

河道内植生大規模伐採後の樹林再侵入 メカニズムの解明と樹林化抑制手法の開発 ～天竜川下流域を対象として～

要旨

1. はじめに
 2. 研究対象地の概要
 3. 航空写真分析を用いた植生動態の長期把握
 3. 1 航空写真を用いた植生動態分析方法
 3. 2 分析結果と考察
 4. 中部一級水系河川群間の比較
 4. 1 分析方法
 4. 2 各河川の植生動態の特徴
 4. 3 植生動態の河川間比較
 4. 4 植生交換の活発さと河道・流況特性の関係
 5. 植生侵入・破壊過程に関する数値解析
 5. 1 数値解析モデル
 5. 2 解析条件
 5. 3 解析結果と考察
 6. 結論
- 参考文献

要旨

全国の多くの河川で河道内の樹林化が報告されている。本研究では、天竜川下流域を対象として、航空写真分析を用いた長期樹林動態の解明、天竜川を含む中部の8つの一級水系河川の樹林動態の比較・類型化、河道地形と樹林動態の相互作用を解明するための数値解析モデルの開発を実施した。研究の結果、以下の知見を得た。

- 天竜川下流域では、1960年代までは河道内の植生は少なかったが、1970年代に高水敷で、1980年代に低水敷堤防際から植生が侵入・拡大した。一方、1980年代までは中州では後年まで残存する植生は少なく出水のたびに植生は破壊され交換が激しかった。1990年代に入ると中州上に草本が侵入し河道の植生域の拡大が進行した。この中州上の植生は2000年代まで残存しており、植生域内の木本の割合が増加し、より安定した樹林帯に変わってきている。しかし、樹林態の周辺部において依然、植生域の侵入・破壊が頻繁に発生し植生の交換が活発である。
- 河口から16~20kmの区間は植生の侵入・破壊が起こりやすく、8~10kmの区間では植生の侵入・破壊が比較的小さい。また、天竜川下流域における植生の拡大と縮小を分ける流量は4000~6500m³/sの間にあり、流量が4000m³/s以下の期間が続くことが河道内の植生拡大につながる。
- 中部の8つの一級河川の樹林動態を比較した結果、以下の4つに分類された：
 - ✓ 植生域が安定している河川：庄内川・櫛田川
 - ✓ 植生の交換が活発で侵入と破壊を繰り返しながら徐々に植生が増加していく河川：天竜川・矢作川
 - ✓ 植生の交換は活発だが、破壊に対して侵入が卓越しており一方的に植生が増加する河川：長良川・揖斐川
 - ✓ 植生はあまり交換されず、侵入のみが大きいため一方的に増加する河川：豊川・木曾川
- 洪水時の河床材料の頻繁な移動が確認された河道区間で活発な植生交換が生じていることが示された。
- 中規模河床波の発生領域区分図上で、複列砂州と単列砂州の領域の区分線付近に位置する河道区間で植生交換が活発に生じる。また、近年の河道の横断面の変化は、砂州の発生領域区分上で、複列砂州の発生領域から単列砂州の発生領域へと変化しており、単列化した河道区間で安定した植生域の繁茂が確認された。
- 種間競争と拡大を考慮した植生繁茂動態と河床変動の解析モデルを構築し、実河川の植被率の変化や植生の繁茂状況のある程度表現できた。また、砂州地形と植生変化から、河道内植生を伴う河床変動では砂州の固定や比高差の増大など河道特性の変化が生じることを示した。

以上の成果から、河道植生域の拡大を抑制するには、河床材料の移動頻度を増加させるような河道横断面の設定が必要であること、本来、複列砂州が形成されていた河道では、砂州発生形態が単列砂州へと変化しないような低水路幅の確保が必要であることが示唆された。

1. はじめに

近年、全国の多くの河川で河道内の植生繁茂域の拡大が報告されている。河道内植生はその光合成活動を通して有機物を生産し河川生態系のピラミッドの底辺を支えるとともに、河畔生物に生息場を提供する機能を有している。また、その存在は河道内植生の流速逓減効果による微細土砂の堆積、高水敷の形成や川幅の縮小といった河道内の水理・地形に影響を与える¹⁾。特に植生の抵抗による洪水時の水位上昇は治水上の障害となる危険性を有しているため、今後の河川管理の中で、河道内植生の適切な管理手法を確立することは重要な課題である。

これまで、現地踏査、数値解析などを用いて河道内の植生繁茂および樹林化に関する研究が行われており、植生繁茂と洪水履歴・地形変化・土砂動態などとの関係性について検討されてきた。例えば、清水ら²⁾は渡良瀬川の調査から小規模出水と細砂の堆積が安定した樹林地の形成につながる指摘している。辻本ら³⁾は手取川でダム建設に伴う流況の変化に注目し、流況の平滑化により樹林化が生じたと指摘している。また、砂州上での植生生理・生態特性の把握とそれに基づく群落拡大予測手法の構築⁴⁾、植生解析と洪水時の流れ・河床変動解析とを融合させた河道内植生繁茂解析手法⁵⁾が提案されるなど、河道内植生動態のメカニズムに関する研究はここ 10 年程の間に目覚ましく進展してきている状況である。

しかし、これまでの研究は植生動態のメカニズム解明を主な研究対象としていたため、調査対象地をリーチスケール程度の現地踏査に適した範囲に絞り込み、詳細な検討が行われることが多かった。また、データ分析においても地形、水理量、河床材料粒度等のデータが比較的質・量ともに充実している近年の植生変化を対象とした分析が多い。河道の植生管理と言った観点から見ると、空間スケールとしてはセグメントレベルでの植生変化の特徴を把握する必要があるとともに、過去数十年から現在に至る長期的な視点での植生動態の実情をまずは把握することが肝要であろう。また、砂州形態や河床材料の移動頻度などといったマクロな河道特性と樹林化の関係を明らかにしていく必要がある。

以上の背景から、本研究では以下 3 つの観点から研究を実施した。

- 広範囲・長期にわたる河道植生の動態把握するため、航空写真データを活用し、天竜川下流域の過去 40～50 年程度の樹林動態を明らかにする（第 3 章）。
- 中部地方の 8 つの一級河川での樹林動態を比較し、各河川の樹林化の特徴の抽出と類型化を行う。その結果から、天竜川での樹林動態を河川間比較の観点から明らかにする（第 4 章）。
- 樹林化の制御や樹林繁茂と河道地形の関係性を解明するための数値解析モデルを開発する（第 5 章）。

2. 研究対象地の概要

本研究で対象とする天竜川は、静岡県・愛知県・長野県の 3 県にまたがる流域面積 5、090km²、流路延長 213km の一級河川である。その下流域（河口～22km 付近）は表層の平均粒径が約 60mm の礫床河川であり、かつては植生の繁茂があまり見られない網状河道で

あった。しかし、近年のダム建設や大規模な砂利採取に伴い、河床高の低下、高水敷との比高差の拡大、洪水時に有効な川幅が減少するなど河道の物理環境が変化し、それと共に河道内の樹林化の進行が報告されている⁶⁾。

調査対象区間は本川中の最下流ダムである船明ダムより下流部の扇状地から河口までの区間とし、具体的には河口より 1km～22km までを対象とする。この区間の代表的な植生はコゴメヤナギ、ヨモギ、メドハギ、ヨシ、シダレスズメガヤ群落である。

3. 航空写真分析を用いた植生動態の長期把握

3. 1 航空写真を用いた植生動態分析方法

本章では植生の長期変遷を把握するために地理情報システム (GISver.9.3) を利用して航空写真を判読した。分析に用いた航空写真は 1967 年から 2005 年までの 39 年間の間に撮影された 1967、1976、1981、1983、1987、1990、1995、1996、1998、2003、2004、2005 の航空写真計 12 ヶ年分である。以下に分析の手順を示す。

まず、植生域、裸地域、水域といった地表状況分類の抽出方法として教師付き (最尤法) 分類を採用した。教師付き分類とは、分析する画像の中に分類する項目であると明確に判読できる領域がある場合、その領域をトレーニングエリアとして設定し、輝度、色構成の画像情報から他の画素がどの領域に最も近いかを判断して分類する方法である。この方法を用いて、まず画像を草本域・木本域・裸地・水域の 4 の領域に分類した。しかし、砂州際の浅い水域と木本域の RGB コードが近かったため、自動的にこの 2 つの領域を完全に分離することはできなかった。そこで、エッジ抽出を行った。エッジ抽出とは輝度および RGB 各色彩値の空間勾配を算出することにより、色合いが不連続に変化する輪郭線を検出する画像処理であり、これにより色合いが似た領域 (水域や裸地、植生域等) ごとに大きく区切ることができる。この 2 つの分類図 (教師付き分類、エッジ抽出) を重ね合わせることで浅い水域と木本域を誤差 0.5% 程度の精度で分類することが出来た。その後、人工地 (グラウンドや耕作地など) を目視判読し、先ほど分類した画像と重ね合わせることで最終的に草本域、木本域、裸地、水域、人工地の 5 つに分類した。ただし、水域は撮影日の流量によって異なる一時的なものである。

河道は洪水の影響を受けやすく植生変化や地形変化を頻繁に繰り返す低水敷と、低水敷よりも一段比高が高く相対的に洪水の影響を受けにくい高水敷に分けられる。よって、河道内植生の動態を議論する際これらを分離して考える必要がある。天竜川では低水敷と高水敷が比高差や植生帯によって明確に分かれているので、航空写真の目視判読と横断面図を用いることで高水敷・低水敷境界を抽出した。

次に、隣接した撮影期間における植生動態を把握するために、新たに侵入した植生域と破壊された植生域を算出する。解析に供する航空写真のうち撮影期間の隣り合うもの 2 年分を重ね合わせ、裸地・水域から草本または木本に変わった領域を侵入域、逆に草本・木本から裸地または水域に変わった領域を破壊域とする。抽出した植生域の面積から、低水敷・高水敷それぞれについて植被率、侵入率、破壊率を算出した。本手法により分類された天竜川下流域の地被状態の変遷を図 3. 1 に示す。

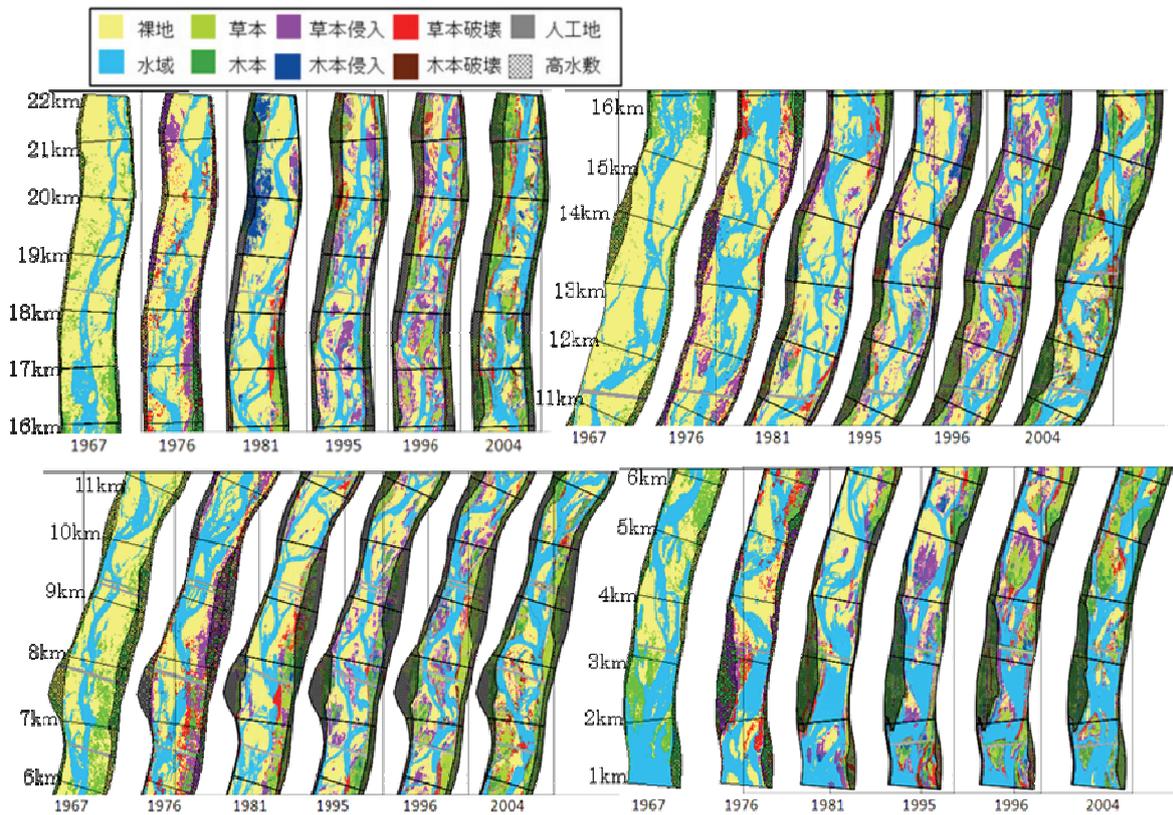


図3. 1 天竜川下流域河道の地被状態の変遷

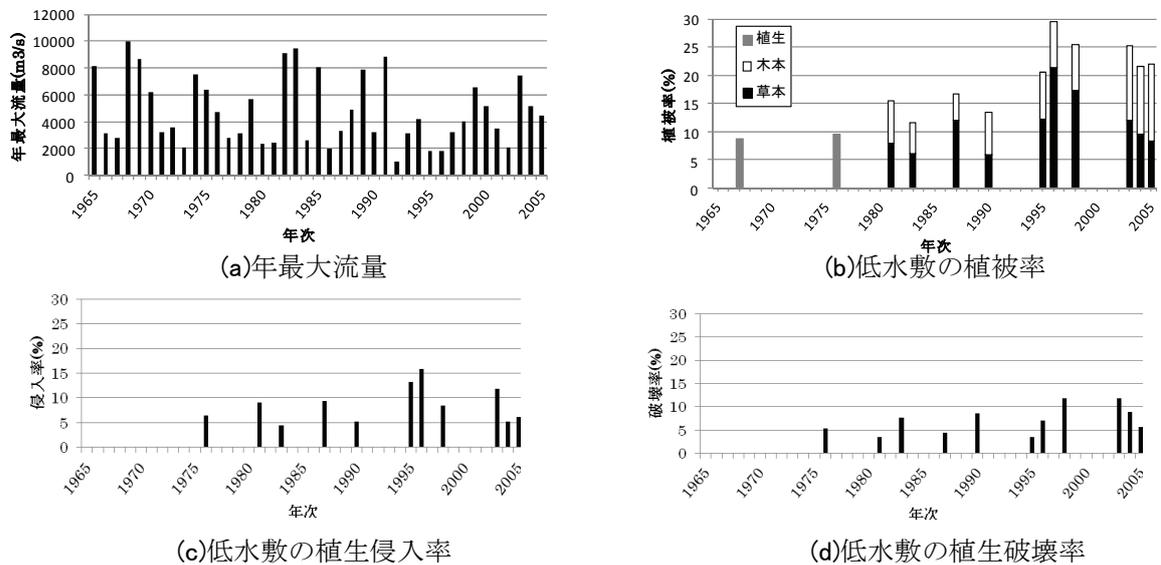


図3. 2 低水敷の植生変化

3. 2 分析結果と考察

3. 2. 1 植被率と侵入・破壊率の変遷

図3. 2に年最大流量、低水敷における植被率、侵入率、破壊率の経年変化を、図3. 3には高水敷における植被率の経年変化を示す。なお、植被率、侵入率、破壊率は、河道全面積に対する植生域面積、侵入域面積、破壊域面積と定義している。従って、侵入率と

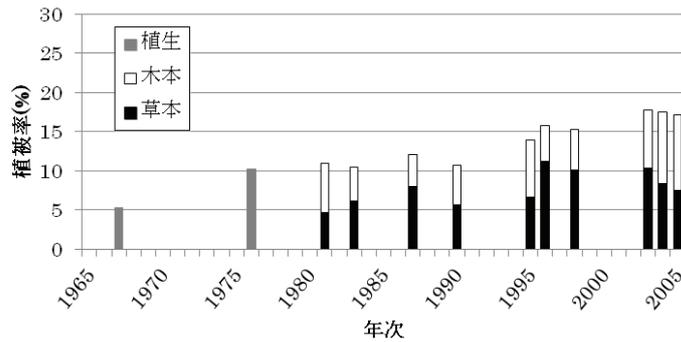


図 3. 3 高水敷の植生変化

破壊率の差が、その期間における植被率の変化と等しくなっている。年最大流量は調査対象区間の直上流にあたる鹿島観測所（河口より 25km）で計測されたものである。1967年と1976年の航空写真は白黒写真であり植生を草本と木本の2つに分離することは困難であったため、草本と木本は分類せずまとめて植生域として判読している。また、最も古い撮影日である1967年の侵入・破壊は算出に必要な前年の航空写真がないため評価していない。図 3. 2 から低水敷において、1976年までは年最大流量が $6000(\text{m}^3/\text{s})$ を超す洪水がたびたび起こっており、植被率は10%未満と小さい。また、植生の侵入率、破壊率も5~7%程度となっており、全植生面積のおよそ50~70%程度が侵入と破壊により交換している。その後、1976~1981年までの間は流量が $5500(\text{m}^3/\text{s})$ 程度の出水が1度あるがそれ以外は $3000(\text{m}^3/\text{s})$ 程度以下と洪水規模が小さく、植生が大きく拡大している。その後1995年までは低流量が2、3年続く期間に拡大、大規模出水がある期間に縮小と、植生の侵入・破壊を繰り返している。そして、1990年から1996年の期間に草本域が大きく増加している。2000年代に入ると植被率は全体として安定してきているが、草本から木本への遷移が生じ、木本域がおよそ8%から13%程度まで増加している。

図 3. 3 より高水敷植生は1967年から1976年にかけて大きく侵入していることが分かる。しかし、それ以降は低水敷と比べると緩やかなスピードで拡大しており、近年の植生域の拡大は主には低水敷における植生増加に因っている。

これより、天竜川下流域は1970年代に高水敷植生の侵入・拡大が生じた。その後、低水敷において1980年代に第一回目の植生拡大が起こり、1990年代に成長速度の速い草本が一気に拡大することにより植生域の拡大が進行した。また、近年は出水に対する抵抗力の高い木本の割合が増加し植生の侵入率・破壊率が多少減少していることから、より安定した樹林帯に変わりつつあると考えられる。しかしながら、植被率に対して、未だに侵入率・破壊率が同オーダーの値を示し、全低水敷植生面積の1/4から半分程度が交換していることから、天竜川は樹林化が進行しつつも植生の交換が活発な河川といえる。

3. 2. 2 植生侵入・破壊の空間分布と植生残存年数

植生域拡大の進行状況を明らかにするため、地被状態の変遷（図 3. 2）より、植生の侵入・破壊の空間的特徴を検討する。また、植生の残存年数を算出し、その変遷も併せて検討を行う。植生の残存年数は、分類した航空写真を全て重ね合わせることで、植生域内のある地点について最初に侵入が判別されてからどれだけの年数残存したかを数える

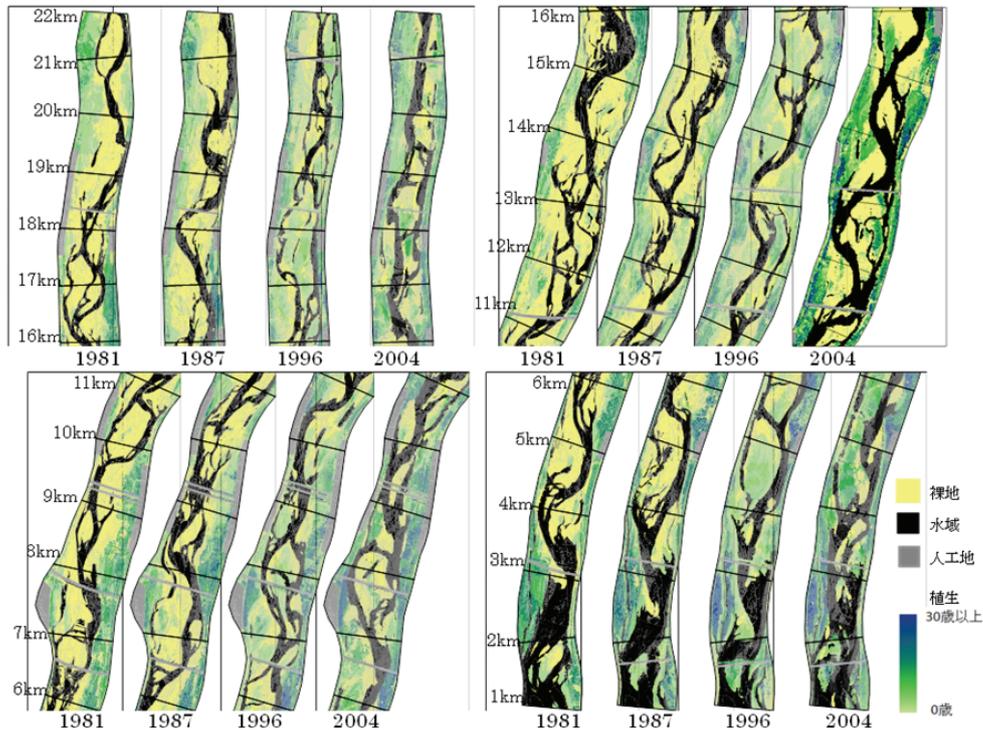


図 3. 4 植生残存年数の空間分布

ことで算出したが、離散的な撮影間隔のどの時点で植生が侵入したかは判読できないため、残存年数を最大と読んだ場合と最小と読んだ場合の中間の値を残存年数として採用することにした。例えば、5年前の航空写真から植生が存在し、それと隣り合う7年前の航空写真で植生が存在しなかった場合、残存年数は7年と5年の平均より6年とする。このように算出した植生残存年数の空間分布を図3.4に示す。

図3.1より天竜川下流域は1960年代まで砂州上にほとんど植生が無かったことがわかる。その後1980年代までに堤防際から植生が侵入するとともに、高水敷が拡大している。図3.4より、高水敷側の植生の残存年数は低水敷のそれより高く、植生の交換は主に洪水の影響を強く受ける低水敷で起こっている。一方で、中州に侵入する植生は多くない。また、図3.4より1980年代までの中州に分布する植生の年齢は全て数年しかないことから、中州では出水のたびに植生が破壊され植生が長く残存できず、植生の交換が頻繁に起こっていたと考えられる。1990年から1996年は植生の拡大期であるが、その期間の侵入域は1980年代までの傾向とは大きく変わり、植生は中州上に大きく侵入している。図3.1の1995年と1996年を比べてみると、1996年に侵入する植生は1995年に侵入した植生域が上流側に向かって拡大することに伴って侵入したものとわかる。2004年の中州上の植生残存年数を見ると、植生群落中心には8年から13年程度の植生域があり、1990年から1996年に侵入した植生が現在まで残存していることがわかる。また、その周辺部には残存年数が数年しかない若い植生が分布している。これより、1990年代以降の天竜川下流域における低水敷の植生域拡大は、中州に侵入した植生が原因で起こったと考えられ、中州への植生侵入をきっかけとして、下流側から上流側に向かって植生繁茂域の面積的な拡大が生じている。1990年代以前は、中州では植生交換が激しく長く残存することは出来なかったが、1995年以降は中州植生域の外縁部では引き続き植生の交換が行われているものの、

中州植生中心部に破壊されにくい安定な植生域が形成され、安定樹林化へと向かっていることが分かる。

3. 2. 3 植生繁茂の縦断的特徴

図3. 5は1kmごとに区切った低水敷の侵入率と破壊率の縦断分布である。1976年から1981年では、河口から1km、14km、19~20kmで植生が大きく侵入している。その後、1983年までに1km、19~20kmで大きな破壊が起こる。1990年か1996年は大幅な植生の拡大期間であり、河道の全域で植生の侵入が見られる。1990年から1995年では特に4km、7~8km、12~17kmでの侵入が大きく、1995年から1996年では4km、12~20kmでの侵入が大きい。その後、1996年から1998年の期間に15~20kmで植生が大きく破壊される。植生の破壊は前年に大きく植生が侵入した区間で生じている。1996~1998年の間には年最大流量としては大きな出水は観測されていないが、この期間には流量3000m³/s以下の小規模な出水が複数回生じており、出水頻度も植生の破壊・侵入に影響を与えることが推察され、今後の課題である。全期間の平均を見ると1km、7km、12~20kmで侵入が大きく、1km、7km、16~20kmで破壊が大きい。一方、8~10kmでは侵入・破壊共に小さくなっている。これらの値が共に大きいことは植生の交換が活発であることを表す。これより、天竜川下流域では時代により植生が交換されやすい区間が多少異なり、1980年代では河口から1km、19~20kmの区間、1990年代では15~20kmが植生の交換されやすい区間だったといえる。平均では1km、7km、16~20kmで交換が激しい。通年で値が高い扇状地区間の上流部(16~20km)は常に植生の交換が起こりやすい物理環境を持っていると考えられる。また、河口から8~10kmは相対的に植生が交換されにくい区間といえる。植生動態のメカニズムに立ち入らない本研究では、植生交換の活発な場所、そうでな

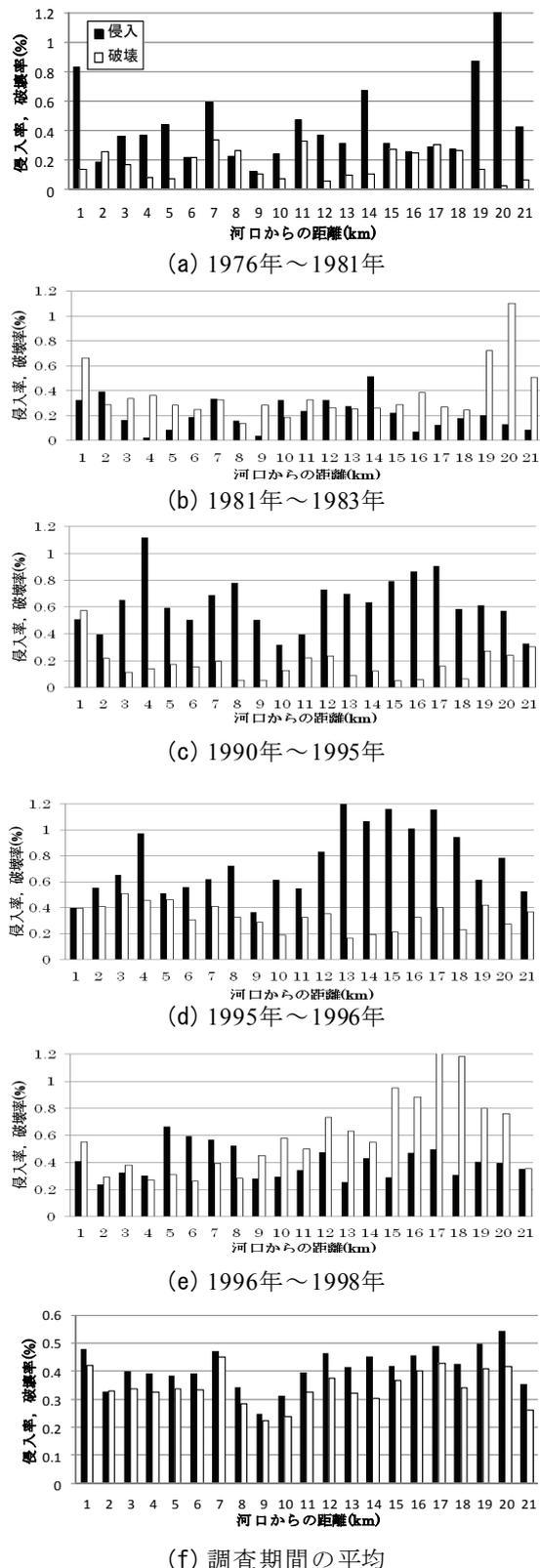


図3. 5 植生の侵入・破壊率の縦断変化

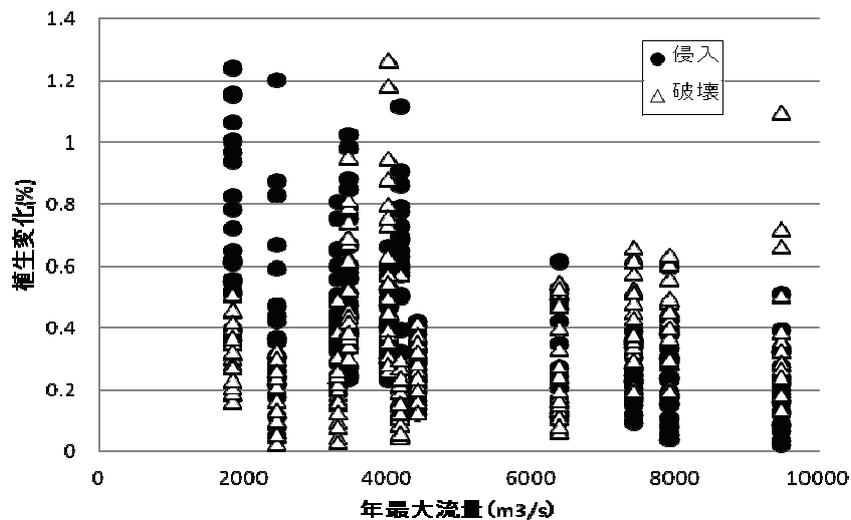


図 3. 6 植生変化と流量の関係

い場所が生じる理由を検討することは困難であるが、このような航空写真分析の実施により、植生動態の観点から見て安定化しやすい場所や変化の激しい場所の抽出が可能であり、今後メカニズム研究を行っていく際の調査サイトの選定や、植生伐採を行う際の留意箇所の抽出（伐採してもすぐに再繁茂しやすい場所の抽出）などへの活用が期待される。

3. 2. 4 植生の拡大と縮小を分ける流量

洪水と植生の拡大・破壊の関係は洪水規模、ピーク流量の継続時間、あるいはハイドログラフの形状など様々な流況特性と関係があると思われるが、まずは本研究では洪水規模と植生動態の関係について検討を行った。図 3. 6 は各年の 1km ごとの侵入率・破壊率と後述の方法より抽出した年最大流量の関係をプロットしたものである。河道内植生は洪水の影響で破壊される⁷⁾ので、一般に流量増加に伴い破壊率は増え、侵入率は減ることが予測される。そのため航空写真の撮影間隔内の最大流量と相関を調べたが明確な関係性が見られなかった。そこで、後年の撮影年から 1 年、2 年と順次遡って植生変化との関係性を検討したところ、過去 2 年間に遡った期間での最大流量と比較したものが、最も相関性が見られたので、その最大流量を図 3. 6 横軸として採用している。過去 2 年間の最大流量との相関性が高い理由については、植生侵入・破壊のメカニズムに基づいた更なる検討が必要であり今後の課題であるが、2 年間という比較的短い期間での最大流量との相関性が高いことは、植生交換が活発な天竜川下流河道の特性に起因していることが推察される。

図 3. 6 より、過去 2 年間での年最大流量が $4000\text{m}^3/\text{s}$ 以下においては、植生の侵入のプロットが破壊のプロットより大きな値となっており、植生の侵入が支配的である。一方、年最大流量が $6500\text{m}^3/\text{s}$ 以上になると、植生の破壊が侵入より大きくなり、植生域が縮小している。以上のことから、植生の拡大と縮小を分ける流量は $4000\sim 6500\text{m}^3/\text{s}$ にあると考えられ、植生の拡大は年最大流量が $4000\text{m}^3/\text{s}$ 以下の期間に活発に生じることが分かる。

表 4. 1 分析対象とした河川・河道区間と使用した航空写真の撮影期間

対象河川	対象区間 河口からの距離(km)	航空写真の撮影期間
天竜川	1～22	1967～2005
豊川	12～25	1961～1987
矢作川	5～33	1947～1992
庄内川	3～26	1946～1990
木曾川	27～57	1945～1993
長良川	22～53	1945～1993
揖斐川	29～55	1945～1993
櫛田川	0～11	1949～2006

表 4. 2 航空写真の撮影年月

天竜川	豊川	矢作川	庄内川	木曾川	長良川	揖斐川	櫛田川
1967年12月	1961年/月	1948年6月	1946年6月	1945年/月	1945年/月	1945年/月	1949年10月
1976年/月	1974年/月	1955年/月	1961年3月	1955年/月	1955年/月	1955年/月	1961年7月
1981年3月	1976年11月	1964年1月	1965年1月	1959年/月	1970年/月	1976年5月	1975年11月
1983年6月	1985年1月	1974年11月	1974年1月	1974年/月	1979年/月	1981年5月	1983年11月
1987年11月	1987年10月	1976年11月	1977年8月	1979年/月	1981年/月	1987年/月	1995年4月
1990年/月		1979年10月	1980年/月	1981年5月	1987年/月	1993年/月	2006年5月
1995年2月		1985年1月	1987年12月	1987年/月	1993年/月		
1996年/月		1987年12月	1990年8月	1993年/月			
1998年10月		1992年3月					
2003年12月							
2004年11月							
2005年9月							

4. 中部一級水系河川群間の比較

4. 1 分析方法

本章では天竜川での植生動態の特徴を、他の河川との比較により抽出することを目的とし、前章と同様の航空写真分析を中部の一級水系河川群を対象に実施した。分析対象区間は砂州が発達し植生の繁茂が活発と思われる扇状地区間を対象とする。表 4. 1 には対象河川と対象区間、航空写真の撮影期間を、また、表 4. 2 には使用した航空写真の撮影年月を示す。

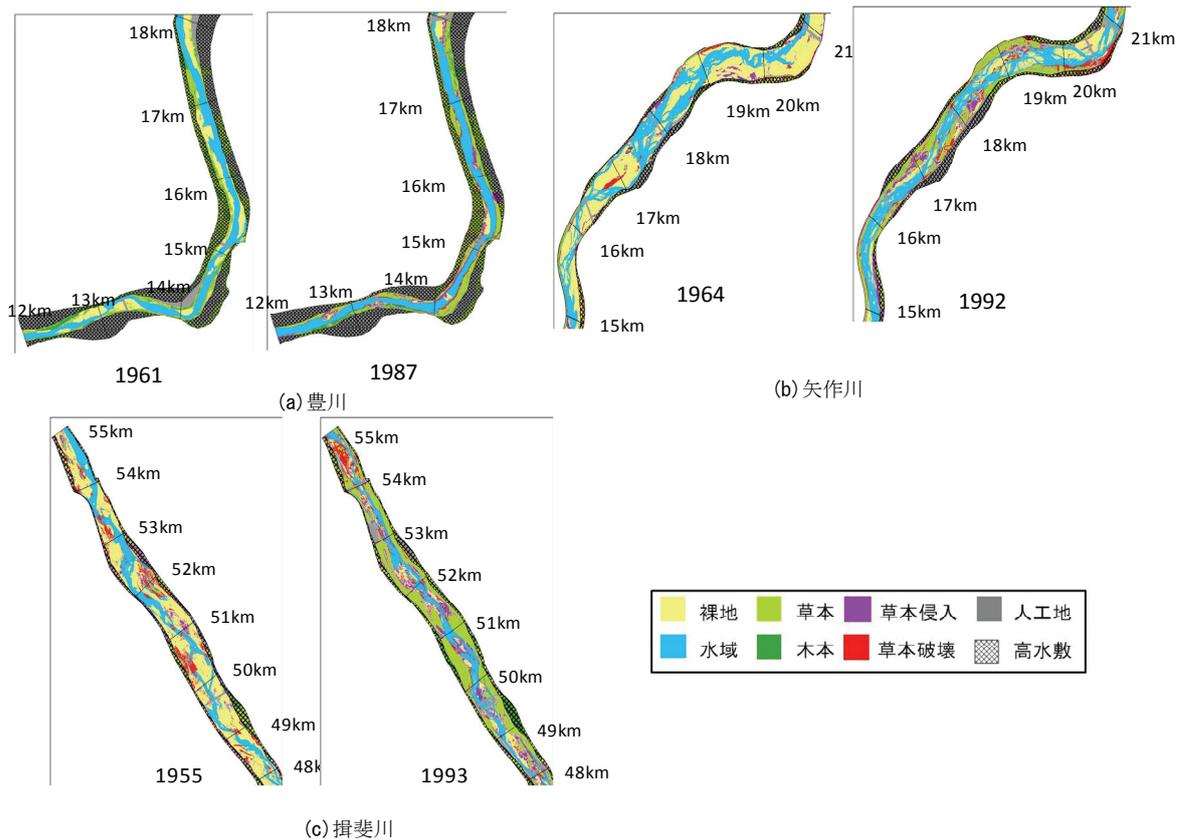


図 4. 1 地被状況の変化

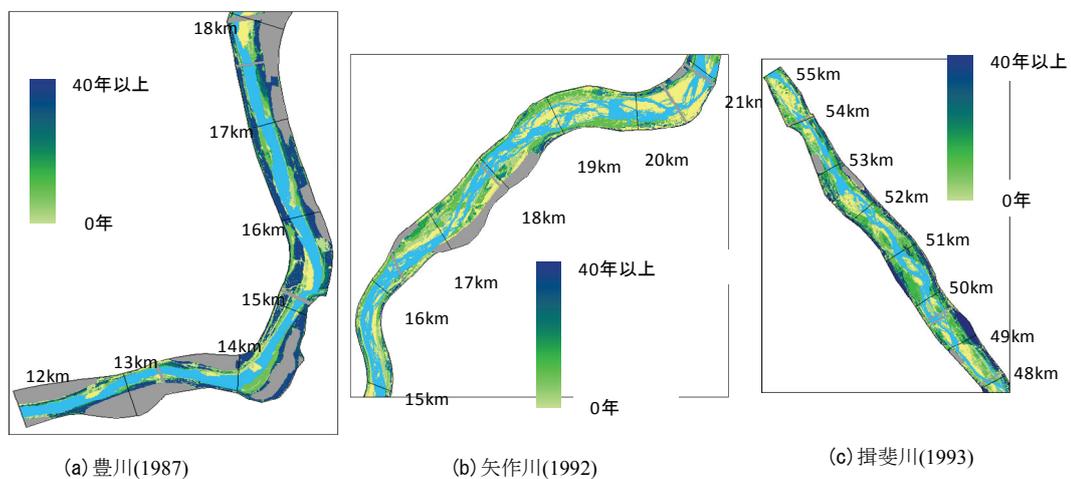


図 4. 2 植生の残存年数

4. 2 各河川の植生動態の特徴

前章にて示された通り、航空写真分析を通じて得られる情報は、1)地表被覆状況の経年変化、2)植生の拡大・破壊、3)植生の残存年数である。ここでは、豊川、矢作川、揖斐川について、1955～1964 頃の比較的古い撮影年と 1987～1993 の比較的近年の撮影年における地被状態の違いを図 4. 1 に、比較的近年の撮影年時に分析した植生の残存年数分布を図 4. 2 に示す。

図 4. 1 から分かる通り、1950～1960 年代には、砂州上に裸地域が多く見られるが、比較的近年の撮影においては、植生が優占している。この傾向は今回分析した 8 つの一級水系のうち、庄内川、櫛田川を除き共通した傾向であり、全国で報告されている植生域の拡

大が、中部の一级水系でも同様に生じていることが分かる。なお、庄内川については、植生域の拡大は見られたが、次章で示す通り、その植被率の増加は5%以下であり、緩やかな植生域の拡大であった。また、櫛田川については、分析対象とした最初の航空写真（1949撮影）から植被率が22%程度と高く、その後の変化は小さかった。

図4. 2の植生の残存年数を見ると、残存年数が30年程度を超える安定した植生域が高水敷側を中心に繁茂しており、単なる植生域の拡大から安定樹林域へと遷移していることが分かる。3河川の比較からは、豊川、揖斐川に比べて、矢作川では残存年数が小さく、このことは、次節で分類するように、矢作川では植被率は増加しているものの、植生交換が活発であることに起因している。

4. 3 植生動態の河川間比較

本章では河川別に得られた植生変化の変遷を比較し、中部の一级河川群における植生拡大の類型化を行う。図4. 3に植被率、拡大率、破壊率、変化率（＝侵入率と破壊率の絶対値の和）の経年変化を示す。図4. 3より対象河川の植生変化は増加傾向にある河川と、比較的安定している河川の大きく2つに分けられる。初期値と比較して最終的な植生変化が5%未満となった庄内川と櫛田川は植生域が安定している河川といえる。これらの河川では変化率も小さく植生の交換は活発でない。一方、その他の河川は植生が増加傾向にある河川といえる。増加傾向を見ると長良川を除き、1970年代から80年代にかけて急速に植生が増加している。その様相は、天竜川と矢作川では植生が急速に拡大し、その後、縮小するというパターンを繰り返しながら増加しており、豊川、木曾川、長良川、揖斐川では、植生が拡大し始めると縮小することはほとんどなく、一方的に植生拡大が進行していく。変化率を見ると、植生が拡大と縮小を繰り返しながら増加していく河川では、植生拡大後も15%を超える変化率を示し、依然植生の交換が活発であるといえる。一方的に植生が増加する河川の中では、豊川、木曾川では変化率は大きくない。木曾川では90年代になっても変化率が10%を超えているが、これはほとんどが植生侵入によるものであり、植生が入

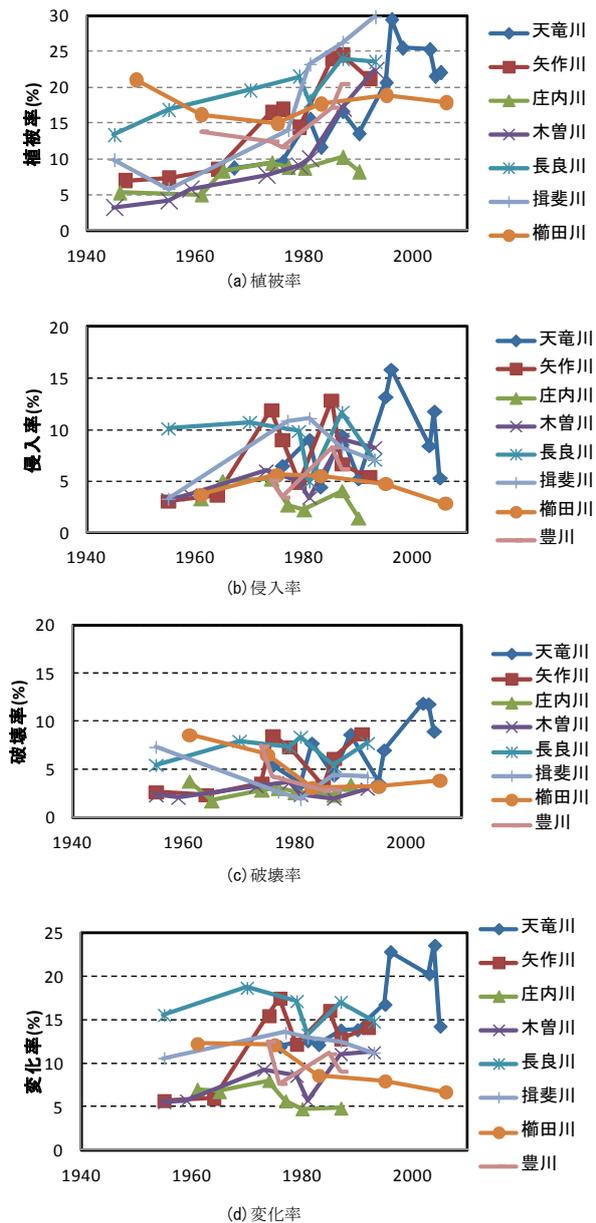


図4. 3 植生動態の河川間比較

れ替わるという意味とは異なるため、この河川は植生の交換は活発でないといえる。一方、長良川と揖斐川では変化率が大きく植生の交換が活発であるが、破壊量に対して侵入量が卓越する傾向にあり、その結果として長期的にみると植生が増加したことが分かる。

これより、植生拡大の進行状況を4つに分類した。①植生域が安定している河川、②植生の交換が活発で、侵入と破壊を繰り返しながら徐々に植生が増加していく河川、③植生の交換は活発だが、破壊に対して侵入が卓越しており一方的に植生が増加する河川、④植生はあまり交換されず、侵入のみが大きいため一方的に増加する河川、であり、中部の一級河川は以下のように分類される：①：庄内川・櫛田川、②：天竜川・矢作川、③：長良川・揖斐川、④：豊川・木曾川。

近年、全国の河川で河道内の植生域の拡大が報告されているが、上記の結果より、植生拡大といっても、その進行過程は河川によって異なることが分かる。

4. 4 植生交換の活発さと河道・流況特性の関係

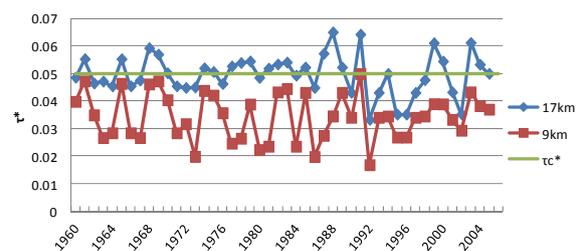
4. 4. 1 河床材料の移動頻度と植生交換の関係

ここでは植生変化が大きく流量・横断面の時系列データが豊富に揃っている天竜川と矢作川で解析を行う。対象区間はそれぞれの河川で植生変化が最も大きかった区間と小さかった区間とし、表4. 3のように設定した。

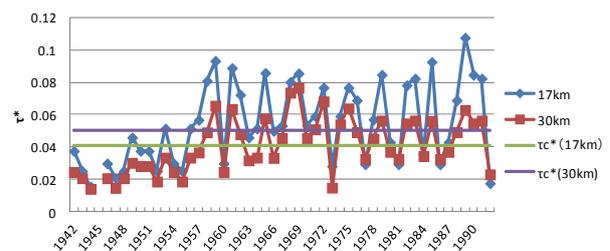
表4. 3 解析対象区間

	植生変化の大きかった区間 (km)と河床材料粒径(mm)	植生変化の小さかった区間(km)と河床材料粒径 (mm)
天竜川	17km, 18mm	9km, 18mm
矢作川	17km, 1.8mm	30km, 4.8mm

図4. 4 (a)に天竜川の、図4. 4 (b)に矢作川の対象区間における年最大流量時の無次元掃流力の分析結果を示す。図中には対象区間の河床材料粒径(60%粒径)より算出した無次元限界掃流力 τ_c^* を同時に示す。また、表4. 4に河床材料の移動頻度を示す。植生交換の活発な区間は植生交換の少ない区間と比べて無次元掃流力が大きく、河床材料の移動が活発である。河床材料の移動頻度にも明確な差が確認され、天竜川では45年のうち植生交換の活発な区間は22回、植生交換の少ない区間は0回、矢作川でも植生交換の活発な区間は植生交換の少ない区間に対して移動頻度が2倍と



(a)天竜川



(b)矢作川

図4. 4 年最大流量時の無次元掃流力

表 4. 4 河床材料の移動頻度

	植生変化の大き かった区間	植生変化の小さ かった区間
天竜川	22/45(年)	0/45(年)
矢作川	32/49(年)	16/49(年)

なっている。これより、河床材料の移動が生じやすい区間で植生交換が活発であることが分かる。

4. 4. 2 中規模河床形態の発生領域と植生交換の関係

交互砂州や複列砂州等の砂州地形は中規模河床形態と呼ばれ、どのような砂州地形が形成されるかは、河川の横断方向の流れの不安定性から、 $BI^0.2/h$ と無次元掃流力 τ^* によって区分できることが知られている。砂州地形は、河道内植生の生息基盤そのものであるため、砂州の形態の変化は植生動態に影響を与えることが推察される。そこで、砂州の発生領域区分図上に調査対象河川の河道特性をプロットし、その経年変化を調べることで、砂州形態と植生繁茂の関係性を検討することとする。検討の対象河川は植生変化が大きく流量データの揃っている河川とし、植生拡大に伴う物理環境の変遷も検討するために植生拡大の前後の年で解析する。対象区間は前節と同様に植生変化が最も大きかった区間と小さかった区間とし、表 4. 5 のように設定した。

表 4. 5 解析対象区間と対象年

	植生変化の大きか った区間(km)	植生変化の小さか った区間(km)	対象年 (植生拡大後)	対象年 (植生拡大前)
天竜川	17	9	1997, 1989	1976
矢作川	17	30	1989, 1975	1965
木曾川	53	40	1993	1973
長良川	35	40	1993	1970
揖斐川	51	42	1993	1977

図 4. 5 に不安定解析による中規模河床形態の領域区分線上に各河川の分析結果をプロットしたものを示す。凡例について、植生拡大前のプロットを中抜きで、拡大後のプロットを塗りつぶしで示す（3年代でプロットした天竜川（1989年）と矢作川（1975年）の中間年のプロットは薄い色で塗りつぶして表示している）。図より植生の交換されやすい区間はそのほとんどが単列砂州よりの複列砂州発生領域にあり、一部が単列砂州領域にあるが、どの河川でも比較的近い位置にプロットされている。一方、植生交換の少ない区間は木曾三川では砂州非発生領域付近に、天竜川と矢作川は複列砂州領域にある。木曾三川の植生交換の少ない区間は、両岸が広く高水敷化し、低水路幅が非常に小さくなっているため砂州非発生領域となっており、植生の立地基盤となる砂州そのものの形成が不活発であることが、小さな植生変化に繋がっていると考えられる。一方、天竜川と矢作川は川幅も広く

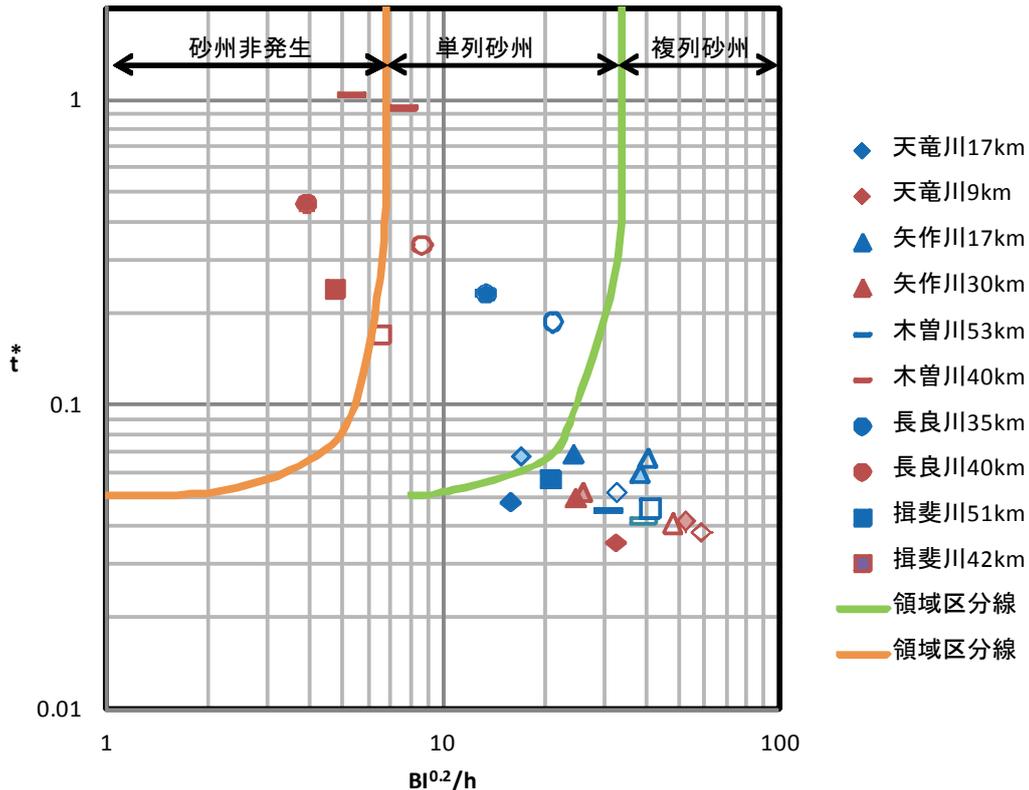


図 4. 5 砂州発生領域区分図上での河道特性の変化

土砂移動が活発な河川であるが、植生交換が活発な区間とそうでない区間を比較すると、植生交換が活発な区間の方がより単列砂州領域に近いことがわかる。また、植生拡大前後で比較すると、植生拡大後にはほとんどのプロットが左上方向へシフトしており、植生交換が活発な区間では単列砂州領域または単列砂州領域の区分線近くまで変化している。これより、人為的な高水敷造成や高水敷上の植生拡大によって、出水に有効な川幅が減少し、複列砂州の発生領域からより安定的な単列砂州方向に河道特性が変化したことが、植生の安定した生息基盤の形成と植生拡大を引き起こしたものと考えられる。

5. 植生侵入・破壊過程に関する数値解析

5. 1 数値解析モデル

本章では侵入・破壊といった植生動態と河道特性の関係を検討するために、植生の侵入・拡大・破壊を考慮した河道地形・植生動態数値解析モデルを開発する。本研究で用いる数値計算モデルは、洪水時における河道内の流れや土砂移動状況を解析する河床変動モデルと平水時の植生の成長・種間競争・植生域拡大を解析する植生繁茂種間競争モデルによって構成されており、計算フローは図 5. 1 のとおりである。モデルの概要を以下に示す。

5. 1. 2 流れ・河床変動モデル

流れ場の解析には、一般曲線座標系(ζ, η)上で記述された水深平均された Reynolds 方程式を用いた(長田⁸⁾)。河床せん断力は Manning 則より与え、河道内植生による形状抵抗に

については抵抗係数と植生密度の関数として運動方程式中に入れられている⁹⁾。また、流砂形態として掃流砂を考え、縦断方向にはMPM式¹⁰⁾、横断方向には長谷川式¹¹⁾をそれぞれ用いて掃流砂量を計算し、河床高の変化を求める。

5. 1. 3 種間競争・増殖・拡大モデル

草本類－木本類の種間競争・増殖・拡大モデルに関しては、植物種間の競争が主に光合成に必要となる日射の獲得によって引き起こされるものとした。草本類が高さにおいて優位にたてば、木本類へ到達する日射量は草本によって遮蔽されることにより減少し、反対に木本類が高さにおいて優位にたてば、草本類へ到達する日射量は木本によって遮蔽されることにより減少する。

草本類、木本類の成長については、Boysen Jensen¹²⁾より光合成による生産量と呼吸による代謝量の差で表されるとした。植生繁茂域の平面的な拡大については、どのような拡大をしていくのかについて明確に把握されていないのが現状である。そこで今回は、植生の拡大を拡散の形で表現するものとし、その拡大速度については現地の植生繁茂変遷との整合性を持たせるように拡散係数を設定することにした。草本類、木本類の単位時間あたりのバイオマスの変化量は次式のようになる。

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = P_i - R_i + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xi} \frac{\partial M_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yi} \frac{\partial M_i}{\partial y} \right) \quad (5.1)$$

ここに、 M_i ：バイオマス、 P_i ：生産量(光合成量)、 R_i ：代謝量(呼吸量)、 k_{xi} 、 k_{yi} ： x 方向、 y 方向の拡散係数であり、添え字 $i(=g, t)$ は草本類(g)、木本類(t)を区別する指標である。

植生群落内における単位高さの植生層による光合成速度は以下の Monod 型関数で与えられるものとする¹³⁾。

$$p_i = \frac{I}{I + I_{ci}} p_{maxi} \quad (5.2)$$

ここに、 p_i ：光合成速度、 I ：任意の群落深さ z での照度、 I_{ci} ：照度に対する半飽和定数、 p_{maxi} ：最大光合成速度である。

植生群落内における日射の獲得量については、MONSI & SAEKI¹⁴⁾より以下の微分方程式で与えられるものとする。

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\lambda I \quad (5.3)$$

ここに、 λ ：係数である。式(5.3)より植物群落内の日射量は減衰の形で表される。係数 λ は以下の形で表される。

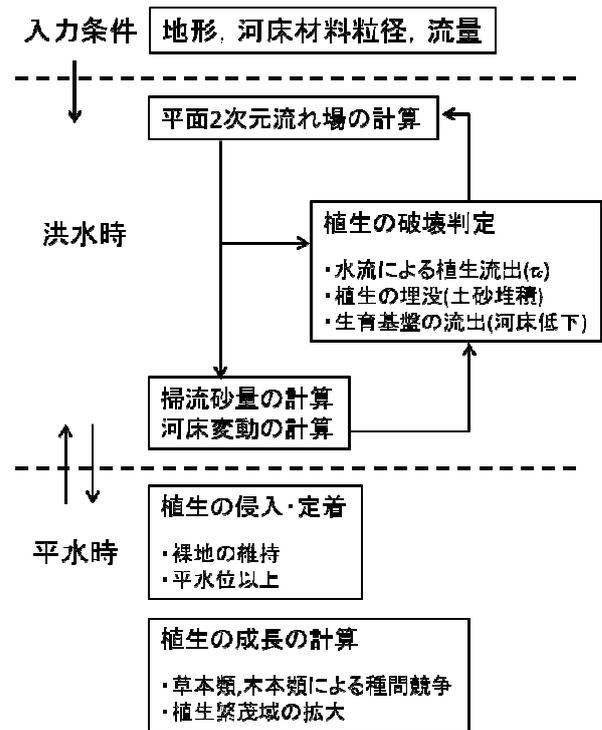


図5.1 数値計算モデルのフロー

$$\lambda = k_i F_{ci} \quad (5.4)$$

ここに、 k_i ：吸光係数、 F_{ci} ：積算葉面積指数（葉層の任意の深さまでの個葉全部の葉面積合計値を群落占有土地面積で割った値）である。日射の獲得による種間競争を考慮するため、草本類と木本類が混在している群落深さについては、 λ が草本、木本それぞれの吸光係数と積算葉面積指数の積を足し合わせた値で表されるものとする。式（5.3）に種間競争を考えた λ を用いた場合、単一種を考えた場合より群落深さにおける照度の減衰は激しく、種間競争による草本、木本の日射の獲得量の減少について表現している。また、後述する植生の幹部については、葉が存在しないものとしており、光合成による生産が行われていないので照度を考える必要がなく、幹部での照度は 0 として考え、照度の減衰もないものとした。

以上の関数に基づき、式（5.2）で表される単位体積あたりの光合成速度を、群落高さから地表面まで積分することにより単位面積当たりの生産量 P_i を求めた。植生の地上部高さを l_i としたときの生産量 P_i は以下のようなになる。

$$P_i = \int_0^{l_i} p_i dz \quad (5.5)$$

植生の緑部、茎、根の高さの比は一定のまま成長するものとし、それぞれの比を l_{li} 、 l_{ti} 、 l_{ri} ($l_{li} + l_{ri} = 1$) とすると、植生の地上部高さは以下のようなになる。

$$l_i = \frac{(l_{li} + l_{ti})M_i}{\rho_i A_i} \quad (5.6)$$

ここに、 ρ_i ：植生の比重、 A_i ：植生の断面積密度である。

また、代謝量 R_i については、McCree¹⁵⁾より呼吸量が成長呼吸量と維持呼吸量との和で表されるものとして以下の式を用いた。

$$R_i = \gamma_i P_i + \mu_i M_i \quad (5.7)$$

ここに、 γ_i ：成長呼吸係数、 μ_i ：維持呼吸係数である。

5.1.4 植生侵入条件

植生の侵入は流水散布を想定し、平時の水位と散布期の平均水位の間において種子が漂着すると仮定する。裸地が更新されずに T_i 年経過した場合には植生が定着する¹⁶⁾とした。航空写真を用いた検討から裸地継続年数を草本は 2 年、木本は 5 年とした。与える初期バイオマスについては不明な点が多かったため、冠水頻度に応じて水際で高く比高が高くなるにつれ減少するものとして、次式により与えた(図 5.2)。

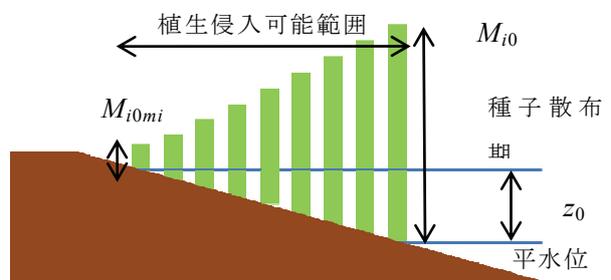


図 5.2 植生侵入の概念図

$$M_i = \frac{z_0 - z}{z_0} M_{i0} + M_{i0min} \quad (5.8)$$

ここに、 z_0 ：平水位と散布期水位の比高差、 z ：平水位と植生定着個所の比高差、 M_{i0} ：水際における初期バイオマス、 M_{i0min} ：冠水頻度 0 の箇所における初期バイオマスである。これらの値は植生が残存するか破壊されるかに大きく影響を及ぼすと考えられ、今後検討する必要がある。

5. 1. 5 植生破壊条件

植生の破壊は洪水流による地形解析時に考えることとする。植生の破壊には土砂堆積による植生の埋没と河床低下による生育基盤の流出、水流による植生の流出が考えられる。植生の頂部まで土砂が堆積するとき、その植生は埋没したと考える。土砂の堆積が植生高さまで至らない場合には、埋没した分だけバイオマスの地上高さが減少するものとし、平水時での種間競争の解析の際にはその地上高さに基づくバイオマスを与える。河床が低下していく過程でその変化量が植生の根の深さよりも大きい場合、あるいは、植物種毎に流失限界となる底面せん断力 $\tau_c^{15)}$ を超える場合には、その地点での植生は流出したと考える。なお、本モデルでは植生埋没をバイオマスの減少で表現しているため、最大高さに達した植生が埋没後に再成長すると考えられ、今後改良する必要がある。

5. 2 解析条件

天竜川下流域では、河床の主材料は礫で、植生域には細砂が堆積しており、混合粒径としての土砂の取り扱いが必要となるが、本研究で開発したモデルでは、まだ混合粒径の効果を取り入れるまでには至っていない。そのため、天竜川と同様に近年樹林の繁茂が確認され、砂州地形の変化が見られる矢作川下流域の条件で計算を実施した。図 5. 3 に矢作川下流域の砂州上における樹林化の様子を示す。河道に生息している植物は主にツルヨシなどの高さが 1~2m 程度の草本類と、タチヤナギなどの高さが 5~10m 程度の木本類に分けることができる。側岸部の水際や中洲には主に草本類が繁茂しており、河道の側岸部で安定化している場所では樹木群が形成され樹林化している(図 5. 3 (a)、(b))。しかし近年では、水際や砂州下流部においても木本類の繁茂が

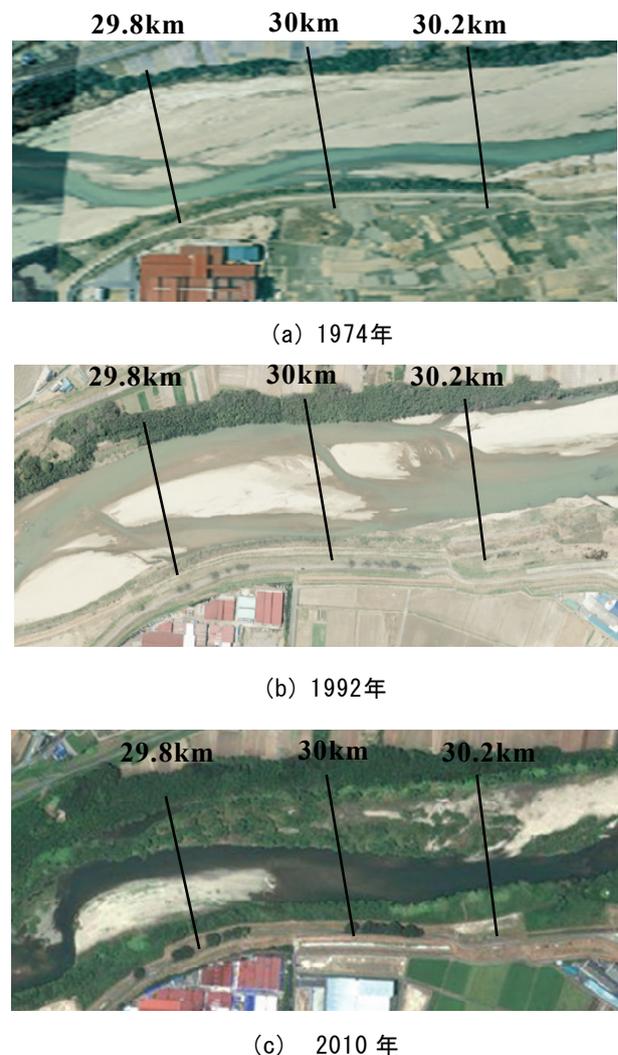


図 5. 3 計算対象地付近の植生繁茂変遷

見られる(図5. 3(c))。

河床勾配は1/1000、粒径は一様粒径で5mm、河道断面は複断面水路の直線河道とする。低水路には砂州が発生している状況を想定する。砂州地形は年最大流量に大きく支配されていると考え、平均年最大流量程度の1200m³/sで最初に砂州を形成させる。植生を伴う河床変動では浮遊砂も重要な役割を担っているが、計算を簡便にするため砂州地形変化により大きな役割を持つ掃流砂のみで河床変動を行う。なお、形成された砂州は、波長1.5km、波高2~2.5m程度であり、実河川で形成されている砂州と近い値となっている。また、河床変動は低水路のみで生じ、高水敷上では河床の変動はないものとし、初期条件として砂州上に植生が繁茂していない状態を想定した。

観測所のデータを用いた検討から出水時間はピーク流量によらずほぼ一定であったため、 $T=40(h)$ とした。平水流量は年によらず常に30m³/sとした。本モデルでは、1年のうち年最大流量の洪水が1度だけ発生するとし、それ以外については平水時と仮定する。洪水時のハイドロについては次式を用いて与えた。

$$Q(t) = (Q_p - Q_0) \sin^2\left(\frac{t-t_0}{T} \pi\right) + Q_0$$

(5. 9)

ここに、 Q_p : ピーク流量、 Q_0 : 平水流量、 t_0 : 出水開始時刻、 T : 出水時間である。また、平水時の流量は変動せず、常に一定流量を与える。洪水時には河床変動の計算、平水時には植生の種間競争・増殖・拡大の計算のみをそれぞれ行う。

植生の生理・形状特性に関しては、草本類としてツルヨシ、木本類としてタチヤナギを想定したパラメータを用いた。

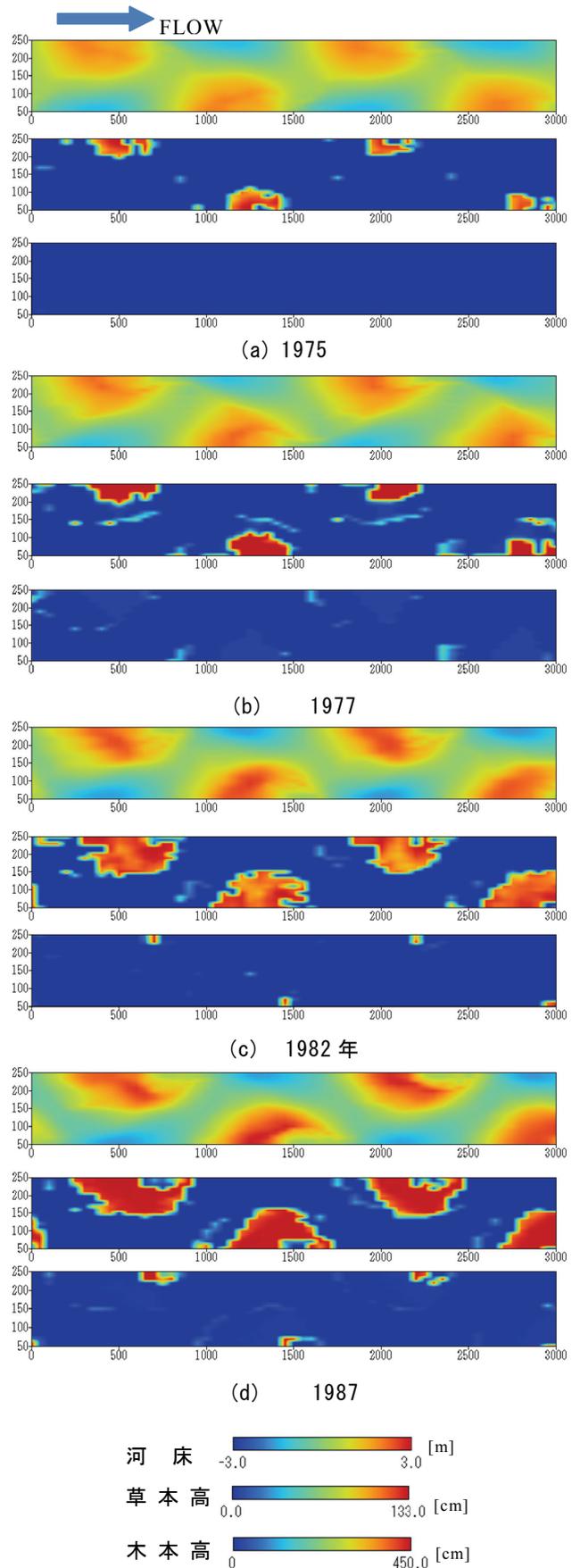


図5. 4 砂州地形・植生の経年変化
(上: 河床高, 中: 草本高さ, 下: 木本高さ)

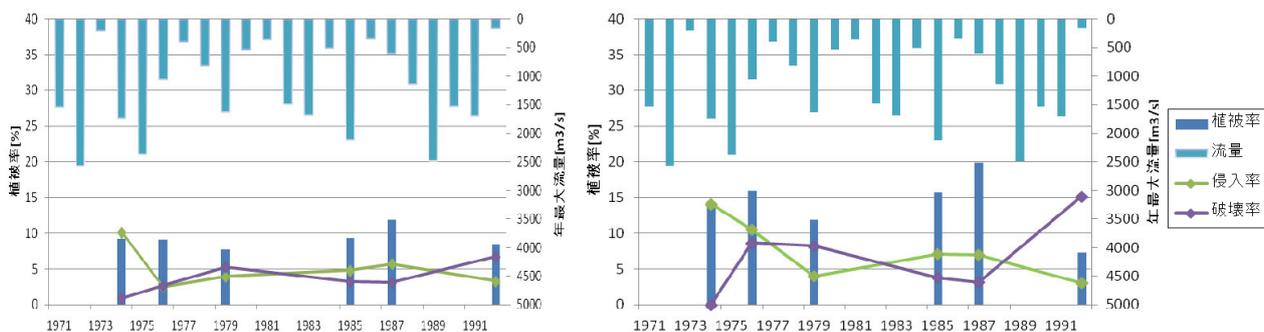


図 5. 5. 植被率，侵入率の経年変化

(左：実測値，右：計算結果)

また流れの解析において、植生の形状抵抗に関しては植生の密度パラメータは草本類・木本類とも常に一定で密度の変化はおこらないものとし、それぞれ 0.03 、 $0.02(\text{m}^{-1})$ とした。植生の成長において、季節の変化を考えず群落上の照度は常に一定とし、その値は日陰を想定し $9500(\text{lx})$ とした。

5. 3 解析結果と考察

5. 3. 1 砂州地形と植生繁茂の時空間的変遷

図 5. 4 に砂州地形と植生の経年変化を示す。図 5. 4 (a) を見ると、草本類が砂州下流側に繁茂していることが分かる。これは、砂州に侵入した植生が、砂州の上流側では流速が速いために流水や土砂移動によって破壊され易いのに対し、砂州下流側ではそれらの影響を受けにくく残存するためだと考えられる。また図 5. 4 (b)～(d) を見ると、草本・木本が砂州の水際付近でライン状に繁茂している。平水位付近では河床変動を受けやすく植生も破壊され易く、種子散布期の平均水位付近では侵入できる植生のバイオマスが小さいためわずかな河床変動でも破壊される(図 5. 2 参照)。このため、平水位と散布期平均水位の中間部で優占的に植生が残存する。これらの植生繁茂状況は実河川の砂州上でも見られ、実際の現象を定性的に表現できていると考えられる。図 5. 4 (a) から (d) までの砂州河床高を見ると、砂州はほとんど移動しておらず固定されており、植生繁茂域の河床高も上昇し横断比高差が増大している。これは植生の流速低減効果により植生域での掃流力が限界掃流力以下となり土砂堆積が促されるためである。河床上昇に伴い植生が埋没してしまうが、残存した植生は冠水頻度の低下により出水時の破壊機会は減少する。このように植生の存在により安定した河床が形成され、出水時に破壊されにくく植生繁茂に有利な環境へと変化していると考えられる。

5. 3. 2 実河川データとの比較

本数値解析では、実河川の河道条件を単純化した解析を実施しており、詳細な植生空間分布等の比較を行うことは難しいため、大局的な植生動態として植生域が河道に占める割合、侵入率や破壊率などについて計算と実測の比較を行う。ここでは、航空写真を使用し、第 3 章と同様の手法を用いて求めた現地の植生の植被率、侵入率、破壊率の経年変化を比較する。図 5. 5 に 1971 年から 1992 年までの年最大流量と植被率、侵入率、破壊率の経年変化の実測と計算結果を示す。これらを比較すると、植被率に全体的に若干過大評価と

なっているが、経年的な変化の傾向は表現できていると判断できる。本解析では簡略化のため、1年のうちに洪水が1度しか発生しない場合を考えているが、実際には同年に複数の洪水が発生する年も存在する。このようなケースでは、植生が侵入・定着できず破壊されてしまう範囲が増え、植被率が低くなると予想される。また、植生の侵入率と破壊率について見ると、それらの値の大小については現地の値と同様の関係となっており、植生域の拡大、縮小の傾向については表現できている。

6. 結論

本研究で得られた主たる成果を以下に述べる。

第3章で、航空写真分析を出来るだけ活用して河道内植生の広域的、長期的な動態を把握する手法を検討した。その結果、天竜川下流域における河道の植生域拡大の特徴について以下の知見が得られた。

- 1) 1960年代までは河道内の植生は少なかったが、1970年代に高水敷で、1980年代に低水敷堤防際から植生が侵入・拡大した。一方、1980年代までは中州では後年まで残存する植生は少なく出水のたびに植生は破壊され交換が激しかった。1990年代に入ると中州上に草本が侵入し河道の植生域の拡大が進行した。
- 2) この中州上の植生は2000年代まで残存しており、植生域内の木本の割合が増加し、より安定した樹林帯に変わってきている。しかし、樹林態の周辺部において依然、植生域の侵入・破壊が頻繁に発生し植生の交換が活発である。
- 3) 河口から16~20kmの区間は植生の交換が起こりやすく、8~10kmの区間では植生の交換が比較的小さい。
- 4) 対象区間における植生の拡大と縮小を分ける流量は4000~6500m³/sの間にあり、流量が4000m³/s以下の期間が続くことが河道内の植生拡大につながる。

また、本研究で提案する手法は、航空写真、流量データ、横断地形データのみを用いるものであるため、全国の多くの河川において、同手法の適用が可能である。本手法の適用により得られる情報としては、従来まで調査されてきた植被率、草本・木本等の植生タイプの違いに加えて、①：植生の侵入率・破壊率、②：植生の残存年数、③：①、②の空間分布、および④植生の拡大と破壊を分ける流量規模である。現在、国内の多くの河川において樹林化の進行が報告されているが、各河川の樹林化の特徴を、単に植被率増加の観点からのみではなく、侵入率・破壊率の観点からも検討を加えることにより、一方的に植生が拡大する場合や、頻繁に交換を生じながら拡大する場合など、植生拡大の類型化が可能になることが期待される。

第4章では中部の一級河川群を対象として、河川ごとの植生動態の特徴および河川間の比較を行い、植生拡大の体系的整理を行った。得られた主たる結論は以下の通りである。

- 1) 植生拡大の進行状況は河川ごとに異なり、中部の一級河川では以下の4つに分類された。
 - ①植生域が安定している河川：庄内川・櫛田川
 - ②植生の交換が活発で侵入と破壊を繰り返しながら徐々に植生が増加していく河川：天竜川・矢作川

③植生の交換は活発だが、破壊に対して侵入が卓越しており一方的に植生が増加する河川：長良川・揖斐川

④植生はあまり交換されず、侵入のみが大きいため一方的に増加する河川：豊川・木曾川

- 2) 河床材料の頻繁な移動が活発な植生交換につながる。
- 3) 中規模河床波の発生領域区分図上で、複列砂州と単列砂州の領域の区分線付近に位置する河道区間で植生交換が活発に生じる。

第5章では、種間競争と拡大を考慮した植生繁茂動態と河床変動の解析モデルを構築し、砂州地形と植生変化について数値解析を行った。入力条件や解析手法ともに簡略化したモデルではあるが、現地の植被率の変化や植生の繁茂状況をある程度表現できた。また、砂州地形と植生変化から、河道内植生を伴う河床変動では砂州の固定や比高差の増大など河道特性の変化が生じることを示した。

以上の成果から、河道植生域の拡大を抑制するには、河床材料の移動頻度を増加させるような河道横断面の設定が必要であること、本来、複列砂州が形成されていた河道では、砂州発生形態が単列砂州へと変化しないような低水路幅の確保が必要であることが示唆された。

参考文献

- 1) 藤田光一, Moody, J. A., 宇多高明, Meade, R. H. (1996) : ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小, 土木学会論文集, No.511, pp.47-62.
- 2) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行, 岡田利志 (1999) : 礫床河川の河道内樹林化に関する一考察, 水工学論文集, 第43巻, pp.971-976.
- 3) 辻本哲郎, 村上陽子, 安井辰弥 (2001) : 出水による破壊機会の減少による河道内樹林化, 水工学論文集, 第45巻, pp.1105-1110.
- 4) 青木信哉, 田中規夫, 八木澤順治 (2007) : 洪水攪乱影響の違いがツルヨシの形態的特徴と繁茂量・拡大幅に与える影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.1255-1260.
- 5) 藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也 (2003) : 扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No.747, pp.41-60.
- 6) 戸田祐嗣, 高松伶介, 辻本哲郎, 土屋允人 (2007) : 天竜川下流域における地形変化と植生繁茂の変遷について, 河川技術論文集, 第13巻, pp.201-206.
- 7) 瀬崎智之, 服部敦, 近藤和仁, 徳田真, 藤田光一, 吉田昌樹 (1991) : 礫州土草本植生の流出機構に関する現地調査と考察, 水工学論文集, 第44巻, pp.825-830.
- 8) 長田信寿 (1999) : 一般座標系を用いた平面二次元非定常流れの数値解析, 水工学における計算機利用の講習会, 講義集.
- 9) 池田俊介・佐野貴之・福元正武・川村一弘 (2000) : 複断面開水路に生じる大規模水平渦と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No.656, pp135-144.
- 10) Meyer-Peter, E. & Muller, R. (1948) : Formulas for Bed-Load Transport, Proc, 2nd Cong. Of Int. Assoc. for Hydr. Struc. Res., pp39-64.
- 11) 長谷川和義 (1983) : 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文.
- 12) Boysen Jensen P. (1932) : Die Stoffproduktion der Pflanzen. Jena.

- 13) Tamiya, H (1951) : Some theoretical notes on the kinetics of algal growth, Bot. Mag. Tokyo 64, pp163-173.
- 14) Monsi, M. & Saeki, T. (1953) : U̇ber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany 14, pp22-52.
- 15) McCree, K. J. (1970) : An equation for the rate of respiration of whiteclover plants grown under controlled conditions. — In Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity (ProcIBP/PP Technical Meeting, Trehon), pp. 221-229.
- 16) 八木澤順治・田中規夫 (2009) : 河道内植生の洪水による破壊・再生を考慮した植生動態モデルの開発, 水工学論文集, 第 53 卷, pp.1171-1176.