特集：ダム構造物の影響 Feature: influences of dam structure

総説 REVIEW

ダム構造物が水辺林の更新動態に与える影響

中村 太士

北海道大学大学院農学研究科森林管理保全学講座

〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

Futoshi NAKAMURA¹⁾: Influences of dam structure on dynamics of riparian forests. *Ecol. Civil Eng.* 2(2), 125-139, 1999.

1) Department of Forest Science, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Nishi 9, Kita 9, Kita-ku, Sapporo 060-8589, Japan

Abstract: Riparian forests play an important role in a river ecosystem. Dams for water regulation and erosion control substantially alter the regeneration habitats of riparian species, thereby affect their recruitment, composition and growth rate. This paper reviewed the effects of dams on riparian forest dynamics. The effects of dams can be seen in the regulation of water discharge, sediment transport and frequency of flood disturbances. For example, spring floods in snowy regions mobilize riverbed sediment and create the moist, alluvial substrate ideal for seed germination. These are essential habitats for the recruitment of *Populus* and *Salix* spp. In contrast, dams attenuate spring flooding and/or stabilize summer flows. This flow regime limits the development of sand bars and may induce drought stress for seedlings and old trees. The recent degradation of riverbeds, widely observed in Japan, is due to gravel mining, and sediment entrapment by reservoirs and erosion control dams. This situation provides stable habitats for riparian forests, resulting in expansion of woodlands. However, decreased flood frequency and magnitude along the downstream reach of dams may reduce densities of pioneer species and shift species distribution from pioneer to late successional trees. Seed dispersal by water which is especially important for maintaining species diversity in wetland forests may be affected by dam construction. The methodologies applied to previous studies on dam effects are based upon a paired-reach comparison (up- and downstream) and/or comparison among rivers with and without dams. Some studies only examine differences in species composition, but others analyze species distribution and population densities with hydrologic, geomorphic parameters. Pre- and post-regulation effects were examined by dendrochronological analysis of core samples taken from matured trees and interpretation of a series of air-photos. Simulations were also conducted based upon niche differentiation and forest succession models. In order to mitigate the effects of dams, I suggest that an adaptive management strategy, such as initiation of artificial floods, is required.

Key words: dam, riparian forest, regeneration, pioneer species, river regulation.

1999年3月30日受付, 1999年6月10日受理

1) e-mail: nakaf@for.agr.hokudai.ac.jp

はじめに

川の周辺に成立する溪畔林や河畔林, さらに湿地林が, 溪流および河川の生態系に与える影響が明らかになるにつれ (Swanson et al. 1982; 中村 1995; 中村 1998), 河川管理は河道のみならず, 河道周辺の水辺域も含めて議論されるようになってきた。本論では, 山地溪流に発達する溪畔林, 沖積扇状地や平野部に見られる河畔林, 自然堤防と後背湿地で特徴づけられる湿地林を, 総称して水辺林 (riparian forest) と呼び, 水辺林が成立する立地を水辺域 (riparian zone) と呼ぶ (Gregory et al. 1991; 溪畔林研究会 1997)。

1997年に改正された新河川法の目的にも, 「河川環境の保全と整備」が加えられ, 堤内地側ではあるが, 樹林帯の整備が唱われている。一方で, 日本の溪流・河川のほとんどは, 人間の土地利用とそれを可能にする保全施設によって改変され, 天然の発達した水辺林は全国でその姿を消している (崎尾・鈴木 1997)。そのためか, これまで水辺林の更新動態に関する研究はきわめて少なく, かろうじて残った天然林で実施されている。内容的にも, 植物社会学的研究が多く, 初期の研究では, 水辺構成樹種の分布と種組成が問題とされてきた (前田・吉岡 1952; Kikuchi 1968; 奥田 1978; 石川 1980, 1982; Ohno 1982)。その後, 1980年代になって森林の更新機構がギャップダイナミクスによって説明がなされるようになってくると (山本 1981), 水辺林の種組成や更新動態が, 溪流や河川による攪乱とその結果形成される立地環境の視点から議論されるようになってきた (新山 1987, 1989; 崎尾 1995; 金子 1995; 有賀ほか 1996; Nakamura et al. 1997)。

貯水ダム, 砂防ダムに代表されるダム構造物は, 河川流量の調節や流砂の捕捉によって, 水辺林の構造や種組成, さらに更新機構に大きな影響を与えると予想できるが, 残念ながら日本において実証的にこの影響を明らかにした研究はない。多くは, 水辺天然林の更新動態から推察した憶測である。日本において, 構造物のない溪流や河川がきわめて少ない現在, 水辺天然林として扱った対象地の多くも, 実は上流構造物の影響をすでに受けている可能性が高い。近年, 顕著に観察される, 砂礫移動が頻繁に起こる流路周辺域と高水敷化した氾濫原の分化は, 流域を通じてすでに発生している構造物の影響かもしれない (Nakamura & Kikuchi 1996, Nakamura et al. 1997, 李ほか 1998)。

日本における研究の遅れにくらべて, 海外では1970年

代からすでに論文が発表されており, 興味深い内容を指摘している。ここで紹介する影響評価の多くは欧米での研究成果であり, 日本での研究事例は予想される結果に対する補足的説明にとどまる。ダムに代表される人工構造物の影響評価を科学的に立証することは, それほど容易なことではない。とくに, 長期観測を必要とする森林への影響となると, 早急に結果を出すことは難しく, 構造物の影響のみを抽出する操作実験や対照区の設定が必要になる。また, 発芽, 実生, 稚幼樹, 林冠木などの発達段階に応じて, 洪水攪乱やダム構造物による影響も変わってくるであろう (伊藤・中村 1994)。さらに, 砂利採取, 護岸・築堤, 流域土地開発など, ダム以外の人為的要因も複雑に連関して水辺林に影響を与えており, ダムの影響のみを抽出することはきわめて難しい。こうした問題点をすべて解決するかたちで研究成果を出すことは, 現在のところ不可能に近いが, ささまざまな観点から実施された研究事例より全体像を類推することはできる。本論の目的はこの全体像を描くことにあり, 将来的にダム影響評価をすすめるための調査手法やモニタリング手法についても概説する。

ダム構造物による物理的立地環境の変化

ダム構造物と水辺林の更新動態を考えるうえで, 最も注目しなければならない直接的影響は, 物理的立地環境の変化である。もちろん, ダムによる水質の変化や生物的变化も水辺林に影響すると考えられるが, その多くは間接的・段階的であり, 複雑なプロセスを経て影響を与えるため, 現在の研究水準で検討することは難しい。そこで本論では物理的影響を中心に議論を進めることにする。

洪水調節や利水を目的としたダム構造物の多くは, 流量を調節する。このため, ダム建設前後で日単位および月単位の流量が大きく変化し, 洪水調節によって洪水時ピーク流量も大幅に減少する。1997年にダム運用を開始した北海道札内川ダムによって, 札内川の流況変動も大幅に変化している。北海道や東北地方では, 夏季の豪雨洪水以外に, 融雪に伴う洪水ピークが5月頃に顕著に現れるのが特徴である。ダムの運用から言えば, 融雪時期は非洪水期 (11月~6月) にあたり, 利水容量を確保するため, 融雪洪水のピークは大幅に軽減されることになる (Fig. 1)。また, ダムの流量調節によって洪水頻度は急激に減少し, これまでとは全く異なる流況が下流域に出現する。Fig. 2は札内川ダムの事例であるが, 生起確率

Fig. 1. Annual variations of water discharge before and after Satsunai Dam construction.

Fig. 2. Return periods of water discharge before and after Satsunai Dam construction.

分布はダム造成後、大幅に図の左側すなわち同じ生起確率でも少ない流量側にシフトすることがわかる。流量調節に伴う影響は、ダム下流ばかりに限ったことではない。ダムのゲート操作に伴う湛水域の水位変動は、ダム湖周辺に生育する植物群落に大きな影響を与えていると考え

られる。非洪水期には貯水池水位が高く、湛水によるストレスが加えられるのに対し、洪水期にあたる夏季には貯水池水位が低く抑えられるため、乾燥によるストレスが加えられることになる。

貯水ダムには水ばかりではなく、上流集水域からの流砂も堆積する。このダム堆砂問題は、ダムの容量を減少させるばかりか、下流への土砂供給を激減させ、下流河床の低下および河床材料の粗粒化 (armoring) をもたらす。溪流に連続して配置される砂防ダム群では、掃流力低下に伴うダム堆砂面での河床材料の細粒化と、水たたき下流における粗粒化が交互に発現する。流砂の減少は、下流河床における砂礫堆の形成や河川地形そのものを変化させる。一般的に、側方方向の流路変動は抑制され、砂礫堆の発達と形成は抑えられる。縦浸食に伴う河床低下が卓越し、流路は単一流路となって流下する。こうした河床材料や河川地形の変化は、水辺林が成立する基質や成立面の高さに影響を与えるばかりでなく、洪水流量の調節と関連して、洪水攪乱の頻度や強度、および立地面の水分条件を大幅に改変する。

水辺林の更新動態に与える影響

水辺林の種組成や構造、更新機構に与えるダムの影響について、上に述べた物理的立地環境の変化にしたがい、議論することにする。整理する立地環境は、①水分条件および更新立地の拡大に影響を与える水位・流量変動、②更新立地の基質条件や立地面の高さに影響を与える流砂量および地形変化、③流量および流砂量変化による攪乱の頻度・強度の変化である。さらに、ダム構造物の影響として流下する種子の拡散阻害が考えられ、この問題についても言及する。当然のことながら、①～③の顕著な変化はダム下流の一定区間にとどまり、流域面積の拡大や支流の流入により小さくなると考えられる。

流量変動

ダムによる春季の融雪洪水の減少が、ヤナギ科植物、とくにヤマナラシ属 (*Populus*: 以下‘ポプラ’と記載する) に与える影響について初期に指摘したのは、Johnson et al. (1976) である。彼らは、米国 Missouri 川氾濫原で河畔林を構成する高木種について、成立面土壌の粒度組成、有効水分量、栄養塩量等の詳細な調査を実施し、時間を傾度とした遷移分析によって立地環境と優占種の変化を論じている。この際、調査区間の最上流に位置する Garrison ダム (貯水ダム) の影響を、稚幼樹の密度および年輪解析からも推測している。これによると、春

先の融雪洪水は、ポプラ (*Populus deltoides*) の種子が発芽し十分な水分を補給するために必要な根の発達を促すことからきわめて重要であり、ダムによる融雪洪水の消失は、稚幼樹の死亡率を高めていると考えられる。

Reily & Johnson (1982) は同じく Missouri 川で林冠木の年輪解析を実施し、Garrison ダムを建設する以前、ポプラ (*Populus deltoides*) の年輪幅は春季の流量および降水量に影響を受けているのに対して、ダム建設後、蒸発散量および気温に影響を受けることを明らかにしている。また、ダム建設以前は、融雪期である6月洪水の水位が成長量を落とす方向で作用するのに対し、建設後は6月洪水水位が成長量を上げる方向で作用することを報告している。これは、ダム建設以前の融雪洪水流量が、建設以後とくらべて2倍から4倍高い値であることを考慮すると、ダム建設以後、ポプラ成立面の乾燥化が進んでおり、成長期に高い洪水水位を必要としていることがうかがえる。

春の融雪洪水の必要性は、この他にもポプラに関する多くの研究事例によって指摘されており (Fenner et al. 1985; Rood & Mahoney 1990; Nilsson et al. 1991), 融雪洪水の発生時期と種子の散布時期との関係が重要になってくる。Niiyama (1990) および長坂 (1996) は、日本、特に北海道における融雪洪水の時期とヤナギ科植物

の種子散布時期を議論している (Fig. 3)。これによると、融雪出水の減水期である5月から6月にかけて様々なヤナギ属の種子が散布されており、散布時期も種により微妙にずれている。最も早く種子を散布する種はエゾヤナギ (*Salix rorida*) で、5月中旬から種子散布を開始するのに対し、遅いのはタチヤナギ (*Salix subfragilis*) で6月から7月上旬まで散布する。属による散布時期の差は比較的是っきりしており、ケショウヤナギ (*Chosenia arbutifolia*) やドロヤナギ (*Populus maximowiczii*) はヤナギ属にくらべて遅く、6月下旬から7月上旬、オオバヤナギ (*Toisusu urbaniana*) はさらに遅く、8月から9月である。

ヤナギ属は、5月から6月にかけての融雪出水の減水期に種子を散布しており、出水によって形成された裸地にいち早く侵入することができるが、その反面、Fig. 3にみられるような小規模な出水ピークによって冠水や流出の被害を受けやすい。一方、ケショウヤナギやドロヤナギ、オオバヤナギなどの散布時期の遅い種は、水位がほぼ低水位に収まった7月以降に侵入することから、他のヤナギ属にすでに侵入されている不利な立地か、もしくは流水近くの裸地、融雪後期にまれに発生する大規模出水によってつくられる攪乱裸地などに侵入する。実際、北海道の扇状地河畔林において、流水近くに成立する種

Fig. 3. Variation of water level and seed dispersal periods of salicaceous species in Hokkaido. The water level was measured at the Bannosawa gauging station in Bibai River, one of the tributary of Ishikari River in 1993 (Civil Engineering Division of Hokkaido Prefectural Government (1993)). Original data on seed dispersal periods are from Niiyama (1990) and Nagasaka (1996). They monitored seed dispersal periods at tributaries of Ishikari River.

は、この3種とケヤマハンノキ (*Alnus hirsuta*) である (新山 1989; Nakamura et al. 1997). 仮にこうした融雪出水が貯水ダムによる流量調節によって抑えられ、5月から6月にかけての砂礫堆の形成と水分の供給が失われた場合、種子が発芽定着できる更新立地は激減し、ヤナギ科植物が水辺域から姿を消すことは容易に想像できる。

ダム建設に伴う融雪期もしくは成長期を通じての水位低下は、先駆性の広葉樹のみならず他の樹種にも大きな影響を与える。乾燥による成長の低下は、高い氾濫原堆積面に成立する樹種で顕著に認められ、Reily & Johnson (1982) は、年輪解析の結果、高い段丘面に成立するニレ属 (*Ulmus americana*)、トネリコ属 (*Fraxinus pennsylvanica*)、カエデ属 (*Acer negundo*)、コナラ属 (*Quercus macrocarpa*) で、ダム建設後成長量が有意に低下していることを明らかにしている。また Bravard et al. (1986) は、フランスローヌ川の水力発電ダムによる水位低下について検討し、ヤナギ属 (*Salix alba*) やポプラ (*Populus nigra*) が減少し、ほぼ上記と同様な遷移後期樹種に遷移していることを指摘している。また、Harris et al. (1987) は、ダム上流と下流の植生の比較から、ハンノキ属 (*Alnus tenuifolia*) がダム下流域で有意に減少しており、その原因が水位低下による乾燥枯死であると推測している。

ポプラは、地下水面あるいはその直上の部分から水を吸う根を地中深く持っており (phreatophytes)、河川水位がポプラの利用できる水分量を左右する。Fenner et al. (1985) によると、アリゾナのポプラ (*Populus fremontii*) は、水位の低下にしたがって、日平均6 mm 根を伸長させることがわかっている。また、夏季までに70-160 cm の深さにある地下水位にも、根を伸長させることができるとも言われている (Johnson 1994)。したがって、もし根の伸長速度より河川水位が急激に下がれば、稚樹は地下水位による水分補給をたたれ、枯死することになる (Rood & Mahoney 1990)。Rood & Heinze-Milne (1989) は、カナダアルバータ州の灌漑用貯水ダムの上流と下流、およびダムのない河川でポプラ林の消長を空中写真判読によって調査し、ダムによるポプラ林の減少を明らかにしている。しかし、このダムは融雪出水を抑える効果は少ないことから、ポプラ林の衰退は灌漑利用による夏季水位の低下と、これにともなう稚樹の乾燥枯死が原因であるとしている。

貯水ダムによる影響は、ダム下流域のみならず上流域である湛水域にもおよぶ。一般的には、ダム下流域では

洪水水位が下がるのに対して、ダム湛水域では高い洪水水位が頻繁に発生する。Franz & Bazzaz (1977) は、水位傾度に沿った水辺植生の分布を検討し、3つの水位調節パターンを実施した場合、水辺植生がいかに変化するかをモデルによって検討している。その結果、いわゆる水辺に生育する種であるアメリカニレ (*Ulmus americana*) が分布域を拡大し、斜面に生育する種であるカリア属の *Carya ovata* が分布域を縮小することを予測している。Nilsson & Keddy (1988) は、スウェーデンのダム湛水域で調査を実施し、ダム湖水位変動に伴う植物群落の応答を議論している。種数は湛水期間によって最もよく説明され、種数と被度を高く保つためには、湛水期間を40-60日以下にとどめることが重要であると指摘している。

貯水ダムが水辺の植物群落に与える影響について、2流域の比較から総合的に検討した Nilsson et al. (1991) は、種数および被度がいずれもダム河川において低い結果を報告している。また、こうした組成変化は、ダム建設後、短期間に発生することを建設経過年数との関連で述べている。水辺林の種数については、年平均流量およびダム建設以前の植生の存否が影響し、被度については、年平均流量および基質 (河床材料) によって説明できることを示している。同様に Nilsson et al. (1997) は、ダムによる水位変動が植物群落に与える長期的影響に対して、完成後1-70年経過した計88のダムから考察している。その結果、水位調節後、貯水ダムでは自然の河川にくらべて種数と被度が減少し、貧弱な植生が維持されることを明らかにしている。

先に述べたように、ダム建設後、ポプラなどの先駆性広葉樹の消失が報告される一方、氾濫原内の裸地が減少し、樹林化が進んでいるという報告も多い。Harris et al. (1987) は、ダム建設後、水辺林の樹冠被度の拡大する河川の存在を指摘しており、その原因を洪水のピーク流量減少に伴う洗掘範囲の減少に求めている。Johnson (1994) は、1900年以降始まった樹林帯の拡大について調査し、最も樹林化の進んでいる地域では、年間10%の割合で砂州が縮小し、下流方向に樹林化が拡大していることを報告している。こうした樹林化の原因としては、ダム貯水および灌漑用の水利用に伴う6月の流量減少があげられ、これによる水位低下が、本来ならば冠水する砂州部分に木本の侵入を促進していると考えられている。現在、こうした砂州部分にはヤナギ科植物が定着しているが、安定化とともに遷移後期樹種によって占められると予想される。樹林化傾向は、近年日本でも報告される

ようになってきたが、その多くが砂州の安定や微細砂の堆積との関連で報告されているため、次節で述べることにする。

流砂量および地形変化

ダムによる影響として、流量調節とともに多くの先行研究によって指摘されているのが流砂量の減少である。流砂量の減少は、対象とするダムの規模や構造によって変化すると考えられるが、一般的には排砂ゲートを持たない貯水ダムでは掃流砂全体と浮遊砂の一部が捕捉されると考えられる。また、貯水ダムに捕捉される浮遊砂量は、ダム容量とダムサイトの流域面積によって決定されると考えられている (Brune 1953)。一方、土砂流出の制御を目的とした砂防ダムは、掃流砂を貯砂する機能を発揮するが、満砂したダムがもつ下流への影響は、量よりも質、すなわち砂礫粒径の調節が主である。

融雪洪水とともに運ばれる砂礫やシルト分は、先駆性の広葉樹にとって必要な発芽床を提供する (Johnson et al. 1976)。このため、ダム構造物によってこうした砂礫の供給が途絶えると、水分および栄養条件のよい立地は形成されなくなり、ポプラなどの種は消失する (Fenner et al. 1985; Rood & Heinze-Milne 1989)。一般的に河畔林の樹齢は、成立面が高くなるにしたがって古くなる傾向にあり (Nakamura 1986)、蛇行帯では屈曲部の内側で順次寄州 (point bar) が形成されるため、流路から離れるにしたがって、形成年代の古い発達した群落が形成されることになる (Fig. 4)。このように、先駆性の広葉樹にとって、流送砂礫による寄州の発達と古い堆積面への土砂再堆積は、更新裸地および水分・栄養補給の観点からもきわめて重要であり、この発達を抑えることは更新立地の消失を意味する (Johnson et al. 1976; Bradley & Smith 1986)。

ダムによる砂礫供給の減少、および流量の減少は、ダム下流における流路変動を抑える方向に働く。Scott et al. (1996) は、地形学的な視点から Missouri 川のヤナギ科植物について考察している。大洪水後、植生侵入によって流路幅が縮小する過程では、兩岸の放置された裸地部分にヤナギ科植物が侵入し、数年つづく小流量期に定着する。河川が蛇行を発達させる場所では、中程度もしくは高い流量期後に形成された寄州が更新立地となり、洪水後には洪水段丘面が更新立地となる。したがって、蛇行 (meandering) 区間におけるダムによる流量減少は寄州更新立地を少なくさせ、網状 (braided) 区間におけ

るピーク流量の減少は、流路幅減少に伴い一時的に更新立地を提供するがその後の更新は進まない状況を生むとしている。同様な内容は Johnson (1994) も指摘しており、ポプラやヤナギの仲間の分布拡大は、蛇行区間では洪水ピーク流量が重要であるのに対して、網状流路区間ではむしろ低水位の期間によって左右されると述べている。

日本では、ダム下流の河床材料の粗粒化、および河床低下がよく問題にされる。下流で広範囲に発生する河床低下の原因は、ダム構造物よりむしろ砂利採取が主因であるケースも少なくないが、流域に配置された砂防ダムおよび貯水ダムが、何らかの形で影響を及ぼしていることも事実であろう。現在、日本の扇状地河川の多くは、上流域のこうした土砂の利用および制御によって、河床が低下する問題が発生しており、小河川では河床材料が粗粒化するばかりか河床に基岩が露出している箇所も少なくない。太田ほか (1996) および鎌田ほか (1997a, 1997b) は、吉野川本流でアカメヤナギ (*Salix chaenomeloides*) に代表されるヤナギ属を中心とした樹林の拡大について、空中写真判読よりその経年変化を把握した。その結果、砂州の安定化と樹林化が明らかになり、砂利採取、貯水・砂防ダムによる供給土砂量の減少、さらには貯水ダムによる流況の安定が木本の定着・成長に貢献していると結論している。

河床が低下する一方、河川の濁り問題に象徴されるように、微細砂の生産は増加する傾向にある。微細砂の生産源は、人間の土地利用である場合が多く、森林伐採 (江頭・芦田 1981; Brown 1985) や道路開設 (Reid & Dunne 1984; Kurashige 1993)、農地浸食 (USDA 1978; 長沢ほか 1987) などさまざまである。多くの貯水ダムは、ウォッシュ・ロードに代表される微細浮遊砂成分は通過させ、掃流砂および粗粒浮遊砂は捕捉する。結果的に、下流河床は低下し、氾濫原は段丘化し、ダムを通過して運搬される微細砂は、段丘化した氾濫原面に越流堆積することになる。こうした河床低下および高水敷への微細土砂の堆積と樹林化問題は、多摩川において李ほか (1998) によって詳しく調べられている。これによると、樹林化は 1981-1983 年洪水以降、急速に進行しており、その原因は 1981-1983 年洪水による微細土砂の高水敷堆積とこれに伴う立地条件の変化であると結論している。特に、ニセアカシア (*Robinia pseudoacacia*) とオギ (*Miscanthus sacchariflorus*) の繁茂が顕著であり、こうした種類の分布は、微細砂堆積の箇所と一致している。

北米原産のニセアカシアが、河川沿いに繁茂する事例

Fig. 4. Development of riparian forests in a meandering channel named Ebi-shiomappu Stream. (A) Distribution of tree crowns and meandering channel. 1, riffle; 2, flat riffle; 3, pool; 4, bar; 5, bank; 6, stream direction; 7, leaning tree (cover); 8, belt-transect and tree crown; 9, large diametric tree; 10, medium diametric tree; 11, small diametric tree. (B) Belt-transect line b-b'. top, cross-sectional feature; middle, coverage rate of under-story vegetation. *Sasa* sp. (solid) and grasses (dashed); bottom, projection of tree crowns (Okamura & Nakamura 1989).

は、全国各地で発生しており（前河・中越 1996; Maekawa & Nakagoshi 1997），もともとは砂防植栽もしくは街路樹等に利用されたものが水辺へ分布域を拡大していると考えられる。ニセアカシヤは、旺盛に根萌芽更新を

行う。すなわち，種子が砂礫堆などの河川裸地に侵入したのち，根萌芽によって分布域を拡大する繁殖戦略をとっていると推定される。ダムによる河床および水位低下は，ヤナギ属よりも乾燥した立地環境を好むニセアカシ

アに有利に働く。また、掃流砂量の減少に起因した低水流路の河床低下とそれに伴う砂礫堆の高水敷化は、高い堆積面における氾濫時の浮遊砂堆積を助長する。吉野川で砂州の発達とヤナギ群落の成立を研究した Kamada & Okabe (1998) は、アカメヤナギを中心にしたヤナギ群落が生域に定着すると、流砂が捕捉され、さらなる河床上昇を促すことを指摘している。結果的に、ヤナギ群落による流砂の捕捉がニセアカシアなどの他樹種の更新立地を提供している可能性も考えられる。根萌芽によって繁殖するニセアカシアにとって、根茎を伸長しやすい微細砂層の発達は重要である。同様な事例は、ササ (*Sasa* spp.) の分布域拡大についても述べられており (Nakamura et al. 1997; Yajima et al. 1998)、地下茎で繁殖するササにとっては、地下茎を伸ばしやすい砂層の存在が重要になっている。結局、砂利採取やダム構造物の建設に伴う河床の段丘化は、微細土砂の高水敷堆積も助長し、水位低下が加わることで、ニセアカシアの繁殖にとって好適な立地環境を形成したと考えられる。

河床低下および砂やシルト分の再堆積は、地形面の安定化および有効水分量や栄養塩の増加を促すと考えられる (Johnson et al. 1976; 中村 1996)。結果的に、不安定で土砂移動の激しい立地に生育できるヤナギやポプラなどの先駆性の広葉樹は後退し、遷移後期樹種への遷移が進むと考えられる (Johnson 1994; Nakamura et al. 1997)。したがって、樹林化に伴い水辺林を構成する樹種は大きく変化し、最終的には谷壁斜面にも見られる森林が成立することになる。

砂防ダム工事が水辺林に与える影響については、崎尾・鈴木 (1997) に詳しい。ここでは、砂礫移動の抑制といったダムが引き起こす現象論的側面について述べることにする。砂防ダムが砂礫の運搬を制御し、樹林化をすすめることはよく知られている。こうした状況は連続して配置する床固め工群で顕著で (Fig. 5)、砂礫の移動が抑制されるにしたがい、木本は順次侵入する。砂防ダムが設置される山地渓流域では、ケショウヤナギ (*Chosenia arbutifolia*) やシオジ (*Fraxinus platypoda*)、サワグルミ (*Pterocarya rhoifolia*) など、山地溪畔林を代表する樹種が多数あり、これらの種は更新立地として砂礫の移動が頻繁に発生する場所を好むことがわかっている。ケショウヤナギは、北海道のいくつかの河川と上高地の梓川流域にのみ隔離分布する種であり (館脇 1948; 木村 1951)、網状流が発達し、砂礫の移動が激しい広い谷底部を好む (進ほか 1999)。このため、床固め工や帯工等による砂礫移動の抑止や流路の固定は、ケショウヤナギの

更新立地を減らし、現存するケショウヤナギ林の遷移とともに衰退する可能性が示唆されている (岩田 1992)。また、シオジやサワグルミは斜面崩壊や土石流段丘上に成立することが知られており (佐藤 1995; Sakio 1997)、砂防ダムによる地表変動攪乱の抑制は、これら溪畔林構成種の更新立地を減少させることが予想される。

貯水ダムおよび砂防ダムによる流送土砂の粒径変化は、微細砂堆積に伴う樹林化問題でも述べたように、水辺林の種組成を変化させる可能性を持っている。水辺林特に河畔林の種組成を基質 (substrate) によって説明した研究は多い (Johnson et al. 1976; Hupp & Osterkamp 1985; 新山 1987, 1989; 石川 1988; 有賀ほか 1996; Yajima et al. 1998)。また Nilsson et al. (1991) は、水辺植生の種数と基質の種類に、正の相関関係を見いだしている。これらの研究から明らかなことは、水辺林を構成する樹種はそれぞれ特定の基質条件を好み、分布域を確保しているということである。このことはすなわち、ダムによる基質の変化および単純化は、基質条件の不均質性 (habitat heterogeneity) を劣化させ、これによって保たれていた水辺林の種多様性を低下させることを意味する (Nilsson et al. 1991)。

攪乱の頻度と強度の変化

ダムによる流量および流砂量調節の影響は、それぞれ別々に水辺林の更新動態に影響することは少なく、両者は複合的に影響を与える。その複合的影響の一つが攪乱頻度と強度の減少である。洪水攪乱の頻度と強度が、水辺の植生に与える影響について検討した既存の研究は少なくない (Lindsey et al. 1961; Sigafos 1961; Teversham & Slaymaker 1976; Bell & del Moral 1977; Bell 1980; Hupp & Osterkamp 1996)。これらの研究のほとんどは、洪水攪乱の頻度や強度が最低河床位からの高さ (elevation: 以下、'比高' と呼ぶ) に関連することから、比高を環境傾度として分析されることが多い。なかでも、Bell & del Moral (1977) と Bell (1980) は、水辺林を構成する種の分布が、洪水頻度に対応する比高傾度によってほぼ説明できることを示し、種数や種多様度が洪水攪乱の頻度が少なくなればなるほど、すなわち比高が高くなればなるほど増加し、洪水攪乱の可能性がきわめて少ないまたは全くない場所では、頭打ちかやや低下する傾向を見いだしている。高い堆積面に成立する水辺林は樹齢が古く発達しており、林齢 (stand age) と種数および種多様度を検討した Johnson et al. (1976) および

Fig. 5. Forest establishment after the construction of check dams (erosion control) in Tarumae Creek. Alphabet "D"s in 1985 indicate the locations of check dams. They were built between 1969–1985.

Nakamura et al. (1997) でも同様の結果が得られている。

北海道，東北地方に広く分布するヤナギ科植物の流域レベルの種分布は，山地，扇状地，沖積低地といった河川縦断形に規制されている（新山 1995）。しかし，水辺林の種多様性をもう少し小さい空間スケール（km オーダー）でとらえると，ケヤマハンノキ，オオバヤナギ，ドロヤナギなどの河畔に特徴的にみられる先駆性広葉樹は，比高傾度で代表される洪水攪乱の頻度によって分布域を微妙に分けている（Fig. 6）。屈曲部内側もしくは旧流路跡地など比高 1.0 m 以下のもっとも低い堆積面にはケヤマハンノキが成立し，流路近くではあるが 1.0 m 程度の比高を有する場所にオオバヤナギ，さらに 2.0 m 程度の高い堆積面にはドロヤナギが優占する。また，これより高い堆積面では針葉樹も増加する傾向にある。

以上の研究結果より，ダムによる流量および流砂の調

節の結果，これまで存在していた攪乱様式（disturbance regime）が変化し，比高傾度に沿った水辺林の種分布が少なからず影響を受けることは容易に想像できる。攪乱が抑えられ，現在の河川横断形が変化せずに保たれたとしても，ダムによる流量調節によってその立地面の攪乱頻度や強度，さらに土性は大幅に変化する。Fig. 2 から明らかなように，札内川ダム建設前毎年発生していた規模の洪水攪乱は，ダム建設後 5 年に 1 度程度に抑えられることになる（帯広開発建設部札内川ダム建設事務所 1998）。さらに，札内川ダムの最大放流量は $150 \text{ m}^3/\text{sec}$ にすぎず，ダム建設前 2 年に 1 度程度発生していた規模の洪水攪乱は，今後発生しなくなると考えられる。Bell (1980) の研究から明らかなように，洪水攪乱頻度の減少は，種の交代を意味する。結局，ヤナギ科植物に代表される水際の不安定な場所に生育できる種は更新できず後退し，徐々に遷移後期樹種に優占されるようになると

Fig. 6. Changes in relative dominance across the elevation gradient. Species abbreviations: Ah, *Alnus hirsuta*; Pm, *Populus maximowiczii*; Tu, *Toisusu urbaniana*. Conifers are *Picea jezoensis* and *Abies sachalinensis* (Nakamura et al. 1997).

予測できる。

近年、日本の河川でも樹齢や種構成が二極分化しているという報告がある(有賀ほか 1996, Nakamura et al. 1997)。こうした事例は古くは米国 Missouri 川で調査した Johnson et al. (1976) でも報告され、その原因に (1) サンプル数の問題、(2) 水辺林の特徴、(3) 人為的影響の 3 つをあげている。Nakamura et al. (1997) が報告した二極分化の内容は、オオバヤナギ、ドロヤナギ、ケヤマハンノキに代表される水際の先駆性広葉樹林が、樹齢 (stand age) 80 年を越える林分ではほとんど認められず、相対優占度でみても 0-50% 程度を占める林分が存在しないことである。すなわち 80 年程度までこれら 3 種が 60% 以上の高い割合で優占するが、それを越えるとヤチダモ (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*) やハルニレ (*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、針葉樹などの遷移後期樹種にほとんど占められてしまうのである。こうした原因は、氾濫原経年変化の地形解析を実施した Nakamura & Kikuchi (1996) から明らかなように、浸食特性からも説明ができる。すなわち、低い堆積面は毎年繰り返す強度の攪乱を受けるが、古い堆積面は最低

河床から高い面を形成し、地形的にも洪水による浸食を受けづらい場所に位置する。このため、耐浸食性は年代とともに高くなり安定性を増すのである。両者の違いは時間が経過するほど大きくなると考えられ、河畔域は先駆性広葉樹の優占する高頻度攪乱域と低頻度攪乱域に分化してゆくと考えられる(中村 1998)。しかし、先に述べたニセアカシア林の拡大や河床低下、洪水攪乱頻度の低下を考えると、ダムをはじめとした人為的影響の可能性も否定できない。現在、日本の河川に特徴的に見られる水際の先駆性広葉樹林は、流況変動の結果、わずかながらに残された高頻度攪乱域でかろうじて生残している林分と解釈した方が妥当かもしれない。

流水による種子散布

流水による種子散布 (hydrochory) について、日本での研究事例は少ない。このため、流水散布に与えるダムの影響まで調査した事例は、日本にはない。ヒルギ科 (*Rhizophoraceae*) に代表されるマングローブ林の胎生芽が、流水や潮の流れに運ばれて散布されることや、ミ

ソハギ (*Lythrum anceps*) のように流水に浮かんで運ばれるものがあることは知られている。しかし、河畔林や河畔林を構成する樹種の更新を考える上での流水による種子散布の可能性については、実証的に調査研究した事例はないと思われる。砂州の水際線に多くのヤナギ類の種子が散布されていたり、水際が徐々に低下するにしたがって実生が水際線を描きながら発生している様子を観察することは多い。このことから、流水による種子散布があることはまちがいないが、風散布 (anemochory) とくらべるとあまり重要な散布形態ではないと考えられている。ただし、先にも紹介した外来種であるニセアカシアについては、その繁殖戦略として流水散布を利用している可能性の高いことは指摘されている (前河・中越 1996)。

海外でも流水による散布を議論した論文はそれほど多くはなく、やはり湿地帯の河川が主である。Schneider & Sharitz (1988) は、流水による種子散布の重要性をアメリカ Savannah 川で調査し、*Taxodium distichum* および *Nyssa aquatica* は、晩秋に発生する洪水によって種子が運搬され、分布域を拡大していることを明らかにしている。Skoglund (1990) は、風による地表面への落下種子、流水内を流れる種子、冬季の雪上への落下種子を調査し、スゲ属 (*Carex*) の種子が流水中に多く含まれる他、23 種の種子を確認したことを報告している。また、この中には周辺には存在しない種の種子も含まれており、洪水による種子散布の重要性を指摘している。

ダムがこうした流水による種子散布に少なからず影響を与えることは容易に想像できるが、その点を実証した研究は海外でも見あたらない。また、水辺林を構成する種の繁殖戦略として、どの程度流水散布が重要なかが明かでない現在、その影響論は限定的にならざるを得ない。Hughes & Cass (1997) は、埋土種子、氾濫水による流送種子、落下種子を調査し、現在成立している植物相がこれら種子の組成とは異なることを示し、洪水攪乱による種子の二次散布が水辺林の組成を決める重要な要因であると述べている。彼らは氾濫水による流送種子 40 種のうち 26 種は周辺に存在しない種であることから、ダムによる洪水制御の影響は流水による種子の二次散布、そして湿地林の種多様性に少なからず影響を与えることを示唆している。

研究方法の特徴と将来予測の可能性

ダム構造物が水辺林に与える影響についての研究の多

くは、ダムの上下流間比較 (Bradley & Smith 1986; Harris et al. 1987) もしくはダムの存否による流域間比較 (Nilsson et al. 1991)、および両比較の併用 (Rood & Heinze-Milne 1989) によっている。もちろん、これ以外の研究調査方法も多々実施されているが、対照区を設定できない研究の多くは、ダムの影響を直接的に評価することができない。

比較内容は、単純に種組成のみを比較したもの (Harris et al. 1987)、水文条件と分布範囲、樹木密度等を比較したもの (Bradley & Smith 1986; Rood & Heinze-Milne 1989)、水文条件のみならず更に細かく地形や基質等の環境変量を測定して、ダムが植物の組成に与える影響を議論したもの (Nilsson et al. 1991) に分けることができる。水辺林の更新動態に与えるダムの影響は、前章で述べたように、水文、地形、土壌条件などさまざまな要因に及ぶ。したがって、ダムの影響を評価したり、その影響を緩和する手段を議論するためには、ダムがこれら環境変量の何に影響を与えているのかを明らかにしなければならない。その意味では、やはり環境変量と水辺林の構造および組成を結びつけて解析することが望ましい。

ダムの影響は時間とともに変化すると考えられる。時間変化の評価手法の一つは、年輪年代学 (dendrochronology) であろう。年輪年代学は、一般的には抽出された木材片の年代を決定する方法として使われるが (Schweingruber 1988)、その他にも年輪幅の変化が何の環境変量 (気候、水文、地形など) によって制御されているかを知ることでもできる。Reily & Johnson (1982) は、ダム建設以前と以後に分けて年輪解析を実施し、異なる水文条件もしくは気候要因が年輪幅に影響していることを明らかにしている。また、ダムの影響のない支流と年輪幅の変化を比較し、ダム造成による成長量の低下を明らかにしている。こうした手法は、成熟林への影響および過去のデータが存在しない地域での長期的影響を知るうえで非常に有効であり、今後の発展が望まれる。Bradley & Smith (1986) は、年輪幅の変化等を解析してはいないが、ポプラ林の成立年代を年輪から推定し、ダム建設前後における樹木密度の変化を議論している。

時間的変化を知るもう一つの調査方法は、空中写真の利用である。大面積では衛星画像も有効になろう。空中写真判読により水辺林の拡大を議論した研究は多く、ダムの影響を論ずる場合、ダム建設時の前後で比較している (Bravard et al. 1986; Rood & Heinze-Milne 1989; Johnson 1994)。空中写真による水辺林の経年変化は日本

でも試みられており、ダムの影響が指摘されている（太田ほか 1996；鎌田ほか 1997a, 1997b）。

さらに、もう一つの方法は、築堤年代の異なる多数のダムを調査し、その影響を評価する方法である。さまざまな自然条件による種組成への影響を考慮しなければならず、ダムによる影響のみを抽出するのは難しいが、ダムによって影響を受けていない区域の水辺林と比較することにより、その差が経年的にどのように変化するかを検討することは可能である（Nilsson et al. 1997）。

ダムによる影響をモデルによって評価することも考えられる。モデル解析は、過去の影響評価の検証のみならず、将来の予測も可能にする点が注目される。モデル解析の方法は、たとえば高度を環境傾度とした植物種のニッチの違いから、ダムによる水位変動操作の影響を考察し、さらに種の分布域変化を予測する方法が試みられている（Franz & Bazzaz 1977）。さらには水辺域を遷移段階の異なるゾーンに区分し、ある時点における個々のゾーンの面積を、遷移によって変化する面積と洗掘によって失われる面積の差として表す方法も実施されている（Johnson 1992）。ここでは、各ゾーンの浸食率の算定が難しく、これによってモデルによる予測値は大きく変化する。今後、応用生態工学的視点からは、ダムによる立地環境の変化予測を、水文、水理、地形変化モデルによって精度良く再現し、多変量軸による植物種の傾度分析を実施することが有効であると考えられる。

おわりに

近年、順応的管理（adaptive management）の必要性が指摘されるようになってきた（鷲谷・松田 1998）。順応的管理とは、予測できない生態系の応答を前提とした管理手法と言え（中村 1998）、Walters (1986) は「これまでの一般的な生態学的理論の基礎的研究や発展をとおして学ぶよりむしろ、管理経験をとおして収穫を維持できる自然個体数について学ぶこと」と定義している。多分、順応的管理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であり、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。

グレン・キャニオンダムの下流につづくコロラド川グランドキャニオンは、1963年にグレン・キャニオンダムが水門を閉めて以降、さまざまな環境問題に直面することになる。ダム建設以前、コロラド川グランドキャニオンでは、6月の融雪出水によって大量の土砂や巨礫が運

搬され、多くの河岸の植物ははぎとられ、砂州が形成されていた。しかし、ダム建設以降、自然の大きな季節的流況変動は完全におさえられ、かわって電力消費に伴う細かな日変動が顕著に認められるようになっていく。また、上流から流送される土砂は、グレン・キャニオンダムですべて捕捉され、下流には供給されなくなっている。安定した流況で固定された砂州には、徐々に外来のギョリュウ属（*Tamarix*）低木種が侵入し、砂地は縮小した。こうした植生の変化は、あらたに昆虫や鳥のハビタットとしても機能している（Long 1997）。

こうした状況のもと順応的管理の考え方を取り入れ、1996年3月、電力損失量180万ドルをかけて人工洪水実験が実施された。洪水の結果、ダムによる流量制限のため河床に厚く堆積していた土砂の多くは、人工洪水によって高い地形面に再堆積し、あらたな砂州の形成には寄与した。再堆積した土砂は、タマリスキなどの植生が繁茂する区域を埋める効果はあったものの、洪水水位が低く植生を洗掘するまでにはいたらず、当初の目的を達することはできなかったと評価されている（Kearsley & Ayers 1997）。

こうした人工洪水（フラッシュ放流実験）は、日本でもダムの弾力的運用の一環として実施されるようになってきた（島田 1998）。現在のところ、魚類や藻類、水質への影響を探るにとどまっているが、今後は水辺の植物群落に対しても実施される可能性を持っている。問題は、いつの時期にどれだけ放流すれば、水辺を構成する植物種が更新できる立地を確保し、生育条件を整えることができるかであるが、この問いに対して明確に答えられるデータはない。現在できることは、これまでの研究結果をもとに実験計画を練り、実験による仮説検証とその改良を繰り返しながら、より良い管理指針を見つけることであろう。日本でも順応的管理を考える時期にきている。

本論では樹木個体群に与える貯水ダムの影響として、融雪洪水の制御による更新立地の消失を大きく取りあげた。この理由は、ダム評価に関する研究の多くが、米国北部、ヨーロッパ、そして北日本の冷温帯に分布域を広げるヤナギやポプラの仲間を対象として実施されてきたためである。一方、日本の暖温帯地域には融雪洪水は認められず、水辺林を構成する種も春季の出水パターンには依存しないと考えられる。しかしながら、種子の発芽・定着期における流量調節が更新プロセスに重大な影響を与えることには変わりがない。結局のところ、暖温帯に分布する植物の生活史から、年間の降雨出水パターン（梅雨、台風出水など）とダムによる流況変化を評価検討し

ていかなければならないと考える。

謝 辞

本論を書くにあたり、洪水資料を提供していただいた帯広開発建設部札内川ダム建設事務所、さらに空中写真を提供していただいた北海道大学大学院栗田健氏に感謝の意を表す。また、本研究を実施するにあたり、文部省科学研究費基盤研究 B (10460059) ならびに(財)ダム水源環境整備センターの研究助成(水源生態研究会・森林生態研究会)を受けたことを付記する。

摘 要

ダム構造物が水辺林の更新動態に与える影響について、流量変動、流砂量および地形変化、攪乱の頻度と強度、そして流水による種子散布の観点から検討した。

ダムによる融雪洪水の消失は、5月から6月にかけての砂礫堆の形成と水分の供給を制限し、ポプラに代表されるヤナギ科植物が発芽定着できる更新立地を縮小させる。また、夏季の水位低下は乾燥による稚樹の枯死をもたらすと報告されている。

一方、ダムによる流量調節および砂防ダムや床固め工の施工により、氾濫原内の裸地が減少し樹林化が進んでいるという報告も多い。ダムによる砂礫供給の減少は、ダム下流における流路変動を抑制する方向に働く。先駆性の広葉樹にとって、流送砂礫による寄州の発達と古い堆積面への土砂再堆積は、更新裸地および水分・栄養供給の観点からも重要であるが、これがダムにより抑えられることになる。

砂利採取およびダム建設による掃流砂量の減少は、下流河床の低下を引き起こす。一方で、微細砂は流域の土地利用に起因して生産され、段丘化した氾濫原に越流堆積する。こうした河床低下と高水敷への微細砂堆積は、近年ニセアカシアが水辺域に分布を拡大する要因となっている。

ダムによる洪水攪乱頻度と強度の減少は、比高(最低河床位からの高さ)に沿った水辺林の種分布に少なからず影響を与え、ヤナギ科植物に代表される先駆性の広葉樹からハルニレやヤチダモに代表される遷移後期樹種への遷移を進めると考えられる。

流水による種子散布は湿地林についての報告が多い。湿地林の種多様性を維持する機構として、洪水攪乱による種子の再分散の重要性を指摘する報告もあり、ダムに

よる流量調節および種子の捕捉は、流水による種子散布にも影響を与えられられる。

ダムの影響を検討した既存の研究の多くは、ダムの上下流間比較もしくはダムの存否による流域間比較に基づいている。また、比較内容は、単純に種組成のみを比較したものから、水文・地形条件を加味したもので様々である。ダム建設前後の比較については、成熟林からの年輪情報の解析および経年的空中写真の判読により検討している。モデル解析は、高度を環境傾度とした植物種のニッチの違いからダム水位操作による種分布域の移動を議論した事例や、遷移確率と浸食率とを組み合わせるダムの影響を評価した事例などがある。

現在、日本でも河川の生態系を復元するためにフラッシュ放流実験が実施されるようになってきた。こうした実験結果を管理計画に反映するためにも、順応的管理による仮説検証が今後必要になる。

引用文献

- 有賀誠・中村太士・菊池俊一・矢島崇(1996)十勝川上流域における河畔林の林分構造および立地環境—隣接斜面との比較から—。日本林学会誌 78: 354-362。
- Bell D. T. (1980) Gradient trends in the streamside forest of central Illinois. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 107: 172-180.
- Bell D. T. & del Moral R. (1977) Vegetation gradients in the streamside forest of Hickory Creek, Will County, Illinois. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 104: 127-135.
- Bradley C. E. & Smith D. G. (1986) Plains cottonwood recruitment and survival on a prairie meandering river floodplain, Milk River, southern Alberta and northern Montana. *Canadian Journal of Botany* 64: 1433-1442.
- Bravard J. P., Amoros C. & Pautou G. (1986) Impact of civil engineering works on the successions of communities in a fluvial system. *OIKOS* 47: 92-111.
- Brown G. W. (1985) Forestry and water quality. OSU Book Stores, Inc.
- Brune G. M. (1953) Trap efficiency of reservoirs. *Transactions of American Geophysical Union* 34(3): 407-418
- 江頭進治・芦田和男(1981)山地流域における微細土砂の生産場と流出過程に関する研究。京大防災研究所年報 24(B-2): 1-12.
- Fenner P., Brady W. W. & Patton D. R. (1985) Effects of regulated water flows on regeneration of fremont cottonwood. *Journal of Range Management* 38: 135-138.
- Franz E. H. & Bazzaz F. A. (1977) Simulation of vegetation response to modified hydrologic regimes: a probabilistic model based on niche differentiation in a floodplain forest. *Ecology* 58: 176-183.
- Gregory S. V., Swanson F. J., McKee W. A. & Cummins K. W. (1991) An ecosystem perspective of riparian zone -

- Focus on links between land and water -. *BioScience* **41**: 540-551.
- Harris R. R., Fox C. A. & Risser R. (1987) Impacts of hydroelectric development on riparian vegetation in the Sierra Nevada region, California, USA. *Environmental Management* **11**: 519-527.
- 北海道土木部河川課 (1993) 雨量・水位・流量年表. 社団法人北海道土木協会.
- Hughes J. W. & Cass W. B. (1997) Pattern and process of a floodplain forest, Vermont, USA: predicted responses of vegetation to perturbation. *Journal of Applied Ecology* **34**: 594-612.
- Hupp C. R. & Osterkamp W. R. (1985) Bottomland vegetation distribution along Passage Creek, Virginia, in relation to fluvial landforms. *Ecology* **66**: 670-681.
- Hupp C. R. & Osterkamp W. R. (1996) Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* **14**: 277-295.
- 石川慎吾 (1980) 北海道地方の河辺に発達するヤナギ林について. 高知大学学術研究報告 **29**: 73-78.
- 石川慎吾 (1982) 東北地方の河辺に発達するヤナギ林について. 高知大学学術研究報告 **31**: 95-104.
- 石川慎吾 (1988) 揖斐川の河辺植生 I. 扇状地の河床に生育する主な種の分布と立地環境. *日本生態学会誌* **38**: 73-84.
- 伊藤哲・中村太士 (1994) 地表変動に伴う森林群集の攪乱様式と更新機構. *森林立地学会誌* **36-2**: 31-40.
- 岩田修二 (1992) 上高地の地形変化と環境保全. *地形* **13**: 283-296.
- Johnson W. C. (1992) Dams and riparian forests: case study from the upper Missouri River. *Rivers* **3**: 229-242.
- Johnson W. C. (1994) Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: patterns and causes. *Ecological Monographs* **64**(1): 45-84.
- Johnson W. C., Burgess R. L. & Keammerer W. R. (1976) Forest overstory vegetation and environment on the Missouri River floodplain in North Dakota. *Ecological Monographs* **46**: 59-84.
- 鎌田磨人・山邊栄一・岡部健士 (1997a) 徳島県吉野川内の木本と土地利用型の分布-1975年のメッシュ図-徳島県立博物館研究報告 **7**: 1-23.
- 鎌田磨人・岡部健士・小寺郁子 (1997b) 吉野川河道内における樹木および土地利用型の分布の変化とそれに及ぼす流域の諸環境. *環境システム研究* **25**: 287-294.
- Kamada, M. & Okabe, T. (1998) Vegetation mapping with the aid of low-altitude aerial photograph. *Applied Vegetation Science* **1**: 211-218.
- 金子有子 (1995) 山地溪畔林の攪乱体制と樹木個体群への攪乱の影響. *日本生態学会誌* **45**: 311-316.
- Kearsley M. J. C. & Ayers T. J. (1997) Effects of the 1996 beach/habitat-building flow on vegetation, seed banks, organic debris, and germination sites. In: *Glen Canyon Dam Beach/Habitat-Building Flow*, p. 64.
- 溪畔林研究会 (1997) 水辺林の保全と再生に向けて. *日本林業調査会*.
- Kikuchi T. (1968) Forest communities along the Oirase valley, Aomori Prefecture. *Ecological Review* **17**: 87-94.
- 木村有香 (1951) 本州に於けるケシヨウヤナギの新産地. *生態学研究* **13**(1): 35-36.
- Kurashige Y. (1993) Mechanism on delayed appearance of peak suspended sediment concentration in a small river. *Transactions of Japanese Geomorphological Union* **14**: 385-405.
- 李参熙・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏・山本晃一・望月達也 (1998) 礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割. *水工学論文集* **42**: 433-438.
- Lindsey A. A., Petty R. O., Sterling D. K. & VanAsdall W. (1961) Vegetation and environment along the wabash and tippecanoe rivers. *Ecological Monographs* **31**(2): 105-156.
- Long M. E. (1997) The grand managed canyon. *National Geographic* **192**(1), 114-135.
- 前田禎三・吉岡二郎 (1952) 秩父山岳林植生の研究(第2報)山地帯群落について. *東京大学農学部演習林報告* **42**: 129-150.
- 前河正昭・中越信和 (1996) 長野県牛伏川の砂防植栽区とその周辺における植生動態. *日本林学会大会論文集* **107**: 441-444.
- Maekawa M. & Nakagoshi N. (1997) Riparian landscape changes over a period of 46 years, on the Azusa River in Central Japan. *Landscape and Urban Planning* **37**: 37-43.
- 長坂有 (1996) 河畔に生えるヤナギ類. *光珠内季報* **101**: 12-17.
- 長沢徹明・梅田安治・水谷環 (1987) 北海道の農林地流域河川における浮流土砂流送挙動. *北海道大学農学部邦文紀要* **15**(4): 352-362.
- Nakamura F. (1986) Analysis of storage and transport processes based on age distribution of sediment. *Transactions of Japanese Geomorphological Union* **7**: 165-184.
- 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 (1996) 河川流域の景相生態. 「景相生態学(ランドスケープ・エコロジー入門)」(沼田真編), pp. 33-38. 朝倉書店.
- 中村太士 (1998) 河川の土砂動態と水辺域の生態学的機能. 「地形工学セミナー 2: 水辺環境の保全と地形学」(日本地形学連合編), pp. 1-36. 古今書院.
- 中村太士 (1998) 予測できない生態系の応答を前提とした新たな管理指針-Adaptive Managementの必要性-. *河川* **628**: 57-63.
- Nakamura F. & Kikuchi S. (1996) Some methodological developments in the analysis of sediment transport processes using age distribution of floodplain deposits. *Geomorphology* **16**: 139-145.
- Nakamura F., Yajima T. & Kikuchi S. (1997) Structure and composition of riparian forests with special reference to geomorphic site conditions along the Tokachi River, northern Japan. *Plant Ecology* **133**: 209-219.
- 新山馨 (1987) 石狩川に沿ったヤナギ科植物の分布と生育地の土壌の土性. *日本生態学会誌* **37**: 163-174.
- 新山馨 (1989) 札内川に沿ったケシヨウヤナギの分布と生育地の土性. *日本生態学会誌* **39**: 173-182.
- Niiyama K. (1990) The role of seed dispersal and seedling traits in colonization and coexistence of *Salix* species in

- a seasonally flooded habitat. *Ecol. Res.* **5**: 317-331.
- 新山馨(1995) ヤナギ科植物の生活史特性と河川環境. 日本生態学会誌 **45**: 301-306.
- Nilsson C. & Keddy P. A. (1988) Predictability of change in shoreline vegetation in a hydroelectric reservoir, Northern Sweden. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**: 1986-1904.
- Nilsson C., Ekblad A., Gardfjell M. & Carlberg B. (1991) Long-term effects of river regulation on river margin vegetation. *Journal of Applied Ecology* **28**: 963-987.
- Nilsson C., Jansson R. & Zinko U. (1997) Long-term responses of river-margin vegetation to water-level regulation. *Science* **276**: 798-800.
- 帯広開発建設部札内川ダム建設事務所(1998) 第4回札内川ダムモニタリング部会資料. 4-8.
- 奥田重俊(1978) 関東平野における河辺植生の植物社会学的研究. 横浜国立大学環境科学研究センター紀要 **4**: 43-112.
- Ohno K. (1982) A phytosociological study of the valley forests in the Chugoku Mountains, southwestern Honshu, Japan. *Japanese Journal of Ecology* **32**: 303-324.
- 岡村俊邦・中村太士(1989) 自然河川の流路変動と河川環境に関する砂防学的研究. 水利科学 **185**: 32-53.
- 太田陽子・鎌田磨人・岡部健士(1996) 徳島県吉野川内の木本と土地利用型の分布-1964年および1990年のメッシュ図-徳島県立博物館研究報告 **6**: 39-72.
- Reid L. M. & Dunne T. (1984) Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research* **20**: 1753-1761.
- Reily P. W. & Johnson W. C. (1982) The effects of altered hydrologic regime on tree growth along the Missouri River in North Dakota. *Canadian Journal of Botany* **60**: 2410-2423.
- Rood S. B. & Heinze-Milne S. (1989) Abrupt downstream forest decline following river damming in southern Alberta. *Canadian Journal of Botany* **67**: 1744-1749.
- Rood S. B. & Mahoney J. M. (1990) Collapse of riparian poplar forests downstream from dams in western prairies: probable causes and prospects for mitigation. *Environmental Management* **14**: 451-464.
- 崎尾均(1995) 溪畔域の攪乱体制と樹木の生活史からみた溪畔林の動態. 日本生態学会誌 **45**: 307-310.
- Sakio H. (1997) Effects of natural disturbance on the regeneration of riparian forests in a Chichibu Mountains, central Japan. *Plant Ecology* **132**: 181-195.
- 崎尾均・鈴木和次郎(1997) 水辺の森林植生(溪畔林・河畔林)の現状・構造・機能および砂防工事による影響. 砂防学会誌 **49**: 40-48.
- 佐藤創(1995) 北海道南部のサワグルミ林の成立維持機構に関する研究. 北海道立林業試験場研究報告 **32**: 55-96.
- Scott M. L., Friedman J. M. & Auble G. T. (1996) Fluvial process and establishment of bottomland trees. *Geomorphology* **14**: 327-339.
- Schneider R. L. & Sharitz R. R. (1988) Hydrochory and regeneration in a bald cypress - water tupelo swamp forest. *Ecology* **69**: 1055-1063.
- Schweingruber, F. H. (1988) *Tree Rings*. D. Reidel Publishing Company.
- Sigafoos R. S. (1961) Vegetation in relation to flood frequency near Washington, D. C. Geological Survey Research 1961: C248-C249.
- 島田昭一(1998) 寒河江ダムの弾力的管理の指向. 河川 **627**: 27-33.
- 進望・石川慎吾・岩田修二(1999) 上高地・梓川における河畔林のモザイク構造とその形成過程. 日本生態学会誌 **49**: 71-81.
- Skoglund S. J. (1990) Seed dispersing agents in two regularly flooded river sites. *Canadian Journal of Botany* **68**: 754-760.
- Swanson F. J., Gregory S. V., Sedell J. R. and Campbell A. G. (1982) Land-water interactions: The riparian zone. In: *Analysis of coniferous forest ecosystems in the western United States* (ed. Edmonds R. L.) pp. 267-292. Hutchinson Ross Publishing Company.
- 館脇操(1948) ケショウヤナギの分布と群落. 生態学研究 **11**: 77-86.
- Teversham J. M. & Slaymaker O. (1976) Vegetation composition in relation to flood frequency in Lillooet River valley, British Columbia. *Catena* **3**: 191-201.
- USDA (1978) Predicting rainfall erosion losses. United States Department Agriculture.
- 鷺谷いづみ・松田裕之(1998) 生態系管理および環境影響評価に関する保全生態学からの提言(案). 応用生態工学 **1**: 51-62.
- Walters C. J. (1986) *Adaptive management of renewable resources*. New York, Macmillan Publishing Company.
- Yajima T., Nakamura F., Shimizu O. & Shibuya M. (1998) Forest recovery after disturbance by the 1926 Mudflow at Mount Tokachi, Hokkaido, Japan. *Res. Bull. Exp. For. Hokkaido Univ.* **55**(1): 216-228.
- 山本進一(1981) 極相林の維持機構-ギャップダイナミクスの視点から-. 生物科学 **33**: 8-16.