Material Spiraling in Stream Corridors: A Telescoping Ecosystem Model, *Ecosystems*, Vol 1, pp 19-34.
- Fisher S. G., and Likens G. E. (1972): Stream ecosystem: organic energy budget, *Bioscience*, Vol 22, pp 33-35.
- Georgian T., Newbold J. D., Thomas S. A., Monaghan M. T., Minshall G. W., and Cushing C. E. (2003): Comparison of corn pollen and natural fine particulate matter transport in streams: can pollen be used as a seston surrogate?, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol 22, pp 2-16.
- Gregory K. J. (2006): The human role in changing river channels, *Geomorphology*, Vol 79, pp 172-191.
- Miller J., and Georgian T. (1992): Estimation of fine particulate transport in streams using pollen as a seston analog, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol 11, pp 172-180.
- Newbold J. D., O'Neill R. V., Elwood J. W., and Winkle W. V. (1982): Nutrient Spiraling in Streams: Implications for Nutrient Limitation and Invertebrate Activity, *American Naturalist*, Vol 120, pp 628.
- Paul M. J., and Hall R. O. (2002): Particle transport and transient storage along a stream-size gradient in the Hubbard Brook Experimental Forest, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol 21, pp 195-205.
- Speaker R., Moore K., and Gregory S. (1984): Analysis of the Process of Retention of Organic Matter in Stream Ecosystems, *Verhandlung Internationale Vereinigung Limnologie*, Vol 22.
- Stanford J. A., and Ward J. V. (2001): Revisiting the serial discontinuity concept, *Regulated Rivers Research & Management*, Vol 17, pp 303-310.
- Tockner K., Pennetzdorfer D., Reiner N., Schiemer F., and Ward J. V. (1999): Hydrological connectivity, and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river-floodplain system (Danube, Austria), *Freshwater Biology*, Vol 41, pp 521-535.
- Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R., and Cushing C. E. (1980): The River Continuum Concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol 37, pp 130-137.
- Wanner S. C., and Pusch M. (2000): Use of fluorescently labeled Lycopodium spores as a tracer for suspended particles in a lowland river, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol 19, pp 648-658.
- Ward J. V., and Stanford J. A. (1983): Serial Discontinuity Concept of Lotic Ecosystems, *Dynamics of Lotic Systems*, Ann Arbor Science, Ann Arbor MI. pp 29-42.
- Ward J. V., and Stanford J. A. (1995): The serial discontinuity concept: Extending the model to floodplain rivers, *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol 10, pp 159-168.

## **Relation of Channel Morphology to FPOM Transport Distance in Tailwater**

Giyoung OCK\* and Yasuhiro TAKEMON

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

This study aims to show the relations of channel morphology to trapping efficiency of suspended FPOM(fine particulate organic matter) using lake originated plankters as FPOM tracers. We estimated the transport distance of suspended FPOM by calculation of the decreasing ratio of the lake originated plankters with channel distance. Study sites were established in two artificial canals and two natural rivers with different channel morphology below the Lake Biwa and dam reservoirs. Since the estimated FPOM transport distance had a positive correlation with the hydraulic radius of each channel, increasing complexity of channel morphology with wide and shallow cross section will increase the FPOM trapping efficiency.

**Keywords:** Fine particulate organic matter, Transport distance, Channel morphology