

航空写真・地形・流況データを用いた裸地砂州 への植生の侵入・定着過程に関する研究

PLANT IMMIGRATION/ESTABLISHMENT PROCESS ONTO BARE SANDBAR
BY USING AERIAL PHOTO, GEOMORPHOLOGY AND FLOW REGIME

宮脇真二郎¹・戸田祐嗣²・花井駿介¹・辻本哲郎³

Shinjiro MIYAWAKI, Yuji TODA, Shunsuke HANAI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

²正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

³フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

The expansion of riparian vegetation is the problem in river engineering and ecology, and many researchers have studied the vegetation dynamics in river. Previous research has mainly dealt with vegetation growth and destruction, but the initial step of vegetation expansion—germination (*Immigration*) and survival (*Establishment*) of seedling—is also important. In fact, there was wider bare area in 1970s in many rivers than at present in Japan, thus the analysis of aerial photographs, geomorphology and flow regime in 1970s might suggest the Immigration and Establishment process. The time of Establishment is determined by the analysis of aerial photograph, and spatial distribution of plant establishment area is discussed with the result of analysis of geomorphology and flow regime.

The results of this study suggested that the seedling immigration area mainly depends upon submergence during winter, and the simulation of bed material mobility during annual maximum flood suggested that the seedling immigration area and the area in where bed material can move during flood determine the plant establishment area.

Key Words : riparian vegetation, bare area, germination, seedling, aerial photograph, geomorphology, flow regime

1. 序論

砂州上の植生は河川の治水安全度や河川生態系に影響を及ぼす。一般に砂州上の植生の繁茂について、まず草本類が裸地へ侵入し、その後同じ場所に木本類が群落を形成するが、木本類が河道内の多くの領域を占めるようになると、植物の群落が洪水流に対する抵抗となり、洪水疎通能力を低下させる。すなわち、河道内における植生群落の拡大によって治水安全度は低下する。一方で、裸地が植生域に変わることによって、河道内に生息する生物は裸地を好むものから植生域を好むものに変化することになる。よって、河道内に植生群落が存在することによって、河川生態系を構成する生物の種類や生息環境が改変される。このように、河道内の植物は物理的・生物的にとても重要な役割を担っている。

近年、我が国の多くの河川において河道内における植

生域の拡大が生じており、河道内植生の動態を扱う研究が数多く行なわれている。植生が群落を形成するために、種子散布、発芽、成長、拡大という過程を経ると考えられる。特に河道内においては実生の段階、又は成長した段階で洪水によって群落が破壊されるという特徴がある。本研究では裸地に種子が散布され、発芽することを侵入、侵入した実生が洪水によって破壊されることを特に成長した植物の破壊と区別して実生破壊と定義する。更に、侵入した実生が洪水後でも生存していることを定着、定着した植物が生長し群落を拡大することを発達、そして成長した植物(群落)が破壊されることを植生破壊と定義する(図-1)。これらの定義に従うと、既往の研究の多くが主に植生の発達や植生破壊に着目しており^{1), 2), 3)}。また、それらの過程を組み合わせる植物の動態をモデル化する試みがなされてきた^{4), 5)}。このような植生の発達や植生破壊のみを考慮した場合、洪水によって破壊され難い場所に植物が群落を形成することになる。

しかしながら実際の河川では、平水時の低水路付近、すなわち水際部において植物が群落を形成している場合

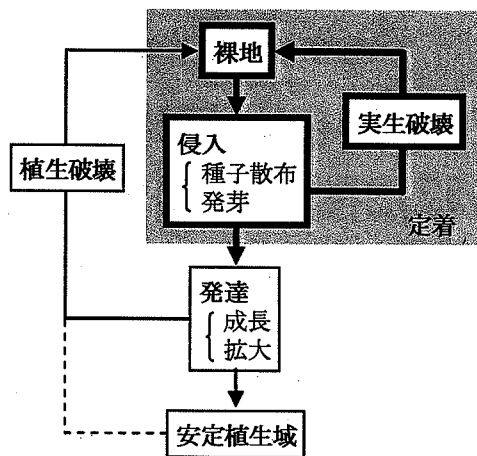


図-1 河道内における植生域拡大の概要

が多く見られる⁶⁾。水際部は冠水頻度が高く、比較的破壊されやすい場所であるため、発達と植生破壊のみを考慮するとこのような現象を説明することが出来ない。すなわち、侵入や定着に関する研究が必要であると考えられる。

以上の背景から、本研究では、裸地への植生の侵入・定着過程を明らかにすることを目的とする。調査対象とする木津川では、現在多くの砂州において既に植生域が発達しているが、1970年代には河道内に多くの裸地砂州が存在していた。そこで、本研究では木津川の過去の航空写真、地形、流量データを用いて、過去の植生侵入・定着過程を明らかにする。

2. 対象とする河川と植物

本研究では、淀川の支川である木津川を対象とし、特に宇治川・桂川・木津川の三川合流地点から20kmのセグメントに着目する。このセグメントの河床勾配は約1/1100である。河床材料は主に砂で構成されており、平均粒径は約2mmである。河道内には交互砂州が形成されており、約18個の砂州に三川合流地点から昇順に番号がつけられている。また、同セグメントにおいて1960年代までは河道内に植生が見られなかったが、1970年代以降植生の発達が進み、現在では裸地中心の砂州に比べて植生が発達した砂州の数の方が多い状況である。以下、比較的植物が発達している砂州を植生砂州、逆に裸地が広い面積を占めている砂州を裸地砂州と呼ぶこととする。

木津川において先駆的な役割を担っている植物はツルヨシとヤナギタデである。ツルヨシは多年生、ヤナギタデ是一年生の草本植物である。2つの植物共に春に発芽し、秋に種子を散布する。ツルヨシの種子には綿がついているため、一般的には種子が風によって地面に落下し（一次散布：風散布）、その後水によって運ばれる（二次散布：水散布）と考えられている。ここで、実験室において綿がついたツルヨシの種子が水に浮くことを確認

表-1 裸地域への植物の定着時期

期間	定着砂州 番号	定着が 見られない年	定着が 見られる年
I	8	1967年	1972年
II	9, 10, 11, 13, 15, 16, 18	1975年	1979年
III	7, 8	1975年	1983年
IV	14, 15	1982年	1988年
V	15	1988年	1993年

している。もう一方のヤナギタデの種子は果皮に包まれているが、果皮と種皮との間に空洞があるため水に浮くことが出来る（容積密度：約0.7g/cm³）。このことから、一般的には秋になると種子が重力により地面に落下し（一次散布：重力散布）、その後水によって運ばれる（二次散布：水散布）と考えられている。

3. 植物の侵入・定着時期の推定

まず、航空写真を用いてどの年代に植物の侵入・定着が起こったか推定する。しかし、実際には毎年航空写真が撮影されていないので、その年代のいつ植物が侵入・定着したのか推定する必要がある。そこで、毎年植物が侵入するという仮定に基づき、流量データからその年の洪水が実生を破壊するのに十分な規模であるかどうか判定することによって、植物の侵入・定着時期を推定した。

(1) 航空写真による侵入・定着が起こった年代の推定

推定には1963, 1967, 1969, 1971, 1972, 1973, 1975, 1979, 1982, 1983, 1984, 1986, 1987, 1989, 1992, 1994, 2002, 2005に撮影された航空写真を用いた。これらの中で、一つ昔の航空写真の中では裸地域であった場所に植物が存在していることを定着と定義して調べた結果、表-1に示すように、大きく分けて5つの年代で植物の定着が起こっていることが分かった。例えば、1967年に砂州8で裸地であった場所に1972年には植物が存在していたため、その間に砂州8に植物が定着したと判断した。表-1より、特に期間II（1975～1979年）では最も多くの砂州において定着が起こっていたため、この期間について更に詳しく定着の起こった年を推定した。

(2) 流量データによる侵入・定着が起こった年の推定

航空写真に植生が写っていない、すなわち植物が定着していないことの要因として、植物が侵入しなかった、又は侵入したが洪水によって破壊されたということが考えられる。本研究では植物は毎年侵入すると仮定し、期間IIのいつ植物が破壊された可能性があるかを調べることで、定着が起こった年の推定を行なった。

図-2に1956～2000年の年最大流量（日平均）の推移を

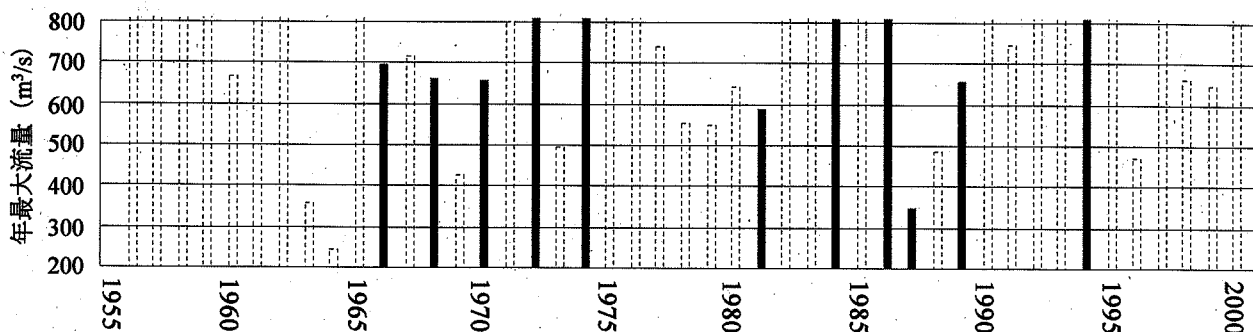


図-2 1956～2000年の年最大流量（日平均）

示す。また、航空写真から判断して、植生が定着していない年の前年の棒グラフには色が塗ってある。図-2より、植生が定着していない年の前年には $600\text{m}^3/\text{s}$ 以上の洪水が発生していることが分かる。このことから、日平均流量で $600\text{m}^3/\text{s}$ を上回る洪水が発生した年には植生が侵入したとしてもその後に洪水によって破壊されていると考えることが出来る。

期間IIに着目すると、1975～1977年は $600\text{m}^3/\text{s}$ を大幅に上回る洪水が発生していることが分かる。すなわち、この間に植物が侵入したとしても、洪水によって破壊されてしまう可能性が高く、植物の侵入は1978年、又は1979年に起こったのではないかと推察される。

4. 植物侵入・定着位置と冬期冠水域の比較

1979年には最も多くの砂州で植物の定着が起きているため、1979年の航空写真を調べることによって実際に侵入・定着した植物の空間的な特徴を把握することが出来る。一方で、その要因を明らかにするために植物の生活形態に着目した。対象植物の種子散布において水による輸送が大きな役割を担っている。特に、植物の生活形態から冬期の裸地域の冠水が植物の侵入に大きな影響を及ぼしていると推察されたため、一次元不等流解析によって冬期冠水域を求め、植物侵入域の空間的な分布と比較検討した。

(1) 定着位置・幅の把握

国土地理院の1/25000の地形図を基準として、GISを用いて航空写真を実スケールに変換した。予め流下方向に200m毎に設けられていた横断測線を実スケールの航空写真に重ねた図を図-3に示す。GISを用いて左岸距離標からそれぞれ植生域の両端までの距離を測定することによって横断測線上における植生域の位置を把握した。また、この2つの距離の差から横断測線上における植生域の幅を求めた。

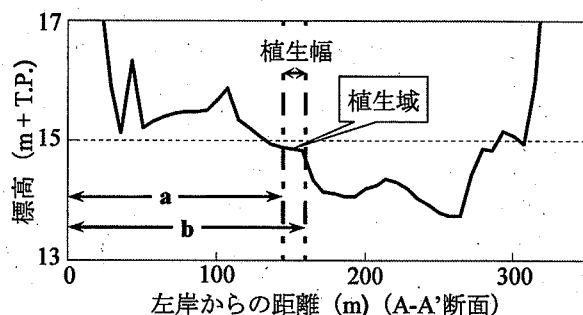
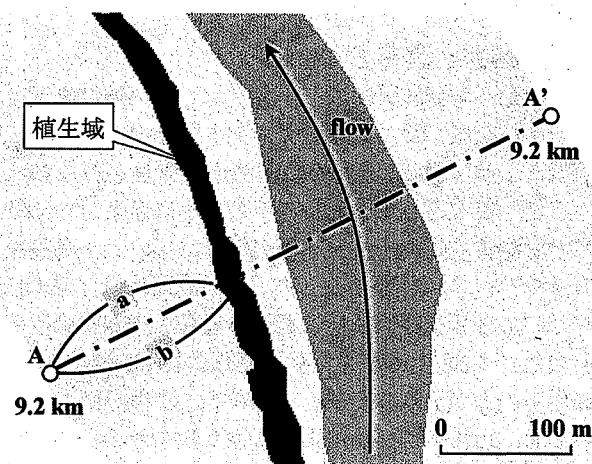


図-3 9.2km地点の植生分布

(2) 冬期冠水域の推定

植物の侵入・定着過程を明らかにするために、植物の生活史に着目する。本研究で対象としているツルヨシやヤナギタデは10月末から1月の初めにかけて種子の一次散布を行い、4月に発芽する。そのため、1月から3月（冬期）にかけて種子の二次散布が行なわれていると推察することが出来る。周辺に植物が存在しない裸地域へ植物が侵入するためには種子の二次散布が必要不可欠であるため、ここでは二次散布に着目する。

種子の二次散布は水によって成されるため、冬期の裸地域の冠水が重要である。冬期最大流量時の水際線は冬期最大冠水域の境界線を意味し、この線より比高が高い場所では水散布によって種子が供給される可能性がない。そこで、現地地形を用いた一次元不等流解析により冬期

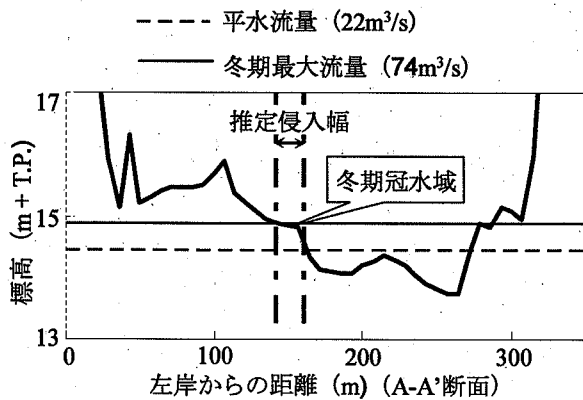


図-4 9.2km地点の冬期冠水域

最大流量時の水際線を求めた。

一次元不等流解析にはソフトウェア（河道計画シミュレータ）を用いた。対象セグメントにおいては、国土交通省によって数年に1度の頻度で地形測量が行なわれているが、対象としている1979年の地形に最も近い1980年の地形測量成果を一次元不等流解析に用いた。冬期最大流量時の冠水域を調べるため、冬期最大流量と平水流量について計算を行い、それぞれの場合の水際線の位置を求めた。冬期最大流量、平水流量共に1978年に比べて1979年の方が大きいため、1978年に植物が侵入したとしても、1979年の植物侵入域に含まれるため、1979年の冬期最大流量、平水流量を用いて解析を行なった。そして、左岸距離標からそれぞれの水際線までの距離の差から横断測線上における冬期冠水幅を求め、推定侵入幅とした（図-4）。

(3) 植物の侵入過程

各横断測線上の推定侵入幅（冬期冠水域幅）と植生域幅を図-5に示す。ここで、1975年の時点で裸地であった横断測線のみを対象としている。もし冬期冠水幅と植生域幅が等しい場合は傾きが1の直線上に点がプロットされることになる。また、1975年から1979年にかけて裸地が維持された横断測線については横軸上にプロットされる。

図-5より、全体的に植生域幅に対して冬期冠水幅が広い傾向があるが、植物が進出した横断測線においては両者の間に強い相関が見られる。横断図上では植生域幅と冬期冠水幅に差がある断面について、図-6において平面図上で両者を比較する。図-6より、空間的な特徴は概ね一致していることが分かる。これらのことから、裸地域への植物の侵入は種子の二次散布に強く依存しており、冬期の裸地域の冠水域を求めることによって植物侵入域を見積もることが可能であることが分かった。

このように植生が定着した横断測線においては冬期冠水幅と植生域幅がよく一致しているのに対し、冬期に冠水しているにもかかわらず植生が全く定着していない横断測線がある。これは、植物が侵入したものの、洪水に

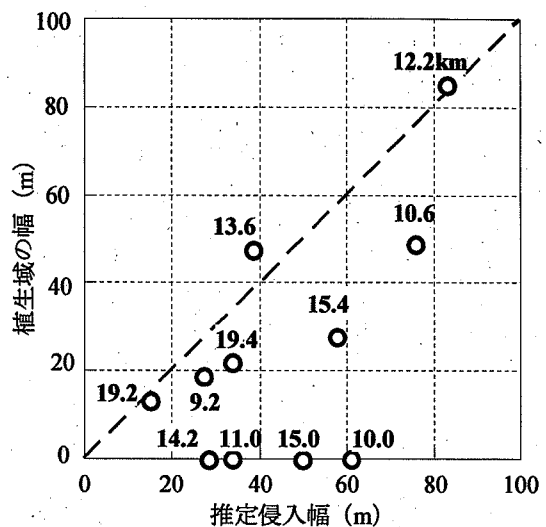


図-5 推定侵入幅と植生域幅

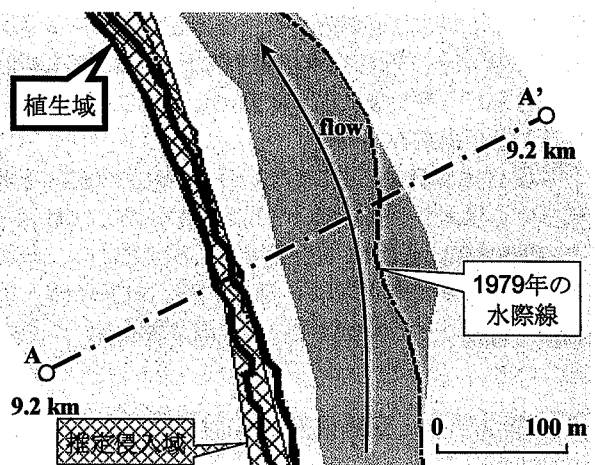


図-6 9.2km地点の推定侵入域

よって破壊された可能性を示唆している。よって、裸地に植物が侵入した後の洪水による実生の破壊を考慮することによって植生の定着域の推定を行なう。

5. 実生定着幅の検討

裸地域への植物の侵入は種子の二次散布に強く依存していることが分かったが、定着に関しては実生破壊について検討する必要がある。既往の研究では礫床河川における植生の破壊を洪水時の掃流力によって評価しているが³⁾、本研究でも同様の手法を用いて砂河川における実生破壊の検討を行なった。ただし、この場合は横断方向の掃流力分布を求める必要があるため、一般曲線座標系による不等流解析⁷⁾の方法を用いた。そして、解析によって求めた破壊幅を冬期冠水域から差し引くことによって推定定着幅を求め、植生定着幅と比較検討を行なった。

(1) 定着幅の推定

掃流力 τ_0 がある一定の限界値 τ_c を超えると砂礫が動き始める。この τ_c を限界掃流力と呼ぶ。また、掃流力 τ_0 を砂の密度 σ 、水の密度 ρ 、重力加速度 g 、砂の平均粒径 D で無次元化したものを無次元掃流力 τ^* と呼ぶ。この無次元掃流力 τ^* が無次元限界掃流力 τ_c^* と等しくなるときの砂の平均粒径を移動限界粒径 D_c とした。この限界粒径 D_c を植生群落の侵入が見られる箇所と侵入が見られない箇所とで求める。この限界粒径 D_c はそれぞれの箇所において動く砂礫の大きさを意味している。ここである限界粒径 D_c を設定しこれを超える粒径を持つ砂礫が動くとき植生がともに破壊されると考え、それにより植生の破壊域を算出する。

a) 2次元浅水流計算による河床掃流力の計算

流れの解析を行なう手法として1次元不等流計算では同じ断面において水位、流速が一定である。水位に関しては実際の河川においても同じ断面ではそれほど変化はしない。しかし流速に関しては実際の河川では同じ断面内でも場所によって大きく変化している。2次元不等流計算では同じ断面上で水位の分布に加え流速の分布を求めることが出来る。植生の侵入域の計算では、計算によって求める必要がある情報が水位のみであったので、計算にかかる時間が少なく、計算方法も容易な1次元計算によって解析を行なった。しかし河床面に作用する掃流力を求める場合には、水深に加えて流速を含んだ式であるため仮に1次元解析により同じ断面上で水深だけが変化する掃流力の分布を求めたとしても、その分布は現実とはかけ離れたものになってしまう。従って掃流力の計算は2次元浅水流計算によって行う。実際には一般曲線座標系による不等流解析⁷⁾の方法を用いた。

計算対象区間は木津川本川合流地点0.0 kmから20.0 kmまでの区間とした。地形データには国土交通省による200 m間隔での横断地形測量データを用いた。流下方向グリッド数は101とした。また計算上の縦断方向の河川の流れにつながりを持たすためにそれぞれの横断面内でもっとも河床高の低い地点を横断方向のグリッドの中央に設定し、それから左右両河岸堤防までの範囲を不等間隔に30分割した。従って、横断方向グリッド数は60である。

計算条件としてはマンニングの粗度係数を0.03、河床勾配を1/1100としている。上流端・下流端での流量と水位には時間最大流量・時間最大水位を設定したが、4(2)で1979年の冬季最大流量を使用したためここでも同じ1979年のデータ(時間最大流量1071.48 m³/s, 時間最大水位12.315 m)を用いた。

b) 移動限界粒径 D_c の算出

5(1)a)により求めた水深 h 、水深平均流速(u , v)を用いて移動限界粒径 D_c を求める。ここで掃流力 τ_0 と無次元掃流力 τ^* を求める式は以下になる。

$$\tau_0 = \rho g R I_e \quad (5a)$$

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\sigma - \rho) g D} \quad (5b)$$

ここで式(5a)の I_e はエネルギー勾配である。エネルギー勾配 I_e はマンニングの速度公式より次のように表される。

$$I_e = n^2 (u^2 + v^2) h^{-\frac{4}{3}} \quad (5c)$$

ここに ρ : 水の密度, σ : 砂礫の密度, g : 重力加速度, D : 砂礫の平均粒径, n : マンニングの粗度係数とする。

以上より限界粒径 D_c は次の式で表される。

$$D_c = \frac{n^2 (u^2 + v^2)}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) h^{\frac{1}{3}} \tau_c^*} \quad (5d)$$

なお一般的に無次元限界掃流力 $\tau_{c^*} = 0.05$ が平均的な値であるのでこれを適用する。また $n = 0.03$, $\sigma = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ としている。

c) 侵入と破壊を考慮した植生の定着幅の算出

礫床河川での植生の流出に関する既往の研究から、植生はその立地基盤の河床材料が移動すると流出が生じることが報告されている。また、移動の判定に用いる河床材料の大きさとしては、 d_{90} や最大粒径といった河床材料中の比較的大きな粒径のものをを用いることが多い。本研究では過去の地形条件での解析を行っているため、その時の河床材料の正確な値は分からないが、現在の木津川砂州土壌の最大粒径程度に相当する $D_c = 3.5 \text{ cm}$ 程度の砂礫が移動を開始したときに、植生の流出が生じるものとした。

(2) 植物の定着過程

冬期に冠水しているにもかかわらず植生が全く定着していない11.0 km地点での横断面上の冠水幅、 D_c の分布、植生が破壊される限界の D_c の値(D_c)を載せた図と冠水域内で破壊を考慮した幅を示した図を図-7に示す。横断面での冠水と破壊を考慮した幅と植生域の幅をプロットしたものを図-8に示す。図中の矢印はそれぞれの地点

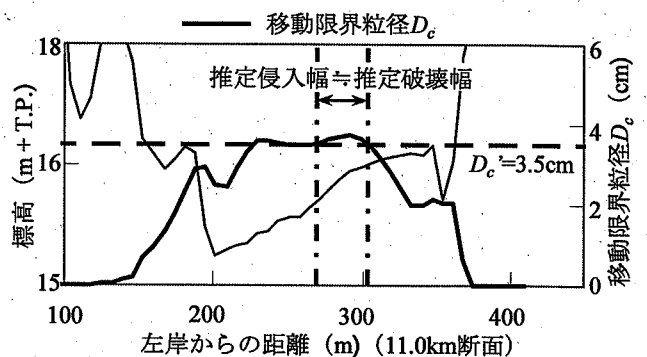


図-7 11.0 km地点の冬期冠水域

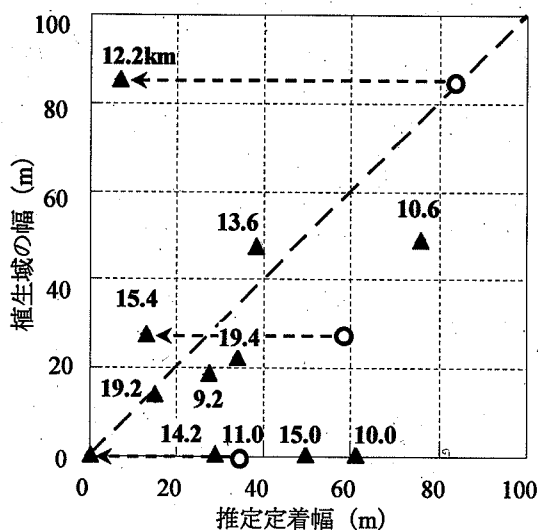


図-8 推定定着幅と植生域幅

での推定侵入幅からの変化を表している。矢印が無い地点は推定侵入幅と推定定着幅に違いがないことを示している。

図-8を見ると破壊を考慮した植生の推定定着幅は推定侵入幅に比べて実際の植生定着域の幅と一致することが分かった。しかし裸地が保たれている箇所（植生域の幅=0の箇所）では本川合流地点から11.0km地点のみで一致が見られた。他の3箇所（14.2km地点、15.0km地点、10.0km地点）について一致が見られない原因を以下に挙げる。

a) 2次元浅水流計算で用いたグリッドの座標データの精度が粗い

b) 砂の堆積による破壊

c) 冠水が必ずしも発芽と結びつかない

a) に関しては2次元浅水流計算で水位と流速を求める際、隣り合った地形データを平均化した地形において計算を行うため入力する地形データの間隔が大きいと現実と大きく違う地形での水位、流速を計算することになる。特に本研究では縦断方向に200m間隔の横断地形測量データを用いていることが結果に影響を与えていると考えられる。

b) に関しては植物が発芽した後に上から砂が堆積することによって航空写真で確認することが出来なかったことが可能性として考えられる。

c) に関しては4.2.2で植生域と冠水域の幅が一致しない原因として挙げたが、冠水したときの周辺の植生分布状況や気候などによって冠水しても発芽が起こっていない可能性も原因として考えられる

6. 結論

本研究では裸地域への植物の侵入・定着過程を明らか

にするために過去の航空写真・地形・流量データの分析を行なった。その結果、植物の侵入・定着過程解明に向けて、以下に示すような重要な知見が得られ、比較的容易に植物の侵入・定着域を見積もる方法を示した。しかし、他の河川への応用や植生域拡大過程全体の解明のために更なる研究が必要である。

a) 木津川においては、1978年～1979年の間に多くの裸地砂州で植生の定着が生じた。

b) 植生の定着時期と河川流況との比較から、木津川においては、年最大流量が $600\text{m}^3/\text{s}$ を越えるような出水が生じると、前年までに着床・発芽した実生が流出し、植生の定着が抑制されるものと思われる。

c) 植生の定着は冬季の冠水域の範囲内で生じている。このことより、植生の定着には冬季の出水による種子供給が必要であることがわかる。

d) 冬季の冠水域の推定に加えて年最大流量時の植生の破壊判定を行うことで、植生の定着幅の予測精度が向上する。

謝辞：本研究は木津川における河川生態学術研究会の総合的な調査研究の一環として実施されたものである。記して意を表する。

参考文献

- 1) 戸田祐嗣，端戸尚毅，池田駿介：礫河原に生息するツルヨシの成長および栄養塩吸収に関する研究，水工学論文集，第48巻，pp. 1615-1620，2004。
- 2) 小川友浩，田中規夫，城野祐介：河川中州上に繁茂するツルヨシのランナーによる拡大量と成長量の評価，水工学論文集，第49巻，pp. 1441-1446，2005。
- 3) 瀬崎智之，服部敦，近藤和仁，徳田真，藤田光一，吉田昌樹：礫州上草本植生の流失機構に関する現地観測と考察，水工学論文集，第44巻，pp. 825-830，2000。
- 4) 李参照，藤田光一，山本晃一：礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ，水工学論文集，第43巻，pp. 977-982，1999。
- 5) 辻本哲郎，村上陽子，安井辰弥：出水による破壊機会の減少によるか道内樹林化，水工学論文集，第45巻，pp. 1105-1110，2001。
- 6) 鈴木倫久，池田祐一，河森克至，須賀亮三：砂州上植生の分布パターンと経年変化に関する基本的研究—那珂川水系荒川における現地調査，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，第49巻，pp. 214-215，1994。
- 7) 長田信寿：一般座標による河川流の計算，水理公式集例題プログラム集，例題2-8，2001。

(2006. 4. 6 受付)