

水工学シリーズ04-A-5

森林と河川の相互作用
-物理化学系ならびに生態系の視点から-

北海道大学大学院農学研究科 教授

中 村 太 士

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
2004年7月

Forest and stream interaction: From physical, chemical and ecological perspectives

中 村 太 士
Futoshi Nakamura

1. 森林の影響に関する誤解と保安林制度の歴史的意義

森林の公益的機能に関するこれまでの研究のほとんどは、森林の在るなしによって評価されてきた。これは水源涵養機能に限らず、他のほとんどの機能も同様で、流域レベルの森林皆伐実験によって支持され評価されてきたのである。皆伐前後もしくは皆伐をしない対照流域における水文観測、土砂流出観測、崩壊面積などの比較から、森林を皆伐すれば年間の総流量は増える、細粒土砂流出量は増加する、崩壊面積は拡大する、といった結果であり、世界各国で実施された皆伐実験によって、概ねこれらの傾向は支持されている。

したがって森林の機能論は、皆伐した場合に発生する水土の流出変化を根拠に成立しており、細かな林分単位の施業(植栽樹種の選択、間伐・除伐や枝打ちなどの森林の取り扱いを意味する)による応答を検証してはいない。また、施業技術と森林の機能に関する研究成果はきわめて少なく、少なくとも技術論レベルには到達していない。すなわち公益的機能論は、森林がなくなった場合に発生するマイナス効果を論拠に、森林の重要性を述べているに過ぎず、施業技術による機能向上を議論できる段階にはない。もし、施業技術というならば、皆伐すれば水が増えるか否かといった問いに対してではなく、年間の流出量を他の公益的機能を損なわずに 100mm 上げるためには、どのような施業を実施すればよいのか、といった問いに答えることができるはずである。残念ながら、公益的機能に関する施業技術論はこのレベルには達していないし、今後も達しない。自然物である森林を扱う以上、単一機能にはおのずと限界があるというのが筆者の見解である。

日本における森林の機能評価は歴史的に多くの問題を含んでいる。それは「何でもわからないことは森林に押しつける」「森林はいつも人間の都合の良ように機能する」と信ずる日本人の妄想に起因する。森林があれば豊富な水が水源から供給される、森林があれば山は崩れない、森林は川に栄養を供給し海の生産性が上がる、といったたぐいの万能論である。

水源涵養機能一つをとっても、洪水ピーク流量の減少と渇水流量の増加とは明らかに二律背反する性格を持っている。洪水ピークを減少させるためには、森林による初期損失雨量をいかに多くするかということであり、蒸発散によってなるべく水を消費するように樹木密度や樹冠うっぺい度を高く保って維持することが重要になる。一方、渇水流量の増加に対しては、なるべく水を消費しないように、間引き(除間伐)をして下枝等を切ってやり、疎林として維持するのが適当である。このように、二つの機能を同時に求めると相矛盾する森林像が浮かび上がり、森林は万能ではないことは明らかである。森林を再生することによって、海の漁獲高が上がったとされるえりも岬の事例も、水揚げ高の多くはサケ・マスの漁獲高であり、1970 年以降の水揚げ高の急上昇は、明らかに孵化事業の影響を受けている。クロマツ人工林のおかげで飛砂が防止され、漁民が安心して暮らしていける基盤ができたと評価すべきところを、森林から供給される栄養(?)によって海が豊かになったと本質論がすり替えられている。

森林の公益的機能を明確に定めているのは、森林法が定める保安林制度である。保安林は 17 の機能区分に分けられており、面積は年々増え続け、現在では森林の総面積の 1/3 を占めるに至っている。しかし、現在指定されている保安林の機能区分は、地形・地質、気象、土壌といった条件を整理して、綿密なデータをもとに客観的に判断しているわけではなく、その 70%以上は水源涵養保安林である。また、誰でも理解できるように、区分された保安林それぞれが、区分された機能を発揮しているわけではない。水源涵養保安林は、

流域の水収支に関わりあうと同時に、土砂流出を防ぐうえでも機能し、時には野生生物の生息場環境も提供するものである。したがって保安林の区分も本来ならば複合的に重なって指定されるべきであるが、現状はほとんど単一機能によって指定されている。しかし、17に区分して別々な機能を期待するほど、森林は単一機能で評価できないことをまず認識すべきである。

保安林制度が果たした役割を歴史的に見ると、個々の機能の発揮という評価以上に、伐採規制、土地利用規制としての位置づけの方が大きい。森林を残したり、木を植林するということは、他の土地開発を排除することである。保安林制度はこうした土地開発圧力に対して、保全の視点から生産の論理に対抗し、公益的利益を優先させてきたと評価できるのである。単一の機能をどの程度発揮したかという視点から保安林を評価するのではなく、総合的そして歴史的に保安林を評価すると、この土地開発規制としての役割が見えてくる。森林を個々の私的土地開発に任せていては、流域保全は達成できないという明確な宣言であり、森林は複合的に必要なものである(中村 1999b)。

2. 物質循環

2.1 森林と河川のエネルギー循環

水系次数の低い山地溪流では、谷壁斜面ならびに水辺林樹冠による日射遮断が強く作用し、溪流内に流入する太陽光は非常に少ない。とくに水辺林樹冠の日射遮断効果はきわめて高く、日本の冷温帯落葉広葉樹林を流れる小溪流では、全天の日射量の約 15%程度しか河川水面に到達できないことがわかっている(中村 1995)。植林地でスギやヒノキなどの樹種が水辺まで植えられている場合、溪流内はさらに暗くなり、直達日射量は 10%以下に減少すると考えられる。こうした水辺林の樹冠効果によって、山地溪流の水温は低温に保たれ、低温を好むサケ科魚類の生息が可能になる。

一方、この樹冠効果によって、春から夏にかけて水辺林が開葉している時期、藻類などの水生植物の光合成は著しく制限を受け、河川内の一次生産量は低く抑えられる。これまで実測されてきた河川内の一次生産量は、樹冠によってほぼ 100%覆われている上流域から、ほとんど覆われていない下流域に向かって大きく変化する。残念ながら日本における有機物収支の実測例はきわめて少なく、溶存態から粒状態まですべてを観測した例は皆無に等しい。

樹冠による日陰効果が強い上流域では、河川内の 1 次生産量が 10%にも満たず、河川内に流入するエネルギー(炭素)のほとんどは、周辺水辺域から流入する落葉リターによって供給される。日本の冷温帯落葉広葉樹林で調べた事例では、樹冠で鬱閉された溪流内に陸上から入る落葉量は、ヘクタール当たり約 3.0 トン程度で、樹冠から直接入る量はそのうち 89%を占め、残りの 11%は林床で堆積している落葉が風などによって巻き上げられ溪岸から入り込む量であった(岸ら 1999)。溪流内に入った落葉は、可溶性物質が溶けだした後、微生物、特に菌類が付着し、最終的に水生昆虫によって摂食されるという過程をたどって分解される。落葉の分解速度は、樹種によって異なっており、一般的には水辺にみられ窒素分の多いハンノキ属やシナノキ属が最も分解されやすく、カエデ属、シラカンバ属が中程度、斜面にみられるコナラ属、ブナ属などの葉は分解されにくい。また、草本の葉も分解速度が早く、草本が繁茂する水辺域では重要なエネルギー源となる。

一方、中流域では流域面積が増大するにつれて河川の川幅が広がるのに対して、水辺林の樹冠が水面を覆う面積は相対的に小さくなり、樹冠遮断の影響は少なくなる。ここでは、河川内の水生植物による一次生産量が大きくなり、相対的に系外からの有機物供給によってまかなわれるエネルギー量は小さくなる。さらに下流にすすむと、水深や濁りの増加に伴い一次生産量は再び低下し、上流から供給される微細粒状の有機物や溶存物質によってエネルギーをまかなう系が成立する。こうしたエネルギーの生産と消費にもとづき、流程に沿って(上流から下流に向かって)分布する生物群集を説明しようとした概念が、河川連続体説である(River Continuum Concept: Vannote et al. 1980)。たとえば、源流域で生産された落葉は、当初は大きな有機物

片であるが、シュレッター（破砕食者）と呼ばれる落葉を破砕する上流域の水生昆虫に摂食されて細くなり、下流域ではコレクター（収集食者）と呼ばれる細くなった粒状有機物を集める水生昆虫に再度利用されることになる。

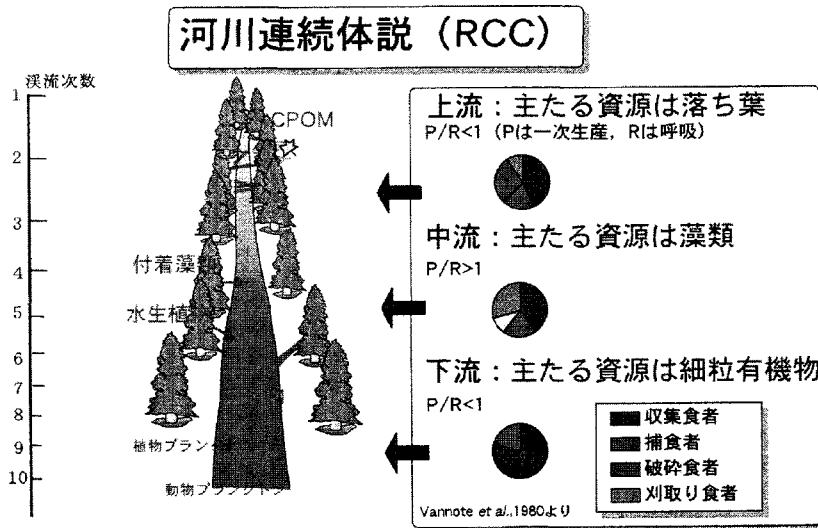


図1 河川連続体説 (Vannote et al. 1980)

ほとんどすべての物質が、水の流れによって集水域から源流河川へ、そして上流から下流へ流下する。このため、林地で循環するフロー以外の流域からの物質流出を考える限り、陸域から河川へ、そして上流から下流海域へ供給されるばかりで、この逆のフローは考えづらい。しかし、海で得た栄養分を上流へ運搬する担い手としてサケ科魚類が重要な役割を果たしていることがわかっている(室田 1995)。遡上したサケ類は、産卵後死に至り、死骸は水生生物によって分解される。分解されて溶出した窒素やリンは、水生植物の一次生産に影響を与えると考えられる。また、産卵のために上流域に達したサケが、陸上のクマやタヌキ、キツネ、カラス、ワシ類などによって捕食される割合は30～80%に及び、遡上したサケの大部分が陸上の動物もしくは林地に還元されることがわかっている。日本では遡上のため河口に集まってくるサケのほとんどを河口域のウライによって捕獲しているのが現状である。また、仮に遡上したとしても、ダムや灌漑施設によって上流域に達することはできない。今後は、物質循環の視点からもウライの撤去や、ダムの魚道設置、さらには砂防ダムのスリット化などの対策を考え、自然産卵ができる河川を復元する必要がある。

2.2 森林伐採の影響

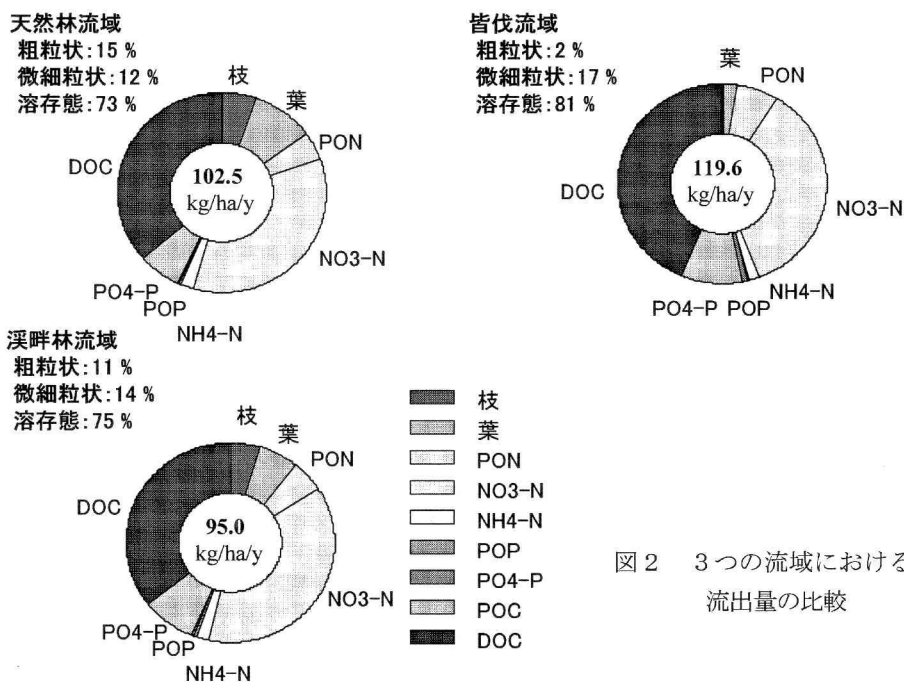
森林伐採により、幹部分が持ち出されると、有機物およびこれに含まれる栄養分が林地から消失する。一方、林地における枝払いや玉切りの過程で、枝条や葉、梢頭部、根株部分は林地に残されることになり、一時的に有機物が増えることになる。伐採のなかでも特に皆伐された林地では、直達の日射光が到達することによって地温が上昇し、有機物の分解が加速化される。伐採後の集材作業、地ごしらえなども、林地表層の攪乱や流出を早める方向に作用する。また、降雨時には雨滴が地表面を侵食し、土壌侵食が発生する可能性が高い。これによって、表層土壌に含まれる有機物も同時に河川に流出することになる。さらに、林地に残された根株部分の腐朽とともに、土壌の保持力が弱まり、斜面崩壊の発生する可能性が高くなる。根株が腐朽し、植林された樹木根系による回復が進まない10～15年程度の期間が、もっとも崩壊発生の可能性が高くなると言われている。斜面崩壊の可能性は、斜面傾斜の影響も強く受け、30度以上の斜面では崩壊ポテ

ンシャルがきわめて高くなることが知られている。

つまり、森林を皆伐した場合、地温の上昇に伴う有機物分解の促進、さらには土壌侵食による土砂および粒状有機物の流出という過程を経て、渓流水の物質濃度は高まることが予想される。

こうした森林伐採の影響が河川への物質供給に与える影響について、湯西川流域で実施された事例を紹介する（水源地森林機能研究会 1999）。この研究では、3つの小流域が設定されている。赤下沢は天然生の森林が保存されている流域、メンボリ沢は十数年前に伐採されているが渓流周辺の溪畔林は保存された流域、長沢は流域全体が皆伐されて十数年経過した流域である。長沢では源頭部に多くの斜面崩壊が発生しており、皆伐に伴う崩壊であると推定できる。3つの流域で計測された物質量を図2に示した。

3つの小流域を比較すると、枝や葉などの粗粒状有機物が最も多く流出しているのは天然林流域（赤下沢）で、全体の15%程度を占め、その次に溪畔林が残された流域（メンボリ沢）が多い。皆伐流域（長沢）では、これら粗粒状の有機物の占める割合はきわめて少なく、全体の2%にすぎない。これに対して微細粒状および溶存態の炭素が占める割合は、皆伐流域で最も高く、53%程度占める。溶存態の窒素のなかでも流出量が高い硝酸態窒素に関しては、流域による差はそれほど顕著ではなく、およそ35~45kg/ha/年程度の量が流出している。微細粒状の窒素については、炭素量と同様やはり皆伐流域で高い傾向が認められる。全体的には年間90~120 kg/ha/年程度の有機物や窒素、リン成分が流域から流出していることになり、総流出量も皆伐流域でやや高くなっている。



また、SS (Suspended Solid : 固形懸濁物質)流出量は、すべての季節で皆伐流域が最も高く、年間の単位面積当たりの流出量は、天然林流域で5.5 kg/ha/年、溪畔林残存流域で18.2 kg/ha/年、皆伐流域で47.6 kg/ha/年に達する（図3）。これまでに海外で実測された溶存態および粒状有機物量と比較すると、Hubbard Brook 実験林でそれぞれ15kg/ha/年、10kg/ha/年（Bormann et al. 1974）、H.J.Andrews 実験林で30kg/ha/年、40kg/ha/年であった（Swanson et al. 1982）。赤下沢の溶存態もしくは微細粒状炭素量を有機物量に換算するために2倍すると、それぞれ74kg/ha/年、29kg/ha/年となり、海外で観測された事例と比較して、溶存態に関してはやや大

きな値、粒状についてはほぼ同様の値を示した。

湯西川流域の3流域で観測された物質の流出傾向は、先に説明した現象を支持するものであり、皆伐によって葉や枝条の供給量が増加する一方、分解も進み、溶存態および微細粒状有機物の量が増えたと考えられる。また、土壌侵食や斜面崩壊に伴い、林地に蓄積した微細粒状有機物と土砂が河川に供給され、流出量が増加したものと推定できる。流出物質の濃度は、河川流量の増加に伴い増加しており、この点からも表層の浸透流および侵食営力による流出プロセスが重要であると考えられる。

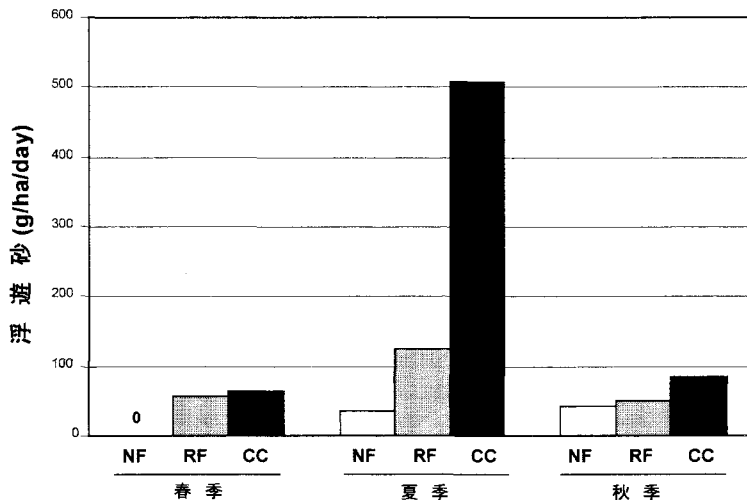


図3 浮遊砂流出に対する3流域の比較 (NF:天然林, RF:溪畔林, CC:皆伐)

3. 河川内における物質の貯留および組成変化

上流域の水源地森林地帯から供給された物質は、河川内に生息する様々な生物によって利用される。河川には流域水循環に規定される上流から下流に向かう非常に強い物質の流れが存在し、流水の排出時間はきわめて短い。日本の河川流域に降った雨のほとんどは、日単位の時間スケールで排出され、この時間スケールでは河川に棲む生物は流下物質を効率的に利用することはできない。このため流域で生産された物質が、流水によって容易に運搬されないように物質を保持する仕組みが必要である。

3.1 粒状有機物の分解と貯留

温帯落葉広葉樹林を流れる河川の物質収支は、生産と流送が一時期に集中する傾向にある。落葉は地域によって多少異なるが、10月～11月に集中し、流送は春の融雪時か夏の豪雨時に集中する。集中して生産され、一気に海まで流されてしまえば有機物や栄養塩は水生生物に利用されずに終わる。分解スピードの早いハンノキ属やシナノキ属でも90%分解されるためには、3～7ヶ月程度必要なのに対し、中程度の分解スピードをもつカエデ属、シラカンバ属の落葉では8～15ヶ月、最も分解の遅いコナラ属、ブナ属に至っては、15ヶ月以上要するのである。つまり、落葉リターが河川内に保持される時間が数ヶ月程度であれば、分解の遅い落葉は利用されずに海域へ流出してしまうことになる。こうした集中性を分散し、供給された落葉リター(エネルギー)を一旦貯留(retention)する構造が自然河川のあちこちにある。

川の中に供給された落葉は、溪流内に分布するいろいろな障害物、たとえば倒木や流木、さらに枝にからみついて捕捉されたり、突起している礫裏に幾重にも重なりあったり、また淵や流速の遅くなった溪岸沿いに多く分布する。細かい落葉片や微細な有機物などは河床の砂礫の間に捕捉されたりもする。北海道の火

山性小溪流である幌内川で調査した事例では、倒木や流木などの大型有機物片に引っかかって貯留されているケースが多く観察され、水深や流速などの水理量より強く影響を与えることが指摘されている。同様な観測結果は、海外でも多く見られる (Speaker et al. 1984 など)。

さらに、砂礫堆や氾濫原などの地形面も重要で、河川流路に直接入らなかった秋の落葉は、一旦こうした川岸の地形面に貯留され、高水時に少しずつ下流へ流出することになる。河況係数の大きい河川では砂礫堆の発達ที่著しいが、こうした河川では倒流木が河川内に滞留する可能性は低く、容易に流される。そのため、河川内のエネルギー貯留機構として、砂礫堆や氾濫原などの地形面による一時貯留が重要になってくる。

砂礫堆の発達する礫床河川で実施した有機物現存量の年間変化を図4に示した。単位区間当たりの落葉リターの貯留量は、若齢のヤナギ林が生育する砂礫堆で年間を通じて最も高く、その次に裸地化している砂礫堆での貯留量が高く、河川内の淵や瀬の貯留量はきわめて低い。こうした地形面に貯留された落葉リターは、洪水時水位が上がった際に徐々に下流に供給されていることが年間の現存量変化と流量変動との対応からわかる。また、氾濫原に水辺林が発達するような下流域では、水辺林帯が河床粗度を増加させ、高い地形面に伴う水深低下によって、河川が運搬してきた細粒の土砂、更に有機物を堆積させるようになる。こうして運ばれた有機物は、徐々に分解され再び流路に排出されることになる。

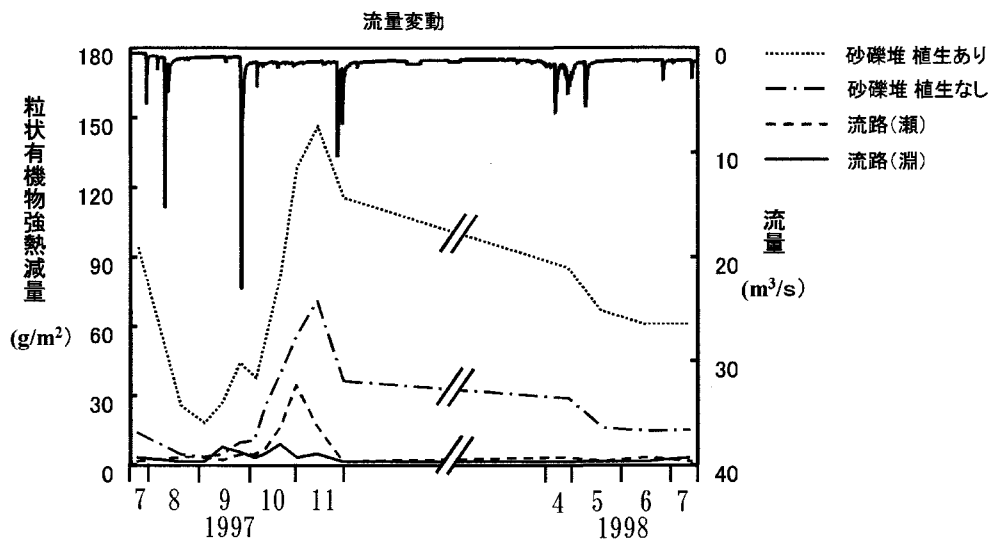


図4 河川における有機物現存量の年間変動

3.2 大型有機物片（倒木および流木）の影響

風倒・河岸侵食・地すべり等によって溪流内に倒れ込んだ倒木、さらに移動した流木は、河川微地形の形成、さらに物質移動に重要な役割を果たしている。こうした河川内に貯留された大型有機物片と河川との相互作用系は水系次数によって異なり、水系次数の低い溪流では、倒れ込んだ樹木が溪流と直接すぐに影響を及ぼすことは少なく、谷壁斜面に橋のように引っかかって保持されることが多い。腐朽する過程で破壊・小片化して溪流内に供給され、V字谷溪流のステップ・プール構造の発達に関与する。米国で実施された研究では、溪流内に形成されるステップ・プール構造の30～80%が倒流木によって形成され、淵の約50～100%が倒流木によって形成されていると報告されている (Harmon et al. 1986)。中流域では流水に対する障害物として機能し、流れの向きを急激に変化させる。このため、河岸・河床洗掘が拡大し、更なる倒木供給や土砂流入が促進される。河岸満水幅 (bankfull channel width) より長い有機物片は、数十年以上同じ場所に停滞し、最終的に天然ダムを形成する。天然ダムは、上流から運搬されてきた大型、小型リターおよび土砂を一旦貯

留するため、川幅はさらに拡大する。さらに下流域では、川幅に対して大型有機物片の長さが短いため、流れの方向に平行に向いて停滞する場合が多く、縦断的地形変化には寄与せず、流路の変化や二次流路の形成など、横断的变化に影響を与えと考えられる (Nakamura and Swanson 1993)。

こうした大型有機物片による物質貯留および地形変化に伴い淵が形成される。こうした淵は魚類生息場として注目され、倒流木の本数もしくは体積と魚類の種類や数の関係が研究されている。倒流木は、淵形成のみならずカバー構造にも影響する。カバーとは、障害物などの陰にできる暗い場所や流れの遅い場所で、魚類の生息場所として重要な要素であることが知られている。

米国における研究結果のほとんどは、倒流木の量が増えると魚類の量が増える傾向を示しており、倒流木が形成する環境は、魚類の生息場として欠かせない要素であると考えられている。こうした結果は、実験的にも確かめられており、倒木を投入する前後および倒木を投入しない対照河川における魚類個体数を比較し、倒木投入河川における明かな個体数上昇が認められている (Riley and Fausch 1995)。また、魚類個体数の増加の多くが淵量の増加に起因していると考えられている (Fausch and Northcote 1992)。しかしこれらの研究のほとんどは、胸高直径 1 m 程度、樹高 50 m 以上の大径針葉樹が水辺に生育する地域でなされたものであり、一度人為的な手が加わって小径の広葉樹が分布する日本の水辺林で、同様の機能が期待できるかどうかは未だ明かではない。

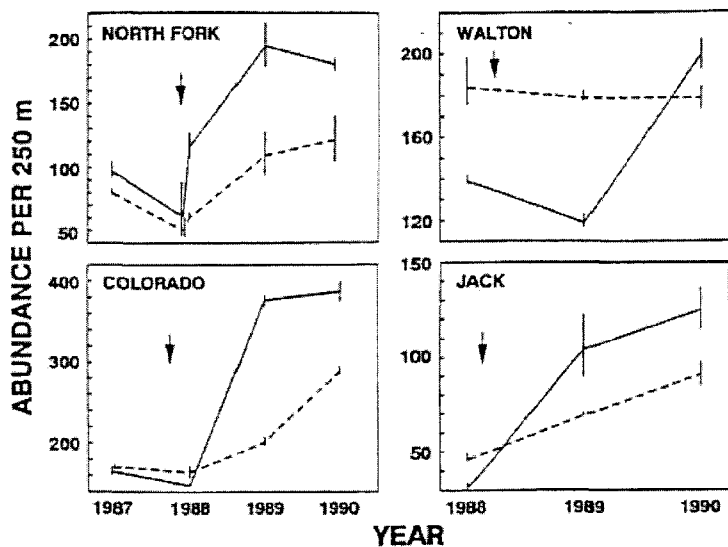


図5 倒木投入による魚類(マス)個体数の変化 (Riley and Fausch 1995)

矢印：倒木投入時、実線：投入河川、破線：対照河川

日本の冷温帯小溪流で実施された大型有機物片の除去実験では、除去によってサクラマス個体数が有意に減少したことを対照区との比較によって明らかにしている (阿部・中村 1999)。Inoue and Nakano (1998)は、倒流木量とサクラマス個体数との関連を調査し、倒流木のサクラマスへの影響は淵形成よりもむしろカバー効果において顕著であると述べている。一方、Urabe and Nakano (1998)は、火山軽石を底質とする緩勾配溪流で倒流木とニジマスの関連を調査し、倒流木による淵形成とこれに伴うニジマス現存量の上昇を明らかにしている。米国西海岸にくらべて小径の広葉樹が分布する日本の水辺林では、淵形成に及ぼす影響は小さいと考えるのが自然であるが、火山軽石など比重が軽く、洗掘を受けやすい底質においては、淵形成にも充分関与すると考えられる。

先にも述べたように、河川内の倒木は、落葉リターの保持構造として河川内のエネルギー貯留に重要な役

割を果たしている。さらに、遡上したサケ科魚類の死骸も、こうした河川内の倒木によって効率よく保持されることが、実験的に確かめられている (Cederholm et al. 1989)。これによると、放流して追跡できた 782 尾のうち、放流地点から 600m 下流へ流出した個体はわずか 9 尾であった。したがって、ほとんどの個体は 600m 以内の川のなか、あるいは岸辺で確認されており、そのうち 50%以上が倒木や枝などによって保持されていたと報告されている。

3.3 栄養塩の貯留

河川水質の汚濁源となる窒素、リン、濁度粒子が、水辺林および土壌粒子によって効率的に除去され、水質を保持するための緩衝帯もしくはフィルターとしての水辺林の役割が注目されている。これまで発表された研究成果からは、溶存酸素の少ない斜面からの地下水の流れと、溶存酸素を豊富に含んだ渓流水が河床や砂礫堆、さらに氾濫原に伏流して混合する領域が、水質形成に重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある (Triska et al. 1989)。こうした領域は間隙水域 (hyporheic zone) と呼ばれ、当初、流水を生息場とする昆虫類の一部が、川底のみならず砂礫堆や氾濫原を構成する湿った礫間にもおよぶことが明らかにされて注目を集めた (Stanford and Ward 1988)。その後、水質形成における役割が議論されるようになってきた。これまでの研究の多くは、畑地に隣接して流入する窒素分が高い系で実施されており、栄養塩除去帯 (nutrient filtering zone) として機能すると結論されている (Jones and Holmes 1996)。しかし、森林生態系ではむしろソースとして機能することも報告されており、期待される機能は、周辺土地利用、森林構成砂礫や土壌の飽和透水係数、動水勾配 (平水時・洪水時)、植物の組成と構造等によって変化すると考えられる。残念ながら、多くの研究は、地下水収支やその流れの方向を議論してはならず、窒素濃度の低下は、植物による吸収や脱窒なのか地下水拡散とこれに伴う希釈なのか区別することは難しい。こうした問題点を補うため、現在では 3 次元の地下水浸透モデルを用いて質量保存則を満たして地下水動態を明らかにし、そのうえで水質を議論することが求められるようになってきた。これまでの研究成果にはこうした水文学上の問題点は存在するものの、多くの研究で 10-20 m 幅の水辺植生による栄養塩除去効果が確認されている (Lowrance 1992, Vought et al. 1994)。

微細砂や粒状有機物が水辺林帯によって補足されることについても多くの研究によって確認されている (Peterjohn and Correll 1984)。山地溪流では、森林伐採や林道建設による微細砂生産と溪畔域による土砂捕捉機能を議論している場合が多く、ほとんどの研究が水辺域による微細砂捕捉機能を認めている。また、谷壁斜面域を対象にしていることから、捕捉機能は斜面傾斜も含めて議論されている。これら水辺林の微細砂の捕捉機能は河川生態系にとっても重要な機能であり、微細砂流入は藻類の光合成生産量を低下させる (Yamada and Nakamura 2002)、サケ科魚類の産卵床に悪影響を与えたり (Moring 1982 ほか)、底生動物 (長坂ら 2000)、水中性のサンショウウオ類 (Corn and Bury 1989) に影響を与える。

4. 物質の流れと生物の生息場環境

これまで述べたきたように、河川に生息する生物群集は、陸域と水域の生態系間を行き来する物質の流れに影響を受けながら、その生息場環境を確保してきたと言える。

一般化して議論するために、水辺域のある区間における物質の流れを考えたい。この区間における物質交換は、①雨や太陽によるエネルギー・物質移入、②上流と下流、③氾濫原 (砂礫堆) と流水、④谷壁斜面と氾濫原の間で行われることになる。物質の流れと生物の生息場環境を結びつけるためには、①～④で行われている物質の流れと、流入と流出の差し引きとして計算される区間内滞留量 (ΔS) がなぜ発生しているのか、どこに発生しているのかを知る必要がある。たとえば、上下流での流砂観測もしくは横断面地形変化量から、区間内微細土砂堆積量を見積もることができる (ΔS の算定)。そして、この変化がどこで起こっているのかが明らかになれば、生息場環境とのつながりを示すことが可能になるのである (中村 1999b)。

ある種は、 ΔS がプラスになる (貯留・堆積) 生息場環境を好み、ある種は、 ΔS がマイナスになる (流出・洗掘) 生息場環境を好むことになる。そして、その空間的複雑性は多様な生物が要求する生息場を提供

すると考えられる。図 5(c)に示した横軸は、直接環境傾度と呼ばれるもので、生物種と物理的変量がいかに対応するかを解析する方法である。生物種のほとんどは、傾度軸上で一山型の分布を示し、それぞれの種は微妙にその生息範囲を分けているのが一般的である。したがって、複雑な環境傾度を狭い範囲に内包する河川や水辺域は、多様な種を内包することができる貴重な景観要素であると言える。

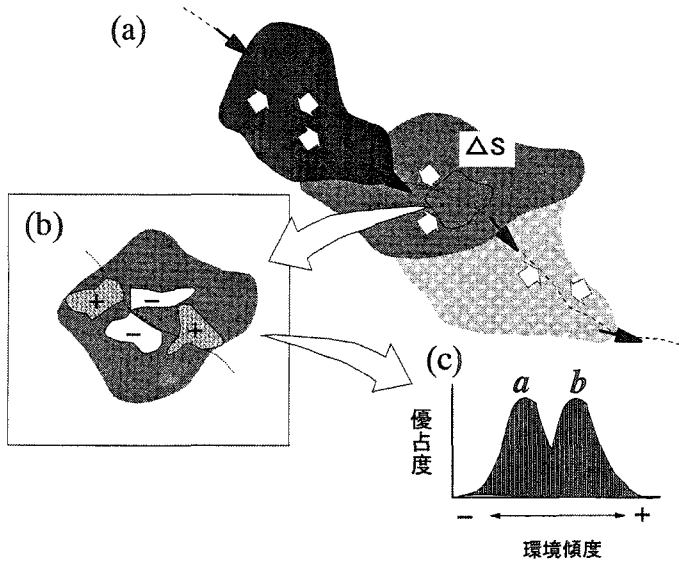


図6 物質の流れと生物の生息場環境

これまでの河川・砂防工事の多くは、この物質の流れ、とくに水と土砂のながれを制御することによって、災害を防止したり、水利用を可能にした。しかし、ある地点における水と土砂の制御は、物質の流れを通して他の地点における生息場環境の改変をもたらし、ある種の生物はこうした生息場に適応できず、消失していくことになる。すなわち、生物種の更新立地を保全するためには、河川・砂防構造物が、図6の矢印で示した物質の流れのどこに問題を起こし、生物生息場環境が破壊されているのかを明らかにする必要がある。これによって、構造物の改良、撤去も含めた新たな計画を立案・実行できるものと考ええる。

ケショウヤナギは、信州上高地と北海道東部に隔離分布する種として有名であり、大礫で構成される広い谷底部に純林を形成する。また、河川が何本もの分派流路に分かれ、右へ左へ屈曲しながら流れる網状形態で、顕著にみられるという特徴をもつ。ヤナギ科木本は春の融雪時に種子を散布する。ケショウヤナギも同様で、北海道では6月から7月頃種子を散布し、融雪洪水によって形成された新しい裸地(砂礫堆)で発芽する。こうした河川にダム構造物を設置した場合、さまざまな問題が発生する可能性がある。一つには、貯水ダムが融雪出水そのものをなくしてしまうことによる砂礫裸地の減少、そして河川の水位低下に伴う立地の乾燥化である。さらに上流域から運搬される土砂のダム内への堆砂や、ダムの流量調節によって土砂の移動が抑えられるため、頻繁に変動する砂礫地を好むケショウヤナギには適さない。このように、ダムの設置は水文や地形・土壤環境を改変し、ケショウヤナギの更新立地を失わせる可能性がある(中村 1999a)。

土地利用や河川構造物が水辺の生物群集に与える影響を、定量的に評価することはきわめて難しい。水辺域に生息する生物の生活史を明らかにし、物質の流れを正確に把握し、必要とされる生息場環境の変化を予測することは、現状では不可能に近い。したがって、決定論的管理方法によって水辺域の保全を考えることには限界がある。今後は仮説提示型の実験的管理を実施し、モニタリングによる検証を繰り返しながら、よ

り良い管理をめざしていく以外方法はないと思われる。米国では、こうした管理方法を称して Adaptive Management (順応的管理)と呼んでおり、すでにグレンキャニオンダム的人工放流やコロンビア川流域計画などに反映されている。

Adaptive Management のもっとも大きな特徴は、科学的結果と管理方法の間に直接的なフィードバック機能が存在していること、さらに管理を実験として位置づけていることだと思われる。これまでの伝統的な管理方法が、実施されている政策は正しいと仮定してきたのに対し、Adaptive Management では不確定性を前提として、管理を"実験"として位置づけることによって政策の検証を行うことになる。こうした新たな管理指針が支持を得るためには、計画立案から決定、さらに仮説の検証に至るすべての過程が情報公開される必要があり、管理指針そのものが地域住民との合意のうえで決定されなければならない。新たな河川法の理念を地域において実現するためには、決定論的管理から順応的管理への脱皮が必要である。

引用文献

- 阿部俊夫・中村太士 (1999) 倒流木の除去が河川地形および魚類生息場所におよぼす影響. 応用生態工学 2(2): 179-190.
- Bormann, F.H., Likens, G.E., Siccama, T.G., Pierce, R.S. and Eaton, J.S. (1974) The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hubbard Brook. Ecol. Monogr. 44: 255-277.
- Cederholm, C.J., Houston, D.B., Cole, D.L. and Scarlett, W.J. (1989) Fate of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) carcasses in spawning streams. Can. J. Fish. Aqua. Sci. 46: 1347-1355.
- Com, P.S. and Buryu, R.B. (1989) Logging in Western Oregon: Responses of Headwater Habitats and Stream Amphibians. Forest Ecology and Management 29: 39-57.
- Fausch, K.D. and Northcote, T.G. (1992) Large woody debris and salmonid habitat in a small coastal British Columbia stream: Can. J. For. Res. 49, 682-693.
- Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, Jr. K., and Cummins, K.W. (1986) Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems: Advances in Ecological Research 15: 133-302.
- Inoue, M. and Nakano, S. (1998) Effects of woody debris on the habitat of juvenile masu salmon (*Oncorhynchus masou*) in northern Japanese streams. Freshwater Biology 40: 1-16.
- Jones, J.B. and Holmes, R.M. (1996) Surface-subsurface interactions in stream ecosystems. Tree, 11(6), 239-242.
- 岸千春・中村太士・井上幹生 (1999) 北海道南西部の小河川幌内川における落葉の収支及び滞留様式. 日本生態学会誌 49: 11-20.
- Lowrance, R. (1992) Groundwater Nitrate and Denitrification in a Coastal Plain Riparian Forest. Journal of Environmental Quality 21: 401-405.
- Moring, J.R. (1982) Decrease in stream gravel permeability after clear-cut logging: An indication of intragravel conditions for developing salmonid eggs and alevins. Hydrobiologia 88: 295-298.
- 室田武 (1995) 溯河性回遊魚による海の栄養分の陸上生態系への輸送—文献展望と環境政策上の合意—. 生物科学 47: 124-140.
- 長坂晶子ほか (2000) 河床の砂礫構成が底生動物の生息環境に及ぼす影響—森林および畑地河川の比較—. 応用生態工学 3(2): 243-254.
- 中村太士 (1995) 河畔域における森林と河川の相互作用. 日本生態学会誌 45: 295-300.
- 中村太士 (1999a) ダム構造物が水辺林の更新動態に与える影響. 応用生態工学 2: 125-139.

- 中村太士 (1999b) 流域一貫一森と川と人のつながりー. 築地書館.
- Nakamura, F. and Swanson, F.J. (1993) Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms* 18 : 43-61.
- Peterjohn, W.T. and Correll, D.L. (1984) Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. *Ecology* 65: 1466-1475.
- Riley, S.C. and Fausch, K.D. (1995) Trout population response to habitat enhancement in six northern Colorado streams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52: 34-53.
- Speaker, R.W., Moore, K. and Gregory, S.V. (1984) Analysis of the process of retention of organic matter in stream ecosystems. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 22: 1835-1841.
- 水源地森林機能研究会 (1999) 水源地森林機能に関する研究ー河畔林・溪流流出物質・水生動物との関連についてー. 161p.
- Stanford, F.J. and Ward, J.V. (1988) The hyporheic habitat of river ecosystem. *Nature*, 335, 64-66.
- Swanson, F.J., Fredriksen, R.L. and McCorison, F.M. (1982) Material transfer in a western Oregon forested watershed. 233-263. In: Edmonds, Robert L., ed. *Analysis of coniferous forest ecosystems in the western United States*. US/IBP Synthesis Series 14. Stroudsburg, PA: Hutchinson Ross Publishing Company.
- Triska, F.J., Kennedy, V.C., Avanzino, R.J., Zellweger, G.W. and Bencala, K.E. (1989) Retention and transport of nutrients in a third-order stream in northwestern California: Hyporheic processes. *Ecology* 70(6): 1893-1905.
- Urabe, H. and Nakano, S. (1998) Contribution of woody debris to trout habitat modification in small streams in secondary deciduous forest, northern Japan. *Ecol. Res.* 13: 335-345.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing, C.E. (1980) The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130-137.
- Vought, L.B.M. et al. (1994) Nutrient Retention in Riparian Ecotones. *Ambio* 23(6), 342-348.
- Yamada, H. and Nakamura, F. (2002) Effect of fine sediment deposition and channel works on periphyton biomass in the Makomanai River, northern Japan, *River Research and Applications* 18: 481-493