

洪水氾濫原における物理生息場と有機物の関係

Relationship between habitats and organic matter in a floodplain

伊藤 潤¹・吉村 千洋¹・大谷 絵利佳¹

Jun ITO, Chihiro YOSHIMURA and Erika OTANI

¹東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1-M1-4)

Many rivers currently suffer from ecological deterioration. Especially, flood control measures tend to decrease natural heterogeneity within river corridors and to result in the loss of ecological integrity. The present study aimed to investigate the relationship between habitat type and organic matter dynamics in river floodplains. Focusing on deposited leaf litter and fine particulate organic matter, we investigated eight different types of aquatic habitats (both lotic and lentic) in a floodplain in the middle reach of the Tagliamento River, northeast Italy. Based on statistical analyses and source estimation of organic matter, its dynamics both in quantity and chemical quality were found to be closely related to flow condition of floodplain habitats. Further, high species diversity in floodplains is possible to be supported by complex organic matters dynamics which are determined by physical flow condition and primary production.

Key Words : *leaf litter, fine particulate organic matter, habitat heterogeneity, allochthonous organic matter, CN ratio*

1. はじめに

河川は、元来、多様な物理生息場から構成される。特に洪水氾濫原や河岸段丘には流れのある瀬や淵のような流水環境だけではなく、洪水時にのみ河川とつながるような止水環境も形成される。洪水氾濫原は他の生態系と比べて種多様性が高いと言われており^{1),2)}、多様な物理生息場の存在と冠水が高い種多様性に寄与していると考えられる。

一方、河川生態系の特徴として、河川規模や河岸植生に応じて、生食連鎖と腐食連鎖のバランスが変化する点がある。腐食連鎖とはデトリタスと呼ばれる生物の死骸や排泄物の分解物を出発点とする食物連鎖である。一般に河川の生息場は水理学的条件によって定義されるが、このような食物連鎖の空間的変化は各生息場の流れの条件や物質動態に依存すると考えられる。例えば、川幅の広い河川では藻類などによる光合成によって一次生産が卓越する。逆に落葉樹の樹冠に覆われた生息場では枝葉に由来するデトリタスが、水生動物の重要な餌資源・エネルギー源であると考えられる。

したがって、各生息場における水生動物群集は、水理学的条件だけでなく餌としての有機物供給過程に適応した結果と考えられる。しかしながら、河川の生息場は一

般に水理学的観点で定義されるものの、各生息場における有機物動態は十分に解明されていない。これまでに、栄養構造は概念的に示されており³⁾、Langhans et al. ⁴⁾により、池での落葉の分解は微生物と腐食動物の影響が強い。また、流水域での落葉の分解は流れのせん断力による破碎の影響が強いと示されているが、有機物供給量やその生物利用性に関する研究報告は不足している。

近年、河川環境管理において、生態系の保全や再生が重要な課題になりつつある⁵⁾。河川においても種多様性が維持される環境条件を明らかにすることは、今後の河川環境管理を効果的に進めていく上で欠かせない。さらに、生物多様性を維持することが重要である。上述したように、各生息場を特徴づける群集構成は、水理学的条件だけでなく有機物動態にも依存していると考えられ、有機物動態を水理学的条件と関連付け、さらに水生動物群集の種構成の理解へ発展させることは有意義である。

本研究では、イタリア北東部に流れるタリアメント川(図-1)に形成される洪水氾濫原を対象に生息場の流れの条件や水中及び周辺植生に着目し、各生息場における有機物動態を明らかにし、河川生態系再生を考える際の基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 対象とした洪水氾濫原

本研究はイタリアの北東部を流れるタリアメント川の中流域の洪水氾濫原を対象とした。タリアメント川はアルプスからアドリア海に流れる全長172kmの川であり、広範囲で網状河川になっている。この川は、欧州の河川のモデル河川とされている¹⁾。

調査はCominoからPinzanoの3kmの流域にある上流の水源から80.3kmに位置する洪水氾濫原（図-1）を対象とした。調査場所の標高は140m、平均勾配1%、氾濫原の幅670～999m⁶⁾であり、物理生息場と有機物動態の関係を明らかにするために行った。また、調査は夏季の流量が安定した時期（2009年8月23日から9月7日）に行った。

本研究では生息場を8種類に分類し、有機物動態を明らかにした（表-1）。対象とした生息場は早瀬、平瀬、淵、サブチャンネル（本流と分離し、下流でも接続）、上流接続ワンド、下流接続ワンド、アクティブプール（氾濫原内の池）、テラスプール（自然堤防上の池）である（図-2）。

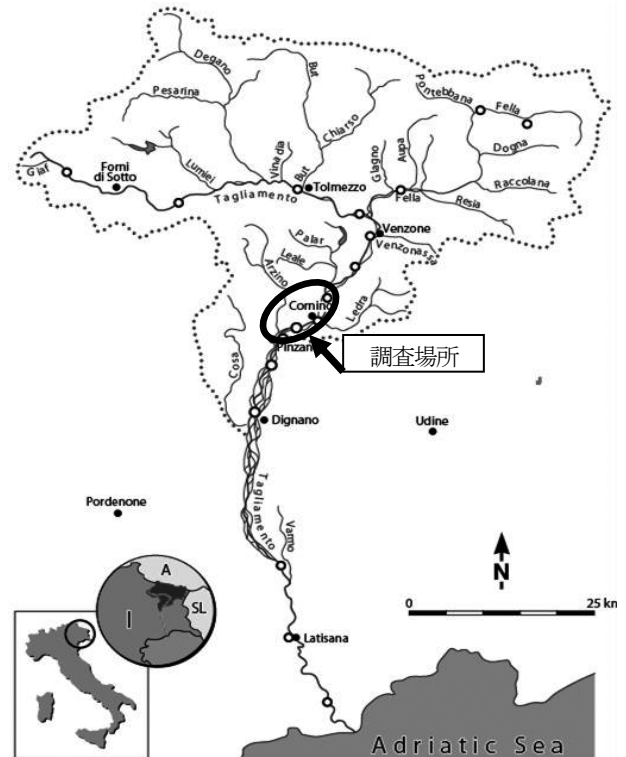


図-1 タリアメント川流域と研究対象とした洪水氾濫原

3. 方法

洪水氾濫原において1種類の生息場を4～5カ所選び（合計38カ所）、面積あたりの落葉枚数（枚/m²）、面積あたりの微細堆積物量（mg/m²）、樹木率（生息場の水際線に対する樹木の割合）、1次生産者、底質を調べた。落葉枚数は40cm×60cmの枠を作り無作為に置き、枠内に存在する落葉の枚数を上限30枚として数えた（最大125枚/m²、繰返し3回）。微細堆積物量は直径30cmのアクリルチューブを微細堆積物の多そうな箇所（水深30cm以下）に固定し、手つきピーカーで河床に触れないよう

（河床に触れると付着物を採取してしまう恐れがあるため）かき混ぜ、1mmのふるいを通過した微細堆積物を含む濁水を500mlのプラスチックボトルに採取した。その後1μmのガラス濾紙（whatman GF/B）で濾過することによって、大きさ1μm～1mmの微細堆積物を分析対象とした。その濾紙は60℃のオーブンで1～3日の間乾燥させ、強熱減量（600℃、30分）によって微細堆積物中の有機物量を測定した。落葉枚数と微細有機物量は生息場の条件によって有意に変化するかを分散分析（ANOVA）

（STATISTICA7）によって調べ、その有意差をTukey HSD検定によって確認した。本研究の検定はすべてSTATISTICA7を用いた。

河床の礫の存在する生息場ではその礫に付着する生物膜をブラシで落とし1mmのふるいを通過したものを付着生物膜として採取した。全ての生息場で周りを覆う樹木の割合を確認し、樹木率とした。生息場ごとの植生（藻類、水草）、礫の有無、樹木率、接続状況を対象に主成分分

析を行い、その生息場の特性を調べた。主成分分析結果の両軸に対して落葉枚数と微細有機物に相関関係があるかを相関分析で調べた。生息場の場所ごとに微細堆積物、落葉、落枝、付着生物膜、藻類、水草を採取し実験室に持ち帰った。

微細有機物の多い止水環境の生息場（上流・下流接続ワンド、アクティブプール、テラスプール）で微細堆積物、落葉、落枝、藻類、水草、付着生物膜の炭素、窒素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ）とCN比を測定した。安定同位体比はFlash EA ConFlo III（アムコ）とDELTA V Advantage（Thermo Fisher）を用いて測定した。基準物質を炭素は化石炭酸塩鉱物（Vienna Pee-Dee Belemnite）、窒素は大気中のN₂ガスとした。試料の安定同位体比は以下の式(1)で表される。

$$\delta^m X = \left[\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000 \quad [\text{permil}] \quad (1)$$

R_{sample} : 試料中の $^m\text{X}/^n\text{X}$ (モル比)

R_{standard} : 基準物質の $^m\text{X}/^n\text{X}$ (モル比)

$^m\text{X}, ^n\text{X}$: 元素Xの安定同位体($m > n$)

安定同位体比測定の際、微細堆積物中に炭酸塩を含む可能性があるため、3Mの塩酸に1～3日浸し、炭酸塩を除去した。

微細有機物中の他生有機物の割合を推定するため、標準混合モデル⁷⁾を使用した。それぞれ現場での観察でモ

表-1 8種類の生息場の物理条件（○は接続，×は接続せず．藻類・水草・礫は存在場所数/調査カ所数．）

生息場	記号	流速	水深 (cm)	接続		樹木率 (%)	藻類	水草	礫
				上流	下流				
早瀬	RA	速	<30	○	○	0~30	5/5	0/3	5/5
平瀬	RI	速	<100	○	○	0	5/5	0/4	5/5
淵	PO	緩	>20	○	○	0~40	5/5	0/5	5/5
サブチャンネル	SC	中	<30	○	○	0~20	4/4	1/4	3/4
上流接続ワンド	UW	-	<30	○	×	0~10	4/4	0/4	4/4
下流接続ワンド	DW	-	<30	×	○	0~70	4/5	0/5	4/5
アクティブプール	AP	-	<30	×	×	10~50	3/5	0/5	4/5
テラスプール	TP	-	<50	×	×	100	3/5	3/5	0/5

デルに使用する主な有機物起源を決定し推定を行った。ここで、他生有機物を落葉、落枝、自生有機物を藻類、水草、付着生物膜とした。モデルを適応するにあたって目視によって有機物起源の量を確認し、影響が強そうなものを選択した。上流接続ワンドは4か所とも落葉、藻類、付着生物膜を対象とした。下流接続ワンドでは5か所とも落葉、藻類、付着生物膜を対象とした。アクティブプール（AP）はAP1とAP2とAP4において落葉と藻類と付着生物膜を対象とした。AP3とAP5は落葉、落枝、藻類を対象とした。テラスプール（TP）はTP1とTP2とTP3とTP5で落葉と落枝と藻類を対象とした。TP4では落葉、落枝、水草を対象とした。

4. 結果

各生息場で落葉枚数を計数した結果、全体的に止水環境で高い値を示した（図-3A）。落葉枚数はANOVAにより生息場条件によって有意（ $F_{7,30} = 13.2, p < 0.001$ ）に変化することを確認した。また、Tukey HSD検定よりテラスプールの値が他の生息場より有意に大きかった。周りに樹木の多いテラスプールで計数上限（125 枚/m²）以上の値であった。次いで上流接続ワンド（30.9 枚/m²）、アクティブプール（29.4 枚/m²）と続いた。流水環境では14.2 枚/m²以下であった。また、流水環境と止水環境では落葉の堆積の仕方が異なっていた。早瀬、平瀬、サブチャンネルでは落葉が河床の礫に引っかかったのに対し、淵と止水環境では重力による沈降によって堆積していた。微細有機物の量も落葉枚数同様止水環境で高い値を示した（図-3B）。微細有機物はANOVAにより生息場条件によって有意（ $F_{7,30} = 5.5, p < 0.01$ ）に変化することを確認した。また、Tukey HSD検定より止水生息場（上流・下流接続ワンドとアクティブプールとテラスプール）の値が他の生息場より有意に大きかった。テラスプールでの52.9mg/m²が最大で、次いで上流接続ワンド（31 mg/m²）、アクティブプール（18.7 mg/m²）の

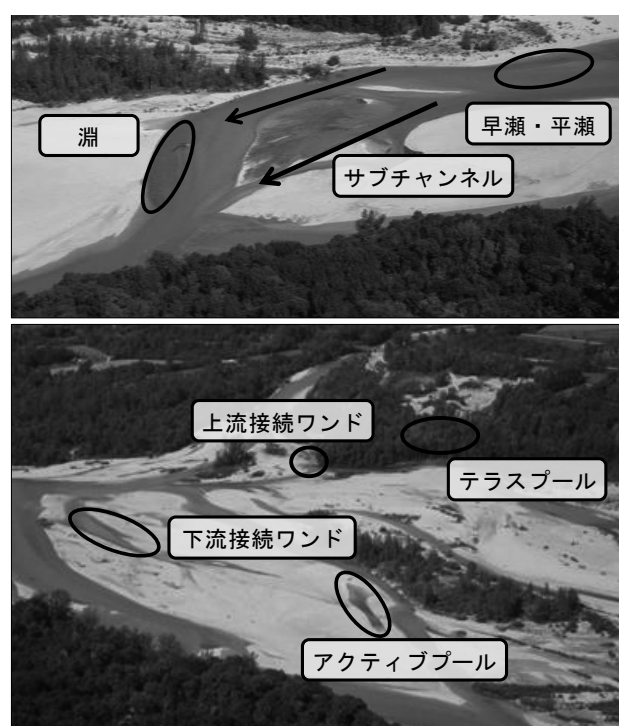


図-2 対象とした洪水氾濫原における主要な生息場

順に多かった。流水環境は6.5 mg/m²以下と少なかった。接続状況が違うワンドにおいて、落葉枚数、微細有機物を比較すると、上流接続ワンドでの値は有意差はないが平均値はどちらも下流接続ワンドよりも大きかった。

生息場の物理・生物条件を対象に主成分分析を行った結果、第1主成分の寄与率は55.8%、第2主成分は18.8%、第3主成分は10.6%であった（図-4）。第1主成分では樹木率、水草が正の相関、藻類、礫、接続状況が負の相関、第2主成分では藻類、水草は負の相関があった。上流・下流接続は、ほぼ同じ場所にプロットされた。生息場の主成分得点では、全ての流水環境の生息場と一部の止水環境の生息場（UW1~4とDW1,4,5）が全て第1主成分では寄与率が負の場所にプロットされた。寄与率が正の場

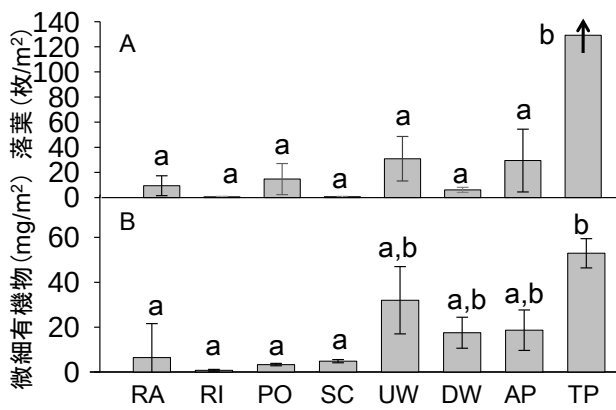


図-3 落葉(A)と微細有機物(B)の堆積量 (a,bはTukey HSD検定による有意差を表す。テラスプールの落葉数は計数の上限である125 枚/m²を超えていた。微細有機物は乾燥重量。誤差は標準誤差。生息場の記号は表-1の通り。)

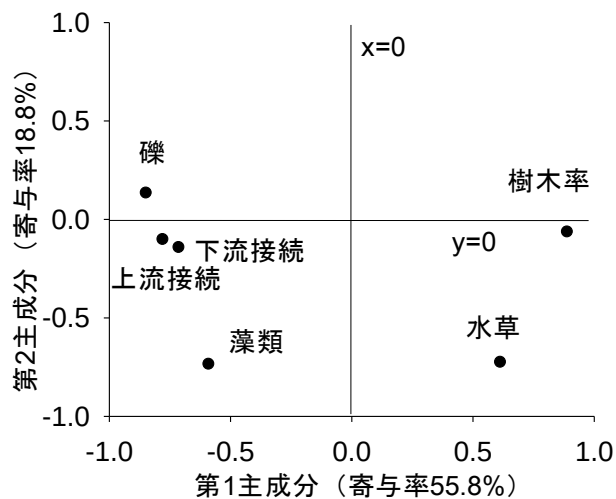


図-4 生息場の物理生物条件を考慮した主成分分析結果

所には他の残りの止水環境の生息場がプロットされた(図-5)。第2主成分では樹木率や一次生産者の量によって生息場内でも異なっていた。全てのアクティブプールでは第2主成分の寄与率が正に位置しているのに対し、テラスプールでは寄与率がTP1とTP2で正、TP3とTP4とTP5で負と分かれた。主成分分析の結果をまとめると、第1主成分の値が正であると生息場の外部の植生(樹木率や落葉の堆積量)の影響が強く、負であると生息場が流水環境にあるという結果となった。相関分析の結果、各生息場の主成分得点(図-5)の第1主成分と落葉枚数には相関関係($r=0.69, p<0.001$)があることがわかった。また、主成分得点の第1主成分と微細有機物にも相関関係($r=0.83, p<0.001$)があることがわかった。しかし、第2主成分と落葉枚数、第2主成分と微細有機物には相関関係は認められなかった。

止水生息場の微細有機物のCN比はANOVAにより生息場条件によって有意($F_{3,13}=10.2, p<0.01$)に変化するこ

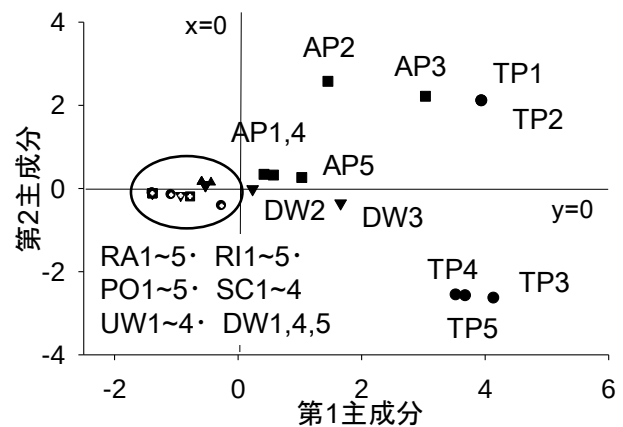


図-5 各生息場の主成分得点(白抜きは流水生息場、それ以外は止水生息場。生息場の記号は表-1の通り。)

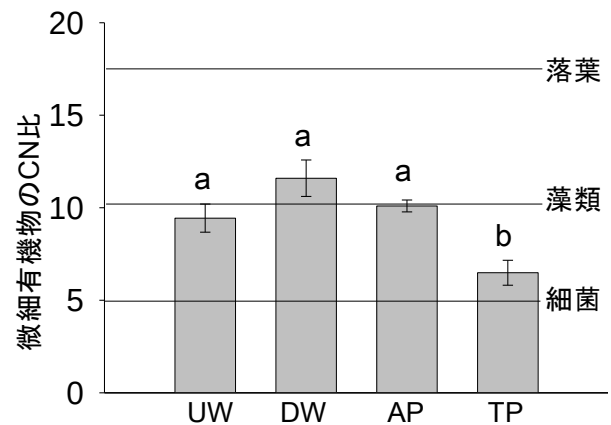


図-6 止水生息場の微細有機物のCN比 (a,bはTukey HSD検定による有意差を表す。誤差は標準誤差。落葉と藻類はそれを由来とする微細有機物のCN比(落葉17.9, 藻類10.3)⁸⁾。細菌は一般的なCN比の5⁹⁾である。生息場の記号は表-1の通り。)

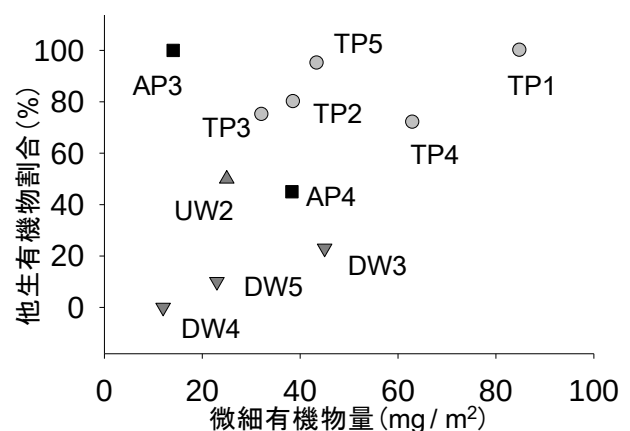


図-7 微細有機物量と他生有機物割合の関係(生息場の記号は表-1の通り)

とを確認した。また、Tukey HSD検定よりテラスプールの値は6.5と他の生息場より優位に小さかった（図-6）。テラスプール以外の生息場のCN比は10前後の値をとり、あまり違いが見られなかった。上流・下流接続ワンドとアクティブプールのCN比は藻類と近い値をとっていた。しかし、テラスプールでは細菌の値に最も近かった。

微細有機物中の他生有機物割合は生息場ごとに他生有機物の割合が異なった（図-7）。テラスプールの他生有機物割合が70%以上、下流接続ワンドでは30%以下、アクティブプールでは45%（AP4）と100%（AP3）、上流接続ワンドで50%（UW2）であった。テラスプールと下流接続ワンドでは他生有機物割合の傾向が異なっていた。しかし、同一生息場内でもアクティブプールは、周辺の植生に影響を受けやすいため他生有機物の変動幅が大きかった。図に示した以外の生息場では標準混合モデルを適応できない、もしくは微細堆積物が分析に十分量存在せず、安定同位体比を測定できなかったため起源を特定できなかった。

5. 考察

洪水氾濫原での生息場の物理条件は堆積性の粒状有機物の質や量、貯留に大きな影響を与えた。つまり、生息場の物理条件の違いが有機物動態に影響を与えていた。

落葉枚数、微細有機物量ではともに下流接続ワンドよりも上流接続ワンドで大きな値をとった（図-3）。これは上流接続ワンドの方が上流から水の供給量が多く、川から運ばれてくる落葉や浮遊微細有機物の流入量が多いため、堆積量が多くなるからである。落葉や微細堆積物が堆積する過程として落葉や上流で分解された落葉は浮遊有機物の一部として上流・下流接続ワンドに堆積したり、流水域の生息場の河床の付着膜にトラップされて付着して、後々水生生物に利用されると考えられる。落葉や上流から供給される浮遊微細有機物のほとんどは止水環境がない限り下流に流されてしまうので、氾濫原における止水生息場は、有機物を貯留するという点で重要な役割を有していると言える。

主成分分析結果（図-4）と主成分得点（図-5）より、樹木率の高い所、水草が存在する所は止水環境ほとんどが止水環境（サブチャンネル1か所に水草有）、礫のように河床に大きな石が存在するのは早瀬、平瀬を代表とする流水域の生息場で多かった。したがって、第1主成分が生息場への流れの影響を表していると考えられる。また、落葉枚数に影響を与える樹木率は第1主成分の正側にプロットされているため、生息場内で生産されていない他生有機物の影響の多さを表しているとも考えられる。第2主成分は、単純に第1次生産者の量であると考えられる。つまり、早瀬、平瀬など一般的な生息場の他にテラスプールを代表とする他とは異

なった生息場を加えることで、生息場に存在する1次生産の差異や生息場に影響を与える有機物に違いが生じるということがわかる。したがって、生息場の多様性は有機物の多様性へと繋がる。主成分分析結果（図-4、図-5）は生息場の状況（表-1）と堆積量（図-3）を繋ぐものである。また、第1主成分には落葉枚数と微細有機物量に相関関係があるため、樹木率の高い所では落葉枚数と微細有機物量が多くなることや、礫が多い所では堆積量が少なくなることがわかる。つまり、この主成分分析結果の成分から着目した環境条件に注意して河川を整備したり、保全することが可能になると思われる。

今回の調査で目視した限りでは、落葉は止水環境か流水環境かによってその動態が異なっていた。止水環境での落葉の分解は微生物と腐食動物の影響が強いことが知られており⁴⁾、微生物が増殖した落葉はそこに生活する水生動物に利用されやすいと考えられる。また、流水域での落葉の分解は流れのせん断力による破碎の影響が強⁴⁾、分解された後は下流へ流されてしまう。そのため、その場では水生動物には利用されにくいと思われる。

一般に、CN比の値が小さいほど物質中の窒素含有量が高くなり、水生生物に利用されやすい可能性がある。落葉由来の微細有機物のCN比の平均値は17.9⁹⁾であり、本研究で求めた微細有機物のCN比の値は高くても10前後であった（図-6）。そのため、落葉のFPOMの値を大きく下回る微細有機物を水生動物が餌資源となることは十分可能であると考えられる。上流・下流接続ワンドとアクティブプールは藻類由来の微細有機物の影響をうけている。しかし、テラスプールでは樹木に囲まれたジメジメとした空間ということもあり、落葉や藻類由来の微細有機物は細菌によってさらに分解され、細菌細胞が微細有機物中に入っている割合が高いと考えられる。そのため、テラスプールのCN比は細菌の一般的なCN比である5⁹⁾に近づいた6.5という値を取る（図-6）と考えられる。

水理条件とそれに対応して有機物動態が長い時間適応して現在の洪水氾濫原の生態系はできているため、水理学的条件が同じで有機物動態が異なった場合、生物群集に大きな影響を与えられる。また、微細有機物が水生動物の餌資源として用いられることが可能であるので、生息場の微細有機物の質の違い（図-7）によってそれぞれに対応する摂食機能群が増え、種の多様性にも影響を与えられると考えられる。つまり、一様な流れが継続しているだけ（生息場が1つだけ）の河川よりも、多様な生息場が存在する河川になるように整備した方が、河川の水生動物の餌資源が多種になるため、種の多様性をあげる1つの要因になると考えられる。

つまり、洪水氾濫原における高い種の多様性は多様な物理生息場と、それに対応した有機物動態に対応した結果であると考えられる。

6. まとめ

本研究から、有機物動態は洪水氾濫原の生息場における水理的条件と植生に密接な関係があることがわかった。氾濫原における止水生息場は有機物を貯留し、生息場の物理条件の違いは生息場内の1次生産の差異は生息場に影響を与える有機物に違いを与えていた。また、止水生息場内の微細有機物は水生動物による餌資源として利用されることが可能だとわかった。そのため、生息場の落葉や微細有機物の質の違いによってそれぞれに対応する摂食機能群が増え、種の多様性に関係があると考えられる。つまり、洪水氾濫原における高い種の多様性は多様な物理生息場と、それに対応した有機物動態に対応した結果であると考えられる。

今後主要な水生生物の餌資源を特定し、かつその生物の移動性や生活種も考慮することで、各生息場における有機物動態の役割を明らかにすることが重要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究（A）「タリメント川の原生的洪水氾濫原の生物多様性形成機構の解明と河川環境評価への適用」および河川環境管理財団（河川整備基金助成事業，No.21-1215-020）による研究助成を得て実施しました。また、現地調査では渡辺幸三氏より多大な協力を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Tockner, K., Mark S. Lorang and Jack A. Stanford. (2010) River Flood Plains Are Model Ecosystems To Test General Hydrogeomorphic and Ecological Concepts, *River Res. Applic.* 26: 76–86
- 2) Ward, J. V., Tockner, K. and Schiemer, F. (1999) Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity, *Regulated Rivers: Research & Management*, Volume 15 Issue 1-3: 125-139
- 3) Fisher, L. G. and Likens, G.E. (1973) Energy flow in Bear Brook, New Hampshire : an integrative approach to stream ecosystem metabolism, *Ecological Monographs*, 43: 421-439
- 4) Langhans, S. D., Tiegs, M. O. Gessner, and K. Tockner. (2008) Leaf-decomposition heterogeneity across a riverine floodplain mosaic. *Aquatic Sciences* 70:337-346.
- 5) 鷲谷いづみ・草刈秀紀 (2003) 自然再生事業—生物多様性の回復をめざして。築地書館。371pp.
- 6) Arscott D. B., Klement Tockner and J. V. Ward. (2003) Spatio-temporal patterns of benthic invertebrates along the continuum of a braided Alpine river, *Archiv für Hydrobiologie*, 158:431–460
- 7) Phillips, D.L. (2001) Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: a critique. *Oecologia* 127:166–170
- 8) Yoshimura, C., Mark, O. G., Tockner, K. and Furumai, H. (2008) Chemical properties, microbial respiration, and decomposition of coarse and fine particulate organic matter, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 27(3):664-673
- 9) Sawyer, C. N., McCarty, P. L. and Parkin, G. F. (1994) *Chemistry for Environmental Engineering*. 4th ed. McGraw-Hill.

(2010. 4. 8受付)