

出水による破壊機会の減少による河道内樹林化

GROWTH OF VEGETATION IN FLUVIAL-FAN SEGMENT DUE TO DECREASE OF DESTRUCTION OF VEGETATION BY FLOODS

辻本哲郎¹・村上陽子²・安井辰弥³

Tetsuro TSUJIMOTO, Yoko MURAKAMI and Tatsuya YASUI

¹正会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工修 建設省四国地方建設局高知工事事務所 (〒780 高知市六泉寺町96-7)

³学生会員 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程学生 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Recently in many rivers, vegetation covers wide parts of floodplain of fluvial-fan segment of particularly with a dam on the upstream. Rich vegetation is disadvantageous from the viewpoint of safety against flood but also it is not necessary good for eco-system of fluvial-fan rivers. When the changes of river landscape of the Tedor river (with dam) and the Abe river (without dam) are compared with each other by aerial-photo analysis, the growth of vegetation after dam construction is remarkable in the Tedor river. When the records of floods of the two rivers are compared with each other, it is clarified how the major floods were controlled by a dam in the Tedor river. The previous studies by us show that repetition of medium-size floods and low-stage waters promotes vegetated area to expand. On the other hand, major floods sometimes destroy the vegetation. Usually the growth and destruction are in balance. Thus the obvious growth of vegetation in the Tedor river probably implies the decrease of chances for vegetation to be destroyed by major floods. Then, models to simulate destruction of vegetation by flood and growth of individual trees have been proposed to explain the difference of landscape changes in the Tedor and the Abe river.

Key Words : Riparian vegetation, fluvial-fan river, flood control, flow with vegetation, river-landscape management

1. まえがき

近年、河道の樹林化が目立っている区間が多く見られる。河道内で樹林化が進行することは、流水抵抗が大きくなり洪水疎通を妨げるほか、河川生態系保全という視点からも河川の個々のセグメントでの潜在的な自然が変質するということが好ましくないという認識が強まってきた。河道内樹林化の原因としては、ダム建設による河床低下に起因する河道内氾濫原(河川敷・中州)の比高増加(陸化)および占有(耕作)放棄があげられている¹⁾。とくに前者については、洪水時における高水敷・植生帯への浮遊砂堆積(顕著な横断混合による浮遊砂の横断輸送によるもの)、河床低下(とくにいわゆる rotational degradation)の流路中央への集中、孤立植生域周辺への土砂堆積と、低水時に陸化する部分へ植生が侵入するプロセスが考えられている(たとえば文献2)にまとめられている)。こうした視点から、中小出水が適当な頻度で出現する環境では、とくに河床低下傾向にある河道では植生

化(草本に覆われ、それが樹林に取ってかわり成長するプロセス)が徐々に進行していくと言える。一方、大出水は植生を破壊する。砂田ら³⁾はこの植生繁茂と破壊に対してそれぞれ指数関数をあてはめ、航空写真からこれらのパラメータを同定して河道の樹林化プロセスを表現することを試みている。そこでいう繁茂関数については、先述のようなその素過程の研究が進みその延長で定式化も可能と期待されている。一方、大出水による破壊はむしろパルスのイベントで、時間的変化の表現より、大出水の機会にその規模と河道植生の状態に応じてどの程度の植生破壊があるかという視点が重要である。破壊については、(1)流体力による樹木倒壊(たとえば流体力による作用モーメントが樹木の転倒抵抗モーメントを上回る⁴⁾)、(2)植生の立地基盤の流失の2つが考えられている⁵⁾が、必ずしも十分にその機構が検討されていない。

本研究では、以上の背景から、同じような規模の流域面積、流路延長、計画高水流量を持ちながら、上流域にダムがある、無いの相違がある手取川、安倍川の扇状地河道区間を例に選び、航空写真から河道植生の変遷を把

表1 手取川と安倍川の概要

	手取川	安倍川
流域	源を白山に発し日本海に注ぐ	源を大谷嶺に発し駿河湾に注ぐ
流域面積(km ²)	809	567
流路延長(km)	72	53.5
扇状地区間の河床勾配	河口より約17km区間で約1/150	0-4km 区間 1/250 4-10km 区間 1/250-1/150 10-14km 区間 1/150-1/125
基本高水流量(m ³ /s)	6000 (鶴来)	5500 (手越)
計画高水流量(m ³ /s)	5000 (鶴来)	5500 (手越)
上流の崩壊	手取中生層は崩壊しやすく、別当谷大崩れ等の崩壊地がある	大谷嶺の斜面(大谷崩)等の崩壊地が多く存在する
ダムの有無	手取川ダム(本川上流1980年完成)	砂防ダムのみ 大規模なダムはない

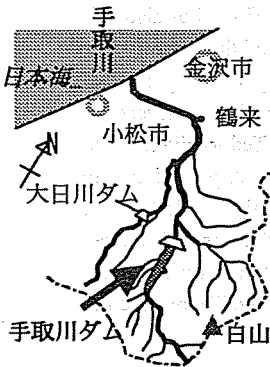


図1 手取川流域図

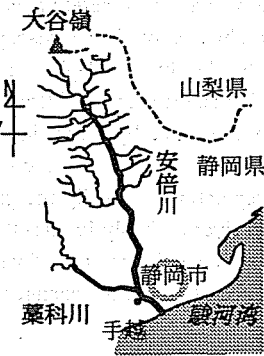


図2 安倍川流域図

握する一方、その相違をそれぞれの洪水履歴の特徴との関連で議論する。さらに、洪水時の植生破壊を植生基盤の流失という観点から、植生水利を媒介にした簡単なモデルで表現、また樹木の成長もデータに基づいてモデル化して大出水時の破壊規模を評価できるようにする一方、大出水が無い場合の(中小洪水と低水の繰り返しによる)穏やかな植生繁茂率を想定して、これまでの樹林化面積の推移の特徴を説明するとともに、洪水調節の河道内樹林化への影響を考察する。

2. 手取川・安倍川の概要

表1に示すように、手取川と安倍川(それぞれの流域概略を図1,2に示す)は、ほぼ同規模の流域面積、流路延長、基本高水流量を有し、扇状地区間の性状も極めて類似している。それにもかかわらず、手取川では1980年にダムが完成したが、安倍川ではダムが無い。したがって、河道特性に及ぼすダムの影響を見るのにこの2川を比較するのは意義深い。

また手取川、安倍川の年最大流量の経年変化をそれぞれ

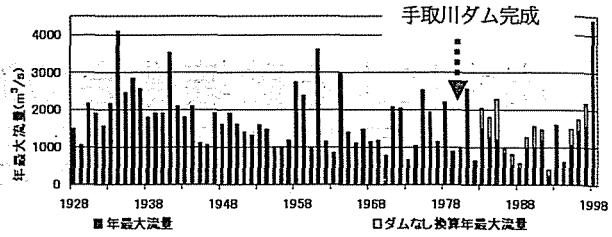


図3 手取川の年最大流量とダムがないとした場合の換算流量(1980年以降)

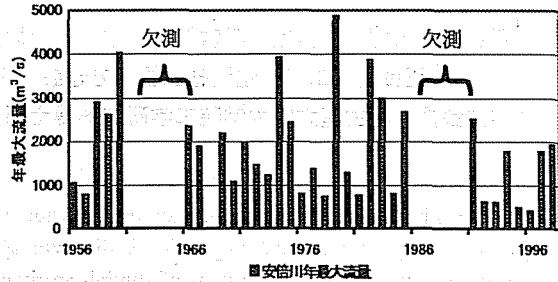


図4 安倍川の年最大流量

れ図3, 図4に示す。手取川では1980年のダム建設を境に年最大流量の平均値が1600m³/s程度から1150m³/s程度へと減少している。図3にはダムが無い場合に換算した流量も示してある。1980年以降の換算流量の平均値は1530m³/s程度となりダム建設以前の平均流量とさほど変わりなく、ダムによる流量の調節がダム建設後の年最大流量の平均値減少をもたらしていると思われる。アーマーカーの破壊限界流量は2000m³/s程度、高水敷や中州が冠水する流量は1500m³/s程度とされているが、1981年の出水以来1997年までは年最大流量が1500m³/sを越えることは無く、アーマーカーが破壊されて顕著な河道変化が生じる機会は激減している。ただし、1998年9月にはピーク流量2883m³/sの大きな出水があり、河道内で繁茂した植生が破壊され、植生域が大きく減少した。一方、安倍川では流量の経年変化に目立った変化は見られない。また近年も河床上昇が続いており、手取川のように低水路と砂州の固定化は生じていない。

3. 航空写真の解析による植生面積率の変遷

(1) 航空写真の解析方法

手取川と安倍川の植生域の経年変化をみるために、航空写真からそれぞれの植生域の面積を測定した。本研究では、画像解析用ソフトPhotoshop (Adobe社製)を用いて解析を行った。

航空写真の画像解析の具体的な手順を以下に示す。

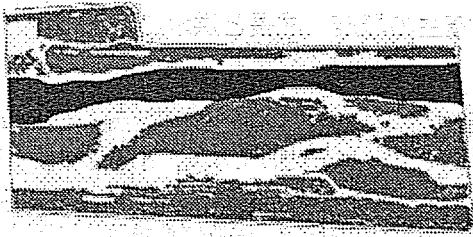


図5 水面，裸地域，植生域に塗り分けた河道区間

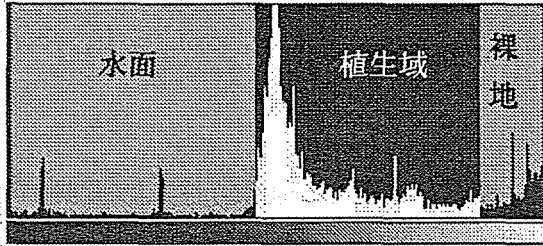


図6 3領域に区分された画像の輝度のヒストグラム

- 1) 航空写真をスキャナで撮り込む
- 2) 航空写真ごとに縮尺が違っているものは、すべて最新（手取川では1998年，安倍川では1999年）の写真の縮尺に統一し，同地点ごとに各年の航空写真の大きさと位置を重ね合わせる。
- 3) 河道の大きさを統一し，区間ごとにその形に切り取る。手取川は1kmごと，安倍川は2kmごとを1区間とする。
- 4) それぞれの地点について高水敷を塗り分け，そのピクセル数を測定する。
- 5) 低水路の範囲を手取川では植生の繁茂域，水面，それ以外の砂州域の3色，安倍川では植生域とそれ以外の区域の2色に塗り分ける（図5）。
- 6) 低水路の範囲のみを選択し，輝度のヒストグラを見て，ほぼ3分割されたそれぞれの割合を読み取ることで，それぞれの区分の割合を測定する（図6）。

当初，航空写真そのままの輝度のヒストグラムからこの3種類の割合を自動的に測定することを試みたが，各航空写真によって色あいが大きく異なっており，自動的にしきい値を定めてこれを判断することは困難であった。特に，明度の低い植生域と明度の高い砂州域を区別することは容易であったが，水面の色が反射の具合で年や地点によって非常にまちまちであり，また多くの場合，植生域か砂州域かのどちらかに非常に類似した色であってヒストグラム上で分離できないことが，これらを自動的に判別することが困難であった要因である。3色に塗り分ける方法は，色彩が類似した地点では元の写真と比較して植生，水，砂州のどれにあたるかを判断しなければならぬため多少煩雑ではあるが，Photoshopの機能により明らかに色合いが異なった各区分をある程度まとめ

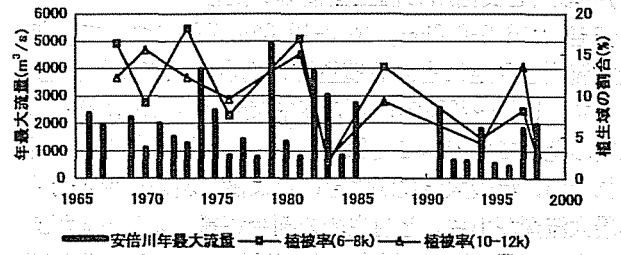


図7 安倍川の年最大流量と植生域の割合の経年変化

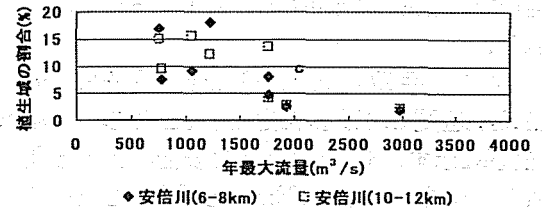


図8 安倍川の年最大流量と植生域の割合の関係

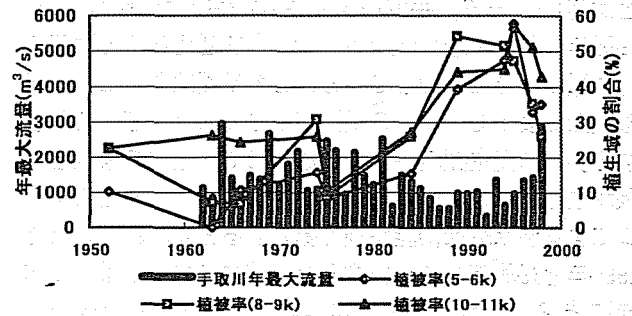


図9 手取川の年最大流量と植生域の割合の経年変化

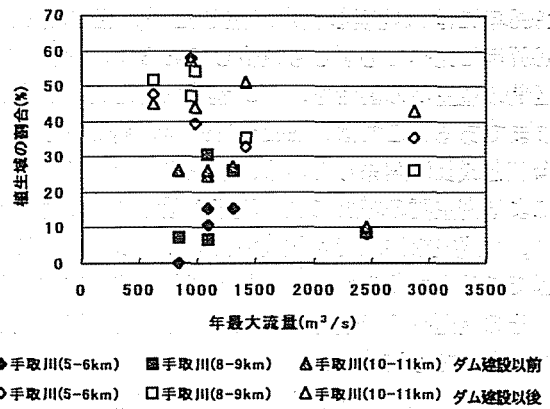


図10 手取川の年最大流量と植生域の割合の関係

て自動的に選択することができるので，結果的には一番簡便な方法であると判断した。ただし水面の面積は，航空写真撮影時の流量条件によって大きく変化する一時的な値である。安倍川では網状流路が複雑で水面を選択することが困難であったため，水面の面積を測定せず，植生域とその他の部分の2色に塗り分けることとした。

(2) 手取川と安倍川の植生面積率の推移

安倍川の6.0-8.0km, 10.0-12.0km区間について, 年最大流量と河道に占める植生域の割合の経年変化を図7に示す. 1968~1999年の間に植生域の割合はおおよそ20%以内の範囲で小刻みに変動しており, 大規模な増減は見られない. 年最大流量が大きい年は植生域の割合が低く, 年最大流量が小さいと植生域の割合が高くなる傾向がある. また, 図8より年最大流量が1500m³/sを越えると植生域の割合が減少することがわかる. この規模の洪水が2年から少なくとも4年に一度は発生しているために, 安倍川では植生域の割合が一定に抑えられていると考えられる.

次に, 手取川の5.0-6.0km, 8.0-9.0km, 10.0-11.0km区間における年最大流量と植生域の割合の推移を図9に示す. ダム建設以前は安倍川と似た傾向が見られる. 年最大流量が1300m³/sを越えると植生域が減少する傾向があり, またその規模の洪水が数年に一度の頻度で生じているために, 植生域の割合が大きく増減することは無い. 一方, 手取川ダムが建設された後の1982~1995年の間に年最大流量が1500m³/sを越えることは無く, 植生域が大幅に増加している. この期間はダムによる流量調節によって, 洪水の規模が小さくなり, 植生を破壊する洪水の発生頻度が減少したために, 植生の繁茂と成長が生じたものと思われる. 従って河道内樹林化にはダムによる洪水調節機能が強く影響すると思われる. また, 1995年と1997年とを比較すると, 植生域の割合は減少傾向にある. 1996, 1997年の年最大流量が1336m³/s, 1423m³/sであることから, これらの出水により植生域の一部は破壊されたものと思われ, 最近においても1300m³/s以上の出水が植生を破壊することが分かる. 1998年には大規模な出水が生じたが, 植生域の割合は1997年に比べて必ずしも減少しておらず, 減少している区間の植生域の割合も, ダム建設以前と比較すると高いままである. これは, 1982~1995年の間に生じた植生の繁茂と成長に関係している. 植生の繁茂, あるいは成長による密生度の増加により流速の低減効果が増大するため, 大規模な洪水でも破壊されなくなっていることが要因であると考えられる. 一旦繁茂した樹林地は, おそらくその周辺への流速低減効果が大きいため, 洪水流量が大きくても破壊が起こり難い. 航空写真を見ると, ダム建設以前には植生域の密度が全体的に小さく, 一つのまとまった植生域が洪水後にはパッチ状に分断されていたのに対して, 樹林化の生じた後は植生群落内の比較的密度が小さいと思われる地点で植生が帯状に破壊され, その周辺の密度の濃い部分では植生が流下方向に細長い群落状のまま残っているというように, 植生域の破壊形態が変化している. そのため, 植生域の面積の長期的な予測を行うためには, 洪水流量の絶対値だけではなく, その履歴・頻度と植生域の密度の増加割合との時間的な関係を知ることが必要であろう.

4. 植生の繁茂・成長と洪水による破壊

航空写真の解析から, 植生域の繁茂・成長と破壊にとり年最大流量の規模だけでなく, 植生を破壊する洪水の発生頻度が重要であることが示された. そこで数値シミュレーションを行い, 流量変動特性の変化による植生域の消長を検討する. また航空写真から測定した植生域は草本と木本を区別していないが, 木本は洪水流に与える影響も大きく, 植生の繁茂と成長において果たす役割を知る必要がある. そのため, 砂州上に点在する木本類に特に注目する.

(1) 植生繁茂と成長

植生の繁茂にはとくに周囲の条件による規則性を考えず, 新たな植生の発生場所は植生がない領域に対して一様な確率(大出水が無い場合の穏やかな植生繁茂率 G (%/年))でランダムに与える. 植生繁茂率 G は本シミュレーションではモデルパラメータとする.

樹高 H (m)と樹齢 t (年)の相関は現地調査のデータより作成された関係式を用いる.

$$H(t) = \frac{(180 \times \log t + 73)}{100} \quad (1)$$

樹木の成長による植生密生度の変化に関しては次式のように入蔽面積 λ (m²)を樹高 H の一次式で仮定する.

$$\lambda(t) = \frac{H(t)}{\alpha} \quad (2)$$

ここで α : 樹高と密生度の関係を表すモデルパラメータである. モデルパラメータ G , α の設定については, 図9に示した手取川における植生域の増減傾向を再現できる組み合わせとなるように, 試行錯誤を行い調整する.

(2) 植生基盤の破壊

木本類の個体が完全に破壊される条件として, 河床材料の移動によって立地基盤が失われ完全に根元から流失する場合を考える. まず植生が(1)で想定する様に繁茂・成長するものと考え, 植生域が分布する平坦河床(地形を無視)で水深平均 k - ϵ モデルを用いて平面2次元の流れ解析を行う. 得られた河床材料の無次元掃流力 τ_r が限界無次元掃流力 $\tau_{r,c}$ を上回る領域では河床材料が移動するために, 植生が流失するものと仮定する. あるメッシュにおける河床材料の無次元掃流力 τ_r は, 流れの場の計算結果より得られたそのメッシュにおける主流速 U , 横断方向流速 V を用いて, 以下の式で与えられる. ここで, u_{*b} : 底面摩擦速度, C_f : 河床の摩擦抵抗係数, σ : 河床材料の砂の密度(=2.65), ρ : 水の密度(=1.0), g : 重力加速度, d : 河床材料粒径である.

$$u_{*b} = \sqrt{C_f (U^2 + V^2)} \quad (3)$$

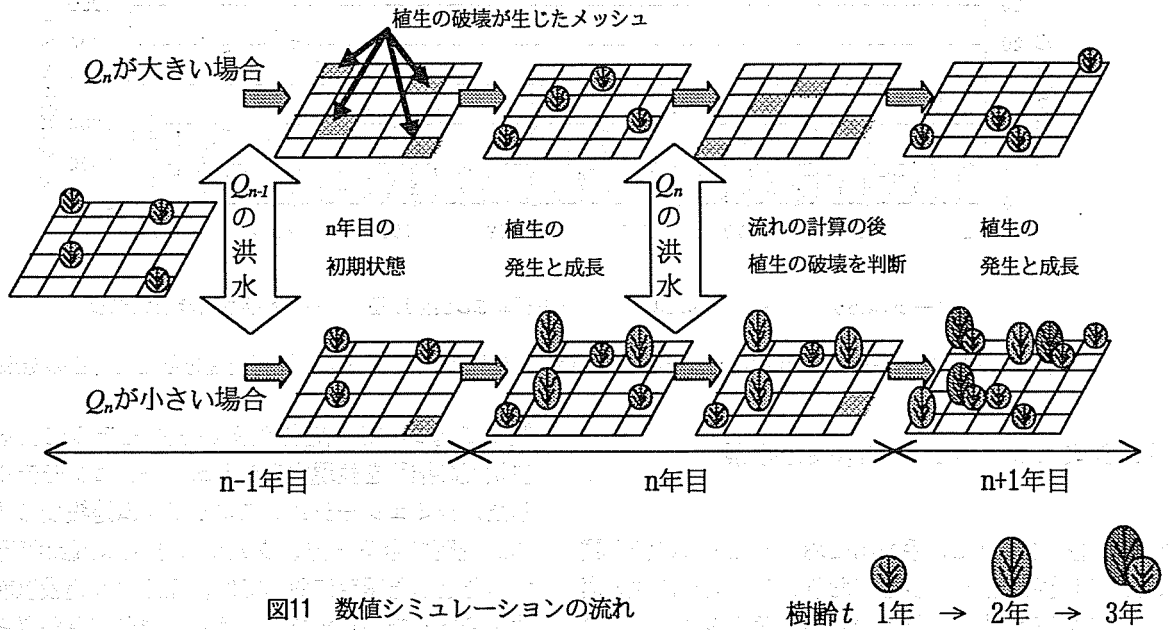


図11 数値シミュレーションの流れ

$$\tau_* = \frac{u_{*b}^2}{\{(\sigma/\rho - 1)gd\}} \quad (4)$$

河床材料の粒径については、1998年の大出水以前に、1995年から1997年の出水によって植生域が破壊されていることを受けて、 $1300\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水で植生が破壊される条件とする。計算を試行した結果、 $d=9.0\text{cm}$ とする。

(3) シミュレーションモデルの構成

(1), (2)で想定した様に植生の繁茂と成長および破壊が生じる場で、洪水の流量と再現期間の条件を様々に与えて、植生域の面積の変遷について数値シミュレーションを行う。初期の状態として、木本群落のうち特にアキグミやイヌコリヤナギなどの低木群落が低水路内に点在していることを想定する。単純化のため、地形は勾配 $1/150$ の平坦な河床とし、植生の立地に対する地形の影響を考慮しない。洪水は各年の年最大流量とする。植生のパラメータとして、樹齢 t 、樹高 $h(t)$ 、密度 $\lambda(t)$ 、1年あたりの植生繁茂率 G を考える。計算領域は流下方向に 75.0m 、横断方向に 50.0m であり、境界は周期境界条件とする。メッシュの大きさは流下方向 $1.5\text{m} \times$ 横断方向 1.0m とする。

計算の流れを図11に示す。まず平水時に計算領域内の N_n 個メッシュ ($n-1$ 年目の破壊判定後に植生が存在しないメッシュの数に植生繁茂率 G をかけたもの)において樹齢 $t=1$ (年)の植生がランダムに発生するものとする。ここに年最大流量 Q_n を与えて流れの場を解き、各メッシュの植生域について破壊されるか判定を行う。破壊される場合にはそのメッシュに存在する植生は消去される。破壊されないメッシュの植生は次の年まで生育するので樹齢が1年加算され、成長して λ が増加する。次に、再び

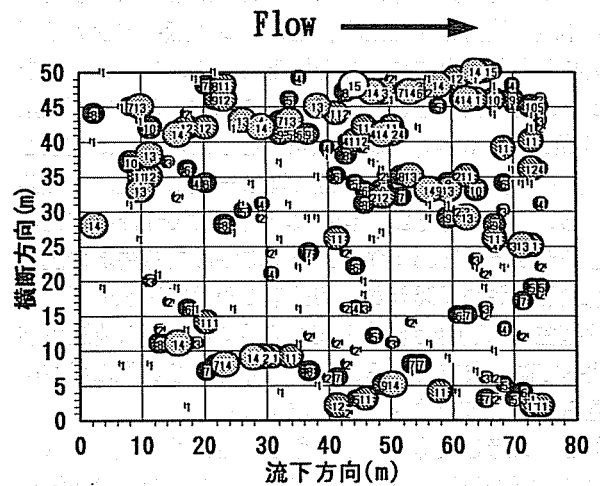


図12 数値シミュレーションによる植生域の分布
 $G=3$ (%/年) $\alpha=100(\text{m}^2)$ 時

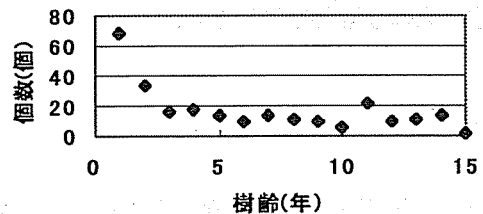


図13 樹齢分布

N_{n+1} 個メッシュ (n 年目の破壊判定後に植生が存在しないメッシュの数に植生繁茂率 G をかけたもの)において $t=1$ の植生が発生するとし、再び年最大流量 Q_{n+1} を与えて流れの計算を行う。1962年から1998年まで実際の年最大流量を与えた場合について、1998年の出水後に植生が生じた状態での植生の分布を図12に示す。円はその地点における植生を、円の大きさと数字は樹齢を示している。また、樹齢ごとの植生の数を図13に示す。

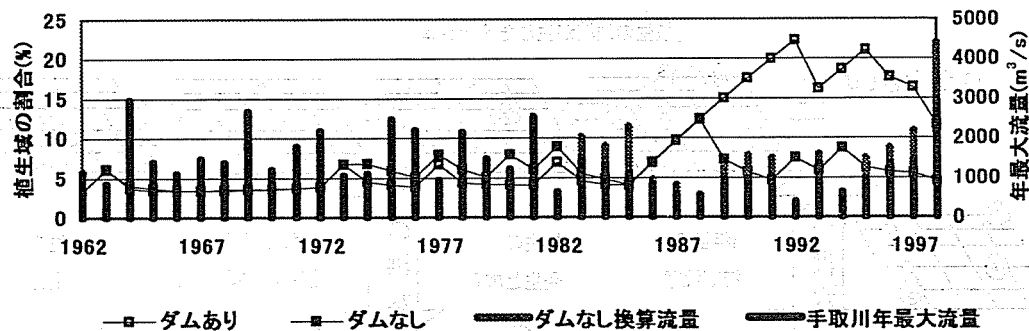


図14 1962年～1998年の年最大流量を与えた場合の結果と同じくダムなし換算流量を与えた場合の結果

5. シミュレーションの結果と考察

すでに述べたように、手取川においてはダムの流量調節により年最大流量が減少しており、このように大規模な出水の頻度の減少が樹林化の原因と考えられる。このことについて考察するために、1962年から1998年まで実際の年最大流量を与えた場合と、ダムが無い場合の換算流量を与えた場合についてそれぞれシミュレーションを行った。その結果を合わせて図14に示す。ここで植生繁茂率 G は $3.0(\%/年)$ 、 α は $100(m^2)$ とした。ダムが建設される前は、植生域の割合が低くほぼ一定に保たれる傾向にある。ダム建設後は、年最大流量が $1000m^3/s$ を越えることの無かった1985年から1992年にかけて植生域の割合が増加し、かつ1996年から1998年にかけて出水の影響を受け植生域の割合は減少しているものの、ダム建設以前と比べて高いままである。これらの特徴は実際に手取川で見られた傾向とよく一致している。

またダム無し換算流量を与えた場合には、実際には樹林化の進行が著しかった1989年から1991年の年最大流量は $1300m^3/s$ から $1600m^3/s$ となり、植生域が破壊される規模であるために植生域の割合は落ち込む。従って現在のような植生の大幅な繁茂は生じない。

6. あとがき

本研究では、まず流域、基本高水流量などがほぼ同規模の手取川、安倍川の扇状地河道区間について航空写真によって植生繁茂状況の経年変化を調べた。その結果、上流にダムが無い安倍川では一定の低い植生面積率で推移してきているのに対し、手取川ではダム建設後、年最大流量の規模が $2/3$ 程度に減じ、この時期に植生面積占有率の拡大(樹林化)が顕著に進んでいることが明らかにされた。手取川では1998年に久々の大出水があり植生破壊が見られ、大出水による植生破壊の機会の減少がダム建設後の樹林化を促進したものと類推した。また、植生破壊は植生立地基盤の不安定化によると仮定、こうした

仮説に基づいて、植生の繁茂・破壊モデルによる河道植生状況の推移を表現するシミュレーションモデルを提案した。シミュレーションによってダム建設後の樹林化傾向が説明できる一方、ダムによる洪水調節が行われなかったとした想定においては、ほぼダム建設以前の植生状況のまま推移したであろうとの推測結果が得られた。このことより、今回提案した手法によって、今後、人工洪水や洪水時の調節方法の工夫が河道景観管理にどのように有効であるかなどを検討しうるものと思われる。ただし、モデル中の仮説には実際現象をかなり概略的に捉えているところや、条件によって適用性の問われる部分もある。こうした点を今後の研究課題としたい。

謝辞：本研究の遂行にあたっては、「河道変遷研究会」(座長：砂田憲吾山梨大学教授、河川環境整備基金事業)の支援を受け、また建設省金沢工事事務所、静岡河川工事事務所には資料提供など大変お世話になった。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 河川植生の生育特性に関する研究会：河道内における樹林化実態調査，リバーフロント整備センター，1998。
- 2) 河川環境管理財団：河道変遷に関する研究 - 適切な河川環境管理を目指して，河川整備基金事業報告，1997。
- 3) 砂田憲吾・岩本尚・渡辺勝彦：出水履歴と河道特性が植生域の長期変動に及ぼす影響に関する基礎的研究，水工学論文集，Vol.42，pp.451-456，1998。
- 4) 河川環境管理財団：河川植生，河川整備基金事業報告，1999。
- 5) リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，204p.，1999。
- 6) 辻本哲郎・村上陽子・安井辰弥：手取川における樹林化と大出水時の植生破壊，河川技術に関する論文集，Vol.5，pp.99-104，1999。
- 7) Tsujimoto, T. : Fluvial processes in streams with vegetation, *Jour. Hydraul. Res.*, IAHR, Vol.37, No.6, pp.789-803, 1999。
- 8) 辻本哲郎・辻倉裕喜：植生周辺の掃流過程と中州の発達，水工学論文集，Vol.42，pp.457-462，1998。

(2000.10.2受付)