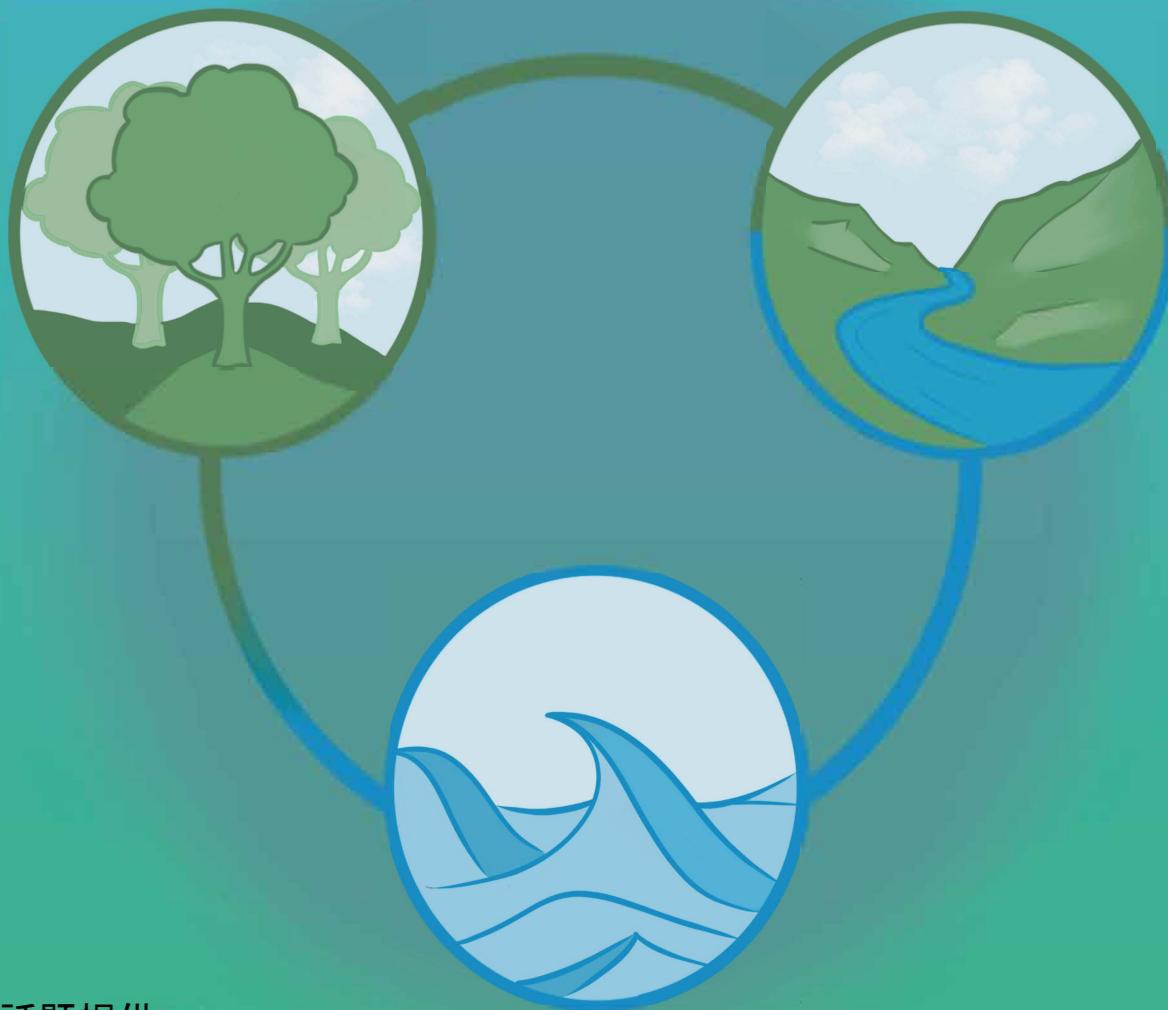


2021年日本陸水学会 公開シンポジウム

「森里川海のつながりを改めて考える」

コンビーナー：

吉岡崇仁(京都大)・白岩孝行(北大)・大西健夫(岐阜大)・楊 宗興(東農工大)



話題提供：

- ・多様な生物が紡ぎだす森・川・海の連環(佐藤拓哉・神戸大)
 - ・落ち葉を介した森川海のつながり(長坂晶子・道総研林業試)
 - ・干潟や谷戸ではなぜ、多くの生物が生息しているのか?
 - エコトーンにおける養分供給能の新理論(楊 宗興・東農工大)
 - ・佐渡島に再導入されたトキと水田環境(永田尚志・新潟大)
 - ・河道内氾濫原の保全と再生(原田守啓・岐阜大)
-
- ・日時：9月20日（月・祝）9:30～12:30
 - ・会場：Zoom
(URLは大会ウェブサイトに掲示、「陸水学会」「シンポジウム」で検索して下さい)
 - ・参加費：無料

「森里川海のつながりを改めて考える」：主旨

はじめに

森の恵みが川を介して海とつながっているという「森里川海のつながり」という考え方は比較的広く知られています。これまで、それがどのような実体のものなのかに関して、いくつかの研究が行われてきましたが、流域の湿地的環境の重要性や河川生態系における餌資源について新しい知見が最近得られてきました。今回のシンポジウムでは、森や湿地が、水域の物質循環的にどのような役割を果たし、その機能をどのように維持保全しようとしているかという観点から、森里川海のつながりを改めて考えてみたいと思います。

森から川や海へ

豊かな森が豊かな海を育てるという魚附き林という考え方に関して、生態学的、生物地球化学的観点からさまざまな研究が行われていますが、森から河川や沿岸域の動物のための餌として有機物を提供されているということが知られるようになってきました。本シンポジウムでは、線虫に寄生された陸生昆虫や水生動物であるヨコエビが、森の有機物を河川生態系に供給する重要な役割を果たしていることについて、最近の研究をご紹介いただきます。

話題提供

- 1) 佐藤拓哉（神戸大学大学院理学研究科）「多様な生物が紡ぎだす森・川・海の連環」
- 2) 長坂晶子（北海道立総合研究機構林業試験場）「落ち葉を介した森川海のつながり」

陸と水の境界域：湿地や干潟の役割

一方、陸と水の境界域に存在する湿地や干潟のような環境は、高い生物生産を維持していることが知られています。本シンポジウムでは、湿地・干潟での物質循環に関する新しい知見についてご紹介するとともに、湿地や水田をえさ場としていたトキを復活させるための研究についてもご紹介します。また、川の周辺に存在する水田や湿地には、洪水で川からあふれた水を一時的に蓄えるという機能がありますが、豪雨災害が頻発する現在、河川工学の観点からこの機能が見直されています。これら、湿地や干潟が果たす役割について最新の研究をご紹介いただきます。

話題提供

- 3) 楊 宗興（東京農工大学大学院農学研究院）「干潟や谷戸ではなぜ多くの生物が生息しているのか？
- エコトーンにおける養分供給能の新理論」
- 4) 永田尚志（新潟大学佐渡自然共生科学センター）「渡島に再導入されたトキと水田環境」
- 5) 原田守啓（岐阜大学流域圏科学研究センター／地域気候変動適応研究センター）「河道内氾濫原の保全と再生」

森里川海のつながりを再考する

パネルディスカッションでは、森里川海のつながりにおいて、森だけではなく、湿地や干潟などの陸と水の境界域が重要であることについて議論したいと思います。

佐藤拓哉（神戸大学大学院理学研究科）

森や川、海の生態系は単独では成立しえず、生物・生物遺骸・栄養塩の移動（系外資源流）を通して、互いに関係しあうことで成立している。森で育まれる陸生動物は、一般に、森林の一次生産が高まる春から夏にかけて河川に流入し、魚類の重要な餌資源となる。これに加えて、成熟したハリガネムシ類（寄生者）が、夏から秋にかけて、カマドウマやキリギリス等（終宿主）の行動を操作して河川に飛び込ませると、宿主がサケ科魚類の主要な餌資源になる（寄生虫がつなぐ森と川の生態系）（図1）。こうした季節折々の森から川への陸生昆虫の恵みは、

サケ科魚類の捕食量の変化を介して、河川内の底生動物、藻類、および落葉の破碎速度にまで影響を及ぼす（図2）。

本講演では、こうした森と川のつながりのもとで育まれるサケ科魚類やそれと河川生態系の関係性、さらには魚類を通じた森と川、そして海までのつながりの研究事例を紹介する。様々な生物が森・川・海をまたいでつながることで、生物の多様性や生態系の機能が維持されていることの一端を、皆さんと共有したい。

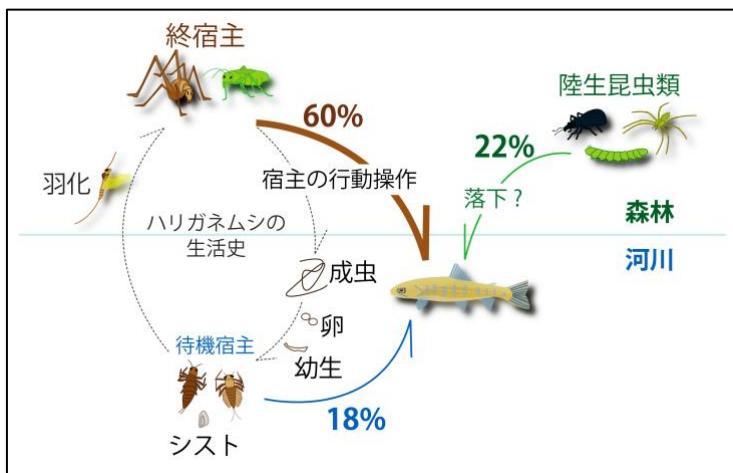


写真. 森林から河川への物質供給を遮断する操作実験。

図1. 寄生者が駆動する森林から河川へのエネルギー流。
ハリガネムシ類による宿主の行動操作が、間接的にサケ科魚類への大きなエネルギー補償を引き起こす。
%は、各餌生物のエネルギー貢献割合。（Sato et al. 2011 Ecology より改訂・引用）

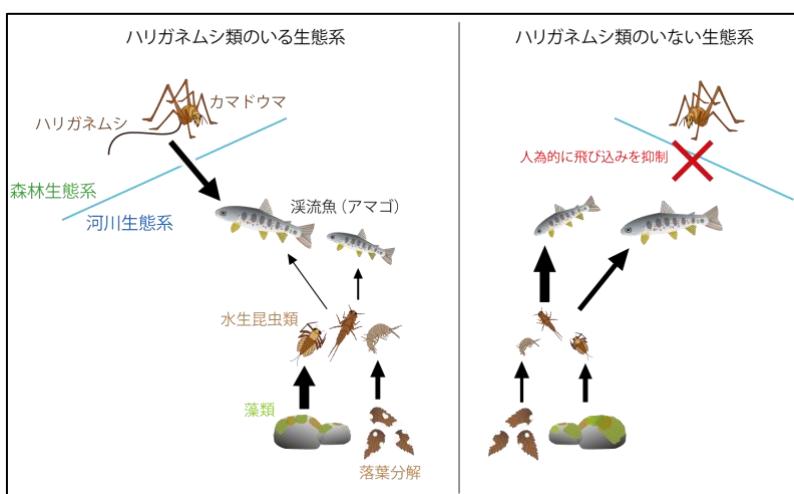


図2. 寄生者が繋ぐ森林・河川生態系。
ハリガネムシ類が引き起こす森から川へのエネルギー流は、渓流魚の年間総エネルギー消費量の60%を占める場合もある（Sato et al. 2011, Ecology）。本研究では、このような寄生者によるエネルギー流を人為的に抑制すると、渓流魚による水生昆虫類への捕食圧が増大し、その影響が河川生態系全体に波及することを実証した。

長坂 晶子（道総研林業試験場）

1. はじめに

筆者は、森一川一海の物質循環を担う「鍵」となる区域として、川沿いに発達する「河畔林」に着目し調査研究を行ってきた。河畔林は溪流魚の餌となる葉っぱや陸生昆虫など有機物の供給のほか、日射の遮断、隠れ場所の提供など、様々な機能を発揮している。今回は主に有機物（樹木の葉）の供給とそれを取り巻く川一海の生き物たちについての研究を紹介したい。なお、今回紹介する内容は、道立中央水産試験場・櫻井泉氏（現東海大学教授）、道立水産ふ化場・下田和孝氏（現さけます内水面水産試験場研究主幹）との共同研究によるものである。彼らとの共同作業ができたことで、森川海一貫した研究に取り組めたことは幸甚である。この場を借りて、これら共同研究者に厚く御礼を申し上げる。

2. 森から川へ 一落ち葉の分解過程一

森林に覆われた小溪流では、日光による一次生産が抑制されるため、溪流生態系のエネルギー源は、河畔林から供給される有機物に90%以上を依存する。溪畔から供給されるのは、粗粒有機物（落ち葉、枝、果実など1mm以上の有機物）と、地表水や地下水から溶存有機物（落ち葉や森林土壤から溶け出した有機物）である。落ち葉は、表面に微生物や菌が定着した後、ガガンボの幼虫などに代表される破碎食者とよばれる水生生物に食べられ、その糞や食べかすとして細粒有機物（ $0.45\text{ }\mu\text{m}-1\text{ mm}$ ）に転換される。一部は水中で溶け出して溶存有機物となる。溶存有機物も微生物や菌の定着により粒状化し、細粒有機物に転換される。川の中には、細粒有機物を主な餌として食べている水生生物も生息するので、「有機物の細粒化」とは、微生物や破碎食者たちによって、さらに別の水生生物の利用可能な餌資源が提供されることを意味している。

筆者らの研究グループが調べた例では、まず溪流における落ち葉の分解者として、端脚類タキヨコエビの存在が際だっていた。タキヨコエビは日本海沿岸の急流河川に生息し、海水と淡水を行き来するユニークな生活史をもっている。このタキヨコエビは、

豊富に供給される落ち葉を食べ、分解者として重要な役割を果たすとともに、溪流の代表魚種であるサクラマス幼魚（ヤマメ）の主要な餌となっていたのだ。森林小溪流に生息するヤマメの総同化量のうち42.2%（冬季）から78.1%（秋季）が森林起源有機物に由来しており、年間を通して河畔林からの有機物供給が重要な役割を果たすことがわかったのだ。

3. 川から海へー落ち葉を利用する海の生き物ー

では、1年間にどのくらいの量の有機物が沿岸域に流れていくのだろうか？

流域面積2000haの小溪流で、1年間の流出量を測定した結果では、河畔林（森）から川に供給された落ち葉は30.5t、そのほとんどが川底にとどまり、沿岸河口域にたどりつくのは、わずか1.4tという結果になった。海にたどりつく落ち葉がこれほど少ないということは、実は筆者らにとっても予想外の結果だった。しかし沿岸河口域では、海洋性のヨコエビ類が盛んに落ち葉を食べ、さらに、このヨコエビ類は、カレイ類稚魚の餌として利用されていた。カレイ（クロガシラガレイ）の胃内容物の調査を6月・7月・9月・11月にわたって実施したところ、胃内容物の組成には季節的な変化が見られ、カレイが8cm前後とまだ小さな時期に、ヨコエビ類を好んで食べていたのである。

4. 小さな川の貢献

さて、もう一度海岸線の様子を思い浮かべてみよう。一つ一つの川は小さく、そこから海に流れ出る落ち葉の量もわずかかもしれないが、海岸に沿っていくつもの川が流れ込み、「落ち葉だまり」が点々とできていることが予想される。沿岸域で成長する稚魚や、またヨコエビなどの小さな生き物にとって必要不可欠な生息場を、森が提供する—これは森と川と海のつながりのほんの一端を示しているに過ぎないだろうが、川で、海で、様々に利用される「森からの贈り物」の多様な役割を実感せずにいられない。

- エコトーンにおける養分供給能の新理論

楊 宗興（東京農工大学大学院農学府）

1. 生物生産性に対する従来の説明と限界

河口、沿岸域は多くの生物が生息し、世界でもっとも生産力が高いとされる(Nixon, 1988; Horn and Goldman, 1994)。貝塚の存在などから、河口域は人間活動の前から基本的に今と同様の状況にあったと想像されるが、その生産性が何故高いのか、理由はよくわかっていない。

国内外の多くの書籍で、河川によって運ばれてくる栄養塩や有機物の重要性が説明されているが、実証的な研究は見当たらない。上流が重要とされたのは、『下流側にいる水の研究者』が寄せる淡い期待のようなものに過ぎなかつたのではないか。なぜなら、『上流側にいる陸の研究者』から見れば、陸が利用可能な栄養塩や有機物を「出す」ことはほとんど考えられないからである。

陸の生態系は窒素ならびにリンに欠乏しており(Vitousek and Howarth, 1991; Elser et al., 2007)、またリン酸(PO_4^{3-})は粘土鉱物や鉄・アルミニウム(水)酸化物(iron / aluminum oxyhydroxides)に強く吸着保持される。実際、非汚染河川の NO_3^- 、 PO_4^{3-} 濃度はきわめて低い(Meybeck, 1982; Hedin et al., 1995; Bol et al., 2016; Wakamatsu et al., 2016)。例えば Wakamatsu ら(2016)によれば、国内渓流河川の PO_4^{3-} 濃度の中央値は検出限界に近い $0.2 \mu\text{mol/L}$ に過ぎない。また、陸域で生産される有機物(例えばリターフォール)は、正味の無機化が生ずる閾値 $\text{C/N} \approx 20$ 、 $\text{C/P} \approx 115$ に比べ、 $\text{C/N} \approx 179$ 、 $\text{C/P} \approx 615$ (Bolin et al., 1983) と炭素過剰で、栄養に富むものではない。

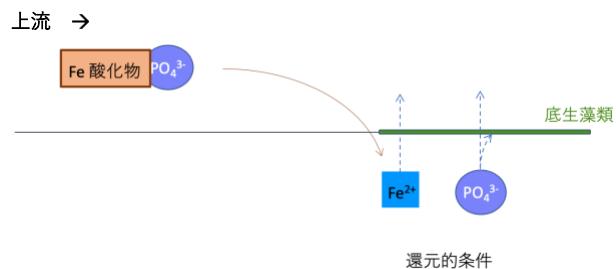
2. 仮説

河口域の例として、木更津で東京湾に流れ込む小櫃川の河口泥干潟では、おびただしいアシハラガニの生息を見る。このような生物生産性の高さは、上記の旧来のセオリーでは到底説明できないであろう。そこで流域生物生産性の新たな説明として、「酸化的条件において鉄酸化物等に強く吸着保持されていた PO_4^{3-} が、堆積物等の還元的条件下で鉄の溶解とともに可溶化高濃度化し、藻類の生産を増大させた」という機構を考えた(図1)。

3. 実証

いくつかの研究により上の仮説の証明を試みた。

- 1) 小櫃川泥干潟クリーク堆積物間隙水中の PO_4^{3-} 濃度を測定した結果 $100 \mu\text{mol/L}$ 以上であり、表面水の濃度も、間隙水濃度と比例関係を示しながら $10 \mu\text{mol/L}$ に達した。これらの濃度は有機物分解では説明しがたい。

図1 堆積物で PO_4^{3-} が高可給化する機構(仮説)(単純化)

- 2) 有明海に注ぐ六角川河口部の‘ガタ土’間隙水でも $100 \mu\text{mol/L}$ に近い PO_4^{3-} 濃度が検出された。
- 3) 被陰された森林集水域源頭部の小池表面水でも夏季の最高時に $>10 \mu\text{mol/L}$ の PO_4^{3-} が検出された。
- 4) 粉碎した母岩を CO_2 曝気条件で培養すると、 SiO_2 ならびに PO_4^{3-} 濃度が増大。還元剤を入れると PO_4^{3-} 濃度上昇はさらに高まった。鉄酸化物還元ならびに無酸素下での風化が、 PO_4^{3-} 源として機能しうる。
- 5) 泥干潟の盲管状クリーク接続口で干満に伴う物質収支を24時間観測した結果、下げ潮時に PO_4^{3-} 、懸濁態リン(PP)、 Fe^{2+} 、 NH_4^+ 、DOC、TDN、懸濁物質(SS)のいずれも増大、上げ潮時にはその逆となった。下げ潮時の流出と上げ潮時の流入の物質収支は、前者が後者をいずれの項目も上回った(図2)。 PO_4^{3-} 产生に起因した底生藻類による正味生態系生産ならびに窒素固定を表している。

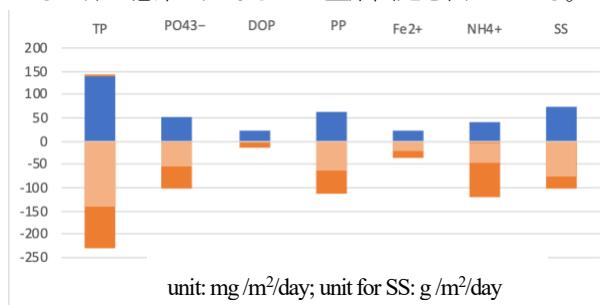


図2 小櫃川クリークにおける上げ潮時の流入(+) (青)と下げ潮時の流出(-) (橙)間の物質収支。薄橙色は青色の相当量

4. 結論

本干潟では PO_4^{3-} ならびに NH_4^+ の正味の現地生成が生じ、自然の『富栄養化』が起こっている。その結果、豊富な自生性有機物の生産が行われ、これがこの地の生物群の隆盛を作り出していると理解される。還元条件の発達する谷戸やその他泥炭非堆積型湿地域における多くの生命の生息においても、同様の仕組みが推定される。

佐渡島に再導入されたトキと水田環境

永田尚志（新潟大・佐渡自然共生科学センター）

環境庁（当時）が1981年に佐渡島に残っていた最後のトキ5羽を捕獲し、野生絶滅した。捕獲したトキの♂1羽のみで、高齢であったためか、日本産トキから雛を得ることはできなかった。しかし、1999年に中国から贈呈されたつがいが飼育下ではじめて繁殖に成功し、この番いの子孫と、その後に中国から貸与された3羽の5羽を始祖とする飼育個体群は順調に個体数を増やしていく。飼育個体群が100羽を越える目処がついた2008年秋に最初の放鳥が実施された。中国産と日本産個体の全mtDNA（16,793bps）を比較したところ11箇所(0.06%)で差異があったのみで、ハプロタイプは共有されていて同一個体群であったと推定された（山本2009）。2021年6月までに24回、のべ415羽が放鳥され、165個体が生存し、残りは野外生まれ個体となっている（図1）。



図1. トキの個体群成長

採餌生態

まず、フォーカルアニマル追跡法を用いて採餌状況をフィールドスコープで直接観察した。トキは嘴を泥の中に軽く差し込みながら歩きまわり、餌を感じると、嘴を深く差し込んで餌を捕獲する接触型の採餌方法をとっている。佐渡島のトキは、1年中、水田およびその周囲の環境で採餌を行うが、稻丈が高くなり水田に入れない7～9月にかけては、畦畔や農道で陸上の餌を利用する。

直接観察で確認できた餌種は、ドジョウなどの魚類、ツチガエル、サドガエル、アマガエル、イモリ等の両生類、ヤゴ（幼虫）やミズアブやガガンボの幼虫等の水生昆虫、サワガニ、アメリカザリガニ等の甲殻類であり、畦畔や農道の叢では、ミミズ、バッタ、ケラ等の陸生の無脊椎動物であった。しかし、飲み込み回数の6割を占める小型の餌生物は、目視では同定できないが、飲み込めるサイズの動物であれば、なんでも餌となっていると考えられた。また、放鳥トキの飲み込み回数中で、ドジョウの占める割合は11～24%に過ぎず、水田が利用できない夏期にはミミズが36%となり、ミミズが重要な餌であることが明らかになった。

放鳥トキは、かつての生息地である中山間地域の棚田ではなく、平野部の水田を好んで利用していた。トキの餌生物としてドジョウは重要ではあるが、水田が利用できない夏期には、畦畔や路傍の草むらに生息しているミミズや昆虫が重要な餌となっていた。佐渡市は、トキの餌となるドジョウ、カエル、バッタを増やすため、「朱鷺と暮らす郷」認証米制度という環境保全型農業を推進し、これらの活動により、トキの生息数も450羽を超えるに至った。しかし、過疎高齢化によって水田耕作の放棄が増加しているため、今後、どのようにトキが生息可能な水田環境が維持していくかが課題となってきている。



原田守啓（岐阜大）

日本の国土面積の凡そ 14%ほどの平野に人口の 5 割が集中している。これらの平野は、洪水が運搬してきた土砂が堆積して形成された沖積平野であり、すなわち“氾濫原”であった。近世・近代以降、平野部の河川には連続堤防が築かれ、現代にかけて堤防の強化や河川断面の拡大などが図られてきた。堤防に守られることとなった堤内地では、排水河川の整備や土地改良事業等の進展、都市の発展に伴う開発が進み、かつての氾濫原的環境やこれに依存した生態系は大幅に劣化した。

堤防と堤防に挟まれた河道内にも、普段は陸地であるが、河川が増水したときにだけ冠水する“河道内氾濫原”が存在する。堤内地の開発が進んだ現在の日本にあって、河道内氾濫原は国内に残された貴重な氾濫原的環境とみなされつつあり、河道内氾濫原の保全・再生を目的とした事業も、主に河川管理者によって実施してきた。

原生的な氾濫原を自由に流下する河道は、洪水によって流路変動を生じ、例えば自然堤防帯を流下する河道であれば、ムチがしなるよう蛇行しながら、氾濫原の多様な生息場所が形成・更新されるが、両岸が堤防によって拘束された人工河道では、流路変動を許容しえないため、自然営力による氾濫原環境の更新を期待することは難しい。そのため、河川管理者が、治水目的で行う河道内樹木の伐採や、土砂の掘削は、うまく活用すれば、河道内氾濫原環境の

若返りと再生に資することもできる。実際のところ、濃尾平野を流れる木曽川、揖斐川では、樹木伐採・河道掘削といった河川管理行為が、氾濫原性の生物の生息場所の形成と定着に寄与すること、またこれらの生息場所は比較的短命な寿命があることもわかってきている。

しかしながら、近年激化しつつある気象現象により毎年のように発生する大水害を受けて、河川管理者は、洪水をよりスムーズに流下させることを目的とし、河道内樹木の伐採、土砂の掘削を緊急的に行っていている。樹木伐採・土砂掘削といった河川管理行為を、治水と環境保全・再生の手段として運用していくには、技術的にも社会的にもまだ多くの課題が残っている。

加えて、本来の氾濫原的環境の再生は、河道内だけでは到底なしえない。河道と洪水調節施設のみで治水を行う時代から、流域全体で水の動きを考える流域治水の時代に向けて、かつての氾濫原であった低内地と河川のつながりの再生についても、問題提起したい。