

4. 河道の植物群落調査とその河川工学的 意義に関する研究

1. はじめに
2. 河道植生調査法と手取川扇状地区間における植生調査
 - 2.1 概説
 - 2.2 野外調査の方法
 - 2.3 調査結果とその考察
 - 2.3.1 調査結果の概要
 - 2.3.2 メッシュデータの作成
 - 2.3.3 河原の地形的特徴
 - 2.3.4 各河原の植生群落特性
 - 2.4 旧流路に沿う植物・河道特性調査
 - 2.5 植物群落調査についてのまとめ
3. 洪水時の植物の変形についての調査研究
 - 3.1 概説
 - 3.2 植物の変形と流れの相互作用系の解析
 - 3.2.1 植生上の流れの数値計算
 - 3.2.2 植生変形のモデル
 - 3.2.3 流れのモデルと植生変形のモデルのカップリング
 - 3.3 実植生の剛性・密生度調査と抵抗評価
 - 3.3.1 実植生の剛性・密生度調査
 - 3.3.2 実植生に覆われた流れの抵抗評価
 - 3.4 水流による植物の変形と抵抗則についてのまとめ
4. あとがき

金沢大学工学部土木建設工学科 辻 本 哲 郎

1. はじめに

近年治水・利水・環境のいずれの機能も損なわないことが河川整備の新しいフィロソフィーになりつつある。こうしたなかで河川植生への注目は大きい。河道内植生は河川にしか残されていない貴重な自然の「場」そのものであり、あらゆる生物の生息空間を支配しており河川の自然環境保全機能の鍵といえる。さらに植生は河川の親水機能を向上させる一面も有している。治水面では従来の洪水疎通障害源としてこれまで以上に精度良く見積られねばならない一方、植生に水制・護岸効果を期待した「多自然型河川工法」の可能性も探られている。こうした状況で、植生の水理に関する研究が盛んに行なわれるようになってきた^{1), 2)}が、河川の植生やその群落についての知見が充分でなく、河川植物の調査が望まれている。こうした中で、「河道の植物群落調査とその河川工学的意義に関する研究」を、河川環境管理財団の河川美化・緑化調査研究助成に採択いただき（平成4年12月～平成6年12月、代表：辻本哲郎、共同研究者：村上正吾、北村忠紀（京都大学）、清水義彦（群馬大学））、主として実河川を舞台に植生水理の基礎的研究を進めた。以下、手取川扇状地区間で河道植生調査をその方法をさぐりながら実施した研究と、植物の洪水時の変形・破壊状態を把握して植物群落の動態を把握するための基礎として実際の川原の植物の変形を観察して流水と植物の相互作用に焦点をあてた研究についてその成果を報告し、助成研究の完了報告とする。

2. 河道植生調査法と手取川扇状地区間における植生調査

2.1 概説

河道の植生を調査することの重要性に鑑み、建設省でも平成3年度から「河川水辺の国勢調査」の一貫として植生調査を開発したが³⁾、植生水理に関する基礎的研究を進める上で植生あるいはその群落をどうモデル化したらよいか、植生と河道動態の特性をいかにして治水・利水・環境機能を等しく向上させる新しい川づくりをするにしても植生の成長や群落形成が河道動態（河床・流路形態・河床材料特性、流況など）とどう相関しているかについて十分な情報を提供してくれる調査としては、必ずしも機能していない。こうした背景から、著者らは上述のような目的に応えるためにはどのように植生調査をやり、どのような特性を抽出して行けばよいか検討に着手した^{4), 5)}。調査対象としては手取川の扇状地区間河道を選んだ。その理由は、扇状地河川での植生調査が少ないこと、河況係数が大きく、植生分布が流況に大きく影響されているだろうこと（冠水などが繰り返され若い植物が多い）、またそのため植物種が貧相で植物種同志の干渉が少ないであろうこと、流路変動とそれと関係の大きい植生群落を含めた制御によって扇状地河川の新しい治水対策を進めていくのが望ましいと考えられることである。

写真1はやはり北陸扇状地河川の一つである神通川（富山県）の航空写真（建設省富山工事事務所提供、写真の下方が上流で、写真の上方右岸に富山空港の一部が見える）であるが、この区間はかつて東

西に分派して流れていたのが約20年以上前から西派川には水が流れなくなった。この結果西派川には植生が繁茂し、一方近年の河床低下は東派川で進行し、ますます西派川の陸化が進行してきた。旧流路であるから植生繁茂に必要な伏流水で十分で、一方洪水による幼木・老木の流失が生じなかったためと考えられる。すなわち旧河道部は豊かな伏流水のため植生群落化の傾向は強く、むしろ流水や洪水が繁茂を抑制する働きをすることが伺える。写真2（建設省金沢工事事務所提供の1989年度撮影の航空写真）に示す手取川扇状地区間に見られる河原でも洪水のとき流路となる部分の植生群度が低く、洪水が植生繁茂を抑制するという推察が支持されている。

本研究では手取川の典型的な扇状地区間（図1及び写真2参照、河口から7.0km～13.0km付近でこの区間の平均縦断勾配は約1/150である）で植生調査を行なった。手取川は白山を水源とする流域面積809km²、流路延長72kmの一級河川で、下流17.3kmが直轄区間となっている。鶴来から下流の平均勾配は1/143で典型的な扇状地河川である。昭和9年の手取川大洪水では多量の土砂が流出し河道を覆い尽くした。その後このような大洪水はおきず、治山・治水工事の進展と共に新しい平衡河道が形成されてきた。図2⁶⁾はいくつかの規模別に整理した洪水頻度の経年変化で、とくに1980年（昭和55年）に手取川ダムが完成して以降は中小洪水、大洪水とも頻度が明らかに減少している。各断面の平均河床高の経年変化をみれば昭和30年代から河床低下傾向が顕著となり、近年静穏化しているが低下傾向は続いている。一方、流路・みお筋の固定化が進み、固定化してきた河原で植生群落形成が活発化している。

扇状地河道区間は基本的には単断面であるが、対象区間では図1あるいは写真2からわかるように左右交互に河原が発達しており（交互研州の名残）、三反田河原、藤蔵河原、下先出河原、灯台笹河原で調査を行った。

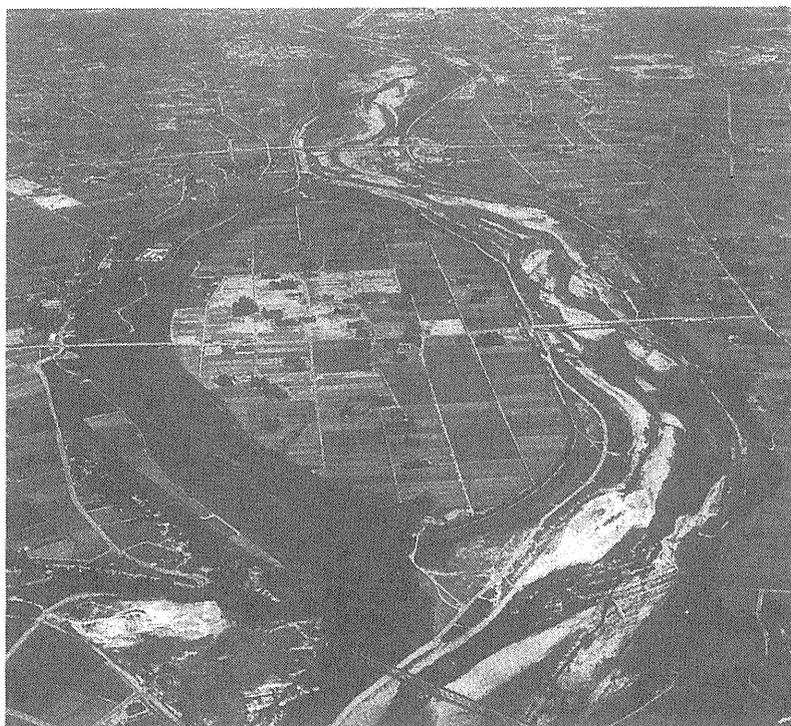


写真1 神通川分派部空中写真



写真2 手取川扇状地区間航空写真

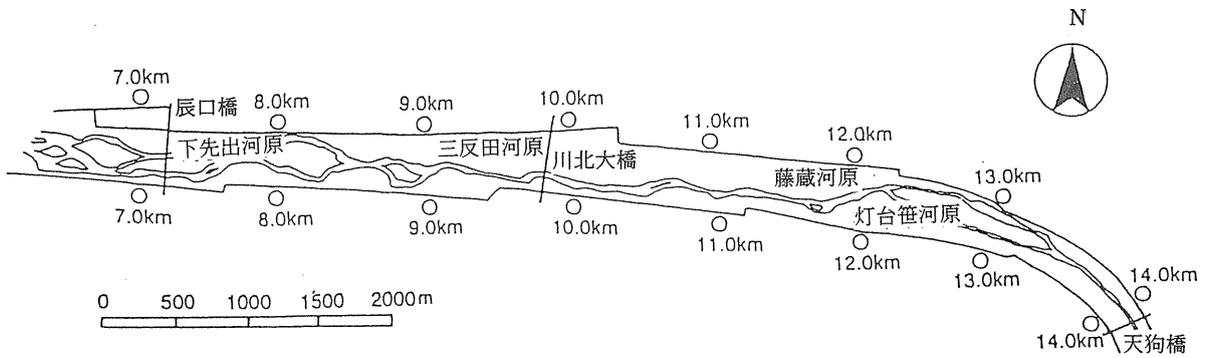


図1 手取川調査区間の河原

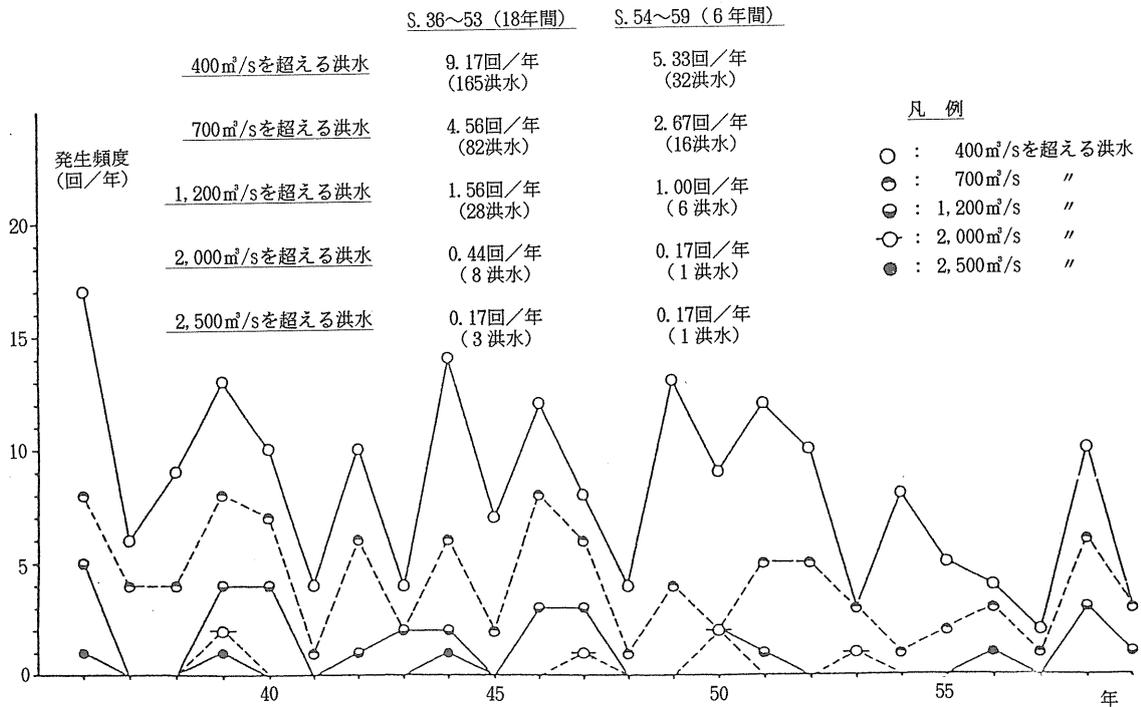


図2 手取川の規模別洪水頻度の経年変化

2.2 野外調査の方法

調査の対象とした植物は水理学的・河川工学的に意義があると思われるものを選び（小さな草花などは除外した）、その種類、大きさ、位置、群落形成特性などを調査することとした。手取川では、川原⁷⁾によってここ6～7年、河原の植物調査が継続されており今回の調査で植物種の特定に当たっては、その報告書を参考にさせていただいたり、また現地で直接指導いただいた。調査の対象となったものは、アキグミ、カワヤナギ、イヌコリヤナギ、ハリエンジュ、ヌルデ、ネムノキ、オニグルミなどの樹木、ツルヨシ、イタドリ、ススキ、マツヨイグサ、コマツナギ、タデ、クズなどの草木類である。今回標本数の多かった樹木を取り上げると、そのシルエットから大きく3つのパターンに分けられる。すなわち、(1)根元から複数の枝が伸び枝や葉が比較的密なもの（ヤナギ、アキグミ）、(2)幹を主体に背が高くなり枝も比較的上向きとなるもの（ハリエンジュ）、(3)下方では幹が1本であるがある程度の高さから枝が横へ張り出すもの（ヌルデ、ネム）である。このような3つのパターンでは水流への抵抗の仕方が本質的に異なる（空隙あるいは透水性の非均質性・非等方性）から、基礎研究においても「モデル植生」を対象とする植物種類によって適切に選ぶ必要がある。

調査に当たっては、植物あるいはその群落の（根元の）空間位置をスタジア測量で求めるという方法によった。測量は、堤防上の距離標（200mピッチ）および距離標間に補間した基準点にトランシットを据え、河原の必要な地点（植物の根元や植物群落の境界、河川敷地形・表層地質の急変点、旧河道の境界など）に標尺を立ててこれを視準した（図3参照）、踏査員は2～3人一組で、河川敷の必要な地

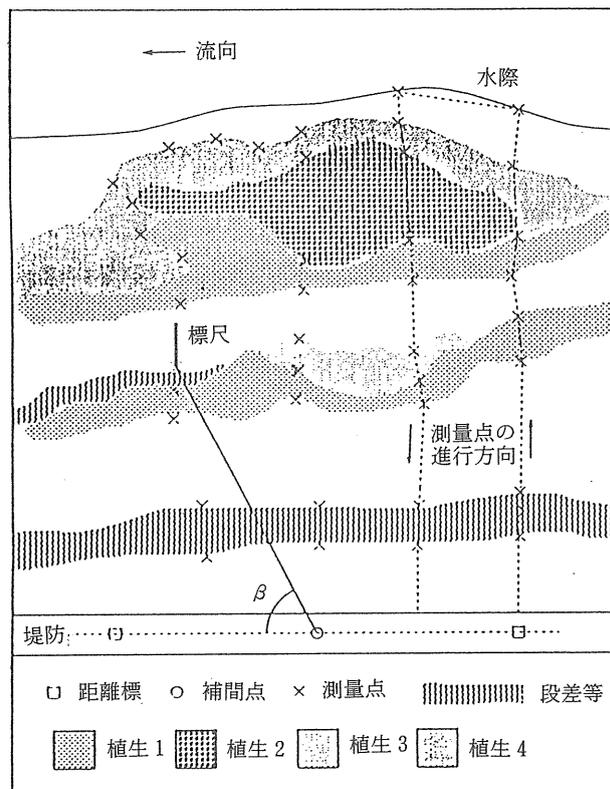


図3 測量基準点と踏査経路

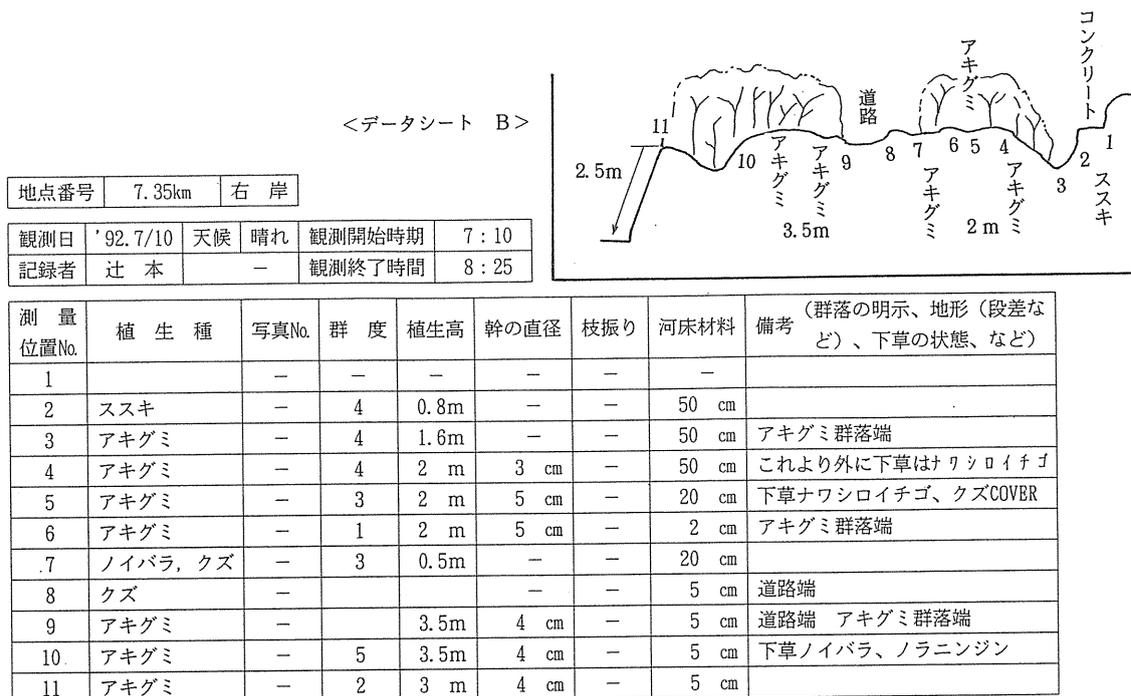


図4 踏査引用記録用紙書き込み例

点に標尺を立てトランシーバーでトランシット要員に測量を依頼するとともに、調査票(図4参照)に必要な事項(植物の種類、高さ、幹の太さ、群度、河床材料、その他)を書き込む。なお、1991年度はトランシットを据える基準点は堤防沿いで100mごとに設置し、測量する点はランダムに分布したが、1992年度以降の調査では、基準点を50mごとに設置、原則として25m間隔の横断線(堤防に直角)に沿った測量点を選んだ。これは1991年度の調査域が比較的群落が疎であったのに対し、1992年度以降の対象域では植生が豊かで群落が連続的であったことによる。測量点の密度は堤防から水際まで(平均150m)の平均個数15~30点、すなわち横断方向には5~10mピッチ、縦断方向には25mピッチの測量点となった。もっとも植生の分布やその種類や地形の変化の著しいところではより密な分布となっている。

上記のような調査によって測量点の3次元座標(トランシットデータから)、植物種類およびその大きさ、群度など(踏査員の調査票)がデータとして得られた。平面座標については堤防上のトランシットと下流の基準面と結ぶ線をx軸(y=0)とし、y軸をこれに直角に流心へ向かう方向に撮った。鉛直座標は基準点の座標とトランシット高さを用いて標高に換算した。

2.3 調査結果とその考察

2.3.1 調査結果の概要

調査で得られたデータをもとに河川敷微地形のコンター(50cm刻み)を描き、それに植物種類の空間分布を重ねた(図5(a)~(d))。また河川地形とその上の植生を典型的に示す横断図(図6(a)~(d))も容易に描くことができる。これらの図から、植物ごとに群落を形成する場所に相対的な差があること、群落の形状が異なることなどの特徴が概観される。すなわちツルヨシ、カワヤナギが水際に近く、イヌコリヤナギ、アキグミがそれに続き、さらにハリエンジュ、ススキとなっているようである。特に右岸は

アキグミ群落がよく発達している。調査した河原のうちでは三反田、藤蔵は比較的植生が貧相でアキグミを主体とし、下先出、灯台笹河原は比較的豊かな植生で、ネムノキ、オニグルミ、ハリエンジュなど植物の種類も豊富である。

ツルヨシ、カワヤナギ、アキグミは典型的な縦断方向に帯状の群落を形成し、一方、ヌルデ、ススキ、イタドリはパッチ状の群落を形成する傾向が強い。ハリエンジュ、オニグルミ、ネムノキも縦断方向に帯状を示すようであるが群度が小さく、手取川の調査区域では一部を除いては群落と認めがたいものが多かった。

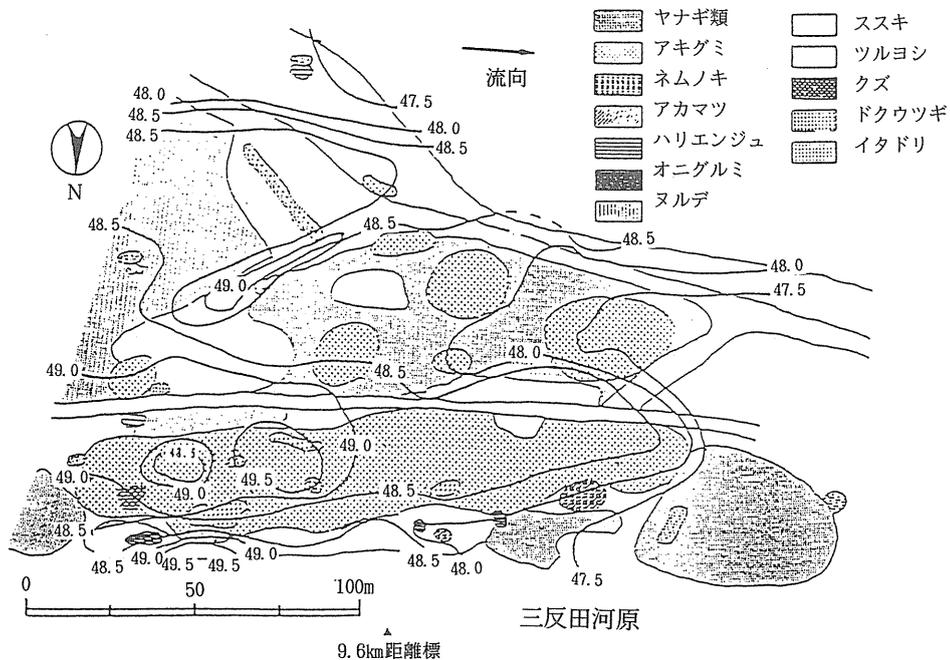


図 5 (a) 三反田河原の微地形と植物群落平面分布

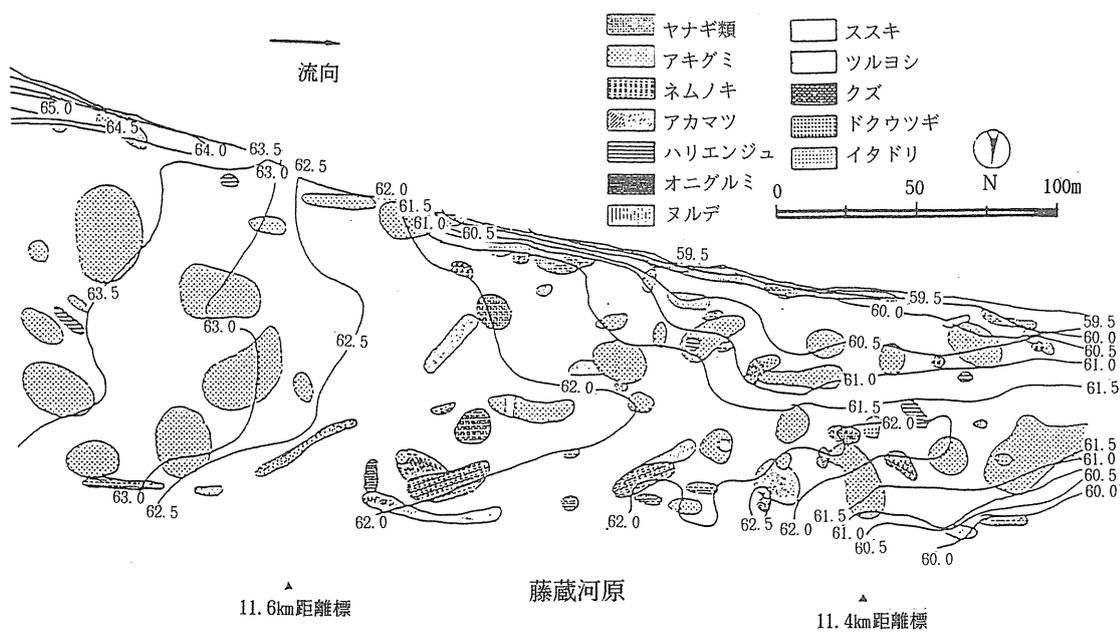


図 5 (b) 藤蔵河原の微地形と植物群落平面分布

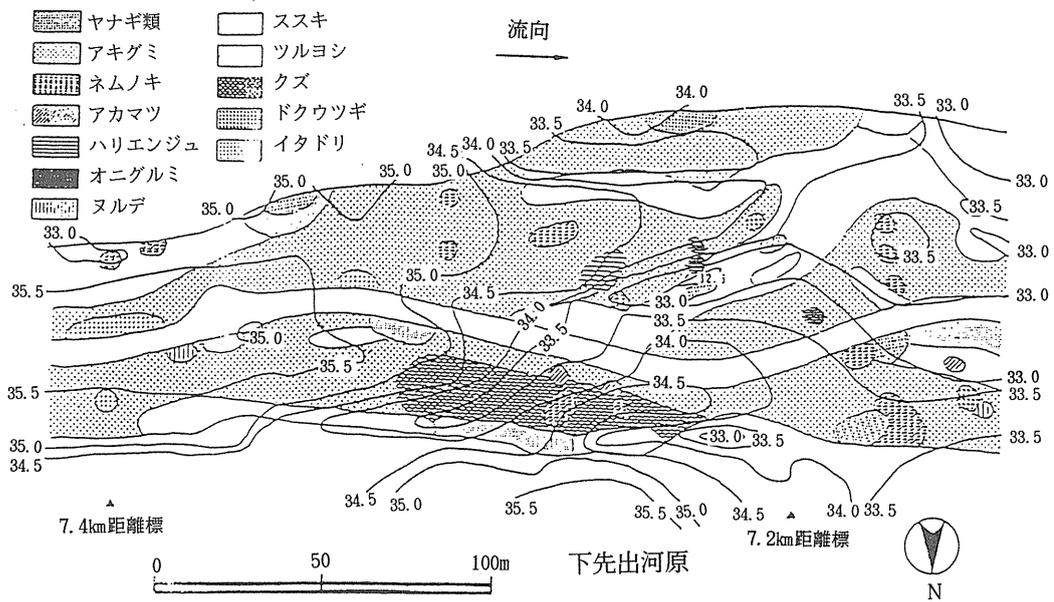


図 5 (c) 下先出河原の微地形と植物群落平面分布

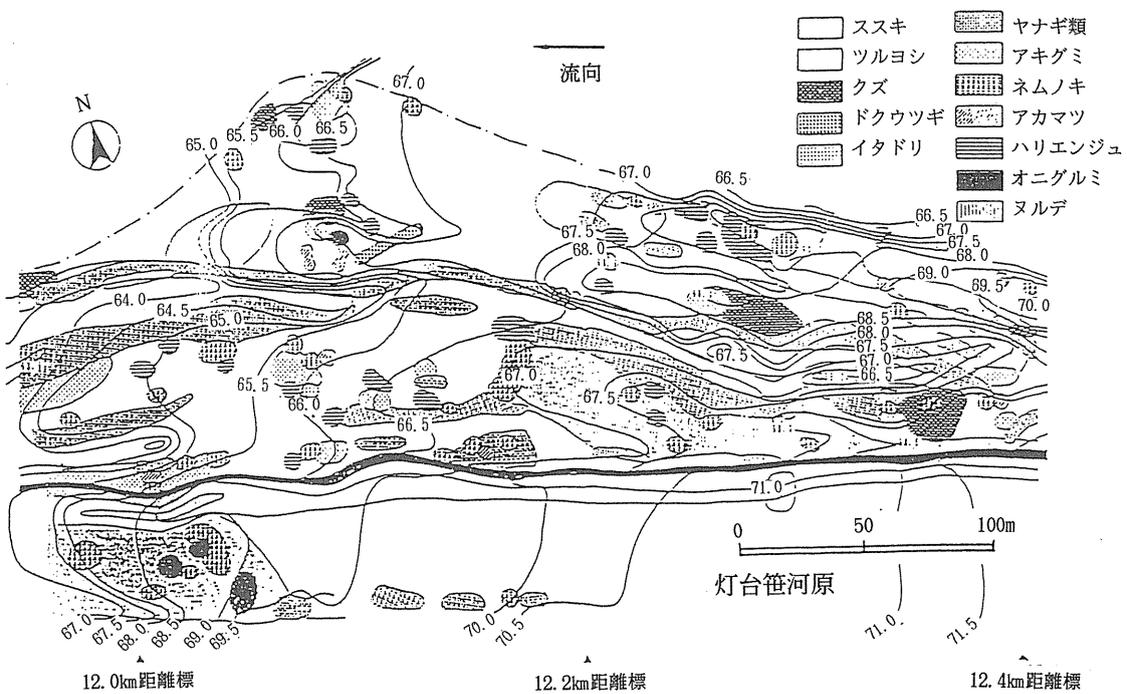


図 5 (d) 灯台笹河原の微地形と植物群落平面分布

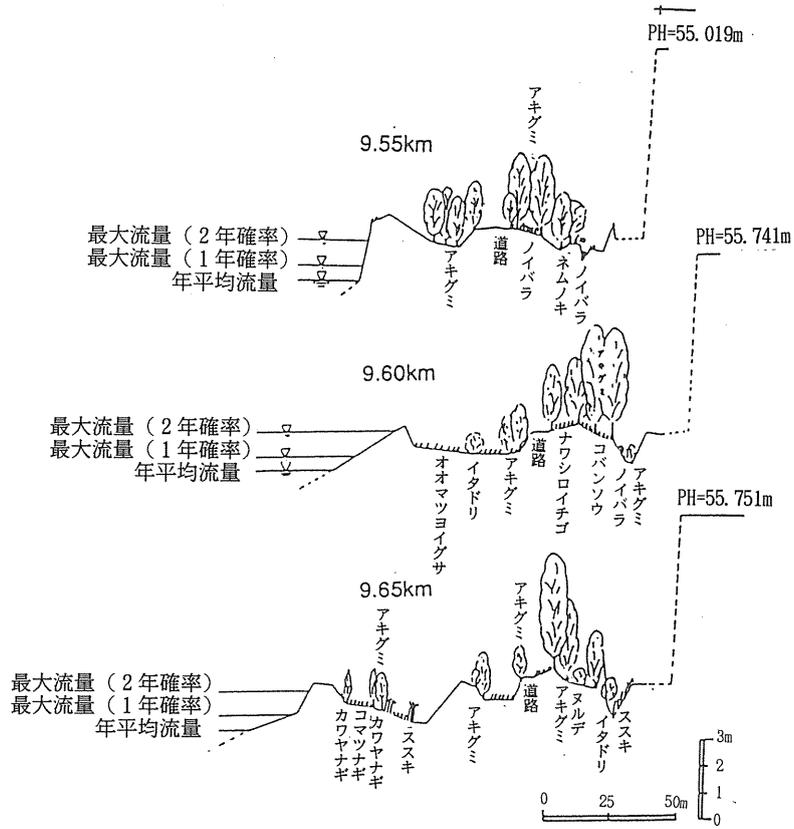


図 6(a) 三反田河原横断面図

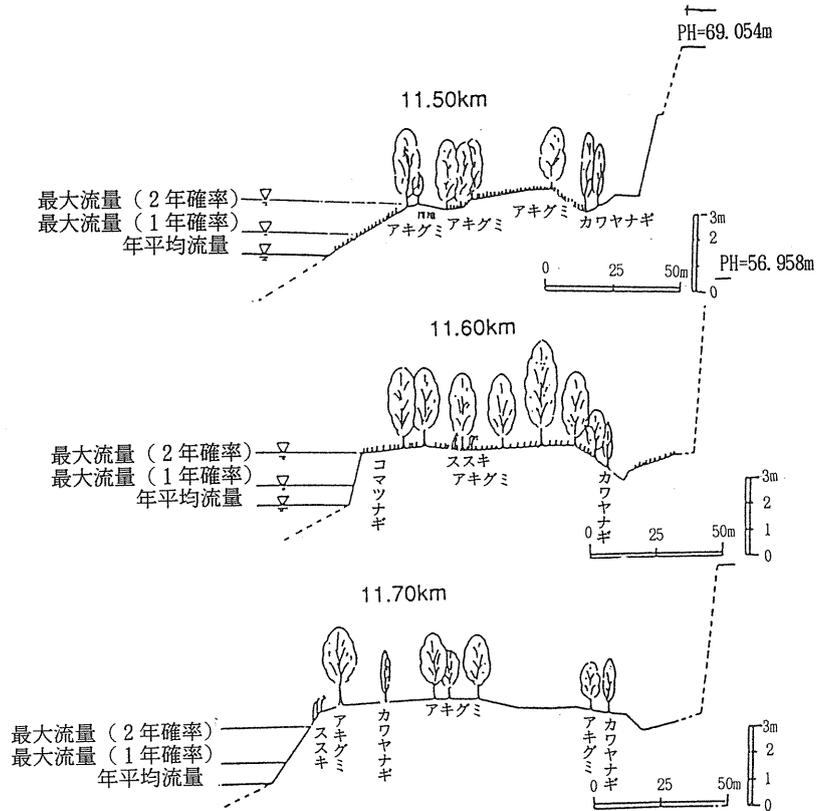


図 6(b) 藤蔵河原横断面図

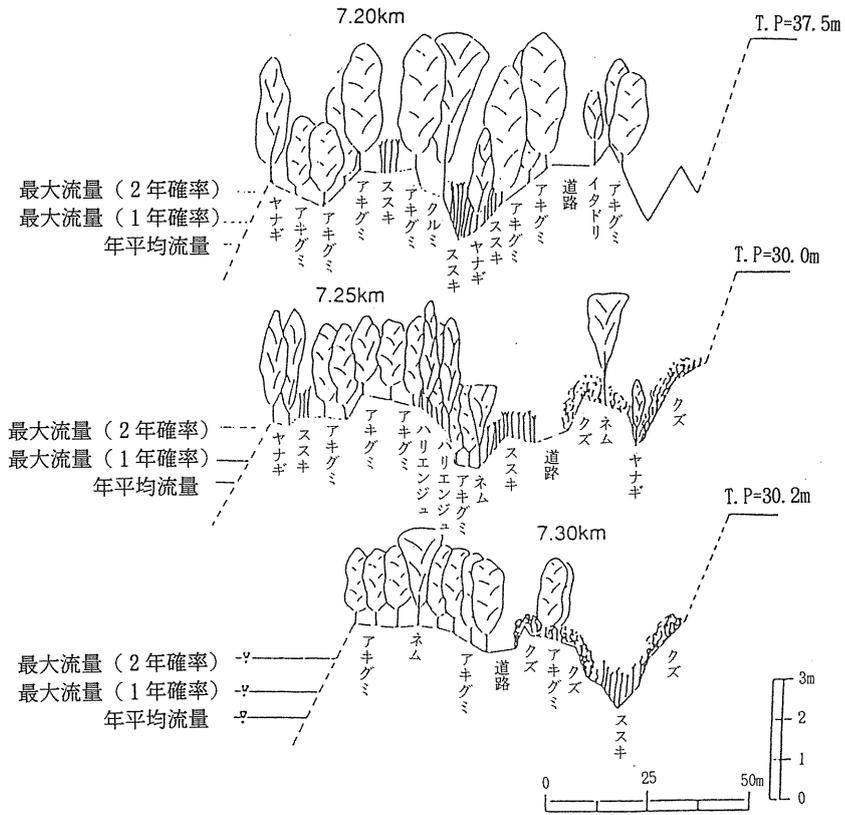


図 6 (c) 下先出河原横断面図

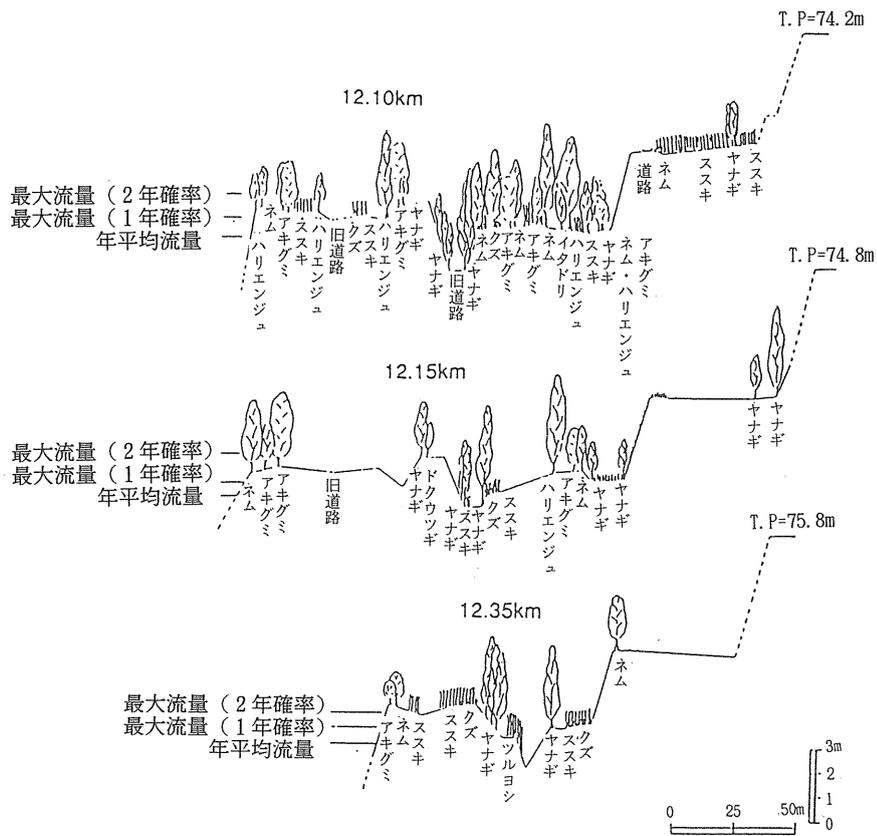


図 6 (d) 灯台笹河原横断面図

2.3.2 メッシュデータの作成

図5をもとに、原データをも参考にしながら各領域ごとに5mメッシュをかけて各メッシュごとの特性（標高、植物の種類、群度、植物の高さなど）を数値データ化しフロッピーディスクに記録した。特性自身は変化の著しいところで重みを付けて測定されるべきだが、後の解析については空間に占める面積の重みを考慮すべきである。この点を考慮してメッシュデータとしての整理をした、この数値データは後の解析（各量の相関解析を含む）に有効であるほか、データの保存、閲覧（ディスプレイ）に便利である。

ここで作成された地形データは空間位置としての絶対値で登録されているが、河道内での各地点の特徴はむしろ「水」あるいは「流れ」からの相対位置であったり、水はけと関連する勾配（隣り合うメッシュ間の相対高さ）であり、こうした量に変換する必要があるが、まず、標高については基準流量のときの水面からの相対高さに変換し、これを「比高」と定義した。基準流量としては年最大流量、年平均流量、低水流量の平均値、最大流量の1年確率流量、2年確率流量などが考えられる。ここでは建設省資料に基づき最近24年間のデータ⁸⁾から統計的にこれらを決めた（それぞれ1,371m³/s, 47.4m³/s, 2m³/s, 321m³/s, 1,133m³/s）。各基準量に対して水理計算によって各地点の水位を決定すれば「比高」が計算されるが、ここでは不等流計算結果（建設省金沢工事事務所による現況断面に対する計算結果⁹⁾）を各距離標断面ごとに水位流量関係式にまとめたものから内挿して各地点での水位とした。図6の横断図にはこれらのいくつかの基準流量に対する水位を示した。これによって各基準流量ごとの「比高」が各メッシュで記録された。一方、地形の勾配については横断勾配が支配的であると考え、各メッシュと流心側に隣り合うメッシュでの地盤高の差（横断方向5mあたりの高低差、流心へ下っていく方向を正と定義）を指標とした。

2.3.3 河原の地形的特徴

調査した河原について年平均流量に対する比高、横断勾配の頻度分布を比較したのが、図7(a)、(b)で、灯台笹では河原が2段になっていること、下先出の比高は灯台笹の2段の河原の低いほうと高いほうの中間の高さとなっていることがわかる。灯台笹では2段の河原の境界の崖部分の存在が横断勾配の頻度

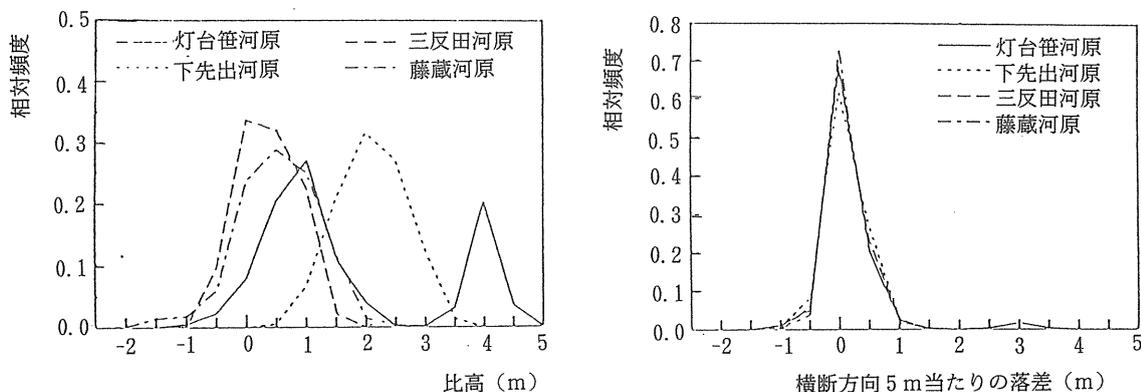


図7 各河原の比高と横断勾配の頻度分布

分布のサブピークを作っていることがわかる。こうした地形特性の変化が植生の種類や群落形成特性に与える影響がどのように調査結果に現われているか、植生調査結果を普遍化するためにはこれらをどのように考慮すればよいか重要な視点である。

2.3.4 各河原の植生群落特性

植物の比高をその生息位置（根元）の年平均流量に対する水面高からの相対高さで定義し、代表的な植物についてその頻度分布を調べた。図8(a)は比高の分布範囲が広く比較的植物種類の多い灯台笹河原でいくつかの植物種の比高の頻度分布を調べたもので植物ごとに成育しやすい比高のあることが示唆される。図8(b)は河原地盤の比高分布によって各比高における各植物の面積占有率を調べたもので、植物種ごとの棲み分けが認められる。ヤナギ、ツルヨシは年平均流量の水際よりもむしろ低い位置に、ススキ、アキグミはそれより1～2 m高い地盤で成育している。図9は、比高を定義する基準流量をいくつか変化させて各植物の生息比高の平均値、標準偏差の変化を見たものである。

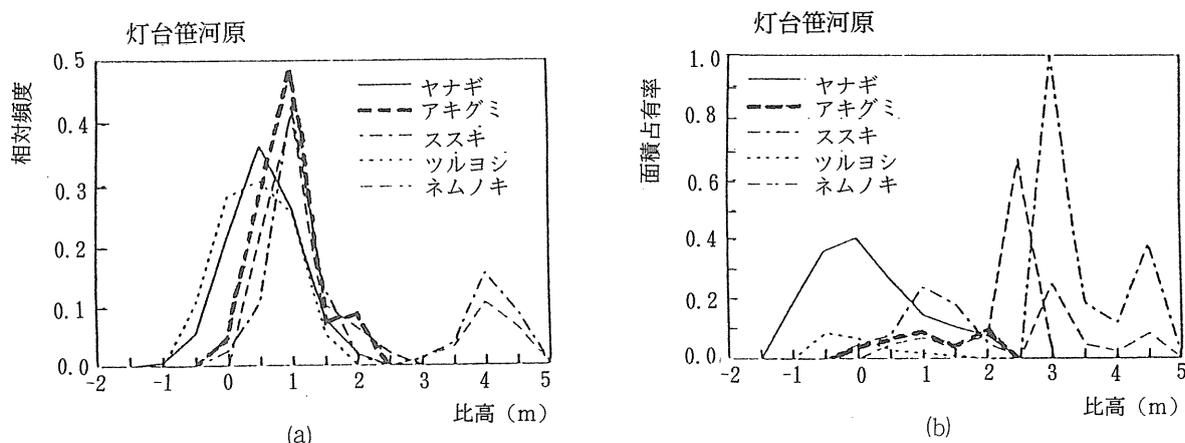


図8 植物種ごとの成育地盤の比高の頻度と面積占有率

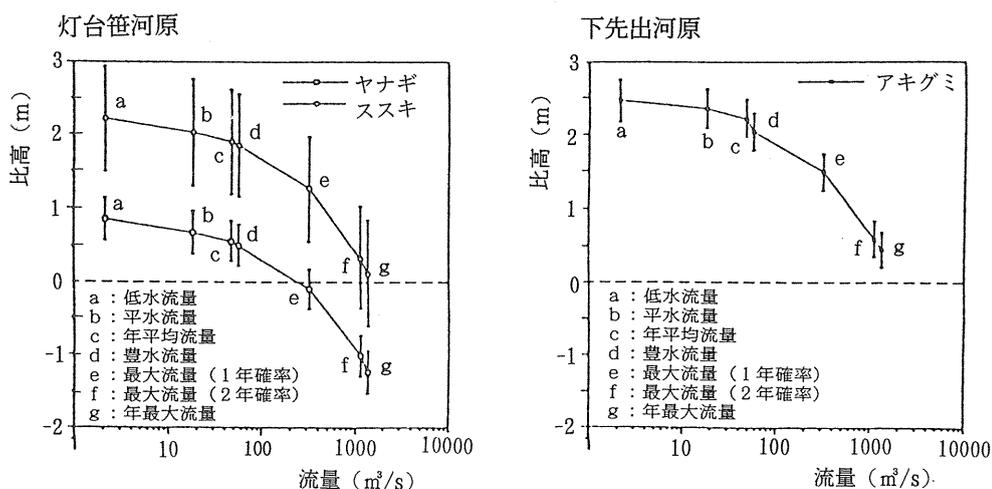


図9 流量に対する植物生息比高の平均値・標準偏差の変化

次に、同様に灯台笹河原のデータを用いて横断勾配と植物種の生育位置の関係を検討した。図10(a)は頻度分布表示したもので、先と同様さらに図10(b)には地盤の横断勾配分布を考慮して求めた占有面積率で表示した。これらの結果、ヤナギ、ツルヨシなどは斜面に生育する割合が高く、一方、アキグミ、ススキは横断勾配の小さいところに多く生育する。観察によると、アキグミは河原の中で台地上に群落を形成し、またススキは平坦な空間を好むようである。

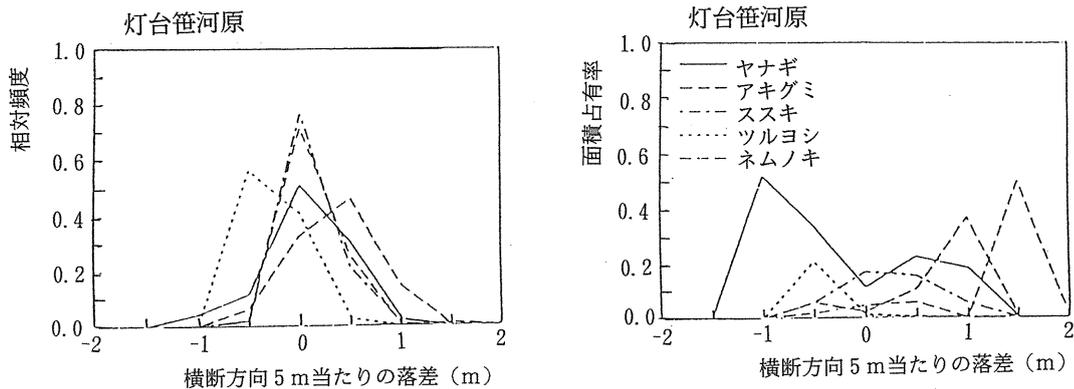


図10 植物ごとの生育地盤の横断勾配の頻度と面積占有率

図11はヤナギとアキグミについて各河原での生育比高の頻度分布を比較したもので、ピークを示す比高において両者の間に1 m程度の差が認められるなど基本的な性質に差はない。ただし図12のように各河原の地盤比高で規格化した面積占有率にするとむしろ差異が著しい。これは各河原の変遷によるもの

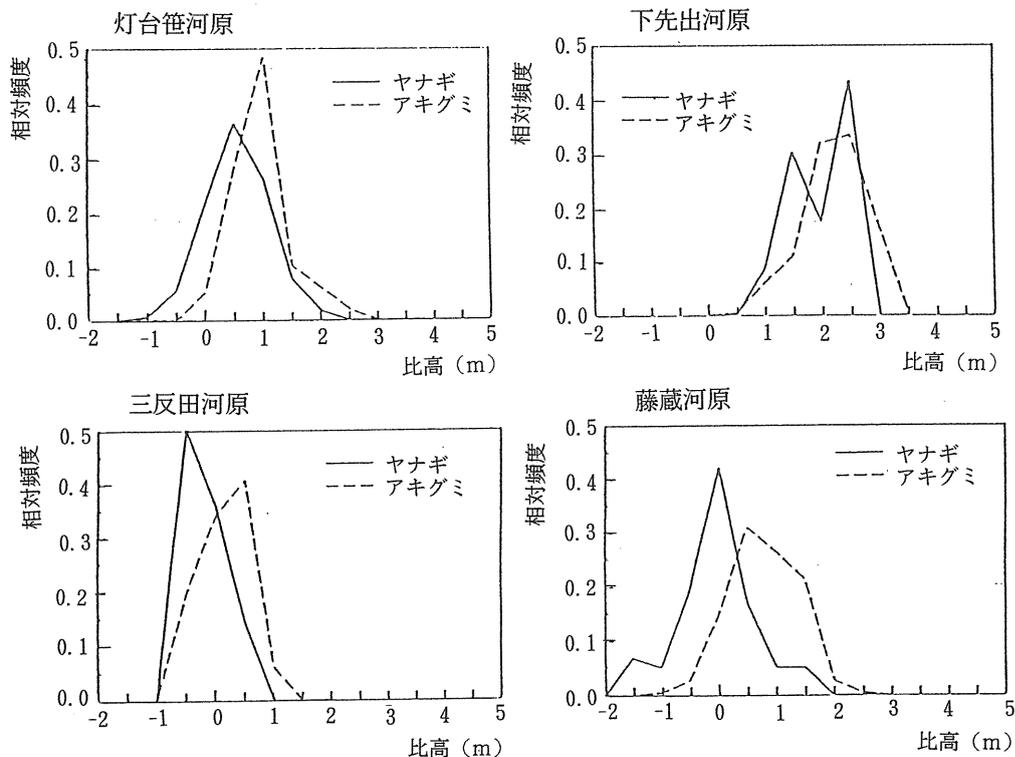


図11 河原ごとのヤナギ・アキグミ生育比高の相対頻度分布

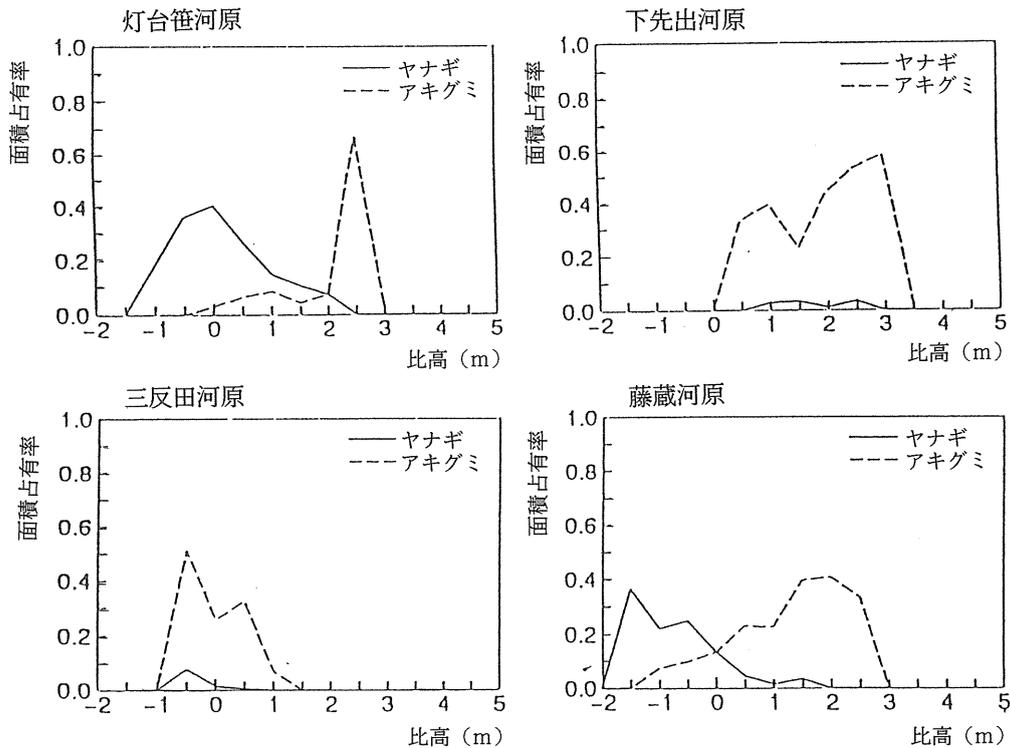


図12 河原ごとのヤナギ・アキグミ成育比高の面積占有率

で、古くから固定している三反田河原、下先出河原ではヤナギの占有面積率が極めて小さく、形成されてから数年しか経過していない河原では樹齢が低く現在の水際での生息が目立っている。こうした点から、植生群落の形成、河原の形成・発達などについて経年的に調査する必要があることが指摘される。

今回の調査では群度、樹高についても調べられてメッシュデータに登録されており、上述の存在分布についてはこれらの重みを課した検討も興味深いところで、河原の地形の経年的変化による相違についての検討と併せ、今後の課題としたい。また、群度・樹高の相関や地形との重相関についても一部検討しているが、未だ不十分で、本報告には含めないこととした。

2.4 旧流路に沿う植物・河道特性調査

河原には洪水時に流れた跡が明確に残り（河原内旧流路と呼ぶ）、そこでは地形・河床材料・植生の間の相互関係を典型的に見いだすことができる。灯台笹河原にも図5(d)あるいは写真2も認められるように旧流路が存在しており、これに沿った調査を実施した。図6(d)に示した1年確率最大流量の水位からわかるように、年に1度は（少なくとも融雪出水期）旧流路に水が流れる。写真3は灯台笹河原周辺の航空写真（1989年撮影、建設省金沢工事事務所提供、写真の上方が上流で、写真上部右側（左岸）の州が灯台笹河原）で、今回の調査を行なったときの状態に近い（現在の方が植生が少々豊かになってきている）。一方、写真4は旧流路に水が流れている状態での航空写真（1986年撮影、建設省金沢工事事務所提供）である。



写真3 灯台笹河原（1989年撮影）

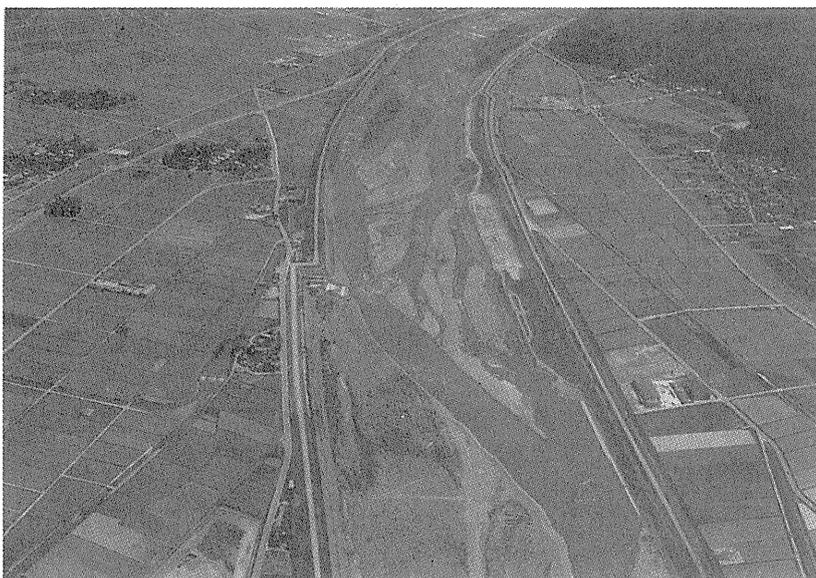


写真4 一部冠水した灯台笹河原（1986年撮影）

調査はトランシットを旧流路に沿って順次移動し、平面、縦断形状ならびに典型的な横断面の測量を行ない、踏査によって旧流路の河床材料、流路両岸の植生の調査を行なった。河床材料は(1)砂、(2)礫混じりの砂、(3)砂混じりの礫、(4)礫、(5)50cm以上の巨礫・石の5クラスに分類した。また、植物種については流路側岸に沿った調査で、年平均流量時の水際あるいはそれより少々低い位置であることからツルヨシ、ヤナギが主体で、その他一部砂で覆われた路床上の植物も調べられた。これらの結果は旧流路の延長距離に沿って5 m 区間データごとに数値化してフロッピーディスクに保存して先の河原空間調査のメッシュデータに対応させ、データの保存と解析の便に供した。

図13は測量によって得られた旧流路平面図で平面流路形状のほか流路両側の植生、河床材料（砂、礫・砂混合、礫の3区分で、それぞれ先の分類の、(1)、(2)と(3)、(4)と(5)に対応させている）を併示した。ま

た図13には流路に沿った縦断形状（図中のx軸に沿った流路中心の標高差）も平面図に対応させて示し、さらに縦断勾配の頻度分布を示した。

写真5には旧流路が巨礫からなる区間（図13のA地点で、両側にヤナギが繁茂）と砂からなる区間（図13のB地点で、砂地にタデが繁茂）の例を示す。図13によると、平面形状、河床材料、周辺植生とも局所的な路床縦断勾配と相関していることが伺える。図14は河床材料のクラス別占有面積率の縦断勾配による変化、図15は側岸植物の面積占有率の縦断勾配による変化を示したもので、縦断勾配が増すにつれて、河床材料は速やかに粗くなり、一方側岸植生はツルヨシからヤナギへと徐々に移行するようで

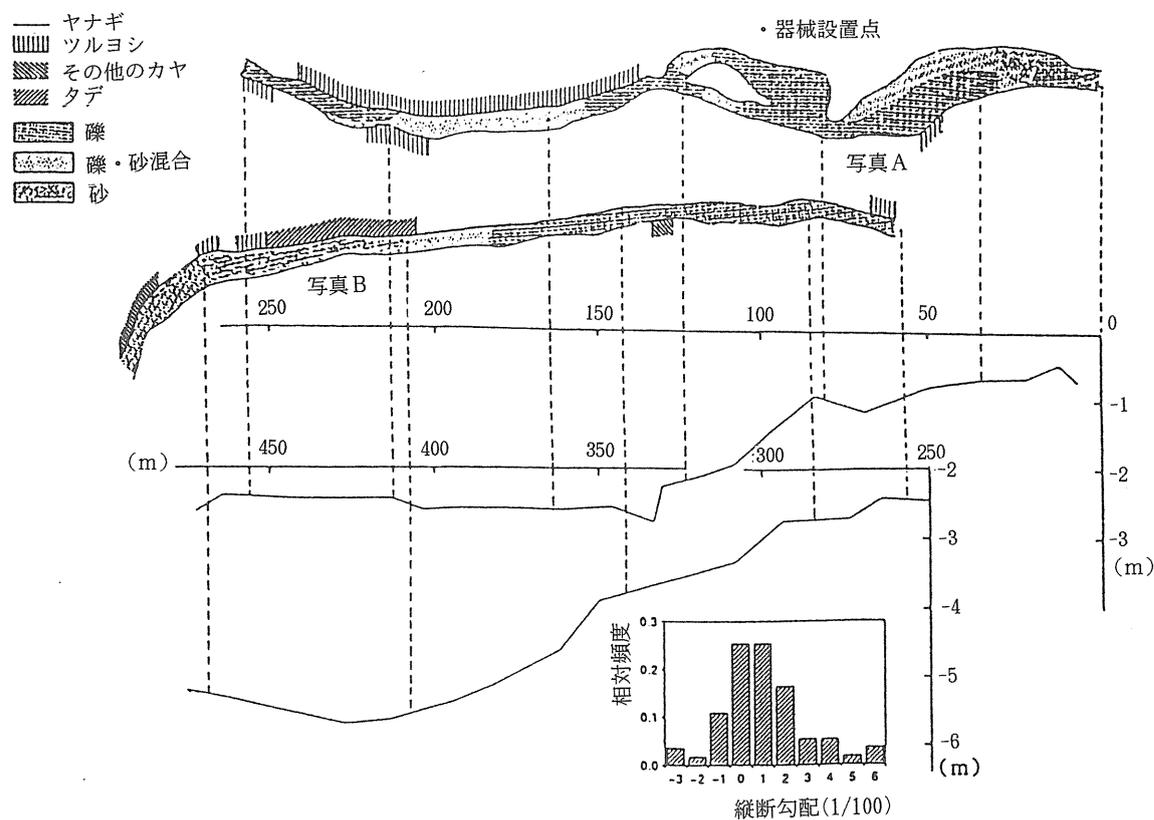


図13 灯台笹河原旧流路平面形状と河床材料・側岸植生及び縦断形状

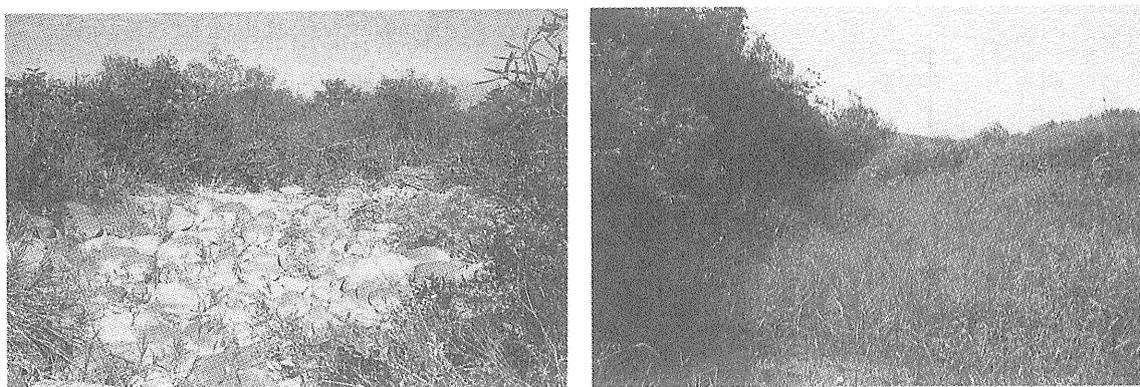


写真5 灯台笹河原内の旧流路の巨礫床区間（A地点）と砂床区間（B地点）

ある。図16は河床材料と植生の相関を見たもので、砂地ではツルヨシ、礫床区間はヤナギを伴うことが多いことがわかる。ただし、観察によると、礫床区間でヤナギが側岸に繁茂しているとき、ヤナギの根元には細砂が畝状に堆積していること、砂地ではツルヨシが側岸から匍匐枝を伸ばして群落拡大を図ることなど、動的な面を検討する必要があることが伺われた。

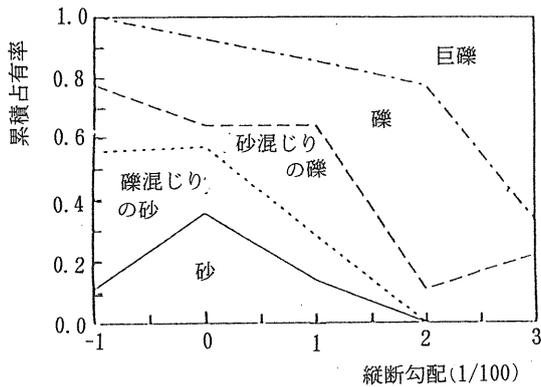


図14 河床材料と縦断勾配の関係

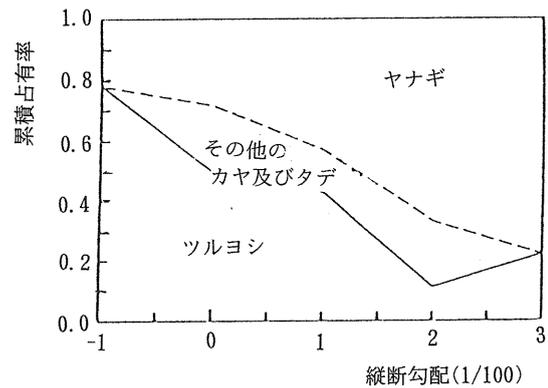


図15 側岸植生と縦断勾配の関係

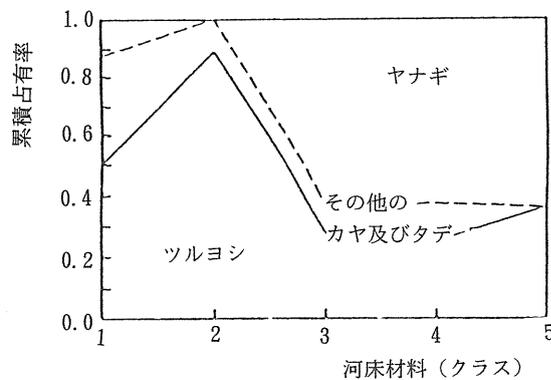


図16 河床材料と側岸植生の関係

2.5 植物群落調査についてのまとめ

本研究では扇状地河川の今後の河川整備が流量、流路形態（土砂）、植生の動態を制御した川づくりであるとの観点から、河原の形成、動態との関連での植生調査の必要性を指摘し、こうした目的にかなった調査方法を検討し、また実施した。本論文では特に扇状河川特有の植物についてその群落形成特性を比高、横断勾配、河床材料と植物繁茂状況との相関を調べることによって検討した。植物群落の形成は河原によって異なるものの、河原の特性である比高分布、横断勾配分布、局所的縦断勾配、河床材料そして流況及び流量変化に対する比高の変化特性などを考慮すればある程度普遍的な性質が抽出できるものと思われる。今後さらに調査区域を増やして特性抽出に努め、河原の地形特性や流況の変化に対する植生動態の予測についての研究を進めたい。

川原健彰先生には手取川の植物についていろいろお教をいただき、また夏の日には河川敷に実際はいつて植物の分類や特徴その他様々ご指導をいただいた。先生の長年にわたる手取川でのフィールド調査

の成果に敬意を表するとともにご指導いただいたことに謝意を表す。また、手取川での早朝からの調査に当たっては、当時の金沢大学大学院および工学部学生であった北村忠紀（京都大学助手）、宮垣圭吾（JR東海）、岡田敏治（日水コン）、西村秀樹・嶋嶋章文（石川県）、長崎敏範・高野卓弥・紺谷一英（富山県）、森田優子（東京都）、村瀬尚（愛知県）、赤城里至・泉倫光君（金沢大学大学院）の諸君の協力を得た。

3. 洪水時の植物の変形についての調査研究

3.1 概説

河川高水敷あるいは河道内にしばしば植生が繁茂している。これらの流水抵抗に関しては洪水痕跡から逆算されたマンニングの粗度係数について概略値が求められている⁹⁾ものの、その詳細については明らかではない。例えば、流水に対してどの程度傾き、また傾くことでどのくらい抵抗が違うのかは植生群落の存在を河道に許していくなかで興味をもたれる点である。本研究では、ヨシやセイタカアワダチソウといった直立していても柔軟なために流水に対して変形する植生粗度の抵抗則について検討する。

著者らは室田・福原¹⁰⁾が行った植生の変形モデルと流れ場のモデルをカップリングする方法を踏襲し、流れのモデルとしては、剛な植生層を伴う流れ場についてその有効性が示された著者ら¹¹⁾の $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた解析を導入することで、種々の水理条件の違いによる系統的な検討を行った。さらに、これらの結果を用いて植生変形量と抵抗則を整理し、種々の剛性、密生度を持つ植生粗度の抵抗則を提案した。さらに実植生で剛性、密生度の実測を行なって、その結果に基づいて抵抗予測を試みた。

3.2 植物の変形と流れの相互作用系の解析

3.2.1 植生上の流れの数値計算

流れ系のモデルには、著者ら¹¹⁾による剛な植生層を伴う流れ場を良好に再現できる運動量式のみならず、 $k-$ 、 ε -方程式にも植生の形状抵抗に関わる項を付加した $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いる。鉛直2次元の定常等流場における支配方程式は次のようである。ここでは、代表流速として断面平均流速 U_m 、代表長さとして水深 h を用い、無次元化して表示した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ \left(\nu_T^* + \frac{1}{R_e} \right) \frac{\partial U^*}{\partial y^*} \right\} - \frac{\partial P^*}{\partial x^*} - F_x^* &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ \frac{\nu_T^*}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial y^*} \right\} + P_k^* + C_{fk} F_x^* U^* - \varepsilon^* &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ \frac{\nu_T^*}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial y^*} \right\} + \frac{\varepsilon^*}{k^*} \{ C_1 (P_k^* + C_{f\varepsilon} F_x^* U^*) - C_{2\varepsilon}^* \} &= 0 \\ P_k^* \equiv \nu_T^* \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} \right)^2; \quad \nu_T^* = C_\mu \frac{k^{*2}}{\varepsilon^*} \end{aligned}$$

植生による形状抵抗は植生に垂直な方向に働くものと考え、次式のように与える。

$$F_x^* = \frac{1}{2} \frac{C^*}{l_0^*} (U^* \cos \theta)^2$$

ここに、 $x^* \equiv x/h$ 、 $y^* \equiv y/h$ 、 $P^* \equiv P/\rho U_m^2$ 、 $U^* \equiv U/U_m$ 、 $k^* \equiv k/U_m^2$ 、 $\varepsilon^* \equiv \varepsilon h/U_m^3$ 、 $R_e \equiv U_m h/\nu$ 、 $C^* \equiv C_D \lambda l_0$ 、 $l_0^* \equiv l_0/h$ 、 P ：圧力、 ρ ：水の密度、 U ：平均流速、 k ：乱れエネルギー、 ε ：乱れエネルギーの逸散率、 ν ：動粘性係数、 C_D ：植生の抗力係数、 λ ：植生の水流に対する単位体積当たりの遮蔽面積、 l_0 ：植生長、 θ ：植生の傾き角（鉛直に立った状態を $\theta=0$ とする）である。

モデル定数には、植生の形状抵抗に関わる C_{fk} 、 C_{fe} 以外のものについては標準 $k-\varepsilon$ モデルの推奨値を用い、 C_{fk} 、 C_{fe} については幾つかの異なる密度を有する剛な植生層を伴う流れ場を再現できるように決められた $C_{fk}=1.0$ 、 $C_{fe}=1.3$ を用いる。

植生が変形しない場合について、 l_0^* をパラメータとし、無次元植生密度 C^* に対する流速係数 U_m/u_{*0} ($u_{*0} \equiv (ghI_e)^{1/2}$ 、 g ：重力加速度、 I_e ：エネルギー勾配)の計算結果を示したのが図17である。この結果より、流れによって植生が変形しない場合の抵抗則は近似的に次式のように表現できる。

$$\frac{U_m}{u_{*0}} = \alpha C^{*m} \quad (0.01 \leq C^* \leq 4.0)$$

$$\alpha = 1.46 - 1.55 \ln l_0^* \quad (0.1 \leq l_0^* \leq 0.75); \quad m = -0.17 - 0.34 l_0^* \quad (0.1 \leq l_0^* \leq 0.75)$$

3.2.2 植生変形モデル

植生の変形は片持ち梁の有限変形としてモデル化する。ここでの仮定は次の2つである。1)「平面保持の仮定」、すなわち変形後も断面は中立軸に直交する。2)植生に働く抗力及び揚力による曲げのみが変形の要因とする。変形した植生の鉛直方向単位長さ当たりに働く抗力 F_D 、揚力 F_L 、曲げモーメント M は、図18を参考にして次のように書ける。

$$F_D^* = \frac{1}{2} C_D d^* (U^* \cos \theta)^2 = \frac{1}{2} C^* \frac{l_0^*}{\gamma} (U^* \cos \theta)^2$$

$$F_L^* = -\frac{1}{2} C_D d^* (U^* \cos \theta)^2 \tan \theta = -\frac{1}{2} C^* \frac{l_0^*}{\gamma} (U^* \cos \theta)^2 \tan \theta$$

$$M^*(y^*) = \int_{y^*}^{l^*} [F_D^*(\eta^*)(\eta^* - y^*) + F_L^*(\eta^*)\{\delta^*(\eta^*) - \delta^*(y^*)\}] d\eta^*$$

$$\delta^*(y^*) \equiv \int_0^{y^*} \left(\frac{d\delta^*}{dy^*} \right) dy^*$$

ここで、 $d^* \equiv d/h$ 、 $\delta^* \equiv \delta/h$ 、 $l^* \equiv l/h$ 、 $\gamma \equiv l_0^* N_0$ 、 d ：植生の直径、 δ ：植生の変化量、 N_0 ：単位面積当たりの植生の本数である。

曲げモーメントと曲げ剛性の EI の間には、

$$\frac{M^*}{(EI)^*} = \frac{d^2 \delta^* / dy^{*2}}{\{1 + (d\delta^* / dy^*)\}^{3/2}}$$

が成り立つ。ここで、 $(EI)^* \equiv EI/(\rho U_m^2 h^4)$ である。

一方、植生長 l_0 と変形した状態での植生高さ l の間には、

$$l_0 = \int_0^{l_0} \sqrt{1 + (d\delta^*/dy^*)^2} dy^*$$

が成立しなければならない。これらを次の境界条件のもとに解く。

$$\frac{d\delta^*}{dy^*} = \delta^* = 0 \quad \text{at} \quad y^* = 0$$

図19は流れの中に1本だけ植生モデル（OHP用透明シートを短冊状に切ったもの）を設置した時の植生変形の実測値と計算結果を比較したものである。図19(a)は滑面開水路流（対数則成立）、(b)は非水没植生群落中の流れ（一様流速分布）の中での結果で、図には流速分布の実測値も併示した。図より本解析モデルの妥当性が確認される。

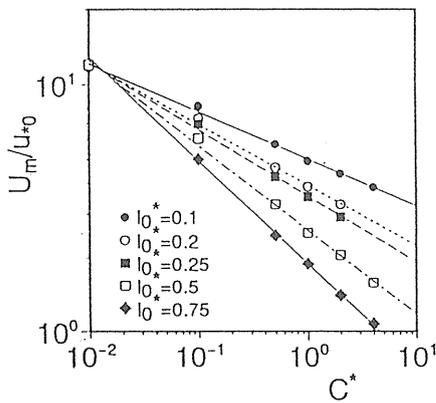


図17 植生が変形しない場合の抵抗則

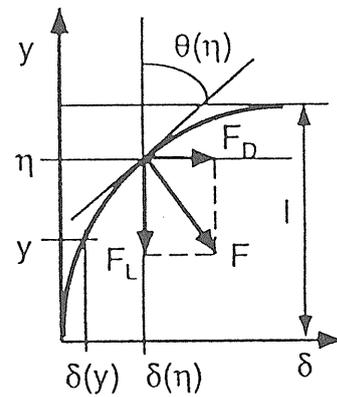


図18 植生に作用する流体力

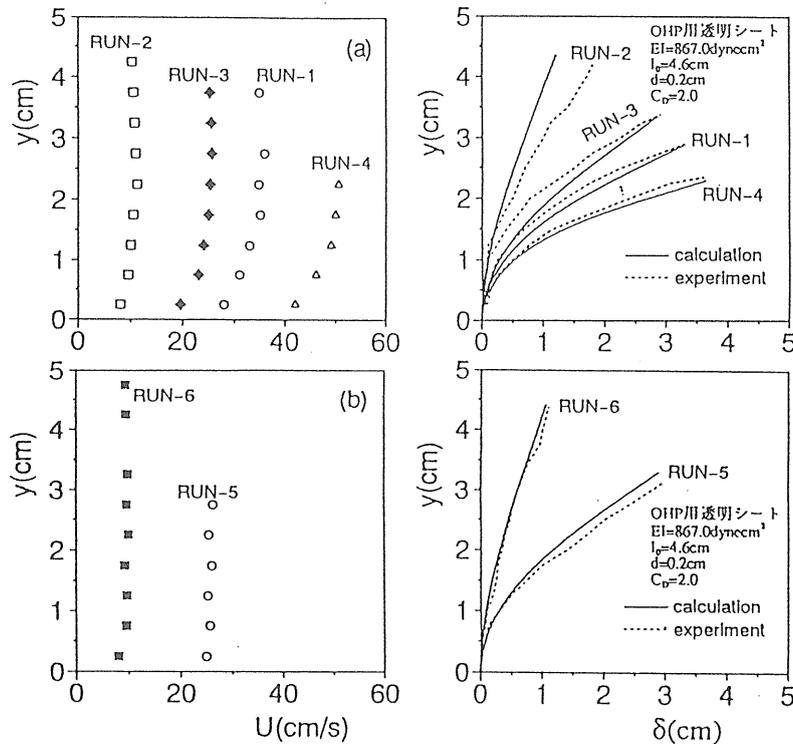


図19 植生変形モデルと実測値の比較

3.2.3 流れのモデルと植生変形のモデルのカップリング

上述の流れのモデルと植生変形のモデルを同時に解き、両者を同時に満足するような解が求められれば、所定の植生・水理条件での植生の変形状態とその時の流れ場が知られる。計算手順は次のとおりである。1) 植生の変形状態を適当に仮定して流れ場を解く。2) 得られた流速場を用いて植生の変形を計算。3) 得られた変形状態が1)で仮定した変形と等しければ計算を終了し、等しくなければ1)へ戻る。

計算で与えるパラメータは、 $(EI)^*$ 、 γ 、 C^* 、 l_0^* の4つであり、これらを適当に与えて計算した結果は図20に示すようである。様々にパラメータを変化させた計算結果(図21)から植生高さの減少率 l/l_0 は $\gamma EI/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ に対して一意に決まる。図21には水路実験での実測値^{10), 12)}を併示し計算値と実測値の対応は良い。なお、計算で得られた $l/l_0 \sim \gamma EI/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ 関係は次式のように近似できる。

$$\frac{l}{l_0} = 1 - 0.89 \exp\left(-4.66 \frac{\gamma EI}{\rho u_{*0}^2 l_0^4}\right) \quad \left(0.03 \leq \frac{\gamma EI}{\rho u_{*0}^2 l_0^4} \leq 2.0\right)$$

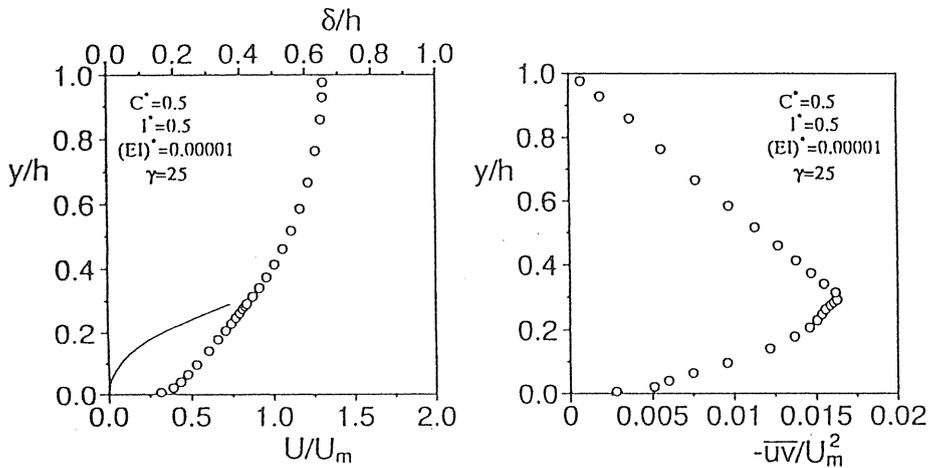


図20 植生の変形と流速・Reynolds応力分布

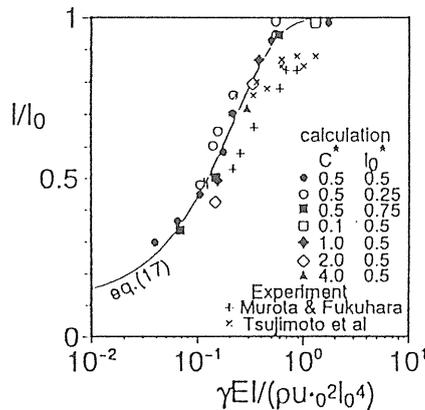


図21 植生の変形と剛性・流れの強度との関係

計算結果を C^* 、 l_0^* 一定の条件のもとで、流速係数 U_m/u_{*0} を $\gamma EI/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ に対して表示したのが図22である。図22には、植生変形の影響として、植生高さが減った効果のみを考慮し、上記近似式で与えられる $l/$ から l^* を求め、 l_0^* を l^* に置き換えて、抵抗についての近似式より U_m/u_{*0} を求めたもの（方法(a)）を破線で併示した。これによると植生の変形の効果として、単に植生高さが減少したと考えるだけでは不十分であり、植生が傾くことによる植生に働く流体力の減少効果も考慮しなければならないことが分かる。近似的に植生が平均的に $\theta_e = \cos^{-1}(l/l_0)$ だけ傾き、それによって植生層内の見かけ上の無次元密度が、 $C_e^* \equiv C^* \cos^2 \theta_e = C^*(l/l_0)^2$ に減少したものとみなし、 C^* を C_e^* に、 l_0^* を l^* にそれぞれ置き換えて、抵抗に関する近似式によって U_m/u_{*0} を求めたもの（方法(b)）は図22で実線で示されているが、この方法では植生が変形する効果を簡単に評価することが出来る。

図23は水路実験の実測値¹²⁾ と上記の方法(b)による計算結果を比較したものであるが、その対応は概ね良好であり、上記の方法(b)によって柔軟な直立性植生粗度を伴う流れの抵抗則を簡便に近似評価出来る。

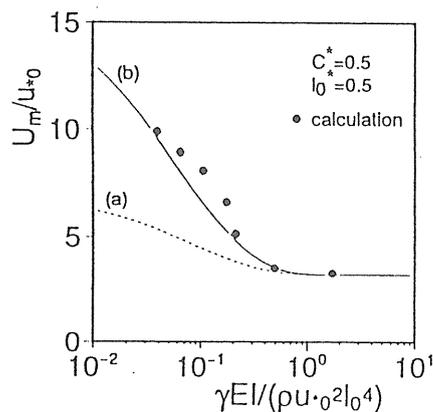


図22 抵抗予測に及ぼす植生変形の効果

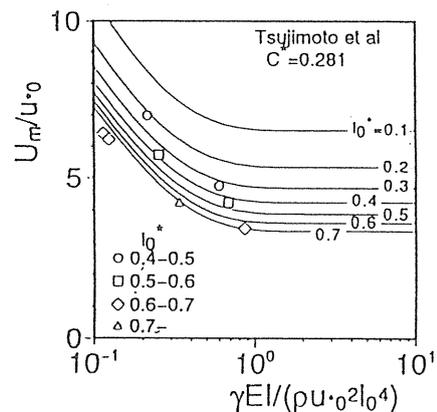


図23 抵抗予測と実験結果の比較

3.3 実植生の剛性・密度調査と抵抗評価

3.3.1 実植生の剛性・密度調査

実植生の抵抗則を見積もることをも目的として、平成6年8月、淀川水系・木津川、桂川の河川敷に生息するヨシ、セイトカアワダチソウの剛性、密度についての調査を行なった。調査地点は数年に1回の洪水で冠水する地点である。現地調査の手順は以下のとおりである。1) 相観により、調査対象の植生種が優先する群落を見つける。2) 群落の任意の位置にコドラートを設定し、調査対象の植生種の存在数を数えることにより、密度を得る。コドラートは異なる数カ所において設定し、平均値をとる。3) 群落内で無作為抽出された10個体の植生について、以下の項目を測定する。(a)植生長：茎部の長さを測定。(b)直径：胸高位置での茎部の直径を測定。(c)剛性：図24に示すように、植生の先端部（葉の部分は除く）に水平に荷重 W をかけ、その時の先端部の高さ y_B を測定し、荷重と変位の関係を得る（写真6参照）。剛性については、植生の根から先端部まで茎部の直径、剛性が一定であると仮定し、先端部に水平に荷重がかけられた片持ち梁の有限変形に関する理論式⁸⁾と比較することから、曲げ剛性 EI

を推定する。すなわち先端部に水平に荷重がかけられた片持ち梁の有限変形の理論式¹³⁾は以下のとおりで、 $y_B/l_0 \sim a$ の関係を与える。

$$\frac{y_B}{l_0} = \frac{2b}{a} \cos \varphi_0$$

$$a \equiv \sqrt{\frac{Wl_0^2}{EI}} = F(b, p/2) - F(b, \varphi_0); \quad b^2 \equiv \frac{1}{2 \sin^2 \varphi_0}$$

$$F(b, \varphi_0) \equiv \int_0^{\varphi_0} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - b^2 \sin^2 \varphi}}$$

図25にヨシ、セイタカアワダチソウの標本に対して W を変化させた y_B を測定した結果から平均的な EI 値を定めた場合について理論式と比較したものである。

調査結果は表1に示される。密生度、植生長、直径、曲げ剛性ともに群落によってばらつきが見られるほか、植生長、直径、曲げ剛性については同一群落内でも個体差が見られる。図26は植生の直径と曲げ剛性の関係を示したものであるが、植生の直径に対して曲げ剛性はほぼ一意的な関係が認められる。植生の剛性の個体差は、植生の材料特性に個体差があるというよりもむしろ、植生の幾何的性質にばらつきがあるためと考えられる。こうした特性は、季節によっても変化すると考えられ、今後、さらに調査数を増やし検討する必要がある。

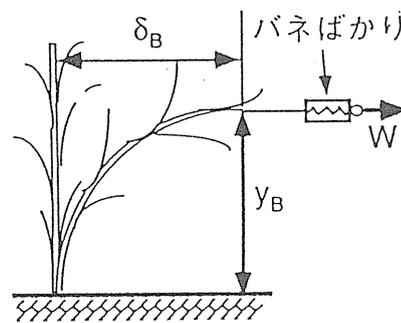


図24 植物の剛性試験説明図



写真6 現地での植物の剛性測定風景（木津川）

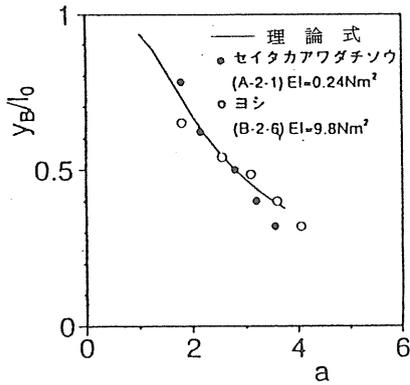


図25 植物剛性評価の例

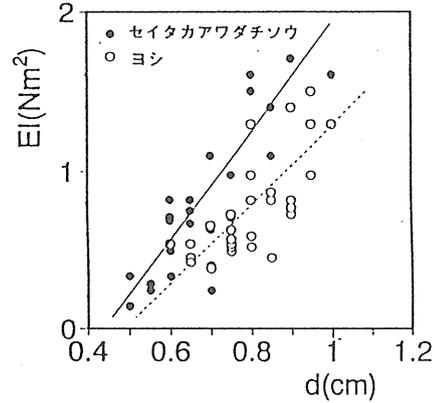


図26 植生の直径と曲げ剛性との関係

表1 植生密度・剛性調査結果

	N_0 (m ⁻²)	l_{0mean} (m)	l_{0rms} (m)	d_{mean} (m)	d_{rms} (m)	EI_{mean} (Nm ²)	EI_{rms} (Nm ²)
A-1	38.3	1.782	0.123	0.0067	0.0009	0.970	0.330
A-2	40.0	1.482	0.114	0.0062	0.0007	0.675	0.290
A-3	27.7	2.060	0.134	0.0085	0.0012	0.720	0.310
B-1	21.3	2.112	0.141	0.0088	0.0009	0.830	0.330
B-2	25.7	1.657	0.116	0.0071	0.0009	0.430	0.250
B-3	22.3	1.700	0.140	0.0081	0.0007	1.280	0.330

1994.8.9-8.11 A:セイトカアワダチソウ B:ヨシ

3.3.2 実植生に覆われた流れの抵抗評価

ある植生種に対して密度、剛性を一定として与えることには無理があるが、ここでは抵抗則の概略を見積もるという観点から、ヨシ、セイトカアワダチソウそれぞれの密度、剛性について、表2のような代表値を設定し、抵抗則を見積もることとする。なお、葉の抵抗は、葉の密接度が小さいものとして無視したが、今後は葉を含めた表現を考える必要もある。

表2 植物の密度・剛性の代表値

	N_0 (m ⁻²)	l_0 (m)	d (m)	EI (Nm ²)	C^*	γ
セイトカアワダチソウ	35.3	1.775	0.00713	0.788	0.447	111.2
ヨシ	23.1	1.823	0.00800	0.847	0.337	76.8

3.2で提案した方法(b)によってエネルギー勾配ごとに水深の変化に対する流速係数、マンニングの粗度係数の変化をそれぞれ示したのが図27、図28である。図27より、流速係数は通常の粗面乱流のように相対水深のみの関数とはならず、エネルギー勾配による変化が大きいことがわかる。一方図28からは、マンニングの粗度係数は洪水痕跡から逆算された草地、堅い草の値⁹⁾と同程度となるものの、エネルギー勾配による変化の大きいことが分かる。

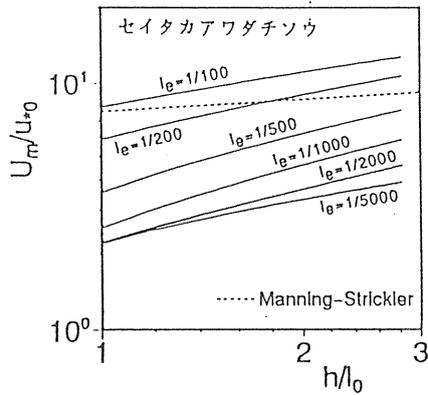


図27 流速係数で表した抵抗予測

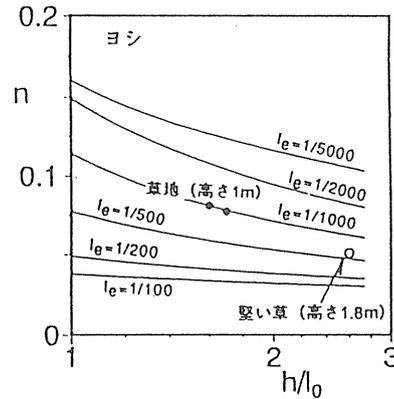


図28 Manningの粗度係数で表した抵抗予測

3.4 水流による植生の変形と抵抗則についてのまとめ

ここでは流れによって変形する直立性植生粗度を対象とし、流れと植生の変形状態の相互関係を数値計算モデルによって調べた。流れのモデルと植物の変形モデルを組み合わせたもので、モデルについては水路実験で検証した。さらにその結果から変形する植生粗度上の流れの抵抗則を提案した。

また、木津川においてセイタカアワダチソウ、ツルヨシなどについて剛性・密生度を実測し、これらの植生上を流れる流れの抵抗を推定した。

現実にはここで取り扱った直立性植生の他にも、植生には様々な形態があり、本研究で提案した抵抗則はそのまま使用できない場合もある。また、洪水継続時間が長くなれば、植生の変形による疲労破壊、土質・根系の状態によっては植生が根こそぎはぎ取られるというような現象が生じることが考えられ、今後本研究での知見を活かして検討を行なっていきたい。

4. あとがき

植生を考慮した河川水理学の重要性が相当認識されてきたにもかかわらず、実験室での理想的な植生モデルを対象とした研究がほとんどで実植生についての知見は必ずしも充分でない。建設省の呼びかけで全国一斉に河川の植生についての調査が行なわれ始めたが、植生を考慮した河川水理学の研究を進めるうえで、あるいは最近流行の多自然型川づくりを考えていくうえで、必ずしも適切な調査とはいえない現状である。本研究ではこうした観点から、実際の河川、河道での調査と研究の接点となる調査研究を狙い、野外での植生調査、実験室・研究室での基礎研究の河川工学的な応用面への橋渡しを意図した。得られた成果は充分ではないが、少なくともこうした観点での研究の方向性は示されたと考える。今後さらに調査・研究を進めていくべき課題はむしろ広がり深まってきた。研究の輪を広げてこれらに対応していきたい。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：植生を伴う流れの水理，水工学シリーズ，91-A-5，土木学会，pp.1-22，1991.
- 2) 植生水理分科会：河川植生の水理研究，Circular No.1，土木学会水理委員会基礎水理部会，15p.，1992.
- 3) 建設省河川局治水課，河川水辺の国勢調査マニュアル（案）植生調査編，51p.，1991.
- 4) 辻本哲郎・北村忠紀：河道内の植物群落調査と植物群落養成の河川工学的意義，第4回水資源に関するシンポジウム前刷集，pp.537-542，1992.
- 5) 辻本哲郎・岡田敏治・村瀬尚：扇状地河川の河原の植物群落と河道特性－手取川における調査，水工学論文集，第37巻，pp.207-214，1992.
- 6) 建設省金沢工事事務所資料，1991.
- 7) 川原健彰：手取川の植物，第4報，1988.
- 8) 建設省金沢工事事務所資料，1991.
- 9) リバーフロント整備センター編集，建設省河川局治水課監修：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案），山海堂，pp.47，1994.
- 10) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No.447／II-19，pp.35-44，1992.
- 11) 室田明・福原輝幸：直立性の植物を有する開水路の流れ構造について，第28回水理講演会論文集，pp.225-231，1984.
- 12) Tsujimoto, T., T. Okada and T. Kitamura : Turbulent flow over flexible vegetation-covered bed in open channels, *KHL-Commun.*, Kanazawa Univ., Vol.2, pp.31-39, 1991.
- 13) 土木学会編：土木工学ハンドブック（上），技報堂，pp.165-166，1974.