

ISSN1347 - 751X

河川環境総合研究所資料第16号

河川環境総合研究所資料
第16号

流量変動と流送土砂量の変化が沖積河川生態系に
及ぼす影響とその緩和技術

平成17年10月

(財)河川環境管理財団
河川環境総合研究所

はじめに

河川およびその周辺域は、流水および流送土砂によって侵食堆積などの攪乱を受ける特異な場所である。この攪乱の形態と規模および頻度が河川およびその周辺域に生息する植物・動物などの生態系の構造と変動を規定している。これが河川生態系を特異なものとし、生物多様性の根拠となっている。変動こそが河川の自然状態なのである。

平成9年の河川法改正により、河川管理の目的に治水・利水に加えて河川環境が加えられ、この特異な場所である生態系の保全・復元が大きな事業目的となってきている。しかしながら、河川生態系の構造とその変動形態については十分な研究調査がなされておらず、また既存の知見も各学問領域の方法と情報編集方式によるため、河川生態系に影響を与える諸要因間の相互作用について体系的な記述がなされているとはいえない。また、流域の開発や河川構造物の建設・操作による攪乱要因の変化という人為的インパクト（作用）が河川生態系にどのような影響を与えていく（る）かについても明確にされていない。

本報告は、河川本来が持つ自然的攪乱と河川流域の人間活動による人為的インパクト（主にダム築造・取水に伴う流量変動と流送土砂の変化）が沖積河川の河川生態系の構造とその変動形態に与える影響に関する知見の集約を行い、諸要因間の相互関連性を分析し、人為的インパクトによる河川生態系の変化を評価・予測する試みを、記載するものである。

本報告で対象とする流量変動と流送土砂の変化による沖積河川生態系の応答事象として考える時間スケールは100年スケール以下のものとする。なお、沖積河川は、河道掘削や取水堰建設などの人為的インパクトの影響を受けており、それらの影響について無視できないので、それらの影響程度についても言及する。汽水域については取り扱わない。

なお本報告は、国土交通省河川局河川環境課の依頼による「河川環境管理と流量変動の考え方に関する検討業務」（平成14～16年度）という課題に対する調査をきっかけに、流量変動のみならず土砂環境等の変化を含めて、当財団の知見を取りまとめ編集したものである。「構造沖積河川学」（山本、山海堂、2004）および河川整備基金事業をきっかけとした「自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系」（小倉・山本編著、技報堂、2005）出版のための調査成果を利用できたことが、取りまとめを可能とした。

本課題に取り組む研究者、河川技術者、河川管理者の参考および指針となれば幸いである。

2005年10月25日

(財) 河川環境管理財団河川環境総合研究所長

山本晃一

目 次

	頁
はじめに	
序 1. 調査研究の目的	i
序 2. 河川生態系における自然的攪乱と人為的インパクト	i
序 3. 調査の方法	iii
第 1 章 河川流量変動と流送土砂の変化による河川生態系の応答変化に対する 認知度と問題意識	
1.1 既往河川環境研究論文から見た認知度	1
1.2 河川管理者の認知度と問題意識	4
[1] ダム下流の河川管理者の回答分析	5
[2] ダム管理者の回答分析	8
1.3 河川流量変動と流送土砂の変化がもたらす河川生態系変化に関する整理	9
第 2 章 既存知見からみた河川流量変動と流送土砂の変化に対する河川環境の応答	
2.1 流量の自然変動と人為的改変	13
2.1.1 潜在的な自然流況と自然的攪乱	13
2.1.2 人為的インパクトによる流況の変化	15
2.1.3 流量変動変化の指標	24
2.2 流送土砂に対する人為的改変	25
2.2.1 潜在流送土砂量	25
2.2.2 自然的・人為的影響が生産土砂量の変化に及ぼす要因とその変化量	28
2.2.3 流送土砂量変化の指標	32
2.3 河川流量変動と流送土砂の変化による河道の変化	36
2.3.1 河川地形システムの捉え方	36
2.3.2 河川地形形成における動植物の位置	36
2.3.3 セグメントスケールの河道地形システムとその内的構造	38
[1] 河床に働く洪水時の掃流力と河道の平均スケール	38
[2] 砂州・蛇行形状と土砂の分級	41
[3] 河岸侵食および氾濫原堆積に伴う土砂の分級と堆積構造	47
[4] 河床材料とマトリックス	52
2.3.4 河川流量変動と流送土砂の変化に対する河道の応答	54
[1] 人為的インパクトに対する中規模河川地形の応答方向と事例	54
[2] 大洪水と河道の応答	65
2.4 河川流量変動と流送土砂の変化に対する河川生態系の応答	68
2.4.1 河川生態系の構成要素と空間・時間スケール	68
2.4.2 河川生態系を規定する支配要因	69
2.4.3 河川流量変動と流送土砂の変化に対する河川生態系応答特性の捉え方	69
2.4.4 河道特性としての植生	71

[1] 河川区域内の環境区分	71
[2] 環境区分と植生配置	72
[3] 植生と自然的攪乱	77
[4] 植生と土砂・流水の相互作用と河川植生の変化シナリオのための情報	80
2.4.5 河道特性としての水生生物	89
[1] 河道内の環境区分	89
[2] 水質区分	90
[3] 環境区分と河床材料・河岸物質	90
[4] 各環境区分・水質区分と生物種	92
[5] 自然的攪乱・人為的インパクトに対する水生動物の応答・変化シナリオための情報	92
2.4.6 河川流量変動と流送土砂の変化に対する生物相の変化	92
2.5 河川流量変動および流送土砂の変化による河川生態系の変化プロセスの仮説シナリオ	94
[1] セグメント1：シナリオA（洪水流量の減少）	94
[2] セグメント1：シナリオB（洪水流量および流送土砂量の減少）	96
[3] セグメント2-1：シナリオC（洪水流量減少）	98
[4] セグメント2-2：シナリオD（洪水流量の減少）	100
[5] セグメント2-2：シナリオE（洪水流量および流送土砂量の減少）	102

第3章 個別河川事例研究を通じた河川生態系の変化シナリオの検証と高度化

3.1 検証法とモデルの高度化	111
3.2 検討対象河川の河道および生態環境の変化	111
3.2.1 矢作川	111
3.2.2 木津川	122
3.2.3 手取川	138
3.2.4 江の川	150
3.2.5 シナリオの妥当性と課題	157
3.3 礫床河道における安定植生域の形成モデルとその適合度	158
3.3.1 安定植生域の形成モデル	158
[1] モデルの構成	158
[2] モデルにおける各過程の具体的取り扱い	159
3.3.2 モデルの感度分析と適合度	162
3.3.3 モデルの改良の方向	169
[1] 物理・化学・植生モデルの精緻化	169
[2] 帰納法による予測の高度化	170

第4章 河川流量変動と流送土砂の変化による河川環境劣化に対する改善方策・手段

4.1 河川流量変動と流送土砂の変化による河川環境劣化に対する保全・復元の意義と 制御要素	173
4.1.1 河川生態系の保全・復元の意義	173
4.1.2 河川生態系制御における操作要素と受動要素	175
4.2 河川流量変動と流送土砂の変化による河川生態系劣化に対する保全・復元技術	177
4.3 今後の課題	179

参考資料

参考資料 1 関連文献一覧表	S- 1
参考資料 2 植生モデルによるシミュレーション実施フロー	S-24
参考資料 3 アユとウグイの産卵場の実態調査法と産卵場の確保流量の考え方	S-30
[1] 既往の知見の整理	S-30
[2] 産卵場の調査法	S-41
[3] 安定的産卵場とは	S-44
[4] 産卵場の保全流量の考え方	S-45

報告書作成に関わった人達

序 論

序1. 調査研究の目的

本研究は、主に山間部に築造される大ダムによる流量レジームおよび流送土砂量の変化による沖積河川の地形変化と河川生態の応答特性を明らかにし、河川生態系の変化量を予測・評価しえるようにすること、また、この変化による河川生態系の劣化を改善するための技術的方策を探ることを目的としている。

序2. 河川生態系における自然的攪乱と人為的インパクト

わが国の河川に全くの手付かずの自然河川はない。現存する河川は、人間が河川に働きかけた歴史的産物であり、人間の手垢のついた二次的自然である。

遠く縄文時代にあつては、植物の採取、狩猟、漁労を生産労働の中心とした生活を営み人口も少ないこともあり、河川との関わりは薄く河川生態系に対する人為的インパクトの影響は微弱なものであった。

紀元前 300 年頃北九州に始まった水稲耕作は、弥生時代中期までには東北青森まで行なわれるようになる。水田の増大は用水を必要とする。畿内を中心に 3 世紀頃から小河川の渇水流量を超える用水が必要となり「ため池」が作られるようになる。難波の堀江や茨田堤に象徴される大河川の沖積地への積極的な進出も行なわれる。平城京や平安京の建設には木材の供給の要から周辺の山の森林破壊も起こる。公地公民の制に基づく条里制、治水工事は沖積地の基盤整備事業であり、河川に対する人為的インパクトであった。

戦国期から江戸時代の近世初期は大沖積地開発の時代であった。河川の瀬替え（流路変更）、用水路の建設、堤防の築造などの工事がなされ、17 世紀初頭 1800 万人であった人口は 100 年後に 3000 万近くに達している。河川が大きく変わった時代といえよう。斐伊川では、花崗岩の風化物である土中の砂鉄を採取する鉄穴流しが活発に行なわれ、多量の土砂が人為的に流され、斐伊川は天井川となり同時に宍道湖を埋め立てた（建設省中国地方建設局、1995）。

明治になり近代的土木技術の導入と日本の産業構造の変化に伴い、河川に対する働きかけの規模が大きくなる。1930 年代になると巨大な電力ダムの建設が行なわれるようになる。高度経済成長が始まる 1960 年頃になると、河川に対する行政投資も国民総生産量に比例して急増していく。この頃から河川水質の悪化を通して河川生態系の変化が世情に認知されだした。1980 年代には地球環境問題などや生態系の保全などが問題とされだし、現在では河川生態系の保全・復元が行政施策として行われている。

戦後、河川生態系に及ぼした主要な人為的インパクト要因としては、次のようなものが挙げられる。

①低水路の掘削・拡張

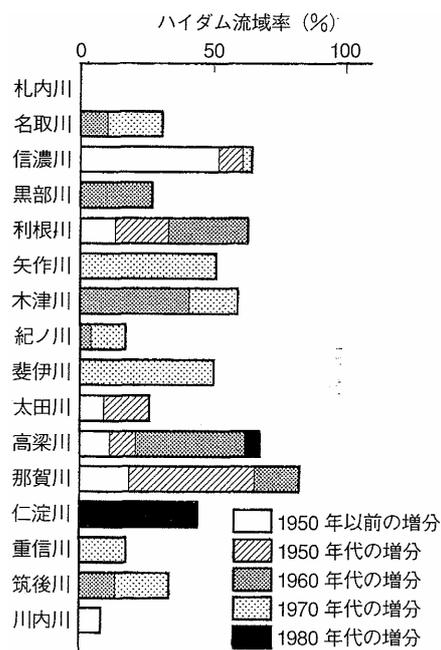
建設用骨材としての河床材料の利用と河道の洪水流下能力増大という二つの目的のため、高度経済成長期（1950 年代後半から 1970 年代前半）をピークとして多量の砂利・砂の採取が行なわれた。採取による河川機能の劣化（既設構造物の破損、地下水位の低下など）が生じるようになり、砂利採取の規制が強化され採取量は急速に減少した。ちなみに河川砂利供給量は、1966 年 2

億 7000 万トン，1973 年 1 億 1000 万トン，1989 年 4300 万トンである（河川行政研究会，1995）。

わが国の山地からの総流出土砂量は年間 2 億トン程度と推定され，そのうち骨材として利用しうるのは 30%程度と考えられるので，1960 年代にはその 3～5 倍の骨材をそれも大河川で集中的に採取していたのである。

②ダム貯水池の建設

図序.1 は，16 の河川のハイダム流域率（沖積平野に出る地点より上流流域面積に占めるダム地点より上流の流域面積の割合）の時間変化を示したものである（建設省治水課ほか，1991）。土砂災害防禦のための砂防ダムの建設や植林事業と相まって，1950～1970 年代にかけて沖積河川への土砂供給量の減少が始まり，現在に至っている（自然災害科学総合研究班，1975；建設省中部地方建設局，1983）。



図序.1 ハイダム流域率の変化（建設省治水課ほか，1991）

わが国のダムの調節容量は大きなものでなく，大洪水ではピーク流量の数割の低減効果でしかないが，洪水流量の低減は確実に生じており，また平常時の流量の平準化が生じている。また，ダムによる貯水は，河川水質（水温，濁度，窒素，リンなど）に変化を与えた。

③丘陵地の開発

都市近郊の丘陵を流下している河川では，70 年代後半から宅地開発が進み，細粒土砂の供給量を急増させ，また洪水流量の増大を招いた。

④河川横断工作物および護岸の設置

従来からも取水のための頭首工・取水堰や河岸侵食を防ぐため護岸・水制などが設置されてきたが，1960 年代後半の高度経済成長以来，その量が急増し，また上流山間地では砂防ダム，流路工などが設置された。これにより水際生態系の劣化，魚類の上下への移動の困難性などが生じた。

⑤都市化と下水道の整備

都市からの流水は多量の汚染物質を排出させる。下水道からの排水量の割合が大きい河川では，

河川水質が下水道の排水水質に規定されるようになってきている。ちなみに 1990 年代後半において、鶴見川亀の子橋で低水流量の 75%、多摩川二子橋で 70%程度が下水道経由となっている。

⑥外来種の導入・遺伝子レベルの異なる生物種の地域間移動

河川における魚類生産量を増大するため、他の場所で生育した魚の放流（例、琵琶湖湖産の鮎の放流、ブラックバスのような外来種の移入により、在来の魚種の減少などが生じている。また河川植生において外来種であるセイタカアワダチソウ、アレチウリ、ハリエンジュ、シナダレスズメガヤ、などが増大し、在来植生種の変化が生じている（外来種影響・対策研究会、2001）。

このような人為的インパクトは、河道形態、河川水理・水文レジーム、河川生態、を変化させている。日本の沖積地河川の河道と河川生態は、上述のような種々の人為的インパクトの影響を受けており、実河川資料を用いてダム貯水池の築造による河川流量変動と流送土砂の変化が沖積河川の地形と生態に及ぼす影響を明らかにするためには、同時に他の人為的インパクト要因の影響についても考察し、変化に与えた影響程度を量的に分析しなければならない。

序3. 調査の方法

既存研究論文をレビューし、知見の集約を行い、人為的インパクトによる流量変動と流送土砂量の変化による沖積河川の河道変化と生態系の変化シナリオを作成し、そのシナリオが適切であるか実河川の河道・環境特性調査により検証する。差異があればその原因を探り知見の拡大を図る。

変化速度を文献調査、事例調査より把握する。それにより変化速度を評価する物理モデルの作成可能性について検討する。

人為的インパクトによる流量変動と流送土砂量の変化による沖積河川と生態系の変化を緩和する手段(技術)について提案する。

参考文献

河川行政研究会編(1995) 日本の河川, 建設広報協議会, pp. 514-517.

外来種影響・対策研究会(2001) 河川における外来種対策に向けて(案), リバーフロント整備センター.

建設省治水課・土木研究所(1991) 河道特性に関する研究その 3, 河床変動と河道計画に関する研究, 第 45 回建設省技術報告会, pp. 696-737.

建設省中部地方建設局河川部河川計画課(1983) 水系における土砂動態と流出土砂の管理に関する検討.

建設省中国地方建設局(1995) 斐伊川史, pp. 162-136.

自然災害科学総合研究班(1975) 土砂の流送・運搬に伴う自然環境変化に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. A-50-9.

第 1 章 河川流量変動と流送土砂の変化による河川生態系の応答変化に対する認知度と問題意識

1.1 既往河川環境研究論文から見た認知度

既往の調査研究事例の収集整理を通して、流量変動と河川環境の関連性に関する認知度を整理した。整理にあたっては、流量と環境の2つの項目について関連する和文の既往文献を JICST 等を用いて抽出した。対象とした文献は、巻末 参考資料 1 関連文献総括表 に示した 110 文献である。

(1) 認知度の変化

流量変動と河川環境の関連性に関する文献数の変化を図 1.1.1 に示す。これを見ると 1995 年以前は数件程度であったが 1995～99 年の 5 年間で 32 件、2000 年～2004 年の 5 年間で 71 件と急激に増加している。1995 年以降、流量変動と河川環境に関する研究報告が増えた理由としては、以下が挙げられる。

- ・ 1997 年度より、既設ダムの洪水調節容量の一部を貯留し、適切な放流を行って、ダム下流の河川環境の整備、保全を図る弾力的運用が開始された。これに伴って放流に伴う河川環境の変化等に関する報告が行われるようになった。
- ・ 1995 年度から河川生態学術研究会では、生態学と河川工学の研究者が、河川生態系に焦点を当てた研究を行っている。本研究会のテーマのひとつとして、「洪水や濁水などの河川が本来持つ攪乱などの自然のインパクトおよび河道や流量の管理、物質の流入などの人為的インパクトの影響を明らかにする。」が挙げられた。特に洪水と生態系に関連する研究内容、すなわち河道内樹林化、糸状藻類の大発生等の流量と河川環境に関する研究が増加する要因となった。

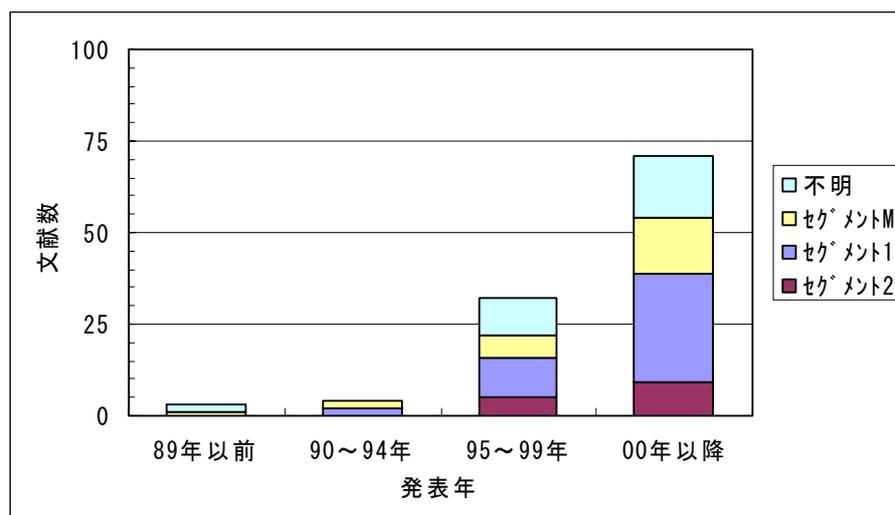


図 1.1.1 既往文献の発行年度と掲載論文数（セグメント別）

(2) テーマ別研究文献数と研究対象セグメント

次に、対象文献を“ダム放流と生態系”，“洪水攪乱と生態系”及び“流量変動と生態系”といった3つのテーマに区分すると、その数の割合は、“洪水攪乱と生態系”に関する文献が42%，“ダム放流と生態系”に関する文献が27%を占め、この2つの分野で全体の69%を占めた(図1.1.2)。

“ダム放流と生態系”については、ほとんどが前述したダムの弾力的運用による河川環境の変化に関する文献である。また、“洪水攪乱と生態系”については、48文献のうち25文献(52.1%)が河川生態学会(多摩川・千曲川・木津川)に関する文献であり、(1)で示した既往研究文献の増加理由に合致する結果となった。

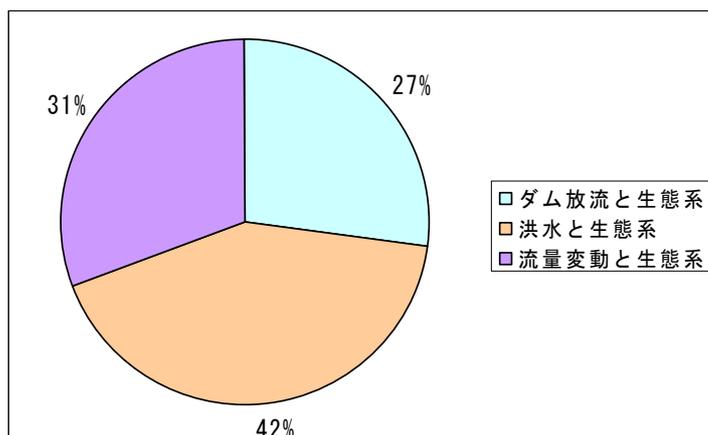


図 1.1.2 既往文献のテーマ別割合

更に上記のテーマについて、既往文献の調査地区から推定されるセグメントについて整理すると図1.1.3のようである(⇒注1)。“ダム放流と生態系”に関するテーマでは、セグメントM，“洪水攪乱と生態系”および“流量変動と生態系”というテーマでは、セグメント1が過半し、セグメント2,3に関する研究報告が少ないことが判る。ただしセグメント2については、1997年以降、報告されるようになり、今後このセグメントにおける研究成果の報告が増大しよう(図1.1.1)。

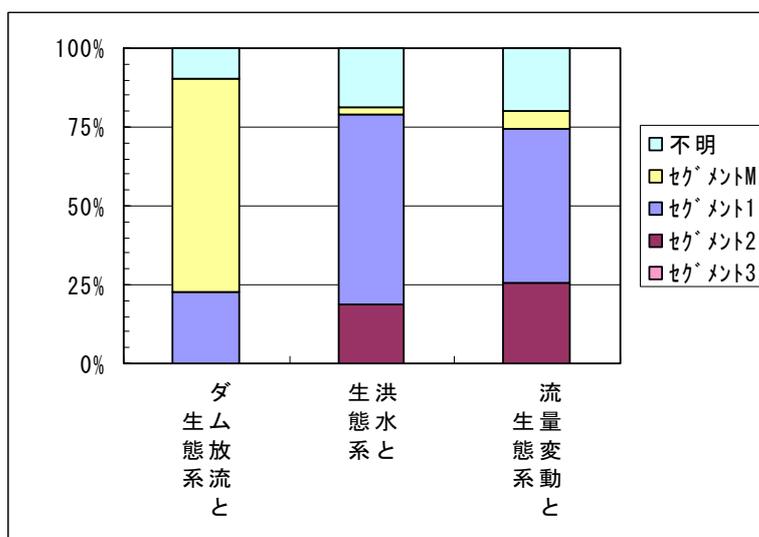


図 1.1.3 調査対象領域のセグメント割合

(3) 調査対象生物種の数

調査対象生物種に見ると、植物(樹木)に関する文献が全文献の 27%を占め、次いで植物(草本)17%、付着藻類 17%、底生動物 16%、魚類 11%、水質 9%の順となっている(図 1.1.4)。これ以外の鳥類及び陸上昆虫類の洪水前後の挙動に関する研究はわずかである。

テーマ別に見ると(図 1.1.5)、植物(樹木)は及び植物(草本)については、“洪水攪乱と生態系”のテーマで多く研究されており、特に、河床低下、洪水による比高差拡大、細粒土砂に伴う植生繁茂に関する研究が多い(多摩川・千曲川・渡良瀬川・手取川・矢作川・神流川)。

これに対して、底生動物、付着藻類および魚類では“ダム放流と生態系”のテーマでの研究成果が多く、底生動物では、流量安定化による造網性トビケラ類等の安定した河床に生息する生物の増加など、付着藻類では流況の安定化に伴う藻類の異常繁殖及びそれに伴う腐敗、魚類では水量減少や水温変化による遡上阻害、仔稚魚の減少、礫底を生息・繁殖場とする魚類の減少等が報告されている。

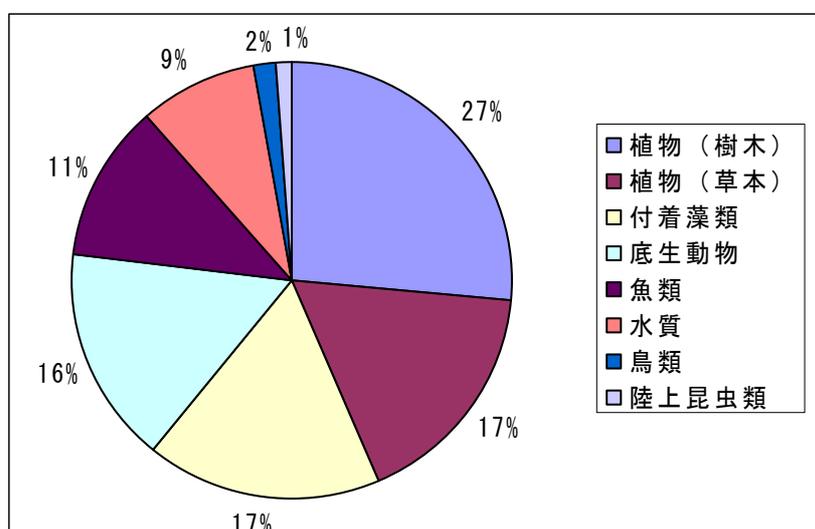


図 1.1.4 既往文献の調査対象生物別割合

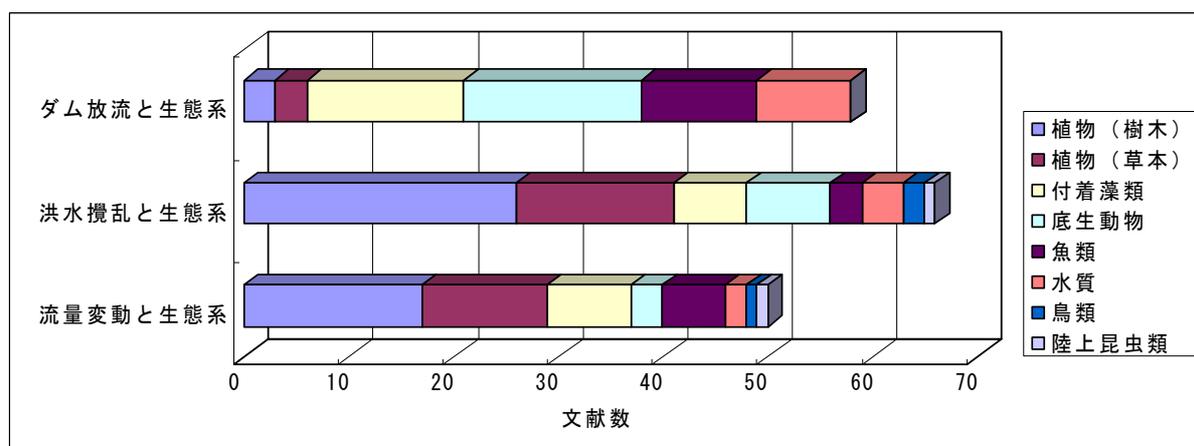


図 1.1.5. 既往文献のテーマ別調査対象生物別割合

1.2 河川管理者の認知度と問題意識

河川管理者の流量変動と河川環境との関連性に関する意識を把握するために、流量変動が及ぼす生態系への影響の認知度・実態把握のためのアンケート調査を全国の直轄河川を対象として実施した。内容は以下の通りである。

【アンケート調査実施内容】

対 象 : 直轄管理のダムおよびその下流の直轄河川区間の管理者
(回答者は係長および課長レベル)

提出方法 : Eメール, FAX または郵送

実施時期 : 配布 平成 15 年 3 月 17 日 → 回収 平成 15 年 3 月 26 日

回答数 : 河川 76 件, ダム 96 件

設問内容

- 1) ダムによると思われる流量変動の変化が見られるか? 想定される変化は以下の通り。
 - ・年最大流量の低下傾向
 - ・平均年最大流量を越える出水頻度の減少傾向
 - ・低水流量等の減少傾向
- 2) ダムによる流量変動の変化によって影響を受けたと考えられる下流域の河川環境の変化が見られたか? 想定される変化内容は以下の通りである。
 - ・出水後に高水敷に細かい土砂が堆積するようになった
 - ・砂礫の河床に泥が堆積するようになった
 - ・砂利が堆積した泥に埋もれ込み動きにくくなった
 - ・かつては出水の度に形状が変化していた中州の固定化が進んだ
 - ・淵が浅くなった
 - ・低水路(みお筋)の幅が狭くなり、干出した場所が広がった
 - ・低水路(みお筋)の固定化が進んだ
 - ・河川横断方向の複断面化が進んだ
 - ・河川敷のワンドが本川と連結する機会が減少した
 - ・かつての早瀬が平瀬の様相を呈するようになった
 - ・よどみやワンドなどの止水域が増えた
 - ・湧き水の量が減少したり、湧き水の場所が少なくなった
 - ・河原に植物が繁茂するようになった(例:ホウシノケガサ, シダレスズメガヤ)
 - ・河原固有の植物が少なくなった(例:カラキリ, カラハコ)
 - ・乾燥した立地に見られる植物群落が増加した(例:ホウシノケガサ, クズ)
 - ・河道内が樹林化した(例:ハエシユ, ヤギなど)
 - ・糸状藻類の大発生が見られるようになった(例:アオトモ・カシオガサ)
 - ・早瀬の平瀬化に伴い、シルトや細砂に生息する底生動物が増えた(例:ユスリカ類)
 - ・浮き石帯の減少によりそこに生息する水生昆虫が減少した(例:マダラカゲロウ類)
 - ・浮き石帯が減少し、砂礫に産卵する魚類が減少した(例:カラムツ・ウグイ・アマゴ)
 - ・早瀬が減少し、砂礫の川底を主な生息空間とする魚類が減少した(例:カジカ類)
 - ・早瀬が平瀬化したため、平瀬でよく見られる魚類が増加した(例:オイワ)
 - ・水位低下に伴い魚類の移動阻害が見られるようになった(例:アユ, サケ)
 - ・湧水の減少によりこれに依存する魚類が減少した(例:ホケトシヨウ, スヤツメ)

アンケートの回答結果を整理すると、以下の通りである。

[1] ダム下流の河川管理者の回答分析

①ダムによると思われる流量変動の変化の有無について

「ダムによると思われる流量変動の変化が見られるか?」という設問に対して、直轄管理ダム下流の直轄管理区間 76 件(河川件数)のうち、41 件(54%)で「ダムによると思われる流量変動の変化が見られる」と回答している(図 1.1.7)。

これをセグメント別に見ると、セグメントM、セグメント1、セグメント2、セグメント3の順となっている。このことはダムが建設されている上流部に近い場所ほど、ダムによる流量変動の変化が認知されやすいことを示している(図 1.1.8)。

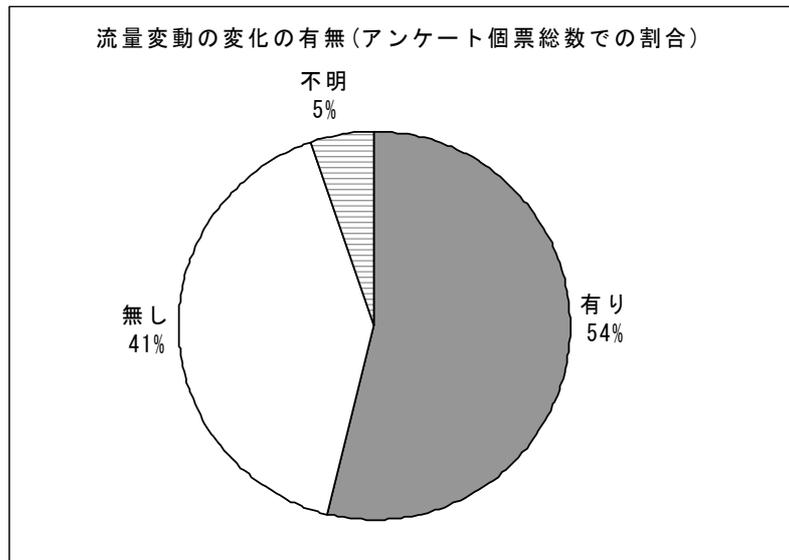


図 1.1.7 流量変動の変化の有無
(アンケート個票総数での割合)

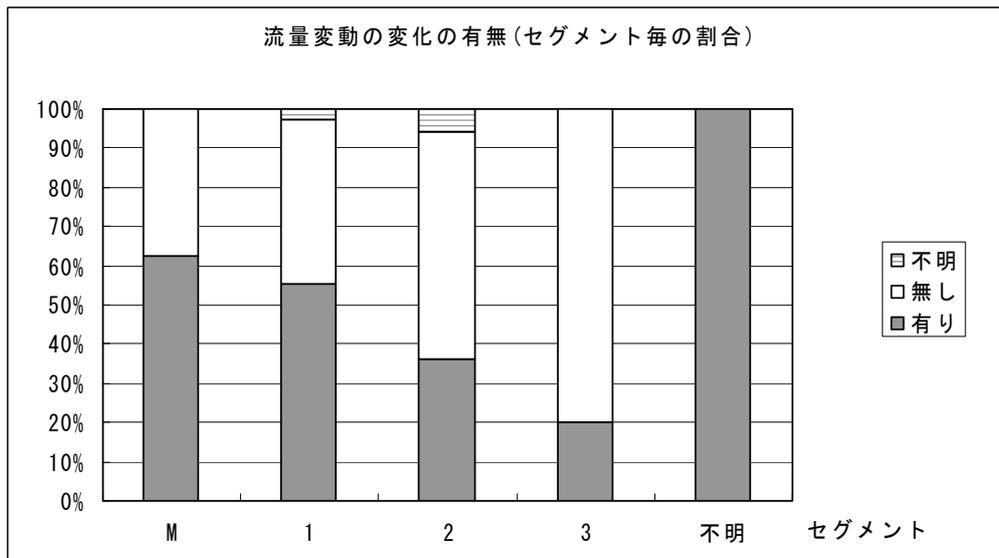


図 1.1.8 流量変動の変化の有無
(セグメント毎の割合)

②ダム下流域の河川環境の変化について

ダム下流域における物理環境の変化としては、河床への泥の堆積、アーマ化、中州の固定化、みお筋の固定化等が見られるという回答が総回答の 25%以上を占めた。生物環境の変化として河道内樹林化、河道内の植生繁茂、乾燥した立地の植物が増加した等が総回答数の 25%以上を占めた。このうち河道内樹林化についてはほぼ半数で変化が確認されている（図 1.1.9）。

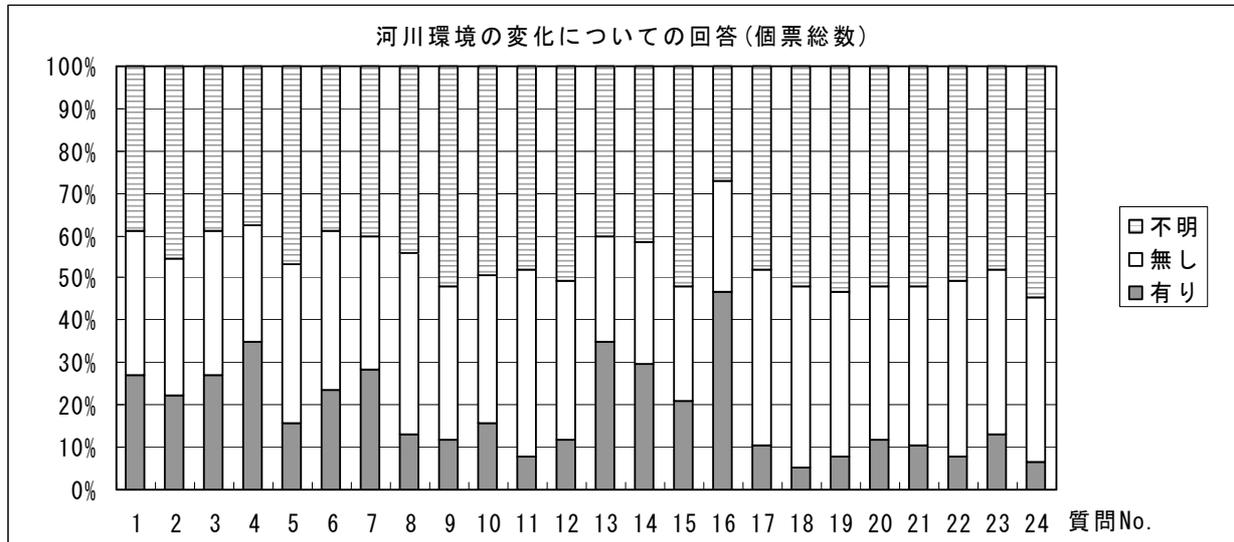


図 1.1.9 河川環境の変化に対する項目別変化認知度の割合

（上図の質問No. の内容は表 1.1.1 に示す）

表 1.1.1 質問項目の内容

物理環境	1	河床に泥が堆積するようになった
	2	早瀬によく見られる浮き石帯が減少した
	3	河床材料が粗粒化（アーマ化）した
	4	かつては出水の度に形状が変化していた中州の固定化が進んだ
	5	淵が浅くなった
	6	低水路（みお筋）の幅が狭くなり、干出した場所が広がった
	7	低水路（みお筋）の固定化が進んだ
	8	河川横断方向の複断面化が進んだ
	9	河川敷のワンドが本川と連結する機会が減少した
	10	かつての早瀬が平瀬の様相を呈するようになった
	11	よどみやワンドなどの止水域が増えた
	12	湧き水の量が減少したり、湧き水の場所が少なくなった
植物関係	13	河原に植物が繁茂するようになった（例：オウシクガサ、シダレスクガヤ）
	14	河原固有の植物が少なくなった（例：カラノギク、カラハコ）
	15	乾燥した立地に見られる植物群落が増加した（例：オウシクガサ、クス）
	16	河道内が樹林化した（例：ハリエンジュ、ヤギ など）
	17	糸状藻類の大発生が見られるようになった（例：アホト・ロ・カシウガサ）
動物関係	18	早瀬の平瀬化に伴い、シルトや細砂に生息する底生動物が増えた（例：ユズカサ）
	19	浮き石帯に生息する水生昆虫が減少した（例：マダラカゲロウ類）
	20	浮き石帯の砂礫に産卵する魚類が減少した（例：カムツ・ウグイ・アマゴ）
	21	早瀬が減少し、砂礫の川底を主な生息空間とする魚類が減少した（例：カジカ類）
	22	早瀬が平瀬化したため、平瀬でよく見られる魚類が増加した（例：オイカワ）
	23	水位低下に伴い魚類の移動阻害が見られるようになった（例：アユ、サケ）
	24	湧水の減少によりこれに依存する魚類が減少した（例：ホケド・ジヨウ、スヤツメ）

③生物関係の変化の因果関係

生物に関する環境変化が他のどの項目と同時に認知されているかを整理することにより、項目間の相互関係を関連の強さを把握した。表 1.1.2 にその整理結果を示す。この表は河川環境の変化についての動植物に関する各質問(質問 No. 13~24:表中の「A」で示したもの)の回答が「有り」であった場合の、他の質問の回答との相関をみたものである。「A」の質問の回答が「有り」で、表中の他の質問も「有り」だった場合の確率(%)を示した。なお、橙色のマスは50%以上の値である。

これを見ると生物に関する環境の変化項目の9割以上が他の項目と同時に変化として認識されている。植物関係では、項目として「13.河原への植物の繁茂」、「14.河原固有植物の減少」および「16.河道内樹林化」が上げられる。このことから、何らかの流量変動に起因する動植物の河川環境の変化が起こっている場所では、陸域植生の変化(植生繁茂・樹林化など)が起こっていることが認知されている。また、これらの陸域植生の繁茂に関連する物理環境の変化として「4.中州の固定化」「低水路(みお筋)の固定化」が同時に認知されている。このことからダム下流域の変化として、下記の変化が一般的な変化として起こっていること知られる。



表 1.1.2 表 1.1.1 における生物の変化項目と他の変化項目との同時認知率 (%)

	質問No.	物理環境												植物環境					動物環境					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
植物関係	13	21	33	45	67	14	48	52	29	17	26	10	12	69	43	79	10	5	26	19	17	24	24	10
	14	22	34	39	71	12	56	61	27	27	27	15	15	71	46	78	7	5	27	20	17	24	37	12
	15	21	29	58	79	29	54	75	42	21	17	0	17	75	79	92	13	4	13	25	17	13	33	13
	16	21	28	38	57	21	45	53	22	14	16	5	12	57	55	38	10	2	16	16	12	12	22	7
	17	73	73	64	73	27	27	27	18	27	27	18	27	36	27	27	55	18	18	45	18	0	27	18
動物関係	18	50	75	25	25	25	25	25	0	25	75	25	75	50	50	25	25	50	25	25	50	0	25	25
	19	42	67	33	58	17	67	58	25	25	33	33	33	92	92	25	75	17	8	42	33	42	25	33
	20	69	77	54	85	23	31	62	38	23	23	8	38	62	62	46	69	38	8	38	38	8	15	31
	21	42	42	17	67	25	42	67	33	17	58	8	50	58	58	33	58	17	17	33	42	33	42	25
	22	15	31	15	54	23	54	38	15	31	62	15	23	77	77	23	54	0	0	38	8	31	31	23
	23	22	28	44	61	28	67	61	17	39	61	17	22	56	83	44	72	17	6	17	11	28	22	22
	24	50	63	38	63	38	50	38	38	75	50	13	88	50	63	38	50	25	13	50	50	38	38	50

[2] ダム管理者の回答分析

①流量データの管理状況について

流量変動と生態系との関連性を検討する際には、過去における流量変動のデータが残っていることが重要である。このため直轄管理ダムにおいて流量データの管理状況についてアンケートを行った。

アンケートの結果、回答件数 96 ダムのうち、「着工前データが有る」、「工事中の流量データが有る」と回答したダムは、それぞれ全体の約半数であり、約半数のダムでは着工前・工事中等の流量データが残っていない(観測されていない)ことが判った。また完成後の流量データは全てのダムで管理されているが、電子化されているのは 63 件で、全体の 66%程度である。

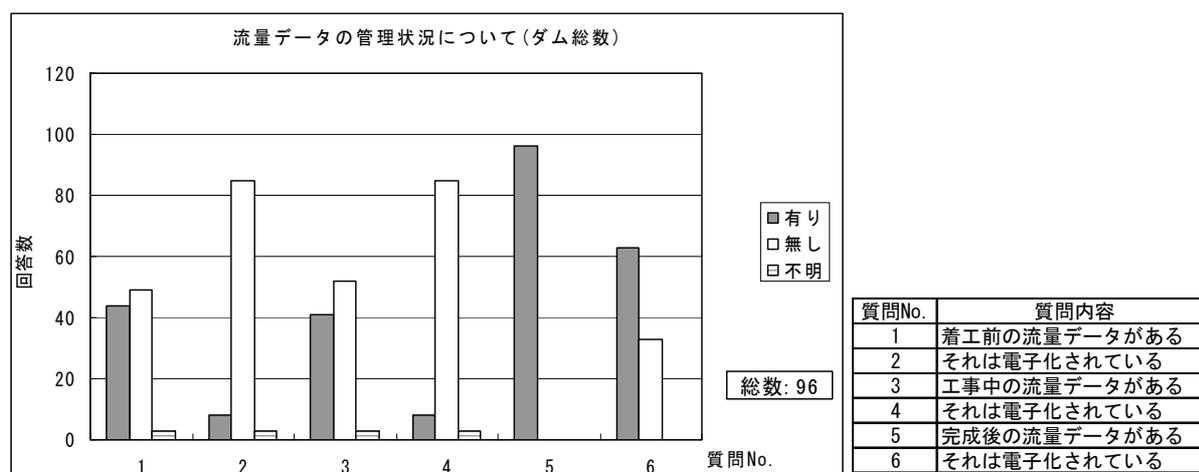


図 1.1.11 流量データの管理状況について(ダム別)

②ダム下流域の河川環境の変化について

ダム下流域の河川環境の変化としては、物理環境の変化として中州の固定化、みお筋の固定化、アーマールコート化が多く見られた。また、生物環境の変化としては、河川と同様に、植生繁茂、河道内樹林化等が挙げられている(図 1.1.12、表 1.1.2)。

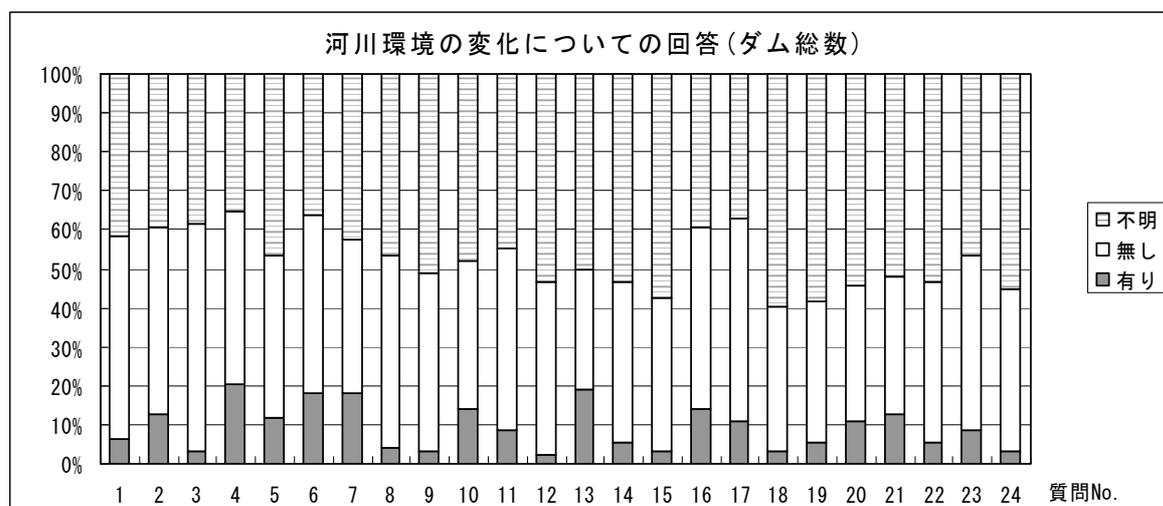


図 1.1.12 河川環境の変化についての回答(ダム総数)

1.3 河川流量変動と流送土砂の変化がもたらす河川生態系変化に関する整理

皆川（2000）は文献調査より、出水がハビット、河川生物に果す役割について表 1.3.1 のようにまとめている。この総括表、今回収集した文献および河川管理者へのアンケート調査より浮かび上がる大ダム築造および取排水による河川流量変動と流送土砂の変化がもたらす河川生態系の変化は、以下のようなものである。

(1) 礫床河川においてダムが扇頂に近くに築造され河床がアーミングした場合

- ・ 川幅の縮小
- ・ 河床低下（平均河床高で 1～3m）
- ・ 高水敷の増加と草本類の侵入，樹林化
- ・ 河床材料表層の C 集団の増加（アーミング化）
- ・ 河床の移動機会の減少
- ・ 淵・瀬の消滅と平瀬化
- ・ 付着藻類種の変化（糸状藻類の増加）
- ・ 造網性昆虫の増加
- ・ 魚種と量の減少（アユの産卵場の減少）
- ・ 攪乱の減少による植生相の変化（河原性植生の減少）
- ・ アジサシ等の河原礫上に産卵する鳥類の営巣数の減少，河原の鳥類の減少
- ・ 平常時水面幅の変化（増える場合と減る場合がある）

(2) 礫床河川とダム築造地点までの距離が長く礫分の供給がある場合

- ・ 多列砂州河道における島状地形の発達⇒河道の統合化（川幅の縮小）
- ・ 単列砂州河道における川幅の縮小
- ・ 島状地形上と高水敷への草本類の侵入，樹林化
- ・ マトリックス材としての砂分の減少（実態調査なし）
- ・ 瀬・淵構造の変化⇒川幅縮小による砂州列数の減少による瀬・淵位置と規模の変化
- ・ 河原性植生の減少（カワラノギク等）
- ・ 魚種と量の減少（アユの産卵場の減少）
- ・ アジサシ等の河原礫上に産卵する鳥類の営巣数の減少

(3) セグメント 2-2 の河道において礫分を含む場合

- ・ 砂分の抜け出しによる礫床河川化
- ・ 川幅の減少
- ・ 砂川生態系から礫床生態系への変化 ～ 水生生物種の変化
- ・ 高水敷の樹林化，鳥類相の変化（里山の鳥類の増加）

(4) セグメント 2-2 の河道において礫分を含まない場合

- ・ 河床のセグメント上流からの低下
- ・ 川幅の縮小 ～ 魚類等の生息場所の減少
- ・ 高水敷の樹林化，鳥類相の変化（里山の鳥類の増加）
- ・ 瀬・淵数の変化（多列砂州の場合には減少，単列砂州の場合には増加）

表 1.3.1 出水がハビタット、生物に果たす役割 (皆川, 200)

	出水時期又は出水の規模・攪乱の程度	役割・機能	文献及び研究・調査事例	
季節的な出水と生物	春期	<ul style="list-style-type: none"> 春出水は、魚類の遡上、産卵のトリガーとなる。 融雪出水による裸地の形成はその後のヤナギ類の種子の定着地となる。 増水時にワンドや高水敷の草地などが冠水あるいは増水することにより本川と連続し、ワンドやタマリで生活史の一部として利用する生物の存続を維持 	<ul style="list-style-type: none"> 河川下流域の魚の多くは、6月の梅雨期に増水した川の河川敷の草地や湿地帯へ侵入して産卵する修正を身に付けた(片野 1995) 春出水による流量増加は、Coregoninae (ルコノス属魚類) の孵化と流下の開始に対して最初のきっかけを与えた (Naesje T et al. 1995) ヤナギ類は、融雪出水の減水期に種子を分散し、融雪出水によって形成された裸地にいち早く侵入する (中村 1999) 千曲川における 1999 年 5 月のワンド調査において、出水による本川の増水に伴い、本川とつながっているワンドに魚類が侵入し、ワンド内の魚類は増加した (建設省土木研究所環境部河川環境研究室 2000) 	
	様々	<ul style="list-style-type: none"> 出水による種子散布、及び攪乱による種子の再散布 (中村 1999) 		
水域の攪乱	小	<ul style="list-style-type: none"> 平常時の数倍以上の河床堆積物が掃流 (フラッシュ効果) する程度の水 底質に堆積した細粒土砂の掃流 	<ul style="list-style-type: none"> 自然共生研究センター実験河川における人工出水実験 (平常時流量 0.1 m³/s を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 m³/s に増加、ピーク継続時間 20 分) では、出水前の現存量によるが、少なくとも (平常時の 10 倍掃流力では 5 倍) で、附着藻類は有意に減少する (皆川ほか 2000) 松浦川水系ダム厳木ダムにおけるフラッシュ放流 (1998. 11, 厳木川流量 0.8 m³/s を 10.7 m³/s に増加、ピーク継続時間 2 時間) では、附着藻類の現存量や底生動物の個体数・現存量・群集構造への影響は認められなかったが、比較的移動性の大きい底生動物への行動には影響を及ぼした (皆川ほか 2000) 木曾川水系比奈谷ダム試験湛水時の流量減少によりカゲ目目は激減し、トミズ目目は増加していたが、フラッシュ放流のフラッシュ放流 (1998. 3~4, ダム放流量 0.5 m³/s → 11 m³/s に増加 (約 1 ヶ月間継続)) によって、その分布は試験湛水前と回復する兆候がみられた (辻本 1999) 	
	大	<ul style="list-style-type: none"> 河床材料の移動を伴う出水 一般に、無次元掃流力 $\tau_* > 0.06$ 	<ul style="list-style-type: none"> 利根川水系五十里ダムにおけるフラッシュ放流 (出水期 4~7 月に 1 回/月、対象放流は 1997. 5) では、ダム放流量 1.0 m³/s → 100 m³/s に増加 (ピーク流量継続時間: 20 分) させた。その結果、河床材料の移動 (最大粒径約 23cm)、附着藻類は Ch1-a で 1/3 に減少 (緑藻、珪藻綱は大きく減少、藍藻類網は残存率が高い)、底生動物は早瀬、平瀬でカゲ目目やトミズ目が減少、深い淵で増加傾向) 底質の炭素・窒素含有率が約 1/3 に低下、放流前後の水質では Ch1-a 及び大腸菌数等の低下が確認された (角 1998) 	
	大	<ul style="list-style-type: none"> 河床堆積物が動く事による河床内間隙水域 (河川水が河床内に浸透した水域) の溶存酸素を含んだ浸透水の維持 河床内間隙水域生物のハビタットが維持 	<ul style="list-style-type: none"> 水生昆虫にとって重要な河床内間隙水域を維持するために溶存酸素を含んだ浸透水の存在が必要となり、このような生息場所条件が同等の攪乱時に堆積物が動くことが必要 (竹門 1997) 	
	大	<ul style="list-style-type: none"> 河床材料の移動に伴う底生動物の流出 優占種の変化、群集構造の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 実験より河床材料が移動した時に顕著に、水生昆虫が流出することが把握された (清水ほか 1998) 流量が安定すると極相として造網型が優占するが、出水による攪乱・流出後は、まず、遊泳型、匍匐型が回復し、その後造網型が回復し、優占種は変更する。伊勢湾台風後の大規模攪乱後の調査結果によると、台風前の状況の回復するのに 7 年を要した (津田 1972) 平常時流量の 7~10 倍の出水後の南浅川における回復過程では優占無き群集→匍匐型・造網型優先群集に遷移し、1 年後には洪水前の組成に群集回復 (小倉 1985) 	
	大	<ul style="list-style-type: none"> 2~3 年に一度の規模の出水 5 年に一度の規模の出水 	<ul style="list-style-type: none"> 瀬や淵等、川の形を形成 階段状河床型の淵の形成 	<ul style="list-style-type: none"> 河道の平面形態は低水路溝床流量 (平均年最大流量=2~3 年に 1 回の出水) くらいで規定される (山本 1994) 千代川上流域における階段状河川形態の淵は、約 5 年確率の洪水に対する階段状形態とよく対応している (藤田 1995)
	水際域から陸域の攪乱	冠水領域、冠水頻度の増大	<ul style="list-style-type: none"> 冠水領域の拡大 →本川とワンドやタマリの連属性が高まり、ワンドやタマリを生活史の一部 (産卵等) として利用する生物の存続を維持 冠水頻度 →地被状況に大きく関与 	<ul style="list-style-type: none"> 本流が増水し場合には、その周囲が冠水し、本流やワンドに住むフナ類やナマズ、ドジョウなどが冠水した場所で産卵 (片野 1998) 碓氷川では冠水頻度が 1~5 日/年を越える場所が裸地が多い (萱場 2000) コロラド川グレン・キャニオンダムにおけるフラッシュ放流 ((1996. 3) ダム放流量 200 m³/s → 1,270 m³/s に増加、継続時間 8 日) によって、直径 75cm 程度の 10 個の河床材料は全て流下 (平均 230m) し、砂浜が形成された (100 ヶ所の砂浜のうち 10% が減少、50% が増加、40% は影響を受けなかった)。河畔植生への影響については、草本植物、特に一年草に有意な減少。外来植生のタマリスクの発芽の若干の抑制効果のみ見られた。魚類への影響では、在来種は流れの緩やかなところに逃避、移入魚種 (帰化魚) も流失せず (鷲谷 1998) (Collier M 1997)
水際域の侵食・堆積		<ul style="list-style-type: none"> 水際域の侵食・堆積による砂州の形成 水辺植生の保全 (奥田・佐々木 1996) (植生遷移が進まない) 		
流路の変更及び砂州の移動		<ul style="list-style-type: none"> 砂州の移動に伴う植生帯が破壊 →裸地河原の再生 →河原に依存して生育生息する生物の保全 →生物多様性の維持 (鷲谷 1999) 	<ul style="list-style-type: none"> 千曲川においては、1999 年 8 月に生じた観測史上最大規模の出水により、砂州の移動、木本類を含む植物帯の破壊・流出し、規模な裸地河原が再生した (中村 1999) ケショウヤナギの種子は、流路変化などによる攪乱によって生じた砂礫裸地に先駆的に侵入することにより存続を可能にする (建設省土木研究所北陸地方建設局松本砂防工事事務所 1995) 	

注1) セグメントの定義とその特徴については、「構造沖積河川学」(山本, 2004, 山海堂)を参照されたい.

参考文献

皆川朋子(2000) 出水による付着藻類と底生動物の変化, 多摩川の総合研究, pp. 771-781.

第 2 章 既存知見からみた河川流量変動と流送土砂の変化に対する河川環境の応答

2.1 流量の自然変動と人為的改変

2.1.1 潜在的な自然流況と自然的攪乱

日本の河川の流量変動は、よほどの原始河川でない限り自然要因と人為的要因の影響を受けている。以下、人為的影響の加わらない自然の流量を潜在的な自然流況と呼ぶことにする。これは集水域の気象条件と地理条件によって決まる。より具体的には、降水量から蒸発散を差し引いた量がインプットとなり、地質や土地被覆や勾配によって地下に浸透する量と表面流出の比率が定まり、さらに流路網の合流・分流などが作用して観測地点の流量になる。豊水量（年間 95 番目日流量）以上では気象要因（降雨流出）が、低水量（同 275 日流量）以上では地質要因（地下水流出）が流量を主に規定し、平水量（年間 185 番目日流量）では両者が同じくらいの規定力（偏相関係数）を持つことが示されている（虫明ら，1981）。

気象条件のうち、降水量は我が国では 800～3,200mm/年（平均 1,800mm）と開きが大きく、北海道東部・瀬戸内・長野盆地などの少雨地帯から紀伊半島南部・四国南部・九州南部・南西諸島といった多雨地帯まで多彩である。主たる降水は降雪・梅雨・台風の 3 つであり、これらの軽重で大まかな分類ができる。梅雨や台風は降雨と同じ時期に河川流量が上昇するが（到達時間はせいぜい数日）、降雪は融雪期にならないと河川流量の増大に寄与しない（積雪はいわば天然の流量バッファである）。一方蒸発散量は日本国内でそれほど差がなく、浅い水面からの蒸発量は北海道・東北・北陸で年間約 500mm、関東・西日本で約 700mm、森林からの蒸発散量は北海道で 500～700mm、四国・九州で 800～900mm とされている（近藤，1994）。

地質と流量の関係では、東北日本—西南日本および外帯—内帯という地質構造区分と河川流況が関連していること、それが人間の水利用と土地利用に深く関連づけられていることが、小出（1970，1972）によって示されている。かいつまんで言うと、東北日本（信濃川・利根川より東北側）は大規模な地質構造と調和的な大河川が多く、盆地の底を流れることから本流の水を利用しにくい状態にあったため用水は支流の扇状地が主となり本流は多目的ダム型の開発が進められた。西南日本ではその逆であり、外帯は平野が小さく破碎帯地すべり地帯の保水力が大きい山地が豊富な降水量とあいまって、多目的ダムを含んだ発電開発が盛んである。

虫明ら（1981）は、もう少し小さなスケールで低水量を分析し、低水流出量を水力発電所の常時使用水量から推定し、第四紀火山岩類から成る流域で最も大きく（2mm～5mm/日）、次が花崗岩（1.5mm/日）、ついで第三紀火山岩類（1.3mm/日）、最も小さいのが中・古生層（0.3～1.0mm/日）という関係が見いだされている。

現在の流量観測点で潜在的な自然流況を捉えている場所は皆無といえるが、比較的人為的影響が小さいと思われる観測例を示したのが図 2.1.1 である（1998 年建設省流量年表より、地点名の横にある数値は流域面積、縦軸は流量を流域面積で割った比流量）。前述した降雪・梅雨・台風の 3 要素のうち、降雪は北日本で 3～4 月の融雪期流量を豊富にする（a 北海道、b 北陸、c 東北太平洋岸など）。梅雨は北日本以外で 6～7 月の流量増に現れる。降水量の少ない関東（d）、瀬戸内（h）、北海道東部（i）などは年総量が小さいだけでなく出水時以外の流量変動に乏しい。地質構造区分で外帯に属する伊豆半島（e）や九州南部（g）は基底流量が大きい。自然湖沼の下流（j）では変

動が大幅に平滑化される.

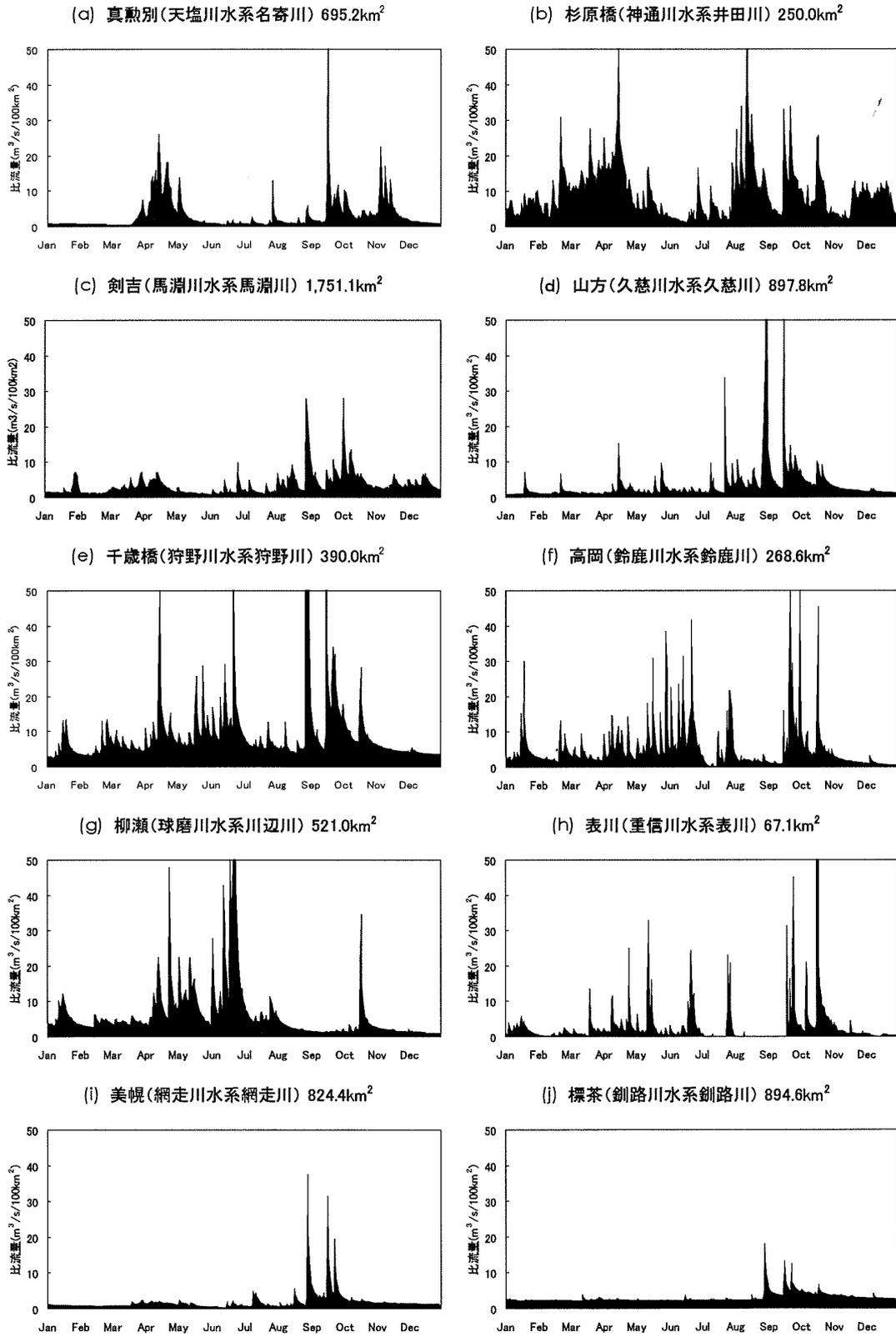


図 2.1.1 自然流況の例 (白川, 2005)

流域が広いと多様な地域から水を集めることになるので流量変動は一般に小さくなる。同じ流量年表から既往最大流量（流域面積 100km² 当たりの比流量）を抽出し、横軸に流域面積をとってプロットしたものが図 2.1.2 で、流域面積が広がるほど比流量の小さくなる傾向がはっきり見て取れる。しかしこの関係は東日本（北海道、東北、関東、北陸）と西日本（東海、近畿、中国、四国、九州）で異なる。流域面積と比流量の相関は東日本の方が強く（相関係数 -0.49, 近似直線の傾き -9.11）、西日本では面積に関わらずほぼ一定値をとる（相関係数 -0.32, 近似直線の傾き -0.74）。同程度の面積に同程度の降雨量があった場合、東日本では平均流域面積が広いことから降雨が一本の川に集中しやすいが西日本では何本かの河川流域にまたがる可能性が高い。また、東日本では流域の一部しか覆わない豪雨域でも西日本では流域全体が覆われることにもなる（比流量は大きくなる）。

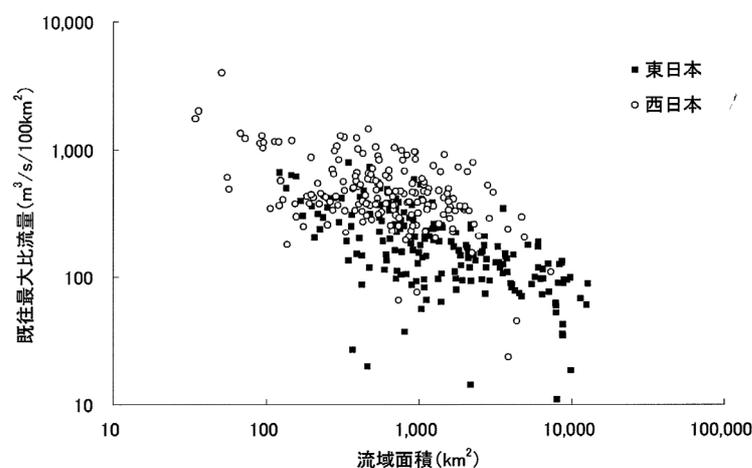


図 2.1.2 流域面積と既往最大比流量の関係（流量年表より）（白川，2005）

図 2.1.2 で既往最大比流量が特に小さいのは大河川の分派河道（旧北上川や江戸川）および自然湖沼からの流出河川（釧路川・千歳川・阿賀野川・天竜川・淀川）である。そのほか東日本では最上川上流や北上川本川，そして北海道の各河川（規模の小さいものを除く）が小さく，関東の外帯河川（富士川・鶴見川・荒川・烏川）と東北中央部（鳴瀬川・雄物川など），北陸では常願寺川などで相対的に大きくなっているが 1,000m³/s/100km² を超える地点は 1 つもない。対照的に西日本では自然湖沼下流のほかには小さい川はなく（あえていうなら芦田川），逆に大きい川は紀伊半島，東海，四国（含瀬戸内側），九州に目白押しである。ただし比流量が特に大きいのは中小規模河川であって，流域面積 500km² 以上でかつ比流量 1,000m³/s/100km² を超えるのは那賀川と北川（五ヶ瀬川）のみである。

2.1.2 人為的インパクトによる流況の変化

潜在的な自然流況に加わる人為的インパクトは，ダムや堰の貯水/放流による流量変動の時間的コントロール，取水と排水による直接的な流量の増減，そして流域地形の改変（土地被覆の不浸透化，森林伐採など）による間接的な影響の 3 種類に分けられる。これを模式的に表したのが図 2.1.3 である。ダムによる流量コントロールは，長期（1 年ないし複数年）の総流量を保ちつつも洪水

や渇水の時期を変化させる。取水/排水は流量自体を増減させ、河川縦断方向の不連続を生み出す。地形改変は水循環機構を変質させ、流量への影響の出方は単純でない。以下、これら3種類の影響を順番に見ていきたい。注目すべき現象は、洪水（年数回程度より大）の規模と生起回数、中小出水（年数回～数十回）の規模と生起回数、低水や渇水流量の大きさ、そして細かな時間変動である。

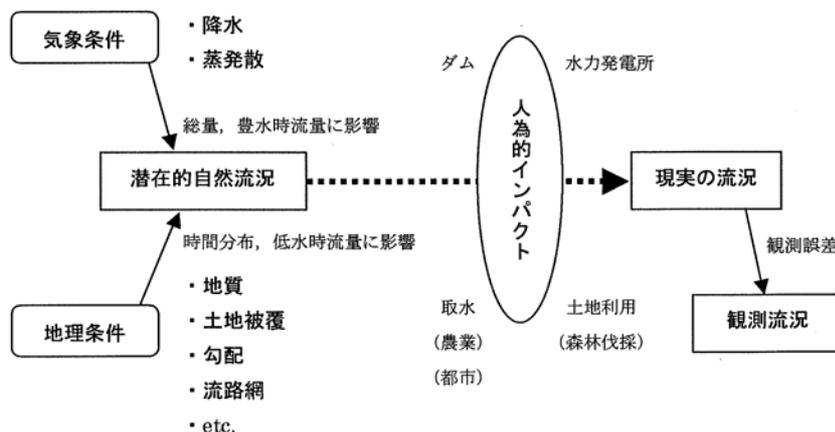


図 2.1.3 河川流況の形成要因と人為的インパクト（白川，2005）

(1) ダム操作方式の基本パターン

ダムという言葉はかなり曖昧に用いられている。日常会話では、水をせき止めている構造物とせき止められた水域、それにその周辺の土地を漠然と指してダムと呼ぶことが多い。

公式には、河川法（第四十四条）や河川管理施設等構造令（第三条）などにより基礎地盤からの高さ15m未満のものを日本では基本的にダムでなく堰と呼んでいる。ちなみに「ダム年鑑（2001年版）」に記載されている日本国内のダムは3,117個（ただし建設中・計画中のものを含む）である。

ダム（堰も含む）は、①水を止める、②上流側の水位を高める（せきあげる）、③背後に水をためる、といった機能を持つ。ダムの用途は図 2.1.4 にもあるように多岐にわたるが、各用途には競合するものもあれば共存可能なものもある。灌漑や水供給は水量を利用するのに対し、水力発電は水量と落差（エネルギー）の利用であり、航行やレクリエーションは「場」の利用である。洪水調節は、大流量（too much water）のピークを空間的および時間的にずらして平滑化する。

揚水式発電ダムや舟運ダムなどは流れの阻害や堰上げ等の問題をはらむものの下流の流況に大きな影響を与えない。沖積河川の流況の観点からは、流水の貯留機能を持ち（③）流況をコントロールする能力を持つものと、水位を高めて（②）取水するだけのもの（いわゆる run-of-river タイプ）を区別して扱うことが必要である。

日本では、急峻な地形、平野部の稠密な人口/資産分布などから、ダムのほとんどは上流部の山あいにつくられている。そのため都市用水や灌漑用水の需要地からは離れており、ダム地点で水が取られることは少ない。つまり、ダムは流量コントロールだけを行い、長期的にみてダム流入量と放流量は等しい（厳密には湖面蒸発量の変化分だけ差が生じる）。また集水域面積に比して貯水池の規模は小さく、経年貯留（複数年にわたる貯水）が困難なため、単年度単位で操作が行わ

れる。つまり、一年を単位とするとダム流入量とダム放流量は等しく、流量増減のタイミングだけがずらされる。水資源利用では（とくに年間を通して需要量の変動が少ない上水道・工業用水の場合）渇水期に使える水量が問題となり、水利権も渇水流量を基準として定められるため、洪水期の流量を減らして渇水期の流量をその分増やせれば、利水可能流量が増えることになる。これを水資源開発と呼んでいる。

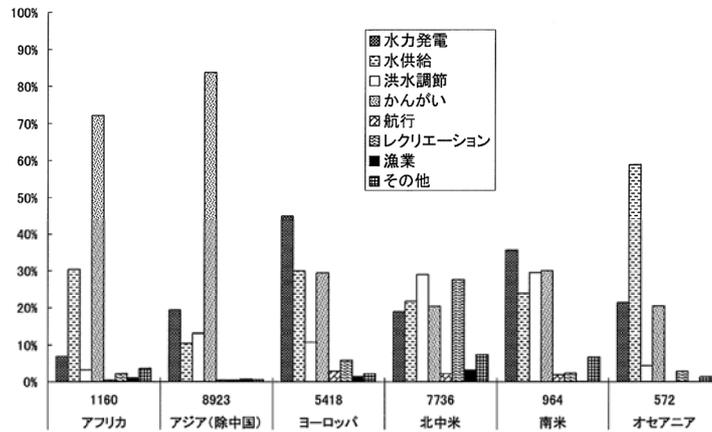


図 2.1.4 大陸別ダム用途 (WCD 国別データより) (白川, 2005)

[大陸名の上の数値はダム数, 多目的ダムを含むため, 合計は 100%を超える]

水供給を目的とするダム操作では、洪水期直前に貯水池水位をできる限り低下させ、洪水期に水を可能な限り貯めて用水にまわすのが最も効率的な操作となる。この操作方法は洪水調節の目的からみても最善である。ところが気象の長期予測は不完全であるから、洪水期に予期した洪水が来ない可能性もある。来なかったとき水不足に陥らないよう、いくらかは貯水池に水を残しておかねばならない。しかし残しすぎると、いざ洪水が来たときにそれを貯めきれずに無効放流することになってしまうし、場合によっては洪水調節の能力も発揮できなくなる。巨大な貯水池を用意することができればこのジレンマを防げるので、大陸部では技術的限界までダムが巨大化した。地形に制約されて巨大化を妨げられる日本の多目的ダムでは夏期制限水位を設けてこれに対処しているが、夏のきまぐれな天気によって左右されて渇水もしばしば生じるのを避けられない。

灌漑ダムでは季節によって水の需要が大きく異なる。大部分を占める水田灌漑では、代かきから田植えにかけての時期（6 月前後）に最も多量の水を必要とする。図 2.1.5 には農業用水の供給量を例示した。群馬用水には上水も全体の 3 分の 1 ほど含まれているが、その取水量は通年ほぼ一定値である。農業用の水需要が顕著な季節変化を持つことがわかる。

貯水池を発電目的で操作する場合、満水状態に近ければ近いほど落差を稼げて有利である。しかし、水力発電が電力供給全体に占める割合が低くなると、出力調整に費用と時間がかかる火力や原子力発電がベースロードを担うようになり、水力はピーク対応としての意味合いが強くなる。すなわち、電力需要の増減に応じた運転（＝ゲートの開け閉め）が求められるようになるのである。電力需要は河川流量と何の関係もなく、また他の利水需要とも全く独立して動くから、ダム操作も他の用途と必ずしも調和しない。発電ダムでは一日の中で激しい流量変動がみられることもあり、下流の河川環境に大きな影響を与えるほか、レクリエーション利用にも危害を及ぼす。

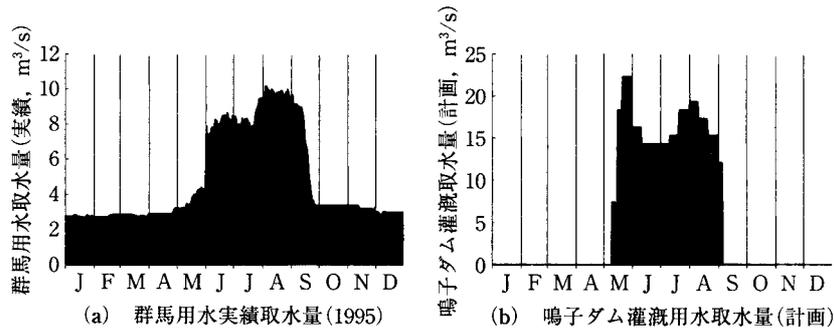


図 2.1.5 農業灌漑用水取水量季節変化 (白川, 2005)

[群馬用水は水資源公団施設管理年報より, 鳴子ダムはダム管理所 HP より]

[群馬用水には上水 (通年ほぼ $1.60\text{m}^3/\text{s}$ で一定) を含む]

まとめると, ダム操作はその用途に応じて表 2.1.1 のような流況変化をもたらす. ただしこれは定性的な一般論であり, ダム下流の点でどのような流量変動が現れるかは土地ごとの地理/地質条件に大きく左右される. その実例を次にいくつか挙げてみたい.

表 2.1.1 ダム用途と下流流況への影響 (白川, 2005)

用途	影響を受ける流況要素	影響
洪水調節	洪水ピーク流量 (年最大流量等)	・ダムに貯留され, 減る (図-3.6 参照).
	洪水頻度	・減る
	洪水通減期流量	・ダムに貯留した洪水を放流するため, 増える.
	洪水前の流量	・洪水に備えダムに空きをつくるため, 増えることがある.
農業灌漑	灌漑期流量 (日本では 6~8 月が中心)	・顕著な増加 (ただし農業取水口まで). 図-3.5 参照. ・農業取水口より下流では減少 (ただしダムがなくても同じ).
	非灌漑期流量	・灌漑用水を確保するため, 基本的に減る.
上水道/ 工業用水	渇水流量	・基本的に通年一定の水を要するため, ダムと取水点の間では渇水流量が増強される (もしくは不変). 取水点より下流では減る.
	豊水時流量	・豊水時の流量は渇水時補給のため貯留され減る. 例えば融雪水. ・全体として, 流量変動は平滑化される.
水力発電	平常時流量	・水路式・ダム水路式発電では減水区間が生じるが, ダム式では生じない. 貯水池・調整池式発電では日々変動/日内変動が生じるが, 流れ込み式では生じない.
	細かな変動	・調整池式では, 日内需要変動に合わせて運転することがあり, 24 時間周期の激しい変動を見る.
レクリエーション	時間単位での流量変動	・釣りやボート等の活動では, 急激な水位上昇は危険をもたらすので可能な限り平滑化が望ましい.
景観	夏季/昼間/休日の流量	・観光地では, 訪問客の多い季節/時間帯に合わせて放流を行う. ダム, 滝, 渓谷等が対象.
舟運・揚水発電	影響なし	・舟運ダムは流量操作の必要がない. ・揚水式発電ではいったん水を貯めてしまえば基本的に管内を上下するだけで, 流況は変化しない (はずである).
流域変更	年総量等	・流域変更は農業用水, 都市用水, 発電用水で見られるが, 取水河川の年総流量を減らし, 排水 (導水先) 河川の流量を増やす.

(2) ダム操作による流況変化

河川の流況を評価するのに現在よく使われる、豊水量（年間 95 番目日流量）、平水量（同 185）、低水量（同 275）、渇水量（同 355）という指標は、明治時代の水力発電調査に起源を持つ。年間を通じ安定して発電できる量は渇水量に依存するが、貯水池の大型化や送電・配電技術の進歩が低水量や平水量までの発電使用を可能にした。この考え方は都市用水などの水資源開発にも通用する。すなわち、渇水量はその地点での利水可能量を示し、平水量や豊水量は水資源開発の可能性を示す量と捉えられる。よって、利水目的のダム操作は自然状態に比べて豊水量を減じ渇水量を増強する方向に働くと推定することができよう。なお、日本では超過日数を d として Q_d の形で表現する（例えば豊水量は Q_{95} ）が、外国では超過割合を x として Q_x と表す（例えば豊水量は $x=95/365=0.26$ だから Q_{26} ）ので注意が必要である。

まずはこの伝統的な指標を用いて日本の河川流況変化をマクロにみてみよう。1970 年を境にして日本全国に建設省が設置した流量観測点（305 地点）のデータを整理し、大きい順番に並べて非超過割合 90%、80%、・・・に相当する数値（流域面積 100km² あたりの比流量）を比較したのが表 2.1.2 である。1970 年前に豊水量が 7.60 を超える地点は全国に 10%しかなかった、というように読む。豊水・平水・低水いずれも 1970 年以後は以前に比べて流量が小さくなっているが、渇水量のみあまり変わっていない。平均流量は豊水量とほぼ等しく、やはり減少している。

表 2.1.2 1970 年前後の河川流況比較（白川，2005）

(単位：m³/s/100km²)

非超過割合	豊水		平水		低水		渇水		平均	
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
(MAX)	16.40	14.27	9.16	8.85	5.90	6.82	4.20	4.68	14.60	11.34
90%	7.60	7.37	4.70	4.57	3.20	3.08	2.00	1.86	7.30	7.03
80%	6.49	6.42	3.90	3.71	2.50	2.43	1.50	1.48	6.46	6.10
70%	5.50	5.40	3.40	3.29	2.27	2.23	1.30	1.31	5.50	5.27
60%	5.00	4.80	3.05	2.91	2.08	1.96	1.10	1.12	4.74	4.70
50%	4.50	4.32	2.72	2.58	1.80	1.68	0.95	0.96	4.40	4.23
40%	4.00	3.89	2.45	2.28	1.57	1.48	0.80	0.81	4.00	3.83
30%	3.45	3.35	2.10	1.96	1.36	1.20	0.70	0.66	3.53	3.45
20%	2.86	2.80	1.64	1.63	1.04	1.00	0.50	0.51	3.00	2.89
10%	2.18	2.18	1.24	1.23	0.73	0.75	0.30	0.30	2.30	2.39
(MIN)	0.45	0.71	0.12	0.17	0.07	0.10	0.00	0.06	0.43	-

この「豊平低渇」指標は基本的に利水指標であり、河川環境の攪乱を適切に表現できる保証はない。河川環境の観点からは、大規模攪乱として大洪水・大渇水、中規模攪乱として年数回程度の出水、日常的ストレスとして低水・渇水流量、そしてそれらの変化速度が重要と推測できる。ダム操作はそれらの要素をどの程度変化させているのだろうか。

ダム決壊などごくまれなケースを除き、大洪水はダム操作により減少する。これを二つの側面から捉えることができる。一つはピーク流量の減少で、河川環境にとって最大外力の低下を意味する。もう一つはある流量に達する頻度の減少で、冠水など攪乱頻度の低下を意味する。ある地点の洪水流量に及ぼすダムの影響は、ダムでの洪水貯留量と残流域からの流出量で決まる。たと

え上流に大きなダムがあっても残流域が広ければダムの影響は大きくならないし、複数のダムがある場合には各ダム操作の時間差が作用する。

いくつかの多目的ダムで、年最大流量がダム地点でどのように変えられているか表したのが図 2.1.6 である（建設から 1992 年まで）。斜めの点線は流入量＝放流量を示し、これより右下は流入量＞放流量を意味する。鹿ノ子ダム（北海道）では毎年最大流量が 50～80%カットされているが耶馬溪ダムではほとんど変わらないなど、場所による差は大きい。平均をとると早明浦ダムでは 45%カット、矢作ダムで 39%、石手川で 24%、釜房で 19%カットとなっている。

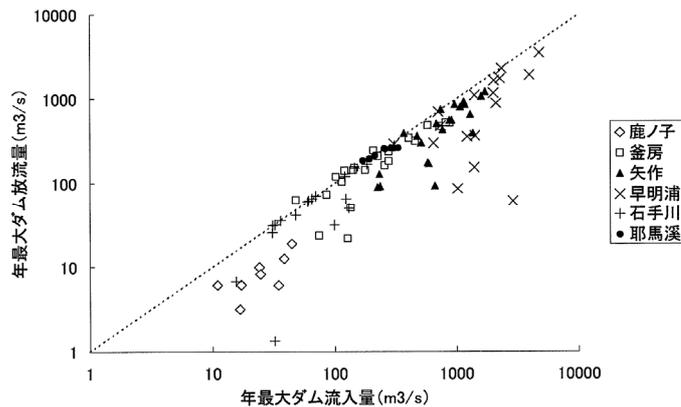


図 2.1.6 年最大流量のダム上下での比較（白川，2005）

次に中規模攪乱の分析例を挙げる。図 2.1.7 は北上川上流の明治橋観測所（流域面積 2,185km²）で、四十四田ダム（1968 年完成，流域面積 1,196km²，有効貯水量 35.5 百万 m³，目的 FP）と御所ダム（1981 年完成，流域面積 635km²，有効貯水量 45.0 百万 m³，目的 FNWP）の建設とともに中規模出水の発生頻度がどう変わったか調べた結果である。ここでは中規模出水をダム建設前流況（自然状態）の超過確率 16%という基準で定義した。超過確率 16%は年間超過日数 60 日に相当する。ただし、四十四田ダムの上流には岩洞ダム（1960 年完成，流域面積 212.1km²，有効貯水量 46.3 百万 m³，目的 AP）が存在するため完全な自然流況との比較にはなっていない。それでも年とともに出水頻度が減少していることが読み取れる。

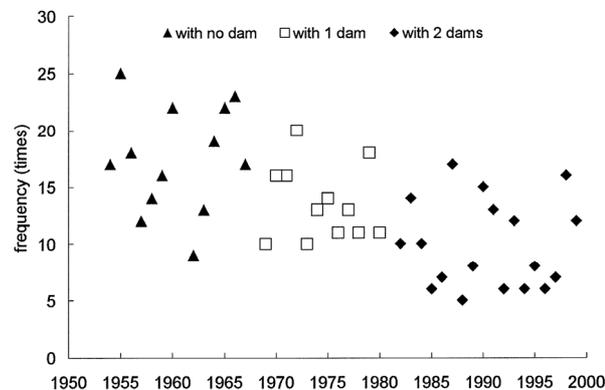


図 2.1.7 北上川明治橋地点における中小出水の発生頻度変化（shirakawa et al., 2002 を改変）

時系列でなく、同じ年のダム流入量と放流量を利根川水系の2ヶ所で比較したのが図 2.1.8 である。草木ダム（流域面積 254km²，有効貯水量 50.5 百万 m³，目的 FAPWI）の集水域（渡良瀬川）と下久保ダム（流域面積 323km²，有効貯水量 120 百万 m³，目的 FNPWI）の集水域（神流川）はともに秩父系の古生層を主体とするものの、内帯に属する渡良瀬川の水源地には花崗岩が分布し、流況はやや有利である（流域の水持ちがよく、渇水流量が小さくならない）。表 2.1.3 のように平均流量は流域雨量の違いを反映して草木ダム流域で下久保ダムの約 2 倍となっているが、渇水量の差はそれよりさらに大きく約 3 倍、低水→平水→豊水と水準が上がるに従って両者の差が小さくなっていく。流量が少ない割に容量の大きい下久保ダムは流況調整能力に富んでいるが、図 2.1.8 の頻度変化には両ダムで大差がない。もう少し詳細に調べてみると、表 2.1.4 のように両ダムの操作の違いはここで採用した超過確率 16%より低い水準（40～50%および 80～95%）にあらわれていた。

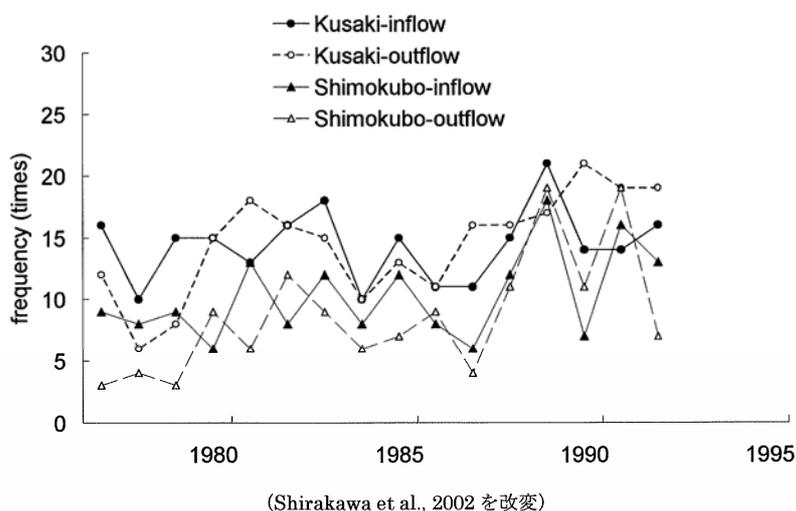


図 2.1.8 利根川2ダム（草木・下久保）における中小出水の発生頻度変化
（shirakawa et al., 2002 を改変）

表 2.1.3 草木ダムと下久保ダムの流入量比較（白川，2005）

[流量は流域面積 100km²あたりの値，1977 年～92 年の平均値]

	流域面積	有効貯水量	最大	豊水	平水	低水	渇水	平均
草木	254km ²	50.5 百万 m ³	107.30	5.04	2.85	1.59	0.98	4.62
下久保	323km ²	120 百万 m ³	50.73	2.27	1.17	0.61	0.33	2.25
草木/下久保			2.1	2.2	2.4	2.6	3.0	2.1

表 2.1.4 流量操作水準の比較 (値は流量, m³/s) (白川, 2005)

非超過割合	草木ダム			下久保ダム		
	流入量	放流量	変化率	流入量	放流量	変化率
10%	21.99	23.85	8.5%	13.78	12.97	-5.9%
20%	15.05	17.80	18.3%	8.54	10.30	20.6%
30%	11.32	11.75	3.8%	6.11	6.50	6.4%
40%	9.08	8.85	-2.5%	4.61	3.00	-34.9%
50%	7.14	6.55	-8.3%	3.60	2.36	-34.4%
60%	5.71	4.86	-14.9%	2.78	2.33	-16.2%
70%	4.49	4.00	-10.9%	2.16	2.03	-6.0%
80%	3.54	3.25	-8.2%	1.72	1.93	12.2%
90%	2.79	2.42	-13.3%	1.34	1.41	5.2%
95%	2.48	1.74	-29.8%	1.12	1.13	0.9%

こういった事例と前述の一般論 (表 2.1.1) から, 次のようなパターンを想定することができよう. まず利水面において最もウェイトの大きいのは洋の東西を問わず農業用水だが, 水田灌漑を主体とする日本では5月後半から7月前半あたりが水利用期となる. これに加えて治水面では, 多目的ダムの夏期制限水位が始まる7月に向けて6月はダム貯水池水位を落とす時期となり放流量は流入量より大きくなる. こうして治水・利水の両面から6月は流量増強がなされる. この時期の水需要に対応するため, 5月中はできるだけダム貯水量を増やしておくことが望ましく, 5月の放流量は小さくされる. 融雪水の豊富な流域ではこの貯水は3月から4月の流量でまかなわれるが, そうでない流域では前年秋季から貯水量の回復に努めなくてはならない. 台風期の出水は, 集水面積に比して十分大きな容量を持つダム (下久保など) では貯め込んで有効利用を図ることもできるが, 日本の多くのダムは大きさが足りないゆえに30%程度のピークカットを行うくらいにとどまらざるを得ず, 水資源としての利用率は高くない. 大陸の大ダムでは図 2.1.9 のように極端な調節を行うことも可能であり, 事情の違いは明白である.

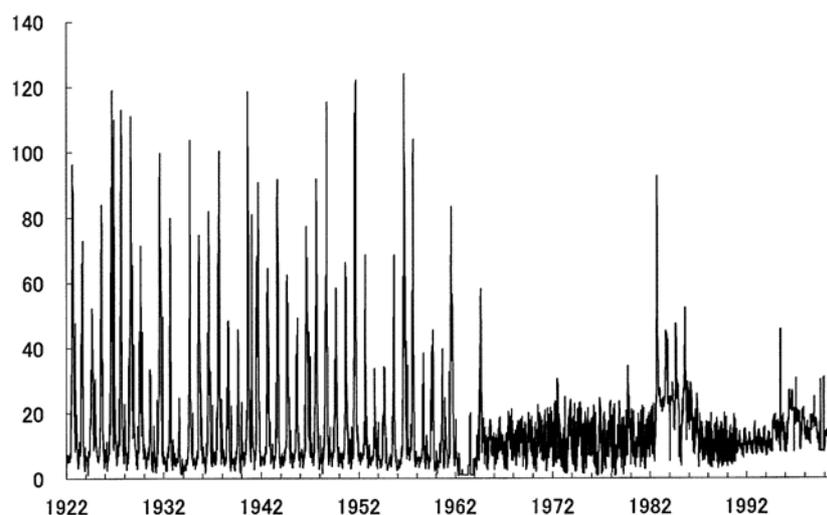


図 2.1.9 グレンキャニオンダム建設 (1962 年) 前後の Lees Ferry 地点の流況変化 (USGS データサイトより, 縦軸の単位は千 cfs) 1m³/s=35.3cfs (白川, 2005)

利水を目的としてダムで調節された流量は、平野に出て水利用地近くに達したところで取水される。水資源開発事業のほとんどは、ダムと取水堰がセットで計画・運用される。このとき、ダムと取水堰の間では上記のような流況変化が起き、取水堰下流では減水が生じる（いわゆる水資源開発の場合、渇水時の流量には変化を与えないことも多い）。下流の減水も広く言ってダムの影響と捉えることができるが、それは次項で扱うことにする。

(3) 取水－排水系による流況変化

取水はその地点より下流の流量を減少させ、排水は増加させる。ただし、取水－排水系を一体としてみた場合、排水点より下流の流量は取水以前とあまり変わらない。というのも、人間の水利利用は生活用水にしろ工業用水にしろ、取水した水を本当の意味で消費することは少ないからである。水は量でみればめぐりめぐっているだけであって、水温、動力、洗浄などといったその質を利用して人間活動が営まれているのである。農業用水はやや異質なところがあり、一定の部分が蒸発散により失われる（いわゆる「消費」される）ほか、水路や圃場での地下浸透はいずれ河川に戻るとはいうものの水循環経路を変質させる。圃場整備や水路のライニングはさらに違った影響を与える。

もう一つ、取水河川と排水河川が異なる場合も考えておかねばならない。いわゆる流域変更と呼ばれるもので、取水河川にははるか下流まで減水のインパクトを与え、排水河川には増水のインパクトを与える。流域変更はもっぱら利水秩序や取水権の保護といった人文社会上の問題点が大きく、とくに国際河川の水資源開発に関連して海外でも膨大な議論が積み重ねられてきているが、自然環境へのインパクトという側面も近年では事業の成否を左右する重要な要素とみなされるようになってきている。

取水による減水の例として、多摩川からの都市用水（東京都）取水を図 2.1.10 に示そう。これは、東京都環境保全局が月 1 度測った流量データを 1 年分平均したものである（1997 年）。河口から 52km 地点にある羽村堰で東京の水を大部分取水して、使用したのちに徐々に多摩川に戻していくという構図は江戸時代の玉川上水掘削から始まった。現在では多摩川からの取水量に数倍する量を利根川から引いてまかなっているものの、多摩川が受けるインパクトは羽村堰地点で流量 70%カットに相当する。1992 年以前は平常時（非灌漑期）に 100%カット（全量取水）を行っていたが、近隣自治体からの要望を受けて通年 $2\text{m}^3/\text{s}$ の放流（水道側からみれば「無効放流」）を行うようになってきている。この地域（多摩地区）では流域下水道の普及が進められており、使用後の都市用水は処理場から順次多摩川に戻ってくる。その割合は図 2.1.8 にみるように下流でおよそ半分に達し、水質にも大きな影響が及んでいることを推測させる。

もう一つ、前述のダムとセットになった水資源開発の例として国営十津川紀ノ川土地改良事業を挙げておく。水不足に悩む大和平野に対し、紀ノ川に津風呂ダム（1963 年完成、流域面積 160.7km^2 、有効貯水量 24.6 百万 m^3 、目的 FA）と大迫ダム（1973 年完成、流域面積 114.8km^2 、有効貯水量 26.7 百万 m^3 、目的 AP）を建設し、下流の下淵頭首工（1974 年完成）から最大 $10.98\text{m}^3/\text{s}$ を農業用水および都市用水として流域変更導水する事業である。下淵頭首工の下流にある隅田・橋本地点において、1965～1971 年と 1984～1992 年（のうちデータの揃っている 7 年間）の各日平均流量を比較したのが図 2.1.11 である。6 月から 9 月にかけて、すなわち農業用水シーズンに流量が減少し

ていることがわかるであろう。

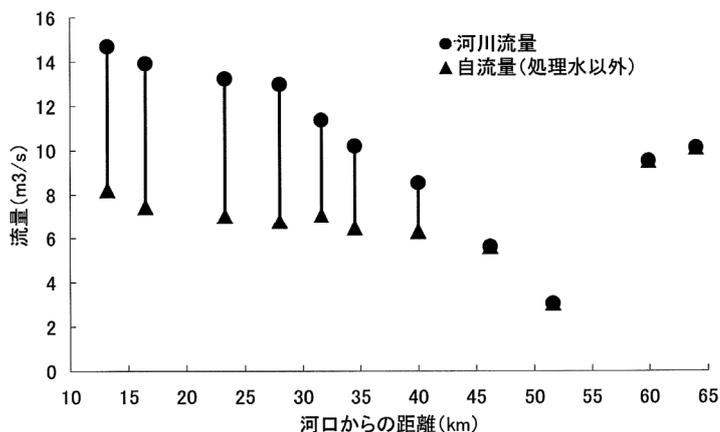


図 2.1.10 多摩川の縦断方向流量変化 (白川, 2005)

(東京都 環境保全局 1997 より作図, 河川流量と自流量の差 (縦線部分) が下水処理水)

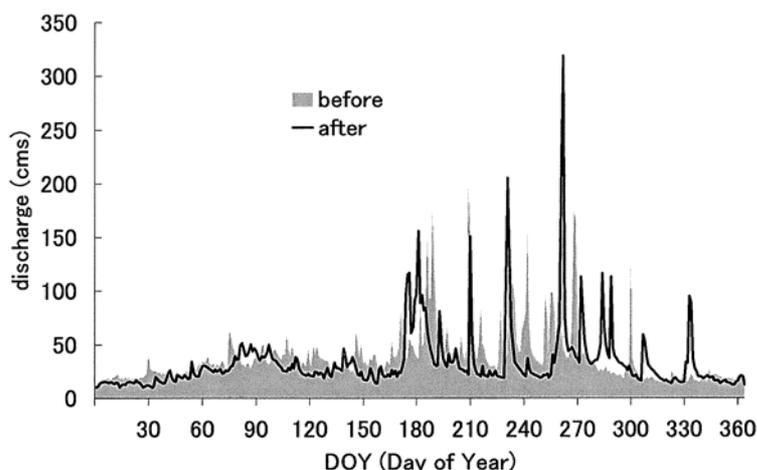


図 2.1.11 紀ノ川におけるダム建設前後の流況比較 (shirakawa et al., 2002 を改変)

このほか、取水とは異なるが人工分水路開削により本流の流量が減少することもこの範疇の人為的インパクトに含めてよいだろう。信濃川 (大河津分水路以降)、北上川、利根川 (江戸川分流以降) などがある例であるが、利根川は江戸時代の東遷事業そのものが大きな人為的インパクトでもあった。

2.1.3 流量変動変化の指標

河道地形と河川生態系を規定する主要要因である流量とその変動をどのような量的指標でとらえるべきかについて整理する。

(1) 年最大流量の経年変化

河道のスケール、川幅、河岸高、粒径を規定する流量は平水の流量でなく洪水流量である。河岸侵食や土砂堆積は洪水時に主に生じるのである (山本, 1944)。従来、河道スケールを規定する

流量として平均年最大流量(河岸満杯流量)が取られてきた。まずは既存の知見の利用・継続という観点から平均年最大流量を流況変化前後の河道・生態系変化を解釈する道具的流量とするべきである。

しかしながら、年最大流量は年々変化し、人為的インパクト後も大きな洪水が生じる。年最大流量のみならず、ある洪水ピーク流量の発生頻度の変化量を河道変化分析の解釈指標として取り込み、分析を加える必要がある。年最大流量の発生確率は対数正規分布形に近いこともあり、ダム完成前後の年最大流量の生起確率分布形との差異とセグメント別の河道地形の変化との関連性を分析-解釈することを試みるべきであろうが、まずは河道の変化と発生洪水流量の関係を時間軸(通時的)で追っていくことを行うべきである。これにより河道変化に大きな影響を与える洪水流量規模を知ることができよう。なお大洪水の影響が河道変化の及ぼす程度は、セグメントごとの異なることが明らかにされている(山本, 2002, 2004)

(2) 豊・平・低・濁水量の変化

平水時の流量は低水路幅のうち流水部分の範囲を規定し、ある標高の水分条件を規定する。すなわち植生の生育条件を規定し、浮遊砂の堆積を媒介として河道変化に影響を与える可能性がある。また水生生物の生活条件を規定している。

豊・平・低・濁水量を流量変化の指標とするのは妥当であろう。なお流況(水位)の季節変化パターンの変化がどのように河川生態系に影響を与えているかについての実態分析は皆無であるが、流況(位況)変化パターンが、人為的改変前後(ダム貯水池、取水堰、頭首工の建設、取排水量の改変)でどのように変わったかについても把握しておく必要がある。具体的には季節毎の豊・平・低・濁水量の変化とそれに伴う位況の変化を調べ指標とする((社)河川協会発刊の流量年表により流況パターンを知ることができる)。

(3) 小出水発生頻度の変化

河床攪乱が数年間ないと水草・抽水植物が発生したり、付着藻類の組成の変化が生じたりする。小洪水発生頻度と河川生態系の連関性分析(通時的分析)が必要である。このためには年3~10回洪水流量の変化を表す指標も必要であろう。

2.2 流送土砂に対する人為的改変

2.2.1 潜在流送土砂量

河川の特徴、すなわち地形・植生・生物は、流水と土砂の量と質によって大きく規定される。流水については、水資源の開発という目的のため詳しい調査がなされ、量・質についてかなりのことが明らかにされている。しかしながら、河川を流下し沖積地形を形成する土砂については、測定が難しいことにより十分ではない。

量については、地形学者による山地解体速度の把握(Yoshikawa, 1974)、ダム管理者や河川管理者のダム堆積量の把握、河川砂利資源量の把握のため、戦後、次々に建設された大ダムにおける土砂の堆積量から、山地部の単位面積(km²)・単位時間(年)当りの生産量(比生産土砂量という)が明らかにされつつある。比生産土砂量は山地の起伏度が高い(斜面角度の大きい)ほど、また裸地が増えるほど大きくなる(ダム水源地環境整備センター, 2003)。図2.2.1は、芦田・奥村(1974)によって示されたわが国の代表的な水系におけるダム貯水池から評価した年平均比堆

砂量 q_s (ほぼ比生産土砂量と同じ) とダム上流域面積 A との関係を示したものである。ここで①群はわが国で最大の流出土砂量を示す黒部川、天竜川、大井川のもの、②～③は流出土砂量の多いとされる只見川、庄川、吉野川、木曾川、十津川のもの、④～⑤群は中国地方のもの、である。その他の流域は③～④群に入るものが多いとしている。さらに、それぞれの直線は $q_s \propto A^{-0.7}$ の直線であり、同一の水系についてはほぼこの直線状に乗るとしている。

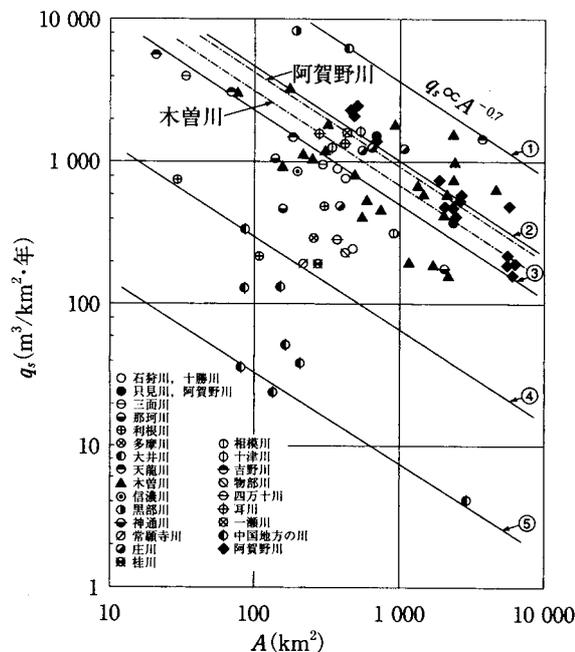


図 2.2.1 流域面積 A と比堆砂量 q_s (芦田, 奥村, 1974 を微修正)

この山地からの沖積地への供給土砂量と質は、岩石の風化速度、すなわち気候、山地地形、地質(岩質)に支配される。風化作用には物理的風化と化学的風化の 2 つの作用がある。岩石は岩質により風化される生産物の大きさが異なり、また風化によって生産される土砂は連続的に種々の粒径のものが生産されるのではなく、不連続的に特定の大きさの粒径集団をもっている。例えば、固結度の低い第三紀のシルト岩、砂岩、凝灰岩の山地(丘陵であることが多い)では、礫以上の粒径ものをほとんど生産しない。これを小出博(1973a)は風化作用の不連続性といった(そこでは物理的風化作用について述べた概念であるが、本論では、化学的風化作用も含めて不連続性の概念とする)。

一般には、粘土、シルト、細砂、中砂、礫、玉石など、4 つ、あるいはそれ以上の特定の粒径にピークをもつ粒径集団が山地部において生産される。概略、シルト・粘土は 50～60%、砂分は 20～30%、1cm 以上の礫・玉石は 10～20%と推定されている(藤田ほか, 1998; 建設省開発課・土木研究所水工水資源研究室, 2000)。

なお流域面積の小さい小河川あるいは大河川の支川で、洪積段丘の侵食地形である谷地田、扇状地の湧水地帯、沼から流下する河川においては、比生産土砂量は少ない。山地から流出する河川と性格が大きく異なる。

上流に堆積地形である盆地を持たない河川のセグメント 1 の上端では、溪流で堆積してしまう

巨石以外は山地から流入し、セグメント 2-2 の上端では砂利分を落とした小礫以下の土砂が流入する。

<メモ 粒径集団区分粒径>

河床材料の粗度の粒径分布形は、対数正規分布形に近いといわれているが、実際には、特性の異なる三つ以上の集団を持っているのが普通である。堆積学では図 2.2.2 のごとく河床材料の主モードである集団を A 集団、それよりも細かいものを B 集団、A 集団より粒径の大きいものを C 集団と呼んでいる。粒径集団の区分するのは、粒径集団ごとに土砂の移動形態や河道形成や河川生態系に及ぼす役割や影響程度が異なり、河川で生じる現象やその変化を予測するのに実用的であるからである。

各粒径集団の区分粒径は、図 2.2.3 に示すように粒径加積曲線上での勾配急変点とすればよいが、扇状地河川の場合、粒径の存在範囲が広く、粒径集団区分粒径の決定に困難を覚えることが多い。この場合は次のように区分粒径を設定する(山本, 1994)。

- ①小セグメントごとに測定された河床材料の粒度分布曲線を描く。
- ②大粒径集団であるチャンネルラグデポジット (channel lag deposit: その移動速度が河床材料の主構成材料である A'集団より遅く、河床の取り残されていくような材料をいう。河床がアーマ化されるとこの集団が表面を覆う) である C 集団と河床材料の主構成材料である A'集団は、通常、粒径加積曲線で勾配の急変転が現れるので、そこの粒径を区分粒径とする。
- ③砂成分を B 集団とする。この場合、粒径加積曲線上で勾配の急変点が生じていれば、これを区分粒径とする。通常 1~2mm 程度となることが多い。勾配の急変点不明确でない場合は、2.0mm を区分粒径と仮設定する。
- ④A'集団と A''集団の区分粒径は、粒径加積曲線状で勾配の急変点として評価しえることが多いが、細粒分の多い河床材料の場合、勾配の急変点不明确でないことがある。この場合は、滞筋部の表層材料の粒度分布 (ほぼ C 集団 A'集団からなることが多い。線格子法による表層材料の調査により簡単に粒度分布を測定しうる) から判断するか、粒径が 2mm 以上であれば、同じような土砂の移動形態を持つものは、最大と最小の比で 7~8 程度であるので、C 集団と A'集団の区分粒径の 8 分の 1 程度の粒径を A'集団と A''集団の区分粒径とする。
- ⑤A'集団と A''集団の区分粒径と B 集団の最大粒径の比 γ が 8~10 程度であれば、A'集団と A''集団の区分粒径と B 集団の最大粒径の間の材料を A''集団とする。 γ が 15 を超えている場合は、下流のセグメントの粒度分布形を参照しながら A'集団と A''集団の区分粒径と B 集団の最大粒径の間の粒径成分を最大と最小の粒径比で 8 程度となるように再区分し、大きな集団から A'', A'''集団とする。
- ⑥最後に対象河川の各小セグメントの区分粒径が、上下流で一致するように区分粒径を微調整する。
- ⑦これは河川の土砂収支の検討、河床変動計算などにおいて、粒径集団ごとの移動量の

収支や河川で生じる種々の現象解釈することが、工学的に有益であり実用的であるからである。

粒径集団が形成される要因としては、土砂供給源における岩石の風化プロセスにおける不連続風化が主因であるが(小出, 1973a), 流水による分級プロセスによっても粒径集団が形成される。A'集団などは、生産土砂量の多いA'集団と流水に対して異なった動きをすることにより形成される集団であり、通常は大セグメントの主モードの材料となれるだけの供給量がなく、大粒径集団のマトリックス、あるいは砂州の頂部付近堆積物として堆積しまう。

④, ⑤における8と言う数字は混合粒径河床材料での移動床実験結果、河床材料の粒度分布形より定めたものである。しかし、セグメント1における小セグメント間の粒度分布形の変化を詳細に見ると、4程度で集団の分離があるようである。例えばC集団である60cmの粒径集団が、次の小セグメントでほとんど見られず、そこでのA'集団は15cmであるなどである。いずれにしても⑥のプロセスを実施し河川に実態に合った、また技術目的に合った粒径集団区分を行うべきである。

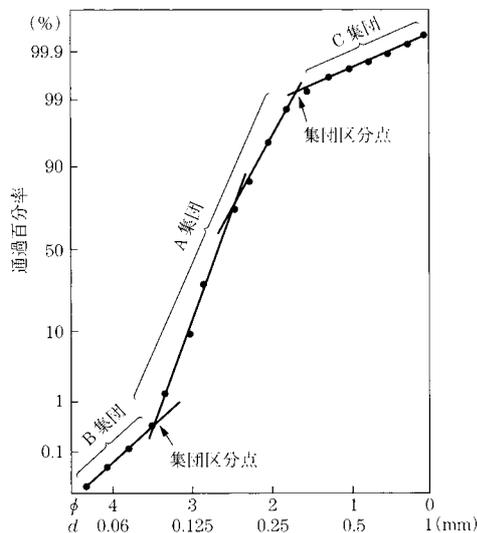


図 2.2.2 河床材料の粒度分布

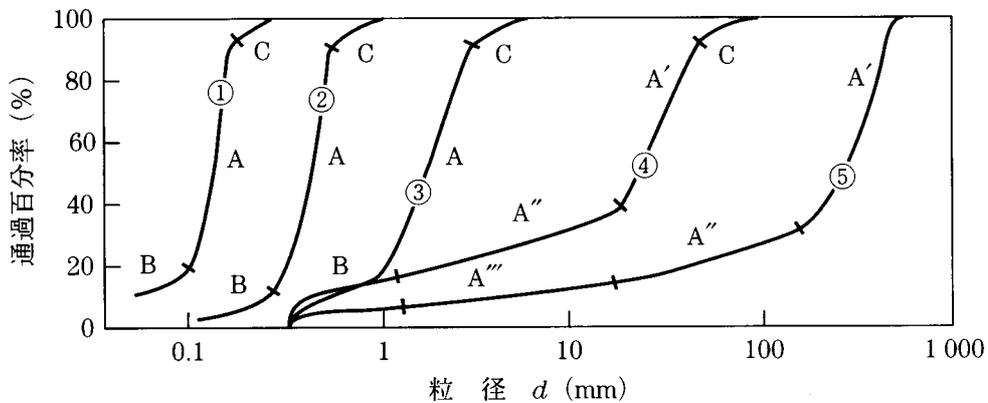


図 2.2.3 種々の粒度分布形におけるポピュレーションブレイク

2.2.2 自然的・人為的影響が生産土砂量の変化に及ぼす要因とその変化量

自然的・人為的影響が生産土砂量の変化に及ぼす要因とその変化量は以下のものである。

(1) 自然的要因

山間部で生産される土砂量は、年毎に異なる。一般に大雨が降ると土石流の発生や表層侵食が多くなり、生産土砂量が増加する。図 2.2.4 は相模川の相模ダムの累積堆積量と年間堆積量を示したものである(河川環境管理財団, 2002)。生産土砂量の多い年は、豪雨が発生している。

豪雨以外に生産土砂量を増加させる自然的要因としては、大地震による山地の崩壊、火山噴火などがある。

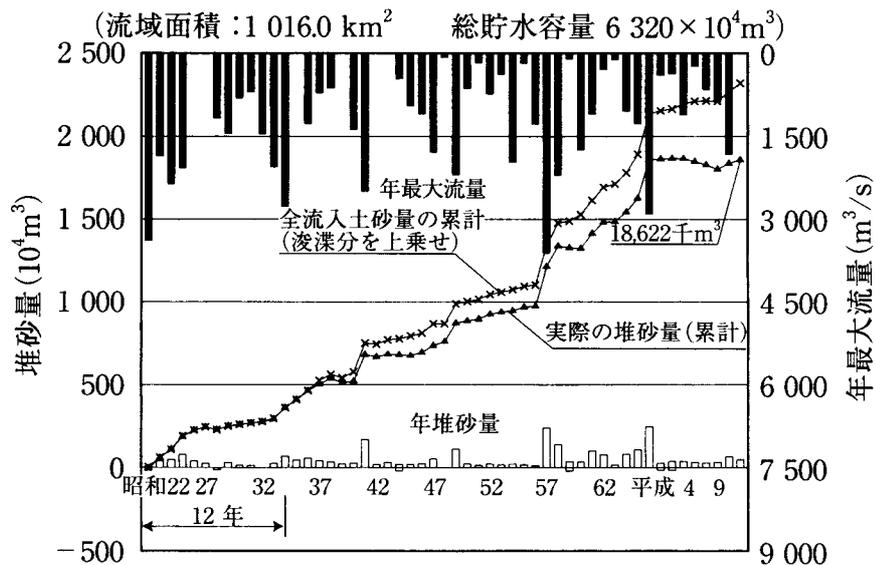


図 2.2.4 相模川の相模ダム累積堆砂量, 年間堆積量の変化 (河川環境管理財団, 2002)

(2) 山地・丘陵の開発と植林

山地の開発, 特に森林から裸地への転換は, 表層土壌の侵食を急増させる。高度経済成長時代, 都市近郊の丘陵地が住宅地に転換された。鶴見川流域では(流域面積 234.5km², 山地面積 179.4km²)では, 60 年代から 90 年代にかけて多摩丘陵の都市開発がなされ, 流域面積の市街化率は, 1958 年で 10%, 1966 年には 20%, 1975 年には 60%, 1997 年には 84%に達している。工事に伴い多摩丘陵を覆うローム層が侵食され, これが鶴見川下流部に堆積した。河積の変化量と浚渫量から, 堆積量は 1965 年から 1975 年で年 22 万 m³, 1975 年から 1984 年で年 15 万 m³と評価された。これより山地の比生産土砂量は, それぞれ約 1700m³/km²/年, 1600m³/km²/年となる(山本ほか, 1993d)。この比生産土砂量は, 中部地方の山岳地帯の土砂生産量に匹敵している。流域の地形起伏から判断すると, 農村的土地利用の時代はこの値より 1 オーダ少ない生産量であったと推定される。

また戦後食料増産時代に山地丘陵部や台地の農地開発がなされた。樹林から農地への転換は河川への流出土砂量, 特に細粒分の流出を増大させた。

(3) 鉱山開発

中国地方の斐伊川(流域面積 2070km²)では, 花崗岩の風化物であるマサ土を鉄穴流しという流水洗鉱方式で採取し, 多量のマサ土が斐伊川に流出させた。江戸時代平均で 1 年当り 50 万 m³と

推定されている(建設省中国地方建設局, 1995). これにより宍道湖は埋め立てられ新田となると同時に斐伊川を天井川化させた.

渡良瀬川では明治以降, 銅の生産量の急増と精錬に伴う SO_2 の排出により精錬所周辺の森林が裸地に変わり, 流出土砂量を増加させ下流の洪水被害の増加や鉱毒被害の要因となった.

(4) ダム建設

大ダムの建設は, 1930年代から始まり, 戦後は多くの大ダムが建設された. 大ダムは, ダム上流で生産された土砂のほとんどをダム湖に堆積させた. 流出してもそのほとんどは粘土・シルトであった. ダムによる土砂補足率は, 図 2.2.5 に示すように貯水容積/ダム年間流入水量の比(ダム回転率)の小さいダムほど大きいと考えられている (Brune, 1953 ; 吉良 1978). ちなみに回転率 10 で 80~90%, 回転率 1 で 95~99%程度と推定されている.

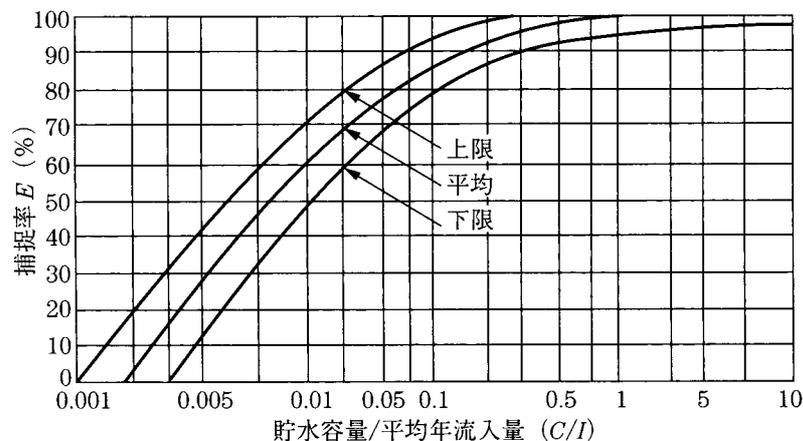


図 2.2.5 ダムにおける土砂の捕捉率とダム回転率の関係 (Brune, 1953)

(5) 治山・砂防事業

砂防ダム, 流路工, 遊砂地などの砂防工事は, 戦後の高度経済成長時代以降, 投資量が増加し現在にいたっている. 溪流土砂の流出の抑制・調整, 土石流の流下の防止により, 山地の解体速度を減少させ土砂災害を軽減させた.

戦後, 荒れた山林に植林を進めた. 山腹工により土砂侵食の軽減と植林は, 荒廃地の減少と同時に河川への土砂供給を軽減させた.

これらの人為的行動が河川への供給土砂量をどの程度変化させたかについての, 実証的研究は少ない. ようやく図 2.2.6 のように粒径集団ごと河道に沿った土砂流下量のマップ(土砂動態マップ)が作成されだした(藤田ほか, 1999 ; 海野ほか, 2004).

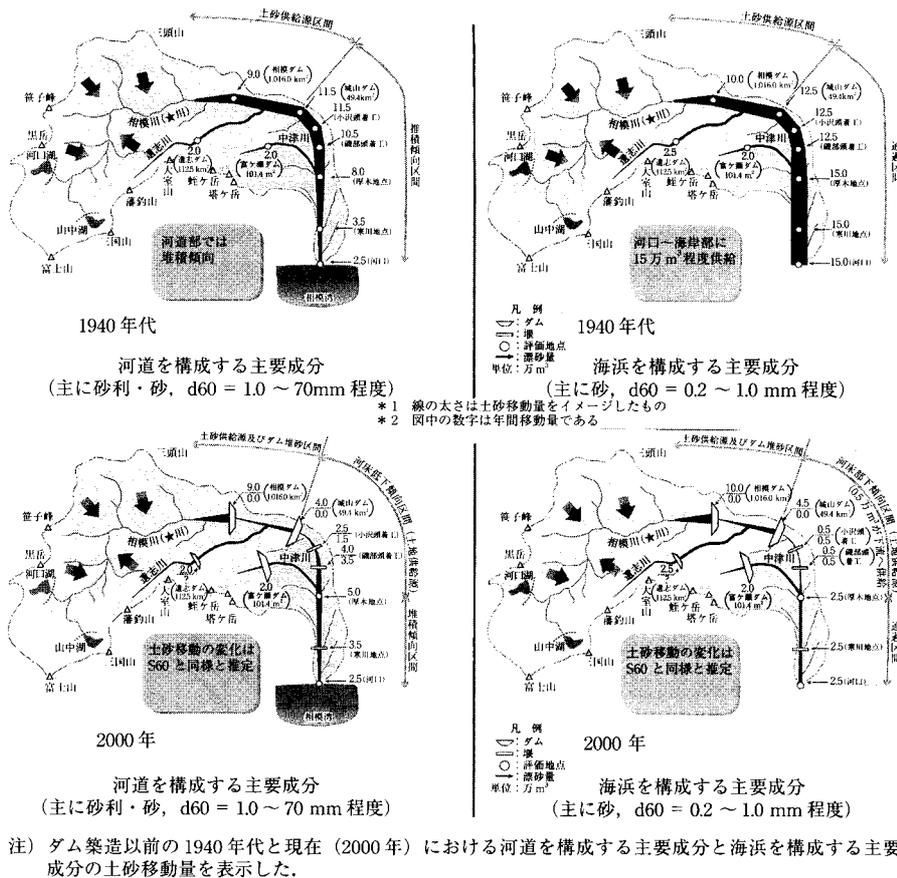


図 2.2.6 相模川における年平均土砂移動量に関する土砂動態マップ (河川環境管理財団, 2001)

<コラム 粒径集団と土砂動態マップ>

人間が河川・流域に加える諸活動は非常に大きなものであり、従来であれば、ゆっくり変化していた河道が、かなり早い速度で変化し、セグメントスケールの地形変化現象が技術的課題として顕在化した。ダム貯水池の建設、河床掘削、捷水路の建設によって、河道が急速に変わり、また海岸侵食が生じ、河川および河川周辺域の生態系も大きな影響を受けた。

これに対処するには、水系を上から下まで通した土砂の収支を的確に把握・評価しなければならない。流砂系を移動する土砂は、粒径集団ごとに流送形態、移動速度、河床材料との交換、河岸形成、河床変化へ役割が大きく異なる。これについては十分な理論化、技術化が進んでいないが、各粒径集団が河川を流下するに従って、セグメント毎にどのような運動形態をもち、かつ河道形成に寄与しているかを量的に把握するという方向で検討がなされた(藤田ほか, 1999; 山本ほか, 1999; 山本, 2000; 河川局治水課ほか, 2000)。

少なくとも粒径 1cm 以上の砂利, 砂, シルト・粘土という 3つの粒径集団ごとに土砂動態と収支を考えることが適切である。図 2.2.7 のように砂利の動きは砂利区間の河床変動を, 砂の動きは砂河床の河床変動を, シルト・粘土(一部, 細砂, 微細砂を含む)は河岸・高水敷(氾濫原)の形成や河口部・沿岸域の低速域での堆積を支配する。これらの種類の異なる

河川地形変化を予測・制御するためには、それぞれの河川地形を支配する粒径集団（有効粒径集団という）に着目して土砂の収支を把握しなければならず、逆に当該粒径集団以外の粒径集団を合わせて追跡する必要は必ずしもない。

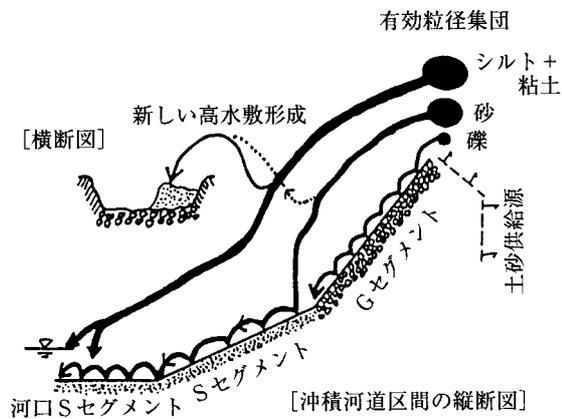


図 2.2.7 各粒径の粒送特性と河川地形変化に与える影響の総括図（藤田ほか，1999）

現在，土砂の動態・収支の表現法については，視覚的に流砂系全体を捉えるため，粒径集団ごとの，あるいは検討の対象とする有効粒径集団の水系土砂動態マップの作成が進められている（国土交通省河川局治水課ほか，2002）．これは，土砂生産域から河口まで粒径集団ごとに土砂移動量を図 2.2.4 のように土砂移動量の太さで示すものである（海野ほか，2004）．土砂供給量（移動量）の評価精度は，持っている情報量に依存するができる範囲で作成することが重要である．精度向上のために調査に莫大な費用・時間をかけるよりも評価不能の場合は不能とし，評価精度の低い場合はある幅を持った土砂移動量であると表示し，土砂管理方針を立案することが喫緊の課題なのである．

河川・流域における人間のインパクトが水系のどこにどのように影響を及ぼすかは，過去，現在，近未来の 3 枚の土砂動態マップを描くことにより，的確に判断しえるようになる．さらにこの土砂動態マップ情報を 1 次元河床変動計算（移動床幅の評価のために川幅に関する経験則が必要）に繰り込むことにより，河道形状と土砂輸送量の将来予測がより適確になる．なお，粒径集団の分級堆積を考慮した河岸の侵食・成長モデルと砂州の成長移動モデルを組み込んだ 2 次元河床変動を行えば，よりの確に未来予測ができるはずであるが，実用に耐えるモデル化は難しい．モデル化に走るより，河道特性調査による河道変化の実態分析を積み上げ，経験的に河川・流域における人為インパクトによる河道変化速度を把握することが先であろう．河川管理者がその気になれば，実行，知見の集約は可能である．

2.2.3 流送土砂量変化の指標

山間地で生産される土砂量は，降雨強度と降雨量により変化する．年供給土砂量を時系列とした供給土砂量の分布形は図 2.2.8 のように対数生起確率密度分布形になるといわれている（須賀ほか，1976；角，2003）．

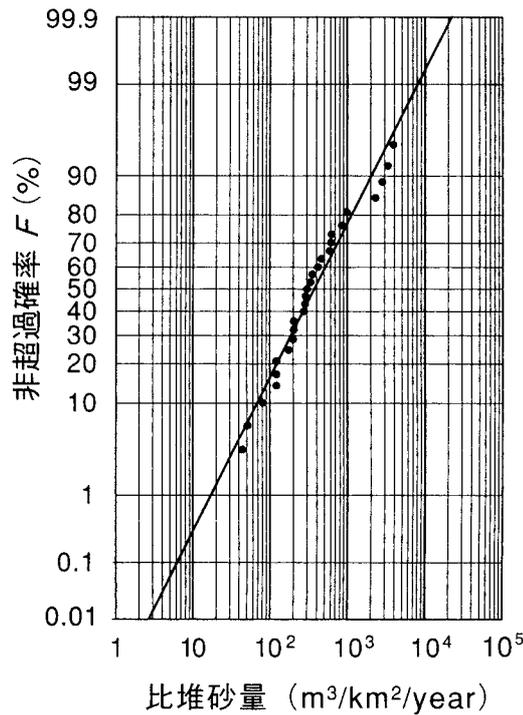


図 2.2.8 川俣ダムの比堆砂量の分布型 (角, 2003)

ダム築造による沖積地への流送土砂量の変化は、年平均供給土砂量の変化として指標化する。その変動成分は、対数生起密度関数の分散値で評価すればよいが、変動成分が河川生態系のどのような影響を与えているかについては研究がなされていないので、当面年平均供給土砂量を指標として用いる。この場合、粒径別の平均供給土砂に関する情報が不可欠である。少なくともシルト・粘土、砂、礫の供給土砂に占める割合を概略値でも知る必要がある。

山間部から沖積地に供給される土砂量の評価法として、次の4つの方法が考えられる。

①沖積地の地下層序構造による評価

土砂がほとんど深海に流出しない内湾域で河川の土砂運搬作用により形成された沖積平野の沖積層（海水面が一時的に低下した1万年前から現在までに堆積した土砂の層、完新世基底礫層上の堆積物）の土質体積をボーリング資料から算定することにより、沖積作用が生じた期間の平均的な河川への供給土砂量を礫分、砂分、シルト・粘土分毎に把握する方法である。

②ダム堆砂量からの評価

ダム貯水池の湖底の地形変化を音響測深器等で測定し、その地形変化量と堆積期間より供給土砂量进行评估する方法である。

算定に当たっては次のことに留意する必要がある。

- ・ダム堆砂量の経年変化の傾向は(石川ほか, 1973), i) ダム竣工直後, 付替道路工事などに伴うずりの流出に影響を受け堆積速度の速い時期, ii) 堆砂傾向が比較的安定する時期, iii) 満砂に達し流入土砂の大部分が越流流下する時期, の三つに分けられる。供給土砂量を把握するためには, ii) の状態にある堆砂量を把握しなければならない。

- ・各ダムが並列状態にある場合は、堆砂量、堆積期間、ダム上流流域面積から求めた比堆砂量を流域全体の比供給土砂量とする方法が適用できるが、直列状態にある場合は上流ダムが下流ダムの堆積に影響を及ぼすためこの方法が適用できない。この場合は、両者のダムの同一期間における堆積量の和を下流のダム上流流域面積により評価する必要がある。

なおダム貯水池から微細な土砂は流下する。必要に応じダムによる土砂捕捉率によりダム堆積量より評定した比供給土砂量を修正する(⇒図 2.2.5)。またダム上流の流域面積が沖積地上流の山間地の面積に比べ小さい場合は、流域面積による比供給土砂量の補正が必要になる。例えば、比供給土砂量は評価地点上流流域面積Aの-0.7乗に比例するとするとして補正する(⇒図2.2.1)。

対象流域のダム貯水池のない場合は、近傍のダム貯水池のデータを用いて評価する。ダム水源地環境整備センター(2003)では、全国の貯水池における比堆砂量とダム流域の地形特性を表すパラメータ(起伏量、高度)、流域面積、岩質などと相関関係を検討し、地質の影響は明確でなく、ダム貯水池上流の平均高度、起伏量との相関が強いことを明らかにしている。生産土砂量推定式あるいはマップが作成されているので利用する。粒径種別の土砂量は、ダム貯水池堆積物のボーリング調査より層序構造を把握することにより把握できるが、調査費用が高く調査がなされている例が少ないので、礫分、砂分、シルト・粘土分毎の概略割合を、2.2.1の情報をを用いて類推する。

③流送土砂量の観測資料からの評価

流砂量観測地点の観測資料より図 2.2.9のような流砂量と流量の関係図を作成し、これと流況データより年間の流出土砂量を評価する方法である。通常、掃流砂量の測定が難しいため浮遊砂(粘土、シルト、細砂)の測定データより総流出土砂を求めるのが一般的である。浮遊砂量は全流出土砂量の60~90%と推定されるので総流出土砂量の概略の把握が可能である。細砂以上の粒径成分については別途、評価する必要がある。

④流砂量式による評価

流量と河道形状資料より河床に働く掃流力を求め、この掃流力を流砂量式に代入して流砂量を求める方法である。この方法は流砂量式が正しければ流砂量の評価が可能であるが、現在混合粒径河床材料の精度良い評価式が完成されていないので、セグメントごとに各セグメントの主モードの材料をセグメントの上流部の水理量を用いて既存の流砂量評価式あるいは図表によりコンタクトロードを評価し、それぞれの粒径集団の供給土砂量とするのが最も好ましい方法と考える(山本, 1994, 2004)。シルト・粘土分のワッシュロードについては、流砂量式では評価できず観測値を用いた経験式によるしかない。

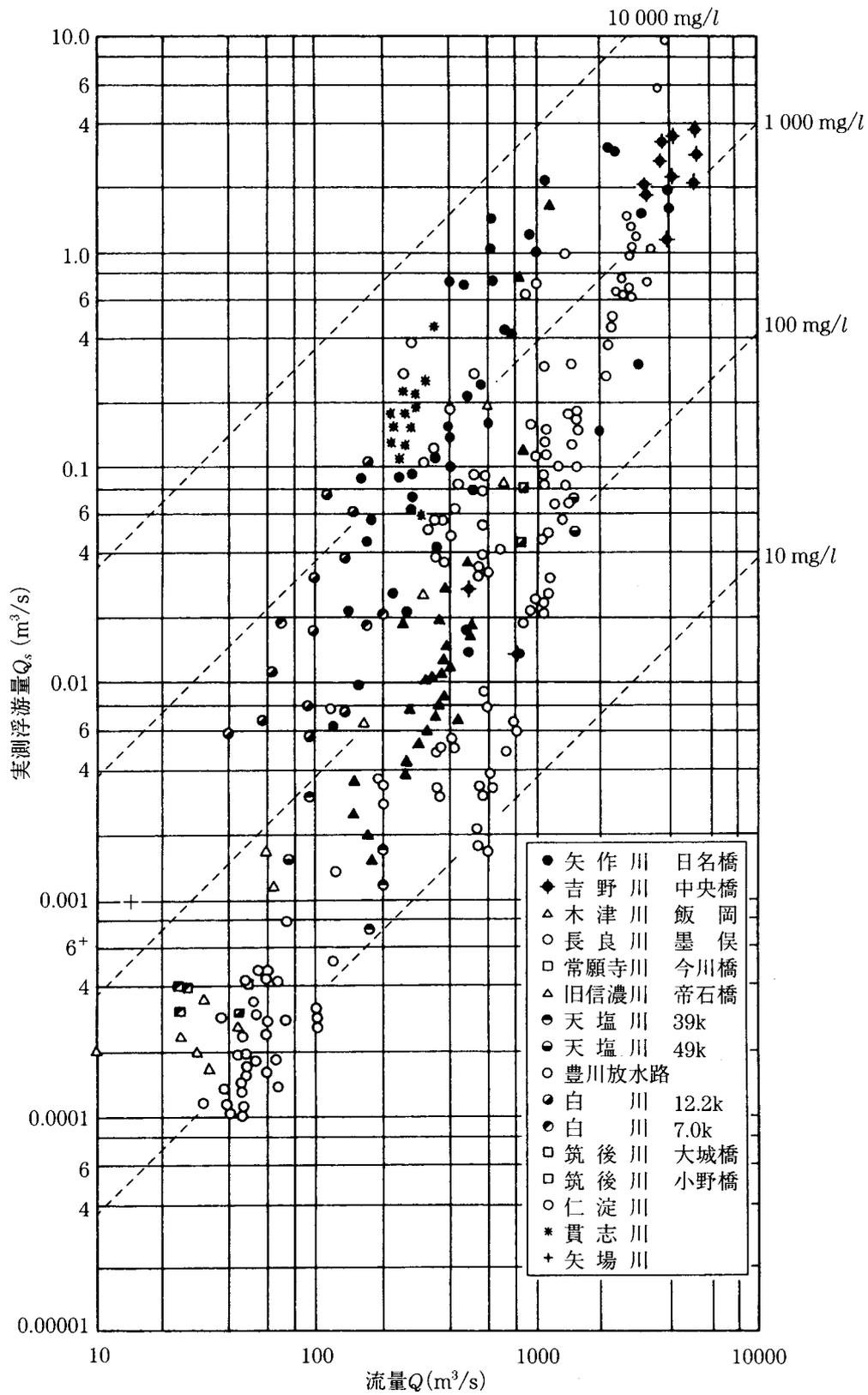


図 2.2.9 観測浮遊砂量と流量の関係 (建設省河川局治水課ほかに付加, 1964 - 1969) (山本, 2004)

2.3 河川流量変動と流送土砂の変化による河道の変化

2.3.1 河川地形システムの捉え方

河川は流水とそれを流下させる器である河床と河岸からなる。河川を流下する水は主として降雨によってもたらされ、その降雨の集水範囲を流域という。河川・流域の地形(景観)は、主に内的営力による地殻変動、外的営力である降雨、地下水、風、熱などによる物理的・化学的風化作用による山地の解体、流水による侵食・運搬・堆積という自然の作用と人間社会の労働・生活活動に伴う人為的作用により、絶えず変化しつつあるものである。

河川・流域の地形が生態系の絶対的存続基盤であることより、河道地形システムは、河川生態系システム記述の土台となるものである。

河川・流域の地形は、種々のスケールの地形単位が組織化されたものである。河川で生じる現象を記述するには、大、中、小の3つのスケール地形単位に系を階層化し、小さい階層の系では大きい階層の系を仮に固定的な境界条件として、その内部の種々の特徴や変化を規定する主要因子を用いて記述することになる。なお、大スケールは流域スケールの地形スケールであり、河道の水系網や河道縦断形形状などである。中スケールはセグメントからリーチスケールの地形であり、蛇行形状、川幅などである。小スケールは水深の10倍程度以下の地形スケールであり、小規模河床波などの微地形である。

例えば、大スケールの河川地形として河系模様(流域における河川水路のパターン)を取れば、これを規定する支配因子として上流域の地形・地質(岩質)、地殻変動、気候変化(植生)を取り、これに従属する植生、土壌、生産土砂の量と質、降雨・降雪、気温、海水面変化などを媒介として記述するが、沖積地を流れる河川(以下、沖積河川という)での中スケール河川地形である河道平面形状を取れば、流量、勾配、河床材料を支配因子と取るのが適切である(山本, 1999)。

ところで、自然攪乱・人為的インパクトと河川生態系との関係を理解しようとするとき、また人為インパクトに対する河川生態系の再生という技術の視点から河川を見るとき、本章で記述する河川地形の3つの階層(大, 中, 小)間で表出された情報を相互にやり取りする必要がある。技術の観点(制御の観点)からの情報の流れは、**図 2.3.1**のようになる。人為的インパクトによる当該対象階層の変化を説明するには、対象階層の境界条件を通る物質・エネルギーをインパクトとし、それは上位階層から流れてくること、下位階層は当該階層の内部構造とその時空変化の説明因子であり、インパクトに対して従属量である。すなわち下位階層は上位階層に包摂される。

2.3.2 河川地形形成における動植物の位置

河川地形の変化を直接的に支配するのは流水と土砂である。人間を除けば河川を生活の場あるいはその一部とする動物は、河床材料を移動させたり、巣穴を掘ったりするが、その土砂移動能力は大きなものでなく、通常、水深規模程度以上の河川地形変化現象の支配因子とはならないが、北米の河川に住むビーバーのように樹木を倒し、それを集め小ダムをつくつような場合もあり無視し得ないこともある。生態学の観点から微小地形(10cm程度以下)を検討対象空間スケールとする場合には、水生動物を地形形成の説明因子として取り入れなければならないが、通常、河川地形を制御するという技術的対象の考慮スケールではない。

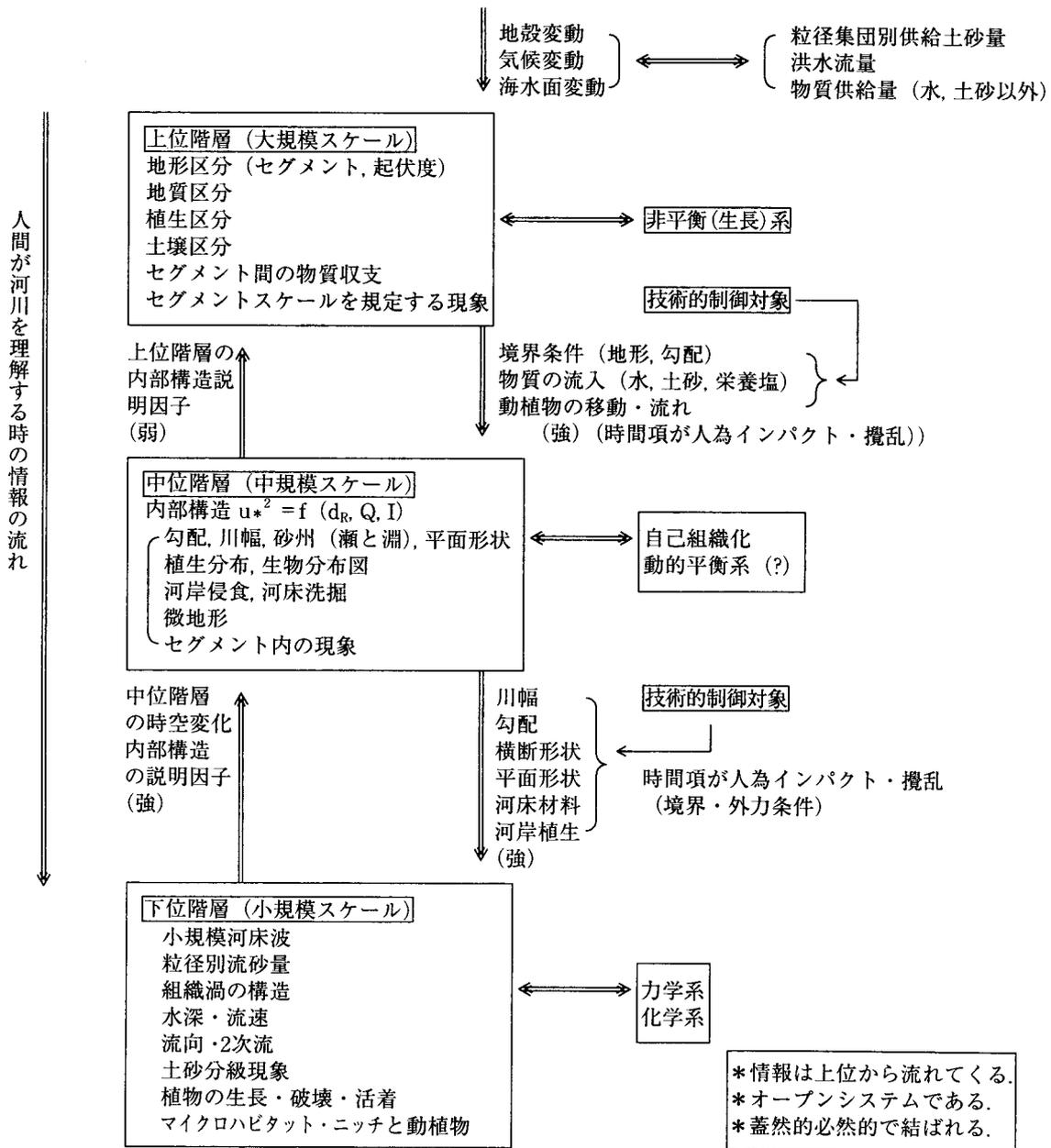


図 2.3.1 河川地形 (大・中・小) を理解・未来予測するための階層間の情報の流れ (山本, 2005)

河川沿いの草本・樹木は、流水に対して粗度となり流速を軽減したり、時には樹木の周辺の流速を速くしたりして、土砂の堆積や再移動に影響を及ぼす。また草本類は表層土壌の侵食を防ぎ、樹木の根は河岸侵食の抑制効果を持つ。河川およびその近傍に生育する植物は、洪水という攪乱受け、これに耐えられる植物が生き残り河川植生という独自の植性景観を形づくる。図 2.3.2 に河川地形と植生の相互作用を流れと流砂を媒介としてその関連を示す。

河川地形さらには河床材料、氾濫原土壌、表層土壌水分はセグメントごとの変わるので、河川生態系の一般的特性を河川水質とセグメントにより分類・記述可能である (⇒2.4)。すなわち、セグメントは河川生態系の河川縦断方向空間区分として利用しうる。また攪乱あるいは人為的イ

材料の移動限界無次元掃流力に相当する (⇒注 1). 同図中には, 図 2.3.3 における平均年最大流量時の u_*^2 と代表粒径 d_R の関係も実線で示してある (山本, 1994).

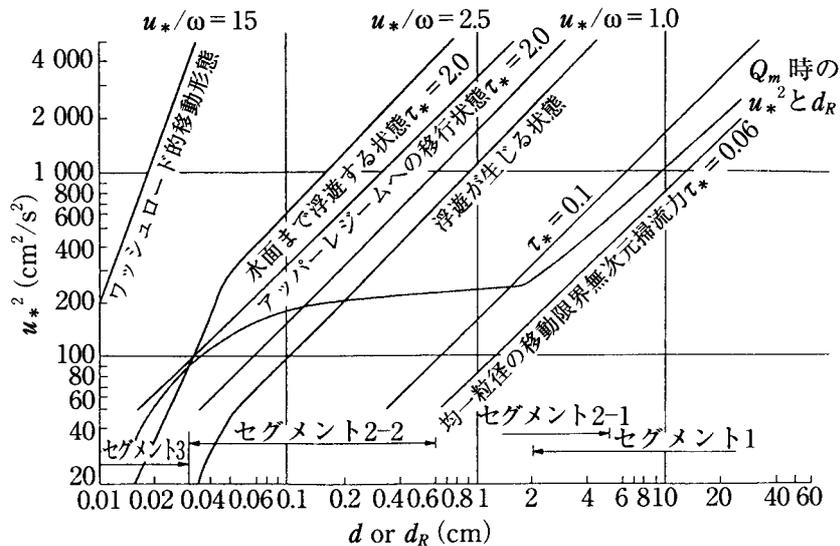


図 2.3.4 粒径 d と u_*/ω , τ_* の関係 (ω は Rubey の式 $S=1.65$, $t=25^\circ\text{C}$ で評価) (山本, 1994)

両図より, d_R が 2cm 以上の河道では, Q_m 時の u_*^2 は河床材料が全面的に動きうるような値となっていることがわかる. ただし, 代表粒径 d_R が大きいほど平均年最大流量時の代表粒径 d_R に対する無次元限界掃流力 τ_* が小さくなる傾向にあり, 河床の攪乱頻度が小さい. セグメント 1 では河岸が河床材料と同様なもので構成されており, 河床材料が全面的に移動しうる掃流力の状態まで川幅が拡がり, それ以上拡がると砂州の移動を伴いつつ, 一方で侵食, 他方で堆積が生じて, ある範囲に落ち着くのだと考えられる. セグメント 2-1 では河岸の上・中層が粘着力をもち流水にある程度耐えられる材料からなるが, 下層は河床材料と同様であり, 洪水時に河床が全面的に移動すると, 湾曲部に深掘れが生じ河岸が崩れてしまい, セグメント 1 と同様な代表粒径と u_*^2 の関係になるものだと考えられる.

d_R が 2cm 以下, 0.6mm 以上の河道では u_*^2 がほぼ $150\sim 200\text{cm}^2/\text{s}^2$ となっている. これは河岸の粘土混じりシルト・細砂の耐侵食力 (流速 1.5m 程度までは侵食に耐える) の大きさが, 河床材料を移動させる力より大きく河岸の耐侵食力に応じた河道スケールになるためと考えられている. ただし, これは河岸が侵食されないということではない. 凹岸側が侵食をされると, 凸岸側へ細粒物質の堆積が生じる水理環境となり, ある川幅に落ち着くのである. これより d_R が小さくなると急に u_*^2 が小さくなる. 中砂を河床材料としてもつセグメント 2-2 の河道では, 上流のセグメントで浮遊砂的に流下していた中砂が掃流砂となるような u_*^2 の値に, また d_R が 0.3mm 以下の河床材料をもつセグメント 3 の河道では, 上流のセグメントでワッシュロード的であったものが, 浮遊砂的な運動形態をもつ水理量 ($u_*/\omega = 4\sim 5$ 程度) となっている.

低水路のスケール, すなわち, 川幅 B , 河積 A , 水深 (低水路満杯流量時の水深) H_m は, 図 2.3.3 および別途求めた平均年最大流量時の流速係数 ϕ (⇒注 2) と代表粒径 d_R の関係を示す図 2.3.5 より (山本, 1994), 平均年最大流量 Q_m , 河床勾配 I_b , 代表粒径 d_R の 3 量でほぼ評価される. なお低水路満杯流量は平均年最大流量に近い.

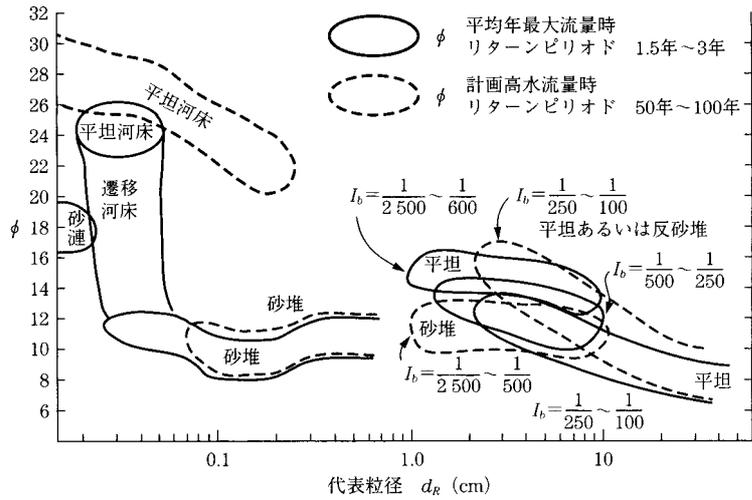


図 2.3.5 φと代表粒径の関係 (山本, 2005)

図 2.3.5 より, φは d_R と I_b によってほぼ定まるので

$$\phi = f_1(d_R, I_b) \quad \dots \dots \dots (2.3.1)$$

図 2.3.3 より

$$u_*^2 = f_2(d_R) \quad \dots \dots \dots (2.3.2)$$

であるので, $u_*^2 = g \cdot H_m \cdot I_b$, $Q_m = B \cdot V_m \cdot H_m$ より

$$H_m = 1/g \cdot f_2/I_b \quad \dots \dots \dots (2.3.3)$$

$$B = f_1^{-1} \cdot f_2^{-3/2} \cdot g \cdot I_b \cdot Q_m \quad \dots \dots \dots (2.3.4)$$

$$A = f_1^{-1} \cdot f_2^{-1/2} \cdot Q_m \quad \dots \dots \dots (2.3.5)$$

となる. 図 2.3.6 に平均年最大流量時の水深と代表粒径, 勾配の関係を示す.

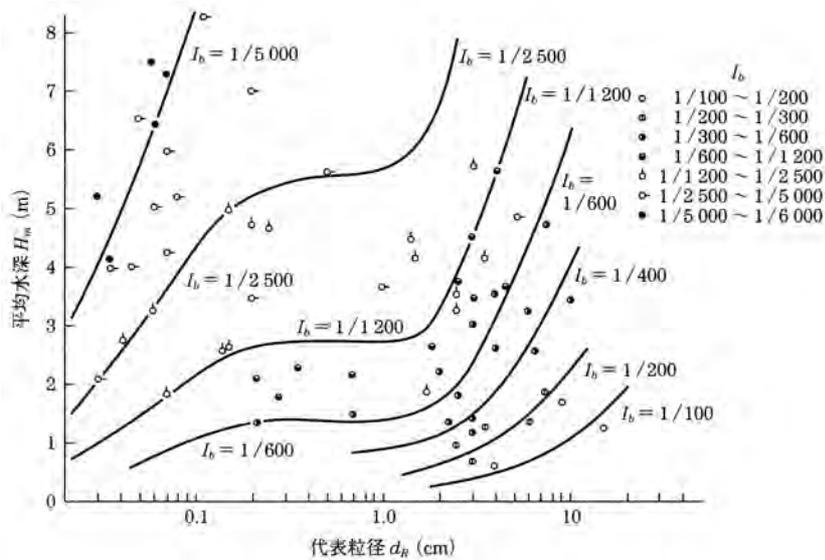


図 2.3.6 平均年最大流量時の平均水深 H_m と d_R , I_b の関係

以上、河道の平均的なスケールは、 Q_m, d_R, I_b の 3 量の関数として表現しうる。その他の種々の地形要素 Y_i についても

$$Y_i = f_i (Q_m, d_R, I_b) \dots \dots \dots (2.3.6)$$

の関係が成立するものとして記載が可能である。すでに大セグメントごとに基本的な共通性が整理され (山本, 1994, 2004), またこれと関連した技術的情報の編集も進んでいる (国土技術研究センター, 2002 ; 山本, 2003)。

なお河口域、沿岸域の中スケール地形 (浜堤、河口砂州、砂丘など) については、波浪、潮汐、潮流、風、河水と河川水との密度差などの要因の影響をうけるが、河口より少し上流であれば、潮汐流の影響の大きい有明海湾奥に流出する河川 (河道の形・スケールが潮汐流に規定されている) を除けば、これらの要因の影響は小さい (山本, 1991)。

セグメント M (山間部河川) の河道において、河岸が谷壁などで固定され、かつ河床がアーマ化していない場合は、平均年最大流量時の u_*^2 の値が同一代表粒径の沖積河川の場合に比べて少し大きい。土砂流出量の大きくない河川では、河床はアーマ化し平瀬状となり、またベドロックが河床に露出することが多い。このような場合は、図 2.3.3 の関係が成立しない。

河川生態系と中規模河川地形 (生態学で言うメソハビタトスケールの地形) は、相互に密接な関係にある。特に植生は中規模河川地形形成の重要な要因であり、中規模河川地形は流水と植生の相互作用の現れでもある。河川生態系の基本的な特性・特徴についても、式 (2.3.6) の関数関係が成立する。ただし水質を説明因子として加える必要がある (山本, 1994)。

[2] 砂州・蛇行形状と土砂の分級

河床は、河床に発生する砂州や湾曲などによって生じる流れの不均一により、河床に凹凸や土砂の分級堆積が生じる。このような河床の凹凸とそれに対応した河床材料粒度構成と堆積構造は、水棲昆虫、魚類、水辺の植生などの空間特性を規定する重要な要素であることより河川生態系の観点から、河床地形の分類がなされている。

可児藤吉 (1944) は、水棲昆虫の生態系の説明要素として河床地形 (リーチスケール) の分類を行い、平水時における河床地形を水深、流速、河床材料などの状態から、図 2.3.7 に示す平瀬、早瀬、淵の 3 要素の分け、下流に向かって平瀬、早瀬、淵と連なる一組を単位形態 (単位景観) と名付けた。また可児は河川を平面的に見ると、河川の屈曲と単位地形との関係にいくつかの型があるとし A, B の 2 型に分けた。

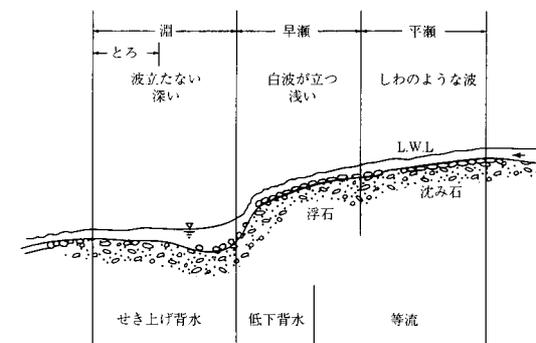


図 2.3.7 単位河床形態の模式図

A型：1 屈曲（蛇行の半波長）内に、多くの単位形態の瀬と淵が縦断方向に連続する。主として溪流に見られる。瀬はすべて早瀬である。

B型：1 屈曲内に瀬と淵が1 つずつ交互に出現する。河川の中・下流に典型的に見られる。

さらにこれに加えて、流れの状況を a, b, c 型に区分した。

a 型：瀬から淵に変わる所は河床が縦断的に連続せず、小さな滝となって落ちる。

b 型：瀬から淵に変わる所は河床が急であり、水面が波立ち早瀬となる。その上流は平瀬となる。

c 型：瀬から淵の変わる所の波立ちが無くなり、平瀬となる。

a, b, c 型は、溪流部, 上・中流部, 下流部にそれぞれ典型的に生じるものであり、また A, B 型と a, b, c 型とは河川の空間位置との関連から組み合わせとして, Aa, Bb, Bc の3通りがあるとした。

上述した河床型は中小河川を対象としたものであり、大河川を含む河床型については網羅されていない。河川工学的視点から見た河床型を、瀬・淵, 砂州, 河道平面型の3つの概念で、セグメント別に説明し、河床型概念の拡大を図る。

勾配が少し緩い山間部の河川、沖積地河川では中規模河床形態といわれる砂州が発生する。ただし、直線状の河道区間で平均年最大流量時の川幅水深 B/H_m が10程度以下となる小河川では砂州が生じない。砂州は、河道地形の一つのユニット（可児の言う単位形態に相当する）であり、瀬や淵はその部分である。図 2.3.8 は直線河道における砂州の形態とスケールを示したものである（山本, 1994）。洪水時においては、交互砂州の発生している河道では水流が蛇行し、複列砂州およびうろこ状砂州の存在する河道では水流が集中と発散を繰り返す。直線河道では、砂州は下流に向かって移動し、それに伴って河岸侵食位置が変化する。

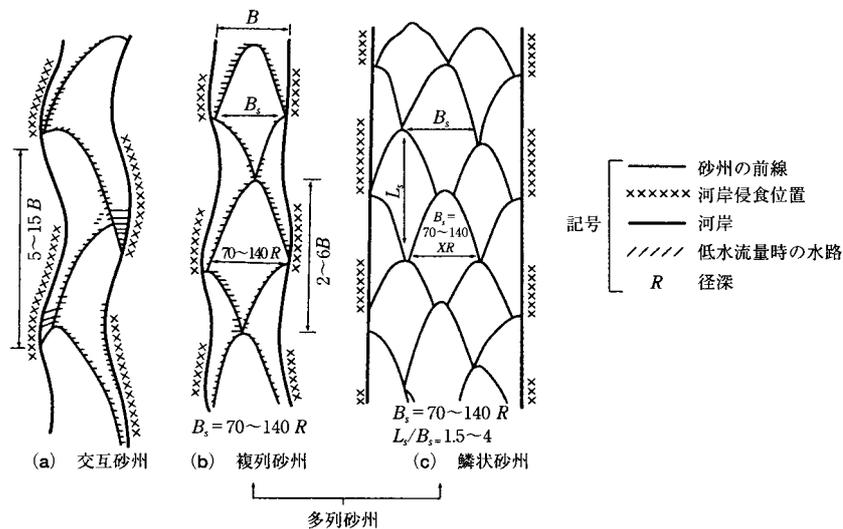


図 2.3.8 典型的な砂州のスケール（山本, 1994）

セグメント 1 および 2-1 の河道では、砂州のスケールは図 2.3.8 に示すように低水路の川幅 B と平均年最大流量時の水深 H_m に規定される。交互砂州の波長 L_s は B の約 10 倍程度であり、緩やかに蛇行する河川の蛇行長に対応する。ただし河幅水深比が 40 を越えるとは L_s/B の値は小さく

なる(山本ほか, 1989). 自然河川では, 河岸侵食に伴う河道位置が変化し, 蛇行が発達する. セグメント 2-1 および 2-2 では, 川幅水深比の小さいほうが蛇行度 S (水路長を谷長で徐したもの) が大きい. 複列砂州およびうろこ状砂州の L_s/B は 2~5 程度である. 複列砂州が生じるような B/H_m が 100 程度では, 流水の集中点が両岸に生じるので, 蛇行度は小さく狭広を繰り返す平面形状となる(山本, 1994).

河川の水深は流量変動に伴って変化するが, 砂州のスケールは河床材料を全面的に移動させるに十分な流量で, かつ頻度の比較的高い流量における水深に対応すると考えられ, セグメント 1, 2-1 では平均年最大流量程度である. 一方, 砂を主成分とするセグメントでは, 比較的小さい流量でも河床材料が動くので, 大流量時と小流量で砂州の形態やスケールが異なることが多い. したがって, 平水時の河床地形データから洪水時の砂州形態を推定できないことが多い.

屈曲した河道が護岸施設や岩・谷壁によって固定されていると, それらが砂州の移動・配置に影響を与える. 直線河道において交互砂州が発生するような B/H_m であり, 河道の湾曲角がある程度大きくなると砂州は移動しなくなり(蛇行長が砂州長のほぼ等しい場合, 湾曲角 20° 程度以上), 深掘れ部の位置が固定される(木下, 三輪, 1979).

(1) セグメント 1

セグメント 1 の河床形態は, 大河川(流域面積 300km 以上)では, 平均年最大流量時の川幅水深比が 100 を超えるので, 2 列以上の多列砂州が発生し, その位置が, 洪水により移動変形する. 可児の言う単位形態が川中に多く現れ, 流れの状態は b 型あるいは平水時に流れが無い状態となる.

セグメント 1 の河道特性を持つ小河川(平均年最大流量時の川幅水深比が 50 以下程度の河川)では, 交互砂州が発生し Bb 型の河床型となるが, 大洪水時には側方侵食量が大きく川幅の拡大や氾濫原の河道化が生じ水衝部が急変してしまうため(平面的構造特性の連続性の切断), セグメント 2-1 の河川のような蛇行度の大きな河道平面形状(1 蛇行に 3 つ以上の淵を持つ蛇曲)とはならない. ただし, 河道が下刻し, かつ谷幅と河川幅がほぼ等しい段丘地形を作るような所では, 大洪水時においても川幅が変化しないので, 水衝部の継続性(平面的構造特性の連続性の継続)があり大きく蛇曲することがある(穿入蛇行). 同様に北方系の河川では, 融雪出水による洪水であることにより洪水規模および土砂流出規模の経年的変動が小さく, 蛇曲まで蛇行が発達するようである(池田・伊勢屋, 1986).

セグメント 1 の河道においては, 上流部に活火山や崩壊地があり小流量でも上流部から砂分を供給するような河川を除けば, 洪水後期, 主流部の表層の砂分・小礫分は流水により移動し, 砂州前縁線沿い(ただし, 平水時, 流水のある早瀬となるところは除く)に堆積する. したがって平水時流水が流れる滞筋部の表層材料は大きくなる. 早瀬に近い平瀬の所は, 平水時, 流水の一部が河床に潜りこむので, 表層下のマトリックスに細砂・シルトがトラップされ, 徐々に透水性が悪くなる. 砂州を動かすような洪水がないと, 小出水時に輸送される細粒物質(シルトを含む)が表層礫の間にトラップされるので, これに拍車をかける.

洪水後の砂州上の河床材料は, 滞の所の粒径が大きく砂州頂付近は小さい場合が多い. なお, 移動床実験の観察によると, 洪水中には滞の所に細粒が集中的に流れ, 河床表層に細粒分が集中することがある. 細砂を含む砂分がマトリックス材としてあり, かつ水分があるところには草本類

が進入し(平水時の水面より少し標高が高いところ)、洪水がないと、これがさらに細粒土砂をトラップし島状の地形(氾濫原的層序構造を持つ地形；下層から砂利、中砂あるいは細砂、シルト交じり細砂)を作ることがある。ただし大洪水時には、この細粒砂層は破壊されてしまうことが多く安定的地形とはいえない。

なお砂州の移動速度は、一般に勾配が急で、河床材料の代表粒径が小さいほど速い。扇頂からの供給土砂量が減少すると、扇頂から河床のアーマ化、川幅の縮小、砂州移動の不活性化が生じる。

(2) セグメント 2-1

セグメント 2-1 の河道は、自然河川(河岸侵食による側方変動の制限の無い河川)であれば蛇行河川であり、Bb 型の河川となることが多いが、川幅水深比が 70 を超えると図 2.3.9 のような複列的砂州あるいは複列砂州(⇒図 2.3.8(b))となり単位形態の発生位置が Bb 型とは異なるものとなる。複列的砂州形状となると、その一部は、平水時、ワンド状地形となることがある。大きな洪水がないと砂州の一部に草本類が生育し細粒物質が堆積し、さらに樹林化が進む。複列的砂州が発生している区間では、緩い蛇行形状であることが多く、一方で砂州の移動速度が遅いので、写真 2.3.1 のように砂州淵部が固定的なワンドとして長い期間存置する事がある。



図 2.3.9 砂州の形状 (山本, 1994)



写真 2.3.1 久慈川 20.5 km 河道とワンド

沖積谷の広い所を流れる自由蛇行河川では、蛇行の進行に伴い、淵と瀬の配置形態が交互に発生する Bb 型とは異なり、淵が片方の岸に連続したりする。図 2.3.10 に河道平面形と淵の配置関係の典型例を示した。

一般に、平水時に流路となる所の河床表層は B 集団が抜け出す、勾配のゆるい場合には淵に砂が堆積することがある。ポイントバーが形成されている所では、湾曲による 2 次流により土砂の分級、横断方向の流速差により、凸湾部河岸に近いほど粒径が小さく砂となる。凹部が侵食されると、凸岸部に浮遊砂が堆積し河岸形成が進む。このような堆積機構の結果として、河岸は下部が河床堆積物である礫が、中層が砂質土となり、上層が細砂・シルト層となる。なお大洪水時に

は、砂州上に砂堆が発生する。

小河川で河道を人為的に直線状とすると（平均年最大流量時の川幅水深比が 20 程度以下），砂州が発生しなくなるので瀬と淵が不明瞭となる。

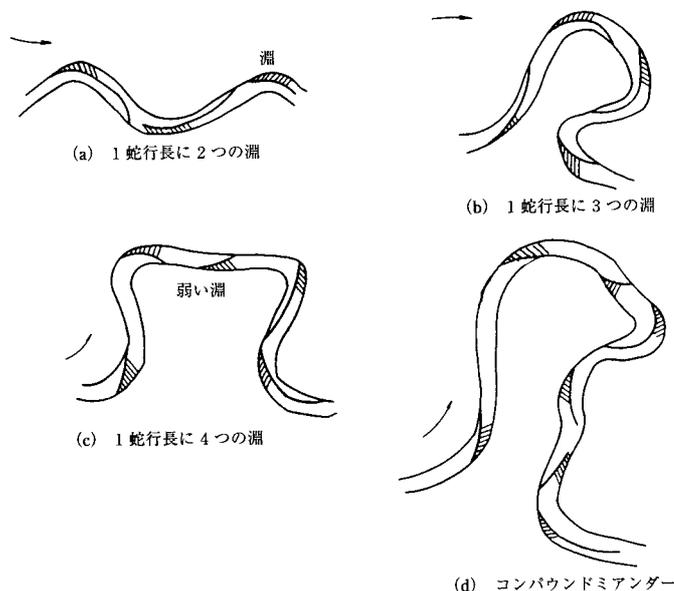


図 2.3.10 蛇行形状と淵（山本，1994）

(3) セグメント 2-2

セグメント 2-2 の河川においては，小流量でも河床材料の A 集団が移動しうるので（ただし河口部は除く），洪水時に形成された砂州は小流量で変形されてしまう。わが国の河川は洪水の流下する時間が短く，洪水時の水量に対応する砂州が発達しないうちに流量が小さくなってしまふので，淵の位置や深さが安定しない。特に直線形状の平面形を持つ河川では安定しない。河道平面形が湾曲している場合は，洪水時にポイントバーが湾曲形状に応じて発生するので，直線状河川より淵の位置が安定するが，これも図 2.3.11 のように小流量時の水量に対応した砂州が発生すると，濤の部分が埋められてしまう（山本ほか，1989）。単位河床形態は，c 型である。

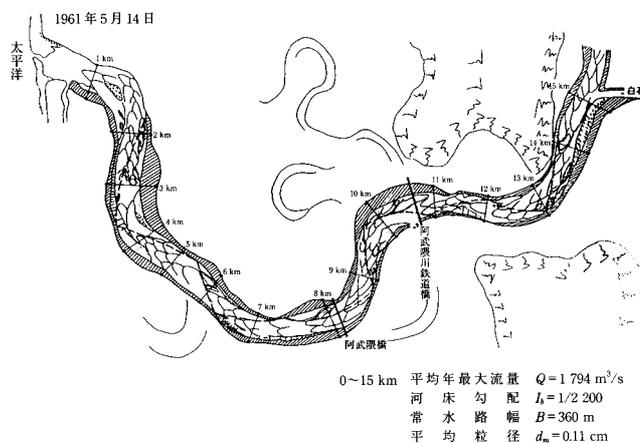


図 2.3.11 阿武隈川における砂州形態（山本ほか，1989）

セグメント 2-2 が河口と接続する場合は、海水面の影響により小流量時 A 集団の材料が余り動かず、洪水時の砂州スケールを保持し、淵の位置がその砂州の配置により規定される(例、阿賀野川下流部)。

わが国ではセグメント 2-2 における砂州上での土砂の分級作用は、洪水時間が短く大きい砂州が形成されないこと、従って小流量に対応する小規模の砂州が形成され易く移動すること、などにより顕著に生じない。ただし砂州の高い所に河床材料の A 集団より 1 つ小さい粒径集団が小流量の時に掃流砂として堆積する。斐伊川(河床勾配 $I_b=1/800$, A 集団 2~3mm)では、**写真 2.3.2**のように砂州の高い所に 0.3~0.4mm の砂が分級堆積している(この B 集団は洪水時河床近くを浮遊砂として移動している。洪水終期に A 集団が移動しない水理条件の所で掃流砂として移動集積するのである)。**図 2.3.12**に砂州頂部付近に堆積した中砂集団と河床の小礫集団(河床材料)の粒度分布を示す。なお、1960 年代低水路であり、現在高水敷となったところ(17km 右岸)の堆積物は、検土丈による調査によると、大部分が表層から地中方向に、シルト混じり細砂、0.3mm の砂(層厚 70~90cm)、2~3mm の小礫となっている。なお他の地点の調査により 0.3mm の砂層に下にシルト層が挟むものもあった。蛇行河川では、凸岸部河岸岸寄りに B 集団が堆積する。



写真 2.3.2 斐伊川 12.4 km 砂州頂部付近の砂の分級堆積 (2000)

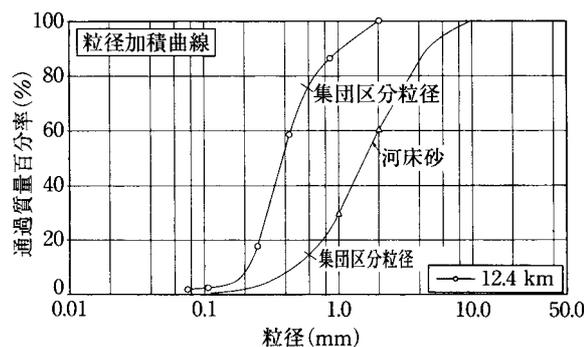


図 2.3.12 斐伊川 12.4 km の砂州頂部付近表層堆積物と河床材料 (山本, 2002)

(4) セグメント 3

セグメント 3 の直線状河道で細砂 (0.1~0.25mm) を河床材料に持ち、川幅水深比が 100 を超える黄河、ブラマプトラ川では、形が複雑な砂州(砂利州のようにきれいなうろこ状ではない)が発生しているが(黄河水利委員会, 1991. Coleman, 1969), わが国の河川では顕著な砂州の発生事例はない(川幅水深比が大きくないこと、洪水時間が短く洪水時の水理量に対応した砂州が形成さ

れないことによる)。

A 集団が 0.1mm 以下では砂州の発生がみられない(粘土混じりシルトとなり分級度の悪い堆積物となってしまう。いわゆる泥川)。河道が蛇行していると、水衝部(凹岸)が深く、その河道横断形状は逆三角形形状である(山本, 1991)。

細砂を A 集団として持つ河川で河口に接続する場合は、流れの弱い川岸付近や川幅の広い所に粘土混じりシルトが堆積する。筑後川では A 集団は細砂であるが、河岸付近には B 集団であるシルト質の堆積物となっている。六角川では A 集団はシルト・粘土であるが、主流部(滞筋)には C 集団である細砂が存在する。

細砂を河岸付近に持つ場合で滞りが河岸によった所の河岸付近河床横断方向勾配は 1/3 程度である。シルト・粘土質である六角川の河岸付近河床横断方向勾配は、1/10~1/5 程度であり、若い河岸(ここ数 100 年で形成された河岸付近)ほど緩い(山本, 1991)。

鶴見川のようにセグメント 3 の長さが短く河口に接続している場合は、洪水の大きさによって河床に働く掃流力が大きく変わるので、河床材料の A 集団の粒径が洪水によって変化してしまう(山本, 1991)。

[3] 河岸侵食および氾濫原堆積に伴う土砂の分級と堆積構造

ところで大洪水(1/100 年確率相当)時の低水路の u_*^2 は、氾濫を防ぐ堤防が完成している場合は、平均年最大流量時の 2 倍程度であり、堤防が無ければ氾濫するのでこれほど大きくならない(沖積谷幅が川幅に比較して大きいほど、平均年最大流量時の値に近づく)。

以上のことと、図 2.3.3、図 2.3.4 に示された関係性を踏まえ、セグメントごとに河岸侵食および氾濫に伴う中規模河川地形と氾濫原堆積物の土質材料の特徴を記載する。

(1) セグメント 1

セグメント 1 の河道の側方侵食量は非常に大きい。一回の洪水で砂州幅の半分に達することもある。侵食幅と侵食長は、砂州の形状とその移動発達と密接に関係している。砂州の頂部の標高は河岸頂の標高より多少低い程度であるので、河岸物質のほとんどは、過去の砂州堆積物である。表層に細砂・中砂の氾濫堆積物が存在するが余り厚くない。勾配の急な河川ほど薄い。これは勾配が急であると水深が小さくても掃流力が大きく、細粒物質が堆積する環境となりにくいからである。勾配の緩い河川では砂州の標高の高いところの表層に細粒物質が堆積することがあり、そこに草本類が生え、後の洪水で侵食されないまま、礫がその上に堆積することがある。河岸の層序構造の中に砂層が挟まるのは、このような現象の結果である。

扇状地河川の河岸高は小さいので、土砂の堆積し易い所(小セグメントの結節点、川幅の広がるところ)では、河床が周辺より高くなり、流路の変更が生じる。新しい流路となるところは、周辺より相対的に低いところである。扇面には放棄された河道跡、すなわち砂州を単位とした地形が残る。人為的に堤防・護岸により流路変更を防止すると、堆積作用が侵食作用より卓越する区間が天井川となる(下流から上流に伝播)。

人為的河床掘削や主流部の河床低下により低い段丘化した所(以前の河床)には、過去の砂州形状が段丘面に残り、地下水面の高い場合には淵の部分が水溜りになったりした。草本類が生育すると浮遊砂がトラップされ細砂や中砂が堆積し、徐々に高水敷の凹凸の程度を低減させる(李

ほか, 1998). 一方で, 大洪水時には**写真 2.3.3**のように流水が走る所で氾濫原の表層土が侵食され窪地を作る.



写真 2.3.3 高水敷の表層土の侵食 (多摩川 17.8 km. 2001)

(2) セグメント 2-1

平均年最大流量時の川幅水深比が 50 以下で河岸が硬いもので構成されていない自由蛇行河川の河道平面形変動形態をまとめると以下のようなものである (山本, 1994).

① 蛇曲から迂曲へ

1 蛇行長に 2 つのプール (淵) のある蛇曲から 3 つ以上ある迂曲への発達過程の典型例については, **図 2.3.13** に示す (Kondrat'yev, 1968 ; 木下, 1961). 蛇曲の状態においては, 外湾部の最大曲率点に位置を基準点とすると河岸侵食部の長さは下流の方が長いので, 蛇行の振幅を増しつつ低水路位置を全体に下流に移動させるが, 振幅の増大につれて水路長が長くなると, 砂州の分裂あるいは新たなプールが発生し, これが生じると低水路全体の下流への移動は停止する (木下, 1961). 侵食部の長さは, 砂州の前縁線が河岸から離れる地点から対岸に達する地点まで, あるいは濬が河岸に寄った範囲であり, 一回の河岸侵食量は, 河岸高の数倍程度である.

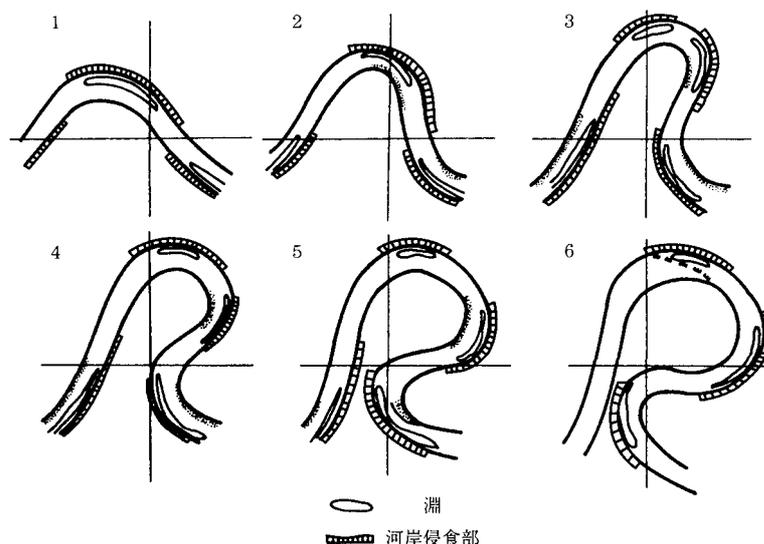


図 2.3.13 蛇行の発達過程 (Kondrat'yev, N.Y., 1968 に付加)

河岸侵食が生じると対岸は堆積が進み河岸付近には中砂が堆積し, そこに植生が生えると細砂・シルトをトラップして土砂の堆積速度が増し高水敷化していく. 堆積側には**図 2.3.14**のよう

な線状の微高地が認知されることがある。線状の微高地の間隔は、河岸高の2~3倍であり、これはちょうど一回の河岸侵食量に対応している。線状構造は対岸の間欠的な河岸崩壊に起因していることを示唆している。

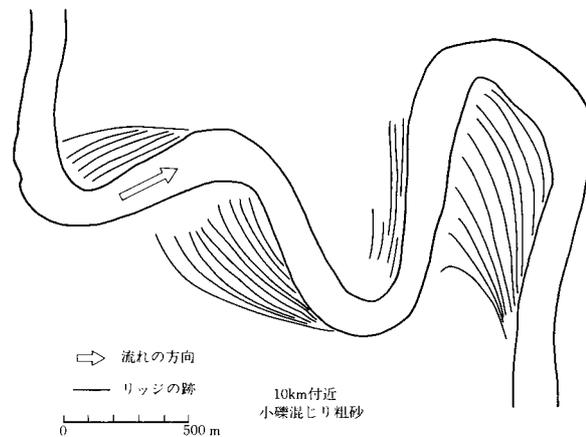


図 2.3.14 天塩川 10 km 付近の線状微高地 (1947) (山本, 1994)

②コンパウンドミアンダーの発生

蛇曲から迂曲に変わった後は、湾曲部はますますその径路を長くし、自然短絡（湾曲の首部が繋がること）が起こらなければプールの間隔が川幅の8~10倍程度となると、新たなプールを発生させ、図 2.3.10(d) のような複雑な形（compound meander）となる。プールの発生ごとに流路の移動方向、移動速度が変化する。プールの発生は低水路変動形態の質的变化点である。

③自然短絡 (natural cutoff)

迂曲河道では河道の全体的な前進がないので、蛇行の進行に伴ってネック部（首部）がくっついて自然短絡が生じる。氾濫水がネック部を走り、氾濫原を侵食し新たな水路を作って自然短絡が生じることもある。

自然短絡が生じると旧河道は、いわゆる三日月湖となり、氾濫の繰り返しにより細粒物質が堆積し埋まっていく。湖の形態がなくなっても旧河道跡は周辺の氾濫原より標高が少し低い。

④蛇曲から迂曲への移行限界

蛇曲から迂曲への移行時の流路長と蛇行波長は1.4程度であり、湾曲角は140~180°，曲率半径川幅比 B/r は3程度である。

⑤河岸物質の影響

移動方向河岸の物質が流れに対して耐侵食力のある固結した物質があると蛇曲、迂曲の発達を妨げられる。例えば谷壁 (valley wall)，段丘崖 (terrace)，後背湿地堆積物性粘性土は低水路の側方移動を規制する。

セグメント 2-1 では、氾濫時流水の乗り上げ部に堆積した細砂・中砂は河岸侵食により侵食されてしまうので、河岸に沿った自然堤防の存在は顕著でない。しかしながら河道位置を固定してしまうような曲がりのある狭い沖積谷を流下している場合、あるいは人為的に河岸侵食を防止すると（近世に始まる）、河道位置が固定されるので高い自然堤防が形成される。その高さは1~2m

程度であり氾濫原側の斜面勾配は 1/30~1/40 程度である。図 2.3.15 に約 400 年前に瀬替えにより洪水の流下場所となった関東の荒川のセグメント 2-1 区間の自然堤防の形状を示す。

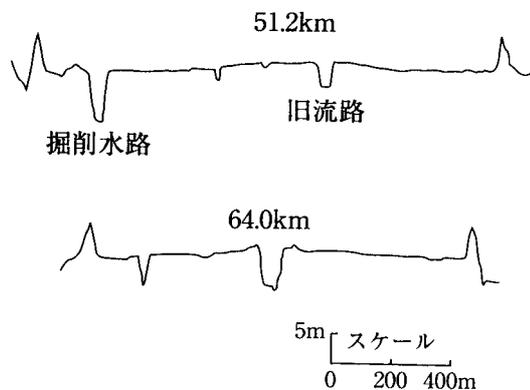


図 2.3.15 荒川セグメント 2 - 1. 1629 年久下瀬替え後，約 400 年で形成された自然堤防

大洪水時には，流水が乗り上げる所に中砂，細砂を堆積する．これを特に河畔堆積物といっている．河畔林あるいは水防林があると氾濫原への流水の乗り上げが妨げられ河畔堆積物量の堆積量が減少する．河畔林あるいは水防林が流下方向に切れているとそこから流水が氾濫原に流れ込み，写真 2.3.4 のように砂が多量に堆積することがある．乗り上げ部流速が速いと（2~3m/s 程度か），砂分が堆積できず高水敷表土を侵食することがある．



写真 2.3.4 氾濫源の砂の堆積（白川，1981）

(3) セグメント 2-2

自然蛇行河川の河道平面の変動形態は，セグメント 2-1 と同様であるが，平常時と洪水で砂州のモード(列数)が変わることがあるので（多列砂州の発生する場合，その砂州幅 B_s は水深の 100 倍程度となろうとする．セグメント 2-2 では小流量時でも河床材料が動くので，洪水時と平水時では砂州のスケールが異なるのである），水衝部がセグメント 2-1 ほど安定しない．勾配の急なほど平水時の砂州移動が活発で砂州のスケールが小さく，水衝部が固定されないので，河道の蛇行度は大きくならない．図 2.3.16 は，インドネシアの河川の蛇行度と川幅水深比，河床勾配の関係を示したものである(山本，1989)．

わが国のセグメント 2-2 の河道区間は，縄文海進時，海面下あった所を流れていた河川が多く

河岸に粘土層が存在することが多いためか、河道の側方移動量が小さい（数 100 年間ほとんど移動した形跡が見られない河川が多い。近世における川普請による河道の側方移動を制御という人為的影響がある）。もともとセグメント 2-2 における河岸侵食力は大きなものでない。

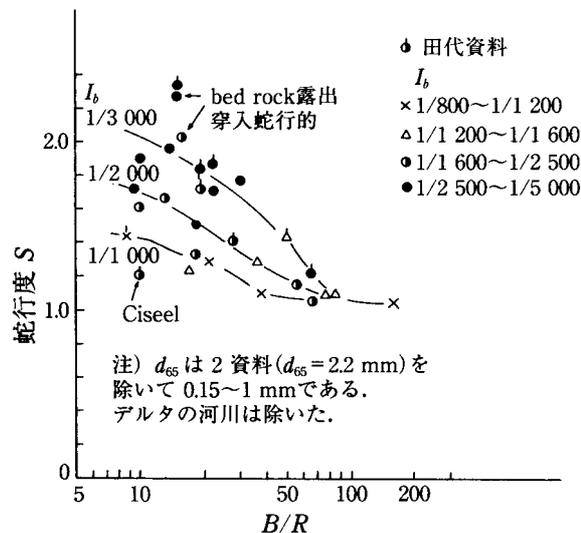


図 2.3.16 インドネシアにおける自由蛇行と判断される河川の S と B/R の関係（山本，1989）

河岸は、一般に、下層が河床堆積物と同様な掃流堆積物であり、中層は洪水時の岸よりのポイントバー堆積物（細砂とシルト混じりの細砂の互層である）である。上層は氾濫原堆積物でありシルト混じり細砂あるいは細砂混じりシルトであるが、洪水時に河岸に乗り上げた流れにより運ばれた中砂を挟むことがある。側方移動が顕著でないこともあり、後背湿地堆積物である粘土層が河岸侵食部に露出することも多い。

側方移動が少ない河川では、河岸沿いに自然堤防が発達し、背後より 1~2m 高く、その横断方向勾配は 1/30~1/150 程度である（形成されてから 30 年以下の若い自然堤防、また A 集団の粒径が大きいほど横断方向勾配が急である）。

利根川において最近形成され始めた自然堤防は（低水路の河床掘削により水制部分が高水敷化したものであり、30 年程度の時間）、高さ 2m 程度あり、斜面勾配は 1/30 程度と急であるが、約 300 年が経過した 85~110km の区間の自然堤防は、図 2.3.17 に示すように高さ 2~3m 程度で、斜面勾配が 1/100~1/150 と緩い。

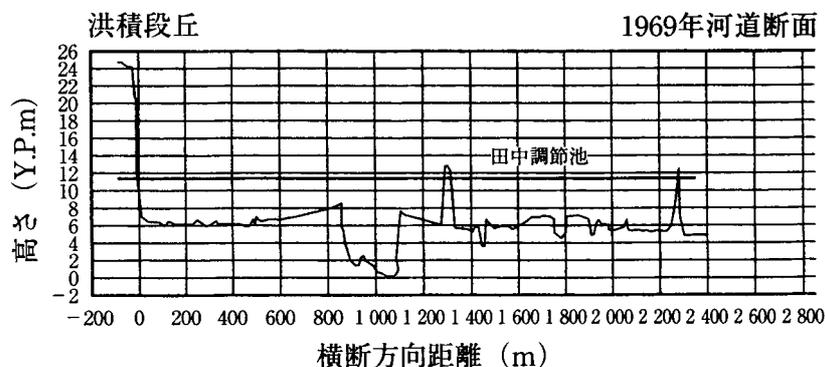


図 2.3.17 約 300 年が経過した自然堤防（利根川）

大洪水時には、洪水が高水敷に乗り上げる所、あるいは低水路と高水敷の流速差にもとづく河岸渦が形成され渦により低水路の物質が高水敷まで運ばれる所の河岸沿いに、写真 2.3.5 のように細砂あるいは中砂を帯状に堆積する(伊勢屋, 1980 ; 木下, 1987b ; 建設省河川局ほか, 1990).



写真 2.3.5 庄内川 10.2 km左岸高水敷河岸寄りの河畔堆積物 (2000年9月撮影)

(4) セグメント3

わが国のセグメント3の河道区間が存在する所は、ここ50～1000年の間に沖積地となった所が大部分であり、沖積地は人為的影響を強く受けている。河岸侵食は、ほとんど見られない。河岸近くの表層堆積物は細砂混じりのシルト・粘土である。洪水時の流速が遅く砂分の高水敷への堆積が少ない一方で、この地形の形成時間が数100年以下であるものが多く、自然堤防状の地形の発達は顕著でない。氾濫原は平坦のヨシ原となる。

潮位変動量がある程度大きいと潮汐流が生じ、潮流の強さに応じた潮汐水路が形成される。

[4] 河床材料とマトリックス

河床は洪水により移動堆積した後においても、平水、小出水により運ばれた物質が堆積したり、逆に流出したりする。

A 集団が砂分である河床材料(セグメント2-2および3)においてA 集団が移動しない状態では、A 集団粒径間の空隙が小さいのでB 集団であるマトリックス材の流出や潜りこみは少ない。海水面の影響を受けていない河道区間では、小流量でも河床材料が移動するので、マトリックス材はA 集団の移動に伴い流出し河床材料の均一度はよくなる。B 集団はまとまりを増し、流速の遅い砂州上や湾曲部内湾側河岸寄りに堆積したりする。河口近くや堰上流のように小流量時においてA 集団が移動しない条件にあるところでは、平水時細粒物質(B 集団)が河床を覆うことがある。ただし洪水時には浮遊し下流に流下する。

A 集団の河床材料が0.2mm以下の細砂である場合は、洪水時でも流速が遅いこと、塩水によるフロキュレーションの促進により、粘土・シルトが流速の遅い河岸付近・浅瀬に堆積する。これらは洪水後のマトリックス材料の再移動による堆積ではない。

河川生態系にとって重要なのは、粒径数cm以上の礫床河川(セグメント1および2-1)におけるマトリックス材の存在様式である。マトリックス材の粒径やその存在量が水分量の保持と栄養塩の量、酸素還元状態に関係し、植生の生育条件を規定する(渡辺ほか, 1998)。また魚類や底生動物の産卵・生育条件とも関係する。

礫成分と砂成分は同一水理量場において運動様式が異なり分級現象が生じ易い。洪水時に礫成

分が移動しているときには砂成分は浮遊し、その移動量も大きい。礫の間にトラップされ、あるいは礫や玉石を含む混相流堆積物としてマトリックス材となる。流速が遅くなり礫の移動が止まっても、表層近く砂成分は流水により移動しうる環境にある。

移動する砂分は集まり、帯状（サンドリボン）あるいは薄く層として移動し、再度礫間のマトリックス材となるものもある。

セグメント 1 においては、砂州の頂部付近に小礫がときには砂分が堆積することがある。また洪水終期に移動した砂が、**写真 2.3.6** のように砂州の頭部に近いところの前邊線前面に集団として堆積することもある。急勾配扇状地河川（勾配 1/250 以上）では、砂州の淵部に砂分は堆積しないが、緩勾配扇状地河川では小流量で運ばれた細粒物質が淵部にたまることがある。流水が流れる砂州前邊線部分は瀬となり、砂分は抜け出し、浮き石状となる。



写真 2.3.6 多摩川 25.4 km 右岸側（ $I_b=1/480$ ）の砂州前縁線における砂の堆積
（2001 年 9 月の洪水後）

後期更新世に噴火した火山流域から流下するセグメント 1 の河床材料は、マトリックス材中に含まれるシルト分の割合が多い。火山灰が風化されシルト・粘土・砂の供給量が多く、洪水時の濃度が高く、これが洪水時トラップされるのである。

セグメント 2-1 においては、淵部は小流量時流速が遅いので細粒物質、有機物などが堆積し易い。また湾曲部のポイントバーでは、河岸側の方が河身側に比べて粒径が細かく、河岸付近には砂がたまることもある。またポイントバーの上流側の方が、下流側に比べて粒径が大きい。

礫河床で A 集団を移動させるような出水が何年もないと、砂州上では小出水時に運ばれる細砂・シルトが表層河床材料下の流速の遅いところに堆積して、**写真 2.3.7** のようにシルト分が多いマトリックスが形成される。また瀬による平水時の水位上昇に伴う淵部から瀬にかけての流水の河床への潜り込みにより、瀬の上流部でマトリックスに細砂・シルトが多くなる。逆に瀬のところでは細粒分が抜け出す。



写真 2.3.7 多摩川 51.0 km 付近玉石下のシルト（2002）

2.3.4 河川流量変動と流送土砂の変化に対する河道の応答

[1] 人為的インパクトに対する中規模河川地形の応答方向と事例

図 2.3.3 は、沖積地河川が持つ基本特性であり、この関係となるように河道が調整される。実際、河道掘削によって河積を増大したり、蛇行していた河川を直線化したりした後の変化は、図 2.3.18 に示すように、図 2.3.3 の関係に戻ろうとしている(山本, 1994)。

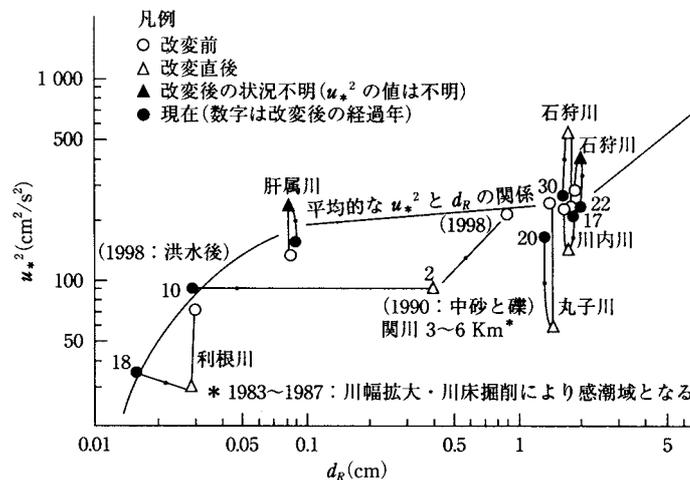


図 2.3.18 人工的河道改変後の河道の応答 (山本, 1994 に付加)

河道特性の変化に関する事例研究と図 2.3.1 より、河岸の侵食が許されている沖積河川での平均年最大流量 Q_m , 対象としているセグメントの河床材料の A 集団の上流部からの供給量 Q_s が変化した場合、対象セグメントの特性がどう変わるかを示すと、表 2.3.1 および表 2.3.2 のようである。ここでは、ある量が増加する場合は+, 減少する場合は-, 変化しない場合は 0 を、ある量の記号の右上に付すことにより示してある。なお時間スケールとしては 10~100 年オーダの現象、空間スケールについては小セグメントスケールの現象を対象としている。ただし、セグメント 3 では、デルタ底置層の粘土層の影響や堆積面の前進等の非平衡性をそのセグメント自身が持っていること、また河道特性の変化に関する実証的事例が少ないことより、変化の方向を示していない(山本, 1994)。

Q_s , Q_m の変化に対して河道は、まず川幅あるいは粒径 (どちらが早いかは、河床材料の混合度や B, C 集団の上流からの流入量や河岸物質の特性によるが、よく分かっていない) が応答し、それにより川幅水深比が変化し、次に蛇行度 S の変化が現れ、最後に勾配の変化が現れるようである。なお上流土砂生産源での生産量の変化による河道の変化は、上流のセグメントから徐々に伝わってくるものでなく、各セグメントの主モード (A 集団) の河床材料の上流からの伝播速度の差 (シルト, 砂, 砂利ではその移動速度が異なる) によって、下流側のセグメントの方が上流のものより先に変化することもある。

表 2.3.1 セグメント 1 における河道の応答 (山本, 1994)

地形 変化するもの	扇状地(セグメント1)
Q_s^+ Q_m^+	$C=Q_s/Q_m$ が変わらなければ, B は Q_m に比例, $I_b^0, S^0, d_R^0, H^0, V_m^0$ C^+ であれば, B はまず Q_m によって増加, その後 I_b^+ による B の増加が加わる. H^-, V_m^- となる. C^- であれば, B はまず Q_m によって増加, その後 I_b^-, d_R^+ による B の減少が加わる. H^+, V_m^+ となる.
Q_s^- Q_m^-	C^0 であれば, B はまず Q_m に比例, $I_b^0, S^0, d_R^0, H^0, V_m^0$ C^+ であれば, B はまず Q_m に比例して減少するが I_b^+ によって B の多少の増加. H^-, V_m^- となる. C^- であれば, B はまず Q_m に比例して減少するが I_b^-, d_R^+ による B の減少が加わる. H^+, V_m^+ となる.
Q_s^- Q_m^+	B の流量増による増加要因と, I_b^-, d_R^+ による減少要因あり, どちらが強いかによって川幅の変化が異なる. 扇頂河床低下, 扇端河床上昇, V_m^+
Q_s^+ Q_m^-	B は流量減による減少要因と, I_b^+ による増加要因があり, 河床上昇, V_m^-, H^+
Q_s^+ Q_m^0	I_b^+ による B の増加, 河床上昇, V_m^-, H^+
Q_s^0 Q_m^+	Q_m^+ による B^+ の要因があるが, d_R^+, I_b^- による減少要因もある. V_m^+, H^+

表 2.3.2 セグメント 2 における河道の応答 (山本, 1994)

地形 変化するもの	中間地(蛇行帯)(セグメント2)
Q_s^+ Q_m^+	$C=Q_s/Q_m$ が変わらず, B/H が 100 以上であれば, B は Q_m に比例, $I_b^0, S^0, d_R^0, H^0, V_m^0$ であるが, B/H が 100 以下であれば, S が減少し, I_b^+ となり, B はより増加する. C^+ であれば, C^0 と同様な現象がまず生ずるが, C^+ による I_b^+ による B の増加がより加わる. H^-, V_m^0 C^- であれば, C^0 と同様な現象がまず生ずるが, その後 I_b^- による B の減少が, またアーマ化による d_R^+ の場合には, これによる B の減少も加わる.
Q_s^- Q_m^-	C^0 で, B/H が変化後で 100 以上であれば B は Q_m に比例, $I_b^0, S^0, d_R^0, H^0, V_m^0$ であるが B/H が 100 以下になるような場合には S が増加し I_b^- となり, B はより減少する. C^+ であれば, C^0 と同様な現象がまず生ずるが, C^+ による I_b^+ による B の増加が加わる. H^-, V_m^0 C^- であれば, C^0 と同様な現象がまず生ずるが, その後 I_b^- による B の減少が加わる. またアーマ化による d_R^+ の増加があればより B の減少が進む.
Q_s^- Q_m^+	B は流量増による増加要因と C^- による I_b^- による減少要因があり, まず Q_m^+ の現象が現われ, C^- による I_b^- が続く. 河床低下によるアーマ化が生じる所では, これによる川幅減少もある. S は, B が増加すれば S^- , 減少すれば S^+ となる. したがって, I_b の変化方向は C^- によるものと S の変化量の 2 つの影響を受ける.
Q_s^+ Q_m^-	B は流量減による減少要因と C^+ による増加要因あり, まず Q_m^- の現象が現われ, これによる B^- による S^+ , I_b^- が続き, C^+ による I_b^+, B^+ の要因が続く.
Q_s^+ Q_m^0	C^+ による I_b^+ , これによって $B^+, S^-,$ 河床上昇
Q_s^0 Q_m^+	Q_m^+ による $B^+, (B/H)^+, S^-, I_b^+$ がまず現われるが, C^- による I_b^- による $B^-, (B/H)^-, S^+, I_b^-$ の影響が続く. アーマ化による d_R^+ があると後者の影響はより大きくな

日本の河川は、側方方向の河道の移動（河岸侵食となる）を護岸等により防いでしまうため、表 2.3.1 および表 2.3.2 のような変化方向を示さないことが多い。そこで表 2.3.3 には、河道の側方移動が制限されているという条件の基で、人工的に河道のスケールや勾配を変えた場合の河道の応答を示した(山本, 1994)。

表 2.3.3 人工的变化に対するセグメントの応答 (山本, 1994)

地形 人工的变化	扇状地(セグメント1)	中間地(蛇行帯)(セグメント2)
B^+	低水路内に Q_m, Q_s に対応した河道幅をつくってしまう。	最終的には扇状地と同様であるが、河岸堆積速度が扇状地ほど速くないので、拡幅に合わせた中規模河床波が発生し、蛇行特性が変わる。特に単列の砂州発生条件であった所が、複列の条件に変わる場合には注意が必要である。
I_b^{+-}	河口部の河床掘削による I_b^- は d_R^-, B_m^-, Z_m^+ となる。 落差工群による I_b^- は d_R^{+-}, B^-, Z_m^{+-} となる。	cutt-off の連続は、 I_b^+ となり、 B^+ となる。河道が固定あるいは対侵食性が強い場合には、河床低下が進む。アーマ化による d_R^+ となることもある。
B^-	低水路のアーマ化 d_R^+, I_b^- の方向となる。	扇状地と同様の傾向、蛇行特性の変化。
A^+	河口近くで河床掘削、川幅の増加を行うと、粒径の急変(砂利から砂へ)が現われることがあり、砂利分の河口から流出の減少を生じる。	河口近くで河床掘削、川幅の大幅な増加を行うと、粒径の急変がまず第一に現われることがある(新しい小セグメントの発生)、河床は上昇の傾向。

以下に、セグメントスケールの河川地形変化に及ぼした河川流量変動と流送土砂の変化の影響を事例にて示そう。

(1) 供給土砂量の減少

大ダム建設は、ダム地点より上流からの土砂の大部分を貯水池に堆積させてしまうため、下流への供給土砂量を急減させる。

上流山地流域に砂と砂利成分のほとんどを堆積し得るようなせき止め湖、ダム貯水池が出現した場合、その上流流域から土砂の供給が行われなくなる(図 2.3.19)。この状況における最終的なセグメント 2-2 への砂の供給量は、概略

$$Q_{SB} \doteq (A_T - A_D) / A_T \cdot Q_{SA} \quad \dots \dots \dots (2.3.7)$$

と考えられる。ここで Q_{SB} : せき止め湖、ダム湖出現前のセグメント 2-2 への砂供給量、 Q_{SA} : 出現後のセグメント 2-2 への砂供給量、 A_T : 山地部流域面積、 A_D : せき止め湖、ダム湖上流の流域面積である。この式は、流域内での砂生産量の場所的違いが小さいことを前提としている。また、砂生産源からセグメント 2-2 上流端までの間の河道に砂がストックされているので、図 2.3.20 に示す Q_{SB} から Q_{SA} に変化するには一定の時間を要する(建設省河川局治水課ほか, 1991)。

セグメント 1 あるいは 2-1 への砂利の供給量についても、原理的には同様の考え方が成立すると考えられる。しかし、砂利の動きは砂に比べてはるかに遅いので、ダム等による砂利供給量減少の影響がセグメント 1 または 2-1 区間上流端に現れるには、砂の場合よりもはるかに長い時間を要する。

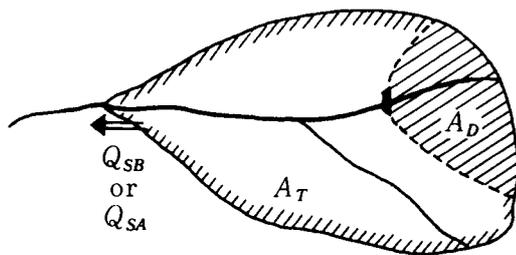


図 2.3.19 構造物が供給土砂量に与える影響（建設省河川局ほか，1991）

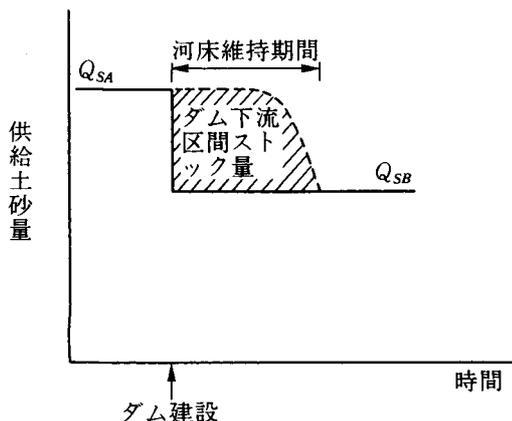


図 2.3.20 供給土砂量減少の時期（建設省ほか，1991）

日本のダムは山地上流部に建設されるものが多く，途中に支川が入り，また山間部の河道は沖積層の厚さが薄く，河床低下してもすぐ基岩が露出してしまふことや，山間部から出た河道区間で人工的砂利採取があることより，ダム建設による供給土砂の減少によって下流部の河道特性がどう変わったかについて明確に述べるといふことは難しい。

狭い川谷を流れている天竜川秋葉ダム下流および秋葉ダム下流のダム建設後の河床変動，河床表層材料および表層化の河床材料調査結果によると，ダム下流の河床は，有力な支川の合流点まで河床がほぼ平行に低下し（区間長は秋葉ダムで 6km，佐久間ダムで 2.5km），その低下量は 2～3m 程度であり，ダム建設後 4～5 年で河床低下が止まっている（山本，1976）．これは河床材料のうち移動しない材料（C 集団）が図 2.3.21 のように河床を多いアーマコート形成したためである。

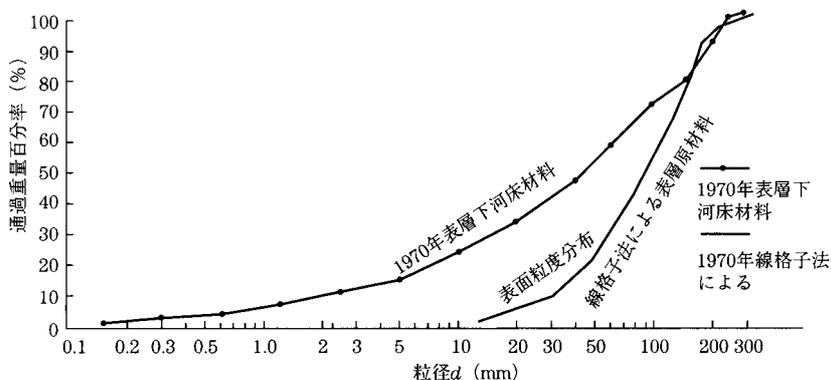


図 2.3.21 天竜川 44 km地点表面と地中の粒度分布（山本，1976）

ダム地点と扇状地との間に長い河道区間がある場合には、支川からの土砂供給があること、山間部河道区間からの土砂補給があることにより、河床が低下しアーマ化するまでかなりの長い期間を要す。ダム地点が扇状地に近い(約3km)梓川扇状地では、1966年に3つの大ダムが完成し、その後26年経過した時点において河道長(セグメント1, 勾配約1/120)17kmのうち、上流約8kmの河床でアーマ化が進行している(山本, 1993c)。一般にアーマ化されると砂州の移動が見られなくなり、流路部の固定化、流路幅の減少、流路部河床の平瀬化(河床凹凸の減少)が進むが、河床低下量はそれほど大きくなく数mである。セグメント1の下流部は、扇頂および扇央からのA集団が供給されるため掘削がなければ引き続き河床は上昇する。

セグメント2-2の河道においては、砂利を河床材料に持つセグメント1および2-1と異なり、大ダムの建設の影響がかなり早く現れる。上流のセグメント1あるいは2-1では、砂は洪水時浮遊状態で運ばれるため、ダムによる砂分の供給の急減がセグメント2-2への供給量減となり河床低下として現れる(建設省治水課・土木研究所, 1991)。

江合川では、1957年に完成した鳴子ダムによって上流からの供給土砂のほとんど止められた。図2.3.22に江合川の最深河床高縦断形の変化を示す。この川は26km付近にある右京江堰の前後で河床材料と勾配が変わり、これより上流はセグメント2-1、下流はセグメント2-2となっている。河床掘削による要因もあるが、明らかにセグメント2-2の上流から河床低下が進み、砂分の供給土砂量減少の影響を受けていると判断される(藤田ほか, 1999)。矢作川では、1971年に完成した矢作ダムにより粗砂の下流への供給が急減し、粗砂が河床材料のA集団であったセグメント2-2(0~42km)の区間のうち、上流の10kmがC集団である礫床河床(セグメント2-1)に変化しつつある(矢作川の伝統工法を観察する会, 2001)。

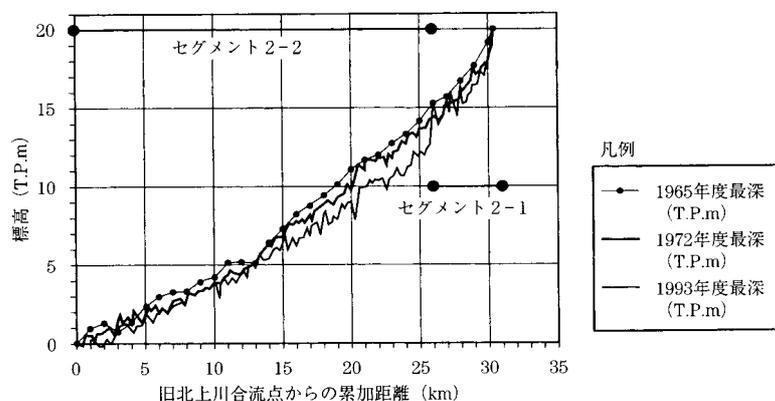


図 2.3.22 江合川の縦断形変化[最新河床高] (藤田ほか, 1999 微修正)

ダムの建設の影響ではないが、斐伊川では、カナナ流し(砂鉄を採取するために花崗岩の風化物であるマサ土を水とともに流し、比重の差により砂鉄を選別する技法)の衰退に伴い斐伊川に流入する小礫材料(1.5~3mm)の減少により、河床が図2.3.23のように変化している。小礫を河床材料に持つ河川では、A集団の流送量は、ほぼ $Q \cdot I_0$ (流量と河床勾配の積)に比例するので(山本, 2004)、1970年以前に比べ現在の小礫の上流からの供給量は6割程度に減少していると推定される。

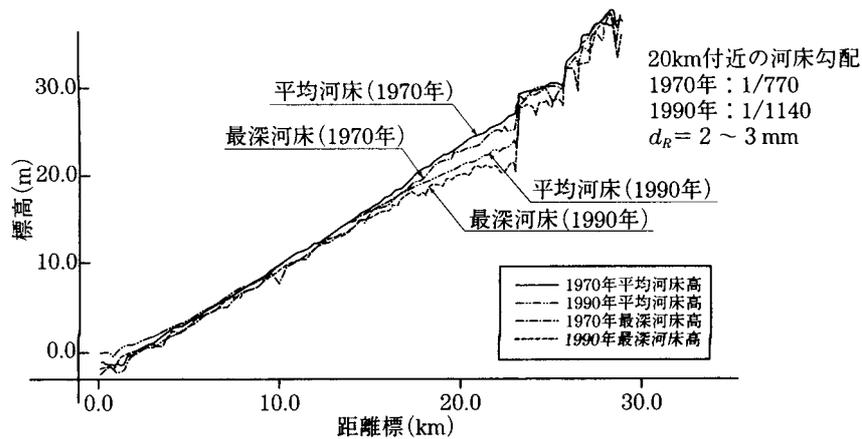


図 2.3.23 斐伊川の 1970 年と 1990 年の河床高

なお、セグメント 2-1 および 2-2 では、河床材料の A 集団の堆積層厚が薄いことが多々あり、河床低下にともない洪積層や沖積粘土層が露出し、これが床固め機能を持ち河床低下現象を規制し、図 2.3.22 のような典型的な河床変動パターンとならないことが多い（鬼怒川では、セグメント 2-2 の区間において洪積層が露出する部分が多くなり、砂州の形成が不明瞭となった。また砂河川らしさが消えてきた）。

(2) 河道の直線化

蛇行河川(セグメント 2 の河川)のショートカットは河床の勾配を変える。このようなショートカットを連続的に行うと、迂曲河道の勾配は 1.5~2 倍増加する。ショートカット部の堆積物が河岸物質と同様なものであれば（セグメント 2-1 においては河道の側方移動により沖積谷幅内の層序構造が似ているが、セグメント 2-2 では粘土層などが露出することがある）、河道は縦侵食より側方侵食により調節される。式 (2.3.4) によると河床材料が変化しなければ、川幅は勾配の変化率に応じて広がる。

事実、図 2.3.24 に示す肝属川 4~12km（勾配が 1/2000 であったものが 1/1200 となった。河床材料の d_{60} は 0.85mm）では、川幅がこの勾配の変化に比例して広がった。表 2.3.4. には河道の直線化による川幅の変化の事例を示す(山本, 1994)。

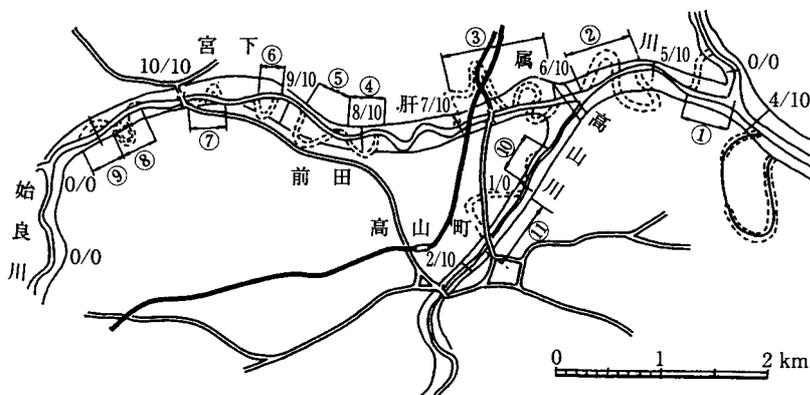


図 2.3.24 肝属川捷水路概要図

表 2.3.4 河道の直線化による川幅変化 (山本, 1994)

河川区間	粒径 d_R (mm)	現河道 の川幅 (m)	旧河道 の川幅 (m)	現河道 の 平面形	旧河道 の 平面形	現河床 勾配	旧ループ 曲率半径 R (m)
釧路川 38~45 km	5~10	50~60	30~40	直線状	迂曲	1/1 200	50~70
沙流川 0~10 km	10~20	250		直線状	迂曲	1/1 000	200~300
利別川 2~10 km	2~3	90~120	50~70	直線状	迂曲	1/1 400	150~200
雄物川 81~88 km	20	250	100~120	直線状	迂曲	1/900	250
阿賀野川 15~30 km	20~25	600~750	200~300	蛇曲	迂曲	1/800	430~660
阿賀野川 4~11 km	0.6~0.8	650	200~250	蛇曲	迂曲	1/4 000	450
加古川 3~8 km	30~60	300		直線状	迂曲	1/970	250
石狩川 92~105 km	10~20	230	195	直線状	迂曲	1/1 300	蛇行度 1.6
石狩川 108~110 km	10~20	180	159	直線状	迂曲	1/1 300	蛇行度 2.1

川幅を前もって護岸により規制し、その幅が式 (4.2.4) より狭いと、セグメント 2-1 の河川では河床材料が少し粗くなり、また河床低下し勾配が緩くなる。石狩川捷水路 (84~87km, 改変前河床勾配 1/1640, 直後河床勾配 1/1300, $d_{60}=10\sim15\text{mm}$) では、このような現象が生じている。

河道の直線化は、河道内の砂州形状すなわち瀬と淵の形状を変え、また固定砂州を移動性砂州に変えてしまう。また淵の部分の水深は浅くなる。セグメント 2-1 の河川では、平均年最大流量時の川幅水深比が 70 近くまで増加してしまうと、砂州形態が複列的砂州となる。

小河川の河道の直線化は、川幅水深比が小さいので河道内に砂州が発生する条件にないことが多く、瀬と淵の消滅となる。

(3) 洪水流量の変化

大ダムの建設は、下流の洪水流量を低下させるが、わが国のダムは貯留量が大きくないので、平均年最大流量を大幅には変化させず、また沖積河川の河川改修が活発におこなわれたこともあり、洪水流量の減少により沖積河川の河道地形がどのように変わったか確実に、かつ定量的に判断できる資料は少ない。しかしながら、1 級河川の指定区間外の河道区間 (大河川の沖積河道区間) の低水路幅は、種々の要因により 1960 年代以前の河道幅より狭くなっている河川が多い。ここでは、洪水流量の減少によると考えられるもの事例を示す。

セグメント 1 の河川では、洪水流量が減少すると砂州の冠水頻度が減少し草本類が生え、細砂・中砂がトラップされ比高が高くなり、シルトもトラップされるようになると冠水しても容易に植生破壊が進まず、砂州の島状化、高水敷化が進行する。手取川 (流域面積 809km²) では、1980 年に手取川ダム完成後 (河道掘削なし)、平均年最大流量は 1500m³/s から 900m³/s 程度に変化した。これにより河道内の樹林化が進み、島状地形が形成されつつある (河川植性の生育特性に関する研究会, 1998; 辻本, 1993, 1998)。黒部川 (流域面積 682km²) では、黒部ダム完成 (1963 年竣工, 集水面積 183.4km²) 後、改修計画に合わせて左右岸を掘り残した形で河道掘削を行った。掘削後の河道は、その後何回かの出水があったにもかかわらず高水敷として残った (低水路幅が縮小した)。黒部川の年最大流量の変化は、表 2.3.5 のようであり、ダム竣工前後で平均年最大流量は 2100m³/s から 1200m³/s に変わっている (山本ほか, 1993c)。

表 2.3.5 黒部川の洪水流量の変化 (山本 1994)

	1951～62年	1963～81年
500 m ³ /s 以上	5.4 回/年	2.3 回/年
1 200 m ³ /s 以上	1.4 回/年	0.6 回/年
平均年最大流量	2 100 m ³ /s	1 200 m ³ /s

セグメント 2-1 の河道である雄物川 75km 付近は、捷水路工事により本川区間であった場所が支川単独の区間になり、20 年後で川幅が 110m から 45m に縮小した (平均年最大流量は 1440m³/s から 165m³/s に変化している)。式 (3.3.4) によると川幅は、流量に比例するから、20 年ではまだ流量変化率ほど川幅は変化していない(山本, 1994)。なお本川の河床低下により本区間の勾配が急となっている可能性が高く、川幅が、流量変化ほど縮小しない一因と考えられる。

セグメント 2-2 の河道である矢作川(河口より明治頭首工 35km 間, 8～34km 間の河床勾配 1/1250, $d_r=2\text{mm}$) では、1975～1976 年の河川区域内(堤防表法肩間)の植生被覆率は 21.8%であったものが 1992 年には 37.9%, 2000 年には 44.6%に増大している。図 2.3.25 に 20～25km 区間の植生被覆状況の変化を示す(矢作川の伝統工法を観察する会, 2001)。概略低水路幅(正確には砂河床である部分の幅)が 1975 年に比べて、1992 年 86%に、2000 年には 76%に縮小したことになる。なお 2000 年の植生被覆率は 9 月 12 日洪水(岩津流量観測所 (29.2km) において既往最大流量である 4300m³/s) 後におけるものである。

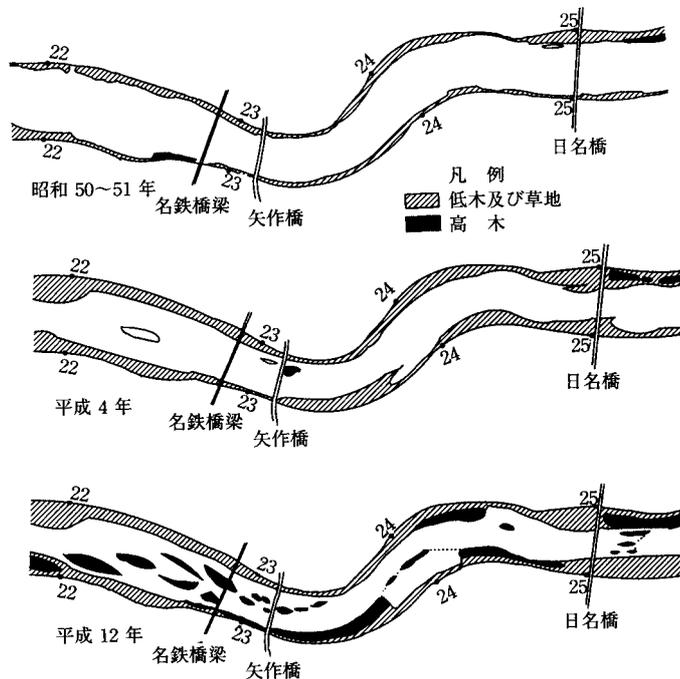


図 2.3.25 蛇行部内部での植生の変化 (矢作川の伝統工法を観察する会, 2001)

川幅の縮小の関係した人為的インパクトとして大きな要因は、骨材採取と 1973 年に流水制御が始まった矢作ダムの完成である。矢作川では 1988 年まで骨材採取がなされ 1965 年から 1988 年に

において河道河積の増加量は約 1600 万 m^3 であり年平均 66 万 m^3 の土砂が河道から減少したことになる。骨材採取禁止後は河床低下が止まり安定化しつつある。この骨材採取により 5～35km 区間の河床勾配が 1965 年 1/1275, 2000 年 1/1250 と少し緩くなったが、勾配変化の影響は大きなものではない。なお 30km より上流は、砂分の供給減により河床から砂分が抜け出し礫床河道(セグメント 2-1)に変化した。

川幅(移動床部)の変化に影響を与えたのは、矢作ダムによる洪水制御と水利開発である。岩津地点のダム完成前の 1946～1972 年, 1973～2000 年の流況を平均値で比較すると、平均年最大流量では、1754 m^3/s が 1240 m^3/s へ (71%), 平水流量が 38.9 m^3/s が 21.9 m^3/s へ (56%), 低水流量が 27.6 m^3/s が 12.2 m^3/s (44%) に変化した(矢作川の伝統工法を觀察する会, 2001)。低水路川幅はほぼ平均年最大流量の減少率に比例して変化している。

セグメント 2-1 および 2-2 の自然蛇行河道においては、洪水流量の減少に応じて川幅が縮小すると川幅水深比が小さくなり蛇行度が増加し、勾配が減少するので、洪水流量減少比以上に川幅が縮小する。17 世紀前半、流路の人工的付替えにより流量が大幅に減少した元荒川では、旧流路内に川幅の狭い迂曲流路となった区間があった。久慈川本川のショートカットにより旧流路後となった区間に流入する小支川により迂曲河道が形成されている。なお河岸の侵食が許された自然河道の蛇行度は平均年最大流量時の川幅水深比が大きいほど小さくなり、100 を越えるとほぼ直線上の河道となる(⇒図 2.3.16 インドネシア国の自然河川の蛇行度と川幅水深比の関係)。

(4) 人為的川幅拡大

人為的川幅拡大後の河道の変化は、ダムによる洪水流量減少後の河道の変化プロセスと似たものと考えられ、流量低減後の河道の反応を読むことができる。

低水路河道の流下能力拡大のため低水路川幅を拡大すると、平均年最大流量時の u_*^2 が変化する。これに対する応答はセグメントごとに異なる。

セグメント 1 においては、川幅を数割広げても河床に働く掃流力が大きいので浮遊砂が河岸に堆積できない。自然河川であれば河岸侵食に伴う河道の側方移動に伴う河道平面形変化の中で人為的川幅拡大の影響は比較的早く解消されるが、護岸により側方移動が制限され、かつ河床を平坦に整齐してしまうと、砂州の再成に時間がかかるので、ある程度長い時間が川幅は維持される。川幅の縮小は、砂州の再成、植生の繁茂、浮遊砂の堆積、島の形成あるいは河岸形成というプロセスで進む。

セグメント 2-1 では河岸に浮遊砂が堆積する条件となるので比較的早く川幅は元に戻ってしまう。川内川 67～78km 区間は、掘削により旧河道より大きい川幅を持つ捷水路となった。この川はシルスの侵食物質が流送されることもあり、通水後河岸に図 2.3.26 のように浮遊砂が堆積し川幅が縮小し(この堆積には草本などの植生の生育が必要)、4 年で元の平均年最大流量時の u_*^2 の値に戻っている。セグメント 2-1 での川幅の人工的拡大は、浮遊砂の濃度にもよるがかなり速い時間(10 年オーダー)で川幅の縮小を生じさせる(山本ほか, 1993a)。

セグメント 2-2 では、同様に川幅の縮小が生じるが、平水流量でも河床材料の移動が生じる条件のあるところでは、砂州の移動により、また砂州頂高が低いので、水面に安定的に露出する河床面積が少なく河床に安定的な植生成長基盤が成立しにくい。浮遊砂のトラップ効率が悪くセグメント 2-1 ほど急速には川幅の縮小は生じないようである。

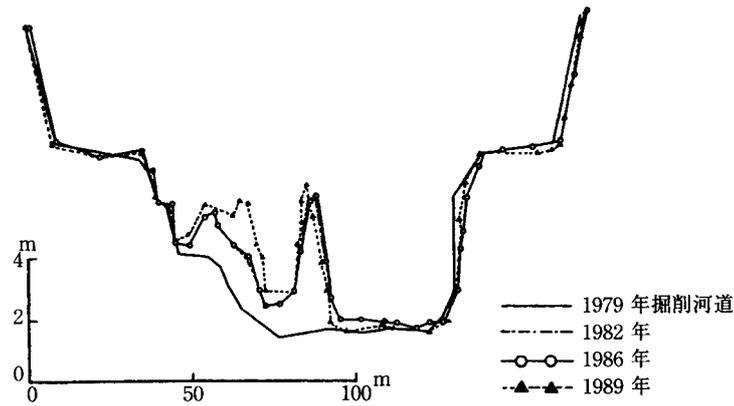


図 2.3.26 川内川 67.4 km 捷水路掘削後の横断形の変化 (山本ほか, 1998)

セグメント 3 に属する利根川 33km 付近では, 図 2.3.27 のように, 1975 年, 川幅を 244m から 460m に拡大した. 12 年後, 河積は減少したが, 川幅は維持された. ここでは河口堰により平水時にも比較的高い水位を保ち, 低水路河床が空中に露出することが無いので, 河床に植生が生育できず, 浮遊砂を河岸近くに堆積する条件が整わないのである. なお, ここでは河床材料の A 集団が中砂から細砂に変化した.

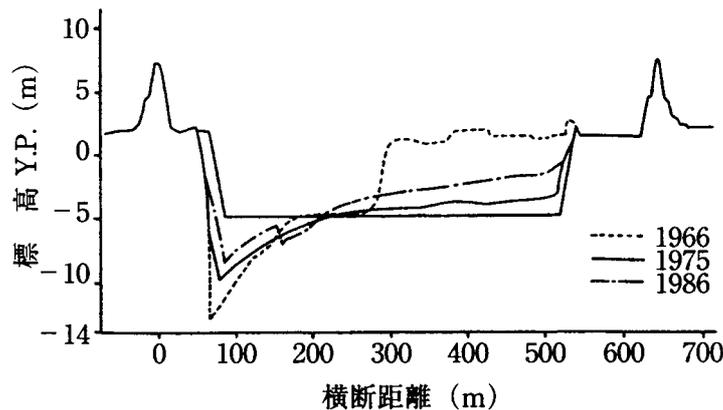


図 2.3.27 利根川 33.0 km の横断形状の変化

(5) 人為的川幅縮小

戦前に施工された水制の高さは, 低水位上 50cm 程度であり中出水でも水制上を流水が流れるので, 水制域の河床高は余り変化せず. また航路部の河床高も余り変化しなかった. 戦前水制を設置した利根川, 木曽川, 淀川のセグメント 2-2 の河道区間において, 戦後, 水制域外 (旧航路部) の河床を掘削により低下させたところ, 水制域の河床高が低水位以上になった区間に植生が進入し, 浮遊砂が堆積するようになり高水敷化が進み, 実質的に川幅が減少した. 平水時, 水制間の河床高が水面上に露出しない区間は, ワンド状の地形として残っている (淀川, 木曽川).

水制により縮小させた河道の河床高の変化は, 洪水が制御された川幅内だけ流れ, ある流量に対して流砂量の連続性が成立する動的平衡であるという想定のもとにおいて, 以下のように評価されている (山本, 1994).

川幅制御区間より上流の水深，川幅，河床勾配をそれぞれ H_0 ， B_0 ， I_0 ，制御区間の水深，川幅，河床勾配を H ， B ， I とすると

$$H/H_0 = (B/B_0)^{(1-p)/p} \quad \dots \dots \dots (2.3.7)$$

$$A/A_0 = (B/B_0)^{1/p} \quad \dots \dots \dots (2.3.8)$$

$$I/I_0 = (B/B_0)^{(p-3)/p} \quad \dots \dots \dots (2.3.9)$$

となる．ここで p は，摩擦速度 u_* と単位幅単位時間流砂量との関係式 $q_s = K \cdot u_*^p$ の係数 p である．上式は，制御区間とそうでない区間において，小規模河床波形態が変わらないものと仮定している．

B/B_0 と A/A_0 および H/H_0 の関係は，**図 2.3.28** のごとくなる．図中の河川データは水制により河川幅を狭めたものではなく，河口水深維持のため河口導流堤（一種の縦工）により川幅を狭めた場合の導流堤上流と導流堤間の水深と河積の関係を図示したものである（水深および河積は平均年最大流量時のものである．また河口導流堤先端の水深は 4m 以上であり，波による河口導流堤内への砂の持込のほとんど無い河川である）（山本，1978）．また図中には河口移動床模型実験のデータ，基礎実験のデータもプロットしてある．実河川の河床材料は中砂であり，この場合， $p=4$ とすればほぼ動的平衡河床高に近い河床高となる．

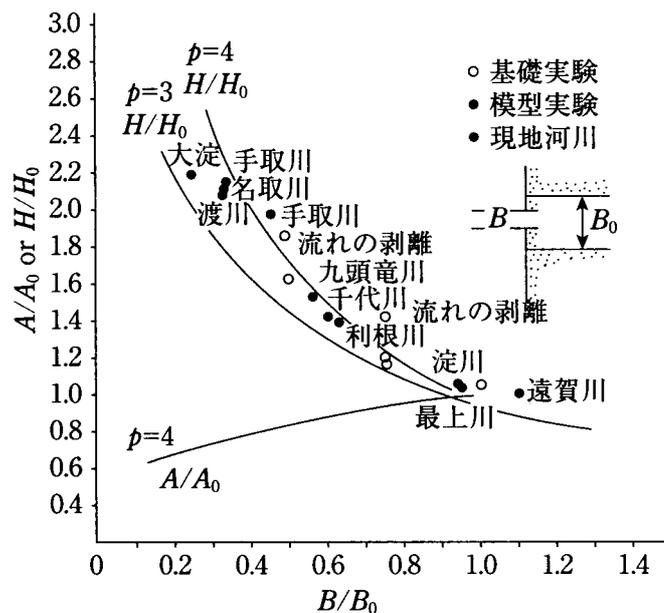


図 2.3.28 川幅の変化による水深河積の変化（山本，1978）

p の値は，細砂・中砂の河川で 3.5~4 程度，粗砂あるいは小礫の場合は 3 程度であろう．なぜならば，細砂・中砂小礫の河川では流砂量と u_* の関係は，小洪水では砂堆河床で p は 3 程度であるが，年最大流量程度で遷移河床となり p が 4~5 程度となるからである．粗砂あるいは小礫の場合は，大洪水でなければ砂堆河床であり p は 3 程度である．

$p=3$ の場合，式 (2.3.9) より，水制間の河床勾配は制御区間とそうでない区間で変わらないことになる．河床上昇を防ぐという目的のため水制および人為的高水敷化（水制高が低く，水制域に土砂がなかなか堆積しないので河床砂を水制間に投入）により低水路を縮小した斐伊川 2~8km

区間（河床勾配 1/1100, d_r が 2mm 程度）では、川幅制御区間（約 300m から 120m へ縮小）の河床勾配は、制御前とほとんど変ない。

セグメント 1 および 2-1 の河川では、1970 年代、河道整理と同時に高水敷利用の高度化（公園など）を目的に低水路幅を狭める計画とした河川があった。北海道の豊平川では、低水路を狭め河川の都市的利用を図った。河床低下の恐れがあるので床止め工を併用した。礫床河川では、川幅を狭めると流砂能力が増加するので上流から河床低下が進むが、アーマ化により低下が止まる。人工的に高水敷化したところで河岸高が低い場合には、洪水時に高水敷上を流れる流水により、植生や利用施設が破損、破壊された。

[2] 大洪水と河道の応答

2.3.3 において、河川の中規模スケールの地形は、動的平衡システムにあるという観点で記述説明した。しかしながら、大洪水が中規模スケールの河川地形を大きく変え、平衡系から大きな偏移を生じせしめる可能性がある。この偏移がどの程度であるかは、治水上のみならず河川生態系の変動特性（植生の分布特性、樹齢の分布特性、水生生物の時間変動）を把握するためにも、必要な情報である。

しかしながら、大規模な洪水により河川地形がどのように変化したかについての研究は、意識化された形でなされてきたとは言えず、一般化した情報として整理されていない。したがって治水計画論としても生態系の管理論としても理論として取り込まれていない。

ここでは、近年生じた大洪水による河道変化の調査研究成果を利用し、大洪水に対する河道の応答特性をセグメント毎に取りまとめる。

セグメント 2-1, 2-2, 3 については、2000 年 9 月洪水による庄内川の直轄河道区間（0~36km）の河道変化調査（2002, 山本）、および昭和 50 年代から平成 12 年にかけての利根川、鬼怒川、小貝川、多摩川などでの洪水後視察調査（写真撮影のみ）に基づきとりまとめる。セグメント M およびセグメント 1 については、平成 7 年洪水による関川と姫川の変化（高橋ほか、1996；新潟県土木部河川課、2001）、平成 10 年 8 月洪水による那珂川支川余笹川（伊藤ほか；2000；須賀ほか、2000）、昭和 44 年洪水における常願寺川と黒部川の変化に関する文献情報および洪水後視察調査などをもとに取りまとめる。

なお、ここではセグメントスケールの地形を変えてしまうような大火山爆発、地震などによる山地大崩壊などは検討の対象としない。また流域面積が 50km² 以下の山地溪流部、土石流扇状地を流れる河道なども検討の対象としない。

沖積河川の河岸満杯流量はセグメント 3 を除けば、概ね平均年最大流量に近い（河岸高は、河川の側方移動、氾濫原の土砂堆積速度、河床上昇速度の関数である）。平均年最大流量は、年第 1 位流量を平均化したもので、年確率で 1/2.3 年程度である。1/100 年確率洪水流量は、地域によって異なるが平均年最大流量の 5~10 倍程度である。この程度以上の洪水を大洪水といおう。可能性としてある洪水流量は十分な検討がなされていない。流域面積の小さいほど可能最大洪水流量と平均年最大流量との比は大きくなる。雨量観測点での日降雨量の観測実績からいえば（花籠、1973）、日本の小流域河川ではこの比が 3 程度になる可能性にあるが、流域面積 5000km² 以上の河川では 1.5 倍程度以下であろう。

セグメント M の河川で谷幅と河道幅がほぼ等しい狭窄部では、大洪水時の水深は平均年最大流量時の水深の 3 倍程度、谷幅が河道幅の 4~5 倍であれば 2~2.5 倍程度となろう。

谷幅が大きく開ける沖積地河川では、堤防がなければ氾濫してしまうのでセグメント M の河川ほどとはならず、せいぜい 1.5 倍程度であろう。堤防で洪水を閉じ込めてしまうと、河口付近を除き大洪水時の低水路部の水深は平均年最大流量時の 2~3 倍となる。

河床に働く掃流力は水深に比例するので、大洪水時の低水路部の平均掃流力は、平均年最大流量時の 1.5~3 倍に、氾濫原部は平均年最大流量時の低水路河床平均掃流力の 0.5~2 倍にもなる。ただし直轄河川では、1960 年代から 1970 年代にかけての河床掘削により低水路部が 2~3m 程度低下した河川では、可能性としてある大洪水時の氾濫原部（高水敷）の水深は以前より小さくなるので、0.5~1 倍程度であろう（河床掘削により掘り残された所が高水敷化されたところは除く）。このような大きな掃流力によって河道はどのように変化するのか、以下セグメント毎にとりまとめる。

(1) セグメント 1（ただし河床勾配 1/80 以下）

堤防が無ければ、大洪水時には洪水は流路から溢れ、扇面の低い所を流下する。表層の土層を侵食し、新しい流路となってしまうこともある。扇状地河川の堆積は河床勾配の変わるところで生じるので、セグメントおよび小セグメントの結節点で新流路が生じることが多い。扇頂より上流がセグメント M で河道幅が狭いと、川幅の広くなる所で土砂が解放され河床上昇し、そこから氾濫し易い。

堤防を築き流路を固定すると、堆積幅が狭くなるので河床上昇は自然状態より早くなる。扇端付近は河床上昇が早く天井川を形成する。大洪水時の扇頂部、扇中部の河床上昇量は、セグメント M 区間における粗粒物質の調整機能（粗粒物質は、山地部での供給の急増があっても、扇頂直上流のセグメントの流送能力しか扇状地に輸送されない）によりそれほど大きくない。先端部の河床上昇量は、黒部川および常願寺川の昭和 44 年洪水（平均年最大流量の約 4 倍のピーク流量）において川幅平均で約 0.8m 程度であった。なお、常願寺川では、この洪水により扇頂、扇中部は多少侵食し、黒部川では、扇頂部（11~13km）が侵食し、その下流の川幅の広い所（7~11km）に縦断方向 1km 平均値で 0.1~0.25m ほど堆積した。

大洪水時の川幅水深比は年最大流量時の 1/2~1/3 であるので、砂州は統合されスケールの大きな砂州となろうとするが洪水時間が長くないので砂州の統合化と拡大は、通常河道が湾曲しているようなところを除けば生じないようである。

洪水による河岸侵食量は砂州の発達と移動によって生じる。今までの観測によると 100m 程度の河岸侵食の例がある。大洪水時には高水敷に流水が乗りその流速が速いので高水敷侵食が生じる。人為的に高水敷を造成し、その河岸高が平均年最大流量程度の水位相当であり、かつ樹林でなければ、大洪水時には侵食破壊され河原状となる。

低水路部分に生育している草本、柳などは倒伏流出する。高水敷化されたところに生える樹木は、河岸侵食が生じると根が浚われ流出する。また河岸侵食がなくても高水敷上の流速が速いので倒伏・流出する可能性がある。倒伏・流出するかは、高水敷の高さ、代表粒径により異なる。高水敷上の流速が 3m/s を超えると、細砂・シルトからなる表層材料は侵食され、樹木回りが洗掘され倒伏する可能性が高くなる。代表粒径が 2~3cm 程度である場合は、大洪水時の低水路の平均

流速が 3~4m/s 程度であるので、高水敷に樹木が群生していれば洪水流に耐えられよう。

以上総括するとセグメント 1 においては、大洪水による河道幅の変化が大きく、河道変化に対する洪水流量時系列の影響分析、すなわち動的平衡系として河道変化を捉えるだけでは的確な河道変化の予測ができず、大洪水というイベントの影響評価を必要としよう。

(2) セグメント 2-1

大洪水時には、河床に砂堆が発生し洪水流量の大きさにもかかわらず低水路部分の平均流速は 2.5~4m/s 程度である。蛇行河川であれば洪水時水衝部の河床高は低下するので河岸が崩壊する。崩壊の幅はそれほど大きくなく河岸高の 2~5 倍程度である。蛇行河川であれば両岸が侵食されることはほとんどない。ただし平均年最大流量時の川幅水深比が 60 を超えると砂州が複列的配置となるため、濬筋が 2 列となり両岸侵食されることがある。そのようなところでは川幅が前後より広い。

自然河道であれば侵食部は崖状となり河岸の樹木は根本をすくわれ倒伏流出する。人為的に河岸を固定し河岸崩壊が発生しないようにすれば樹木は倒伏することはあっても何とか流水に耐えられる（であるからこそ水防林で洪水に対処した歴史がある）。ただし樹林が孤立したような所では樹林の先頭部周辺の河床が洗掘され樹木が倒伏する。また竹は群生する竹林の周辺は折れたり倒伏したりする。草本類は倒伏してしまうが表層材料が侵食されない限り破壊されない。樹林でないと高水敷上の流速が 3m/s 程度となるので、裸地、畑地などでは侵食される。低水路部の柳は倒伏し、流出する。

ポイントバーの上流側は侵食され、中央から下流にかけては堆積傾向となる。そこでは上流から下流方向にまた河岸方向に粒径が小さくなる。中砂が堆積することもある。また流水が乗り上げ高水敷上を走る（樹林がない場合）と細砂・中砂を広い範囲に薄く堆積させる。

河床高は、ダムがなければセグメント 2-1 の A 集団の供給土砂量が急増するので上昇するのが一般的である。セグメントの長さが短いほどこの急変の影響を受け易い。常願寺川 0~5km では（河床勾配 1/800、河床材料は 4~5cm の砂利と中砂の混合物であり、中砂の供給が多いと中砂の割合が増加し、平常時には河口近くを除き砂利となる。この洪水では中砂が増加）、1969 年洪水（平均年最大流量 700m/s の約 3 倍のピーク流量）において平均 0.3~0.4m 程度上昇した。

大洪水においても河道が大きく変わるとことはない。ただし従来の河床（砂州の頂部付近が草地化し高水敷化しつつある所、あるいはポイントバーを人為的に整齊し高水敷化した所は、大洪水時にその上流部が侵食され、その中下流部に砂利や中砂の堆積が生じ、砂利州が回復する。

河岸が侵食された対岸にはその後堆積が生じ 10 年スケールのオーダーで動的平衡状態に戻る。

以上総括するとセグメント 2-1 においては、大洪水による河道幅の変化は小さくなく、また川幅の回復も速いので、年最大流量の変化に追従する動的平衡系として河道変化評価することができよう。

(3) セグメント 2-2

河床材料の A 集団粒径が 2mm 以下では、大洪水時河床がフラットとなり低水路部分の流速が 3~4m/s にもなる。しかしながら河岸斜面に生えた柳・竹などは、群生し、かつ河岸の根元が侵食されなければほとんど倒伏しない。ただし一本立ちだと倒伏する。河岸近くの草本類は倒伏する

が破壊されない。

水衝部では河床低下により河岸が崩れ侵食されるが、せいぜい河岸高の2~3倍程度である。高水敷は植生が生育していれば侵食されない。むしろ流水の高水敷への乗り上げ部に細砂・中砂を河畔堆積物(20~30cmにも達することあり)として堆積する。その背後には細砂混じりのシルトが堆積(10~20cmにも達することあり)する。

平均年最大流量時の川幅水深比が50以上の直線状の河川では、低水路川幅水深比が小さくなるので小出水に対応してできた砂州が統合され、大きな砂州となるので河床の凹凸は大きくなる。ただし川幅水深比の小さい河川(平均年最大流量時の川幅水深比が40程度以下)では砂州が消滅の方向に向かうので横断方向の凹凸は小さくなる。蛇行河川では大洪水ほど流水が直進し、深掘れ部が少し下流へ移動する。

セグメント2-2が直接海に接する場合は、河口部の水面勾配が急になり河口付近の河床は低下する。一般に、破堤しなければ河道が大きく変わるということはない。すなわち、大洪水による河道の変化は小さくなく、年最大流量の変化に追従する動的平衡系として河道変化を評価することができよう。

(4) セグメント3

大洪水時においては、河床材料のA集団は浮遊砂となるが河岸近くに薄く堆積する程度であり、氾濫原(高水敷)の植生(葦、真菰)は河岸近くを除けば倒伏しない。氾濫原には細砂混じりシルトが堆積する。低水路幅の大きな変化は生じない。上流のセグメントでワッシュロードとして運ばれて来る細粒物質は急増するが、一方で細粒物質の流送能力も急増するので、河床が上昇するか低下するかは上流からの供給量と流送能力の差異による。

大洪水においても河道の変化は少ない。すなわち、大洪水による河道の変化は小さくなく、年最大流量の変化に追従する動的平衡系として河道変化を評価することができよう。

2.4 河川流量変動と流送土砂の変化に対する河川生態系の応答

2.4.1 河川生態系の構成要素と空間・時間スケール

現存する河川生態系は、以下に示す物理・化学系、生物系、人間系という3つの系の統合体と見なされる。

物理・化学系：境界としての地形、構成物質(表層材料)、流量(水位)、粒径集団別土砂量、栄養塩量(窒素、磷、炭素、その他)、エネルギー(光、熱など)

生物系：植生、陸生動物、水生生物(魚、昆虫など)、微生物(動・植物プランクトン、細菌など)

人間系：河川流域における意識的および無意識的生産・消費活動(物理・化学系、生物系への働きかけ)とその生産・消費物

3つの系は独立系ではなく相互依存系であるが、生物系は他の2つの系に対する従属的性格が強い。なお河川工学および応用生態工学としては、人間系と他の二つの系との相互作用(流域開発史、河川技術史)については、それを直接的相互作用として捉えるのではなく、物理・化学系および生物系にとってインパクト要因(働きかけ)として位置付けるのが妥当である。

自然的攪乱・人為的インパクトという外乱が、河川生態系に変化として現れる時間・空間スケール

ールには種々のものがある。空間スケールが異なれば、その現象の表現様式（認識のための概念枠）と時間単位は異なるものである。空間スケールの異なる階層構造からなるものとし、その階層ごとに、また同一階層における生物分類ごとに自然的攪乱と人為的インパクトに対する応答特性とその階層系として現れる平均的表現型（応答として現れる標準的な生物の空間分布型）を記載整理していくと種々の情報の見通しが良くなり、生態系構成要素とそれを変化させる自然的攪乱・人為的インパクト要因との関係がわかり易くなる。

河川生態系空間を、流域スケール、大セグメントスケール、リーチスケール（砂州長、蛇行波長スケール）、水深スケール（砂堆、反砂堆）、礫径スケール（巨石、礫）、砂径スケールの6階層程度の空間階層性をもつものとして階層化することが必要であろう。有機物の分解に関わる細菌類まで河川生態系を認識する枠組みの入れれば、シルトスケールを空間階層に加える必要がある。なお河川生態系を構成する生物種ごとに空間スケールのターミノロジーは異なっている。魚類生態学では、セグメント相当の上・中・下流、瀬・淵構造スケールのリーチが、昆虫生態学では、これの加えて礫径スケールが空間階層性として取られることが多い。桜井（1995）は生物の棲み場所の観点から、海や他流域を含む流域を越えたスケール（渡り鳥、回遊魚などを対象）であるビオトープネットワーク、流域スケールである大生息場所（ビオトープシステム）、リーチスケールである生息場所（ビオトープ）、水深スケールである小生息場（ハビタット）、礫径スケールの微生物生息場所（マイクロハビタット）、砂スケールである超微生物生息場所（スーパー・マイクロハビタット）の6階層区分を提示している。

これらを統一した表現とするのは、現状では無理であり生態系構成要素ごとに慣用として使われているターミノロジーを、しばらくはそのまま使用せざるを得まい。

ところで自然的攪乱・人為的インパクトにより現れる現象が変化として認知しえる時間の長さは、空間スケールと強い関連性がある。空間スケールが大きくなるほど変化として現れるのに時間がかかるからである。河川生態系を捉えるには、河道地形と同様に、河川生態系（システムの構造体）を空間スケールで階層化し、その特性を共時態（地理的空間特性）として把握し、通時態（変動特性）は共時態の構造変動として捉えていくのが好ましい。

2.4.2 河川生態系を規定する支配要因

2.3.1 で記したように、上位の階層構造は、より上位の階層から流れてくる構造を規定する情報により動かされ、かつ下位の階層構造変化の集積により偏移して行く。すなわち、総体としての構造（システム）は、ある階層の主要因子に及ぼす上位および下位の階層の情報との関連性を把握分析し、つながりを明らかにしなければならない。河川生態系は、部分が全体に規制され、全体が部分のシステムの総合体である一種の有機体とアナロジーされるのである。

ダム の 築 造 という インパクト を 考 え れ ば 、 インパクト による 流況 と 土砂 の 変化 を 入力 条件 と し 、 それ による 河道 内 砂州 ・ 横断 形状 の 変化 を 媒介 と し て 植生 や 魚類 層 の 変化 を セグメント ある い は リーチ の 空間 スケール で 記述 し て いく こと に なろ う 。

2.4.3 河川流量変動と流送土砂の変化に対する河川生態系応答特性の捉え方

自然的攪乱・人為的インパクトに対する河川生態系の応答特性を把握するには、まず、各空間

スケールでの生態系構成要素ごとに、以下のような情報が求められる。

- ・場の特性と生物相の関係：生物生育場の特性と生育生物種
- ・攪乱限界外力・水質：攪乱を生じせしめる限界外力・水質を明確にする。例えば外力として玉石移動限界流速，藻剥離限界流速，樹木倒壊流速などであり，水質としては，生物の行動と生活を変える限界水温，pH，濁度などである。
- ・攪乱後の応答速度：攪乱に対する復元速度（大洪水後の付着藻類・水生昆虫・魚類の復元速度），植生景観遷移速度などである。
- ・攪乱時の生物の応答：回避行動，植物の破損・破壊形態などである。

これらの情報により，自然的攪乱・人為的インパクト後の生物相・景観の遷移プロセスを河道地形の変化を媒介とすることにより概略描き出すことができる(藤田ほか，2003)。

人為的インパクト後の生態系の変化をより定量的(時間項を含む)に描き出すためには，河川縦断方向に河川空間を空間区分し，各区分空間(コンパートメント)の境界を通じた物質の出入りを，洪水時，月平均および年平均の物質収支として縦断方向に繋ぐことが必要である。具体的には，単位空間スケール内での物質の変換過程を取り込んだ物質収支を把握し，河川の上流から海までの物質の流れ量を表出する。しかしながら，河川という移流場では閉鎖系(湖沼)より時間変動性が強いこと，移流量を評価しなければならないことより，量的把握が困難であり，漸く実態把握が始まった段階にある。まずは小セグメントに空間区分し，区分線を境界として物質収支を評価していくことから始めなければなるまい。河川生態系にとって重要な河川流送物質に関する情報が不足しているので，すべての物質について収支図を描けないが，水量については作図可能であり，土砂については粒径別流送土砂量を土砂動態マップとして河川に沿って描かれた(藤田ほか，1999；建設省河川局治水課ほか，2000；海野ほか，2004)。BOD，窒素などの水質項目についても描く試みがなされている(河川生態学術研究会千曲川グループ，2002)。なお物質収支図を描くには，当然，生態系構成生物が物質の量と質の変化に及ぼす作用，物質の沈降・堆積・溶出・拡散に及ぼす水と土砂の影響，さらには物理・化学過程における各要素間の相互作用に関する情報が必要であり，この情報を得るための観測と理論化が求められる。

河川生態学において「河川連続体仮説」が提案され，縦断方向に生態的特長の異なった区間分けができ，それが物質を媒介として上流から下流に連続していることが指摘されている。洪水時および年平均的な時間スケールにおいて「単位空間スケール内での物質の変換過程を取り込んだ物質収支を把握し，河川の上流から海までの物質の流れ量を表出する」ことが河川生態系の理解のため，また流域管理という技術行為のために必要なのである。

ところである空間階層内での物流を通じた物質収支を評価するには，生物による相互作用による食物連鎖に関する知見が必要である。生態学ではこれを食物網(生食物連鎖と腐食食物連鎖)として，例えば生食物連鎖においては，緑食植物を1次栄養段階，これを食べる捕食者を2次栄養段階，捕食者を食する肉食者を3次栄養段階，肉食者を食う肉食者を4次栄養段階としており，生態系を垂直方向のイメージで階層構造として捉えている。これは生物の生き残り(行動)戦略(生活史，動物行動学，動植物の空間配置形態)を理解するために必要な構造化である(この食物連鎖の階層構造には直接的には前述してきた空間階層性の概念は含まれていない)。

河川生態系を認知化(科学化)するとは，2つの性質の異なる階層構造における階層境界面で

の物質の流れ（情報）の量・質の変化（ディスタバンスとストレス）による階層内構造の変移を明らかにすることにあるといえよう。

上述したように、空間階層間の情報のやり取りを記載記述できるようにしていくことが必要であるが、現実には、河川生態系を構成する要素間の相互連関性の実態把握も理論化も十分なされていないとはいえず、漸く意識的に総合研究が始められた段階といえる（⇒注4）。

2.4.4 河道特性としての植生

河川およびその近傍に生える植生は、洪水という攪乱を受け、これに耐えられる植生が生き残り河川植生という独自の植物景観を形づくる。河川周辺の環境は、植物の生育環境として他の陸上の環境とは明らかに異なった性質を有している。それは時々起こる冠水と通常の著しい乾燥という水分条件の両極端にまたがる状態を交互に繰り返すことや、時には生育基盤である表土が洪水により破壊されるということに代表される。そればかりでなく水湿地から乾燥地までの環境傾度に従った植生立地を見出すことができる。それは川の横断方向に見ていった場合にも、縦断方向に見ていった場合にも見出される。

河川微地形さらには河床材料、氾濫原土壌、氾濫原表層土壌水分は、セグメントごとになるので、河川生態系の一般的特性を河川水質とセグメントにより分類・記述可能である。すなわち、セグメントは河川生態系の河川縦断方向空間区分（空間方向の変化）として適用しえるのである。

こうした環境上の特殊性は、そこに生育する植生の状態（群落組成、生活型、相観等）を規定し、逆に植生の状態からその立地の環境条件を推定できることを示している。つまり河川敷に生育する植生の状態は、その場所の環境条件の指標となり得るのである。

河道特性として植生を記載するには、まず植生地理学としての植生の空間配置と植生を取り巻く環境要素との関係を明示することから始めるべきである（⇒注5）。

[1] 河川区域内の環境区分

植生の生育環境区分として大きな空間スケールから順に以下のように区分する。

第1に、気候区分を取るべきであろう。気候が異なるとに日照、気温、降雨の特性が異なり、生育する植生が異なるからである（河川上流域では高度上昇による温度低下があり、高度を副次的環境区分として加える必要がる）。

第2に、河道の縦断方向の環境区分を表すものとして、小セグメント区分を取るべきである。同一小セグメント内では、河床材料、表層材料・土壌、河道の種々のスケール、洪水時の流速（攪乱外力）がほぼ同様であり、植生景観が似たものとなるからである。

第3に、河道横断方向の環境区分を表すものとして、水際部、河岸侵食部（裸地）、河岸堆積部（植生被覆地）、河岸肩部、自然堤防部（河畔堆積部を含む）、後背湿地部、旧河道跡低地部、三日月湖部、旧扇状地の滲筋跡部、などの地形による区分を取るべきであろう。なお高水敷部は、人為作用の影響を受けたところが多く、それに応じた群落種となるので人為地形部（堤防、ゴルフ場、水田、畑、牧草地、グラウンドなど）に区分する。ところで日本の河川高水敷は人為的改変とコントロールを受けている。氾濫原を含めた潜在自然河川は北海道を除けば見ることができない。人為を受けた植生景観の調査が必要である。

人為作用の影響については、次の3つの形態を考える必要がある。

1 つは、高水敷上をある目的のために、ある特定植物種を人為的に育成する場合である。例えば、水防林としての竹類・クスノキ、水田としてのイネ、畑地としてのクワ・ナガイモ・ゴボウ、牧草、公園、ゴルフ場としての芝などである。この場合セグメントごとに生育しえる植生種が河道特性として表現されることになる。

2 つは、直接的人為作用の強さである。野焼き、草刈りである。野焼きはヨシあるいは牧草生育条件の改善のため行われていた所が多かったが、近年ダイオキシンの発生に対する恐れから禁止されほとんど行われなくなった。草刈りは高水敷利用の増進のため増加の傾向にある。この場合、人為的制御因子の指標としては草刈り回数と時期が上げられる。例えば堤防における芝群落は、放置すると長茎の植物との競争において光の奪い合いに負け衰退していく。芝群落として維持していくには年4回以上の草刈りが必要であり、年2回程度ではチガヤ群落の、年1回程度ではススキ群落に遷移してしまう。

3 つは、間接的人為的作用による地形および位況の変化による生育基盤条件の変化である。近年礫床河道区間では樹林化が進行して礫床面積が低減している事例が増加している。これには供給土砂量の減少、洪水流量の減少、河道掘削などが関係している(辻本, 1993; 茅場ほか, 1995; 藤田ほか, 2003)。

工学的には河川域の植生種の制御が目的となるので、制御因子としての水位(地下水位)を表すような物理的な指標を付加する必要がある。植生の生育条件としては、平水時の水位と洪水時の水位(土壌特性の指標でもある)が大きな要素であるので、位況図より、冠水頻度 D_i 日の水位(年間の平均的な日単位で示した位況図より求めた D_i 日相当水位)と洪水時冠水 Y_i 年の水位を河道横断方向の区分を定める水位とするとよい。 D_i 、 Y_i は、植生群落種と D_i 、 Y_i との関係を実証的に調べて適切なものとする必要がある。

工学的視点からの環境区分としては以上で十分と考えるが、植生のに関する情報の利用目的により必要であれば再区分を行う。環境区分の通時的変化は基盤条件を規定する流水と土砂による地形変化により評価する。

[2] 環境区分と植生配置

植生の配置、種については、河川水辺の国勢調査(⇒注4)などにより河道内の植生図および植生種リストが作成されている。これらの情報により環境区分と植生配置の関係性についての知見の増大が図られつつある(石川, 1996)。

第一の環境区分である気候区分と植生群落については、暖かさ指数(各月平均気温の値からそれぞれ 5°C を引き、平均気温が 5°C 以下の月は0とする。その年間総和をいう)や寒さの指数(月平均気温 5°C 以下の月だけについて、 5°C から月平均気温の値を引き、その総和をいう)

を用いて区分する(吉良, 1949)。照葉樹林帯と落葉広葉樹林帯との区分は、暖かさ指標でおよそ 85 度、落葉広葉樹林帯と針葉樹林帯との区分は、およそ $45\sim 55$ 度といわれている(沼田ほか, 2002)。まず既存の研究成果に基づく日本の植生帯図により区分し、区分された空間ごとに河川植生種の違いを記述・分析・整理することがなされなければならぬ。

第二の環境区分については、河川域で見られる優先種を取り出し、それがどのセグメントで多いか明らかにする。

図 2.4.1 は猶原（1945）が関東を流れる荒川の河川域植生種縦断方向変化を模式図として示したものである。数量的に示したものでなく感覚的なものであるが、セグメントごとにどのような植生種が生育するのか分かり易い。さらにこれに第三の環境区分である横断方向の環境区分、例えば、水際、河岸斜面部、河岸肩部、自然堤防、旧河道、後背湿地、旧砂州濬筋部、などの地形区分、人為地形区分ごとに整理すれば、より利用し易いものとなる。このような作業により気候区分毎に各セグメントの代表種や群落構成が特徴付けられよう。

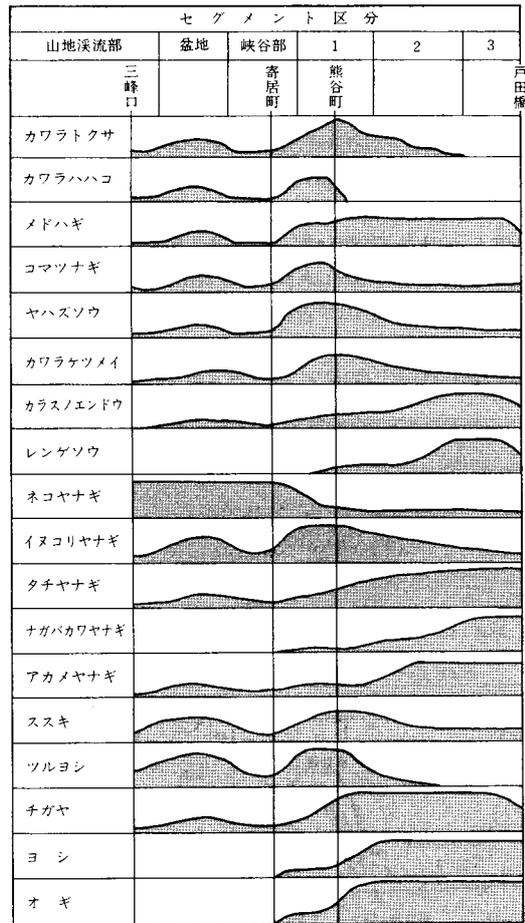


図 2.4.1 荒川河川植物の縦断方向変化（猶原，1945 に加筆）

第三の環境区分としては、前述した地形区分が分かり易いが、これに加えて水位の発生頻度を環境区分情報として付加する場合は、次の調査例が参考となる。

山本ほか（1993b）は、1991年から1992年にかけて1年間、河道景観が季節ごとにどのように変化するのか、また植生配置と土砂の堆積の関係を明らかにするために、鬼怒川と利根川下流部で調査を行っている。調査地点はセグメントの違いによる河道景観の差異を明らかにするため、セグメントごとに2~3箇所選んだ。セグメントに見られる特徴を河道横断方向の環境区分の観点から整理すると以下のようなものである（山本ほか，1993b；宇多ほか，1994）。

(1) セグメント1 (鬼怒川 55.0km, 96.0km 地点)

鬼怒川 96.0km 地点(写真 2.4.1)は, 河床勾配 $I_b=1/200$, 代表粒径 $d_r=10\sim 20\text{cm}$ の河道であり, 55.0km は, 河床勾配 $I_b=1/550$, 代表粒径 $d_r=3\sim 4\text{cm}$ の河道である.



写真 2.4.1 鬼怒川 96.25 km 地点上流の様子 (1993 年 9 月 28 日)

扇状地の植生は, 図 2.4.2 に示すように砂州上の植生 (扇状地 A 植生), 常水路河岸 (河岸斜面部) の植生 (扇状地 B 植生), 高水敷化した所の植生 (扇状地 C 植生) に分けられる. なお図 2.4.2 中に示す位況図の方法 1 は不等流計算によって水位を求めたものであり, 方法 2 は直近の水位観測所データより推定したものである. 図中の横断面の縦軸は Y.P.m, 横軸は m である (以下同様).

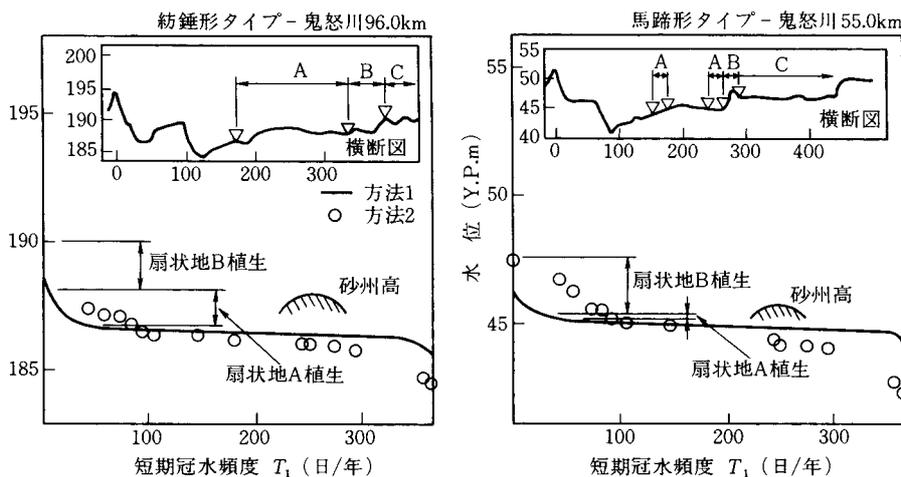


図 2.4.2 冠水頻度と植生の関係 (鬼怒川 55.0 km, 96.0 地点) (山本ほか, 1993)

①砂州上の植生 (扇状地 A 植生)

砂州上の植生の平面分布型は, 大きく分けて図 2.4.3 に示す馬蹄形タイプ (砂州周辺部のみに主に植生が繁茂する) と紡錘形タイプの 2 種類に分けられる. 一般に流水による植生のフラッシュ (破壊) がなければ, 砂州上の植生の平面分布は, 植生無し→馬蹄形タイプ→紡錘形タイプへと遷移すると考えられる. 常水路の河床が低下して相対的に砂州頂高が上昇する, あるいは大きな洪水がないと標高の高い砂州頂部付近での流速が大きくなり, 河原植生が破壊されないような場合に上記の発達が促進される. 植生が破壊されない期間が長いと浮遊砂が植生によりトラップされ土層が形成され樹木を伴う島状の地形となっていく.

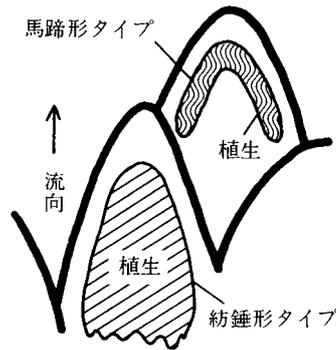


図 2.4.3 扇状地における砂州上の植生繁茂形態（馬蹄タイプと紡錘形タイプ）

馬蹄形タイプの砂州上の植生としては、ツルヨシが最も多く、ネコヤナギ、ヨモギ、スズナ、ネコヤナギなども見られる。紡錘形タイプの場合には、その他にカワラヨモギ、カワラサイコなどもあり植生繁茂がより進んでいる。

②常水路河岸部の植生（扇状地 B 植生）

ここでいう河岸は崖垂状の河岸侵食部ではなく高水敷化が進み安定化した砂州部にあたるものである。植生はツルヨシやヤナギなどの灌木類からなり、出水期には多くの砂が堆積する。

③高水敷化した所の植生（扇状地 C 植生）

扇状地 C 植生は冠水頻度 5 年確率以上の場所に繁茂する。調査地点では冠水頻度が小さいにもかかわらず低木がなくススキ原となっている。これは調査地点付近で毎年冬の火入れが行なわれているためと考えられる。

(2) セグメント 2-2（鬼怒川 16.5km, 32.0km）

本区間は河床勾配 $I_b=1/2000$ ，河床材料は 0.5mm 程度の中砂からなる（写真 2.4.2）。また所々に更新統の堆積物が河床の露出している。図 2.4.4 に示すように、河岸は横断勾配が急で、また高水敷までの間に平坦面（テラス）を持つ。



写真 2.4.2 鬼怒川 31.7 km 地点の右岸の様子（1993 年 9 月 28 日）

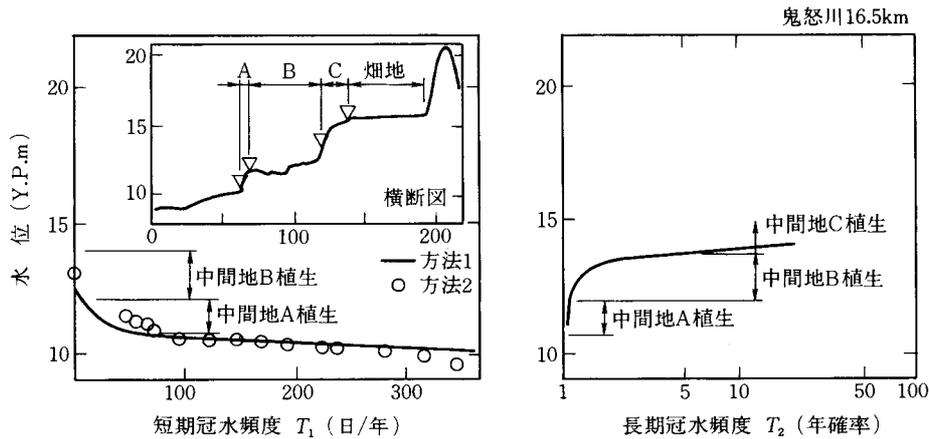


図 2.4.4 冠水頻度植生の関係 (鬼怒川 16.5 km 地点) (山本ほか, 1963)

ここでの植生は、大きく中間地 A 植生 (オオクサキビ, ヤナギタデ, オギ, クサヨシなど), 中間地 B 植生 (ギシギシ, オギ, セリ, クサヨシ, カワラメドハギなど), 中間地 C 植生 (メダケ, タチヤナギなど) の三つに分けられる. 高水敷上は畑地に利用されている. 中間地 A, B, C の冠水頻度は, それぞれ約 10~90 日/年, 約 0~10 日/年, 5 年に一回である. 中間地 A, B 植生の繁茂する場所では横断方向に激しい凹凸があり, その高さに応じて細砂, シルトが筋状に分級堆積している.

(3) セグメント 3 (利根川 6.0km, 20.0km, 27.0km)

本区間の河床勾配は, 多少逆勾配であり, 河床材料は 0.015mm 程度の細砂あるいは細砂混じりのシルトである. 平常時の水位は潮位の影響を受ける. ただし 18.5km 地点に利根川河口堰があり, それより上流の 27.0km 地点は平常時の水位はほぼ一定である.

図 2.4.5 に示すように高水敷の横断勾配が小さく, 冠水頻度の横断方向変化率が少ないため 1 つの植生群落の横断方向占有幅が広い. そこの植生は, デルタ A 植生 (ヨシ, マコモ, オギ, ネコヤナギなど) とデルタ B 植生 (セイタカアワダチソウ, ギシギシなど) に分けられる. 水際より似見られるのはデルタ A 植生であり, 高水敷の造成などで冠水頻度の低下した場所にデルタ B 植生が見られる (写真 2.4.3).

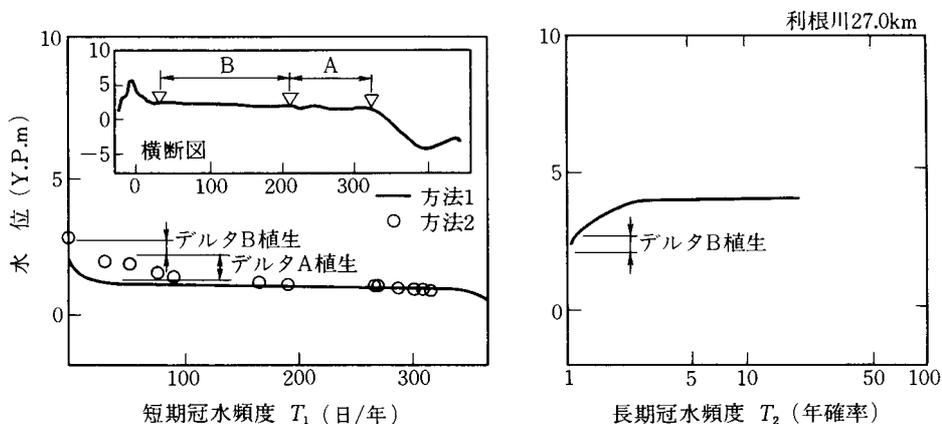


図 2.4.5 冠水頻度と植生の関係 (利根川 27.0 km地点) (山本ほか, 1963)



写真 2.4.3 利根川 27.2 km 地点左岸の様子 (1991 年 8 月 11 日)

各セグメントの位況図を見ると、どの位況図も図 2.4.6 に示すような 2 つの明確な勾配変化点 (K, J) を持っている。ここで J 点より低い部分は概ね 350 日以上水中に没し、K 点より上部では冠水頻度が年 50 日程度以下となる。K, J 点の水位差は 1m 以下であり、水位が K, J 点間の狭い範囲に位置する期間が年間の大半を占めること示している。位況曲線と植生繁茂領域との関係を整理すると、どのセグメントとも A 植生の生育下限高さは K 点近くにある。K 点より低い水位の出現頻度が急増することから、植生繁茂領域の下限が一定以上の期間の水没に耐えられない植生の限界値を示すものと考えられる。ただし利根川 27.0km 地点の場合には K 点の少し下までヨシが繁茂している。ヨシは水面下 50cm 程度の水没に耐えられるのである。植生の種類によりその下限位置と K 点の関係は少しずれる (⇒注 6)。

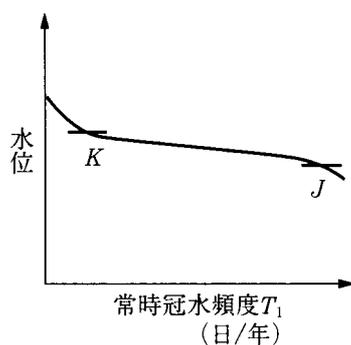


図 2.4.6 短期冠水頻度の急変点

低水路内に K 点より高い河床部分が存在するところでは、その草本植生が繁茂する可能性があることを意味する。植生による土砂トラップによる土砂堆積はその高水敷化につながる可能性があり、逆に洪水により裸地化の可能性のあるところでもある。K 点水位は低水路川幅の変化や河道景観の変化を支配する重要な要素といえる。なお K 点水位と豊水流量 (年に 95 日は下回らない流量) 時水位との差は 10~20cm であるので、既存水文資料の整備状況を考えると豊水流量相当水位 M 点を河床および河岸の生育する植生条件を規定する水位としたほうが良いかもしれない。

木本類や高水敷上の植物相を分類する指標水位としては、適当な冠水頻度 Y_1 、たとえば 2、10 年確率洪水流量相当水位を取ればよい。

[3] 植生と自然的攪乱

一般にある程度湿った裸地ができると、植生は一年生草本→多年生草本→低木 (陽樹) →高木

へと遷移する。しかし河川では洪水という攪乱があり、このときの流速と冠水時間が植生を破壊あるいは死滅させてしまう条件にあると、遷移が進まず元に戻る。ここではセグメントごとに洪水と植生の関係を記す。

(1) セグメント1

扇状地河川では出水がないとツルヨシ等の草本類やイヌコロヤナギ、カワヤナギが水分の多い水際付近に、オギ、ススキなどの草本類、アキグミなどの木本類が砂州上に生育する。これらの植生は中出水により破壊され元の河原に戻るというサイクルを繰り返している。

ダムなどにより流送土砂量が減少し滞筋の河床低下が進んだ所や洪水流量が減少した所では、冠水頻度が減少し、小種出水で冠水する礫床にマトリック材として細砂・シルトが侵入や砂州頂部付近への小礫・中砂の堆積を通じて草本類が侵入し、草本類との相互作用によりさらに細かい細砂・シルト層が形成され、ハリエンジュ、オニグルミなどの木本類が育ち島状・高水敷化が進み、中洪水でも破壊されなくなる。図 2.4.7 は多摩川永田地区 (51~53km, $I_b=1/220$, $d_m=35\text{mm}$ 程度の河道で、左岸側に滞筋が生じ、右岸側は高水敷化した) における安定な植生域拡大のプロセスを示したものである (季ほか, 1999)。なお図中のタイプ型は表 2.4.1 のとおりである。

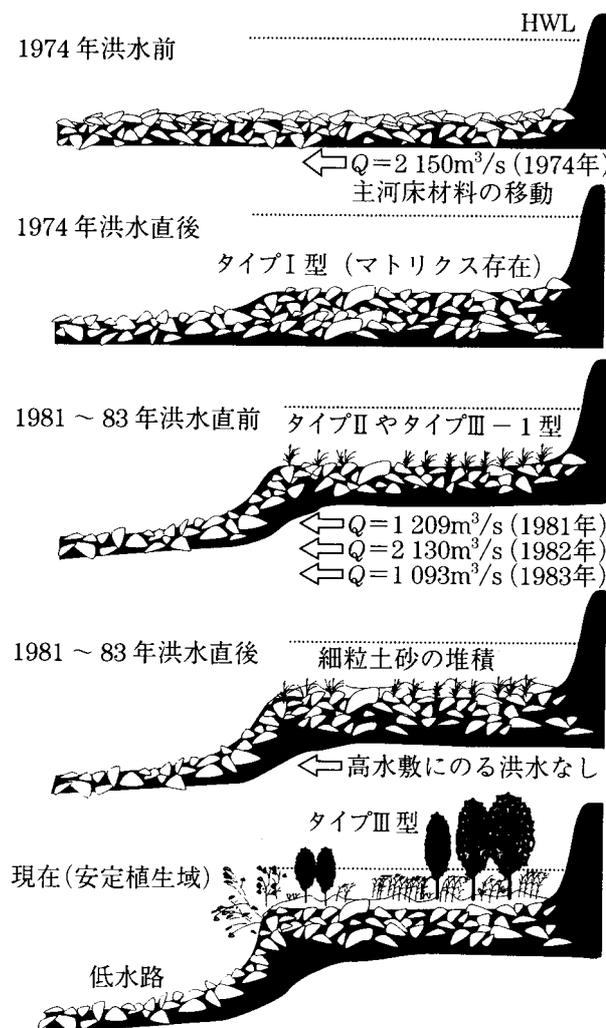


図 2.4.7 安定な植生域の拡大のイメージ (季ほか, 1999)

表 2.4.1 比高一堆積厚座標を用いた植物群落のタイプ型 (藤田ほか, 2003)

I 型	裸地およびカラ ラノギク、コセ ンダングサを優 占種とする群落 が該当	比高によらず、ほとんどの場所では、堆積厚 0 である。一部薄い (10 cm 程度以下) 表層細粒土層厚を持つ場合がある。
II 型	ツルヨシ、イヌ コリヤナギ群落 が該当	二つの離れた存在領域を持つ、すなわち、堆積厚 0 で比高が 30 cm 以下の場所と、堆積厚 10 cm 程度以上で比高が概ね 50~100 cm 以下の場所に分布する。
III 型	ススキ・オギ・ オオブタクサ・ ハリエンジュ群 落が該当	堆積厚 0 の場合に存在しない (ただしススキは堆積厚ほぼ 0 の場所にも存在しうる可能性がある)。比高 0 および 0 近くの場所には存在しない。堆積厚数 cm 以上、比高 50 cm 程度以上の場所に幅広く分布する。 ----- ススキを III-1 型、それ以外を III-2 型と細分することはできそうである。この場合は、III-1 型は、低比高に存在せず (150 cm 程度以上)、堆積厚が薄い (10 cm 前後が多い; 0 でも繁茂不可能でない可能性も) ことが特徴となる。

草本類の破壊は、基盤である礫層が移動し成育基盤が破壊される、表層のシルト混じりの細砂層が草本の根と一緒に捲くれ上がる、あるいはブロック状に破壊されることにより流出してしまう、移動してきたれ砂・礫に完全に埋もれてしまうような場合に生じる。そうでない場合は、多少埋まっても、倒れ葉がちぎれても、生き残る。

ヤナギ類、ハリエンジュなどの樹木は流水の流体力により倒伏しても萌芽により再生する。流出は河岸侵食により根こそぎ流されるもの、速い流速により倒伏し基盤が破壊され根鉢が露出流出するものがある (清水, 2002)。

高水敷の冠水頻度が数年に一回程度の標高の所では大出水時 (100 年確率洪水程度) の流速が速く植生は破壊される。ただし冠水頻度が 20 年に一回程度の地表面高の所は水深が浅いので樹木は存置しえよう。

(2) セグメント 2-1

セグメント 2-1 の高水敷の流速は、河床掘削等による平均河床高が低下していなければ大出水において 1.5~2.5m/s、水深 3~4m となる。この流速は密に生えた草本類は耐えられる流速であるが、木本類は一本立ちの場合には倒伏したり折れたりする流速である。特の幼樹や樹高の低いオニグルミ、クワ、ヤナギなどは、ゴミが枝や幹に引っかかり流体抵抗が大きくなり、倒伏しやすい。水防林として育成される竹類は群中のものは倒伏しないが、群の最上流端や河岸寄りには倒伏する。

セグメント 2-1 の河川は自然河川であれば、通常、蛇行河川となり、外湾部の河岸侵食と内湾部の細粒物質の堆積により、動的低水路川幅を維持している。間歇的な河道の側方侵食に伴う内湾側河岸付近の土砂堆積、低水路であった状況からの時間経過 (間歇的な河岸成長速度の増加) により、河道に沿った帯状の植生群落の差異や樹木樹齢の差異の帯が生じる。写真 2.4.4 は亜寒帯地方を流れるカムシャッカ川の内湾ポイントバー後部の植生状況を示したものであり、ヤナギの樹齢の差異による樹高のことなる 3 段の帯によく示されている。ポイントバーの滑走斜面は、攪乱頻度の応じて河床材料、水分量が異なり、植生群落も帯状となるのである。日本の河川は河岸侵食を災害として防止し氾濫原を農地化してきた歴史があり、このよう樹齢の異なる帯状樹木

帯をほとんど見られないが、1960年代以前の北海道の河川では蛇行の移動に伴う樹木帯の帯が空撮写真により確認されている。



写真 2.4.4 カムチャッカ川セグメント 2-1 のポイントバーの帯状植生 (2002 年)

日本の本州においてはポイントバーの平水時水際からヤナギタデ，カワラヨモギ，ツルヨシ，オギ，タチヤナギ群落となるのが典型例である（(財)リバーフロント整備センター，2000）。

(3) セグメント 2-2

セグメント 2-2 の河道区間では，高水敷の流速は大出水でも通常 2m/s 以下であり，草本類は倒伏するが破壊まで至らない。河岸近くで洪水流が低水路から乗り上げる所では，土砂の堆積により埋もれ死滅することがある。樹木は一般に倒伏しないが一本立ちのタチヤナギではゴミが付着して倒伏することもある。

河岸付近にタチヤナギが生え河岸林となることが多いが，群として生育しており河岸が崩壊しなければ出水に耐えられる。

(4) セグメント 3

セグメント 3 では洪水時の高水敷上の流速は小さく，河岸付近での草本（ヨシ）の倒伏があるが一般に倒伏まで至らない。したがって植生種は洪水の攪乱によらず地下水位および汽水環境に規定されるものとなる。高水敷の人為的改変がなければ，満潮時の水位と河岸高の標高差が少なく平坦面であるので満潮位より 1m ぐらいの所まで一面のヨシ原となっている。これより地表面が高いとデルタ B 植生となる。

なおヨシ群落の河川側最前線は，低水路の砂質物質とヨシ群落によりトラップされたシルト・粘土質物質の境界となっている。

[4] 植生と土砂・流水の相互作用と河川植生の変化シナリオのための情報

河道における侵食と堆積現象には河川植生が相互に密接の関係しあっている。河道地形，河川植生の変動・遷移現象を理解・説明できるようにするには，少なくとも次のことに対する知見の集約が必要である。

(1) 植生の粗度，倒伏・破壊限界流速

高水敷の粗度係数は，高水敷上の水深と地被状況（樹木・草本の高さ，倒伏状況）に影響され

る。

図 2.4.8 は、実河川の洪水時の水位と水面勾配，そのときの高水敷の地被状況をもとに，水深 h 植生の高さ h_v との比と粗度係数の関係を図化したものである（建設省河川局治水課ほか，1989；国土技術研究センター，2002）。この図により評価された n を用いて高水敷の流速係数は $\phi_0 = h_d^{1/6}/g^{1/2}/n$ として求められる。

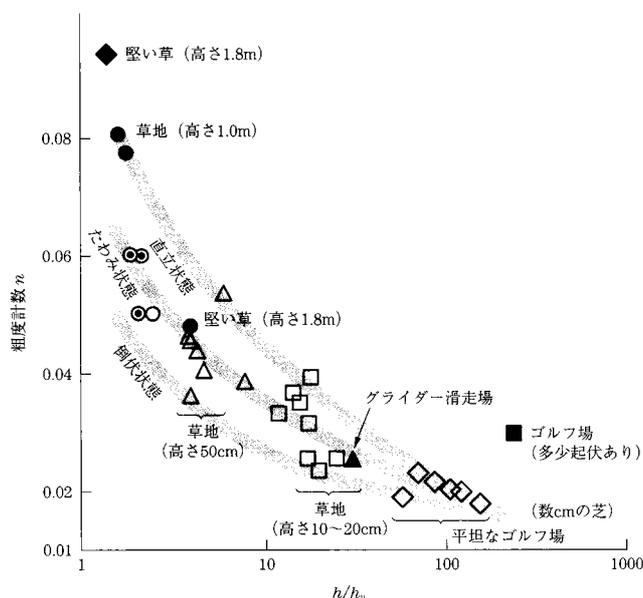


図 2.4.8 高水敷の植生の状態と水深と粗度係数の関係
（建設省河川局治水課ほか，1989 に加筆、国土技術研究センター、2002）

草本類の倒伏限界については以下のようなものである（宇多ほか，1997）。

[堅い草が繁茂している場合]

ヨシ，ススキ，セイタカアワダチソウなどに代表される，高さ 1～3m に達する堅い草は， u_* が 12cm/s 以下で直立，12～22cm/s でたわみ，22cm/s 以上では倒伏する。

[柔らかい草が繁茂する場合]

エノコログサ，イヌエビ，ネズミムギなどに代表される，地表面近傍から多数の葉が生えており，かつ比較的曲がり易い茎を有する草は， u_* が 7cm/s 以下で直立，7～15cm/s でたわみ，15cm/s 以上では倒伏する。

以上の評価は，数少ない水路実験データを用いて評価したものである。庄内川平成 12 年 9 月洪水による植生の倒伏状況と洪水ピーク時の掃流力値より判断すると，堅い草が繁茂している場合の上述の標準値は少し小さいようであるが，ほぼ妥当であると判断されている（山本，2002）。

樹木群の存在する高水敷の粗度は，樹木に働く流体力を評価する水理学的方法により評価することができる（福岡ほか，1990，（財）国土技術研究センター編，2002）。なお洪水時には流木やゴミが樹木に引っ掛かり樹木間に堆積する現象があり，粗度の設定に当たっては注意が必要である。

水防林のような樹木群の粗度については実証的な資料が乏しい。水理学的には樹木に働く流体力と氾濫原面に働く掃流力を評価すれば粗度を算定できるが（福岡ほか，1990），樹木に働く抗力

算定のための流水を遮蔽する面積の評価の困難さや幹・枝・葉の抗力係数 C_D 算定の煩雑さなどにより、実用化に耐えないところがある。ここでは Chow (1959) の提案による標準値を表 2.4.2 に示しておく。

表 2.4.2 樹木の粗度係数 n (Chow, 1959)

氾濫原の状態	最小値	標準値	最大値
[藪]			
① まばらな藪と密集した雑草	0.035	0.050	0.070
② 冬季の散らばった藪と樹木	0.035	0.050	0.060
③ 夏季の散らばった藪と樹木	0.040	0.060	0.080
④ 冬季の中間から密な藪	0.045	0.070	0.110
⑤ 夏季の中間から密な藪	0.070	0.100	0.160
[樹木]			
① 夏季の密集した真っ直ぐな柳	0.110	0.150	0.200
② 木の株が残っている開墾地で、芽が出ていない	0.030	0.040	0.050
③ 同上、しかし木株から芽がたくさん出ている	0.050	0.060	0.080
④ 樹木が密集し、倒れた木もある。下ばえほとんどなし。洪水時の水位は枝の下	0.080	0.100	0.120
⑤ 同上、しかし洪水時の水位は枝にとどく	0.100	0.120	0.160

(2) 植生の破壊限界流速

植生は根毛により土壌を緊縛している。流水にさらされるとその表層土壌が徐々に抜け出し最後は根毛層が剥がれ破壊に至る。図 2.4.9 と図 2.4.10 は草丈の低い芝、草の耐流速値と流水にさらされる時間の関係式を示したものである (福岡ほか, 1987 ; Hemphill ほか, 1989)。後者は草でライニングした水路 (排水のための小水路) 設計のためのものであり、自然河川の河岸と異なる。前者より多少耐流速値が大きい。表 2.4.3 には, Begemann ほか (1997), アンドレアス (1998), 宇多ほか (1989) および筆者の日本の河川での洪水後植生状況観察結果などを踏まえ、植生が耐えられる流速値を示した。なお現実の植生の破壊状況を見ると植生は上述のような破壊形態をとるものは少ない。セグメント 1 およびセグメント 2-1 の河川においては、植生の生えていないところの基盤が侵食され植生が根毛ごと捲くれ上がってしまい破壊されるか、上流から輸送されてきた土砂により埋まり死滅してしまう。セグメント 2-2 の高水敷においては植生があれば構造物回りのように局所流の生じる所を除けば侵食されない。

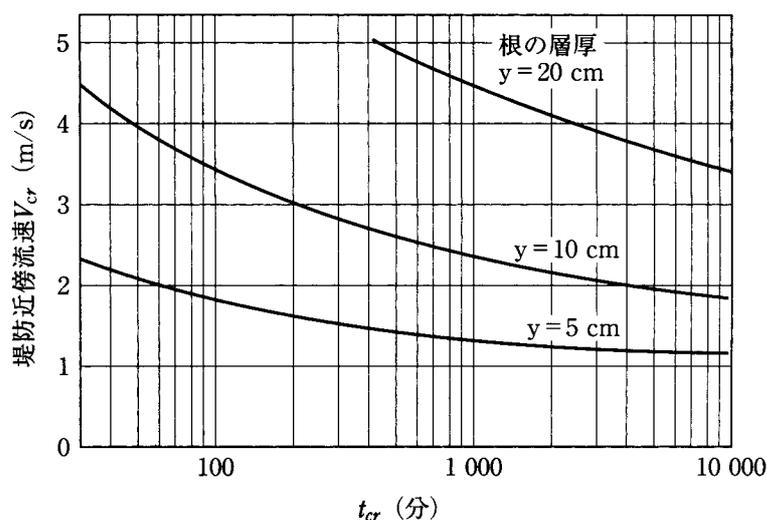


図 2.4.9 現場侵食試験結果から得られた対侵食強度推定図 (福岡ほか, 1987 より作成)

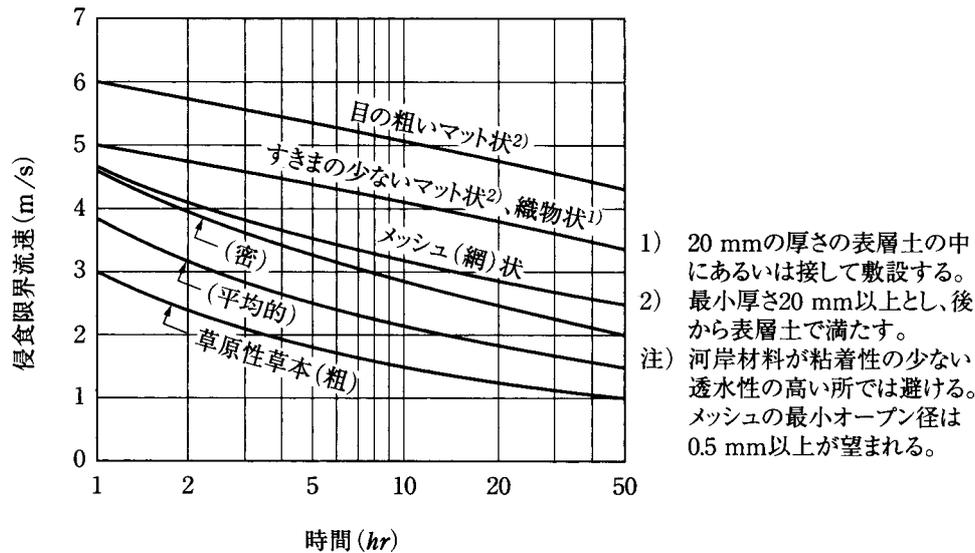


図 2.4.10 草の耐流速値と流れにさらされる時間との関係 (Hemphill ほか, 1989 より作成)

表 2.4.3 植生護岸 (植生) の許容流速 (山本編, 2003)

植生種	許容流速* (m/s)	適用セグメント	コメント
草本類 (芝・チガヤ)	2 ~ 2.5	セグメント 3、2-2	堤防護岸に使用。
ヨシ	2 ~ 3	セグメント 3、2-2	ヨシ生育域前面の河床侵食対策が必要。
ヤナギ・ハンノ木の幼木**	3 ~ 3.5	セグメント 2-2、2-1	基盤が侵食されると流出する。
ヤナギ**	3 ~ 4.0	セグメント 2-2、2-1	同上
竹**	3 ~ 4	セグメント 2-2、2-1	水防材として多用された。

* 河岸近くの流速

** 一本立ちではなく群生

注) 根部の侵食は防止されていることを前提とする。

砂地には用いない。

扇状地性の河原での洪水による草本類の破壊の観察によるとオオアレチノギク、ヨモギ等の根茎の浅い植物 (タイプ A) は洪水に対して耐久性が小さく、河床材料の d_{50} に対する無次元掃流力が 0.06 程度、ツルヨシ、オギなど (タイプ B) は 0.09 程度で流出するとしている (藤田ほか, 2000, 榎本ほか, 2004)。図 2.4.11 は末次ほか (2004) による礫河原である多摩川、千曲川で観測された植生別の無次元送流力による流出形態を総括した図であり、表 2.4.4 は洪水に対する抵抗力による植生の分類を整理したものである。

大洪水後の利根川、庄内川などでの観察によるとセグメント 2-2 の区間では、河岸に群 (列) として生えている柳は、ごみが引っかかり傾いているものがあるが、ほとんどそのまま残っている。ただし一本立ちしているものはごみが引っ掛かり倒伏しているものがある。セグメント 2-1 では河岸の樹木群 (柳)、竹の群生は存置している。河岸根部の侵食がなければ樹木は存置する。

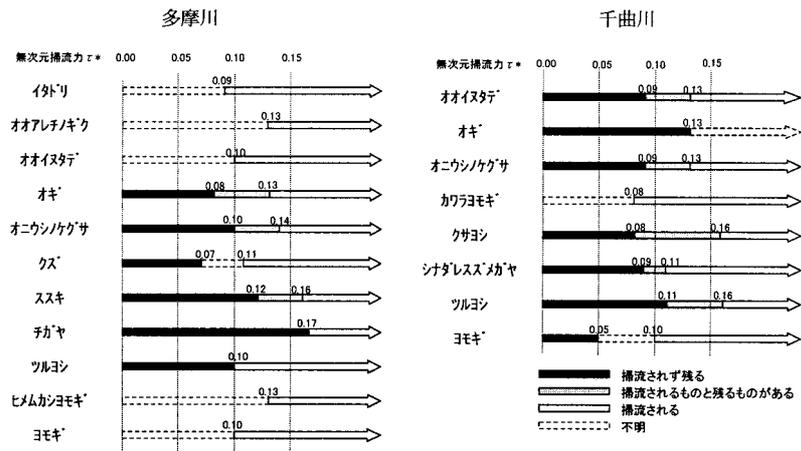


図 2.4.11 植生別の無次元掃流力による流失形態 (末次, 2004)

表 2.4.4 洪水に対する抵抗力による植生の分類 (末次ほか, 2004)

分類	多摩川	千曲川
タイプ①・・・抵抗力が弱い。 目安として無次元掃流力が 0.06~ 0.09 程度で流失するもの。	オオアレチノギク・クズ・ヒ メムカシヨモギ・ヨモギ	カワラヨモギ・ヨモギ
タイプ②・・・抵抗力が強い。 目安として無次元掃流力が 0.08~ 0.14 程度で流失するもの。	チガヤ・オギ・オニウシノケ グサ・ススキ・ツルヨシ・オ オイヌタデ	オオイヌタデ・オニウシノケ グサ・クサヨシ・シナダレスズメガ ヤ・ツルヨシ・オギ

樹木の倒伏限界流速については、樹木の種類ごとの胸高直径Dに対する倒伏限界モーメントが図 2.4.12 のように評価されており、流水による流体力とその地表からの作用点が評価しえれば、倒伏するかどうかの判定が可能である (建設省河川局ほか, 1990 ; (財) リバーフロント整備センター編, 1999) . なお、以下のことが明らかにされている。

- ・ 胸高直径 D に対する倒伏モーメント M_c は樹種別には大きな差異が確認されなかった。
- ・ 土壌による違いでは、砂礫質土壌での M_c がシルト質、砂質土壌よりわずかに大きい傾向が認められた。
- ・ 河川の平水位と樹木立地位置の比高差が 2m 以下の樹木では M_c が小さい。これは地下水位が根茎の下方への成長を妨げているためと推定されている。

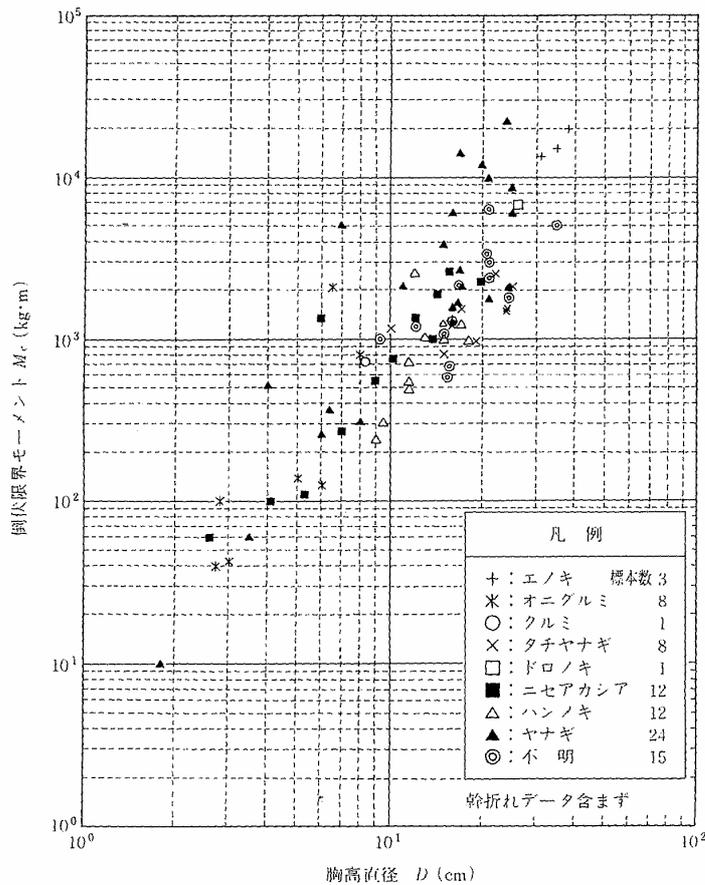


図 2.4.12 樹種による差異 (リバーフロント整備センター編, 1999)

(3) セグメント 1 における洪水後の植生の遷移と遷移速度

末次ほか(2004)は礫河原である多摩川, 千曲川の洪水後草本類の遷移過程を観察し, 表 2.4.5, 表 2.4.6 のようにまとめている. 裸地には 1 年未満で一年草の他に多年層の植物も侵入している. 河原に再生する植生の遷移は一次遷移でなく二次遷移の系列に入るものである. 侵入植生の基が周囲に存在しているからである(沖野, 2001). 図 2.4.13 は末次ほか(2004)による植生の出現および遷移状況による植生分類である. また図 2.4.14 は植生群落別の一年間あたり変化速度を示したものである(洪水による攪乱なし). ここで変化速度は単位群落周囲当たりの群落面積変化速度である. 拡大傾向のあるのは表 2.4.1 に示すタイプ II, III に属する安定植生域を形成するタイプである.

これらの成果は, 河原での植生変化プロセスモデルの基礎情報となる.

また, いくつかの樹木・竹については樹径と樹高の関係, 樹径と樹齢の関係, 樹種の樹齢と樹木密度の関係が調べられている(建設省治水課ほか, 1990; 茂木ほか, 1999) (⇒図 2.4.15).

表 2.4.5 植物群落のタイプ分類 (多摩川) (末次ほか, 2004)

タイプ	植生種類	生活型	遷移状況		
			洪水後1年未満	洪水後1年～2年	洪水後2年以降
I	A	エノコグサ	裸地に侵入	ツルヨシに遷移	マルバヤハズツクに遷移
		オオアレチノギク	裸地に侵入	ツルヨシに遷移	裸地に侵入
		オランダガラシ	裸地に侵入		ネズミムギに遷移
		(クヌ)	ススキに侵入		オキ・オニウシノケガサに遷移
		オオイヌタデ	ススキ・裸地に侵入	ツルヨシ・ネズミムギ・ヒメムカシヨモギに遷移	裸地化
	B	(クサヨシ)	裸地に侵入		オニウシノケガサに遷移
		(ススキ)	残存		オキ・チガヤに遷移
		(ヨシ)	ツルヨシに侵入	ツルヨシに遷移	
		ネズミムギ		オニウシノケガサ・裸地に侵入	裸地化
		ヒメムカシヨモギ		裸地に侵入	裸地化
II	A	マルバヤハズツク		ツルヨシ・裸地に侵入	裸地化
		ヒシバ		裸地に侵入	オオアレチノギクに遷移
	B	ヨモギ	裸地に侵入		残存
		イタドリ	残存		残存
III	A	ツルヨシ	残存	裸地に侵入	残存
		オニウシノケガサ	ススキに侵入	裸地に侵入	ネズミムギに遷移
	B	オキ		ススキに侵入	オニウシノケガサに遷移
		チガヤ		ススキに侵入	残存

表 2.4.6 植物群落のタイプ分類 (千曲川) (末次ほか, 2004)

タイプ	植生種類	生活型	遷移状況		
			洪水後1年未満	洪水後1年～2年	洪水後2年以降
I	A	ヒシバ	裸地に侵入	オオイヌタデに遷移・裸地化	
		ヒメムカシヨモギ	裸地・ツルヨシに侵入	オオイヌタデに侵入	裸地化
		スズビトハキ	裸地に侵入	マルバハキ・オオイヌタデに遷移・裸地化	
		カモガヤ	裸地に侵入	オオイヌタデに遷移・裸地化	
		メマツヨイグサ	裸地に侵入		裸地化
	B	シロザ	裸地に侵入		シロバナシナガワハキに遷移
		カセクサ	シナダレススガヤに侵入	シナダレススガヤ・オニウシノケガサに遷移	
		(クワモドキ)	裸地に侵入	裸地化	
		オオイヌタデ	裸地に侵入	クサヨシ・ヒメムカシヨモギ・シロバナシナガワハキに遷移	裸地化
		(ヨシ)	ツルヨシに侵入	ツルヨシに遷移	
II	A	マルバハキ		スズビトハキに侵入	シロバナシナガワハキに遷移
		シロバナシナガワハキ		マルバハキ・オオイヌタデに侵入	ヨモギ・ツルヨシ・オニウシノケガサに遷移・裸地化
	B	ヨモギ	裸地に侵入		シロバナシナガワハキに侵入
		カラヨモギ	裸地に侵入		残存
III	A	外ハキ	不明		残存
		(オニウシノケガサ)	残存		オオイヌタデに侵入
	B	(シナダレススガヤ)	残存		カセクサに侵入
		ツルヨシ	残存		オオイヌタデ・ヨシに侵入
クサヨシ	残存		残存		
オキ	残存		不明	残存	

※ 表中の波線は、洪水後2年以降も残る可能性がある植生を示している。
 ※ 括弧書きの植生は、矢印先の植生タイプに属する可能性があることを示している。

○ 群落を形成 ● 群落が消滅
 ▲ 群落が拡大 ▼ 群落が縮小

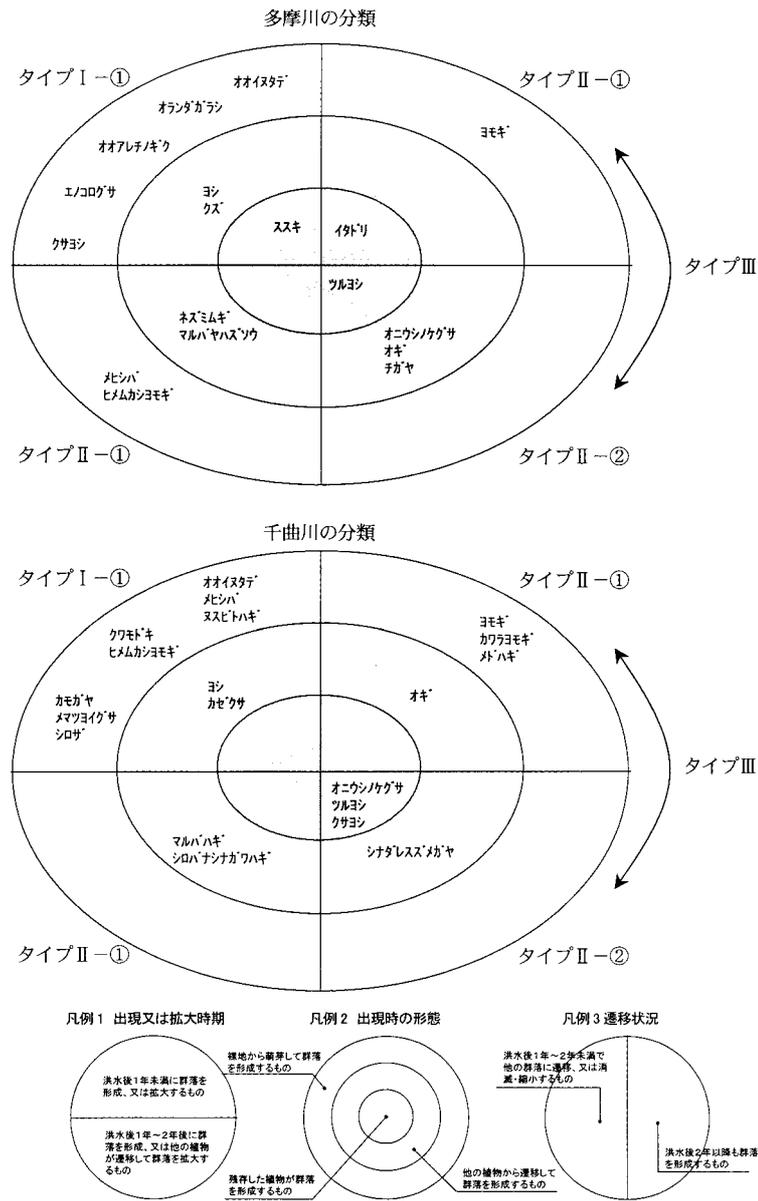


図 2.4.13 植生の出現および遷移状況による植生分類 (末次ほか, 2004)

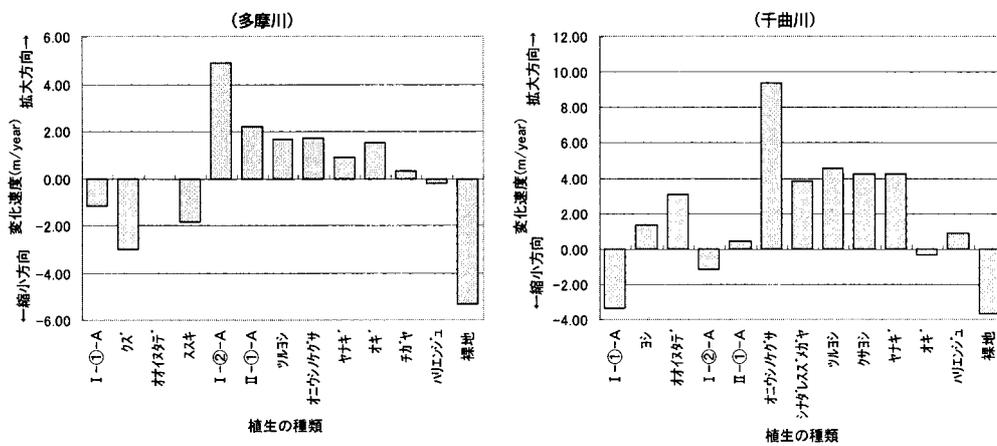


図 2.4.14 植生群落別の1年間あたりの変化速度 (末次ほか, 2004)

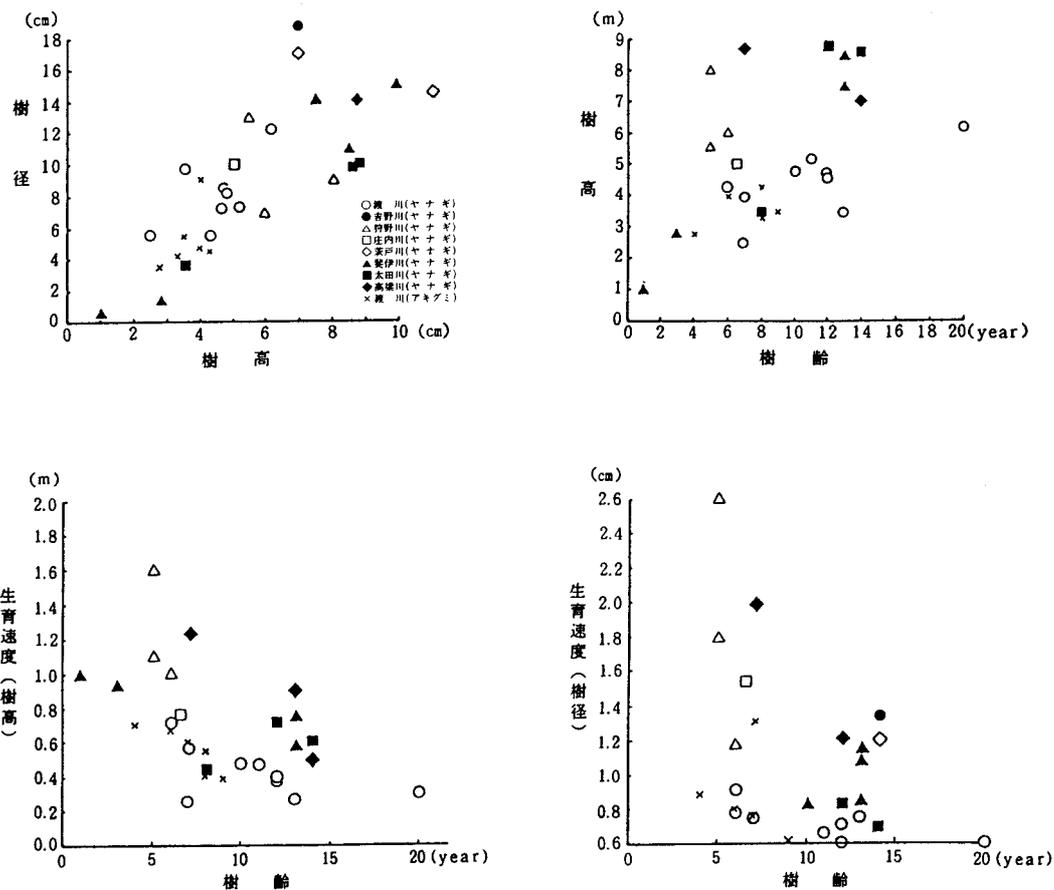


図 2.4.15 樹木の生長特性（建設省河川局ほか，1990）

(4) 植生と物理・化学基盤との関係

植生の横断方向-縦断方向の変化は洪水という攪乱に規定されているが，平水流量，地下水位にも関係する．すなわち植生種ごとに破壊と定着・実生条件(水分条件)の違いを明らかにし，攪乱後の遷移・種間の競争・共生関係を整理する必要がある．次のような観点が重要であろう．

- ・ 流況変化は植生の種と分布を変える．すなわち破壊と定着・実生条件(水分条件)が変化する．
- ・ 水分条件，光条件，表層材料の存在様式は，実生条件を規定する．
- ・ 栄養塩の存在様式とシルト・粘土が堆積物中に占める割合の関係に注目する．
- ・ 風，流水，移動性動物によっては運ばれる種子の散布様式の差異と実生条件の関係に注目する．

シナダレスズメガヤの種子の沈降速度は，0.2mm/s 相当である（すなわち砂の沈降する環境でありシルト粘土が堆積するところでない）．

ヤナギの種子は主に風で散布され，湿った裸地に実生する（樹齢が同一の一斉林になりやすい）．

- ・ 沖積河川の河岸高を規定するのは平均年最大流量に近い．人為的河床低下は，攪乱頻度と地下水位を変える．すなわち破壊と定着・実生条件(水分条件)が変化する．
- ・ 高水敷における微小起伏は，表層土壌の水分条件，栄養条件を規定する．それにより植生相

が変わる。

(5) 生物間相互作用

- ・ 陸生昆虫による植害と成長の関係について注目する。
- ・ 昆虫種・鳥種と植生種の関係について整理する。
- ・ 植物・昆虫・水生生物間の食物連鎖について整理する。
- ・ 一次生産者としての植生の生態系における位置の役割に注目する。

2.4.5 河道特性としての水生生物

水生生物（底生動物・魚介類・付着藻類のみを対象とする）の生育環境をコントロールしているの主要な要素として

- ① 水面下の河床の三次元形状（砂州，小規模河床波）⇒流速，礫径，酸素，堆積物条件に関係する。
- ② 河床の表層材料とその平面的分布状況（河床表面における河床材料の分級堆積状況）⇒餌，産卵条件に関係する。
- ③ 河床材料の洪水時および平水時の移動状況⇒付着藻類の生長，礫のクレンジング，礫の存在形式（浮石，はまり石）に関係する。
- ④ 位況および流速とその季節変化特性（砂州，平面形状，河床勾配，河床材料，河岸付近植生，流量の変動に規定される）
- ⑤ 河岸形状と河岸構成材料
- ⑥ 河岸付近の植生（河畔林）状況 ⇒光条件，餌環境，退避条件，産卵条件に関係する。
- ⑦ 河川の水質（水温，栄養塩の濃度，濁度，溶存酸素，pHを含む，水質は内部生産と外部からの流入物質により変化する）
- ⑧ 気候
- ⑨ 潮汐

などが考えられる。このうち①から⑤は河道特性そのものである。したがって水生生物の種や群集構造，分布形態をセグメントごとに河道特性として記述可能であるが，水生生物は水質に大きく影響されること，また微小地形や微小空間の物理化学的な特性に影響を受けるので，これらの情報との関連性についての言及が必要である。①から⑤が水生生物の生育環境の基盤を作っているという前提のもとに，水生生物の生態学的特性に関する情報の生産と整理が必要である。以下の整理が必要であろう。

- ① 河道内の環境区分
- ② 水質（水温）区分
- ③ 環境区分ごとの河床材料，河岸材料
- ④ 各環境区分，水質（水温）区分に特有な生物種とその生態特性
- ⑤ 洪水に対する水生生物の応答特性

[1] 河道内の環境区分

水生動物の環境区分として，植生と同様，第1に気候区分，第2にセグメント区分を取るべき

である。理由は植生と同様である。

第3に水生生物の重要な環境要素である水深、流速を代表する指標区分を取るべきであるが、河道特性としては、河道の曲がりや砂州によって形成される河床の凹凸を示す地形区分で表現すると良い。具体的には、砂利河川では淵、平瀬、早瀬、よどみを、砂河川では深場、浅場、よどみなどが区分概念となろう。このほかに河岸近くは水生生物にとって特別な場であるので、河岸部を自然河岸（植生の有無）、人工河岸（空隙の有無）で4区分する。

[2] 水質区分

水質としては、水温、溶存酸素量、pH、塩分濃度、BOD、各種栄養塩濃度、濁度などを指標として水質区分を行う必要があるが、水質は栄養塩および酸素が河川内の微生物・藻類などにより消費・生産されるので昼と夜という日変動、流下過程での変化が生じる。水生生物を河道特性として表現する場合には総合化した少ない水質指標が便利であるので、塩分濃度については海水域、汽水域、河水域の3区分程度、他の水質指標については生物学的水質判定で使われているような水質階級4ランク程度（Ⅰ清、貧腐水性、Ⅱやや汚濁、β中腐水性、Ⅲかなり汚濁、α中腐水性、Ⅳきわめて汚濁、強腐水性）に区分すればよいと考える。酸性水などが流下するとことでは、別途分類する。水温は気候区分に従属的であるが、流程、水深、地下水との関係で変わるので、水温が水生生物の生息条件に大きく関係する場合は、別途水温の区分を考える。

[3] 環境区分と河床材料・河岸物質

環境区分ごとの河床材料と河岸物質は、河川水生生物の基本生活条件である。これらは洪水によって形成される砂州形態と土砂の分級堆積の現れであるので、セグメントごとに特徴があり、それに応じて水生動物相が変化する。水生動物相の規定要因としての河床材料・河岸物質について水生動物の観点から付加しておくべき情報を取りまとめておく。

(1) セグメント1

セグメン1の河川で勾配1/200以上の河川では、平水時、淵の部分はC集団が多く粒径が大きいことが多い。B集団である砂は小流量でも動くので表層にはほとんど存在しない。砂州の前縁線直下流に洪水終期に運ばれた砂が堆積することがあるが、平水時流水の流れる早瀬となる所は河床がやや低下し砂が流出し浮石状にA集団やC集団が存在する。砂州前縁線の少し上流に当たる平瀬の部分は、淵の部分よりC集団が少なく、表層は流れにより砂が運ばれるので砂成分は少ない。ただし平水時の河水は河床から浸透する流れにより細粒物質が表層下にマトリックスとして集積することがある。侵食された河岸の下部斜面にはC集団が集中することが多い。平水時の網状流路の一部が流量減により流路が途切れると「溜まり」（小さなプール）が形成される。

緩勾配扇状地河川においても基本的には上述のパターンと同様であるが、平水時の淵部分の流速が遅くB集団である砂が溜まることがある。また、水際線が急な崖状でなければ平水時の水際線より少し高いところに砂やシルトがA集団の間にマトリックスとしてトラップされ、一年性草本が生育しやすい条件となり植生の帯となる。

扇状地河川の直上流に大ダムが築造されると河床はアーミングされ、河床は凹凸が少なくなる。

(2) セグメント 2-1

淵の部分は平水時 B 集団の砂が堆積し河床を覆うことがある。早瀬、平瀬の部分は砂分が移動しえるので砂利成分が大部分を占める。アユの産卵床は浮石でザクザクしている小砂利が存在するところが好ましい場所となる。洪水時には淵の部分は河床低下、早瀬の部分が上昇の傾向にある。湾曲部の後半部では、洪水時の横断方向の流速の差異と 2 次流により内湾後半部岸寄りに細粒となる。湾曲の流入部および前半部は湾曲角が小さいと大洪水時主流が内岸側を走る。外湾側の淵の部分には平水時砂が集まることある。水生動物は砂州をユニットとした水深、河床材料、流速、溶存酸素量の空間的差異を巧みに選び取り生息場所を棲み分けている。

侵食河岸は、水際部・下層が砂利層、中層がシルト混じりの細砂・中砂、上層はシルト混じりの細砂や泥層となることが多い。後背湿地堆積物である粘性物質が露出することもある。

(3) セグメント 2-2

河床材料が粗砂あるいは中砂であり、浅い所でなければ平水流量程度でも河床材料が移動するので、河床を棲家とする水生昆虫などの生育環境として好ましいものでない。感潮域では平水時の河床材料の移動は少ないが、細粒物質がフロキュレーションにより沈降し河床に細粒物質および有機成分が堆積することある。潮汐があると細粒物質が移動し上流に細粒物質が運ばれる。

河岸の侵食部は、下層は砂層であるが中・上層は細砂や粘土混じりのシルトとなることが多いが、後背湿地堆積物の粘土層が露出することもある。侵食部でなければ水際近くはヨシ・マコモなどの植生で覆われ、魚の避難場、コイ・フナなどの産卵場となる。ヤナギが河畔林となって水際近くまで生育していることある。

河口に接している場合には汽水環境である区間が長くなるので生物相が塩分条件に応じて変化する。

(4) セグメント 3

砂州の発生が見られないので河床の凹凸は河道の平面形の曲がりに規制されたものとなる。

河床材料は潮汐流が河道形成要因と河川以外は、平水時ほとんど動かない。細粒物質がフロキュレーションにより沈降し河床に細粒物質が堆積し、粘土混じりシルトとなることがある。このようなヘドロ状堆積物には有機成分が 5~10%含まれ、溶存酸素を消費し河床近くを貧酸素状態にすることがある。

河岸物質は下層に細砂層が、中・上層は粘土混じりシルトである。水際近くはヨシが満潮時水面以下の場所まで生育し陸側に広がりヨシ原となる。ヨシ原部の堆積物は泥質で有機物に富む。潮汐により干潟の生じる場所は、ゴカイ類、甲殻類などの生息場所となる。

[4] 各環境区分・水質区分と生物種

生育段階に応じた種々の魚類、底生動物などの水生動物の生育場所、存在場所を各環境・水質区分ごとに、洪水に対する水生動物の応答と回復過程に関する情報を、集積・整理する必要がある。まずは動物種ごとにその生活史と環境区分の関係、水位(流速)変化に対する応答特性、産卵形態、生態特性を既存資料により情報カード化することから始めるべきである(⇒注 7)。

[5] 自然的攪乱・人為的インパクトに対する水生動物の応答・変化シナリオのための情報

自然的攪乱・人為的インパクトに対する水生動物の応答・変化を理解・説明するには、土砂・流水と植生との相互作用で形成された河川地形(形態、堆積物)と河川植生を基盤として、そこを流れる流水の変動と水質を説明要因として記載すればよい。そのためには、種ごとに以下のようなことに注目して調査・整理し、知見としてまとめなければならない。

- ・ 動物種ごとの生活場としての河川微地形、河川形態(瀬・淵)
- ・ 生活史として洪水氾濫を繰り返した生態(産卵、遡上)
- ・ 河岸植生と産卵・待避(回避)行動の関係
- ・ 他の生物との競争・共生関係
- ・ 河畔林・河床地形・河床材料の変化と餌環境
- ・ 餌としての付着藻類・底生動物・植物と水位(流量)との関係
- ・ 動物種ごとの気温・水温依存性、光環境
- ・ 回遊魚と障害物(堰、ダム)の影響程度
- ・ 自然攪乱・人為的インパクトに対する付着藻類相の時間変化形態

自然的攪乱・人為的インパクトに対する水生動物の応答・変化を評価・予測するには、セグメントごとの典型的ビオトープ(リーチスケール)、ハビタット(水深スケール)、河川水質を抽出し、ビオトープ、ハビタット、河川水質ごとに各水生動物の理念的空間占有場を表出し、次に地形・植生と水質の変化に基づき水生生物の変化を予測するということになる。地形・植生変化予測のほうが先なのである。

2.4.6 河川流量変動と流送土砂の変化に対する生物相の変化

ここでは上流山間地に大ダムが建設され場合の生物相の変化について、既往文献より抽出、取りまとめる。

河川生態系を構成する生物種は、河川流量変動と流送土砂の変化による河道地形と河床材料の変化と攪乱の頻度変化により従属的に変化する。

(1) 付着藻類

付着藻類は、通常石礫の表面に付着して発生、成長する。成長には栄養塩と光が必要である。藻類は2~3週間で成長し終わり、絶えず剥離と成長を繰り返している。石礫が移動するような出水(年4~5回程度であろう)により付着藻類は擦り剥がれてしまう。また流速が増加すると剥がれる。戸田ほか(2004)によると付着藻類量が100mg. chl-a/m²以上では摩擦速度5cm/sを越えると剥離率が増加する(平均流速で50~70cm/s)。付着藻類量が100mg. chl-a/m²以下では藻類が直接石礫に付着するため、付着強度と水理量の関係で規定される。摩擦速度5cm/sを付着藻類が付着できなくなる摩擦速度としてはならない。

ダム下流のように流況が安定し攪乱がすくなく珪藻や藍藻から糸状藻類(緑藻)であるカワシオグサやアオミドロに代表される大型の糸状緑藻群落が河床礫上に異常に発生する事例が報告されている(矢崎, 2004)。これらの大型糸状藻類は美観の悪化となり、またアユの餌環境の悪化となるといわれている(鮎による摂取という攪乱が継続する条件にあれば付着藻類の更新が生じる

ので、一般論とすべきか不明)。鮎の卵は付着藻類の少ないきれいな石に付着する(すなわち攪乱された河床が産卵床として好ましい)。

多摩川永田地区では、小出水時(ピーク流量約 90m³/s、小礫は移動するが河床が全面的移動するような出水ではない)に攪乱により付着藻類が減少するが、11 日後には増殖して現存量が増加している(皆川ほか、2000)。籠実験によると一度何らかの形で付着藻類が剥離しても 30 日で周辺の礫の付着物量に達する(沖野、2001)。

(2) 水生昆虫

河床礫の移動機会(攪乱)の減少は造網性トビケラの増加となる。また川幅の縮小による河岸林の生育は水生昆虫類の餌環境の改善となる。

河床材料が全面的に移動する出水においては水生昆虫の現存量は急減する。大洪水後の回復には、1 年後には回復した事例(小倉ほか、1985、沖野、2005)、7 年を要した事例(津田ほか、1972)が報告されているが、洪水という攪乱のみの影響か不明である。

(3) 魚類

河道の変化すなわち川幅の縮小による水面積の減少により生息環境の減少となる。流送土砂が上流から供給される場合、単列砂州であった河道は淵の数の増加と淵部の深さが増大する。多列砂州であった場合は淵の数の減少するが淵の深さはあまり変わらない。河床がアーマ化する場合は瀬-淵の不明瞭化が生じ、生息環境が悪化する。さらに河床材料の粗粒化により礫床で産卵する魚類の産卵場所の減少となる。

(4) 植生

川幅の減少により陸域植生(氾濫原植生)の生息空間は増大するが(扇状地河川におけるハリエンジュ、アキグミ、ヤナギ類、オニグルミの増加、セグメント 2 におけるヤナギ類の増加)河原系植生の生息空間は減少する(カワラノギクの減少)。

(5) 鳥類

陸域樹林の増加によるゴイサギなどの営巣空間の増大となるが、河原に巣を作るコアジサシの営巣空間の減少となる。草本類の増加は草本類を営巣空間とするヨシキリ、バンなどの営巣空間を増大させる。採餌空間は昆虫類を餌とする場合は、生息条件の向上であるが、水生生物を餌とするような場合は採餌条件の劣化となることが多い。

土砂・流水と河川植生の相互作用を伴った河道地形の変化、河川植生の遷移現象を理解するには、事例調査に基づき仮説的变化・遷移のシナリオを作成し、土砂水理的、流体力学、植生生物学的な基礎的知見に基づきそのシナリオに合う説明ができるのか検証し、シナリオを高度化して行くことが求められる。また、そのような試みが始まっている(山本ほか、1993a; 藤井ほか、1993; 藤田ほか、1996; 季ほか、1999; 辻本、1999; 清水、2002; 藤田ほか、2003; 平林桂、2003、末次ほか、2004)。

河道地形の変化に伴う水生生物の変化現象については、変化した地形基盤と流水・水質の上に存在する種の量・質を予測するということになる。生物種と生息環境に関する知見の集約が最も必要なのである。

2.5 河川流量変動および流送土砂の変化による河川生態系の変化プロセスの仮説シナリオ

本節では、具体的には上流に大ダムが建設され、平均年最大流量が $1500\text{m}^3/\text{s}$ から $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度に減少したとして、沖積河川の各セグメントで河川環境がどのように変化するか、前述までの知見に基づき変化プロセスの仮説シナリオを作成する。ただし、ダム建設により豊・平・低・濁流量の変化は、それ程大きくないものとする。

[1] セグメント1：シナリオ A（洪水流量の減少）

次のような人為的インパクトにおける河川環境の変化を考える。

(1) 人為的インパクトの条件

セグメント1の扇状地河川の扇状部から先端部に河道を考える。河川上流の大ダムが建設され、平均年最大流量が $1500\text{m}^3/\text{s}$ 程度から $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度に変化することをイメージする。河床勾配は $1/150$ 、代表粒径は 10cm 、流量に対応する砂分以上の土砂は供給されるとする（ダムにより供給土砂の急減が生じるがダム地点と検討対象区間の距離があり、土砂の供給はある）。

(2) 変化プロセスのシナリオ

変更前の平均年最大流量時の河床に働く掃流力 (u_*^2) は、 $100\text{N}/\text{m}^2$ ($1000\text{cm}^2/\text{s}^2$) 程度である。 $\phi_2 = 10$ 程度である。このときの平均水深 H_m および川幅 B は、式 (2.3.3)、式 (2.3.4) より 1.53m 、 306m となる。 $B/H_m = 200$ であり、4列程度の砂州が形成されている。

小洪水しかない年が続くと浮遊砂が砂州の標高に高いところに堆積し、表層水分条件が変化し、草本類が進化するが平均最大流量程度以上の洪水があると草本の生育基盤が破壊され白州の戻る。以下に河道の変化プロセスシナリオを記す。

ステップ1：川幅 300m の河道に4列程度の砂州が形成されている（個々の砂州は平均値に対してその大きさが前後 30% 程度の差異がある）。砂州頂高は平均年最大流量時の平均河床高より H_m (1.53m) の $2\sim 5$ 割程度高い所にある。草本が豊水流量より高いところに馬蹄形状をして生育している。草本は平均年最大流量程度の洪水が生じると破壊され川原となる。平水時の水路面積は $40\sim 60\text{m}$ ある。

ステップ2：洪水流量が減少するため（平均年最大流量時平均水深 1.17m 、変更前の 75% ）、砂州頂部の冠水頻度が減少し、そこに小粒径（砂・小礫）のものが堆積し、保水性が高まり草本類の進入を見る。流水は滞筋に集中し、細粒物質は標高の高い所に堆積する。平均年最大流量では、砂州の全面的移動が生じない。

ステップ3：草本類により浮遊砂がとらわれ、細砂が堆積する（ $1\sim 10$ 年）。さらにシルトも堆積し、草本ハリエンジュ、ヤナギ（実生の生育基盤として光と水分が必要である。水分の多い水際に帯状に樹齢が同じとなることが多い）など木本類が侵入する（ $5\sim 15$ 年）。

ステップ4：砂州の島状化、砂州の高水敷化が進み、かつ標高が高くなり、河原部の平均年最大流量時の水深が年々上昇し、河岸侵食も生じる。川幅は島状化、高水敷化されたところを除けば 200m 程度となる。島は上流部が侵食され下流部は延伸する。

ステップ5：川幅は平均年最大流の減少比に比例して縮小し平均 200m 程度となる。河道には $2\sim 3$ 列の砂州が生じる。動的安定状態となる（ $20\sim 40$ 年）。

水生生物は川幅の減少比に比例して生息空間が減少する。その種は大きくは変わらない。

高水敷にはエノキ、ムクノキなどの樹木が進化する。河原植生の生育基盤が川幅の減少比に

応じて減少する。

ステップ6：上流からの供給土砂の影響が扇状地まで及ぶようになるとシナリオBに転化する。

(3) 生態系の変化フロー

変化プロセスの変化をフロー図およびイメージ図に描くと図 2.5.1, 図 2.5.2 となる。

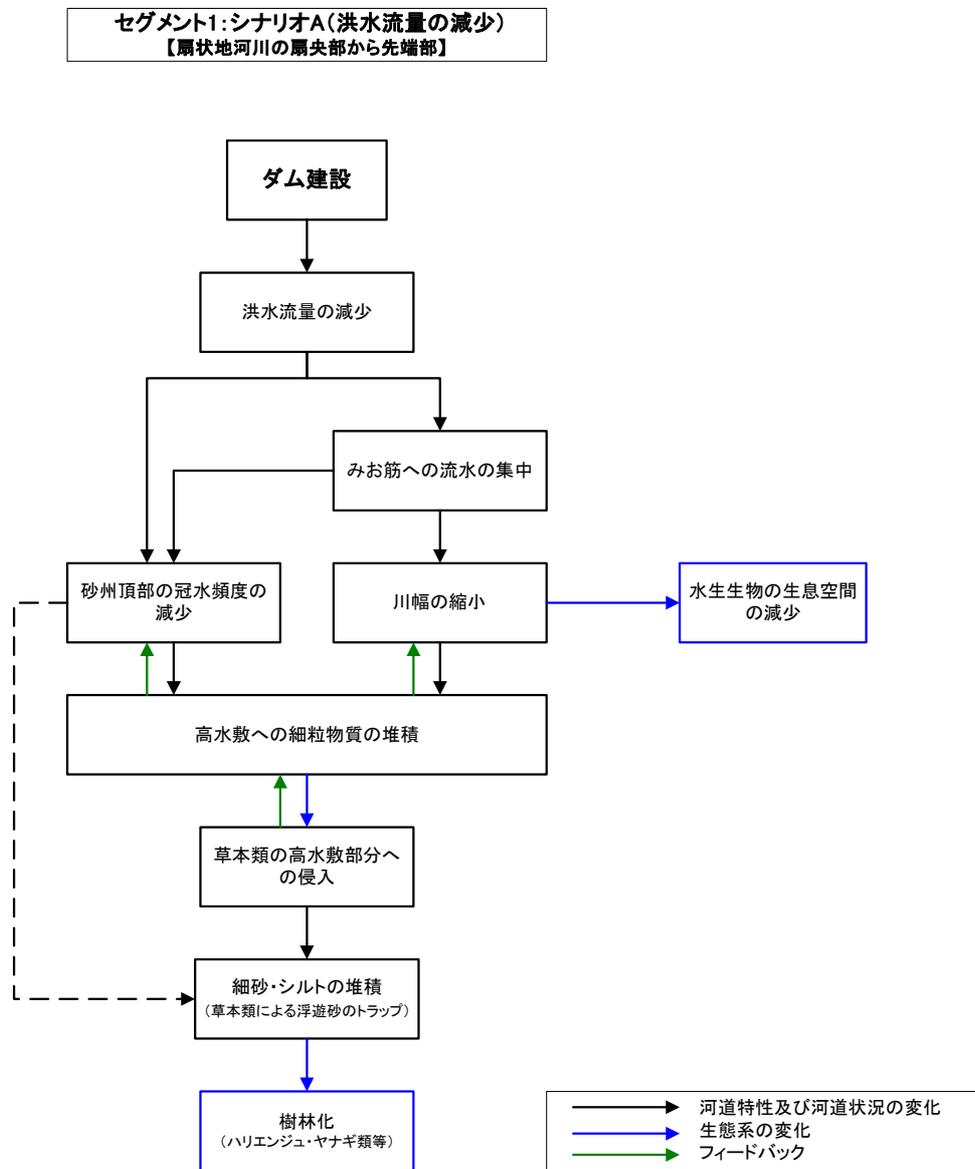


図 2.5.1 プロセスの変化(シナリオ A)：フロー図

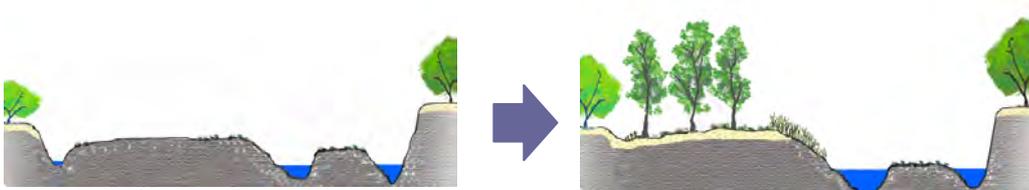


図 2.5.2 プロセスの変化(シナリオ A)：イメージ図

[2] セグメント1：シナリオB（洪水流量および流送土砂量の減少）

次のような人為的インパクトにおける河川環境の変化を考える。

(1) 人為的インパクトの条件

セグメント1の扇状地河川の扇頂部から扇中央部の河道を考える。扇状地上流近くに大ダムが建設され、平均年最大流量が $1500\text{m}^3/\text{s}$ 程度から $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度に変化することとする。河床勾配は $1/150$ 、代表粒径は 10cm 、流量に対応する砂以上の土砂は供給されないとする（ダム地点と検討対象区間の距離が短く、土砂の供給源がない）。

(2) 変化プロセスシナリオ

変更前の平均年最大流量時の河床に働く掃流力（ u_*^2 ）は、 $100\text{N}/\text{m}^2$ （ $1000\text{cm}^2/\text{s}^2$ ）程度である。 $\phi_2=10$ 程度である。このときの平均水深 H_m および川幅 B は式（2.3.3）、式（2.3.4）より 1.53m 、 306m となる。 $B/H_m=200$ であり4列程度の砂州が形成されている。

以下に変化シナリオを記す。

ステップ1：川幅 300m の河道に4列の砂州が形成されている。砂州頂高は平均年最大流量時の平均河床高より H_m （ 1.53m ）の2～5割程度高い所にある。草本が豊水流量より高いところに馬蹄形状をして生える。これは平均年最大流量程度の洪水が生じると破壊され川原となる。平水時の水路面積は $40\sim 60\text{m}$ ある。

ステップ2：洪水流量および供給土砂量が急減するため、変更前の滞筋に流水が集中し、上流から滞筋部の河床低下が進む（ $2\sim 3\text{m}$ ）。瀬のところは上流から供給土砂の減少のため河床が低下しC集団（ 40cm ）が多くなる。

ステップ3：砂州頂部の冠水頻度が滞部の河床低下および洪水流量の減少し、そこに小粒径のものが堆積する。ただし細粒分の供給土砂も減少するため堆積速度が小さく、細粒土層の形成が貧弱である。草本類の進入を見る。

ステップ4：ヤナギ、アキグミ、ハリエンジュ、オニグルミ、エノキなど木本類が侵入する（ $5\sim 15$ 年）。

ステップ5：C集団（ 40cm ）が河床面の 60% 程度を覆うと河床低下は止まり（パラレルデグラデーション、山本、1976）平瀬状となる。アーマ化される区間は時間とともに延伸する。アーマ化の進行中は、流水部の瀬と淵の標高差が小さくなり、州の標高に高いところは河床低下により粒径が大きくなる。アーマ化されたところは大洪水でも動かなくなる。川幅は粒径が大きくなるので、洪水流量減少比以上に縮小する（川幅 $100\sim 150\text{m}$ ）。

ステップ6：河道は淵と瀬の標高差が小さくなり平瀬状となる。低水路幅は $100\sim 150\text{m}$ 程度となり静的安定状態となる（ $15\sim 40$ 年）。高水敷化された空間は樹林となる。

水生生物の種が変化する、造網性の水生昆虫が増える。魚類は種が少なくなる（砂、小礫を生育環境とする種の減少）。

(3) 生態系の変化フロー

変化プロセスの変化をフロー図およびイメージ図に描くと図2.5.3、図2.5.4となる。

セグメント1:シナリオB(洪水流量および流送土砂量の減少)
【扇状地河川の扇頂部から扇中央部】

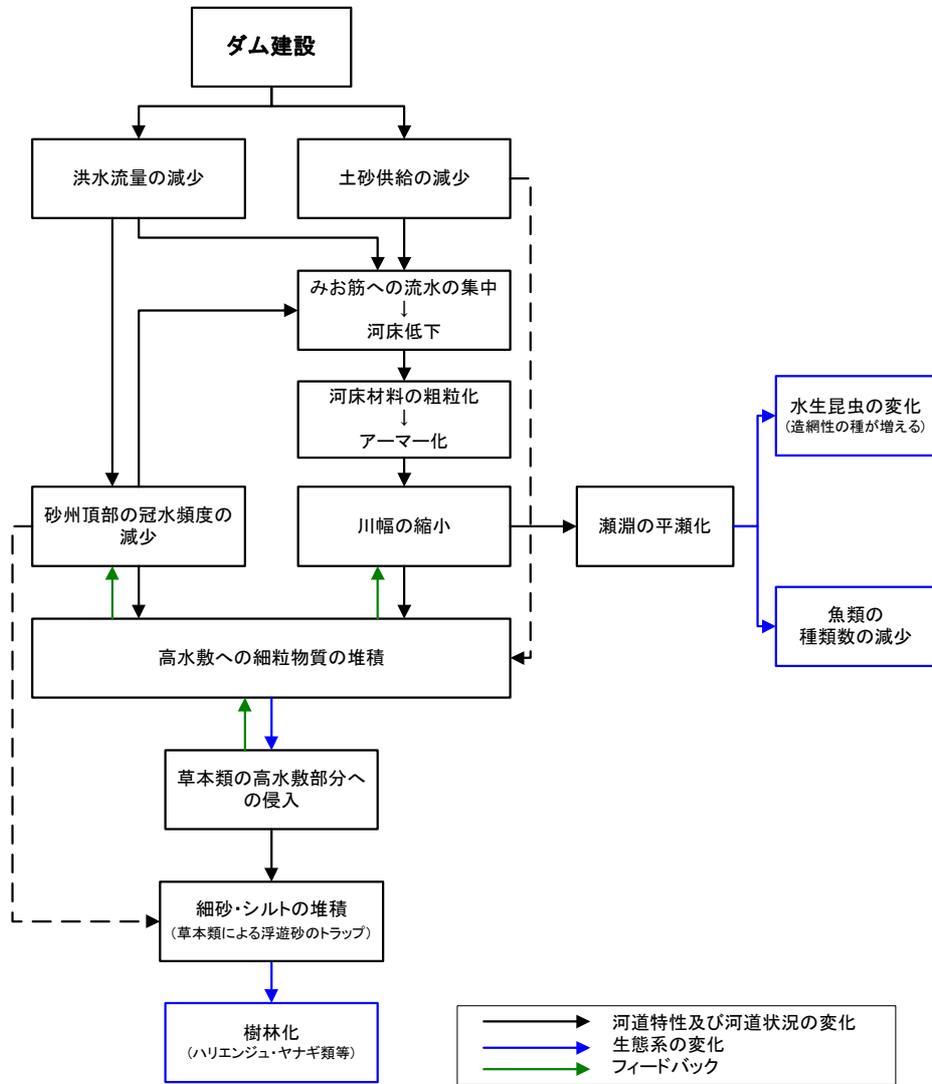


図 2.5.3 プロセスの変化(シナリオ B) :フロー図

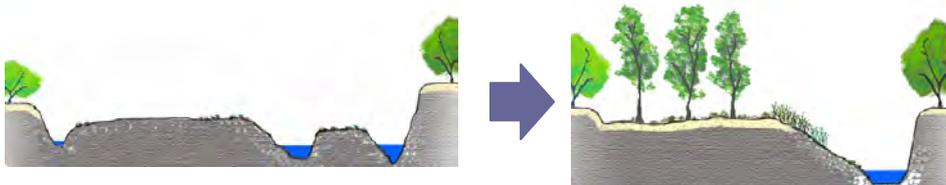


図 2.5.4 プロセスの変化(シナリオ B) :イメージ図

[3] セグメント 2-1：シナリオ C（洪水流量減少）

次のような人為的インパクトにおける河川環境の変化を考える。

(1) 人為インパクトの条件

セグメント 2-1 の中礫を河床材料にも持つ河道を考える。沖積地上流近くに大ダムが建設され、平均年最大流量が $1500\text{m}^3/\text{s}$ 程度から $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度に変化することをイメージする。河床勾配は $1/1000$ 、代表粒径は 4cm 、流量に対応する砂分以上の土砂は供給されるとする（ダム地点と検討対象区間の距離が長く、中砂が補給される）。

(2) 変化プロセスシナリオ

変更前の平均年最大流量時の河床に働く掃流力 (u_*^2) は、 $4.2\text{N}/\text{m}^2$ ($420\text{cm}^2/\text{s}^2$) 程度である。 $\phi_2 = 15$ 程度である。このときの平均水深 H_m および川幅 B は式 (2.3.3)、式 (2.3.4) より 4.3m 、 114m となる。 $B/H_m = 27$ となり単列砂州が形成されている。

以下に変化シナリオを記す。

ステップ 1：川幅 114m の河道に単列砂州が形成されている。自然河道であれば迂曲河道となり、湾曲部は滑走斜面となり、湾曲内岸側は河床高が高い。直線状に河道が制御されていれば単列砂州が生じている。草本類は豊水位以上のところに生育し、そこが河岸の法尻となる。斜面が侵食されると河岸は裸地となる

ステップ 2：洪水流量が減少するため、変更前の滯筋に流水が集中し、砂州の頂部および湾曲内湾側は冠水頻度が低下し、小出水では B 集団である中砂が掃流形式で運ばれ河床が高くなる。中出水では、河岸に近い方から細砂、中砂、礫分が分級・堆積する。

ステップ 3：砂州頂部および湾曲内岸の豊水流量水位上に草本類の侵入が進化する。

ステップ 4：草本類の繁茂によりワッシュロードがトラップされ、急速な堆積が始まる ($5\sim 15$ 年)。その河岸斜面は勾配がきつくなる。

ステップ 5：川幅は流量減少比程度の幅 (93m) に減少する。ヤナギなど木本類が河岸非侵食部に進入する。侵食部は崖状とな、氾濫現 (高水敷) 化する。

ステップ 6：蛇行度が増加する (河岸侵食防止工を設置する場合はステップ 7 へ)。

ステップ 7：川幅の減少により淵の間隔は短くなり、かつ川幅水深比が小さくなるので蛇行度が増加し、より勾配が緩くなり、かつ水深が深くなり、川幅はさらに減少する

ステップ 8：動的安定化に至る ($20\sim 50$ 年)。

(3) 生態系の変化フロー

変化プロセスの変化をフロー図およびイメージ図に描くと **図 2.5.5**、**図 2.5.6** となる。

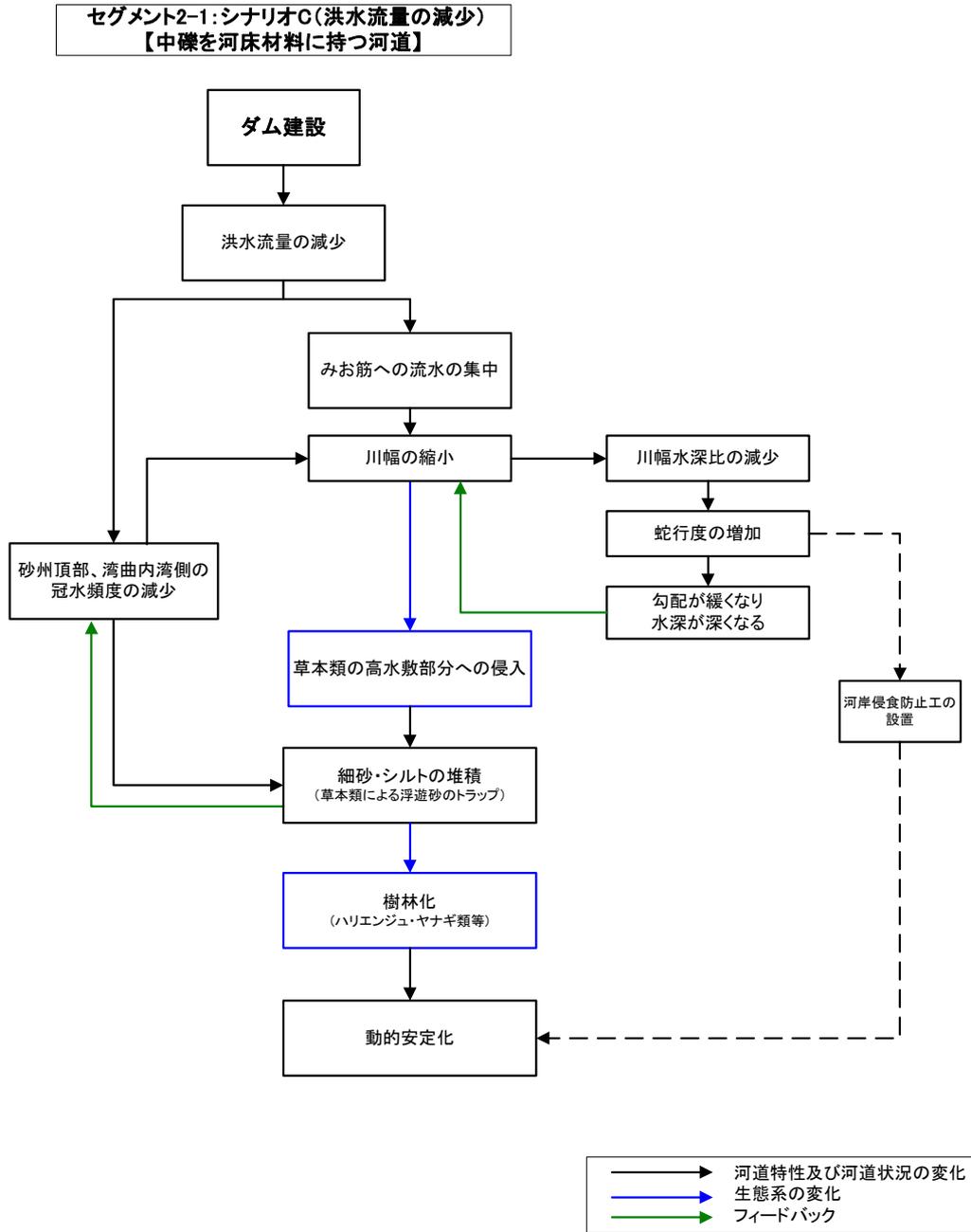


図 2.5.5 プロセスの変化(シナリオ C) : フロー図

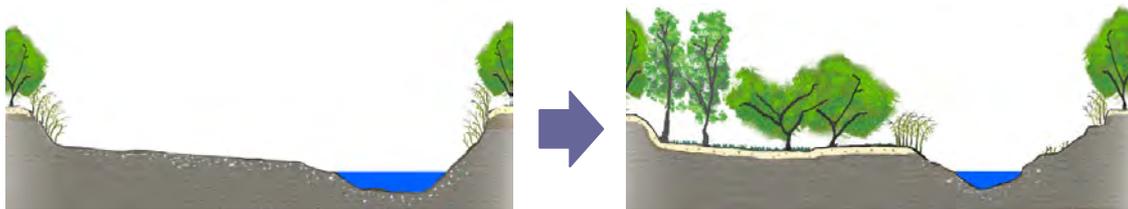


図 2.5.6 プロセスの変化(シナリオ C) : イメージ図

[4] セグメント 2-2：シナリオ D（洪水流量の減少）

次のような人為的インパクトにおける河川環境の変化を考える。

(1) 人為的インパクトの条件

セグメント 2-2 の粗砂を河床材料にも持つ河道を考える。沖積地上流近くに大ダムが建設され、平均年最大流量が $1500\text{m}^3/\text{s}$ 程度から $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度に変化することをイメージする。河床勾配は $1/2000$ ，代表粒径は 0.1cm ，流量に対応する砂分以上の土砂は供給されるとする（ダム地点と検討対象区間の距離が長く，中砂が補給される）。

(2) 変化プロセスシナリオ

改変前の平均年最大流量時の河床に働く掃流力 (u_*^2) は， $17\text{N}/\text{m}^2$ ($170\text{cm}^2/\text{s}^2$) 程度である。 $\phi_2 = 10$ 程度である。このときの平均水深 H_m および川幅 B は式 (2.3.3)，式 (2.3.4) より 3.47m ， 338m となる。 $B/H_m=95$ となり洪水時 2 列，小流量時多列砂州が形成されている。

以下に変化シナリオを記す。

ステップ 1：川幅 400m の河道に多列の砂州が形成されている。砂州頂高は豊水位程度で水面にでる程度の高さである。草本類は低水路には侵入していない。

ステップ 2：洪水流量が急減するため，砂州の移動速度が減少する。小取水で B 集団である細砂が掃流形式で運ばれ砂州上河床が高くなる。ただし少し大きい洪水で細砂は再移動する。

ステップ 3：豊水流量が変化しなければ砂州の頂部および湾曲内湾側は冠水頻度がそれほど低下しないので，草本類の進入それほど早くない。豊水流量が減少すると，冠水頻度が減少し，減少しない場合に比べて，草本類の進入が早くなる。

ステップ 4：草本類の繁茂によりワッシュロードがトラップされ，急速な堆積が始まる ($5\sim 15$ 年)。

ステップ 5：川幅は流量減少比程度の幅 (290m) に減少する。この減少速度は，豊水流量の減少比が大きいほど早い。ヤナギなど木本類が河岸非侵食部に進入する。侵食部は崖状となる。

ステップ 6：単列砂州的な河道となり蛇行度が増加する（河岸侵食防止工を設置する場合はステップ 7 へ）。

ステップ 7：蛇行度の増加により勾配が緩くなり，かつ水深が深くなる。川幅はさらに減少する

ステップ 8：動的安定化に至る ($20\sim 50$ 年)。

河道の変化に応じ，河川生物は環境場および攪乱場に応じて遷移する。この場合，水質がどのように変化するかによって遷移プロセス(種の構成)が異なる。

(3) 生態系の変化フロー

変化プロセスの変化をフロー図およびイメージ図に描くと **図 2.5.7**，**図 2.5.8** となる。

セグメント2-2:シナリオD(洪水流量の減少)
【粗砂を河床材料に持つ河道】

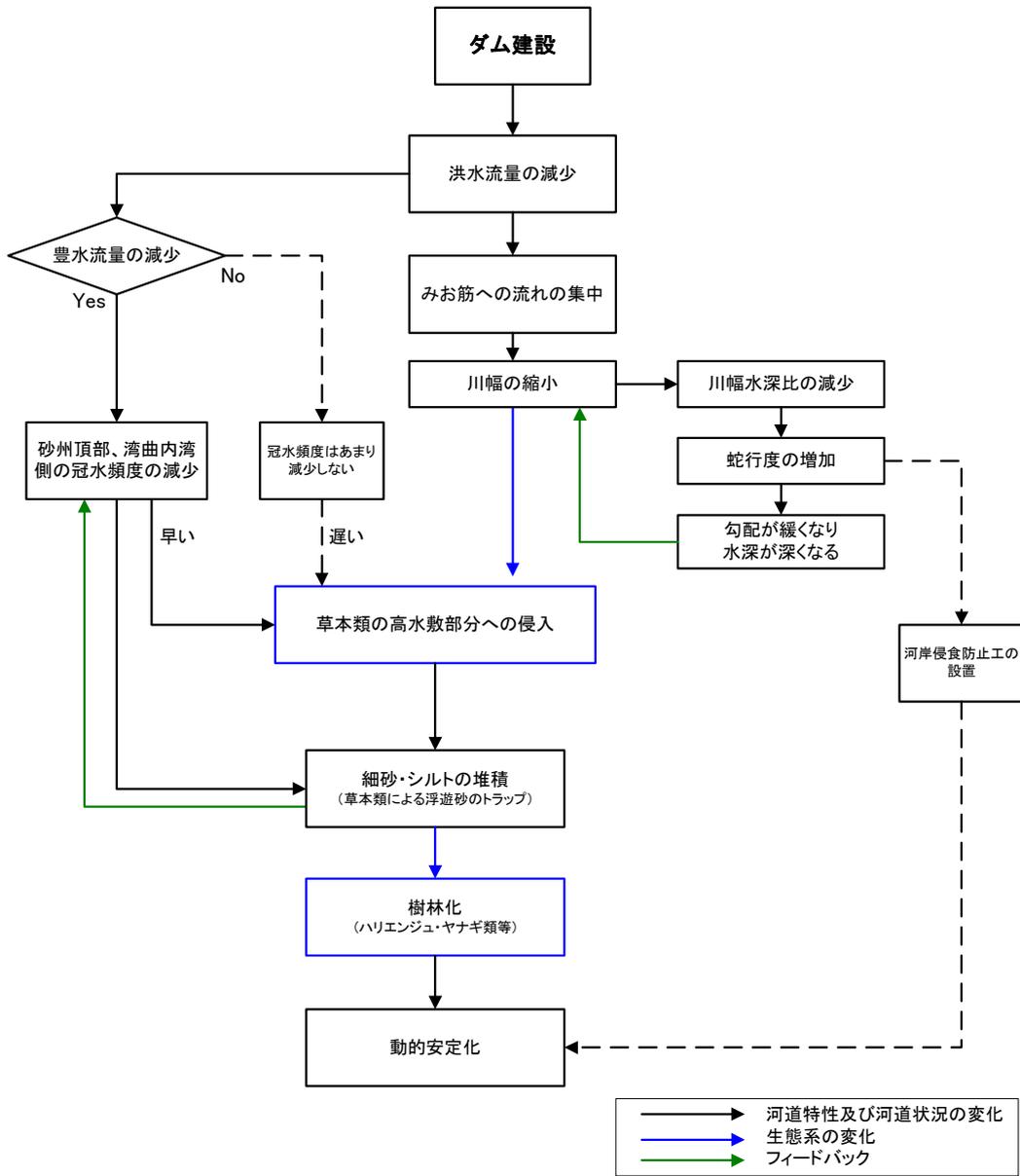


図 2.5.7 プロセスの変化(シナリオ D) : フロー図

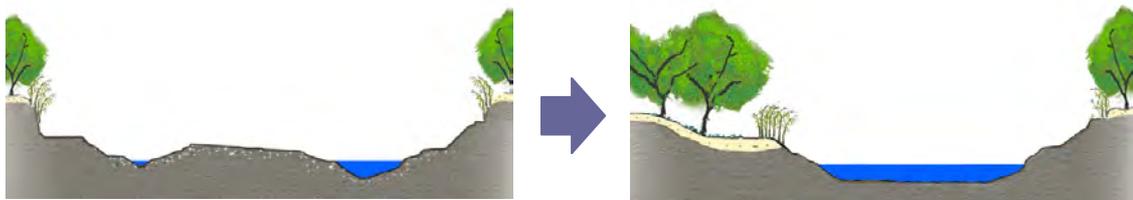


図 2.5.8 プロセスの変化(シナリオ D) : イメージ図

[5] セグメント 2-2：シナリオ E（洪水流量および流送土砂量の減少）

次のような人為的インパクトにおける河川環境の変化を考える。

(1) 人為的インパクトの条件

セグメント 2-2 の粗砂を河床材料にも持つ河道を考える。沖積地上流近くに大ダムが建設され、平均年最大流量が $1500\text{m}^3/\text{s}$ 程度から $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度に変化することをイメージする。河床勾配は $1/2000$ 、代表粒径は 0.1cm 、流量に対応する砂分以上の土砂は供給されないとする（ダム地点と検討対象区間の距離が短く、土砂の供給源がない）。

(2) 変化プロセスシナリオ

変更前の平均年最大流量時の河床に働く掃流力 (u_*^2) は、 $17\text{N}/\text{m}^2$ ($170\text{cm}^2/\text{s}^2$) 程度である。 $\phi_2 = 10$ 程度である。このときの平均水深 H_m および川幅 B は式 (2.3.3)、式 (2.3.4) より 3.47m 、 338m となる。 $B/H_m=95$ となり洪水時 2 列程度、小流量時多列砂州が形成されている。

以下に変化シナリオを記す。

ステップ 1：川幅 338m の河道に多列の砂州が形成されている。砂州頂高は豊水位程度で水面に露出程度の高さである。草本類は低水路には侵入していない。

ステップ 2：洪水流量および供給土砂量が急減するため、変更前の滞筋に流水が集中し、上流から滞筋部の河床低下が進む。砂州の頂部および湾曲内湾側は冠水頻度の低下により B 集団である細砂が掃流形式で運ばれ河床が高くなる。滞筋部では上流からの砂分の供給減少のため河床中の小量存在した C 集団である砂利が取り残され、量が多くなる。C 集団が存在しない場合は河床低下が進行し、難侵食層の露出によって止まる。

ステップ 3：砂州頂部の冠水頻度が滞部の河床低下および洪水流量の減少により、そこに小粒径のものが堆積する。ただし細粒分の供給土砂も減少するため堆積速度は遅くなる。豊水位程度以上のところに草本類の進入を見る。

ステップ 4：草本類の進入が生じたところでは、ワッシュロード（シルト・粘土）の堆積が生じ、自然堤防地形が生じる。

ステップ 5：高水敷化されたところでは、ヤナギ、エノキなどの木本類が侵入する（5～15 年）。

ステップ 6：河床は C 集団が多くなり河床低下は止まる。アーマ化される区間は時間とともに延伸する。川幅は流量減少比より小さくなる。C 集団が少ない場合は、泥層・洪積層の露出と移動性砂州が消滅する（鬼怒川）。

水生生物は砂川対応種から砂利川、軟岩、粘土層対応種に変化する。

ステップ 7：静的安定状態となる（20～40 年）。

(3) 生態系の変化フロー

変化プロセスの変化をフロー図およびイメージ図に描くと **図 2.5.9**、**図 2.5.10** となる。

セグメント2-2: シナリオE(洪水流量および流送土砂量の減少)
【粗砂を河床材料に持つ河道】

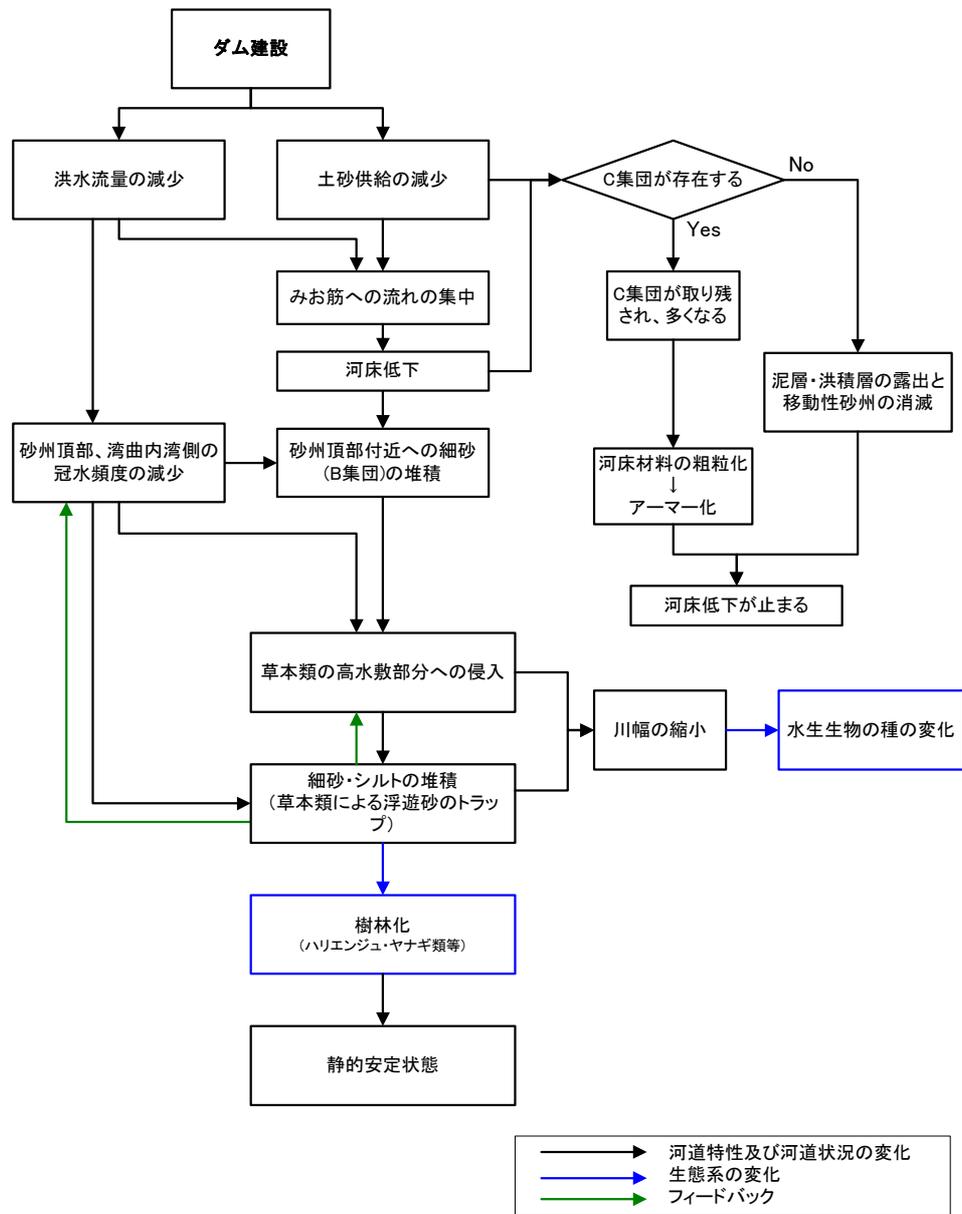


図 2.5.9 プロセスの変化(シナリオ E) : フロー図

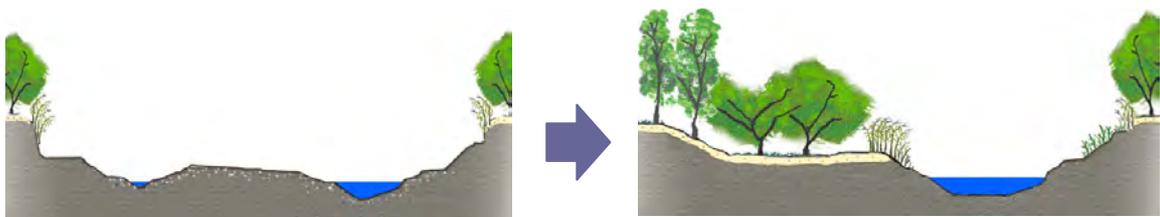


図 2.5.10 プロセスの変化(シナリオ E) : イメージ図

注

注 1) 土砂の移動限界無次元掃流力

粒径 d の均一河床材料は、河床に働く掃流力 τ が、ある一定以上となった時に移動を始める。移動始める時の掃流力を移動限界掃流力 τ_c といい、これを $(\rho_s - \rho_w)gd$ で除したものを無次元移動限界掃流力 τ_{*c} という。Shields, A(1936)によれば、通常の河床材料（水中比重 s が 1.65 程度）であれば、粒径 d が 0.125mm で 0.08, 0.5mm で 0.03, 0.1cm で 0.03, 0.2cm で 0.04, 0.3cm 以上ではほぼ一定であり 0.06 程度である。

実際の河床材料は混合河床材料であり、ここの粒径 d の無次元移動限界掃流力は粒度分布形の影響を受ける。小粒径は均一河床材料の場合に比べて動きにくくなり、大粒径は動き易くなる（混合度の違いが及ぼす影響についての詳細については、山本（1994）参照）。

注 2) 流速係数

流速係数 ϕ は、 $\phi = V_m/u_*$ で定義される。これは流水の流れにくさ（やすさ）を表す無次元の物理量である。この ϕ は河床に発生する小規模河床波の形状に規定され、これは水理量の関数である。平均年最大流量時の ϕ は、ほぼ代表粒径 d_r と河床勾配で規定される（山本，1994）。

注 3) 河川生態系の構造に関する情報は少ない。それは河川が変動の場であり、実態把握を個人的レベルで把握するには情報収集に困難を覚え、研究対象として参入する研究者が少なかったことによる。漸く平成の時代に入り河川環境が技術的対照となることにより研究参入者が増加した。方法論的には物質収支を構造の基本説明要素とする地球化学的・衛生工学的的方法論、動物進化史・動物社会学的な生物学的方法論、生態系情報を人間との関わりで把握しようとする応用生態学・工学的的方法論が競い合っている。

注 4) 河川生態を生態学者と土木工学者が同じ土俵で研究しようという試みが生態学者、建設省河川局治水課、建設省土木研究所の関係者で話し合われ、1995年に河川生態学術研究会が設置された。現在、多摩川、信濃川、木津川、北川、標津川で総合的な研究なされ、多くの成果を上げている。

また 1994 年より河川整備基金の事業として（財）河川環境管理財団を事務局とした河川生態の総合研究が行われている。

注 5) 平成 2 年（1994）建設省河川局は「河川水辺の国勢調査」を始めた。5 年ごとに各生態項目（底生動物、魚介類、陸上昆虫類等、両生類・爬虫類・哺乳類、鳥類、植物、河川空間利用実態）を調査することとされている。

注 6) 水際線の前後に生育する抽水植物、浮葉植物、水中の生育する沈水植物は静水的環境にある湖沼では、典型的な植物景観をなす。移動床である沖積河川では浮葉植物、沈水植物の生育基盤として適地とはいえない。

抽水植物はセグメント 2-2 および 3 以外では余りみられないが、水位変動と地形変化の少ない三日月湖、落ち堀、ワンド、後背湿地などに生育する。

沈水植物（水草）は、砂・礫床の三日月湖、落ち堀、ワンド、たまり、河床変動の少ない湧水地から流下する水深の浅い小河川、農業用排水路などで見られる。

注 7) （財）リバーフロント整備センター編著（1998）「さかなから見た落差工の配慮事項」において水生動物（魚類、両生類）の 31 種について「生活史の整理フォーマット」が作成されている。

参考文献

- 芦田和男, 奥村武信(1974) ダム堆砂に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 17 号, pp. 555-570.
- アンドレアス・ディートリッヒ, (1998) 生物工学護岸(Biological Engineering Method)の強度について, 国際水資源工学会議に発表したものを奥道泰治が補足資料と編集を加えて和訳したもの, 多自然研究 No. 39, pp. 14-16.
- 池田宏, 伊勢屋ふじこ(1986) ヌポロマポロ川の蛇行変遷, 北方科学調査報告 7.
- 季参熙, 藤田光一, 山本晃一(1999) 礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ, 水工論文集第 42 巻, pp. 977-982.
- 石井正典(1998) 森林の渇水緩和機能についての研究(Ⅲ)ー米代川水系小又川の夏期の流況についてー. 水利科学 No. 248 (Vol. 43-3) 水利科学研究所, pp. 18-36.
- 石川信吾(1996) 河川環境と水辺植生 6 章 河川植生の特性, 奥田重俊, 佐々木寧 編, ソフトサイエンス社.
- 石川晴雄, 浅田宏(1973) 発電用貯水池土砂堆積状況に関する調査報告書, 電力中央研究所技術第二研究報告, 72019.
- 伊勢屋ふじこ(1980) 砂床河川における自然堤防の形成, 1980 年日本地理学会春季大会前刷.
- 伊藤和典, 須賀堯三, 茂木信祥, 池田裕一(2000) 平成 10 年 8 月末の那須出水による余笹川の流路変化特性, 水工学論文集, 第 44 巻.
- 宇多高明, 藤田光一, 佐々木克也, 服部敦, 平林治(1994) 河道特性による植物群落の分類ー利根川と鬼怒川を実例としてー, 土木研究所資料第 3249 号.
- 宇多高明ほか(1997) 洪水流を受けた時の多自然型河岸防禦工・粘性土・植生の挙動. 土木研究所資料第 3489 号, pp. 294-295.
- 海野修司, 辰野剛志, 山本晃一, 渡口正史, 本田信二(2004) 相模川水系の土砂管理と河川環境の関連性に関する研究, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp. 185-190.
- 榎本真二, 服部敦, 瀬崎智之, 伊藤政彦, 末次忠司, 藤田光一(2004) 礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答, 遷移および群落拡大, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp. 303-308.
- 沖野外輝夫(2001) 千曲川鼠橋調査区間の陸上植物群集, 千曲川の総合研究, 河川学術研究会千曲川研究グループ, pp. 359-384.
- 沖野外輝夫(2005) 千曲川における河川生態学術研究の取り込みと成果, River Front Vol. 52, pp. 8-13.
- 奥田重俊(2000) 河川生態環境評価法 第 2 章河川生態環境を規定する基礎概念, 東京大学出版会, pp. 18-27.
- 奥田重俊, 佐々木寧編(1996) 河川植生と水辺植生, ソフトサイエンス社.
- 小倉紀雄, 市川秀夫, 安田卓哉(1985) 洪水による南浅川上流域の水生昆虫群集の破壊と現存量の遷移, とうきゅう環境浄化財団研究助成 No. 77 : 20.
- 沖野外輝夫(2001) 附着藻類の現存量の変動, 千曲川の総合研究, pp. 263-275.
- 可児藤吉(1944) 溪流棲昆虫の生態. 昆虫(上), 古川晴男(編), 研究社, pp. 117-317.

- 河川環境管理財団(2002) 第1回相模川水系土砂管理懇談会資料.
- 河川植生の生育特性に関する研究会(1998) 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.
- 茅場裕一, 島谷幸宏(1995) 扇状地河川における地被状態の長期変化とその要因に関する基礎的研究, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, 建設省土木研究所, pp. 191-196.
- 木下良作(1961) 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源調査局資料 36号.
- 木下良作(1987) 洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的検討, 文部省科学研究費 自然災害特別研究(I)「沖積地河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究」報告書.
- 木下良作, 三輪弑(1979) 砂レキ堆の位置が安定化する流路形状, 新砂防, Vol. 94, pp. 12-17.
- 吉良竜夫(1949) 日本の森林帯, 日本林業技術協会.
- 吉良八郎(1978) 日本における貯水池の補足率と土砂収支, 農業土木学会論文集, (78). 建設省河川局編, 流量年表. 日本河川協会.
- 建設省河川局開発課監修, 多目的ダム管理年報. 中国建設弘済会.
- 建設省河川局河川計画課(1973) 主要河川流況表(昭和13~45年). 253p.
- 建設省河川局開発課, 土木研究所水工水資源研究室(2000) ダム貯水池の土砂管理に関する研究, 第53回建設省技術研究会報告, 土木研究センター.
- 建設省河川局治水課, 建設省土木研究所(1989) 河道特性に関する研究—その1—洪水流の挙動と河道—, 第43回建設省技術研究会, (財)土木研究センター.
- 建設省河川局治水課, 建設省土木研究所(1990) 河道特性に関する研究—その2—高水敷の機能に関する研究, 第44回建設省技術研究会, (財)土木研究センター, pp. 783-810.
- 建設省治水課・土木研究所(1991) 河道特性に関する研究その3 河床変動と河道計画に関する研究, 第45回建設省技術研究会報告, pp. 696-737.
- 建設省河川局治水課, 河川局防災課, 土木研究所河川研究室, 土木研究所海岸研究室(2000) 水系一貫土砂管理に向けた河川における土砂観測, 土砂動態マップの作成およびモニター体制構築に関する研究, 平成12年度(第54回)建設省技術研究会指定課題.
- 小出博(1973a) 日本の国土 上, 東京大学出版会, pp. 59-70.
- 小出博(1970) 日本の河川—自然史と社会史—. 東京大学出版会. 248p.
- 小出博(1972) 日本の河川研究—地域性と個別性—. 東京大学出版会. 377p.
- 国土技術研究センター編(2002) 河道計画検討の手引き, 山海堂.
- 国土交通省河川局治水課, 国総研河川部河川研究室(2002) 河床変動の特性把握と予測に関する研究, 平成14年度国土交通省国土技術研究会.
- 黄河水理委員会宣伝出版中心編(1991) 黄河系列画冊 黄河花園口, 中国環境科学出版社.
- 近藤純正(1994) 水環境の気象学. 朝倉書店. 350p.
- 桜井善雄(1995) 多自然型川づくりとビオトープ(1), 多自然研究, No. 3.
- 白川直樹(2005) 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系 第3章, 技報堂, pp. 39-55.
- 末次忠司, 藤田光一, 服部敦, 瀬崎智之, 伊藤政彦, 榎本真二(2004) 礫床河川に繁茂する植

- 生の洪水攪乱に対する応答，遷移および群落の拡大の特性，国土技術政策総合研究所資料，No. 161.
- 須賀堯三，島貫徹，徳永敏郎(1976) 全国河川上流部の流出土砂量，土木技術資料 Vol. 18-2.
- 須賀堯三，池田雄一，伊藤和典(2000) 余笹川にみる低頻度大洪水による横侵食性河道変化の実態とその考察，河川整備基金助成報告書.
- 角哲也(2003) 日本における貯水池土砂管理，流域一貫の土砂管理，第3回世界水フォーラム統合的流域および水資源管理分科会，(財)ダム水源地環境管理センター，pp. 103-118.
- 清水義彦(2002) 河川整備基金事業，自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系の関係に関する研究 第6章，(財)河川環境管理財団，pp. 103-129.
- ダム水源地環境整備センター(2003) ダム土砂管理推進検討会資料，未発表.
- 津田早苗，森下裕子(1972) 河川生態系の復元力に関する調査報告書，水中環境の変化と生物相—その破壊と回復.
- 辻本哲朗(1993) 手取川扇状地区間の河原の植生群落と河道特性，金沢大学日本海域研究所報告第25号，pp. 83-99.
- 辻本哲朗(1999) 河川の自然復元—目標景観，応用生態学会，pp. 7-14.
- 辻本哲朗(1998) 河道変遷特性に関する研究，(財)河川環境管理財団，pp. 77-86.
- 戸田祐嗣，西村明，池田俊介(2004) 糸状藻・非糸状藻の増殖-剥離-種間競争に関する室内実験，河川技術論文集第10巻，pp. 483-488.
- 沼田眞，岩瀬徹(2002) 図説 日本の植生，講談社学術文庫.
- 新潟県土木部河川課，上越土木事務所(2001) 平成7年災関川災害復旧助成事業工事記録誌，新潟県.
- 日本ダム協会(2001) ダム年鑑2001，p. 1543.
- 花籠秀輔(1973) フィルダムの異常洪水流量設計のための資料，土木技術資料，Vol. 7-22.
- 平林桂(2003) 流域土砂動態およびそれが河道地形形成に及ぼす影響に関する研究，第2章，3章，山梨大学大学院学位請求論文.
- 福岡捷二，藤田光一(1990) 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響，土木研究所報告第180号.
- 藤井政人，山本晃一，深谷渉(1993) 河岸形成過程に関する研究—利根川・川内川での土砂堆積の実態調査，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，土木学会水理委員会基礎水理部会，pp. 155-162.
- 藤田光一，季参熙，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性域消長の機構とシミュレーション，土木学会論文集，No. 747/II-65，pp. 41-60.
- 藤田光一，近藤和仁，瀬崎智之，徳田真，服部敦，吉田昌樹(2000) 出水による砂州上植生の破壊機構，多摩川の総合研究，pp. 761-770.
- 藤田光一，平館治，服部敦，山内芳郎，加藤信行(1999) 水系土砂動態マップの作成と利用 — 潤沼川と江合川の事例から— 土木技術資料，41-7，pp. 42-47.
- 藤田光一，山本晃一，赤堀安宏(1998) 勾配・河床材料の急変点を持つ沖積河道縦断形の形成機構と縦断変化予測，土木学会論文集，No. 600/II-44，pp. 37-50.

- 皆川朋子ほか(2000) 出水による付着藻類と底生動物の変化, 多摩川の総合研究, pp. 771-781.
- 虫明功臣・高橋裕・安藤義久(1981) 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, 土木学会論文集, No. 309, pp. 51-62.
- 茂木信祥, 須賀堯三, 池田裕一(1999) 鬼怒川河道における高木の育成特性について, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp. 252-253.
- リバーフロント整備センター 編(1999) 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp. 154-171.
- リバーフロント整備センター 編著(1998) 魚からみた落差工への配慮事項, (財)リバーフロント整備センター.
- リバーフロント整備センター 編(2000) 河川植生の基礎知識, (財)リバーフロント整備センター
- 矢崎健太郎(2004) 矢作川中流部における大型糸状緑藻群落の発達, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp. 49-52.
- 矢作川の伝統工法を観察する会(2001) 矢作川の伝統工法, (社)中部建設協会, pp. 143-147.
- 山本晃一(1976) 急流河川の河床材料調査法と表面粒度特性, 土木研究所報告, 第 147 号 pp. 1-20.
- 山本晃一(1976) ダム下流の河床低下に関する研究, 土木研究所報告, 第 147 号, pp. 31-43.
- 山本晃一(1978) 河口処理論[1], 土木研究所資料, 第 1394 号, pp. 47-53.
- 山本晃一(1989) 気候・地形・地質が河道特性に及ぼす影響に関するノート, 土木研究所資料, 第 2795 号, pp. 101-122.
- 山本晃一(1991) 沖積低地河川の河道特性に関する研究ノート, 土木研究所資料, 第 2912 号, pp. 112-155.
- 山本晃一(1994) 沖積河川学, 山海堂, pp. 1-337.
- 山本晃一(1999) 河道計画の技術史 補章 沖積河川の河道特性, 山海堂, pp. 603-640.
- 山本晃一(2000) 長江中-下流部の河道特性, 河川環境総合研究所報告, 第 6 号, (財)河川環境管理財団, pp. 107-138.
- 山本晃一(2002) 河川整備基金事業 自然的・人為的インパクトと河川生態系の関係に関する研究 4.6 大洪水と河道の応答, (財)河川環境管理財団.
- 山本晃一(2004) 構造沖積河川学, 山海堂, pp. 429-455, 520-533, 543-545.
- 山本晃一編著(2003) 護岸・水制の計画・設計, 山海堂.
- 山本晃一, 藤田光一, 佐々木克也, 有澤俊治(1993a) 低水路川幅変化における土砂と植生の役割, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp. 233-238.
- 山本晃一, 藤田光一, 佐々木克也, 有澤俊治(1993b) 河岸形成における植生の役割, 土木技術資料, Vol. 35-8, pp. 54-60.
- 山本晃一・藤田光一(1999) 土砂の制御は可能か, 科学 Vol. 69, No. 12, pp. 1060-1067.
- 山本晃一, 高橋晃(1993c) 扇状地河川の河道特性と河道処理, 土木研究所資料, 第 3159 号.
- 山本晃一, 高橋晃, 佐藤英治(1989) 河道平面形状と砂州の関係に関する基礎調査, 土木研究

所資料, 第 2806 号.

- 山本晃一, 長沼宏一, 渡辺明英, 大森徹治(1993d) 鶴見川河口部の土砂堆積と浚渫計画, 建設省関東地方建設局京浜工事事務所.
- 猶原恭爾(1945) 荒川河原植物群落の生態学的研究並びに其の治水植栽と高水敷牧場化, 資源科学研究叢書 8.
- 吉田弘・端野道夫(1999) 森林整備と水源かん養機能の関係について—河川工学・水資源工学の立場から—, 水利科学, No. 248 (Vol. 43-3), 水利科学研究所, pp. 1-17.
- 渡辺敏, 藤田光一, 塚原隆夫(1998) 安定した砂礫州における草本植生発達の有無を分ける規定要因, 水工学論文集, 第 42 卷, pp. 439-444.
- 渡辺泰徳(2000) 洪水時の物質収支, 多摩川の総合研究, pp. 785-788.
- Begemann. W. and Schiechl H. M., 三浦裕二, 藤井和 訳(1997) 工学的生物学の实践, 彰国社.
- Brune G. M. (1953) Trap efficiency in reservoirs, Tran. A. G. U., 34(3).
- Chow, V. T. (1959) open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, pp. 101, 1. 26-106, 1. 26.
- Coleman, J. M. (1969) Brahmaputra River: Channel processes and sedimentation, Sedimentary Geology, Vol. 3, pp. 129-239.
- Kondrat'yev, N. Y. (1968) Hydromorphologi principles of computation of free meandering, Trans. of the State Hydrologic Institute (Trudy GGI), No. 155, pp. 5-38.
- Shields, A. (1936) Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebewegung, Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Germany. 61.
- Shirakawa, N., Tamai, N. & Phouthone, S. (2002) Change of occurrence of ecological flushing discharge by multiple purpose dams and economic evaluation of re-regulation. Proceedings of Environmental Flows for River Systems, 4th International Ecohydraulics Symposium.
- Yoshikawa T. (1974) Denudation and tectonic movement in contemporary Japan, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, 6, pp. 1-14.

第 3 章 個別河川事例研究を通じた河川生態系の変化シナリオの検証と高度化

3.1 検証法とモデルの高度化

本章では 2.5 で示した仮説シナリオが実際に適用できるのか、上流にダム貯水池が建設され洪水流量が減少した矢作川、木津川、手取川、江の川を対象に、河道形状や河道内動植物と流量変動の関係を詳細に分析し、シナリオが適切であるか検証する。

また藤田ほか(2003)、末次ほか(2004)により開発された樹林化モデルが適用しえるのか 4 河川(手取川、肱川、大井川、小瀬川)において適用し、モデルの問題点、改良点をさぐる。

3.2 検討対象河川の河道および生態環境の変化

河川の河道および生態環境の変化は、河道掘削、山間部の土砂生産量制御構造物の建設、取水構造物の建設、河岸侵食防止工の設置などによる影響を受けており、単一の要因による変化ではない。河道および生態環境の変化の分析に当たっては、この影響程度を含めた分析を行う必要がある。

3.2.1 矢作川

(1) 河川の概要

矢作川は、その源を中央アルプス南端の長野県下伊那郡大川入山(標高 1,908m)に発し、根羽川、名倉川等の支川を合わせながら山岳地帯を貫流し、平野部に出て巴川、乙川と合流した後、矢作古川を分派し、三河湾に注ぐ、幹川流路延長 117km、流域面積 1,830km²の一級河川である。流域の地形は、上流域では、標高 1,000m 前後の三河高原からなり、中下流域では、西三河平野として丘陵地や低地からなっている。流域の地質は、上流域では花崗岩類や雲母片岩、石英片岩等の領家変成岩類からなる。このため、矢作川中下流部には白くかがやく砂州がみられる。

矢作古川分派点までは 1/1,100~1/2,200 程度となり、それより河口部までは、1/2,100~1/4,600 程度である。源流から小原村(60km 付近)までは溪流の様相を、小原村より下流の中畑橋(4.6k 付近)までは瀬と淵が混在する中流域の様相を呈し、中畑橋より河口までは瀬と淵の区分が明瞭でない静水域が広がる。

矢作川の基本高水流量は、岩津地点で(1994 年改定) 8100m³/s であり、流量配分は、**図 3.2.2**のごとくである。

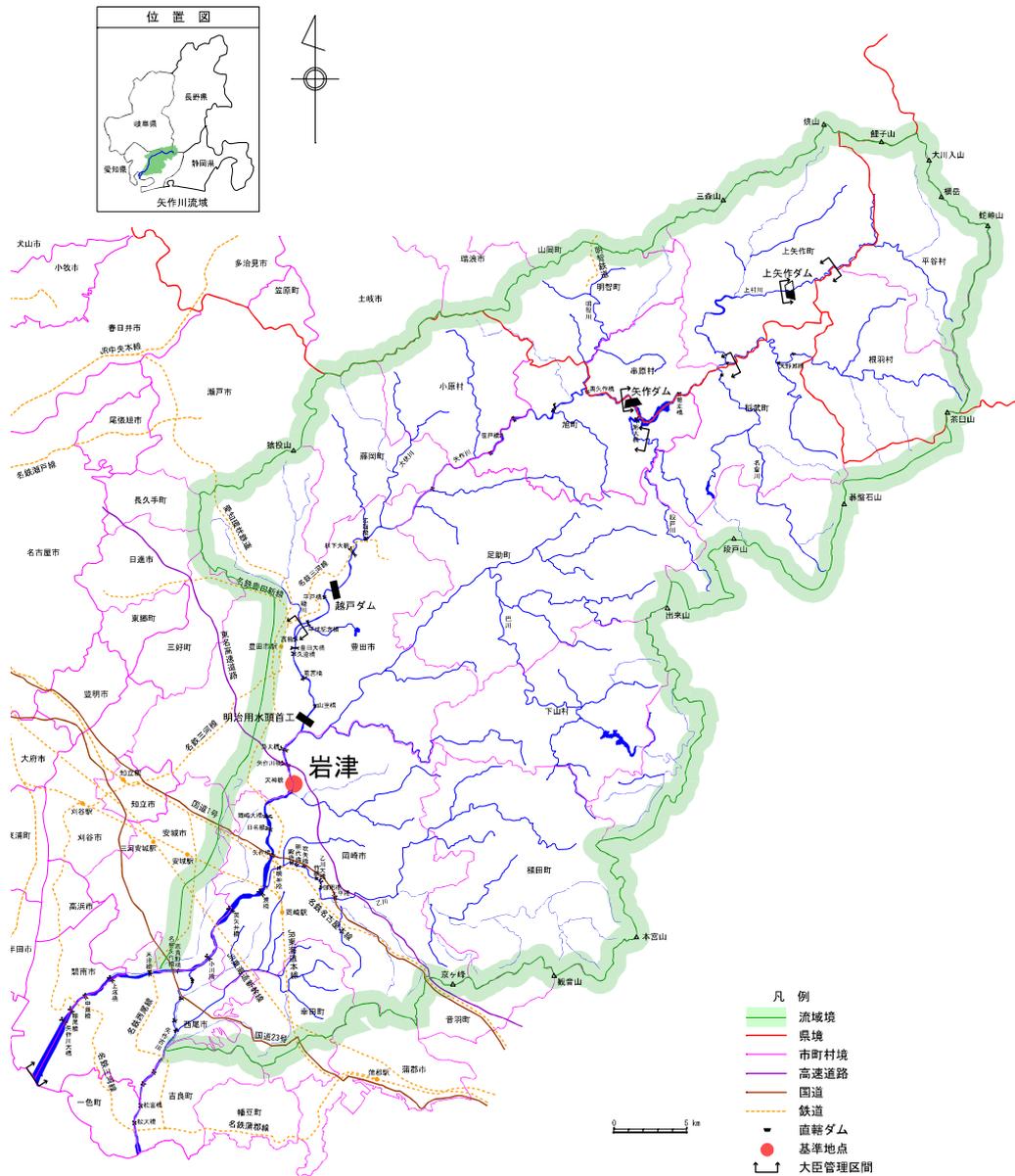


图 3.2.1 矢作川流域図

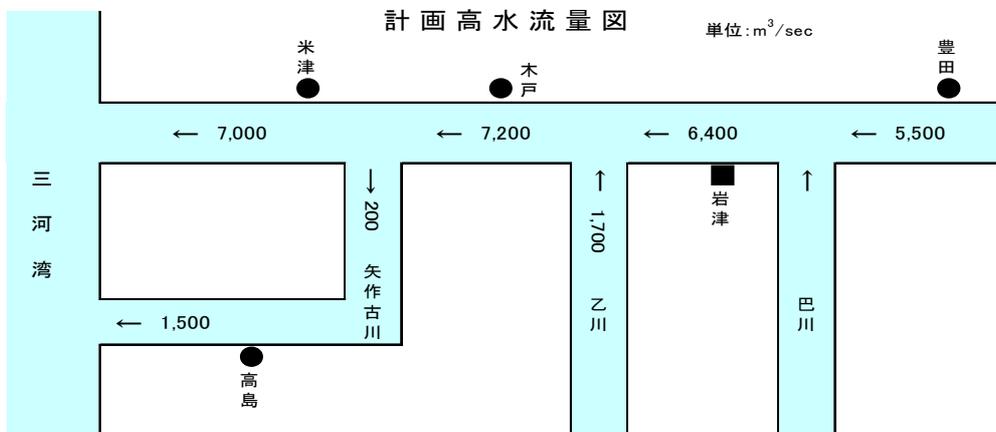


图 3.2.2 計画流量配分図

(2) 河道および河川環境に与えた人為的インパクト

河口より約 80km 上流に位置する矢作ダムは、1971（昭和 46）年に竣工した有効貯水量 $65,000 \times 10^3 \text{m}^3$ 多目的ダムである。

矢作ダムの集水面積は 505.5km^2 で矢作川流域の約 28% を占めている。また近年 10 ヶ年の年間総流入量が $768.4 \times 10^6 \text{m}^3$ であることから、ダムの回転率は 13.2 回/年である。なお電力ダムである船戸ダムが 1929 年に完成している。このダムは総貯水量が $2,876 \times 10^3 \text{m}^3$ で流域面積 941km^2 である。また 35km 地点に明治用水取水堰があり、この堰が堰上流の河床の侵食基準面となっている。矢作川下流河道に与えたに直接的な人為的インパクトとして影響の大きいには、この 3 つの施設である。特にその貯水量と洪水調節機能より矢作ダムの影響は大きい。

図 3.2.3 に矢作ダムの計画洪水調節図を示す。

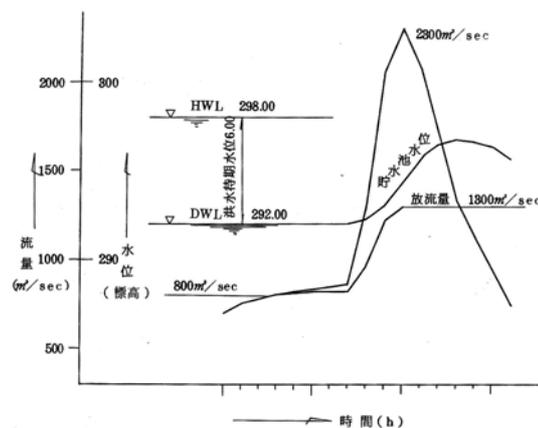


図 3.2.3 矢作ダムの洪水調節図

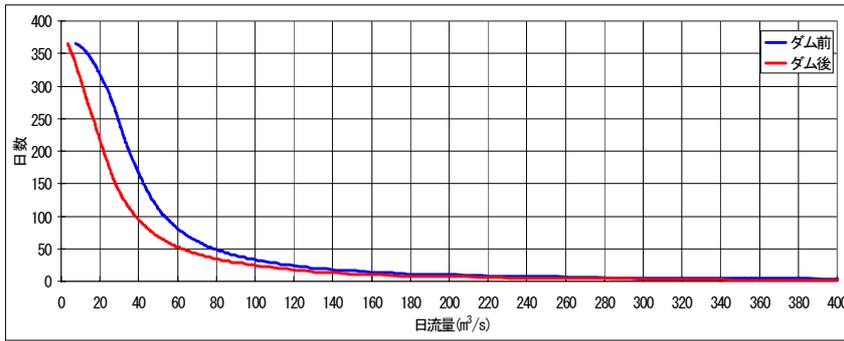
(3) ダムの建設による流況の変化と土砂環境の変化

1) 流況の変化

河口より 29.2km 上流の岩津地点におけるダムの建設による日流量の流況の変化を比較すると表 3.2.1、図 3.2.4 のとおりである。豊・平・低・濁流量はすべて減少傾向にある。これは明治頭首工地点より取水され、その水が還流しないためである。また矢作ダム完成前後の日流量階別の発生頻度（岩津地点）を 10 年に何回生じたかを比べたのが図 3.2.5 である。小出水の発生頻度も低下しているのが分かる。

平均年最大流量は図 3.2.5 ダム建設前の 1946 年から 1972 年で $1,754 \text{m}^3/\text{s}$ が完成後 1973～2000 年で $1,240 \text{m}^3/\text{s}$ となり（完成前の 71%）、約 $500 \text{m}^3/\text{s}$ の減少となっている。また矢作ダム完成前後の年最大流量の流量階別の発生頻度（岩津地点）を 10 年に何回生じたかを比べたのが表 3.2.2 である。

表 3.2.1 流況表



岩津地点 (29.2k)		
	ダム設置前 (m³/s)	ダム設置後 (m³/s)
平均年 最大流量	1,500	1,300
豊水流量	57.81	38.90
平水流量	38.65	23.03
低水流量	27.17	13.16
渇水流量	12.95	4.50

図 3.2.4 流況の変化 (岩津地点)

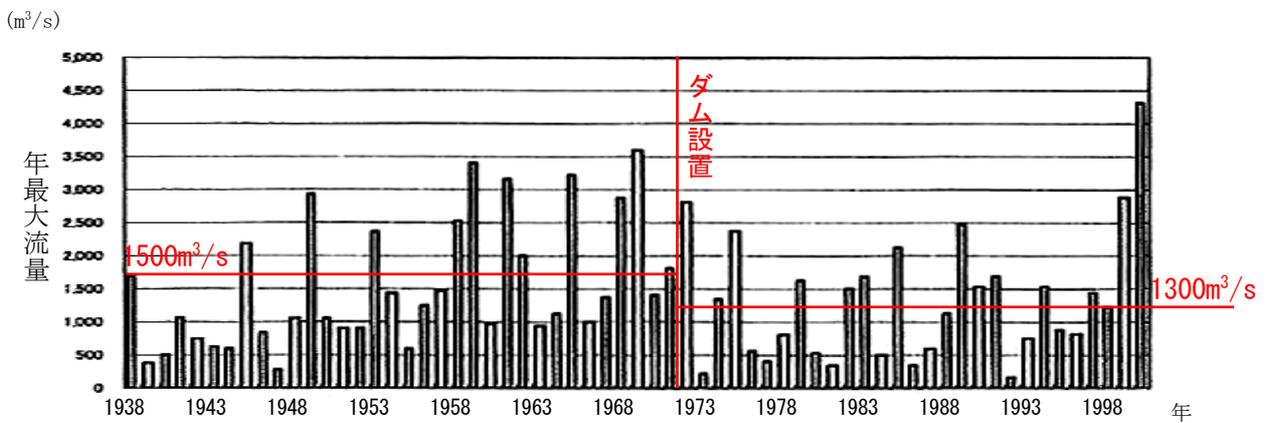


図 3.2.5 年最大流量の変化 (岩津地点)

表 3.2.2 矢作ダム完成前後の洪水発生頻度 (岩津地点)

規模	実回数			10年当たり回数		
	1938~1971	1972~2001	全期間	1938~1971	1972~2001	全期間
	ダム完成前	ダム完成後		ダム完成前	ダム完成後	
50m³/s以上	2932 回 / 27年	2220 回 / 30年	5152 回 / 57年	1085.9 回 / 10年	740.0 回 / 10年	903.9 回 / 10年
100m³/s以上	937 回 / 27年	685 回 / 30年	1622 回 / 57年	347.0 回 / 10年	228.3 回 / 10年	284.6 回 / 10年
200m³/s以上	278 回 / 27年	207 回 / 30年	485 回 / 57年	103.0 回 / 10年	69.0 回 / 10年	85.1 回 / 10年
300m³/s以上	123 回 / 27年	103 回 / 30年	226 回 / 57年	45.6 回 / 10年	34.3 回 / 10年	39.6 回 / 10年
400m³/s以上	75 回 / 27年	58 回 / 30年	133 回 / 57年	27.8 回 / 10年	19.3 回 / 10年	23.3 回 / 10年
500m³/s以上	47 回 / 27年	35 回 / 30年	82 回 / 57年	17.4 回 / 10年	11.7 回 / 10年	14.4 回 / 10年
1,000m³/s以上	10 回 / 27年	8 回 / 30年	18 回 / 57年	3.7 回 / 10年	2.7 回 / 10年	3.2 回 / 10年
1,500m³/s以上	3 回 / 27年	3 回 / 30年	6 回 / 57年	1.1 回 / 10年	1.0 回 / 10年	1.1 回 / 10年
2,000m³/s以上	1 回 / 27年	1 回 / 30年	2 回 / 57年	0.4 回 / 10年	0.3 回 / 10年	0.4 回 / 10年
2,500m³/s以上	1 回 / 27年	0 回 / 30年	1 回 / 57年	0.4 回 / 10年	0.0 回 / 10年	0.2 回 / 10年

注) 1943~1949については欠測のため対象から除外

2) 土砂環境の変化

矢作ダムの回転率は 13.2 回/年である事から、ダムによる土砂の補足率 80～90%程度 (Brune, 1953) と推定される。ただしダムから流出するのはシルト・粘土性分で、砂分以上はほとんど補足される。矢作ダムの集水面積は矢作川流域山地面積 (60.1%) の 45%を占め、矢作川ダム下流河道の土砂環境に及ぼす影響は大きい。

砂利採集は 1961 年頃には年間 55 万 m³/年に達し、それとともに矢作川の河床低下が問題となり、1963 年には砂利採取の規制が開始された。その後、1974 年に特定砂利採取計画が実施され、1988 年には採取計画は終了している。

(4) 河道特性量とセグメント区分

河口より上流の 34km の区間を、現況の河道形状、河床材料等の河道特性量より、以下の 3 区間にセグメント区分した。(表 3.2.3) なおセグメント 2-1 の区間はダム建設前の河床材料は粗砂のセグメント 2-2 の特性を持つ区間であった。

表 3.2.3 代表区間のセグメント区分

区 間	34～30km	30～13km	13～0km
代表粒径 (60%粒径)	20mm	2mm	2mm
平均河床勾配	1/1, 100	1/1, 350	1/5, 200
セグメント区分	2-1	2-2-①	2-2-②

(5) 河床材料の変化

1961 年以降の河床材料の変化を図 3.2.6 に示す。河床材料は 1961 年当初は対象の全区間にわたって平均粒径が 2mm 前後であった。しかし近年、上流側より粗粒化が進行し、上流区間 (34～30km) では、1997 年の調査資料によれば 20mm 程度の平均粒径となっている。さらに、この傾向は下流側へと移動している。

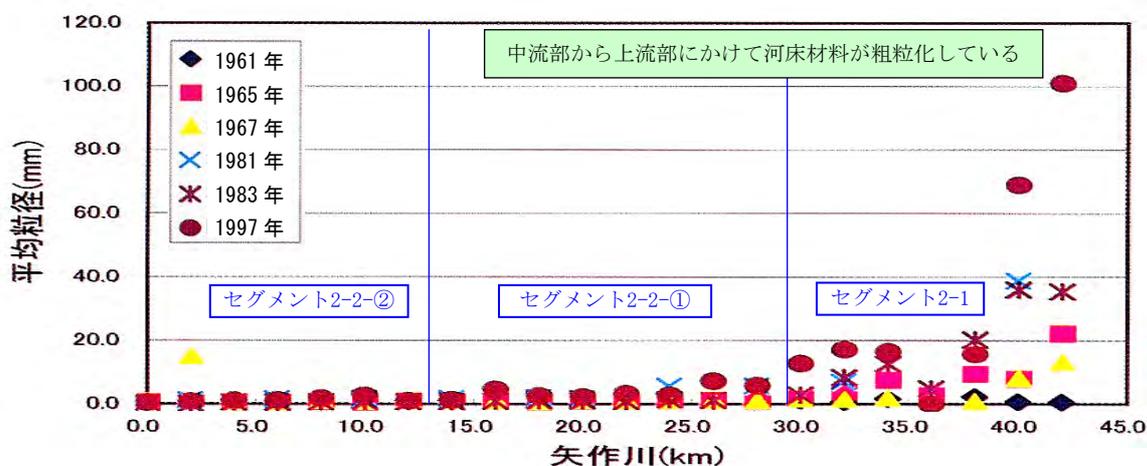


図 3.2.6 河床材料の変化

(6) 河道形状・平面形状・横断形状の変化

ダム建設前後における河道形状の変化を図 3.2.7, 図 3.2.8 に示す. また図 3.2.9 に水面域と砂州(裸地部)の堤防間幅に占める割合の変化を縦断図と示した. 両者の和がほぼ低水路幅に相当する. 各セグメントの河道形状の変化は以下のとおりである.

1) 34km~30km 区間 (セグメント 2-1)

平均河床勾配はダム建設前後ともに $1/1,100$ で変化は殆どない. しかし, 河床は 3m 程度低下し, さらにみお筋の固定と河床材料の粗粒化により河床は移動しにくくなっている.

河床材料は, 小礫(粗砂)の供給減により砂利に変化している (⇒図 3.2.6). 32.0km の低水路幅は中水敷が形成され, 横断図の経年変化からみると 250m から 130m に減少し, ダム建設以前の比べ 52%となっている. 32km 地点は縮小率の大きな断面であり, 本セグメントの平均では, 65%程度である.

2) 30km~13km 区間 (セグメント 2-2-①)

平均河床勾配は $1/1,250$ から $1/1,350$ にやや緩やかになっている. 平均河床は 2m 程度低下し, さらにみお筋の固定により河床は移動しにくくなっている.

河床材料は上流側の一部で砂利化は進行している. 13.6km 断面の低水路幅は中水敷が形成され 230m から 150m に減少し, ダム建設以前の比べ 65%となっている. 13.6km 地点は縮小率の大きな断面であり, 本セグメントの平均では, 80%程度である.

3) 13km~0km 区間 (セグメント 2-2-②)

平均河床勾配は $1/3,300$ から $1/5,200$ へと緩やかになっている. 平均河床は 0~2m 程度低下している. うろこ状の砂州は人為的な掘削も加わり列数が減少し, 3~6km は単列的になっている.

河床掘削により 0~3km 区間は汽水域化し, 川幅の減少は少ないが, それより上流は川幅が減少している.

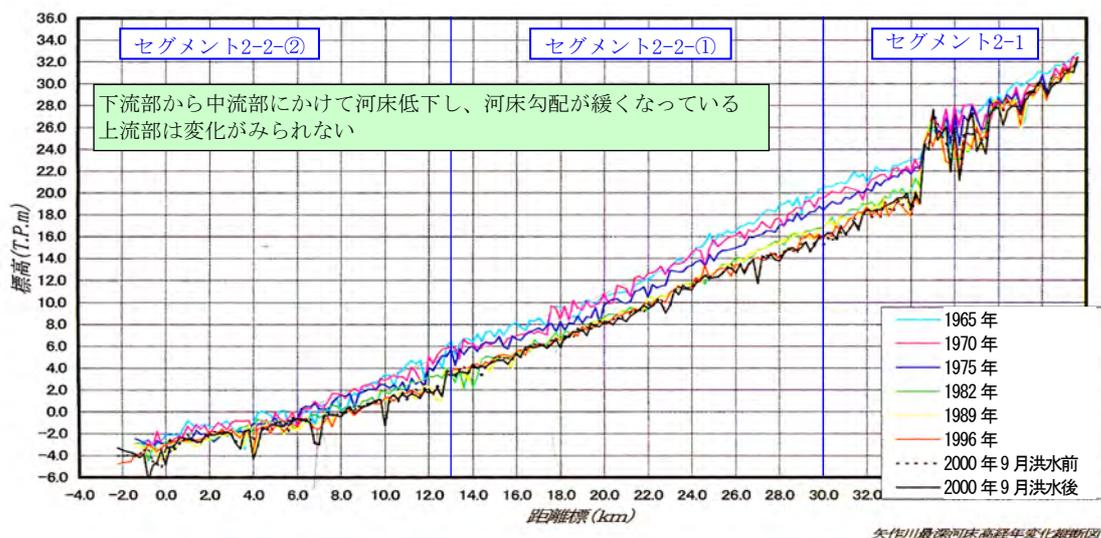


図 3.2.7 縦断形状の変化

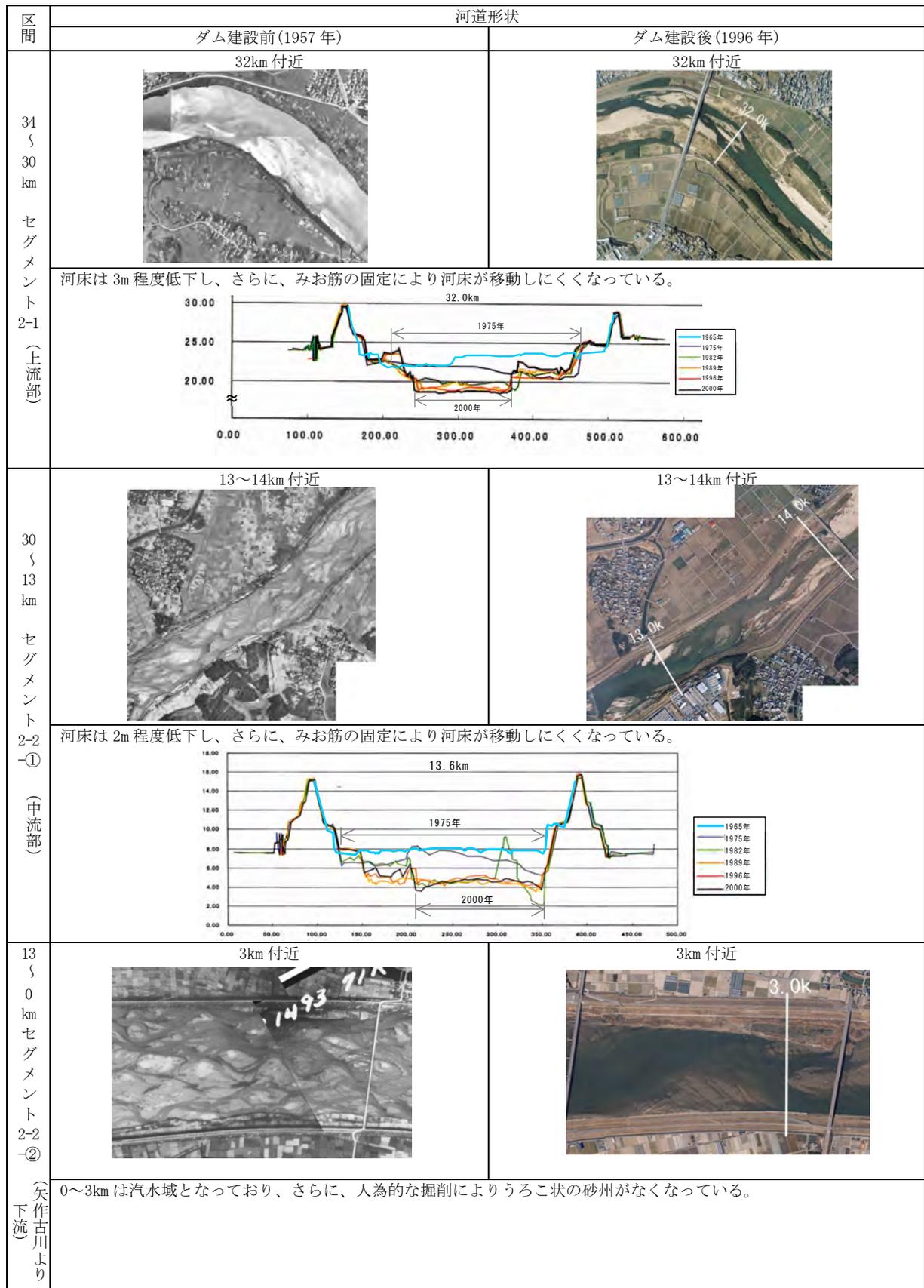


図 3.2.8 平面形状と横断形状の変化

(7) 植生の変化

(4) で示された 3 つのセグメントにおいて、代表的な横断面における植生の変遷を航空写真(昭 1948 年, 1973 年, 1996 年) を用いて整理した。区分は植生域(木本)・植生域(草本), グラウンド・植栽地・人工構造物, 砂州, 開放水面の 5 区分とした。

セグメント 2-1 (34km~30km) に該当する 30.0km の横断面における植生変化を見ると, 1948 年では植生はほとんど見られなかったが, 1973 年以降, 木本を中心に植生面積が増加していることが判る。上流部の矢作ダム建設が 1971 年であることから, ダム建設以降に植生繁茂が進行したことが示唆される。

セグメント 2-2-① (30km~13km) に該当する 14.0km の横断面における植生変化を見ると, 上流部と同様に植生の経年的な増加が見られるが, 樹林が顕著に確認されるのは 1996 年以降であり, 34~30km ほどには樹林化が進行していないことが判る。このことは河道内樹林化が上流から進行していることを示唆する。

セグメント 2-2-② (13km~0km) に該当するに該当する 6.0km の横断面における植生変化を見ると, 植生の発達は見られるが, 1973 年以降ではむしろ減少傾向を示している。理由としては人為的掘削による汽水域環境の上流への移動が考えられる。

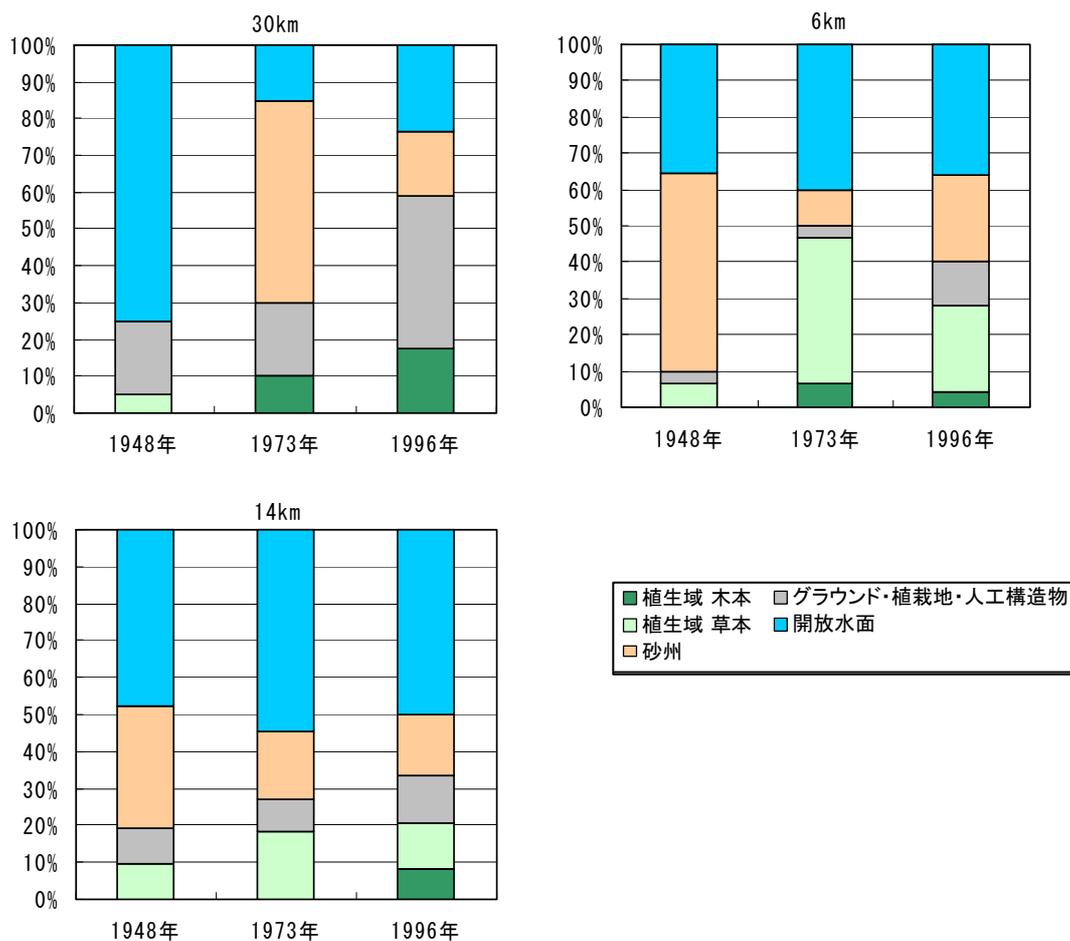


図 3.2.9 地被状態の変化

(8) 横断面テラスごとの流量と掃流力の関係

ダム建設前後の代表断面における横断形状の変化とテラスとの流量と掃流力について整理すると図 3.2.10 に示すとおりである。図中の水位(H)と流量(Q)、あるいは水位(H)と掃流力(τ)の関係曲線は、代表断面地点の計画高水勾配(I)を用い、1mごとに水位を仮定してH-Q曲線の場合は Manning式 ($Q=1/n \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$)、H- τ 曲線の場合は掃流力算定式($\tau = \rho ghI$)より作成したものである。ここに、n:粗度係数、A:河積、R:径深、 ρ :水密度、g:重力加速度、h:水深である。

ダム建設後はいずれの断面も新たに高水敷や中水敷が形成されている。この高水敷あるいは中水敷高までの河川流量はほぼダム建設後の平均年最大流量に対応している。

一方、掃流力は河床低下や低水路幅の縮小によって、低水路河床に対してはダム建設前後で平均年最大流量が約 500 m³/s の変化であるにもかかわらず、変化は小さく、ほぼ同程度の値となっている。

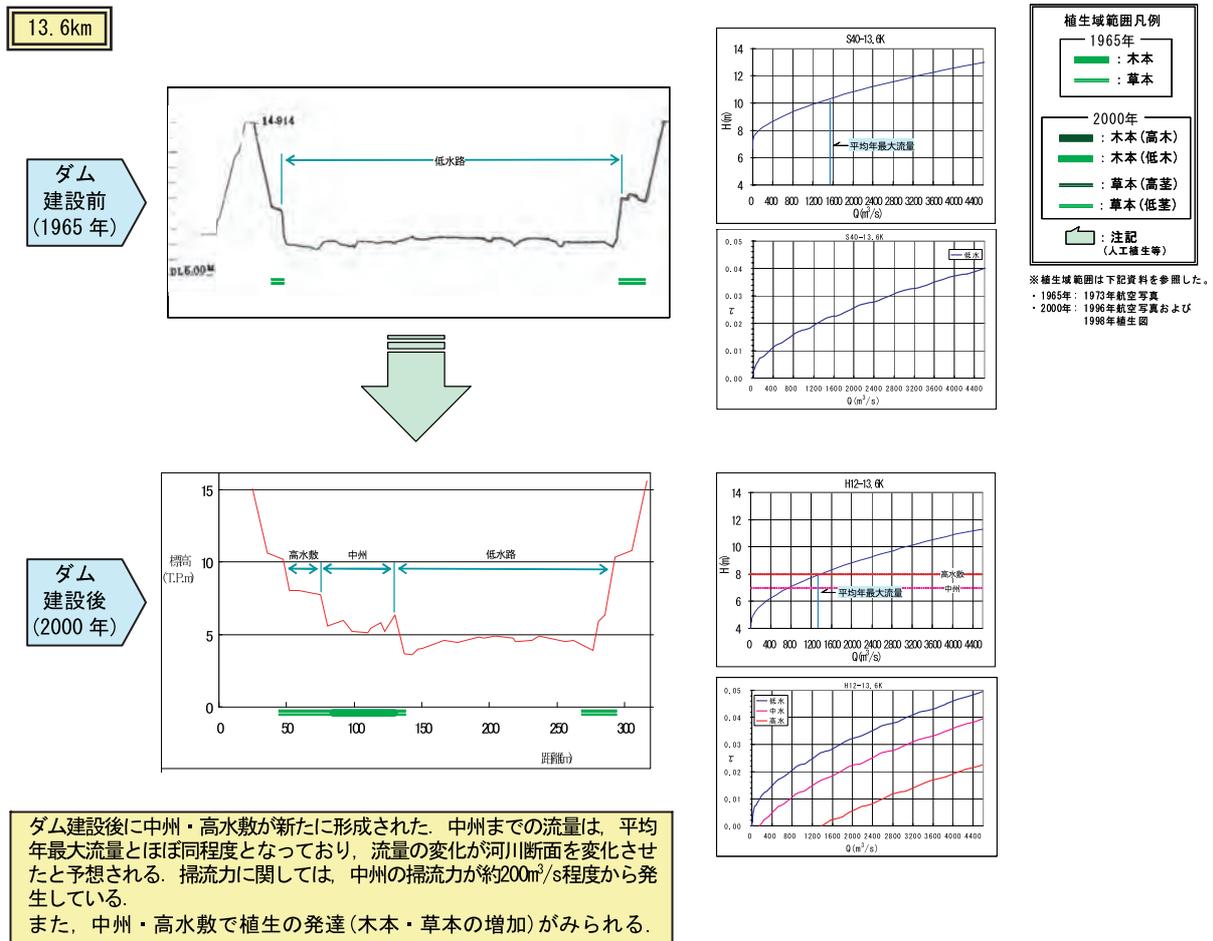


図 3.2.10(1) 横断形状の変化と流量、掃流力の関係 (1)

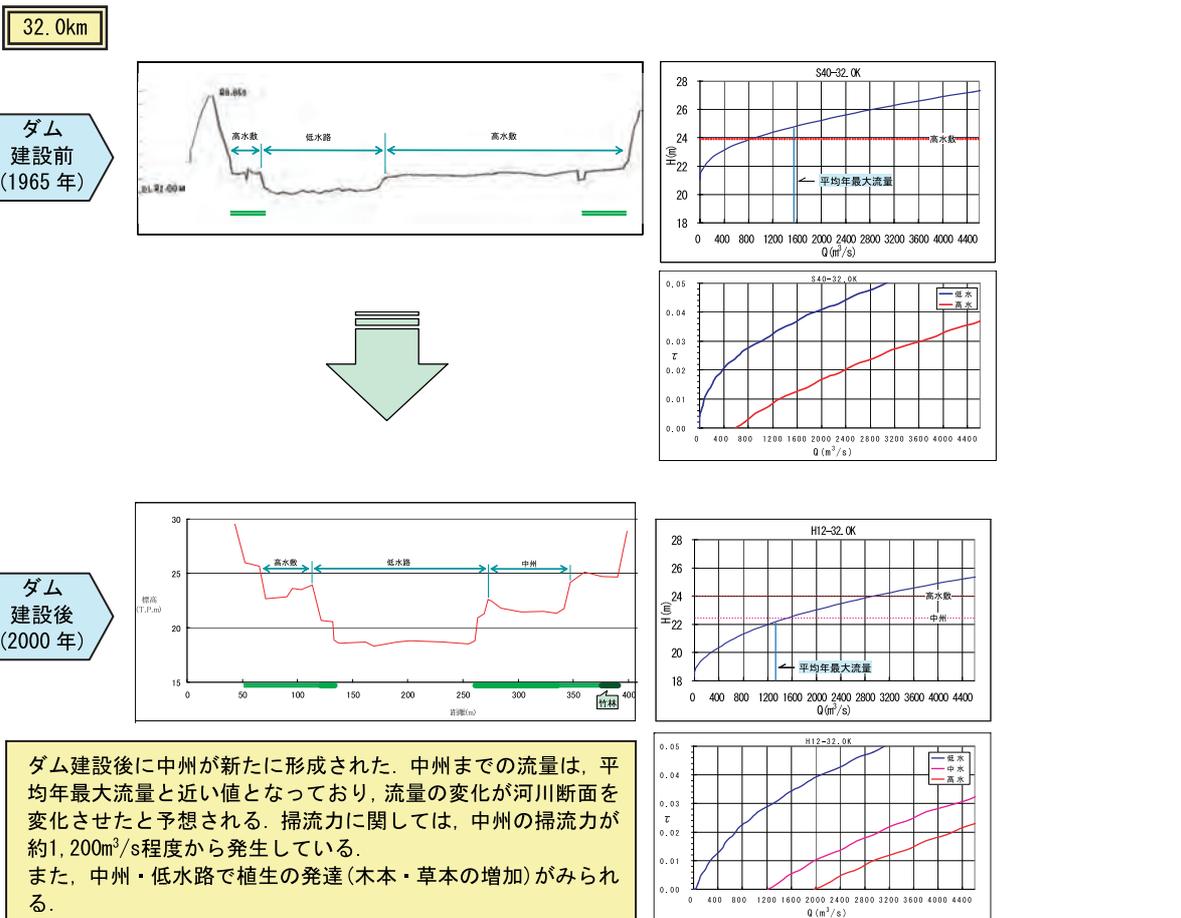
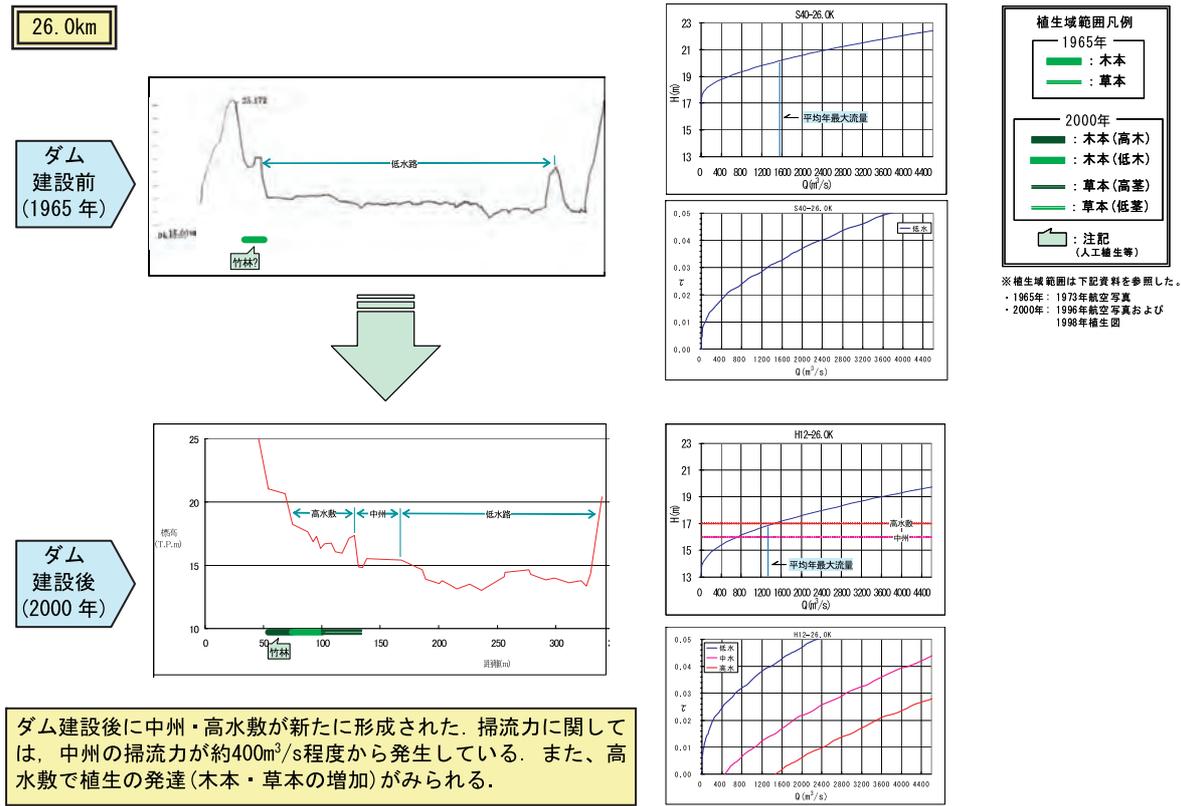


図 3.2.10(2) 横断形状の変化と流量，掃流力の関係 (2)

(9) 想定される河道変化プロセス

人為的インパクトである矢作ダム建設による河道変化のプロセスを前項までの知見を基に整理した。

1) 34km～30km の区間 (セグメント 2-1)

- ① 当該区間はセグメント 2-2 の上流部にあたり、ダムの建設によって流量の減少とともに土砂供給が減少した区間である。
- ② 土砂供給が減少したため河床は低下し、粗砂は移動して流出して、砂利化した。
- ③ さらに、流量の減少によって砂州の冠水頻度が低下して砂州の移動が少なくなりみお筋が固定された。
- ④ 水位が低下し、河岸沿いの水深の浅いところにシルトや細砂等の細粒分が堆積した。
- ⑤ ここに草本が侵入し、さらに細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑥ その結果、中水敷や高水敷が新たに形成され、低水路幅が減少した。

2) 30km～13km の区間 (セグメント 2-2-①)

- ① 当該区間はセグメント 2-2 の中央から終端部にあたり、上流河道で発生した土砂の供給がある程度ある区間である。
- ② ダムの建設によって流量は減少したが、粗砂は移動し上流部から流出して砂利化し、河床は低下した。25km 以下は上流からの粗砂の供給があるので砂利化は生じなかった。
- ③ 流量の減少とともに、出水頻度や砂州の冠水頻度が低下し、砂州の移動が少なくなり、みお筋が固定された。
- ④ 水位が低下し、河岸沿いの水深の浅いところにシルトや細砂等の細粒分が堆積した。
- ⑤ ここに草本が侵入し、更に細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑥ その結果、中水敷や高水敷が新たに形成され、低水路幅が減少した。

3) 13km～0km の区間 (セグメント 2-2-②)

- ① 当該区間はセグメント 2-2 の終端部にあたり、上流セグメントからの土砂の供給は、流量低下量による給砂の減少があったが、その変化は流量の変化率程度であった。
- ② 河口部の人為的な砂利採取により河床低下し、河床勾配が緩くなると同時に感潮区間長が増加した。
- ③ その結果、洪水時の掃流力は減少し、土砂移動量が急減した。
- ④ 水深の増加により砂州スケールは増大し、かつ掃流力の低下と砂州スケールの増大により掘削前に存在したうろこ状の砂州は消失してみお筋の変動が小さくなった。
- ⑤ 本小セグメントの上流部では河岸沿いの水深の浅いところにシルトや細砂等の細粒分が堆積した。
- ⑥ ここに草本が侵入し、更に細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑦ その結果、中水敷が新たに形成されて低水路幅が減少した。
- ⑧ 下流部では塩水の存在および海水位が低下しないので、川幅は維持された。

(10) 想定される生態系の変化

砂河川としてまとめ、3.2.2 (9) で記述する。

3.2.2 木津川

(1) 河川の概要

木津川は、布引山脈（標高 756m）に源を発し、柘植川、服部川、名張川などを合わせながら山間部を西進し、平野部に出てからは北上して、宇治川、桂川と合流し淀川となって大阪湾に注ぐ一級河川である。流域は近畿地方のほぼ中央、三重県、奈良県、京都府の 1 府 2 県にまたがり、流域面積は 1,596km²であり、約 89%を山地が占めている。沿川は名張市、上野市、島ヶ原村、笠置町等 4 市 18 町村から構成され、流域内人口は約 39 万人、中・下流域では京阪神地域のベッドタウンとして宅地、工業用地等への開発が進んでいる（図 3.2.11）。

主要な支流である名張川の最下流部には、1969 年（昭和 44）に管理開始された高山ダムがあり、さらに上流の青蓮寺ダム、室生ダム、比奈知ダムとともに木津川及び淀川の洪水調節のほか、灌漑用水、阪神地区の上水道用水に供給している。

流域には風化花崗岩地帯が多く、上流域や支流から流入する多量の土砂が洪水の度に流送され、とくに中流域は、美しい交互砂州が形成されるなど砂河川としての特徴が顕著な川である。なお、最近 20 年ぐらいのあいだで砂州域に植生域が発達し、生物相も多様になってきている。

木津川の基本高水流量は、加茂地点で（淀川水系昭和 1971 年決定、2004 年一部改定）6,100m³/s であり、流量配分は、図 3.2.12 のとおりである。

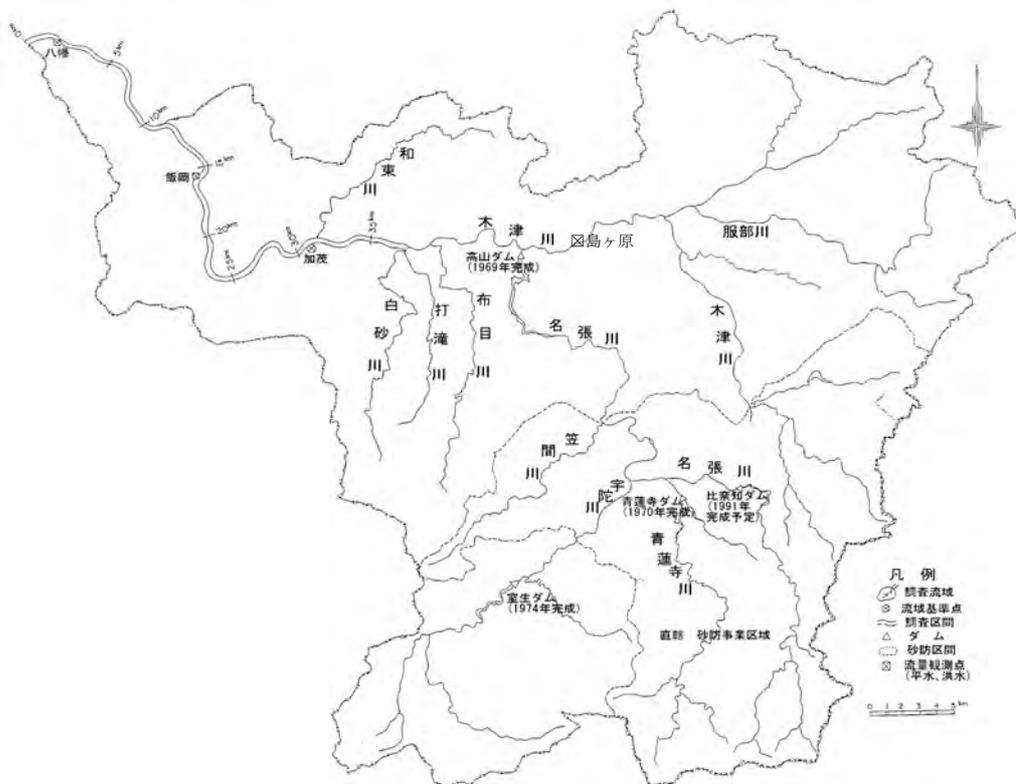


図 3.2.11 木津川流域図

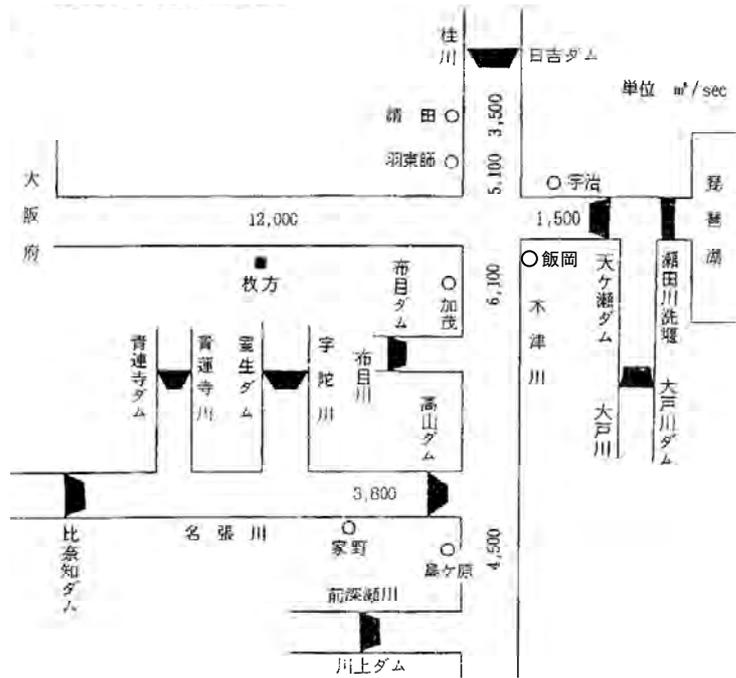


図 3.2.12 流量配分図

(2) 河道および河川環境に与えた人為的インパクト

名張川の最下流部に位置する高山ダムは、1969年に竣工した有効貯水量 $49,200 \times 10^3 \text{m}^3$ の多目的ダムである。

高山ダムの集水面積は 615km^2 で木津川流域山地面積の約 42% を占めている。また、近年 10 年の年間流入量が約 $489.7 \times 10^6 \text{m}^3$ であることから、ダム回転率は約 8.6 回/年となる。木津川の河道および生態環境の変化に対するインパクトとしての位置付けは大きい。図 3.2.13 に高山ダムの計画洪水調節図を示す。

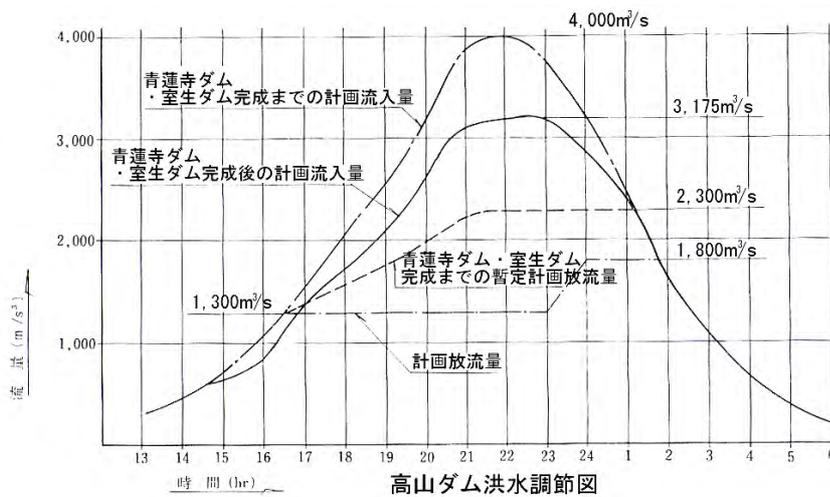


図 3.2.13 高山ダムの洪水調節図

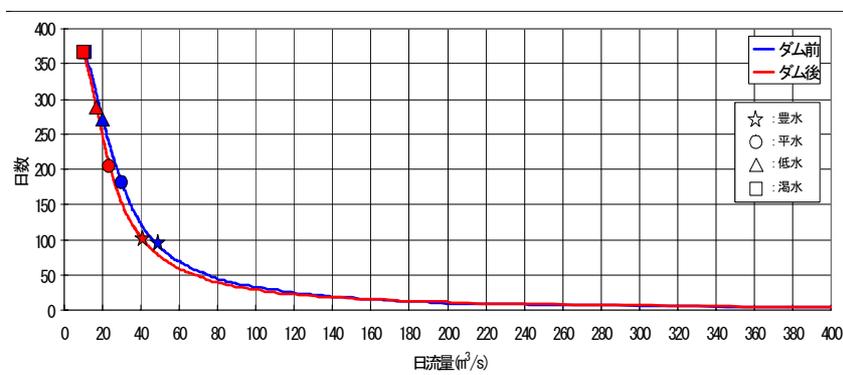
(3) ダムの建設による流況の変化と土砂環境の変化

1) 流況の変化

淀川合流点より 15.9km 上流の飯岡地点における、ダム建設による流況の変化を比較すると表 3.2.4, 図 3.2.14 のとおりである。日流量は全体的にあまり変化がないが 80m³/s 以下は減少傾向にある。近年は渇水が多発している状況であり、年間総流出量は減少傾向にあり（図 3.2.15）。また高山ダム完成前後の日流量階別の発生頻度（飯岡地点）を 10 年に何回生じたかを比べたのが図 3.2.16 である。1000m³/s 以上は発生頻度が減少しているが、200～1000m³/s は増加している。

平均年最大流量は、ダム建設前の 1956 年から 1969 年で 2,333m³/s が完成後 1970～2001 年で 1,775m³/s（ダム完成前の約 76%）となり、約 550m³/s の減少（24%減）となっている（図 3.2.17）。また高山ダム完成前後の年最大流量階別の発生頻度（飯岡地点）を 10 年に何回生じたかを比べたのが表 3.2.5 である。

表 3.2.4 流況表



飯岡地点 (15.9k)		
	ダム設置前 (m ³ /s)	ダム設置後 (m ³ /s)
平均年最大流量	2,333	1,775
豊水流量	47.82	39.88
平水流量	29.36	23.01
低水流量	20.03	15.82
渇水流量	11.83	10.51

図 3.2.14 流況の変化（飯岡地点）

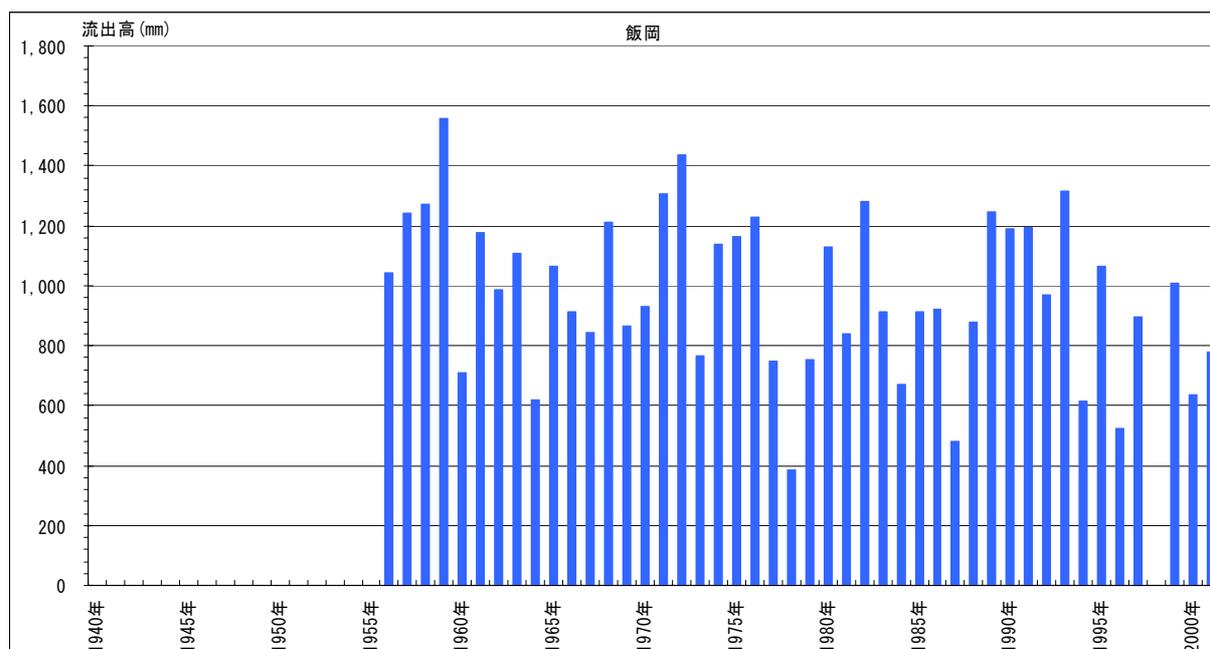


図 3.2.15 流出高の経年変化（飯岡地点）

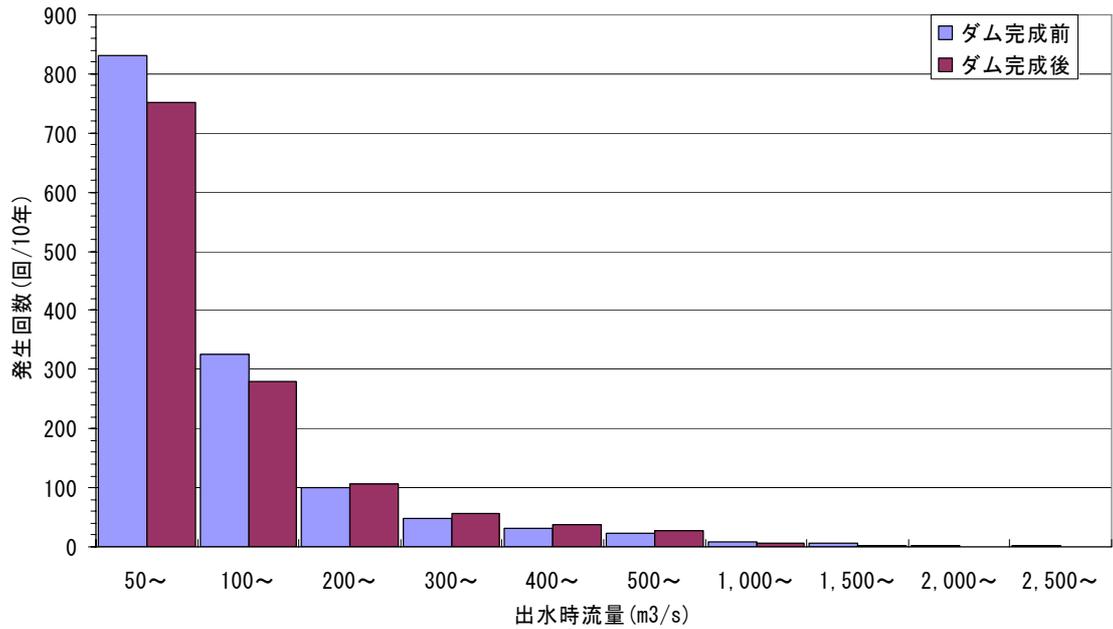


図 3.2.16 高山ダム完成前後の洪水発生頻度 (飯岡地点)

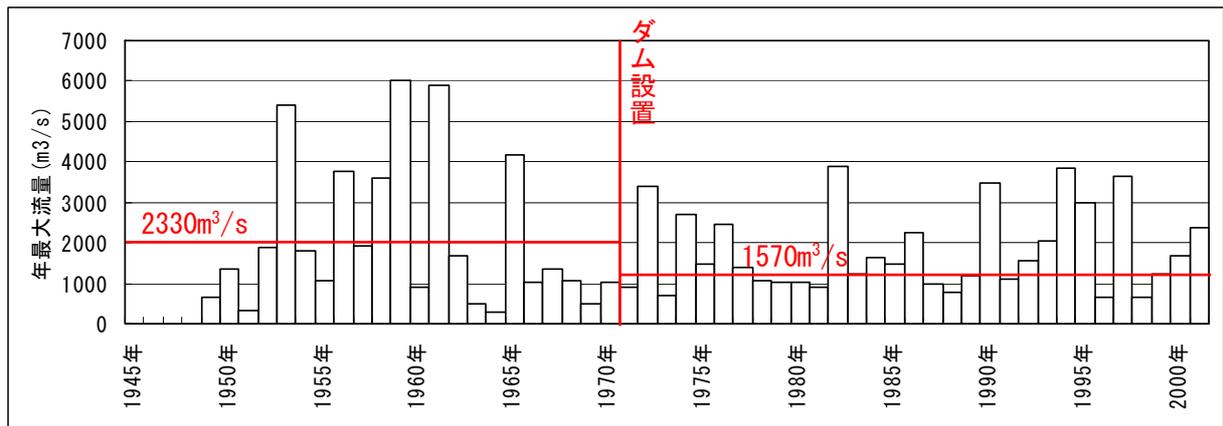


図 3.2.17 年最大流量の変化 (飯岡地点)

表 3.2.5 高山ダム完成前後の洪水発生頻度 (飯岡地点)

規模	実回数			10年当たり回数		
	1955~1969	1970~2002	全期間	1955~1969	1970~2002	全期間
	ダム完成前	ダム完成後		ダム完成前	ダム完成後	
50m³/s以上	1247 回/15年	2483 回/33年	3730 回/48年	831.3 回/10年	752.4 回/10年	777.1 回/10年
100m³/s以上	490 回/15年	921 回/33年	1411 回/48年	326.7 回/10年	279.1 回/10年	294.0 回/10年
200m³/s以上	150 回/15年	348 回/33年	498 回/48年	100.0 回/10年	105.5 回/10年	103.8 回/10年
300m³/s以上	73 回/15年	189 回/33年	262 回/48年	48.7 回/10年	57.3 回/10年	54.6 回/10年
400m³/s以上	48 回/15年	126 回/33年	174 回/48年	32.0 回/10年	38.2 回/10年	36.3 回/10年
500m³/s以上	34 回/15年	89 回/33年	123 回/48年	22.7 回/10年	27.0 回/10年	25.6 回/10年
1,000m³/s以上	12 回/15年	21 回/33年	33 回/48年	8.0 回/10年	6.4 回/10年	6.9 回/10年
1,500m³/s以上	8 回/15年	6 回/33年	14 回/48年	5.3 回/10年	1.8 回/10年	2.9 回/10年
2,000m³/s以上	2 回/15年	1 回/33年	3 回/48年	1.3 回/10年	0.3 回/10年	0.6 回/10年
2,500m³/s以上	2 回/15年	0 回/33年	2 回/48年	1.3 回/10年	0.0 回/10年	0.4 回/10年

2) 土砂環境の変化

高山ダムの回転率は、約 8.6 回/年であることから、ダムによる土砂の補足率は 90～95%程度と推定される。高山ダムの集水面積が、木津川全体の約 37%を占めるため、木津川河道の土砂環境に及ぼす影響は大きい。

砂利採取は 1958 年頃より開始され、それとともに木津川の河床低下が急速に始まり、1971 年までに平均河床で約 2m の低下となっている。砂利採取は 1971 年に禁止され、平均河床の低下は止まっているが、最深河床の低下は続いている。

(4) 河道特性量とセグメント区分

淀川合流点より上流部の 37km の区間を河道形状、河床材料等の河道特性量より、表 3.2.6 に示す 3 区間にセグメント区分した。

河道の縦断面図、河床材料の縦断面図を図 3.2.18、図 3.2.19 に示す。なお本検討対象区間の河床材料は、図 3.2.19 に示すように 4～5cm の砂利と 2mm 程度の粗砂が交じり合ったものであり、砂集団のほうが多い。

表 3.2.6 代表区間のセグメント区分

区 間	37～26km	26～6km	6～0km
代表粒径	粗砂混じり砂利 (4cm)	砂利混じり粗砂 (2mm)	2mm
平均河床勾配	1/1, 100	1/1, 160	1/1, 030
セグメント区分	2-1～2-2-①	2-2-②	2-2-③

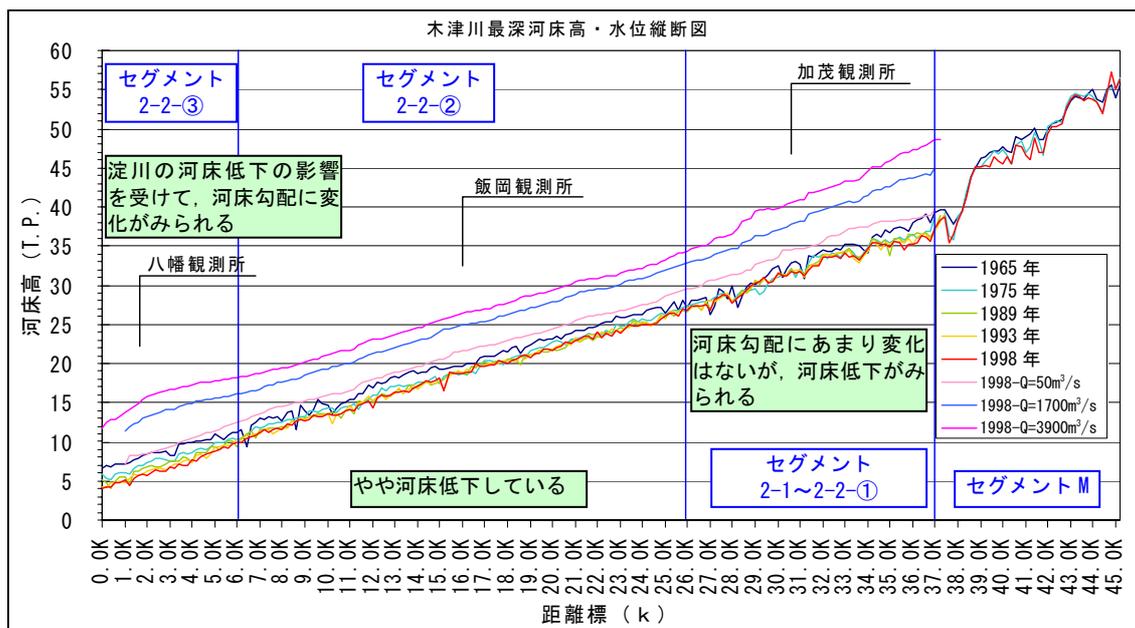


図 3.2.18 河床高縦断面図

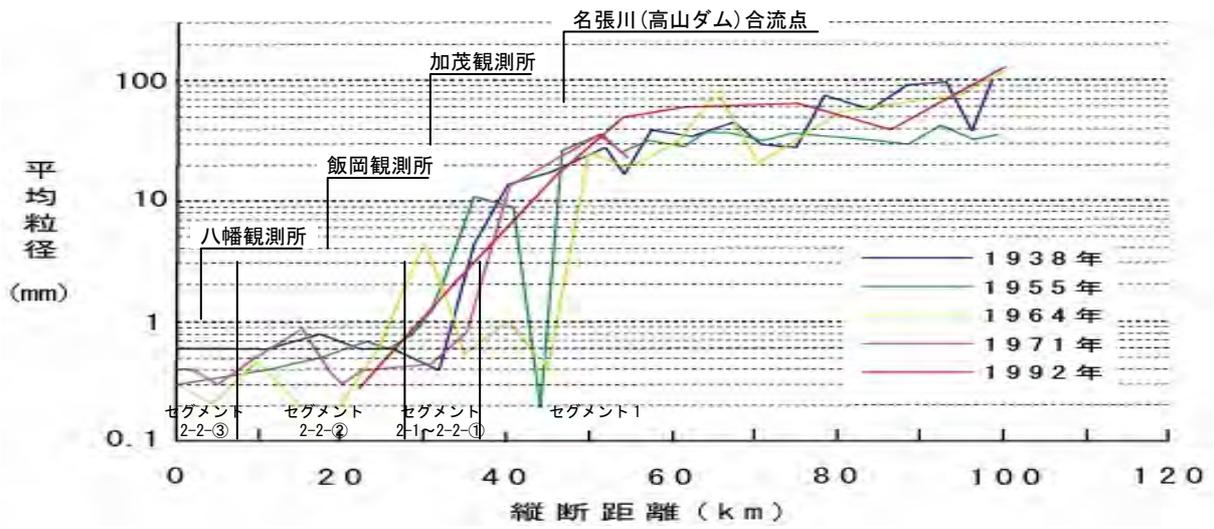


図 3.2.19 河床材料平均粒径図

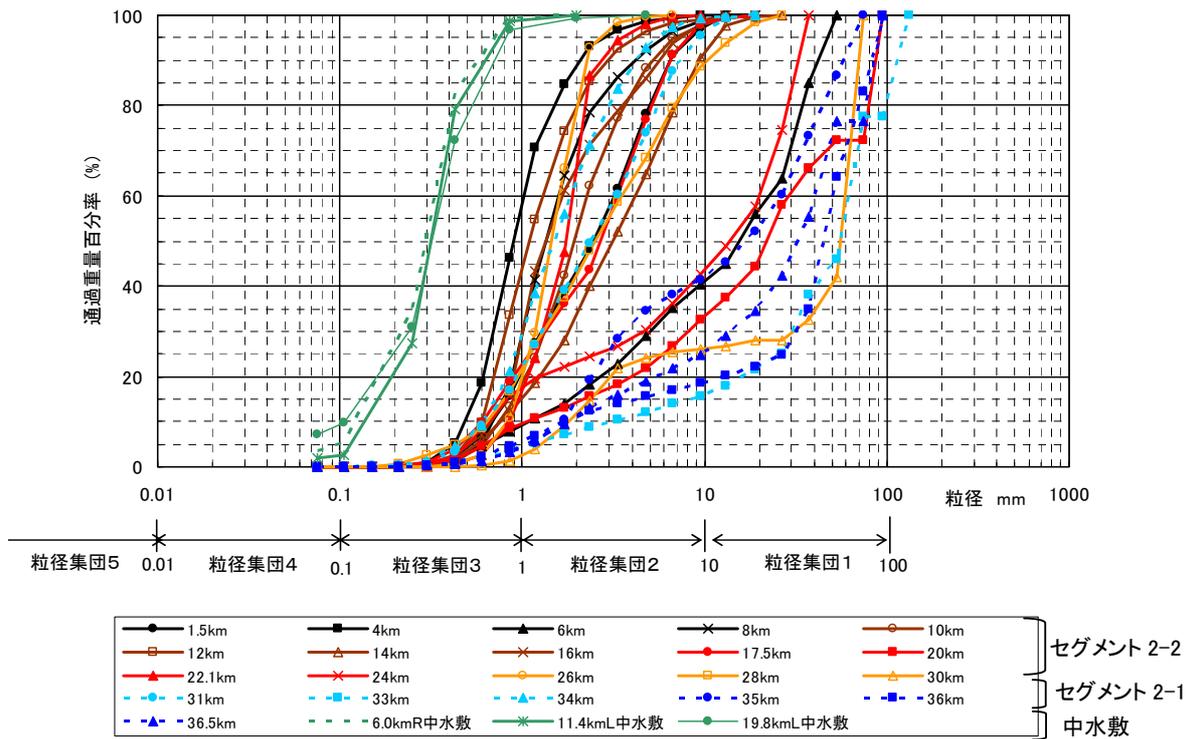


図 3.2.20 木津川の粒径集団区分

(5) 縦断形状・平面形状・横断形状の変化

図 3.2.21 にダム建設前と後の低水路と水面幅の変化を示す。代表区間毎の横断形状の変化を図 3.2.22 に示す。

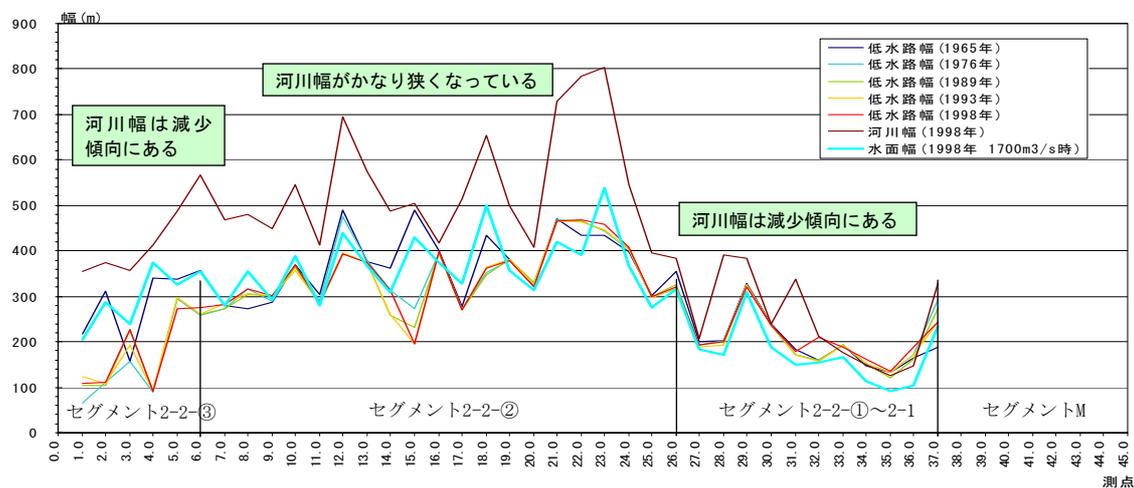


図 3.2.21 河川幅・水面幅の変化

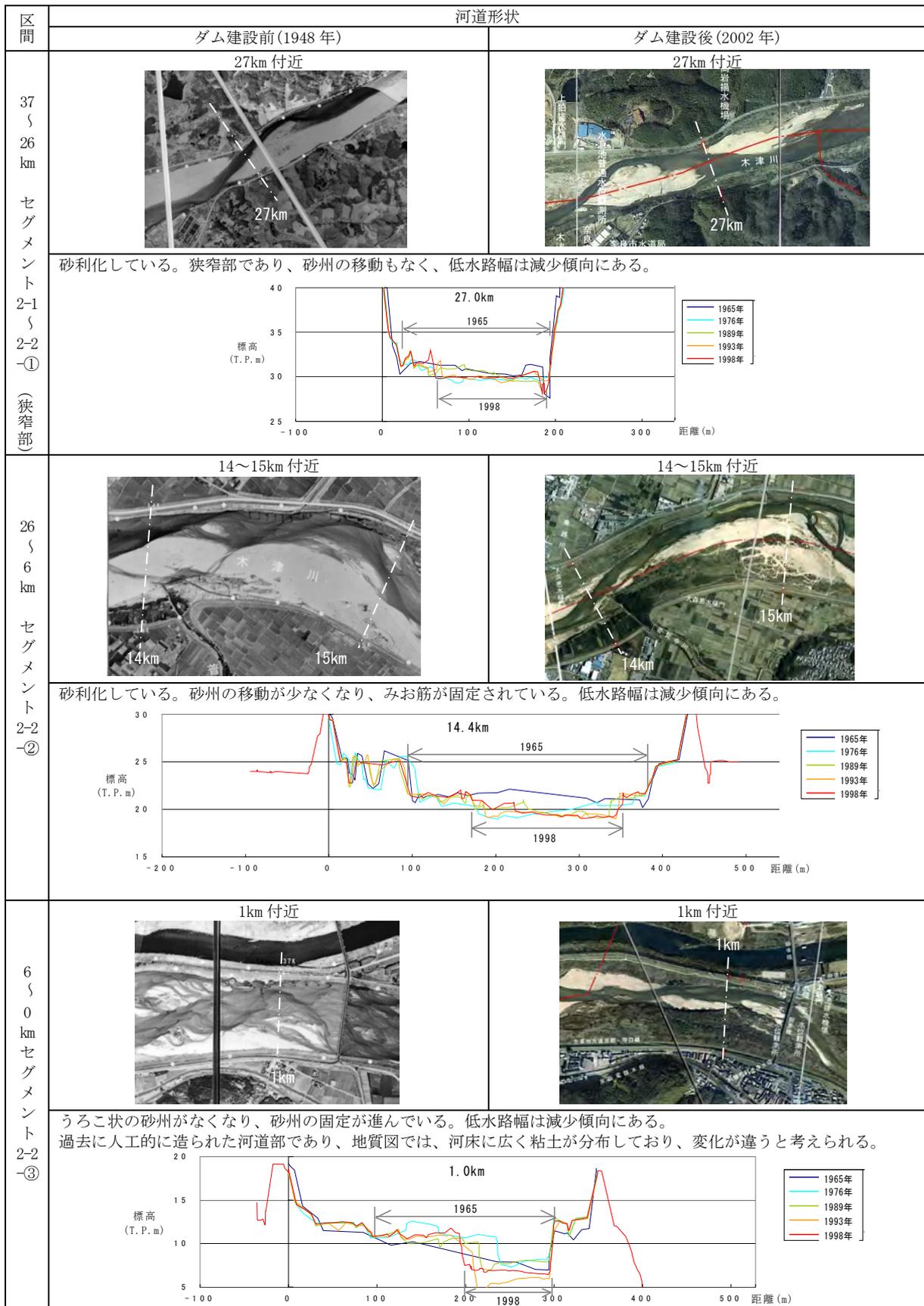


図 3.2.22 平面形状と横断形状の変化

各セグメントの河道形状の変化は以下のとおりである。

1) 37km から 26km 区間 (セグメント 2-2-①)

平均河床勾配の変化は、ダム建設前後で $1/1,000$ から $1/1,100$ であり変化はほとんどないが、平均河床は約 1.5m 程度低下している。しかし、この区間は狭窄部のため河床の平面形の変化は少ない。

ただし、河岸が沖積堆積物からなる本セグメントの下流部は、27.0km 横断面に見るようにの中水敷が形成され低水路幅は 170m から 120m に減少しているが、狭窄部(両岸は岩)では、水路幅の変化は小さい。



(1971 年)



(1990 年)



(2002 年)

図 3. 2. 23 木津川上流域の年代別航空写真

2) 26km から 6km 区間 (セグメント 2-2-②)

平均河床勾配は $1/1,270$ から $1/1,160$ に変化している。河床は約 1.5m 程度低下している。さらに砂州上に植生が侵入し、砂州の島状化、滞部の固定化と砂利分の増加がみられる。

14.4km では以前の低水路に中水敷が形成され、川幅が 290m から 180m に減少している。14.4km

地点は縮小率の大きな断面であり，本セグメントの平均では70%程度である。

3) 6km から 0km 区間 (セグメント 2-2-③)

平均河床勾配は 1/1,330 から 1/1,030 に変化している。河床は淀川の河床低下の影響を受けて勾配が急になっている。うろこ状の砂州は消失し，砂州の固定化が進んでいる。河床材料はあまり変化していない。現在，本区間は旧氾濫原の粘性質堆積物を切り込んでおり，川幅の大幅な縮小と河岸の固定化が生じている。1.0km 断面の低水路幅は 210m から 100m に減少している。

(6) 植生の変化

(4)で示された 3 つのセグメントにおいて，代表的な横断面における植生の変遷を航空写真 (1948 年, 1971 年, 1990 年, 2002 年) を用いて整理した。区分は植生域 (木本), 植生域 (草本), グラウンド・植栽地・人工構造物, 砂州, 開放水面の 5 区分とした。図 3.2.24 に地味状態の変化を示す。

セグメント 2-1~2-2 (37km~26km の狭窄部) に該当する 28km の横断面における植生変化を見ると，草本，木本ともに経年的な変化はほとんど見られなかった。これは当該地区では狭窄部であり，河岸が露岩で植生域の面積がもともと小さく，河床材料が同一の沖積河川より洪水時の河床に働く掃流力が大きいため (山本, 2004)，変化が顕著に現れなかったためと推察される。

セグメント 2-2-② (26km~6km) に該当する 15km の横断面における植生変化を見ると，草本・木本ともに増加が見られるとともに，水域の減少が見られる。特に 1990 年以降は樹林 (ヤナギ) が形成されている。当該地区近傍 (14.4km) の横断面の変化を見ると，1965 年から 1976 年間で顕著な河床低下が見られることから，この掘削に伴う河床低下と河岸沿いおよび小礫の供給減に伴い滲筋の砂利化と砂州の固定化・深掘れが生じ，水面幅の減少が生じたものと推察される。

セグメント 2-2-③ (6km~0km) に該当する 4km の横断面における植生変化を見ると，セグメント 2-2-② (26km~6km) よりも早い 1971 年に既に樹林化が起こっている。当該地区は淀川の河床低下の影響を受けて，セグメント 2-2-② (26km~6km) よりも早い時期から河床低下が起こり，樹林が繁茂できる高水敷が形成されたのである。

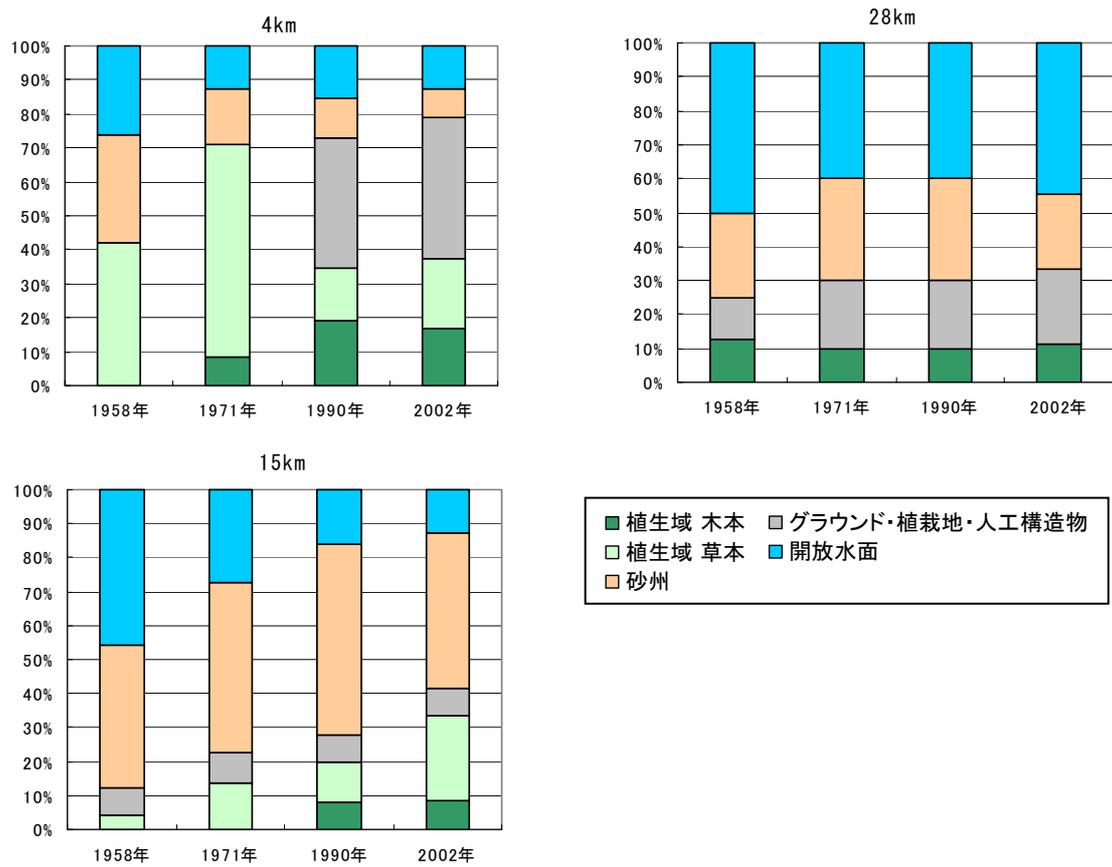


図 3. 2. 24 地被状態の変化

なお、辻本ほか（2003）は、このような樹林化の要因として、高山ダム等の建設後の、洪水ピーク流量の減少と $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度の出水の増加を指摘している。木津川では $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模の出水では、砂州が冠水する程度であり、全面的な砂州の移動と植生の破壊が起こらない。こうした洪水規模の減少により植生域の発達を促進したと考えている。

また 12km 付近の砂州において、年最大流量と植生域面積を比較し、植生が破壊されるのは $3,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の洪水であり、 $2,300\text{m}^3/\text{s}$ 以下では大きな破壊を受けず面積が拡大することを示し、植生域面積の拡大・減少は、洪水の規模によって大きく左右されるとしている。

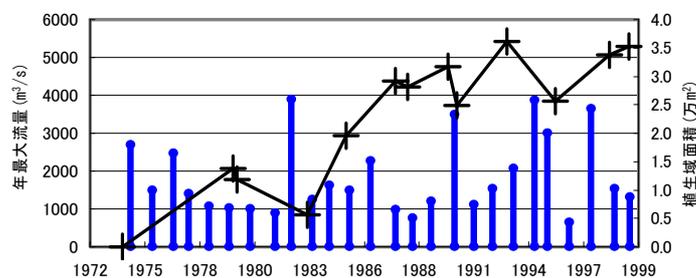


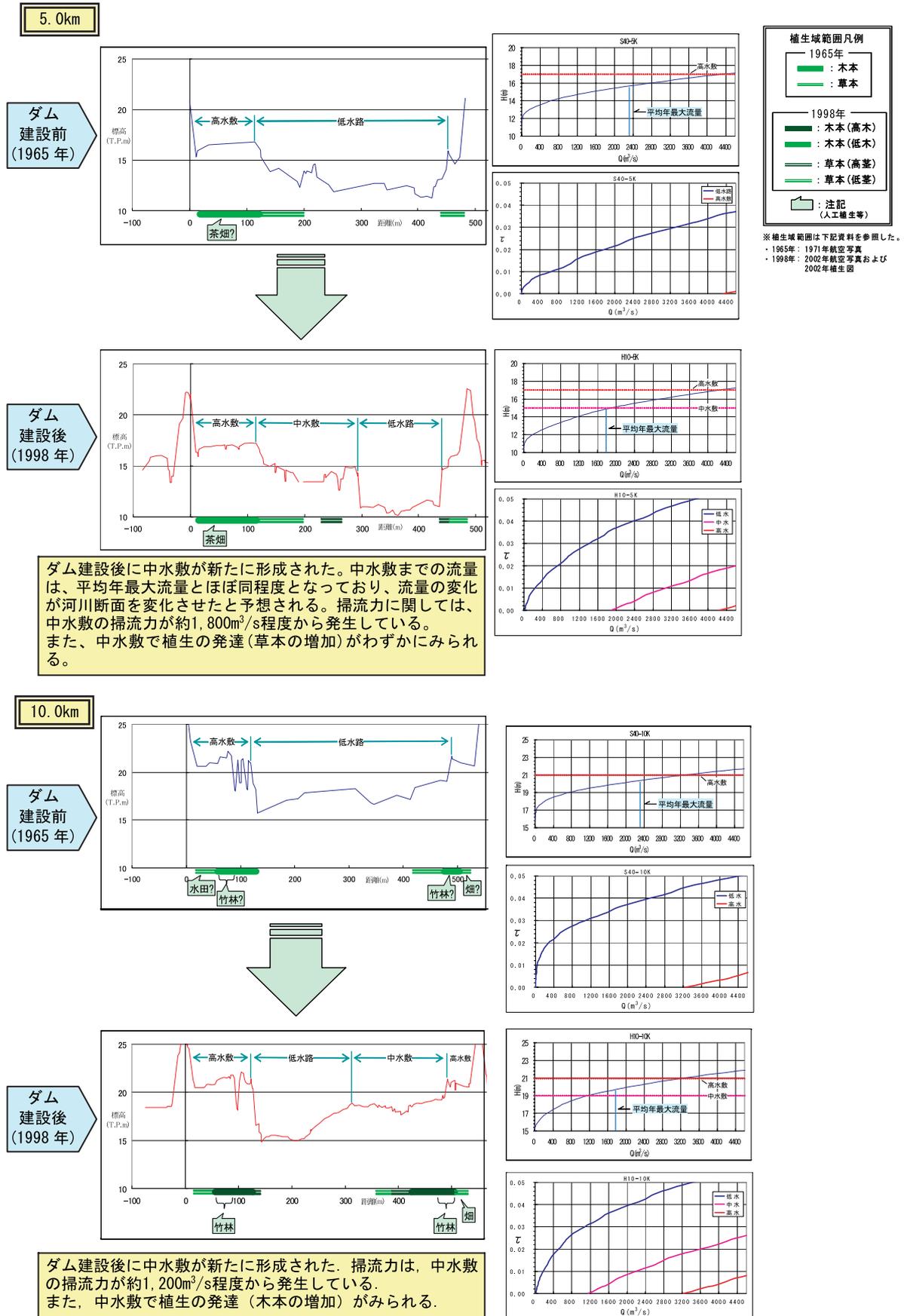
図 3. 2. 25 年最大流量と植生域の面積 (辻本ほか, 2003)

1983, 1990, 1995年に植生面積が減少している。
これにより対象地域では $3,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の洪水で植生が破壊されると考えられる。

(7) 横断面テラスごとの流量と掃流力の関係

ダム建設前後の代表断面における断面形状の変化と高水敷テラスでの流量と掃流力について整理すると図 3.2.26 に示すとおりである。なお掃流力の評価法は、矢作川と同様である。ダム建設後はいずれの断面も新たに中水敷が形成されている。この中水敷高までの河川流量はダム建設後の平均年最大流量にほぼ対応している。

低水路河床に働く掃流力は、ダム建設前後で平均年最大流量が約 $500\text{m}^3/\text{s}$ の変化があったにもかかわらず、それぞれの平均年最大流量時の掃流力は変化が小さく、ほぼ同程度の値となっている。



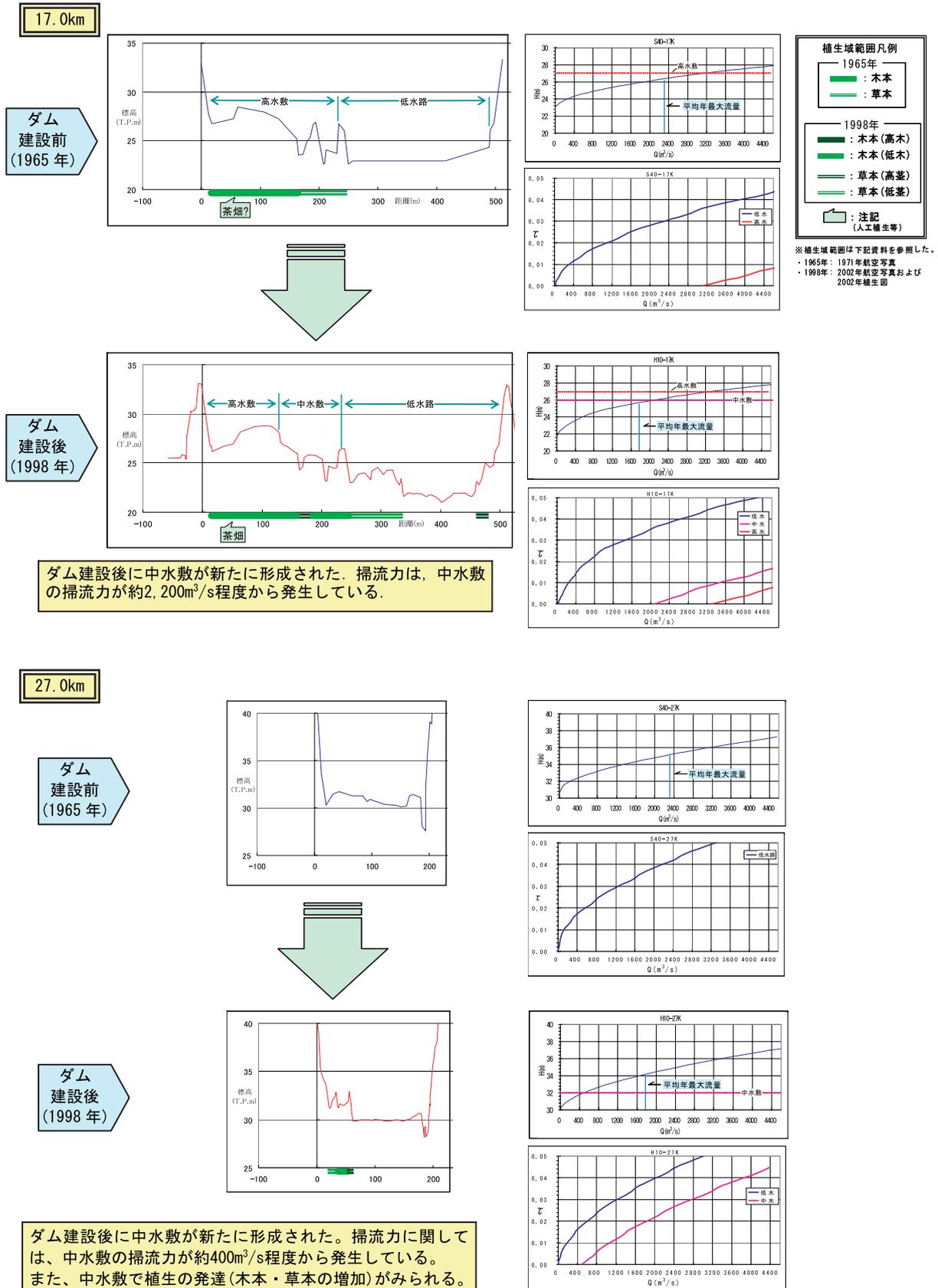


図 3.2.26 (2) 横断形状の変化と流量，掃流力の関係 (2)

(8) 想定される河道変化プロセス

人為的インパクトである高山ダム建設による河道変化のプロセスを、前項までの知見を基に整理する。

1) 37km～26km の狭窄部区間 (セグメント 2-1～2-2-①)

- ① 当該区間はセグメント 2-2 の上流部にあたり、土砂供給が減少する区間である。
- ② ダム建設によって、流量は減少したが、ダム完成後の平均年最大流量時においても砂利成分 (5cm) の河床材料は移動した。
- ③ 狭窄部であるため洪水時の掃流力は同一粒径の沖積河道より大きいので、流量低減しても川幅の縮小は生じなかった。ただし 2mm の小礫が流出して砂利成分が増加した。
- ④ 河岸が洪水堆積物である本小セグメントでは、流量の減少によって水深が減少し、河岸沿いの水深の浅い所にシルトや細砂等の細粒分が堆積した。
- ⑤ ここに草本が侵入し、さらに細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑥ その結果、中水敷が形成され、低水路幅が減少した。

2) 26km～6km の区間 (セグメント 2-2-②)

- ① 当該区間はセグメント 2-2 の上流部にあたり、土砂供給が減少する区間である。
- ② ダム建設によって、流量は減少するが小礫成分の河床材料は移動し流出するが砂利分は残留し、濇筋部の砂利化が進行した。
- ③ 流量の減少とともに、出水頻度や砂州の冠水頻度が低下し、砂州の移動が少なくなり、みお筋が固定された。
- ④ 砂州の標高の高い所、河岸沿いの水深の浅い所に、細砂が堆積し草本類が進入し、さらにシルトや細砂等の細粒物質がトラップされた。
- ⑤ さらに細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑥ その結果、中水敷が形成されて低水路幅が減少した。
- ⑦ 樹木類も進入し、樹林化した。

3) 6km～0km の区間 (セグメント 2-2-③)

- ① 当該区間はセグメント 2-2 の終端部の区間にあたり、粗砂の供給がある。
- ② 過去に人工的に付け替えられた河道であり、河床の浅いところに粘性土層が存在していた。
- ③ 淀川本川の河床掘削による 4m にも及ぶ河床低下により本区間は勾配が急になり、砂採取とあわせて、粘性層が露出し、そこを切り込むようになった。
- ④ ダム建設による流量の減少とともに、取り残された河岸沿いの部分は冠水頻度が低下し、細粒成分の堆積空間となった。そこには草本類(ヨシ)が進入し、さらに細粒物質の堆積を助長した。
- ⑤ 切り込まれた河道部分(低水路)では、うろこ状の砂州が消失し、みお筋が固定化された。
- ⑥ 高水敷化された部分には、さらに細粒分が堆積して堆積厚が増加した。
- ⑦ その結果、中水敷が形成された。

(9) 砂川におけ生態系の変化

矢作川，木津川等の砂河川では，河道変化プロセスに伴い以下に示すような生態系の変化が生じている。

1) 植生の繁茂

洪水流量の減少，河床低下に伴う高水敷あるいは島状地形の形成に伴い，草地の繁茂及び樹林が形成された。ただし礫床河川で見られるような礫地をおもな生育場とするハリエンジュ等はほとんど見られず，砂場に生育するタチヤナギ，エノキ等を中心とした樹林が形成された。

また，このような河道内樹林化に伴い，本来河川に生息していない生物の生息・繁殖できる環境が形成された。例えば木津川のセグメント 2-2 (26km～6km) にあたる 12km 付近の砂州では，全国で初めて河川敷でウグイスの繁殖が確認されている (Hamao&Matsubara 2001, 濱尾ほか 2001)。ウグイスは本来山地のササ群落などに営巣するとされており，河川敷における植生帯の発達に伴って近年になって新たな営巣環境として用いられるようになったと推定されている。

また植生が一度繁茂すると大洪水でも容易に破壊されない。これは砂河川では植生域の流速が大洪水でも 1.5～2m/s 程度にしかならないからである。自由蛇行河川では植生域の変化は河岸侵食と河岸形成によって最終的には規定される。

2) 大礫化の進行

木津川セグメント 2-1 (37km～26km の狭窄部) では，小礫・粗礫の減少に伴う大礫の増加が確認されている。このような場所では，みお筋は固定し砂州の移動がとまり，島状地形が形成された。矢作川では河床の粗粒化(砂利化)・安定化に伴い，糸状藻類の繁茂 (カワシオグサ)，造網性昆虫の増加などが生じた。

3) 水域環境の変化

流量の減少・河床低下等に伴う水域面積の減少に伴い以下のような現状が起こった。

- ・ 平水・低水流量の減少に伴う水面幅・水深の減少
- ・ 低水路の固定などによる滯筋の固定化
- ・ 平常時の流量減少などによる砂州頂部への細粒土砂の堆積
- ・ 滯筋部河床材料の粗粒化 (アーマー化)

また周辺のワンドタ・マリと呼ばれる一時水域と本川の連続性の減少も生じた。このようなワンドタマリは一般的には産卵場 (出水を契機に一時水域に入って産卵)，稚魚の保育場，洪水時の避難場所として有意義な場となっていると考えられており，このような場所との連続性の減少に伴い魚類の生息環境が奪われた。

3.2.3 手取川

(1) 河川の概要

手取川は、石川県の霊峰白山（標高 2,702m）に源を発し、尾添川、大日川などを合わせながら石川郡鶴来町地先に至り、これより山間部を離れ、石川県の誇る穀倉地帯である加賀平野を西に流れて石川郡美川町にて日本海に注ぐ流域面積 809km²、幹川流路延長 72km の一級河川で、全流域面積の 91%を山地が占めている。

流域は石川県石川郡（白峰村、尾口村、鳥越村、吉野谷村、河内村、野々市町、鶴来町、美川町）、能美郡（川北町、辰口町、寺井町、根上町）、小松市、松任市の 2 市 7 町 5 村で構成され、総人口は 29.4 万人である。

上流部は白山を中心とした白山国立公園となっており、全国有数の良好なブナ自然林や高山植物の宝庫であり、中流部では手取川峡谷がその美しい姿を見せながら、下流に行くに従って大扇状地を形成している。上流～中流部にかけては、交差砂州による瀬・淵がよく発達しているが、下流部の扇状地については網流状態で多列砂州となっている。

手取川の基本高水流量は、鶴来地点で（1994 年改定）6000m³/s であり、流量配分は、**図 3.2.28**のごとくである。



図 3.2.27 手取川流域図

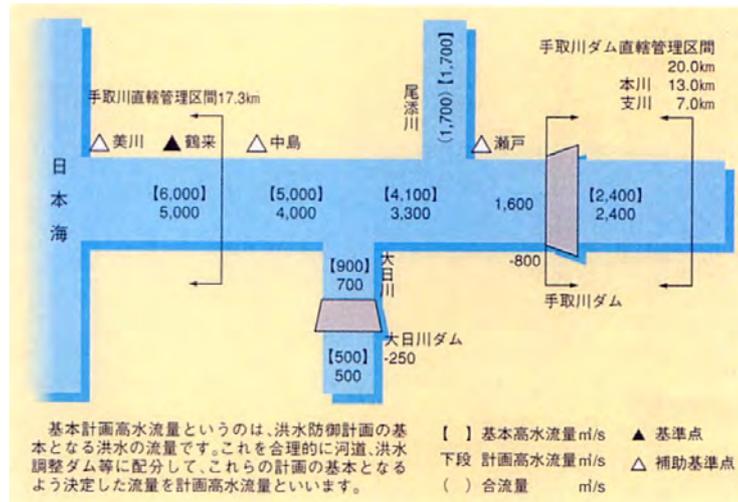


図 3.2.28 流量配分図

(2) 河道および河川環境に与えた人為的インパクト

河口より約 40km 上流に位置する手取川ダムは 1979 (昭和 54) 年に竣工した有効貯水量 $190,000 \times 10^3 \text{m}^3$ の多目的ダムである。手取川ダムの集水面積は 247.2km^2 で手取川流域の約 31% を占めている。また、近年 10 ヶ年の年間流入水量が $1,112.1 \times 10^6 \text{m}^3$ である事からダム回転率は約 4.8 回/年で手取川に対する人為的インパクトとしての位置付けは大きい。左支川大日川の建設された大日川ダム (1996 年竣工) は流域面積 89km^2 で総貯水量は $27,200 \times 10^3 \text{m}^3$ であり、本川への影響はそれほど大きくない。図 3.2.29 に手取川ダムの計画洪水調節図を示す。

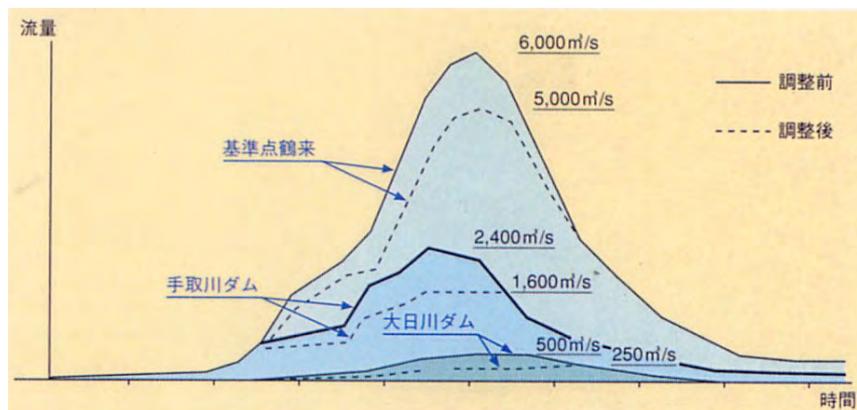


図 3.2.29 手取川ダムの計画洪水調節図

(3) 手取川ダムの建設による流況の変化と土砂環境の変化

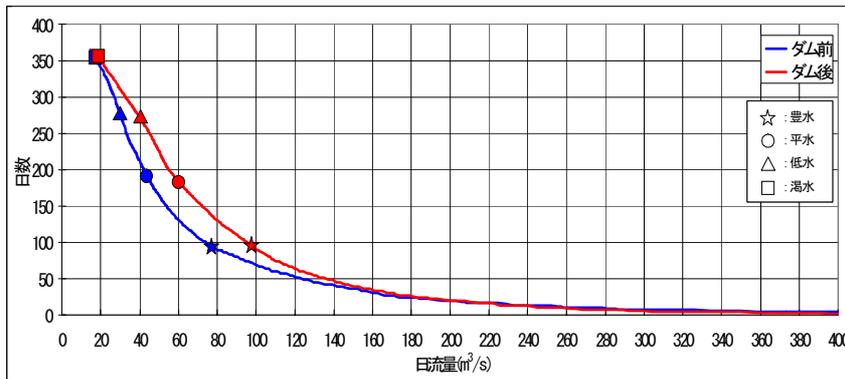
1) 流況の変化

河口より 19.0km 上流の中島地点でダムの建設による流況の変化を比較すると表 3.2.7, 図 3.2.30 のとおりである。豊水流量以下は増加傾向にある。また手取側ダム完成前後の日流量階別の発生頻度 (中島地点) を 10 年に何回生じたかを比べたのが図 3.2.31 である。 $400 \text{m}^3/\text{s}$ 以上は発生頻度が減少しているが、 $100 \sim 300 \text{m}^3/\text{s}$ は増加している。

平均年最大流量は、ダム建設前の1954年から1979年で $1,694\text{m}^3/\text{s}$ が完成後1980～2001年で $1,081\text{m}^3/\text{s}$ となり（ダム完成前の64%）、ダム建設前後で約 $610\text{m}^3/\text{s}$ の減少（36%減）となっている（図3.2.31）。

また手取川ダム完成前後の年最大流量の流量階別の発生頻度（中島地点）を10年に何回生じたかを比べたのが表3.2.8である。ピーク流量 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上が小さくなっているのが分かる。

表 3.2.7 流況表



中島地点(19.0k)		
	ダム設置前 (m^3/s)	ダム設置後 (m^3/s)
平均年 最大流量	1,694	1,081
豊水流量	77.04	95.71
平水流量	45.32	61.50
低水流量	30.26	43.18
渇水流量	17.18	20.83

図 3.2.30 流況の変化（中島地点）

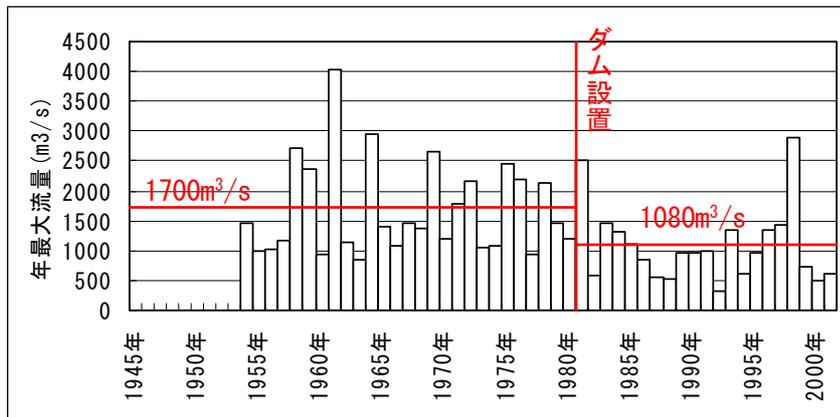


図 3.2.31 年最大流量の変化（中島地点）

表 3.2.8 手取川ダム完成前後の洪水発生頻度（中島地点）

規模	実回数			10年当たり回数		
	1968～1979	1980～2002	全期間	1968～1979	1980～2002	全期間
	ダム完成前	ダム完成後		ダム完成前	ダム完成後	
$50\text{m}^3/\text{s}$ 以上	1955 回/12年	5141 回/23年	7096 回/35年	1629.2 回/10年	2235.2 回/10年	2027.4 回/10年
$100\text{m}^3/\text{s}$ 以上	806 回/12年	2004 回/23年	2810 回/35年	671.7 回/10年	871.3 回/10年	802.9 回/10年
$200\text{m}^3/\text{s}$ 以上	243 回/12年	466 回/23年	709 回/35年	202.5 回/10年	202.6 回/10年	202.6 回/10年
$300\text{m}^3/\text{s}$ 以上	92 回/12年	161 回/23年	253 回/35年	76.7 回/10年	70.0 回/10年	72.3 回/10年
$400\text{m}^3/\text{s}$ 以上	44 回/12年	63 回/23年	107 回/35年	36.7 回/10年	27.4 回/10年	30.6 回/10年
$500\text{m}^3/\text{s}$ 以上	28 回/12年	27 回/23年	55 回/35年	23.3 回/10年	11.7 回/10年	15.7 回/10年
$1,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上	2 回/12年	1 回/23年	3 回/35年	1.7 回/10年	0.4 回/10年	0.9 回/10年
$1,500\text{m}^3/\text{s}$ 以上	0 回/12年	0 回/23年	0 回/35年	0.0 回/10年	0.0 回/10年	0.0 回/10年
$2,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上	0 回/12年	0 回/23年	0 回/35年	0.0 回/10年	0.0 回/10年	0.0 回/10年
$2,500\text{m}^3/\text{s}$ 以上	0 回/12年	0 回/23年	0 回/35年	0.0 回/10年	0.0 回/10年	0.0 回/10年

2) 土砂環境の変化

手取川ダムの回転率は約 4.8 回/年である事からダムによる土砂の補足率は 90～95%程度と推定される。手取川ダムの集水面積が手取川の全体の 31%を占めるため手取川河道の土砂環境に及ぼす影響は大きい。

一方、砂利採取は 1955 年頃より開始され、1967 年には用途規制指定河川に指定され、1982 年には計画採取は終了している。

(4) 河道特性量とセグメント区分

河床縦断面形、河床材料、川幅より、河口より上流の 17km の区間を河道形状、河床材料等の河道特性量より以下の 3 区間にセグメント区分した (表 3.2.9)。

表 3.2.9 代表区間のセグメント区分

区 間	17～13.5km	13.5～7km	7～2km	2～0km
代表粒径 (60%粒径)	121mm	149mm	70mm	38mm
平均河床勾配	1/130	1/200	1/200	1/410
セグメント区分	1-①	1-②	1-③	1-④

(5) 河床材料特性とその変化

手取川ダムの竣工した 1979 年以降の河床材料の変化を図 3.2.30 に示す。河床材料は 1979 年当初で平均粒径が河口部を除いて 50～60mm 程度であった。しかし、次第に粗粒化が進行し、1993 年、1999 年の調査資料によれば、平均粒径は 2 倍以上の値に変化しアーマ化している。

河口部付近の平均粒径については、大きな変化はみられない。

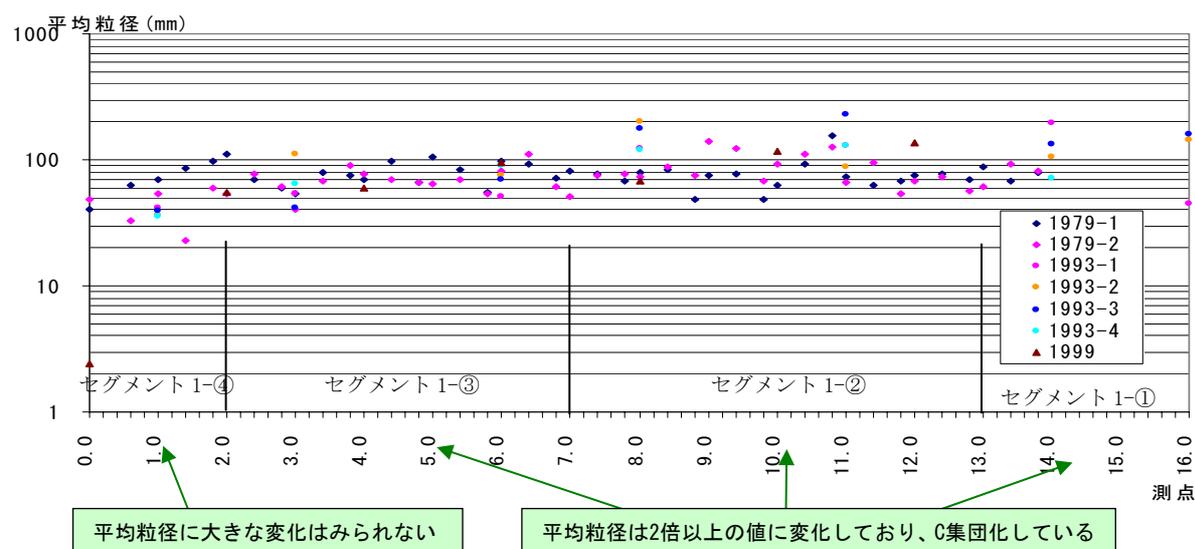


図 3.2.32 河床材料の変化

(6) 縦断形状, 平面形状, 横断形状の変化

ダム建設前後における河道形状の変化を図 3.2.33 (縦断図), 図 3.2.34 (横断図) に示す. 代表区間毎の河道形状の変化は以下のとおりである.

1929 年以降の河床変動状況を見ると以下のようなものである.

- 1929 年と 1955 年を比較すると, 河口部から 9km 付近まではほとんど変化が見られない. しかし 9.0km~14.0km 付近は平均で 1m 程度低下している.
- 1955 年~1965 年の比較では, 河口~6.0km 付近で 2m 前後低下している, これは河床掘削によるものである.
- 1965 年以降においては, 7.0km~14.0km 付近で大きな変化が見られる. これは河道計画およびコンクリート用骨材の需要増加に伴い河床の砂利採取が行われたことが原因している. 1965 年以降は河床低下が進行したため, 採取規制が行われ河床低下が緩和され現在に至っている.
- 河口部 (0~1km の河床低下量が少ない. これは掘削しても海水面が侵食基準面になり上流からの土砂が堆積するからである.

図 3.2.35 に 1929 年 (昭和 4 年) 基準の手取川の平均河床高の変化量を示す.

以下に 1965 年以降の各セグメントの河道変化量を詳述する.

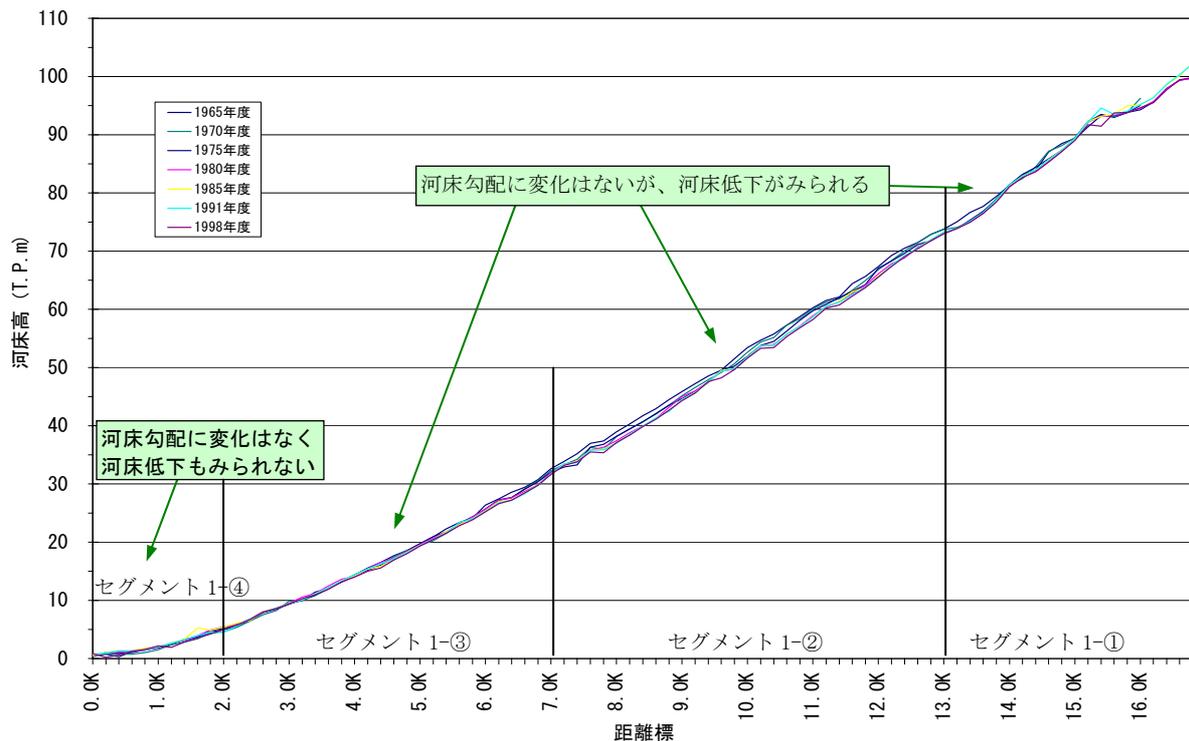


図 3.2.33 縦断形状の変化

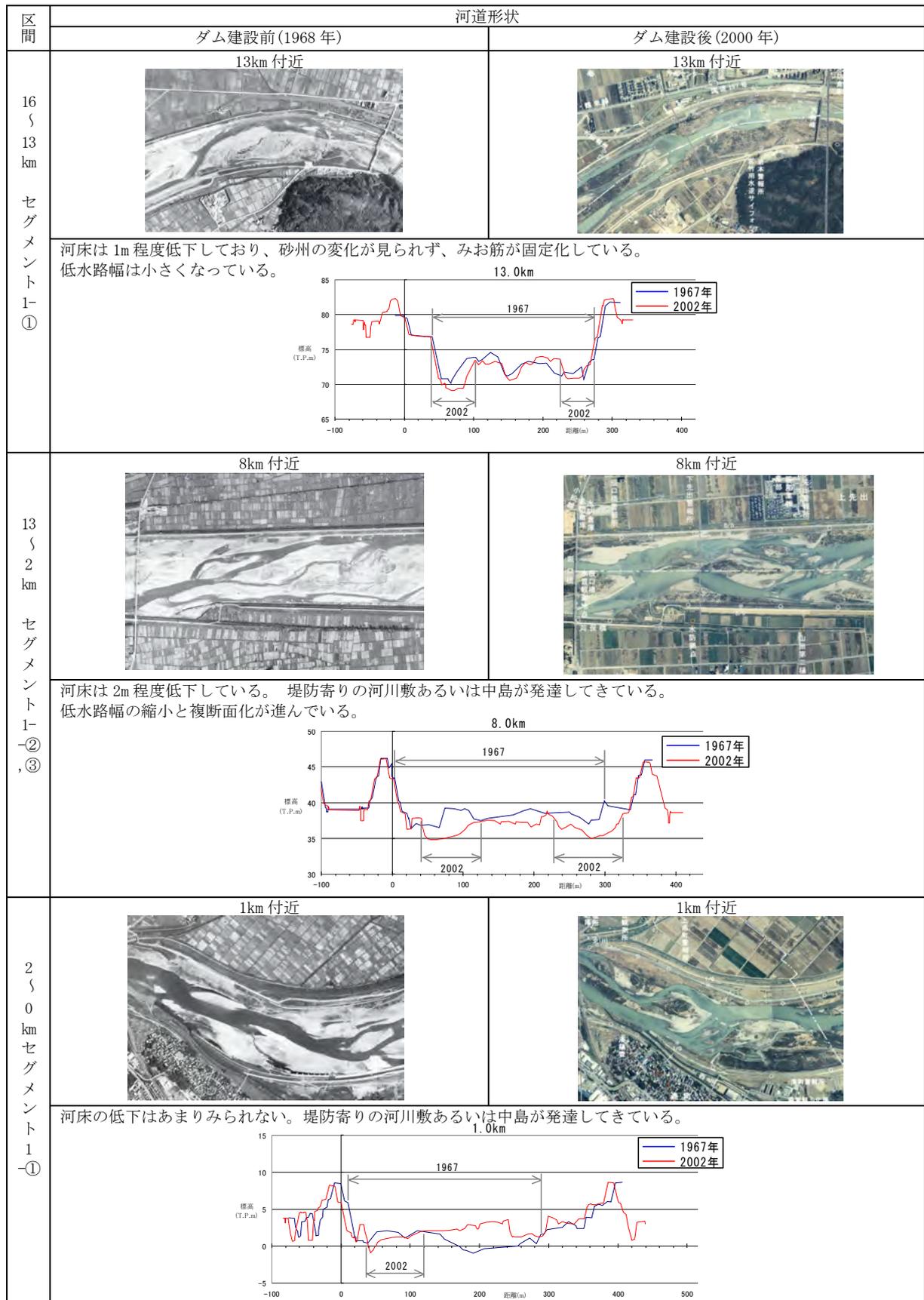


図 3. 2. 34 平面形状と横断形状の変化

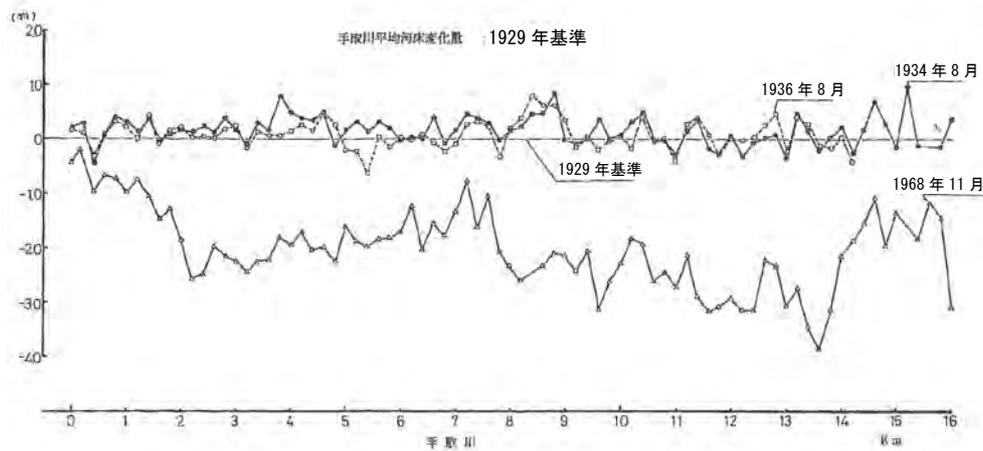


図 3. 2. 35 手取川平均河床変化量(1929 年基準)

1) 17km～13.5km 区間 (セグメント 1-①)

平均河床勾配はダム建設前後ともに 1/130 で変化はない。1965 年から現在までに平均河床高は 1m 程度低下している。ダム完成以前から徐々に低下の傾向があり 0.3m 程度低下していたが、ダム完成後の 5 年間で 0.2m 程度低下した。さらに、1991 年以降に 0.5m 低下した。滞筋は、ダム完成以前から、固定しており、本区間の上流部にはベドロックが露出していた。砂州形状は単列砂州であった。ダム完成以前から本区間は河床低下傾向にあり、河床材料も大きくアーマ化の傾向があった。平均年最大流量時の川幅も 125m 程度で下流のセグメントの半分程度しかなかった。ダム完成後は、平均年最大流量が減少したため、湾曲部外湾の標高の高いところは洪水攪乱の減少により草原化、樹林化が進行し、高水敷幅が増加した。

代表断面 (13.0km 断面) の低水路幅は、冠水頻度が減少したため標高の高いところに植生が進入し複断面化が進み、230m から 142m に減少している。

2) 13km～7km 区間 (セグメント 1-②)

平均河床勾配はダム建設前後ともに 1/150 で変化はない。1965 年から現在までに平均河床高は 2m 程度低下している。ダム完成前の 10 年間で 1m 程度低下した。これは掘削によるものである。さらにダム完成後の 5 年間で 0.3m 低下した。その後一時、河床低下が治まったが 1991 年以降に 0.2m の低下があった。ダム完成以前においては 2～3 列の多列砂州であったが、洪水流量の減少により、砂州の標高の高いところは掃流力が減少し攪乱されなくなり、草本やヤナギが進入、活着し、島状地形の発達とみお筋の固定化が進行しつつある。また河床材料も大きくなり C 集団の割合が増加している。

代表断面 (9.0km 断面) の低水路幅は複断面化が進み、横断面の経年変化からみると 300m から 180m に減少している。

3) 7～2km (セグメント 1-③)

平均河床勾配はダム建設前後ともに 1/200 で変化はない。1965 年から平均河床高は 0.5m 程度低下している。1965 年から 1970 年までの間に 0.3m 程度低下し、その後一時、河床低下は治まった。しかし、ダム完成後に 0.2m 程度低下した。ダム完成以前においては 4 列の多列砂州であった

が、洪水流量の減少により、砂州の標高の高いところは掃流力が減少し攪乱されなくなり、草本やヤナギが進入、活着し、島状地形の発達とみお筋の固定化が進行しつつある。セグメント 1-②と同様であるが、その進行程度はセグメント 2-②より遅い。本区間は堆積空間でありことがこの差異を生み出しているのであろう。

4) 2km～0km 区間 (セグメント 1-④)

平均河床勾配はダム建設前後ともに 1/410 で変化はない。本区間は 1960～1970 年代の河床掘削によって形成された小セグメントであり、河床材料中には砂分が 30%ほどであった。ダムの完成後の河床低下は小さく平均粒径も大きな変化はない。砂州の頂部には草本やヤナギの進入が見られる。

(7) 植生の変化

(4)で示された 3 つのセグメントにおいて、代表的な横断面における植生の変遷を航空写真 (1968 年, 1989 年, 2000 年) を用いて整理した。区分は植生域 (木本), 植生域 (草本), グラウンド, 植栽地, 人工構造物, 砂州, 開放水面の 5 区分とした。図 3.2.36 に結果を示す。

セグメント 1 (16km～13km) に該当する 14km の横断面における植生変化を見ると、1968 年ではほとんど見られなかった木本が平成元年以降大幅に増加していることが判る。この木本はほとんどがハリエンジュであり、ダム建設が 1980 年であることを考えると、ダム建設後に河道内樹林化が進行したことが推察される。辻本 (2001) は、手取川における年最大流量と植生域の経年変化から、1980 年の手取川ダム建設以降の大規模出水の減少とそれに植生域の増加を指摘している。

セグメント 1 (13km～2km) に該当する 10km の横断面における植生変化を見ると、植生の経年的な増加が見られるが、樹林が顕著に確認されるのは 2000 年以降であり、16～13km ほどには樹林化が進行していないことが判る。このことは河道内樹林化が上流から進行していることを示唆する。

セグメント 1 (2km～0km) に該当する 2km の横断面における植生変化を見ると、1989 年に一時的に植生域の拡大が見られるが、2000 年で再び減少傾向を示す他、樹林がほとんど見られないことから、上流部に見られるような経年的な植生域の拡大は起こっていないものと推察される。当該地区の範囲では河床低下があまり見られないことから、上流部に見られるような植生が繁茂できるような高水敷が形成されないためであると推察できる。

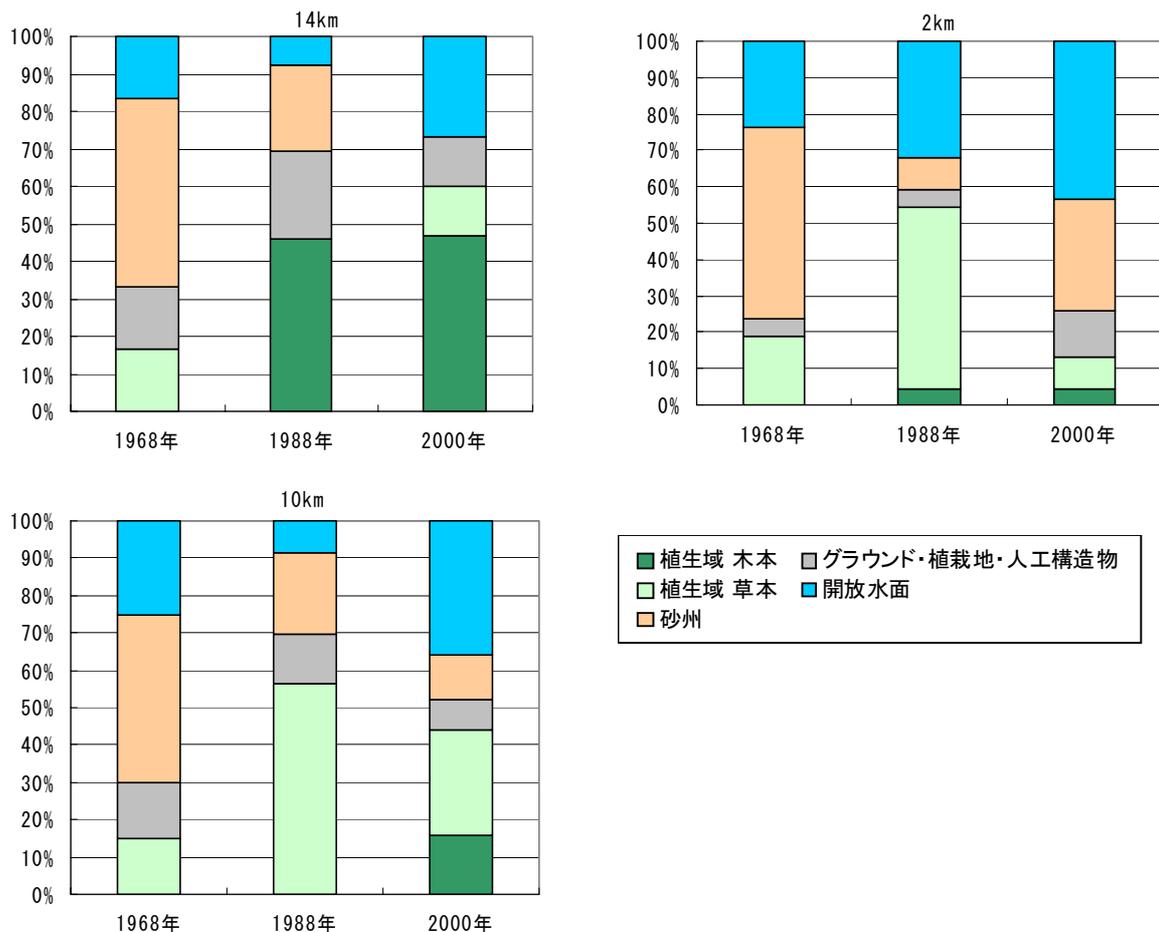


図 3. 2. 36 地被状態の変化

(8) 横断面テラスごとの流量と掃流力の関係

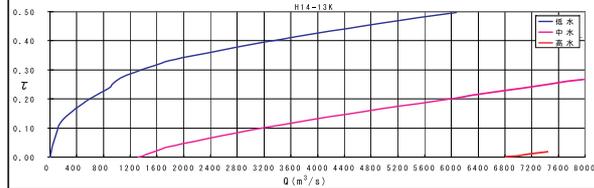
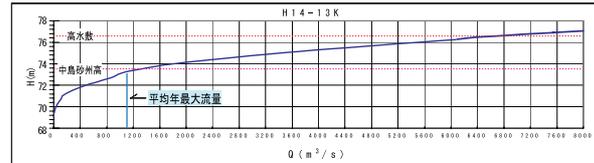
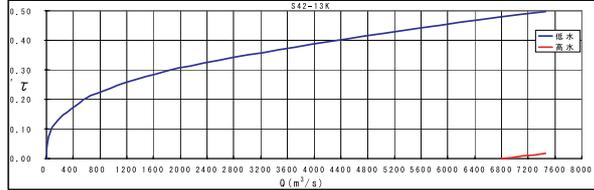
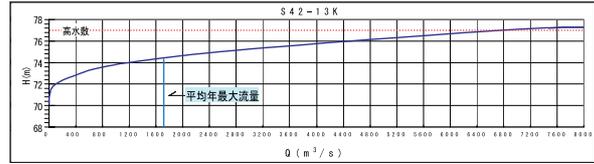
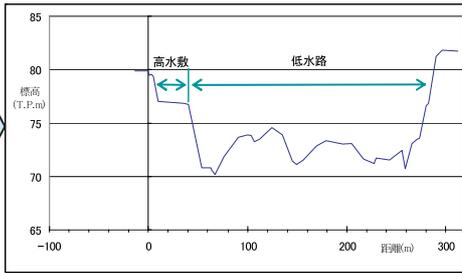
ダム建設前後の代表断面における横断形状の変化とテラスでの流量と掃流力について整理すると図 3. 2. 37 に示すとおりである。なお掃流力の評価法は、矢作川と同様である。ダム建設後は河口付近を除く上流側の 13km～2km の区間では河床低下とともに複断面化が進み、高水敷や中島が形成されている。

この高水敷や中島砂州高までの河川流量はほぼダム建設後の平均年最大流量に対応している。

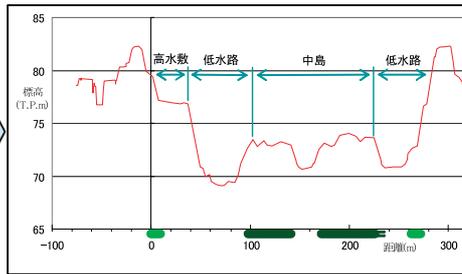
一方、掃流力は河床低下や低水路幅の縮小によって、低水路河床に対してはダム建設前後で平均年最大流量が約 $600\text{m}^3/\text{s}$ の変化であるにもかかわらず、その変化は小さく、ほぼ同程度の値となっている。

13.0km

ダム建設前
(1967年)



ダム建設後
(2002年)



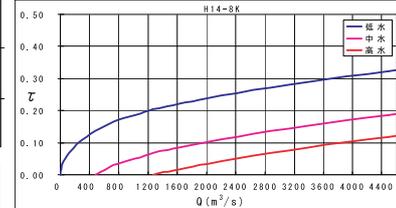
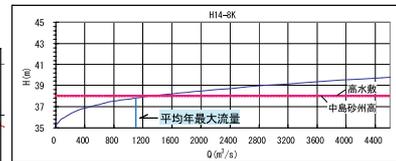
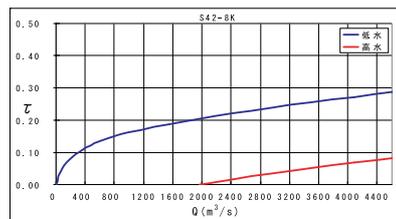
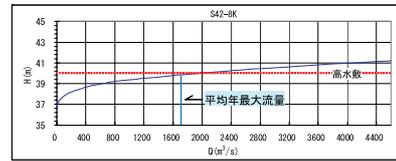
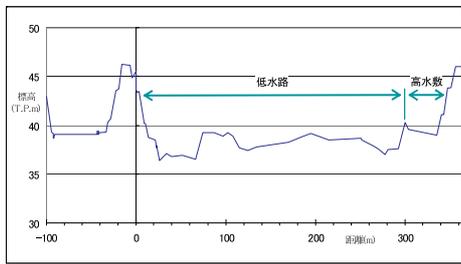
ダム建設後に中水敷が新たに形成された。中水敷までの流量は、平均年最大流量と近い値となっており、流量の変化が河川断面を変化させたと予想される。掃流力は、中水敷の掃流力が約1,300m³/s程度から発生している。
また、中水敷で植生の発達(木本の増加)が著しい。



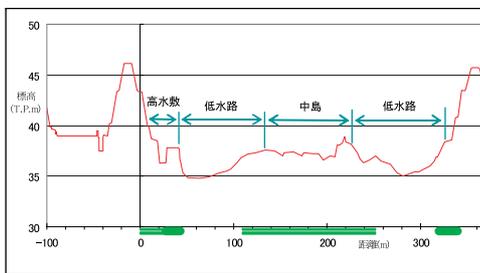
※植生域範囲は下記資料を参照した。
・1967年：1968年航空写真
・2002年：2000年航空写真および2002年植生図

8.0km

ダム建設前
(1967年)



ダム建設後
(2002年)



ダム建設後に中水敷が新たに形成された。掃流力は、中水敷の掃流力が約500m³/s程度から発生している。
また、高水敷・中水敷・低水路で植生の発達(木本の増加)がみられる。

図 3. 2. 3-37(1) 横断形状の変化と流量・掃流力の関係 (1)

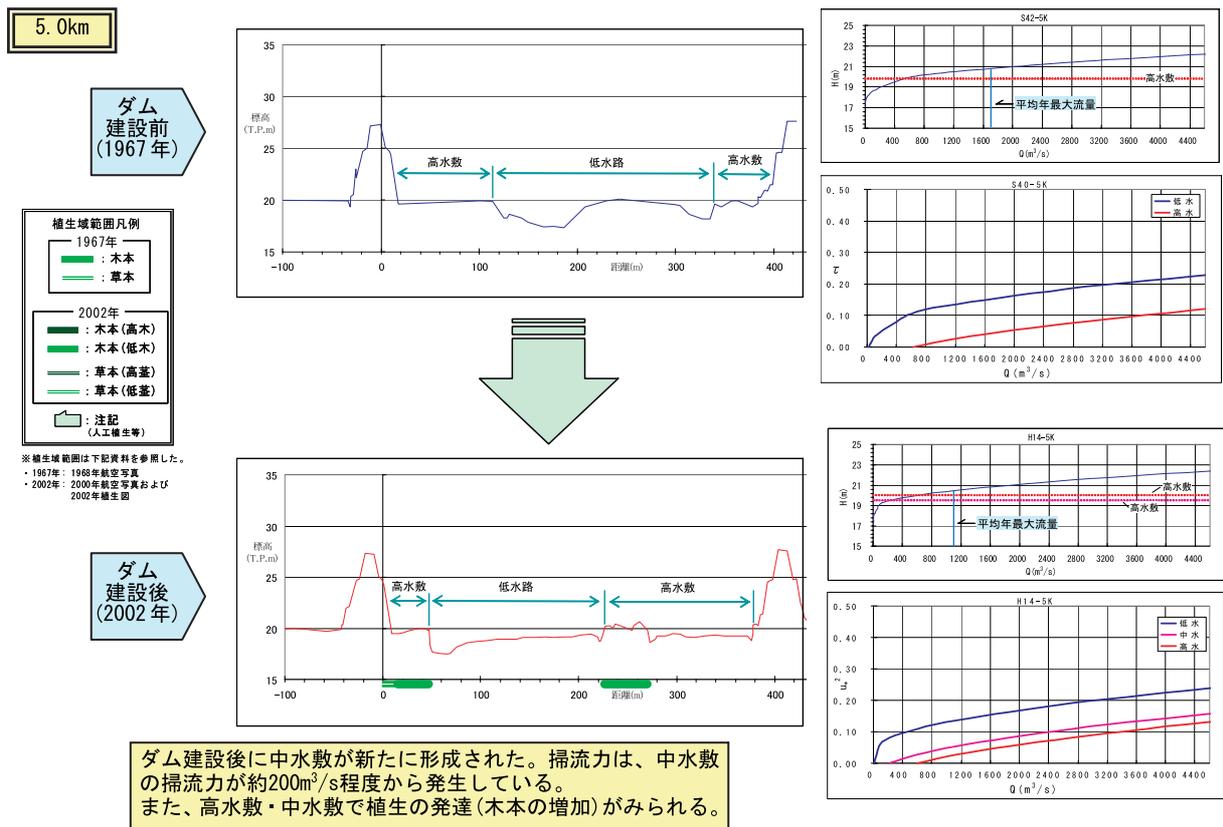


図 3. 2. 3-37 (2) 横断形状の変化と流量・掃流力の関係 (2)

(9) 想定される河道変化プロセス

人為的インパクトである手取川ダム建設による河道変化のプロセスを、前項までの知見を基に整理した。

1) 16km～13km 区間 (セグメント 1-①) 及び 13km～2km 区間 (セグメント 1-②)

- ① 当該区間は扇頂部にあたり、ダムの建設によって流量の減少とともに土砂供給が減少した区間である。
- ② 土砂供給が減少したため河床は低下し、河床材料は移動し、細粒分が流出して礫は粗粒化した。
- ③ さらに流量の減少によって砂州の冠水頻度が低下して、砂州の移動が少なくなり、みお筋が固定化された。
- ④ 水深が減少し、河岸沿いの水深の浅い所や中州の頂部にシルトや細砂等の細粒分が堆積した。
- ⑤ ここに草本が侵入し、更に細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑥ その結果、複断面化が進み、高水敷や中島が形成され、低水路幅が減少した。

2) 2km～0km 区間 (セグメント 1-③)

- ① 当該区間は扇端部の区間にあたり、土砂供給のある区間である。
- ② ダム建設による流量の減少とともに出水頻度や砂州の冠水頻度が低下し、砂州の移動が不

活性化した。

- ③ 河床は上流からの供給土砂があり、また海水面で河口の河床高が規定されているため河床高や河床勾配に大きな変化はなかった。
- ④ 流量の減少によって水深が減少し、河岸沿いの水深の浅い所や中州の頂部にシルトや細砂などの細粒分が堆積した。
- ⑤ ここに草本が侵入し、更に細粒分の堆積が進み、堆積厚が増加した。
- ⑥ その結果、高水敷や中島が形成され低水路幅が減少した。

(10) 想定される生態系の変化

手取川などの礫床河川では、(9)で示したような河道変化プロセスに伴い、以下に示すような生態系の変化が予想される。

1) 植生の繁茂

手取川のような礫床河道では河床低下に伴う高水敷あるいは島状地形が形成されると同時に、高水敷化した場所に細粒土砂が堆積する。これに伴い草本類や木本類が繁茂できる場所が形成され植生繁茂が起こると考えられている。例えば多摩川でも礫床河道において同様の河道内樹林化が見られ、河床低下や細粒土砂の堆積等と関連づけてシナリオが示されている。手取川では、上流の手取川ダム建設以降の年最大流量の減少、扇状地河川部の上流からの河床材料の粗粒化と滲筋の河床低下の進行が想定され、今後も河道内に島状地形の成長と植生繁茂が進行すると考えられる。

また上記のような植生の繁茂に伴い、いままで植被のまばらな砂礫質の河原を主な生活の場としていた生物の生活空間が減少し、河原らしい植生が失われつつある。例えば同様の現象が報告されている多摩川では、河原に生息する代表的な植物であるカワラノギク(絶滅危惧種 1B類)が、1976年には13.5haの広範囲に分布していたが、1984年には2.2ha、1993年には0.8haと減少した。これに対して、河道内樹林化が進行し1992年には22%まで増加し、これらの約80%をニセアカシアが占めていることが報告されている。

2) 水域環境の変化

流量の減少・河床低下等に伴う水域面積の減少及び河床材料の粗粒化に伴い、平水・低水流量の減少に伴う水深の減少、低水路の固定などによる河床の平坦化、冠水頻度の減少により砂州の標高の高いところに細粒土砂の堆積が生じ、生息環境の変化に応じて水生生物(魚類・底生動物等)の種および量の変化が懸念される。

また周辺のワンドタマリと呼ばれる一時水域と本川の連続性の減少も懸念される。このようなワンドタマリは一般的には産卵場(出水を契機に一時水域に入って産卵)、稚魚の保育場、洪水時の避難場所として有意義な場となっていると考えられており、このような場所との連続性の減少に伴い上記のような機能が失われる可能性がある。

3.2.4 江の川

(1) 河川概要

江の川は、その水源を阿佐山（1,218m）に発し、志路原川、戸島川等の小支川のほか、三次市において、馬洗川、西城川、神野瀬川、島根県に入り出羽川、八戸川等の支流を合流した後、江津市において日本海に注ぐ幹線流路延長 194km、流域面積 3,870km²の中国地方最大の一級河川である。山地は石見高原、中国山地等の急峻な山々が流域のほとんどを占め、人口は三次盆地に集中している。

直轄区間上流端から三次市内にかけての区間は両岸では護岸が整備されている部分が多く、市街地、水田等が広がり、河床勾配は 1/300～1/700 程度である。高宮町から作木村の両国橋までの区間の両岸は露岩地が点在する溪谷状を呈し、河床勾配は 1/200～1/1,200 程度となっている。両国橋から浜原ダムまでの区間は、両岸に山が迫り、川幅は狭く、溪谷部を川は蛇行する。浜原ダムから邑智町の区間で川は大きく屈折し、川本町、桜江町を経て河口に至る。川本町から河口の区間の河床勾配は 1/1,000～1/3,000 程度となっている。

江の川の基本高水流量は、尾関山地点で（1988 年改定）10,200m³/s であり、流量配分は、**図 3.2.39**のごとくである。

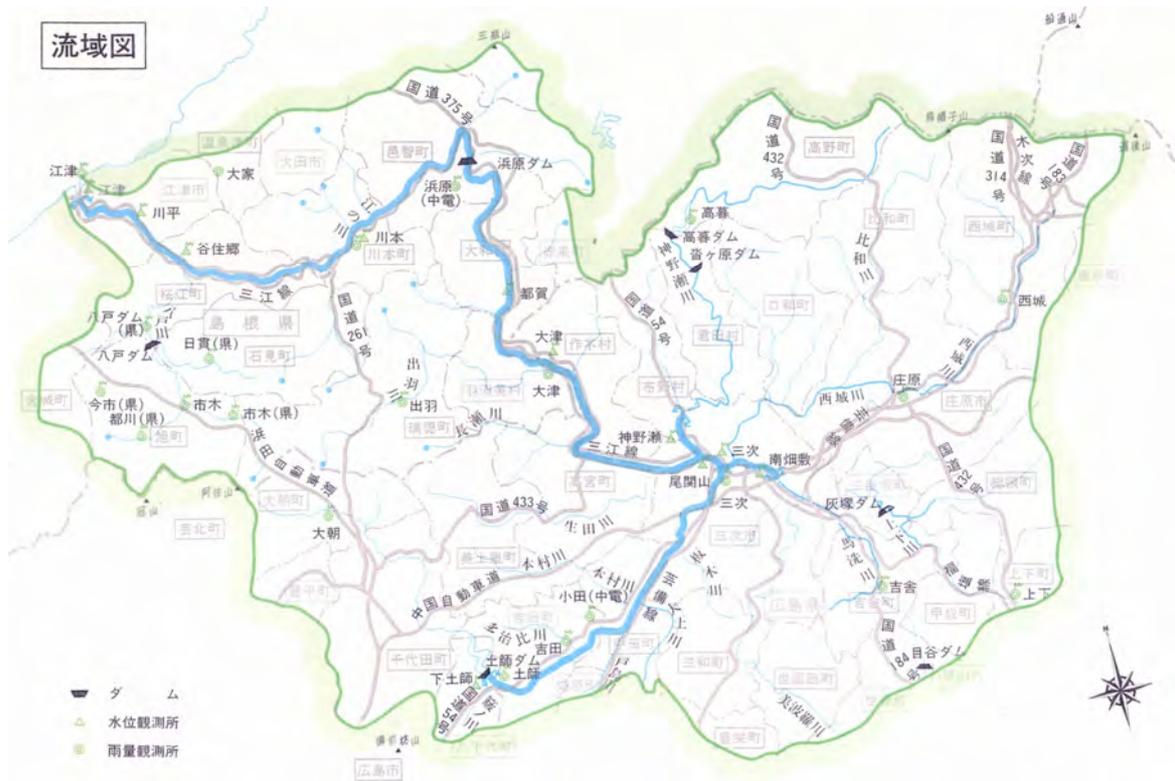


図 3.2.38 江の川流域図

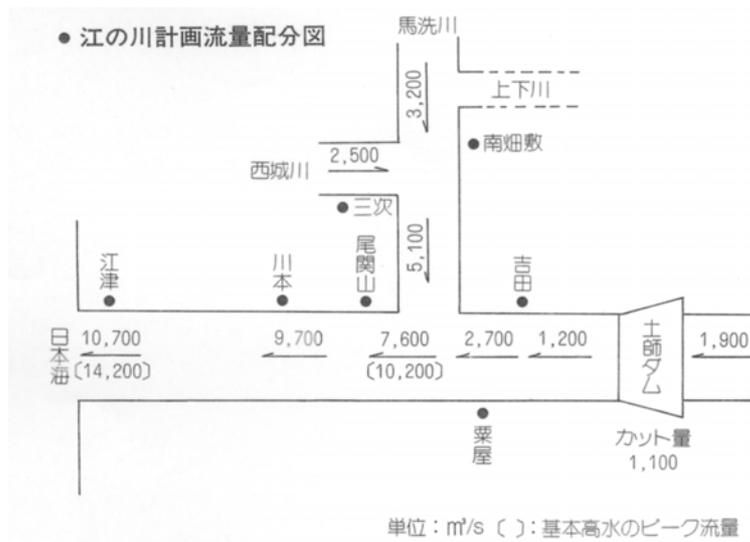


図 3. 2. 39 流量配分図

(2) 河道および河川環境に与えた人為的インパクト

河口より約 180km 上流に位置する土師ダムは 1973 (昭和 48) 年に竣工した。有効貯水量 $41,100 \times 10^3 \text{m}^3$ の多目的ダムである。

土師ダムの集水面積は 308km^2 で、江の川流域の約 8% を占めている。(ただし、本検討の対象区間の末端である栗屋地点上流域では約 46% となる。) また、近年、10 ヶ年の年間流入水量が $370.3 \times 10^6 \text{m}^3$ であることから、ダム回転率は約 7.8 回/年となる。江の川上流域に対する人為的インパクトとしての位置付けは大きい。

(3) ダムの建設による流況の変化と土砂環境の変化

1) 流況の変化

河口より 141.6km 上流の栗屋地点における、ダムの建設による日流量の流況の変化は表 3. 2. 10 および図 3. 2. 40 のとおりである。また日流量の流量階別のダム完成前後の発生頻度は図 3. 2. 41 のようである。ダム完成後 $50 \text{m}^3/\text{s}$ 流量以上の日流量の発生頻度は全て小さくなっている。

平均年最大流量は、図 3. 2. 42 に示すようにダム建設前後でダム建設前の 1964 年から 1973 年で $1,125 \text{m}^3/\text{s}$ が完成後 1974~2001 年で $749 \text{m}^3/\text{s}$ となり、約 $370 \text{m}^3/\text{s}$ の減少 (33% 減) となっている。ただし、ダム完成以前の観測データは 9 年であり、また 1972 年に $3000 \text{m}^3/\text{s}$ 弱の大洪水があり、これがダム築造以前の洪水流量を大きくしている。ダム築造以前の平均年最大流量は $950 \text{m}^3/\text{s}$ 程度でないかと推察される (20% 減)。また土師ダム完成前後の年最大流量の流量階別発生頻度を表 3. 2. 11 に示す。

表 3.2.10 流況表

栗屋地点(141.6k)		
	ダム設置前 (m ³ /s)	ダム設置後 (m ³ /s)
平均年 最大流量	1,125	749
豊水流量	23.07	12.59
平水流量	13.96	8.42
低水流量	9.81	6.58
渇水流量	5.38	4.85

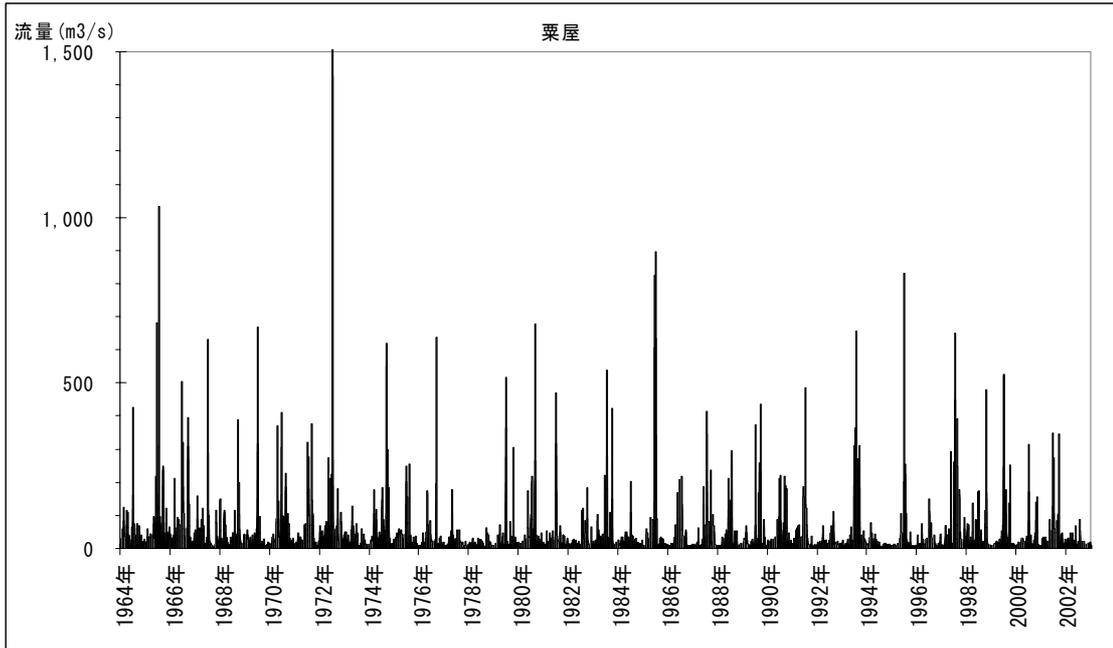


図 3.2.40 日流量の変化 (栗屋地点)

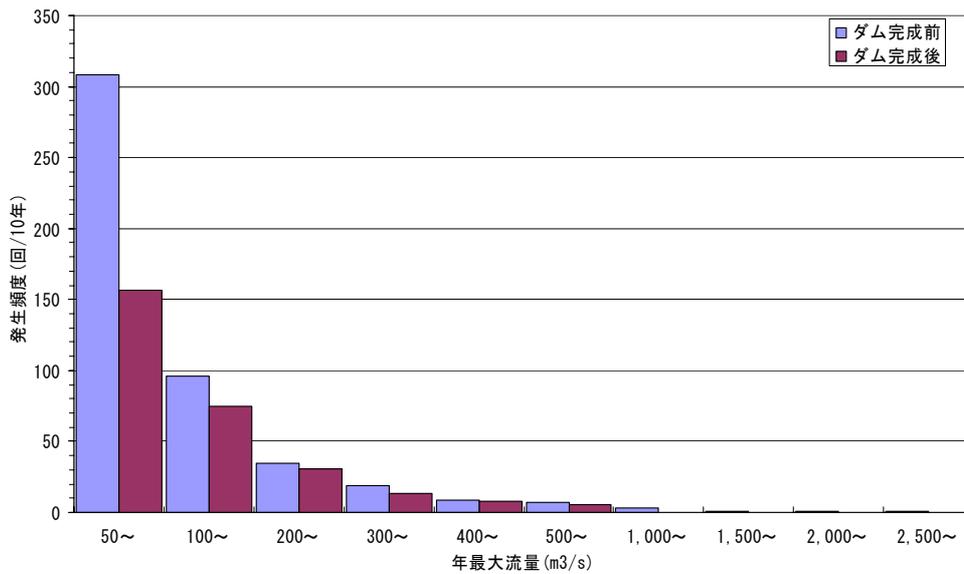


図 3.2.41 土師ダム完成前後の洪水発生頻度 (栗屋地点)

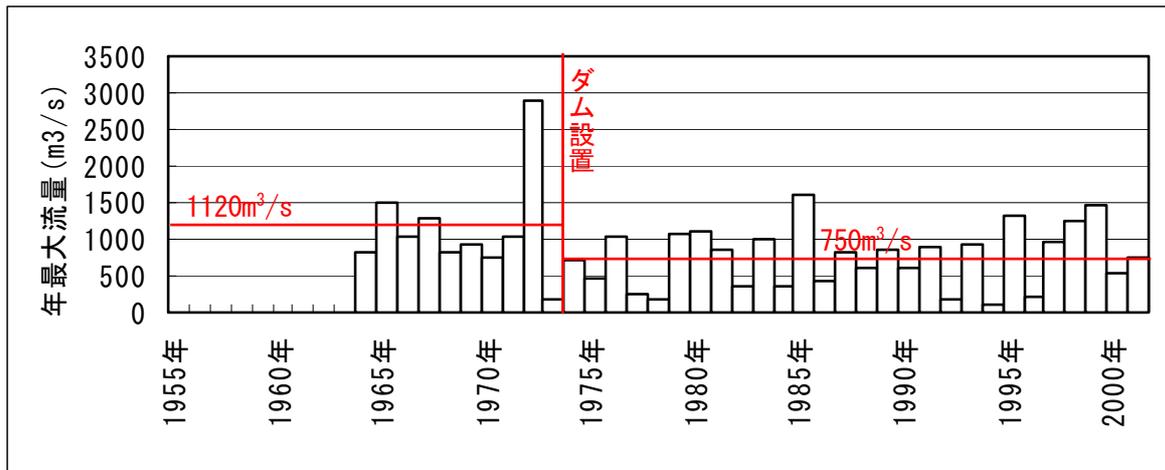


図 3. 2. 42 年最大流量の変化（栗屋地点）

表 3. 2. 11 土師ダム完成前後の洪水発生頻度（栗屋地点）

規模	実回数			10年当たり回数		
	1964～1973	1974～2002	全期間	1964～1973	1974～2002	全期間
	ダム完成前	ダム完成後		ダム完成前	ダム完成後	
50m³/s以上	308 回/10年	455 回/29年	763 回/39年	308.0 回/10年	156.9 回/10年	195.6 回/10年
100m³/s以上	96 回/10年	216 回/29年	312 回/39年	96.0 回/10年	74.5 回/10年	80.0 回/10年
200m³/s以上	35 回/10年	90 回/29年	125 回/39年	35.0 回/10年	31.0 回/10年	32.1 回/10年
300m³/s以上	19 回/10年	38 回/29年	57 回/39年	19.0 回/10年	13.1 回/10年	14.6 回/10年
400m³/s以上	9 回/10年	22 回/29年	31 回/39年	9.0 回/10年	7.6 回/10年	7.9 回/10年
500m³/s以上	7 回/10年	15 回/29年	22 回/39年	7.0 回/10年	5.2 回/10年	5.6 回/10年
1,000m³/s以上	3 回/10年	0 回/29年	3 回/39年	3.0 回/10年	0.0 回/10年	0.8 回/10年
1,500m³/s以上	1 回/10年	0 回/29年	1 回/39年	1.0 回/10年	0.0 回/10年	0.3 回/10年
2,000m³/s以上	1 回/10年	0 回/29年	1 回/39年	1.0 回/10年	0.0 回/10年	0.3 回/10年
2,500m³/s以上	1 回/10年	0 回/29年	1 回/39年	1.0 回/10年	0.0 回/10年	0.3 回/10年

2) 土砂環境の変化

土師ダムの回転率は約 7.8 回/年であることから、ダムによる土砂の補足率は 90～95%程度と推定される。土師ダムの集水面積が栗屋地点上流域の約 46%を占めるため、江の川河道の土砂環境に及ぼす影響は大きい。

(4) 河道特性量とセグメント区分

馬洗川合流点より上流の 39km の区間 (140km～179km) を河道形状、河床材料等の河道特性量よりセグメント区分した (表 3. 2. 12)。河道の縦断図、河床材料、低水路幅を図 3. 2. 43、図 3. 2. 44、図 3. 2. 45 に示す。ただし本セグメントは河岸付近に山麓が迫り、ところどころに岩が露出するようで、沖積河川といえない。河道は基本的には下刻河道といえる。

表 3.2.12 代表区間のセグメント区分

区 間	140km~179km
項 目	
代表粒径 (60%粒径)	50mm
平均河床勾配	1/600
セグメント区分	2-1

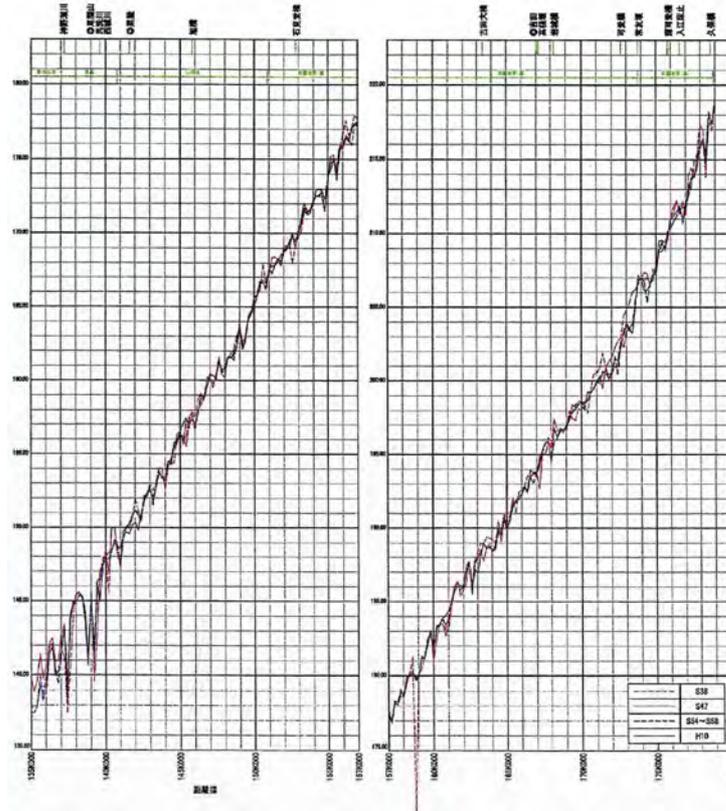


図 3.2.43 河道縦断形

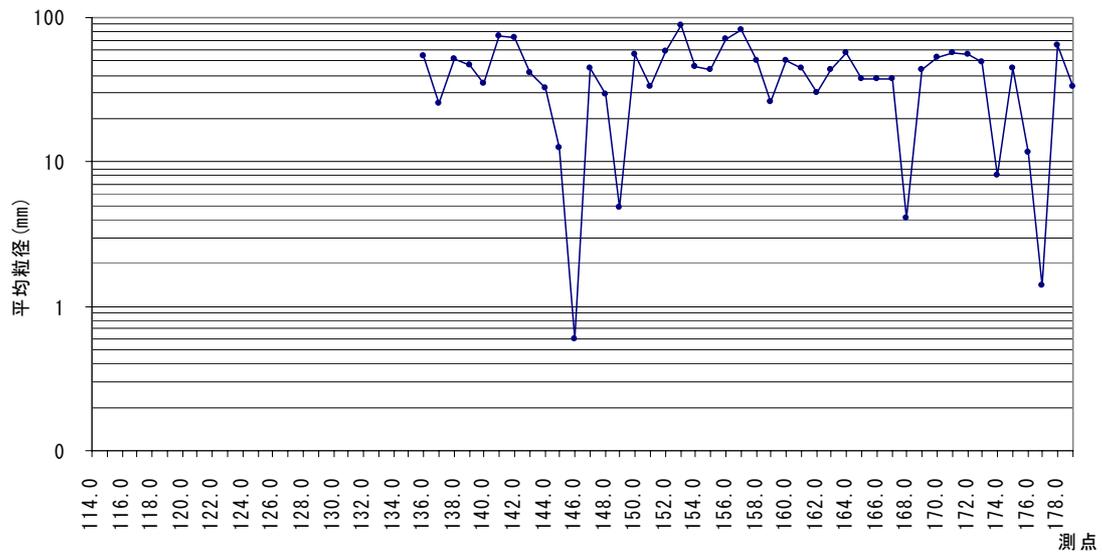


図 3.2.44 河床材料

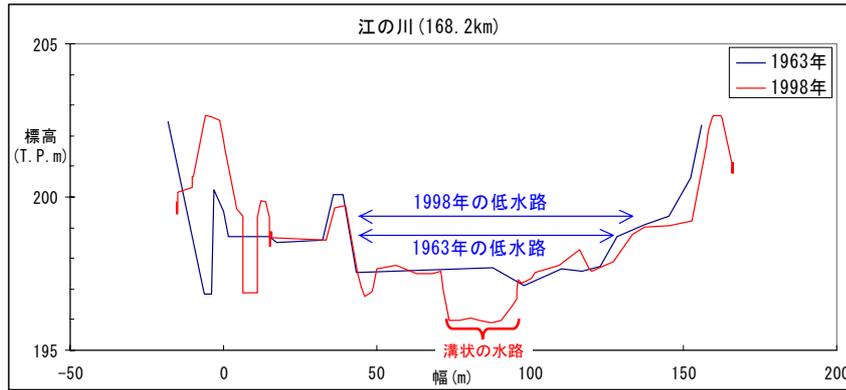


図 3. 2. 45 低水路幅の経年変化 (168. 2km)

(5) 縦断形状, 平面形状, 横断形状の変化

河道形状の変化は以下のとおりである.

平均河床勾配はダム建設前後とも 1/600 で変化はほとんどない. また, 河床高も大きな変化はみられない. みお筋は固定化の傾向にある. 代表断面 (168km 断面) の低水路幅はダム建設前後ともに 100m であるが, 新たに低水路が形成されている (図 3. 2. 46).

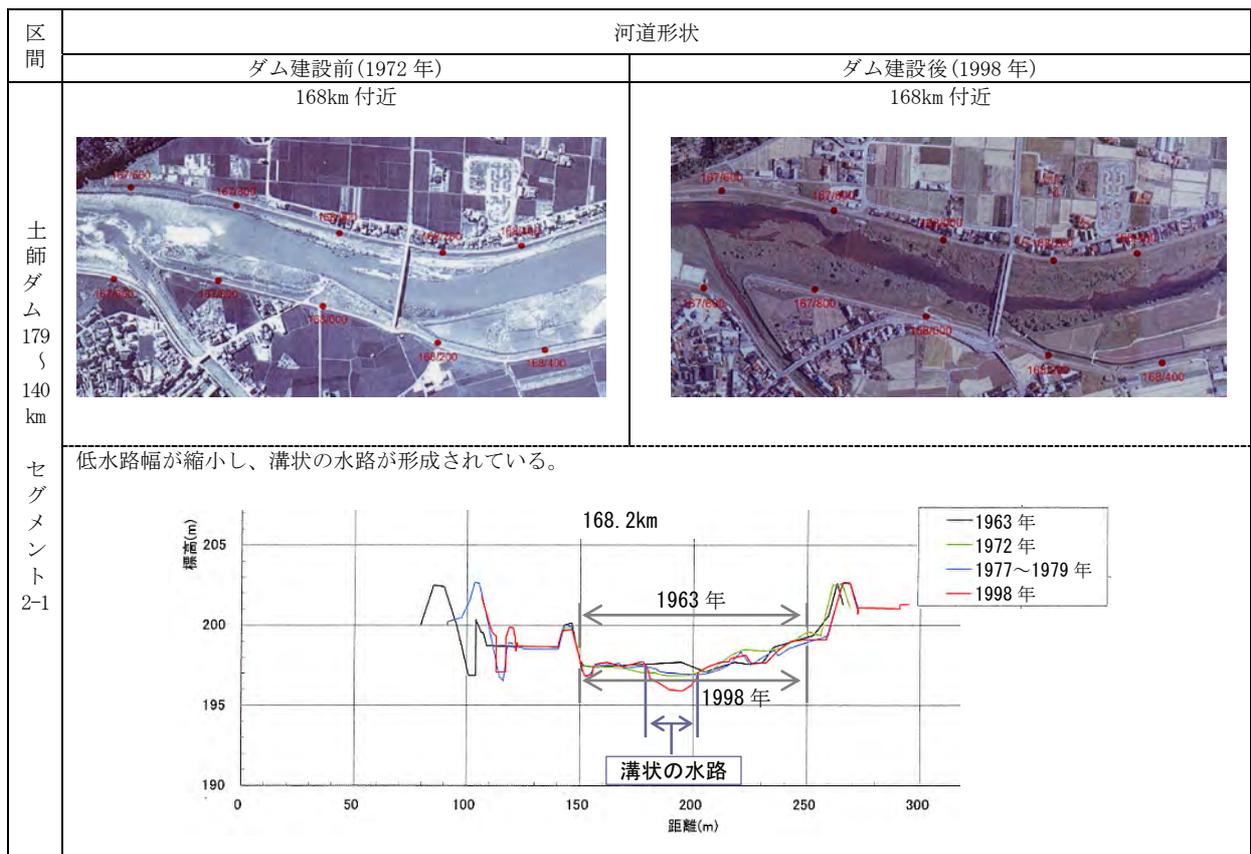


図 3. 2. 46 平面形状と横断形状の変化

(6) 植生の変化

代表的な横断面における植生の変遷を図 3.2.46 に示す航空写真（1972 年，1998 年）を用いて図 3.2.47 に整理した．区分は植生域（木本），植生域（草本），グラウンド・植栽地・人工構造物，砂州，開放水面の 5 区分とした．14.0km の横断面における植生変化を見ると，植生の発達はあまり見られない．

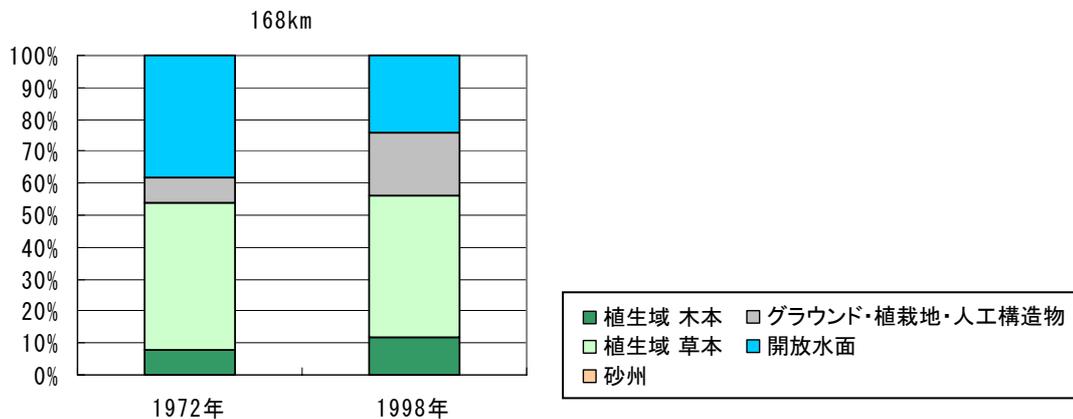


図 3.2.47 地被状態の変化

(7) 横断面テラス毎の流量と掃流力

ダム建設前後の代表断面における，横断形状の変化と高水敷での流量と掃流力について整理すると，図 3.2.48 に示すとおりである．なお掃流力の評価法は矢作川と同様である．

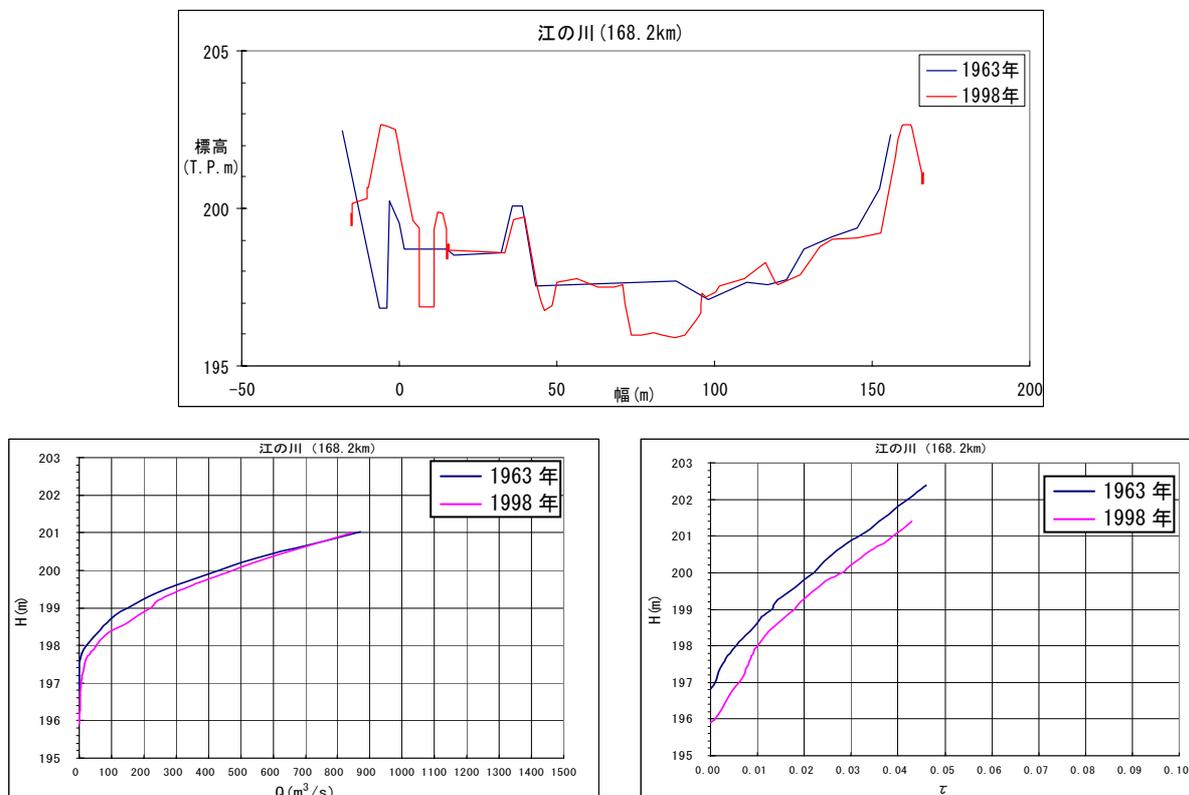


図 3.2.48 横断形状の変化と流量，掃流力の関係

ダム建設後は河道の一部が溝化し、低水路が形成されている断面もあるが、全体として断面に大きな変化はなく、ダム建設による低水路および高水敷上の同一洪水流量に対する掃流力に大きな差異はない。

ダムによる洪水流量の変化が 20%程度と推察されること、また本セグメントは沖積河道とは言えず木津川 37～27km の狭窄部的性格を持つこと、掘削による河床低下がなかったことが、河道および植生の変化が小さかった理由であろう。

3.2.5 シナリオの妥当性と課題

2.5 節に示したのシナリオの妥当性と課題について、検討対象 4 河川の実態調査結果を用いて、とりまとめる。

概ね流量変動が河川環境に及ぼす影響について定量的な評価が可能であることを示すことができたが、個々のセグメントにおいてシナリオが妥当しないものもある。

それらをあげると

①河床低下による河床および河岸に旧堆積物が現れる区間（木津川 6～0km）

この区間は、下流淀川本川の河床掘削による河床低下により、本区間が侵食区間となったことと、河道が人工的に付け替えられ浅いところに氾濫原堆積物が存在したことにより、通常のシナリオが妥当しなかったものであろう。

②狭窄部の河道区間(木津川 37～26km, 江の川 179～140km)

狭窄部は、本来、下刻傾向にある区間で所々に露岩が露出する。①一般に河床掘削をする区間でなく、高水敷と低水路の河床高の差異を生み出さないこと、②同一河床材料の沖積河川に比べて平均年最大流量の掃流力が大きいこと、③単列砂州の区間であったこと、④川幅が狭く洪水時も流路幅が一定なので掃流力が大きいことが、平均年最大流量の数割の減少では、河道変化が現れない理由であろう。

今後、河道変化、生態系の変化シナリオの高度化を図るためには、事例研究（人為的インパクトに対して河道および河川生態が時空間でどのように変化してきたかについての河道特性調査および環境特性調査（山本、2004）の実施・増加と要因分析による変化現象の解明すなわち説明要因とその影響による河道および生態変化シナリオの作成、さらに変化速度を評価するためのモデル化・理論化が必要である。

なお 2.5 節の経験則を用いたシナリオは変化速度を適確に評価し得ないが、これも河道特性分類とインパクト要因ごとに事例分析を加え類型化していけば、ある程度、変化速度を評価しえる可能性が大である。

3.3 礫床河道における安定植生域の形成モデルとその適合度

3.3.1 安定植生域の形成モデル

本節では、礫床河道における安定植生域の形成モデルを4河川に適用し、モデルの有効性について検証をおこない、モデルの問題点、改良点をさぐる。

なお、ここで述べる礫床河道における安定植生域の形成モデルとは、国土技術政策総合研究所で開発された「植生消長の予測モデル」である（藤田ほか，2003；末次ほか，2004）。

本モデルは、扇状地礫床河道における安定植生域の消長を大局的に予測するモデルであり、多摩川の永田橋地区、秋川合流地区、日野橋地区を対象として植生繁茂・樹林化の実態調査より、その基本メカニズムを解明し、モデルの構築に当たったものである。

[1] モデルの構成

モデルの構成は、安定植生域の消長に関わる現象を次の4つの過程に分け、それぞれについて定量的記述の手法を当てはめ、統合化したものである。

①河床変動と礫床裸地（植生タイプⅠ）の形成

洪水により有意な河床変動が起こり、以前と異なる形状を持つ河床が形成される。河床表面は礫床で裸地である。

②パイオニア的植物（植生タイプⅡ）の繁茂

裸地の礫床面に、立地条件の変化をほとんど伴わず発芽・定着できる植物が先駆的に繁茂する。これは「パイオニア的植物の繁茂」と呼ばれている。ここでの「パイオニア的植物」は、来るべき表層細粒土層の堆積に寄与できる植物だけを対象にしている。礫床の裸地が形成されてから（過程①あるいは後述の過程④）、過程①、④のいずれも起こらない条件で時間 T_{pr} が経過した後にパイオニア的植物が繁茂し始める。

③表層細粒土層の堆積と安定植生域（植生タイプⅢ）の形成

洪水が作用し、表層細粒土層（粒径 d_{ts} ）が堆積する過程である。表層細粒土層の厚さ D_{ts} が D_c （安定植生域の形成に必要な表層細粒土層厚の最低値）を上回った時にすぐに安定植生域が形成されるとする。実際には、表層細粒土層の形成と安定植生域の形成には時差があるが、安定植生域の持続期間に比べ小さいとして無視されている。表層細粒土層を形成する材料は、上流から浮遊砂（ウォッシュロード）あるいは浮遊砂的挙動をする土砂として供給されることを前提とし、その量は、流量に比例した濃度で上流から無制限に供給されるものとしている。

④洪水による植物の流失

植物の基盤を構成する河床表面の礫（粒径 d_r ）に関する無次元掃流力 τ_* が τ_{*ce} （植生が立地への有意な攪乱となるための域値）を越えた場合に過程④が起こり、植物が全面的に（表層細粒土層がある場合にはそれも一緒に）流失し、再び礫床裸地に戻るとする。このように、本モデルでは、立地条件の攪乱による植物の流失が、河床主材料である礫の移動に支配されるという考えが基本となっている。なお、本過程では河床形状は概ね変わらないとする。有意な河床変動を伴う場合は、過程①にもどる。

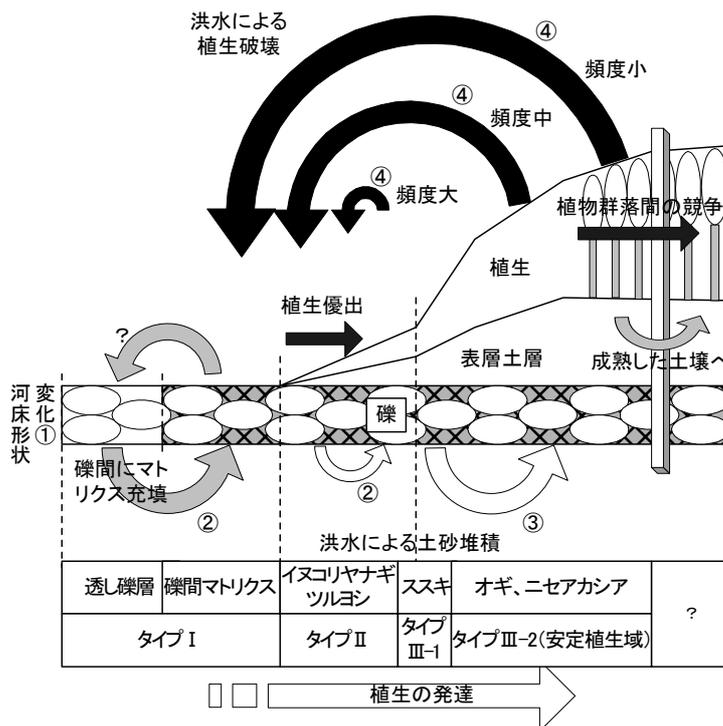


図 3.3.1 植生モデルにおける植生消長現象のとりえ方 (藤田ほか, 2003)

なお上記の植生タイプの分類は

植生タイプ I…礫床裸地, 礫床裸地に生育できる植物

植生タイプ II…パイオニア的植物, 表層の細粒土砂を必要とせずには繁茂できる植物, 薄い表層土層があれば繁茂できる植物

植生タイプ III…安定植生域を構成する植物である.

本モデルの対象地域となった多摩川では, それぞれの植生タイプに相当する植生として, 下記の植物が挙げられている.

植生タイプ I…裸地・カワラノギク・コセンダングサを優先種とする群落

植生タイプ II…ツルヨシ・イヌコリヤナギ群落

植生タイプ III…ススキ・オギ・オオブタクサ・ハリエンジュ

[2] モデルにおける各過程の具体的取り扱い

(1) 安定植生域拡大条件とその判定

安定植生域の拡大に大きく関与した植物種は, オギ, ニセアカシア, オオブタクサ, ススキ, ギシギシ, ヨモギ等であるが, これらの繁茂している場所の共通点として以下が挙げられている.

- ・ 表層細粒土層厚が 0cm のところには繁茂していない.
- ・ 礫床裸地→ツルヨシが定着・発達 (細粒土砂が堆積) →比高が変化→安定植生域の形成 というプロセスを経ている.

上記から求められた「安定植生域の拡大の条件」とその判定材料は表 3.3.1 のとおりである.

表 3.3.1 安定植生域拡大の条件とその判定材料

条件	条件	判定材料
条件 1	表層細粒土層が無く、礫が露出した河床面に、比較的早くパイオニア的植物（表層の細粒土砂を必要とせずに繁茂できる植物、薄い表層土層があれば繁茂できる植物）が定着すること。	礫床表面の状態（透かし礫層の有無、マトリクス*の存在状態、マトリクス中のシルト含有率） *) 下図参照
条件 2	上記条件 1 の植物群落が、当該地点で細砂粒径以下を堆積させる水理条件を作り出すこと。	代表地点における植物群落と河床勾配の関係
条件 3	上記条件 2 の水理条件のもとで有意な表層細粒土層が形成されるに見合った細砂を中心とする材料が上流からウォッシュロードあるいはウォッシュロード的挙動をする土砂として供給されること。	ウォッシュロードあるいはウォッシュロード的挙動をする土砂の供給量、該当箇所での沈降速度等
条件 4	対象期間中に、上記条件 1 の植生が流失するような礫床の大規模な移動が起こらないこと。	洪水流量の頻度分布、当該地点に作用する無次元掃流力の頻度分布

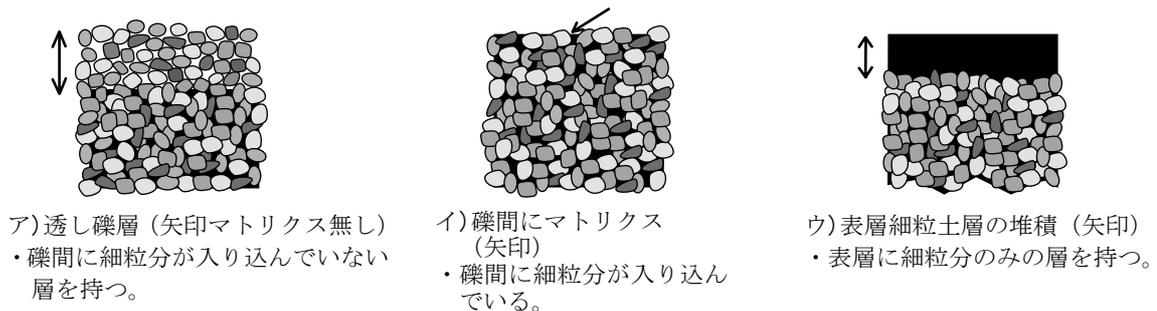
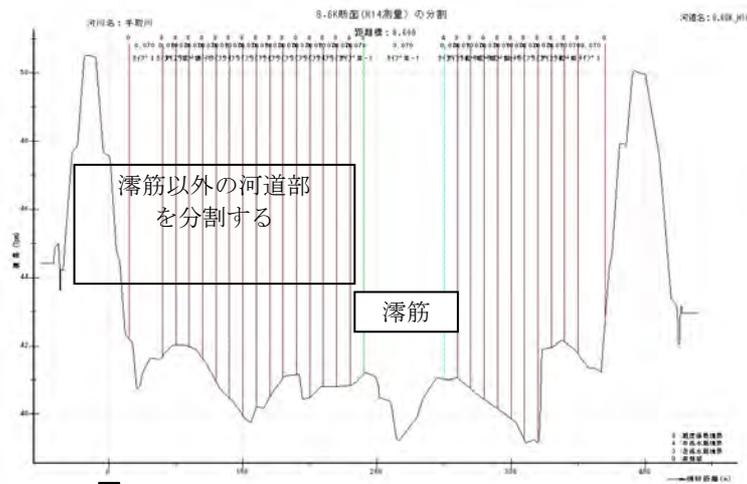


図 3.3.2 礫床表面状態の分類区分

(2) 初期条件

初期の河道の状況は、洪水後の、植生や細粒土砂がフラッシュされた状態とする。フラッシュされた河床表面は、礫床裸地である。植生が在置している所は、その状態を初期条件とする。

実際の計算は、ある横断面を対象として行う。対象断面を、横断方向にあるピッチで分割し（この分割した区間の一つ一つを以下「スプリット」と記述する。）、各スプリット間の平均高さを算定して階段状にモデル化し、スプリットごとに計算を行う（図 3.3.3 参照）。



階段状にモデル化…おのおののスプリット（分割区間）ごとに計算する。

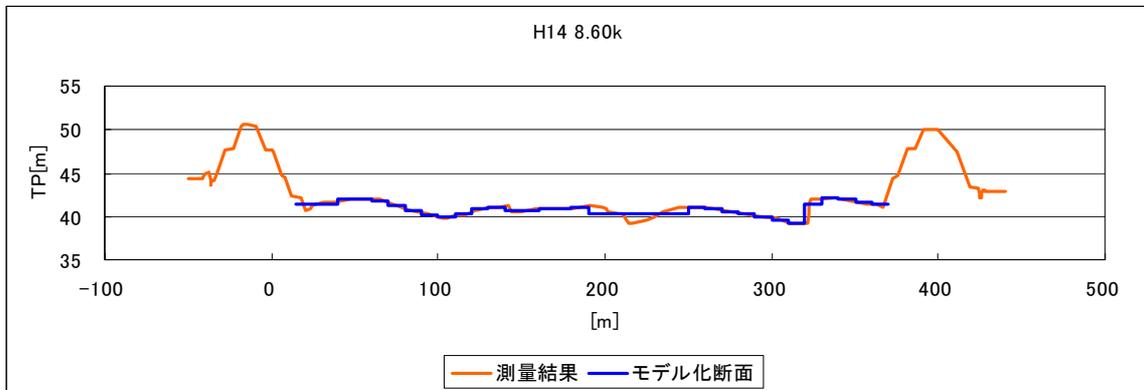


図 3.3.3 対象河道断面の分割

(3) パイオニア的植物の繁茂

洪水による河床変動による横断形状の変化や植生の流出（[1]で示した過程①或いは④）が起こらない状態がある期間継続すると、パイオニア的植物が繁茂する。この、パイオニア的植物の繁茂が開始するまでに必要な、植生の立地条件の攪乱が発生しない状態の継続期間を、ここでは T_{pr} （年）で表す。

シミュレーション上は、スプリット毎に前回の立地条件の攪乱からの経過日数を数えていくことになる。立地条件の攪乱の発生から T_{pr} 年が経過しないうちに、再度立地条件の攪乱が発生した場合には、それまでの継続期間は初期化され、再度 0 から継続期間を累積していくことになる。したがって、植生の流出が発生するような掃流力を持つ洪水が頻繁に発生する場合には、パイオニア的植物は長期に渡って繁茂しない。なお、現段階では T_{pr} を予測するための確立された手法が無いので、本モデルでは T_{pr} を所与の条件としている。

(4) 表層細粒土層の堆積と安定植生域の形成

本モデルでは、安定植生が繁茂するためには、表層細粒土層がある程度以上の厚さを持つことが条件となっている。

表層細粒土層の堆積厚の算定にあたっては、上流からの供給量を規定する浮遊砂濃度と流量の関係の規定する定数 α 、細粒土層の粒径 d_{ts} 、安定植生域の形成に必要な細粒土層の堆積厚の最低値 D_{ts} を所与の条件として設定する。

表層土層厚の堆積は、パイオニア的植物が持つ底面付近の流速低減効果により、 $U_{*u}/w_0 < 1$ の条件が満たされ、対象としている細粒土砂の河床からの巻き上がり量が 0 とみなせるときに発生する。ここで、 U_{*u} は河床に作用する摩擦速度で、流量 Q から等流計算により得られる水深 h を用いて、 $U_{*u} = \sqrt{g \cdot h_s \cdot I_b}$ により求める。 h_s は対象スプリットの水深、 I_b は河床勾配である。 w_0 は表層細粒土層となりうる粒径の沈降速度である。

堆積厚 D_t は、 $D_t = \int R_D dt$ より求める。ここで、 R_D は堆積速度であり、 $R_D = (C_b \sigma \cdot w_0) / (1 - \lambda)$ で求められる。 C_b は底面濃度、 σ は植生による細粒土砂の補足効率、 λ は堆積土砂の空隙率である。

C_b は η を介して細粒物質の鉛直平均濃度 C と結びつけられる。すなわち、

$$C_b = \eta C, \quad \eta = 6Z / (1 - \exp(-6Z)), \quad Z = w_0 / (\beta \kappa u_*^*)$$

β は鉛直混合に関する拡散係数と渦動粘性係数の比であり、ここでは 1 とした。 κ はカルマン定数であり、0.4 とした。

σ は浮遊砂の巻き上がりが植物によって抑止される効率を表した係数で 1~0 の値を持つが、ここでは 1/3 とした。

上流から供給された細粒土砂の層厚 D_t が、 $D_t \geq D_{ts}$ となると同時に安定植生域が形成されるとする。 D_{ts} の値は多摩川の例では 2~3cm とされており、本書の検討においては、現地調査における植生タイプ別の細粒土層厚の傾向を基に河川毎に設定した。

(5) 洪水による植物の流出

植生および植生の繁茂する立地条件である細粒土層は、その下部にある礫層が移動しうる掃流力で破壊されるものとする。すなわち各スプリットにおける代表粒径 d_R が移動しうる限界掃流力 τ_{*ce} が、植生がフラッシュされ裸地に戻るかどうかの判定材料となる。したがって、 $\tau_* = U_{*u}^2 / (s \cdot g \cdot d_R) \geq \tau_{*ce}$ となったときに植物が全面的に（表層細粒土層がある場合にはそれも一緒に）流失する。ここで、 τ_* は各スプリットにおける代表粒径に関する無次元掃流力、 s は水中比重である。

なお本モデルでは、計算期間中の河道形状の大規模な変化、例えばダム建設後の大規模な洪水による滞筋の変化や、ダム建設後の河床の低下や側方侵食堆積等の礫床河床形状の変化は考慮されていない。そこで、本書の検討においては、ダム建設前の河道横断形状を初期条件とし、ダム建設後の河床掘削による河床低下や河岸の侵食による低水路形状については、計算対象期間中、適宜、河床形状を更新させ、その形状で計算を続行することで考慮した。

3.3.2 モデルの感度分析と適合度

(1) 検討対象河川と植生の状況

検討対象河川は、扇状地礫床河道をもつ、セグメント 1 もしくは 2-1 である河川のうち、以下の 3 つの条件を満たす「手取川」「肱川」「大井川」「小瀬川」とした。

- ① 高水敷が形成されており，まとまった植生が存在する．
- ② 大規模な河川改修跡が見られない．
- ③ 代表的なダムが洪水調節を行っており，ダム建設前後で流量の変化が大きなことが予想される．

各河川で，河川の代表的な植生を有しており，等流計算により流れの状況の再現が見込め，一様河道で流れが支川や派川の影響をあまりうけていない箇所を対象断面として設定した．それぞれの河川の植生状況は，ダム建設前後で表 3.3.2 のように変化している．

表 3.3.2 対象河川・対象断面におけるダム建設前及び現状の植生

対象河川	対象ダム	竣工年	距離標	植生の状況	
				ダム前	現状（ダム後）
手取川	手取川ダム	1980 (S55)	8.2k	裸地が維持されている．	植生も見られるが，ある程度の裸地が維持されている．
			8.6k		
			12.6k	裸地が維持されている．	ダム後は乾燥化しススキやハリエンジュ等の繁茂が目立つ．
			13.0k		
肱川	野村ダム	1981 (S56)	10.4k	濡筋に近い部分は裸地が維持されている．	ダム後も，濡筋に近い部分は裸地が維持されている．
			12.4k		
大井川	(長島ダム)	2002 (H14)	18.0k	裸地が維持されている．	
			22.0k	右岸に安定したヤナギ林が形成されている．	
			22.2k	*) 長島ダム建設後の年数が短いためダム前後を区分しない．	
小瀬川	弥栄ダム	1991 (H03)	10.4k	裸地が維持されている．	水際まで草本類が繁茂している．
			11.4k		

また，上記 4 河川において現地調査を行い，各植生タイプに相当する植物を表 3.3.3 のとおりとした．

表 3.3.3 対象河川の植生タイプ区分

植生タイプ	手取川	肱川	大井川	小瀬川
タイプⅠ	自然裸地 人工裸地 カワラヨモギ カワラハハコ	自然裸地	自然裸地 カワラヨモギ カワラハハコ	— (該当植生無)
タイプⅡ	アキグミ イヌコリヤナギ ネコヤナギ	ヨシノヤナギ ツルヨシ	オオフタバムグラ シナダレスズメガヤ	ツルヨシ カワラハンノキ ネコヤナギ
タイプⅢ	ススキ ナワシロイチゴ イタドリ ハリエンジュ	マダケ植林	ススキ コゴメヤナギ	ススキ マダケ

(2) 予測モデルの感度分析

本モデルの主なパラメータについては、「扇状地礫床河道における安定植生域の形成機構に関する研究」（土木研究所資料第 3622 号）で感度分析が行われており、感度が大きなパラメータとして代表粒径 d_R （河床の主構成材料）を媒介とした τ_{*ce} （洪水による植物流失の条件）が挙げられ、細粒土砂濃度と流量の関係 ($C = \alpha Q$ ここで C は細粒物質の鉛直平均濃度, Q は洪水流量: 単位 m^3/s である) を規定する定数である α については、基本量 2.0×10^{-7} の 1/10 以下になると植生の出現状況が大幅に異なると述べられている。

ここでは、条件の異なる 4 河川でシミュレーションを行うにあたり、植生が繁茂する場の形成に大きく寄与する α の感度分析を行った。基本量および感度分析のための設定量は表 3.3.4 に示した。

表 3.3.4 基本量および感度分析のための設定量

α の基本量	感度分析のための設定量
2.0×10^{-7}	1.0×10^{-7} …基本量の 1/2 倍
	2.0×10^{-6} …基本量の 10 倍
	2.0×10^{-8} …基本量の 1/10 倍

この結果、基本量からそれぞれ 10 倍、0.1 倍としたケースでは、安定植生である植生タイプⅢの対象期間内における存在期間の割合、および植生タイプⅢが河道内に占める割合とも、それぞれ約 2 倍、約 1/2 倍程度に変化するという結果となった。基本量から 1/2 倍では、ほとんど結果に変化がなかった。

α は通常、 $4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$ 程度と言われている [「改訂新版建設省河川砂防技術（案）同解説調査編」（監修：建設河川局 編集：社団法人日本河川協会）]。本モデルの適用に当たっては、 α を適切なものとするため感度分析を行い、それぞれの河川の実態にあった値を設定する必要がある。

感度分析の結果を、手取川 8.6k 断面を例に、植生タイプⅢが河道内に占める割合、植生タイプⅢの存在期間割合を軸として図 3.3.4 に示した。

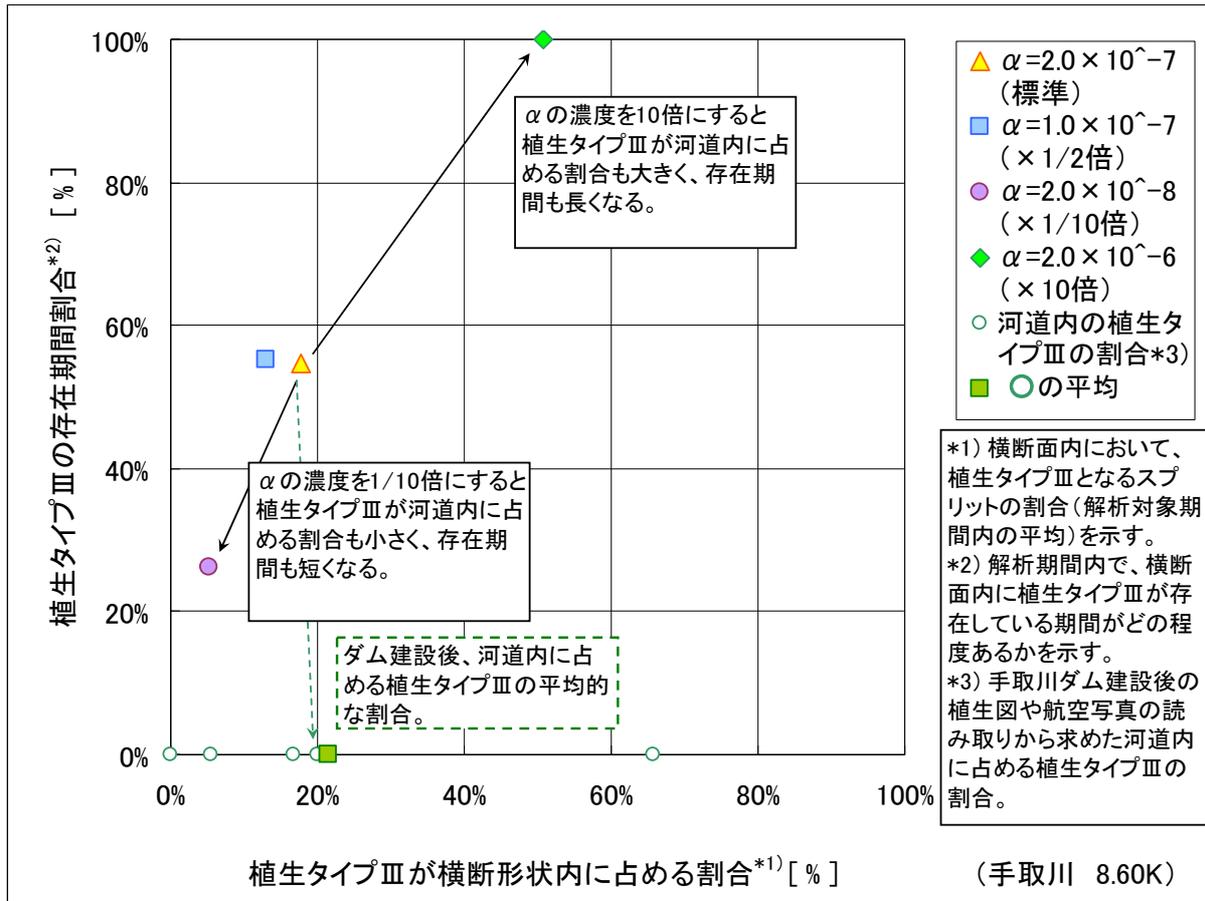


図 3.3.4 感度分析結果 (手取川 8.6k)

(3) 適合度

手取川、肱川、小瀬川、大井川の4河川11断面を対象とし、本モデルを用いたシミュレーションを実施した。対象期間はダム建設前後を含むなるべく長期間とし、横断形状は経年的に大きな変化があった場合に、形状の変更を行った。また、流量条件はそれぞれの近傍の流量観測地点における観測値を使用し、通常は日単位の計算、洪水時は時間単位の計算を行った。

この他、設定した定数、パラメータ等は表3.3.5に示したとおりである。

表 3.3.5 設定した定数, パラメータ等

No.	項目	手取川	肱川	大井川	小瀬川
1	粗度係数: n	タイプ I, 低水路部……………0.045 タイプ II……………0.045 タイプ III-1……………0.050 タイプ III-2, 3……………0.080	タイプ I, 低水路部……………0.030 (大流路, 礫河床: ……………0.02~0.04) タイプ II……………0.045 タイプ III-1……………0.050 タイプ III-2, 3……………0.080	タイプ I, 低水路部……………0.037 タイプ II……………0.045 タイプ III-1……………0.050 タイプ III-2, 3……………0.080	タイプ I, 低水路部……………0.035 タイプ II……………0.045 タイプ III-1……………0.050 タイプ III-2, 3……………0.080
2	河床勾配: I	1/157	1/1350	1/266	1/550
3	河床構成主材料の粒径: d_R	ダム前: 3cm ダム後: 3~4cm	ダム前後とも 0.8cm	ダム前後とも 4cm	ダム前: 2cm ダム後: 7.8cm
4	ウォッシュロードの粒径: d_{ts}	0.15mm	0.15mm	0.15mm	0.15mm
5	パイオニア的植生が繁茂するまでの期間: T_{pr}	3年	3年	3年	3年
6	空隙率: λ	0.4	0.4	0.36	0.4
7	安定植生域が形成されるのに必要な最低の表層細粒土層厚: D_c	3 cm	11cm	5.3cm	3cm
8	ウォッシュロードの割合: α	2.0×10^{-7} (平均的な値)	2.0×10^{-7} (平均的な値)	2.0×10^{-7} (平均的な値)	2.0×10^{-7} (平均的な値)
9	植物流出条件: τ_{*ce}	0.05 (河床材料が動く 無次元掃流力)	0.05 (河床材料が動く 無次元掃流力)	0.05 (河床材料が動く 無次元掃流力)	0.05 (河床材料が動く 無次元掃流力)

シミュレーション結果の適合度は、過去の航空写真、植生図等の調査結果との整合性および、現地調査結果との整合性を用いて示すこととした。

例えば、肱川 12.0k における 1985 年撮影の航空写真との比較した結果、適合度は図 3.3.5 に示すように 89% となった。

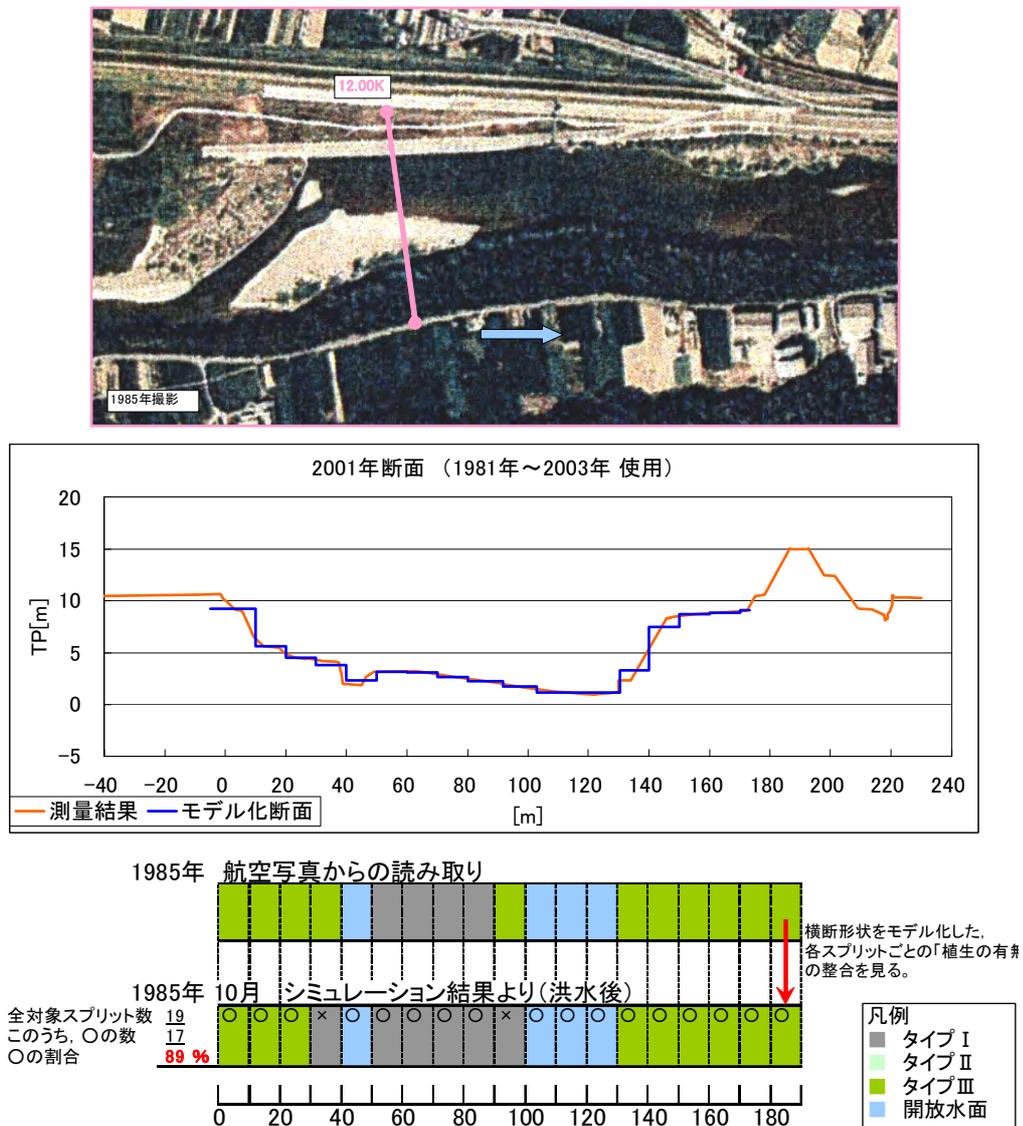


図 3.3.5 適合度の検討例 (肱川 12.0k, 1985 年撮影の航空写真との比較)

このように、既往の調査結果等との適合状況を河川ごと、対象断面ごとに調査し、その結果をとりまとめたものが表 3.3.6 である。

これによれば、適合性の低い大井川の 22.0k, 22.2k を除くと概ね適合度は 80% 程度であり、おのおのの断面における植生の形成過程について、ある程度定量的な評価が可能であると考えられる。

表 3.3.6 各河川・断面の適合度

		中間時点 の整合性	現時点 の整合性	備考
手取川	8.20K	76%	77%	
	8.60K	85%	57%	流れの状況が等流計算では再現が困難な箇所
	12.60K	81%	68%	
	13.00K	62%	79%	
肱川	10.00K	75%	80%	
	12.00K	79%	70%	
大井川	18.00K	100%	100%	滯筋、裸地の部分が大半を占める。
	22.00K	60%	0%	整合性が低く植生成成過程は再現されない。
	22.20K	56%	31%	整合性が低く植生成成過程は再現されない。
小瀬川	10.40K	77%	78%	
	11.40K	77%	88%	
平均		79%	78%	大井川22.0K,22.2Kを除く

※ 「中間時点の適合度」：過去の航空写真、植生図等の調査結果との整合性

「現時点の適合度」：現地調査結果との整合性

以下に、各河川における、植生モデルと実際の植生変化の適合度およびシナリオとの適合性について述べる。

手取川：比較的モデルとの適合度が高い。平均年最大流量の減少により掃流力の減少した部分に堆砂が起り、中州が形成され、冠水頻度の減少により植生の繁茂がみられる（植生タイプⅢが長期間に渡り維持される）というシナリオに沿った植生域の形成過程をある程度再現していると考えられる。

なお、手取川の 8.60k 断面は、現時点の適合度が他よりも低くなっている。これはこの場所が、下流から流れが入り込むワンド状の地形で、植生が河道の平面的な形状の影響を受けており、流れを 1 次元で表現する本モデルでは流れの状況の再現性が低いことが原因と考えられる。

肱川：比較的モデルとの適合度が高い。高水敷の冠水頻度に変化がなく、現在も砂州が維持されているという植生の形成過程をある程度再現している。この地点は扇端部でありダムまでの距離が長い。支川数も多く、扇頂付近と違い現在も流量に応じた土砂供給がある場所である。シナリオのとおり、河原の維持には土砂供給が重要であることが検証された。

大井川：適合度が高い場所（18.0k）と低い場所（22.0k, 22.2k）に分かれる。特に安定した植生の発生位置が再現出来ない。これは、①現地調査実施時点と最新の横断測量結果の形状が大きく異なっていたこと、②22.0k, 22.2k 断面は両方とも湾曲部であり、滯筋は左岸側に寄るが、本モデルでは、流れを等流計算で解いており、平面形状にかかわらず低いところから順に水が冠水するという結果になる、ということが主な原因である。

また横断形状の変化が激しく、3年(T_{pr} 年)程度の期間、同形状の横断が維持されている

とは考えにくいところである。(T_{pr}の検討が必要なところであると考えられる)

小瀬川：比較的適合度が高い。ダムまでの距離が短く、土砂供給の減少が顕著であることから、河床が比較的速く低下し、更に粗粒化もみられる。このため、パイオニア的植生の繁茂も速く、高水敷の冠水頻度の減少と相まって植生の繁茂がみられる(植生タイプⅢが長期間に渡り維持される)、という植生域の形成過程をある程度再現していると考えられる。

以上、本樹林化モデルは礫床部分の河道形状が大きく変わらないような、すなわち砂州の発生や移動の顕著でない単列蛇行河川、セグメント1の河床低下の生じている上流部、流量がダム建設により小さくなり砂州の移動がほとんど生じなくなった河道で適用可能といえる。

簡単なモデルでありながら、ある程度植生変化が予測しえたことは、植生変化モデルの高度化を図るに当たっての根拠性と見通しを与えている。

3.3.3 モデルの改良の方向

[1] 物理・化学・植生モデルの精緻化

1) 流量変動の変化評価の高度化

過去から現在までの植生状況の変化を追跡するためには、実績流量を与えればよいが、将来を予測するためには、流量変動発生モデルが必要である。雨を過去のパターン(20年)で繰り返すのが実用的であるが、高度化をねらうなら、確率統計分析を通じた外力発生シュミレータを開発し、その雨に流域の土地条件、ダム放流操作規則を入力した流出モデルを構築する。

2) 対象セグメントにおける流送土砂量の評価と指標化

インパクト前後における粒径集団ごとの流送土砂量の変化を把握し土砂動態マップを作成する。その際には、ダム堆砂量の時系列データより概略の粒径集団別の年あたり平均供給量を求める。

そのデータと粒径別流砂量公式による流砂量との適合性をチェックし流砂量式の修正を行う。流量規模ごとの粒径集団ごとの流送土砂量をインパクト前後で把握する。混合粒径河床材料の粒径別流砂量式による流砂量評価の信頼性が乏しく、粒径集団別の流砂量の変化評価の精度は低い。実施すればそれなりの情報となる。A集団は評価できるが、B,C集団は難しく、便宜的、経験的な修正係数を流砂量式に導入せざるを得ないとする(山本, 1994)。

3) 外力を入力条件とした河川地形の時経変化予測(力学的・化学的モデル化)

次のような要素モデルが必要である。

①二次元流況モデル

モデルは完成しているが、地被状態に応じた流速係数の設定法の高度化を図らなければならない。

②二次元河道変化モデル

土砂の堆積-侵食と草本類との相互作用モデル、河岸侵食と河岸形成モデル、植生遷移モデル、生物の生長-破壊モデル(自動遷移、他動遷移モデル)を組み込む必要がある。

要素モデルの開発に当たっては、生態系を規定する要因の実態と分析が必要であり、基礎研究なしには前進しない。特に地形変化モデルの高度化が難しい。入力条件の確率性、河床変化における砂州の発生の不確定性、浮遊砂・ワッシュロード量の評価の困難性、堆積・侵食現象

の不明確性、植生遷移と土砂の関係などの不明確性などにより地形変化を20年先まで確度良く予測するには困難であるが、地形変化が激しくない場合には予測可能である。

③水質変化モデル

ダム築造による物質のトラップと質の変化は下流に流下する水質を変化させる。この水質変化と物質流下量の変化は河川生態系を変化させる。沖積地河川では、流域からの流入水質と量の要因による水質変化が大きく流域からの流入水質モデル、沖積河川での水質の内部変化モデルを负荷して水質変化モデルを構築する必要がある。すでにモデル化の試みがなされており、早晚、実用化されよう。

4) 水生生物の変化モデル

地形・堆積物・水量・水質と生物種別選好度モデル、競争-共存モデルの開発と高度化が必要である。魚類については選好度曲線が作られつつある。

モデル化に当たっての最大の隘路は、河道地形の変化を的確に予測する河道変化モデルの構築が難しいことである。

[2] 帰納法による予測の高度化

①平均年最大流量プラス他の指標流量を説明因子にした河道・環境の変化予測の高度化

河道・環境特性情報編集（山本，2004, 2005）による河道・環境の時径列変化分析と変化要因分析を通じた事例の増加により、変化シナリオを類型化し蓋然的必然性を抽出する。

説得性が弱い、物理・化学モデルと予測精度はそれほど変わらないであろう。

②河川生態系時間変化プロセスおよび空間分布の雛型的シナリオ作成

雛形的シナリオに応じた潜在自然・代償植生の評価法の高度化を図る。

③河川環境変化に関する主題図作成技術の高度化

①に②の情報を乗せる。

なお、[1]物理・化学・植生モデルによるモデルの精緻化に当たって、[2]帰納法による予測の高度化なくして開発できないことを銘記するべきである。

参考文献

李参熙，山本晃一，望月達也，藤田光一，塚原隆夫，渡辺敏（1999） 扇状地礫床河道における安定植性域形成機構に関する研究，土木研究所資料，第3266号。

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性域消長の機構とシミュレーション，土木学会論文集，No. 747/II-65，pp. 41-60。

末次忠司，藤田光一，服部敦，瀬崎智之，伊藤政彦，榎本真二（2004） 礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答，遷移および群落の拡大の特性，国土技術政策総合研究所資料，No. 161。

辻本ほか（2003） 木津川の総合的研究，河川生態学術研究会 木津川グループ，リバーフロ

ント整備センター， pp. 62.

山本晃一（2004） 構造沖積河川学第 18 章， 山海堂， pp. 565-571.

山本晃一（2005） ノート 河川環境特性情報編集とその展開，（財）河川環境管理財団.

第 4 章 河川流量変動と流送土砂の変化による河川環境劣化に対する改善方策・手段

4.1 河川流量変動と流送土砂の変化による河川環境劣化に対する保全・復元の意義と制御要素

4.1.1 河川生態系の保全・復元の意義

1993 年、「環境基本法」が制定され、翌年、これを受け建設省は環境政策大綱を制定し、そこでは「健全で恵み豊かな環境を保全しながら、人と自然との触れ合いが保たれ、ゆったりとうるおいのある美しい環境を創造するとともに、地球環境問題の解決に貢献することが建設環境問題の解決に貢献することが建設行政の本来の使命であるとの認識をすること、すなわち「環境」を建設行政において内部目的化するものとする。」と宣言した。

1997 年には 33 年ぶりの抜本的改正となる河川法改定案が国会で可決、公布された。河川法の目的に「河川環境の整備・保全」が位置付けられ、治水、利水、環境が河川管理の 3 本の柱となった。河川環境は、技術行為の配慮点ではなく目的となったのである。しかしながら、治水、利水に比べ、技術的蓄積もないこともあり、「河川環境の整備と保全」をどのような観点から、どのようなシステムでそれを担うかについて、十分な制度的仕組みや計画・管理論が確立していない。技術論的視点から早急な検討と体系化が必要となっている。

河川生態系の保全・管理の目標とその水準は、河川が置かれた自然的・社会的条件により大きく異なるものであり、普遍的目標水準があるわけでない。河川と流域の相互関連の歴史性という与件の相違を認識しつつ、個々の河川ごとに、また場所ごとに設定せざるを得ないものなのである。河川法による河川整備計画は、流域の意見を聞きつつ河川管理者が設定するものであるが、流域および社会が持つ地域性と時代の価値観に従わざるを得ないのである。問題は誰がものをいい、目標を現実化するのに誰が費用負担し、誰が意思決定するのかということになる。河川生態系に関する科学技術的知見はこれをサポートするが最終的意思決定の根拠性となるものでない。

河川生態学的知見の増大は自然攪乱の持つ価値的意味の増大となると思われるが、どのような水準で自然攪乱を受け入れ、かつ制御という技術的対応(人為的インパクト)を取るかは、主に河川流域の自然的・社会的条件、従って流域そのものを取り巻くよりスケールの大きな(地域、国)環境条件、さらには地球規模の環境条件とリンクせざるを得ないものである。

具体的には河川整備計画の中に自然攪乱を考慮した河川環境の保全・管理をどのように取り込み現実化していくか、河川制御行為が河川環境に与えるインパクトいかに緩和・解消していくかが技術的課題であるが、自然的攪乱・人為的インパクトが河川生態系に及ぼす影響の評価手法、河川生態系改善手段の効果算定など、計画に必要なサポート情報の生産・理論化は始まったばかりである。

さて「河川生態系の保全と復元」の観点から、攪乱をどう意味付け評価し、目標設定するべきなのか。近代の技術は、規格化、分業化という工場の技術に特徴がある。河川についても同様な技術思想にとらわれてきた。河川の機能(目的)ごとに分断化された技術体系、定常化、定規断面、公平・平等の安全度などなどである。河川における人為的インパクトのほとんどは、このこの技術思想の流れの具体的現れといってもよいものである。今は、これを河川とは攪乱の場であり、変動する場であり、それが河川生態系を多様性のあるものとし、それを支えているのだ、それこそ河川であるという方向への意識転換が始まったばかりなのである。攪乱(変動)の持つ

価値（効用）の定量的評価はまだ行われていないし、また価値（効用）が社会として十分に意識化されていない。川らしいとは何かの啓蒙の時代である。

河川の風景は、周辺社会の現れであり、社会の指標である。社会の規範・価値観に左右されざるを得ないのである。人間は洪水という脅威を防ぎ、また河川水を生産財として引水し、土地生産性を高めてきた。河川と人間のかかわりが文化なのであり河川の風景なのである。現にある河川の風景は歴史的到達物であり、これを土台としてしか河川環境の復元はありえない。復元の方角とその程度は、周辺社会の価値観に従わざるを得ず、原自然には戻れないのである。「河川とは、物質循環の主要な構成要素であり、生態系を構成する単位（流域）であり、人間にとっては身近な自然でゆっくりと時間が重ね交流してきた地域の文化を育んできた存在」と捉える中にこれからの河川管理の方向があろう。河川生態系自体に価値はない。生態系はそれを取り巻く環境の変化に応じて応答するのみである。それを価値付け、意味付けするのは人間である。すなわち時代の思想なのである。

攪乱という河川生態系にとって本質的な現象を受け入れ、それを技術の中に内部化するには、解決しなければ多くの課題がある。

緊急の課題としては、①現存する河川の河川環境水準の評価法、②それを土台に取りえる手段を考慮に入れながら自然生態系の保全・復元に係る計画目標水準を設定法、③取り入れる手段の効果の測定手法、④河川の関わる他の機能との折り合いのつけ方、⑤河川生態系の復元の関わる行動計画策定（規制、誘導、直接投資）プロセスのあり方、を明確にすることが必要不可欠である。当面、次のような方向で河川環境の保全・管理を考えておくべきであろう。

基本的には、極力人為的管理行為と人為的ストレスが少ない、すなわち川のなりたがる姿に技術行為を合わせていくということになろう。しかしながら、自然攪乱・人為インパクトによる河川環境の変化の予測精度が高くないことより、これを実体化するには、従来の物財管理と異なった河川管理システムが必要となろう。ある目的行為による変化を監視し、変化を未来に向けて読み解き、目的が持続可能なように、少ないエネルギー投入量で管理していくという、ある意味で高度な河川管理システムが必要となる。実践・モニタリング・補修・修正というサイクルを保証し得るシステムと、行為による変化の予測信頼性を高め得るシステムを構築することである。

すでに人為的インパクトにより河道および生態系が変化してしまった河川に対しては、なるべく自然の攪乱規模を回復する試みを実施するべきであり、その社会的および技術的基盤もできつつある。要はやる気の問題と河川に関わるステークホルダーとの合意形成である。

4.1.2 河川生態系制御における操作要素と受動要素

河川生態系をある目標を定めて計画的（適応的）対応するという技術行為を行うには、何を操作対象とし、それが技術的行為によりどのように反応するか予測・評価する必要がある。

「河川生態系の保全・復元」という技術目標を掲げた場合、目標指標を設定し、それに向かって操作対象に働きかけなければならない。なお意図的な無対応も働きかけと見なす。直接的操作要素（河川内で直接実行しえる操作要素）として重要なものを引き出すと、以下のようになろう。

(1) 洪水流量

洪水流量は河川形態系の動態と変動を規定する最も主要な要素である。洪水流量を直接的に制

御する構造物はダム貯水池である。ダムの運用は利水、治水を目的とするもので、「河川生態系の保全と復元」を直接的な目的とした洪水時の運用はなされていない。

洪水調節容量の大きいダムにおいては、平均年最大流量が低下し河道風景、河川生態系の変化が生じている。洪水時の放流方式を「河川生態系の保全と復元」の観点から治水、利水と整合を取りながら、攪乱規模をどの程度にし、どう制御すべきか検討する時期にきている。小流量を長時間流すより高水敷に乗るような洪水が攪乱として重要であるが、河川利用との競合もある。

ダム放流における無害流量(河道の疎通能力)を大きくし、攪乱規模を大きくすることが考えられる。通常、無害流量はダム地点から沖積平野に出るまでの山間部における洪水被害発生流量で規定されてしまうことが多く、山間部の治水安全度を上げるという対応措置が必要となる。無害流量が大きくなれば、ダムの治水容量をより有効に利用しえる。また計画放流量についても、放流ハイドログラフを工夫する余地がある。

平地性魚類産卵行動(小出水による水位上昇が産卵行動の刺激となる)の刺激のため、堰による水位増加(淀川)や春から初夏にかけてダムによる小出水放流などの試みられ(小川・紀平, 2004)、また魚類のえさとなる河床礫につく付着藻類の更新や細粒物質の堆積防止のためダムによるフラッシュ放流などがなされている。

(2) 平水時流量

平常時の流量は、流水の正常な機能を維持するために必要な流量(正常流量)を確保するため、ダム貯水池放流量を制御することにより確保される。正常流量は、舟運、漁業、景観、塩害の防止、河口閉塞の防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持、動植物の保護、流水の清潔の保持等を総合的に考慮し、渇水時において維持すべき流量(維持流量)およびそれが定められた地点より下流における流水の占有のために必要な流量(水利流量)の双方を満足する流量である。

「河川生態系の保全と復元」の観点からは、維持流量の増加が望まれるが、河川生態系の視点からどの程度の流量が必要であるが明確にされていない。もともと理学的に定まるものでなく社会学的用語なのである。たとえ明確化さえても無い水は生まれない。環境用水ダムの築造、流域変更、水利用の合理化、流域の保水性の確保なしには生み出せないものである。

(3) 土砂

山間部においては砂防ダムのスリットダム化やダム貯水池の土砂排砂施設の設置、堆積土砂の下流への移動などが試みられ、土砂の制御可能性が増しつつある。

河川域では、適切な河道掘削、取水堰堆積土砂の下流への移動、頭首工の可動堰化などが土砂移動の制御手段となりうる。実際、河川生態系復元のため取水堰に溜まった土砂を下流に移動させることや、頭首工の改築に当り、悪化した河川環境の改善を目指した堰の可動堰化と河道掘削が行われている。

(4) 河道形状

河川管理者は、従来、治水・利水の目的のため、河道形状を河道計画に則り河道の縦横断形状を整理、河川管理構造物の建設・維持してきた。これらは河川生態系に対する人為的インパクト要因となり河川生態系に大きな影響を与えたが、河川生態系の復元手段ともなりうる。

河道計画において河川生態系の保全と復元を治水機能と調整を取りながら適切なものとしていくことが肝要である。幸い河川法の改定により河川整備計画の検討がなされているから、この機

会に河川流量変動と流送土砂の変化による河道の変化について十分な検討を行うべきである。局部的に悪化した河川空間を生態系の保全、復元のため河道の再蛇行化や人工的ワンド・たまりの形成、近自然型護岸の設置などがなされているが、その機能が維持しえるのか検討を加えるべきである。

河川構造物の建設に当たって、河川縦断方向および横断方向における生物の移動、物質の移動を分断化しないような設計や生態系の復元に貢献するような構造物の設置がなされている。

(5) 水位（地下水位）

河床掘削などによる水位低下、高水敷への土砂堆積により高水敷（氾濫原）の乾燥化が進み、高水敷植生の遷移が生じている河川では、水位の制御（堰の設置）により乾燥化を防ぐことがなされている。また高水敷に水路を造成し地下水位の上昇を図る試みなどがなされている。

(6) 水質制御

ダム貯水池では放流水の冷水対策、白濁対策として、選択取水がなされている。

河川では排水路、小支川の汚れた河水を浄化施設（礫間接触法、植生浄化など）により直接浄化する、汚濁水を水路で導き下流で放流する、浄化用水を導入する、などがなされている。

(7) 植生

治水機能の保全・増大のため堤外地の植生、特に樹木は伐採の対象にされてきた。しかしながら堤防の築造が十分でない河川では水防林に見るように樹木は河岸侵食防止機能、土砂堆積制御、氾濫流制御機能として位置付けられてきた。近年では河川生態系の重要な構成要素としてまた景観形成要として河川植生は保全育成されるまでになった。河川植生は、攪乱という現象を必須の考慮事項とした治水・河川利用（高水敷利用）・生態系との調整を図る価値的および技術的（制御）対象となった。

扇状地河川では外来種であるハリエンジュの樹林化防止にため一部伐採などの試みがなされている。またヨシ原の保全・復元などの試みられている。

流域住民と協働してアレチウリのような外来種の駆除活動も行われている。

(8) 魚類

従来、ダム建設による魚業補償により生産量の維持・増大という観点から稚魚の放流などもなされてきた。またアユの産卵床の造成などがなされてきた。

以上、河川流量変動と流送土砂の変化による河川環境の劣化に対する実行可能な制御項目を挙げた。

間接的操作要素（河川外で行う操作要素）としては、河川に影響を与えるすべて（河川に流入する物質の量と質の変化に影響するすべての人為的インパクト）が操作対象となるが、流域を単位とした物質の収支が十分に解明されていないこともあり、何を、どこで、いつ、誰が、いかに制御すればよいかについて、流域管理という視点から整理されていない。現在、洪水防御の観点から土地利用規制、貯留・浸透施設が、水質保全の観点から下水道・水質浄化施設の設置や放流水質規制などがなされている。間接的操作要素を意図的に制御するには、河川法を超える流域管理という視点と統合組織、さらには地球という空間スケールでの環境管理が、そしてそれを支え

る科学技術情報とその学習が必須であり、さらに公的セクターのみならず、プライベートセクターとの協働がなければ実行できないものなのである。

4.2 河川流量変動と流送土砂の変化による河川生態系劣化に対する保全・復元技術

(1) 河道計画の方向

河道計画においては堤防防護ラインと低水路河岸管理ラインという概念が導入されようとしている。

堤防防護ラインとは、侵食・洗掘に対する堤防の安全性確保のため、河岸侵食が直接堤防侵食に繋がらないのに必要な高水敷幅を確保するものである。(堤防漏水対策として高水敷をブランケットと位置付けている場合、また地震による堤防の損傷対策として位置付けている場合は、これに必要な幅も確保する)。この幅の確保が、治水面からの必要河積の確保、河川環境(生態、景観等)の面、から不可能な場合は、護岸・水制等による侵食対策を確実なものとし、さらに堤防の補強により対処する。このようにして求められた高水敷幅を確保したラインを堤防の防護の観点から見た堤防防護ラインという。

この堤防防護ラインは、従来の計画低水路法線のように「計画」として、そのラインに低水路を固定するという積極的な意味を持つものでなく、低水路の移動により、このラインが侵食により犯された場合、あるいは犯される恐れが生じた場合に、防護のための措置が必要となるという消極的な意味を持つものである。いわば「計画」ではなく「管理」の目安となるものである。すなわち、エコシステムとしての河川を生かす、あるいは回復するために、河川自身が作り出す河川形態とそれと密接な関係性を持つ生態系を、両ラインのなかで自由に形成させようという意図のもとにこの概念が導入されたのである。もちろん河川は人間が働きかけた歴史化された自然であり、種々の制約のなかで、河道形状をコントロールされてきた。これからも同様、種々の制約条件下にある河道は、人間が考える許容範囲内でしか自由を与えられないが、できるだけ河川のダイナミズムを取り戻そうというのである。

低水路河岸管理ラインとは、河道内において治水、利水、環境等の面から期待される機能を確保するために措置(河岸侵食防止工)を講ずる必要がある区間を示すものであり、高水敷利用や河岸侵食に対する堤防防護の観点から、低水路を安定化させることを目的に設定するものである。低水路形状を制限する必要がないと判断される箇所・区間では低水路河岸管理ラインは不要である。

低水路河岸管理ラインは、現況河道の低水路平面形状の変動要因あるいは安定要因を分析し、河川整備によって河道の平面形状がどのように変化するかを予測・推定し、これに基づいて設定する。たとえば、セグメント2-1および2-2では護岸がないと経年的に河岸侵食が生じ、低水路が蛇行し、その振幅が徐々に大きくなることがある。このような区間においては水衝部または局所洗掘の発生位置が移動することから、既往の定期横断測量結果や空中写真から、低水路法線の経年変化を把握し、河川流量変動と流送土砂の変化による低水路の近未来形(低水路幅、蛇高度)を読み込み、堤防位置、蛇行振幅、低水路幅、川幅、提外地の土地利用を勘案して平面形状を安定化(水衝部の固定化)するべきか判断する。平面形の安定化の方針をとる場合は、河道が自ら作り出す低水路幅を評価し、蛇行波長と低水路幅とが調和するように平面形状を設定する。

従前存在した河川植生の復元のため、河川流量変動と流送土砂の変化により形成された低水路幅より広い川幅を人為的に維持するのは維持管理に費用が掛かり避けるべきであろう。中水敷を造成して攪乱頻度を増加させても、植生の繁茂と細粒土砂の堆積は免れない。

河川生態系の保全・復元の観点からの河道計画は、上述の技術思想を極力取り入れ、河川の自然的動態を極力妨げないにすることである。そのためには

- ・河川域の拡大

 - 川らしさ確保のため河川区域の拡大（中山間地河川における災害復旧計画に取り込む）

- ・河川生態保全林と保全区域の制度化

- ・人為的インパクト後の流況に応じた低水路幅の推定とその幅を前提とした河道計画の策定

- ・蛇行の復元と河岸侵食の許容

 - 河岸侵食をやり過ぎ工法の採用（伝統工法, 生物工法の活用）

 - 直線河道の再蛇行化と最少の河岸線防御工となるような平面計画

 - 河岸の自然化（自然河岸を保全する河岸防御工の開発：河岸線防御水制の採用（山本編著，2003））

- ・護岸の近自然化

- ・堰の可動堰化

- ・落差工のない（少ない）河道計画（急流小河川）

- ・生態系の視点からの河川域内の空間管理計画（面的管理へ）

 - 低水路河岸沿いの自然化（生態系保全幅の設定），水防林効果の認知（セグメント 2-1），

 - 治水機能と環境機能のトレードオフ関係における最適設計（経済学的方法, 便益とコスト）

などが考えられる。

(2) 水系土砂管理の技術

人間が河川・流域に加える諸活動は非常に大きなものであり、従来であれば、ゆっくり変化していた河道が、かなり早い速度で変化し、セグメントスケールの地形変化現象が技術的課題として顕在化した。ダム貯水池の建設、河床掘削、捷水路の建設によって、河道が急速に変わり、また海岸侵食が生じ、河川および河川周辺域の生態系も大きな影響を受けるようになった。

山間部からの流出土砂量は、山地の樹林地の増加、治山・砂防施設の増加、大ダムの増加により戦前に比べて減少している。これにより、海岸侵食やダム下流河床材料のアーマ化等の現象が生じている。またダムによる流況変化も加わり河川生態系の変化が生じている。山間部からの適切な土砂供給の確保が求められている。

1) 山間域

砂防ダムは、専ら土砂の流出を減少させる目的で設置されてきたが、下流への土砂供給を確保するためスリットダムなどの透過型ダムが設置され始めた。これは、土石流や確率頻度の低い多量な土砂流出時に土砂の流出を抑制し、通常の出水時には土砂を流下させるような機能をもつものである。

貯水ダムは電力開発、利水開発、治水対策のために山間地に設置されてきた。ダムにおける堆砂はダムの機能の損失であり、土砂の排除技術の開発は大きな課題であった。土砂の排除の方法

として以下の方法が考えられている（角；2003，柏井；2004，中川；2004）。

- ① 土砂排砂ゲート・門
- ② 掘削・浚渫材料のダム下流へ移動
- ③ 土砂バイパス
- ④ 土砂フラッシング(水位低下による排砂)
- ⑤ サイフォンを利用した排砂

ダム高の低い電力ダムでは①の対応，治水容量の大きなダムでは④の対応，細粒分放出のためには③の対応，④，⑤は既設ダムでの対応がなされている。なお，②，③においてはダム湖末端に貯砂ダムを設置し粗粒材料をそこにトラップし，排出の効率化を図ることがなされつつある。

また利水占用と治水のためのダム(穴あきダム)の分離による土砂流送の連続性の確保なども改善の手段となりえよう（角，2004）。

2) 河川域

河川域における土砂管理については，河道掘削を河川環境管理および水系土砂管理の観点から最適のものとするのが肝要であるが，

- ① 堰・頭首工の可動堰化
- ② 土砂置き
- ③ 産卵床の造成

などによって劣化した河川環境の改善を図れる可能性がある。

またセグメント2における河床低化による高水敷の乾燥化による植生変化に対しては河道の複雑断面化が1つの手段であるが中水敷の冠水頻度は年1回程度以上にしておくべきである（低すぎると急速に堆積が生じる）。

(3) 水系流水管理の技術

河川生態系を健全にするためには，河道内に形成される砂州が移動するような洪水流量が必要である。すなわち砂利川では洪水ピーク時に河床の代表粒径が移動する無次元掃流力が0.06程度以上となる洪水流量が年に1度以上あることが好ましい。

- ① ダム放流方式の類型化と改善の方向(河道の疎通能力を最大限活用する放流方式)
放流方式の実態調査が必要である。それが合理的であるのかに検討・改良の方向の検討。
無害流量(洪水調節開始流量)の増大化を図る(下流被害地点の改善による無害流量の増大化)
- ② 事前放流方式の可能性(夏期制限への移行期のフラッシュ放流)
- ③ 放流設備の改善(流量制御量の増加；ゲート，放流穴，高さ)
治水容量の高度利用の可能性検討
- ④ 取水量の適切化
- ⑤ 取排水位置の適切化
水質および河川生態系の保全の観点から，取水位置，排水位置を適切に配置する。

4.3 今後の課題

本報告では「河川流量変動と流送土砂の変化が沖積河川生態系に及ぼす影響とその緩和技術」

について研究状況を概説してきたが、生態系に関する調査の困難性により既存の研究実績が十分でなく、課題の要請に答えたとはいえない。今後以下のような視点で研究に取り組む必要がある（小倉・山本編，2005）。

(1) 情報の生産と観測体制

河川生態系の空間分布特性が河川水辺の国勢調査を通じて漸く把握できるようになり、河川生態系を構成する各要素間の関連性の分析が漸く始まっているが、時間変動特性の把握、分析、一般化は、これからの調査研究に待たなければならないことが多い

河川生態系の構造とその変動形態の理解のため、そして河川生態系の復元のためには、河川生態系に関わる多量の実証的資料を必要とする。この資料の収集は手間と資金の掛かるものであり、少ない研究者でこれを行うのは不可能である。現在、データの収集は、河川に関わる各行政組織がその行政目的遂行のために実施するもの、河川に関わる研究者がその研究目的のために実施するもの、市民あるいは団体が河川環境の関する学習や理解を深めるために行うもの、など多岐にわたって行なわれている。しかし、これらの情報が有機的に繋がれておらず、河川生態系の総合的理解の隘路となっている。今後、種々の観測データの公開と情報流通センターの整備が必要となろう。

(2) 河川生態系のシステム構造の把握法

湖沼などに比べて河川生態系は、流れ（移流）系であることもあり、その構造システムについても、またその記述法についても、十分な概念化、理論化が進んでいない。河道特性・環境特性の空間分布特性が時間軸のなかでどの様に変化してきたかを分析するという視点で調査に取り組んだが、成果は十分なものでない。生態系構成要素の研究成果を統合する研究組織と統合理論が必要である。

(3) 自然攪乱の持つ価値の位置付けと環境の質の指標化

河川生態系に及ぼす自然攪乱あるいは人為インパクトの関係が理解しえたとしても、それはそのまま価値概念となるものではない。河川流域のあり方や河川生態系の保全・回復という技術行為を行うには、その価値の位置付けが必要となる。しかし、現在、標準的目標水準は設定されておらず、また設定するべきものでもあるまい。行為決定のためのプロセスの中で流域としての位置付けをせざるを得ないものであり、時代のなかで変化していかざる得ないものなのである。ただし、意思決定や合意形成プロセスにおいては、生態系の質の指標が必ず必要となる。目的、検討の対象領域の大きさに応じた生態系の質の指標を何にするかの研究が必要であろう。

(4) 河川生態系の保全・復元手法とその実施による影響把握手法

今後の研究課題であるが、河川生態系の保全・復元を局在的な処理に終わらせず、河川流域という系の中で保全・復元を考えていくことが肝要であり、そのような視点からの研究が必要である。さらに、治水、利水、環境の総合化の視点、河川の持つ多面的な機能の折り合いのつけ方・折り合いの方向性に関する研究が必要である。

(5) 河川環境管理（モニタリング）の方向性

今後、河川管理は、投資された財をある国民的・流域的水準で維持管理するという仕事、さらに流域の環境の質を河川を通して監視し、流域に対して行為のあり方（流域内における行動計画）について発信するということになる。すなわち河川管理とは、河川を通して流域の治水・利水

安全度の水準および環境の質をモニタリングし、データの蓄積を行い、それらを基に求められている流域の安全度と環境の質（管理目標水準）と比較考量することを日常的仕事とせざるをえなくなるであろう。例えば植生の繁茂は流れに対して阻害要因となり、流域の治水安全度を低下させる。どこまで植生の繁茂を許容するか絶えず監視し、必要な時期に必要な対応を行わざるを得ないのである。

管理行為に最も必要なものは、河川管理に関わる情報を、いかに、適確に、すばやく収集し、それを意味あるものへ編集し、比較考量（判断行為）し得るシステムとなろう。しかしながら現状の河川管理のための情報は、役所的縦割り行政の中で、縦割りごとの論理すなわち編集方針に則り分断、整理され、統合化・総合化されおらず、また時間軸での整理もなされていない。河川管理における治水、利水、環境は、本来別個に存在するものでなく、河川という統合体の部分の切り口でしかない。基礎情報は同じものであり、共通に使えるものなのである。河川の情報は、統合体としての河川の姿が浮かび上がるように河道特性・環境特性基本台帳を編集しなければならない（山本，2004）。

河川生態系に関する研究においても、従来、その生態系構成要素ごとの学的領域での編集方針によりデータは整理され、また分断化されストックされてきた。河川環境、河川生態系という統合体の理解のためには、行政が生産する情報と各学問領域で生産する情報、さらに市民活動で生産するモニタリング情報の統合化とその意味解釈という編集を行う組織が必要である。官、学、民による協働活動とその活動センターが求められているといえるが、その中核は行政が行う河川管理活動で生産される情報とならざるを得ない。行政（河川事務所）で生産される情報の編集方式の様式化と情報ネットワークの構築が始まっている。学的集団はこれとネットワークを組み河川生態系の構造把握に貢献すべき立場にたたされよう。

(6) 河川生態系保全の観点から見たダム放流方式に改善可能性分析

ダムの放流規則、取水方法や制御法を河川生態系の保全の観点から根本的に見直すことが必要であろう。治水・利水・環境の折り合い点を合理的に探る研究が必要である。

また、水質管理も流域管理・物質循環という観点から、河川・都市・農村における役割分担、管理費用の負担、排水水質規制などの制度を含めて研究するべきである。

参考文献

- 小川力也，紀平肇（2004） 流水・土砂の管理と河川環境の保全・復元に関する研究，5.4 砂州の魚類生態機能，財団法人 河川環境管理財団，pp.116-141.
- 小倉紀雄・山本晃一編（2005） 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系，技報堂，pp.342-343.
- 角哲也，高田康史，岡野眞久（2004） 土砂管理の軽減を目的とした治水利水分離型ダム事業のライフサイクルコストに関する研究，河川技術論文集，Vol.11，pp.209-214.
- 角哲也（2003） 日本における貯水池土砂管理，流域一貫の土砂管理，第3回世界水フォーラム 統合的流域および水資源管理分科会，（財）ダム水源地環境管理センター，pp.103-118.
- 柏井条介（2004） 堆砂対策によるダム貯水地の持続的利用，土木技術資料47-1，pp.46-51.
- 中川一（2004） 流水・土砂の管理と河川環境の保全・復元に関する研究，3.2.1 土砂生産・

流出の総合管理システム, 財団法人 河川環境管理財団, pp. 41-44..

山本晃一(2004) 構造沖積河川学 第18章 河道特性調査の目的と内容, 山海堂, pp. 564-571.

山本晃一編著(2003) 護岸・水理の計画・設計, 山海堂, pp. 205-238.

参 考 資 料

- 参考資料 1 関連文献一覧表
- 参考資料 2 植生モデルによるシミュレーション実施フロー
- 参考資料 3 アユとウグイの産卵場の実態調査法と産卵場の確保流量の考え方

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	具体的な影響	今後の課題等
5	フラッシュ放流による河川捕鯉効果に関する検討	大杉泰功・尾崎博之・小笠原浩吉・角哲也	2000	河川技術に関する論文集 6:188-190	フラッシュ放流の環境効果の検討	利根川水系 鬼怒川 川原ダム	M	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	フラッシュ放流による河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	河川変動による河川捕鯉効果の検討	・ピーク流量を一定に維持することの検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査
6	黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	2002	河川技術に関する論文集 8:197-200	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測	黒部川 宇奈月ダム 出し平ダム	M	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測	・河川変動による河川捕鯉効果の検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査
7	流量変動が河川生態系に与える影響に関する検討	尾崎博之・黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	2000	河川技術に関する論文集 6:191-196	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測	利根川 宇奈月ダム 出し平ダム	M	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測	・河川変動による河川捕鯉効果の検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査
8	河川流量と送水設備の性能に関する検討	尾崎博之・黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	2002	河川技術に関する論文集 7:16	流量変動が河川生態系に与える影響	利根川 宇奈月ダム 出し平ダム	?	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	流量変動が河川生態系に与える影響	河川流量と送水設備の性能に関する検討	・河川変動による河川捕鯉効果の検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査
9	黒部川・宇奈月ダムの連発排水と環境影響に関する検討	尾崎博之・黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	2002	河川技術に関する論文集 157	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測	黒部川 宇奈月ダム 出し平ダム	?	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダム・出し平ダムによる河川変動の予測	・河川変動による河川捕鯉効果の検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査
10	中国電力黒部川発電所1号機放水による河川変動に関する検討	尾崎博之・黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	2001	河川技術に関する論文集 12:58-62	中国電力黒部川発電所1号機放水による河川変動の予測	黒部川 宇奈月ダム 出し平ダム	M	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	中国電力黒部川発電所1号機放水による河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	中国電力黒部川発電所1号機放水による河川変動の予測	・河川変動による河川捕鯉効果の検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査
11	黒部川・宇奈月ダムの連発排水と環境影響に関する検討	尾崎博之・黒部川・宇奈月ダム・出し平ダムの連発排水と環境影響に関する検討	2002	河川技術に関する論文集 190:29-36	宇奈月ダムの連発排水と環境影響に関する検討	黒部川 宇奈月ダム 出し平ダム	M	河川変動状況 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査	宇奈月ダムの連発排水と環境影響に関する検討	黒部川・宇奈月ダムの連発排水と環境影響に関する検討	・河川変動による河川捕鯉効果の検討 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査 ・河川変動の予測 ・河川変動の調査

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	具体的な影響要因	今後の課題等
15	ダム構造物が水辺林の更新動態に与える影響	中村太士	1999	応用生態工学 2:125-130.	水辺林によるダムに代表される構造物影響評価に関する研究成果のレビュー	河川・ダム名 (海外)	?	-	<p>植生影響を与える主な要因</p> <p>(1) ダム通過流量による洪水頻度が急激に減少し生態系への減少</p> <p>※採種・採種時期・採種時期(11~6月)にあり利水容量を確保するため、降雪水のピークが大幅に遅延</p> <p>(2) ダムのゲート操作に伴う湛水域の水位変動</p> <p>非採種期→湛水ストレス→採種期→乾涸によるストレス</p> <p>(3) 流砂の減少</p> <p>総攪動に伴う河床下の卓越・単一河路の形成、粗粒化</p> <p>水辺林の更新と与える影響</p> <p>1) 流量変動</p> <p>・春季の降雪水の減少</p> <p>ポプラ種の死亡率の増加、ヤナギ属の更新抑制の減少</p> <p>・降雪期・成長期を通じての水位低下</p> <p>ニレ属等の成長阻害、貧弱な植生、湛水の減少、樹林化</p> <p>2) 流砂量および形態変化</p> <p>ポプラ等の消失、ウォッシュロードの堆積</p> <p>3) 攪乱の頻度・強度の変化</p> <p>攪乱頻度の減少</p> <p>4) 流砂による種子散布影響の事例なし</p>	<p>1) 流量変動 (春季の降雪水の減少)</p> <p>・ポプラは降雪水により種子の発育を促すことから、降雪水の減少により稚樹の死亡率が高まる。</p> <p>・ヤナギ属は、5~6月の降雪水が枯死を抑制し降雪水により形成され、稚樹の侵入を促すが、降雪水の減少により更新抑制の減少(更新の遅延など)</p> <p>・降雪期・成長期を通じての水位低下</p> <p>・高・低圧面に成立するニレ属、トリノ属、カエデ属、ポプラ属はダム建設後成長量が有意に減少する。原因は乾涸による成長低下と考えられる</p> <p>・ハンノキ属はダム下流で有意に減少する。原因は水位低下による影響抑制と考えられる。</p> <p>・貯水ダムでは自然河川に比べて種数と被度が減少し貧弱な植生が維持</p> <p>(2) 流砂量および形態変化</p> <p>・降雪水とともに運ばれる砂礫やシルトは先頭部は葉の養分を供給するが、降雪水の減少により、水分および養分条件のよい立地が形成されなくなりポプラ等の種数消失する</p> <p>・ウォッシュロード(微細浮遊土砂)が堆積すると、ニセアカシア(根を伸ばしやす)やササ(地下茎を伸ばしやす)の繁茂し、ヤナギ等の先頭部は葉の養分を供給し、種数増加の傾向が進行する。</p> <p>(3) 攪乱の頻度・強度の変化</p> <p>・水辺林を構成する種分布が洪水種数に対する比が高頻度で減少し、種数や種多様性が減少し攪乱の頻度が少なく(比高が高く)なれば増加する。このためダムによる攪乱頻度の変化に伴い、種組成が変化し得る可能性がある。</p>	<p>今後の課題等</p> <p>・フラッシュ放流に際していつの時期にとりだの放流量があれば、水辺植物が更新できる立地を確保し、生育条件を悪化させるか。</p> <p>・暖温帯に分布する植物の生活史から、年間降雨パターン(梅雨・台風等)とダムの流況の変化に関する評価</p>

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	具体的な影響要因	今後の課題等	
16	ダムが河川の底生動物へ与える影響	谷田一三	1999	応用生態工学 2:153-161	ダムが底生動物に与える影響についてのレビュー	河川・ダム名 (海外)	?	—	底生動物群集の劣化 ・種多様性減少する一方で種数密度や種存在の増加 ・タクサの入れ替わり 1) 流量調節の影響 a. 流量減少の影響 ・水位低下→生息可能面積の減少→底生動物の減少 ・流速低下→土壌水環境の形成→他種底生動物の侵入 b. 流量安定化の影響 ・抽水植物の繁茂、遊離性トビケラ類の増加 c. 急激で短期的な流量変動の影響 ・短期間の流量変動→移動性の小さい生物の現存量低下 d. 水生昆虫類の流下量が増加 ・放牧が減少→流下量が増加 2) 渇水時の変化 ダムによる土砂堆積の増加と流量安定化→アーメーコート化(動床にくい)河床の形成→浮き石をおもむき転が場とする底生動物ごとく不利 3) 水温環境の変化 ・水温の日較差や年較差の減少、夏季水温の低下→底生動物の分布拡大、高水温種の減少 4) 渇水 山間部のダムにおける渇水の放牧 河床への到達水の減少→付着藻類減少 一底生動物の組成変化 ・マイナス：遊離性トビケラ類や濾過食のアカ科 ・プラス：埋積するシルトや細砂で簡易な作る生物 5) ダム湖におけるプランクトン生産の影響 ダム湖で生産されたプランクトンの下流への供給 →遊離性トビケラであるシマトビケラ科がダム直下で増加 6) 移殖動物としてのダム ・ダム湖由来による移殖阻害	・アメリカグレイトレイクス・オンタリオ湖系で洪水調節により河床が安定した結果、ダム直下で糸状菌類が優勢となり、ヨコエビ類の減少が顕著な結果、二名カケロウ属、オオカケロウ属等の他種は減少した。 ・欧州では、ダムからの取水による流量減少が長期継続的である結果、二名カケロウ属、オオカケロウ属等の他種は減少した。 ・流量の安定化が求む継続する場合、シルトや細砂の堆積を伴う結果、ユスリカ科の幼虫のうち、シルトや細砂で簡単に作るとユスリカ科が卓越する(欧米のダム)。 ・ダム上流部では種数が多く競争強度が大きくなり、ダム直下部は種数が少なく競争強度も小さく、ダムの影響の強弱が異なる。更に下流では、種数も競争強度も再び大きくなる。ダムによる流量の安定化、優占種の卓越、種数の減少が働いている(欧米のダム)。	・ダムの底生動物に与える影響に関する知識の蓄積 ・ダムを擬写像とした影響評価の必要性 ※上下流の比較 ※ダムの種類、河川との比較 ※人工湖の環境等 ・長期的なモニタリング調査の必要性(生物多様性などの影響が時間的経過とともに明らかになる)	・ダム除去を含む河川生態系改善のためのシナリオの検討
17	ダム構造物と魚類の生活	森城一	1999	応用生態工学 2:165-177	ダムが魚類に与える影響についてのレビュー	狭谷ダム (海外)	Ⅱ	—	ダムの魚類への影響 (1) 取水による水位低下→早瀬の平瀬化 生息可能面積の減少、急流減少 (2) プランクトンと底生動物の取水の影響(不明?) (3) 堆積物の減少→土砂堆積の減少、細粒土砂の堆積→水温環境の変化 (4) 下流部の水温変化 発電用排水口の高温水の影響→冷水性(サケ科等)魚類の生存率低下 (5) 産卵場と養子塔などの阻害遮断	・狭谷ダム(奈良県十神川)におけるダム建設前後の魚類組成と生息環境の相違を明らかに、ダム建設前後の魚類組成が類似していることが多く見られるが、ダム建設後、ウグイが優勢になり、ウグイ科以外の魚類が減少した。それによってオウゴン、モツゴなどのコイ科魚類が増加した。 ・ダム湖に流入する河川の流速低下はオウゴン、モツゴなどのコイ科魚類の減少を招き、産卵場の減少による魚類組成の変化が顕著である。 ・アメリカコロネドビア川ではダムの多い、支流のスケネーク川の水温が、合流後のコロネドビア川よりも数度高く、この温度差がスケネーク川へのカケ成魚の遡上をさげている。	・ダム除去を含む河川生態系改善のためのシナリオの検討	

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	具体的な成果と課題	今後の課題等
22	薬師江ダムの効率的運用の効 果及び効率的運用の支援と 及ぼさないように安全確保に 活用できるかの確認	島田昭一 松田正貴 岡田 稔	1999	ダム技術 153:35-47	薬師江ダムの効率的運用の効 果及び効率的運用の支援と 及ぼさないように安全確保に 活用できるかの確認	薬師江川 薬師江ダム	M	・水生生物調査 ・底生動物(付着 類・底生動物) ・住民アンケート	・ダム完成後、これまで継続流量(1.2m ³ /s)の確保と月1回程度のフラッシュ放流を 実施していたが、夏季において美しい深生 や川原の残雪ダム建設前と比較して 発生していた。貯水容量を利用し、継続 フラッシュ流量の維持が可能となり、前 述の問題に対して改善効果が見られた。	・気候下流の積雪向上→事前の積雪 作を的確に行うため、降雪予測の 精度向上が必要であるが、気象予報 が困難 ・下流河川の環境を考慮する(早瀬の 悪化・根拠、草地の減少、樹林化な ど)	
23	魚(特アユ)の生態にどうつ つて好ましいダム放流変動 に関する調査	西岸和重 三野直人 赤石則明	1999	ダム技術 154:44-52	ダム放流変動によって、アユの 生態にどうつにつて好ましいダム放 流変動に関する調査	阿賀川 大川ダム	M	・河川状況調査(水 深・流速・流量、河 床構造・水質) ・生物調査(付着藻 類・底生動物) ・放流変動調査(遷移 動・河床記、河床変 化) ・アユ生存調査	・アユの類となる付着藻類と与える影響 にとりまらず、河川に生息する生物全般こ ととも良好な結果をもたらす	・調査に関する課題 放流後水量が安定した後1週間後 に実施。この調査期間 水深、流速など河川全体の状況の 調査の実地 不安定な河川の水質に対する植生 への影響	
85	生物の生態環境改善に資す るフラッシュ放流的手法	田中朝和ほか	2003	河川技術論文集 9:103-108	フラッシュ放流手法の取組 の検討	滝沢川(滝沢川) 6m下流	M	既行調査	・改善目標の設定(魚類、底生動物、付着 藻類) ・フラッシュ放流手法の検討(ピーク流 量・放流時間、放流回数、放流形状、ピー ク継続時間)	詳細なダム操作手法の取組 ・実現可能性の検証 ・河川利用者の安全確保 ・水質・環境に配慮した放流方法 ・放流回数に合わせた追加放流 効果の検証 ・成功を早める評価基準 ・若電ダム放流量と調整効果効果と の経路比較手法	
96	滝沢ダム運用が下流河川の 物理環境および水生生物に 与える影響	佐川志朗ほか	2004	応用生態工学 7:65-80	ダム運用後の下流河川の物 理環境及び水生生物の変化	滝沢ダム 右岸川水系安知 川	I	・ダム下流の物理環 境変化及び土流のエン トロープ ・物理環境：河川内 抽水能変化、瀬淵の 区分、河川横断断面、 水面積、水深、流速 及び河川利用調査 ・生物：魚類、底生 動物	・ダム運用後の物理環境の変化として、流況区間で中水面 幅減少、最大水深減少、連続水深減少、連続延長の増加、 初期瀬の出現、瀬淵区分の明確化、流速の減少等が見られた。 ・インフラストラクチャー運用後の流況区において、河床が増加 した。 ・底生動物で流況区において多様性指数が減少した ・インフラストラクチャー運用後の水深と魚の相関、連続水深と 魚・水生動物の多様性指数は、最大水 深と正の相関、連続水深と魚の相関が確認さ れた。	・本調査を事業評価に活用するため には、評価対象生物群の選定、およ びその選定に合わせた調査頻度の取 組が必要	
97	浦山ダム下流に投入した土 砂がワグライの産卵に与え る影響について	柳澤健ほか	2003	応用生態工学6: 51-58	浦山ダム貯水池上流に投入 した土砂がワグライの産卵 に与える影響	浦山ダム 浦山川系浦山川	I	・貯水池上流に投入 した土砂100m ³ を 浦山川系浦山川の 河川内に投入 ・投入土砂の流下状 況を把握するために トレーサーとして 品質石灰岩を投入 ・産卵場等で水深、 水深、水温を計測し、 河川利用材料、ト ンレーサーの投入、河床 型を把握調査	・トレーサーの投入した河床でワグライの産卵が確認され、投 入土砂が産卵場として利用されたことが確認された。 ・浦山ダム下流で見られた産卵場の河川内での共通点は以下 の通り。 ・河床型は主に平瀬 ・河床構成材は主に石や砂利、浮き石状態で表面が滑ら れている(洗・砂利)	・ワグライの産卵に対する土砂投 入効果の確認	

No	資料名	編著者	発刊年	発行文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	具体的な影響と課題	今後の課題等
105	一庫ダム下流河川環境回復元に向けての取組	田代眞明 中根宏幸 前田俊郎	2004	ダム技術215:57-74	ダム下流の河川環境の改善のための取組として実施したフラッシュ放流等の効果について	一庫ダム 湖川水系群名川 一庫大谷川	I	・河川環境の改善のため平成14年にコシ除土、玉石投入、平成15年に土砂投入とフラッシュ放流を実施 ・魚種調査、付着藻類調査、底生動物調査を実施 ・ダムが下流河川に与える主要なインパクトである流量、水質、土砂の影響についての解説	・魚種調査の経年変化 ・フラッシュ放流前後における底生動物相の変化 ・フラッシュ放流前後におけるダム直下流の河川状況の変化	・傾向：平成15年で明確できる項目として、底生魚であるアザガ、ドジョウ、オオシヨウノ目、コシの捕獲、ナマズの確認(2,3年で生態系が変化しているような大きな影響は確認できなかった) ・底生動物：僅くコシ、生物多様性指数が低くフラッシュ放流前後の明確な変化は確認されなかった ・付着生物調査：長く繁殖した藻類等の影響	物理的環境の変化が生物相への影響を継続する。
106	ダムと自然環境	高谷幸宏	2004	河川106:6-10	流量、水質、土砂およびダム建設による河川環境へのインパクトからの、自然環境への影響	—	?	・ダムが下流河川に与える主要なインパクトである流量、水質、土砂の影響についての解説	・ダム流量操作と自然環境 ・ダムと水質 ・ダムと土砂	ダムが自然環境に及ぼす影響を明らかにし、それらを改善する。	
107	ダムの効率的な管理に向けた試験的状況について	河川局	2004	ダム技術211:72-77	ダムの効率的な管理の奨励状況及び効果について	真名川ダム 薬師江ダム 三春ダム	M	・ダムの効率的な管理の奨励状況及び効果について解説	・効率的な管理の奨励の留意点と結果 ・効率的な管理の奨励による河川環境の改善効果の紹介	フラッシュ放流と相定される効果 ・平時時の数倍程度の排水：たまり水の除去、有機物・シルトの削減、付着藻類の削減 ・河川環境の改善 ・河川環境の改善による樹林化抑制、産卵場形成 ・2-3年ごとの排水：湖湖の河川環境の変化、アーメーコーの乾燥、ハビタットの多様性の維持など	—
108	ダム下流河川環境改善手法について	田中則和 大杉泰功 名波繁昭 岡野真久	2004	大ダム188:112-120	河川環境改善のための水利調整行政機構の紹介及び一庫ダムでの検証	帝釈川ダム	M	・帝釈川ダムをケーススタディーとして利用可能な幅広い生物を考慮した最適なフラッシュ放流方法についての紹介	・効率的な管理の活用効果の確認 ・フラッシュ放流手法の検証(帝釈川ダム)	・フラッシュ放流の効果検証は、生物の生活史を考慮して3年間と同様のフラッシュ放流を実施して、その効果をモニタリングして把握する必要がある。	

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	今後の課題等	
29	昭和56年8月洪水が与えた河川環境への影響について。	柳屋圭吾ほか	1981	石狩川河川開発建設部、北海道開発局、環境研究所発表会論文集	洪水前後での環境指標を比較することにより、昭和56年8月の洪水が河川環境に与えた変化の大きさとその回復速度、回復からその影響量を考察する。	豊田川 茨戸川	I?	<ul style="list-style-type: none"> 底生動物、付着生物 水質：水温、pH、DO、濁度、溶存酸素 出水後の平常流量回復後～付着生物は1回/1週、底生動物は1回/2週 	<ul style="list-style-type: none"> 出水後は濁度、流速が増加したが、1～2週間で出水前に戻る 底生動物は約2ヶ月でもとの生活型まで回復するが、現存量は4ヶ月でもほとんど回復しない 付着生物の現存量も回復し、1ヶ月で出水前の状態に戻り回復する 	<ul style="list-style-type: none"> 出水後は濁度や流速が増加したが、1～2週間で出水前に戻る 付着生物の現存量も回復するが、出水後(9/22)に比べて回復が遅い 底生動物は約2ヶ月でもとの生活型まで回復するが、現存量は4ヶ月でもほとんど回復しない 付着生物の現存量も回復し、1ヶ月で出水前の状態に戻り回復する 	<ul style="list-style-type: none"> 河川環境に見合った河川管理の必要性
30	洪水被害によるヘリエンジェの破壊・再生と河道内樹林について。	清水義彦、小栗竹重、岡田理志、新藤隆行	2000	河川技術に関する論文集6：59～64	冠水、洪水被害を受けたことによる河道内樹林の破壊・拡大に着目	利根川水系 渡良瀬川	1	航空写真の撮影比較、樹木調査(密度等)	<ul style="list-style-type: none"> 洪水後、冠水の被害を受けた河道内樹林の破壊・拡大が確認された 洪水後、冠水の被害を受けた河道内樹林の破壊・拡大が確認された 	<ul style="list-style-type: none"> 洪水後、冠水の被害を受けた河道内樹林の破壊・拡大が確認された 洪水後、冠水の被害を受けた河道内樹林の破壊・拡大が確認された 	<ul style="list-style-type: none"> 洪水被害によるヘリエンジェの破壊・再生と河道内樹林について
31	立地条件と植生繁茂との関係	山本望一・藤田光一・望月謙也・原嶋夫・李参熙・渡辺敏	2000	多摩川の総合研究640-666	植生繁茂と立地条件との関係から植生動態を予測する	多摩川	1	<ul style="list-style-type: none"> 植生調査(植生種、植生被覆) 地形、標高、地下水位 河川状況(河川幅、土層厚、坡度、植生) 	<ul style="list-style-type: none"> 植生調査の結果、植生被覆は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 植生被覆は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 	<ul style="list-style-type: none"> 植生調査の結果、植生被覆は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 植生被覆は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 	<ul style="list-style-type: none"> 植生調査の結果、植生被覆は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 植生被覆は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった
32	植生動態のモデル化	藤田光一・原嶋夫・李参熙・渡辺敏	2000	多摩川の総合研究680-747	多摩川川床地区、日野橋地区における植生動態のシナリオ	多摩川	1	<ul style="list-style-type: none"> 表層植生(土層)の植生 構造 年最大水深(水深) 植生動態の分布 航空写真の比較 	<ul style="list-style-type: none"> 表層植生(土層)の植生は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 表層植生(土層)の植生は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 	<ul style="list-style-type: none"> 表層植生(土層)の植生は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 表層植生(土層)の植生は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 	<ul style="list-style-type: none"> 表層植生(土層)の植生は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった 表層植生(土層)の植生は河道内樹林の繁茂と関係があることがわかった

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成長	具体的な状態遷移	今後の課題等
38	生物相による物理・化学環境との相互作用(洪水による変化)	服部他	2001	千曲川の総合研究559-684	洪水直後における物理・化学環境・陸上昆虫類・水生昆虫の移動	千曲川	1	物理環境の変化 化学環境の変化 陸上昆虫類 ワンドタマリの魚類 鳥類	物理環境の変化→自然環境の回復、湖沼工の植生性 化学環境の変化→出水前後の全リン含有率の減少 生物相の変化 その特徴 陸上昆虫の移動→出水1年後の個体数変化 水生昆虫の移動→洪水後の個体数変化 洪水のワンドタマリへの影響と魚類群集の減少→出水前後における魚類群集の変化 洪水による湖沼環境の移動→湖沼はこわわらぬ環境の変化	物理環境の変化 ・自然環境の回復、湖沼工の植生性 ・出水前後の全リン含有率の減少 ・ワンドタマリの魚類の減少 ・鳥類の減少 ・水生昆虫の移動 ・洪水後の個体数変化 ・洪水のワンドタマリへの影響と魚類群集の減少 ・洪水による湖沼環境の移動 ・湖沼はこわわらぬ環境の変化	—
39	川辺の樹木に関するフィールドワーク	北川明・高谷幸宏・小栗幸雄	1989	第33回水理講演会論文集(25-690)	樹木の洪水時の倒伏状況について	那賀川	??	樹木の倒伏形態 樹種・樹高・樹径・洪水深・樹木への付着量 倒伏率と樹木の倒伏量	・昭和61年8月台風で倒伏最大数の洪水が発生。洪水による倒伏はゴミの付着量、樹種・樹高・樹径・洪水深・樹木への付着量に依存する。 ・倒伏した樹木の倒伏量は、倒伏した樹木の倒伏量に依存する。 ・倒伏した樹木の倒伏量は、倒伏した樹木の倒伏量に依存する。	・フィールドワークにおけるデータ蓄積の必要性	
40	河道における樹木と洪水の流下特性について	三上英寿	1992	八代高専紀要14:38-40	河道中樹木が洪水の流下特性に対してどのような影響を与えるか	球磨川	?	モザイク河道による計算	・河道中樹木が洪水の流下特性に与える影響を調査する。 ・河道中樹木が洪水の流下特性に与える影響を調査する。 ・河道中樹木が洪水の流下特性に与える影響を調査する。	—	

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	今後の課題等
54	砂防河川の河床変動及び洪水水害におよぼす砂州への流れ(河床変動特性に関する研究)	江頭進治	1998	河川環境管理研 団3-4	水位-流量曲線と植生の関係性	木津川	2	注水時の水位-流量曲線 ・植生発現割合の経年変化 ・航空写真判読	木津川下流域の37km ² 地区から、3川合流点(0km)における植生有無と水位-流量曲線の相関性について ・最近20数年間で最大流量は1994年ご記録され、植生占有面積の増減が確認された。	・水位-流量曲線と植生の有無との関係が破綻している。水位差は1.5~2.0mに達する。 ・水位-流量曲線がループを描くが、原因は不明と推察されるため、ループが顕著になる。 ・最近20数年間で、最大流量を記録した年は1994年で、右岸地区で最大日平均流量2500m ³ /sを記録した。この際、植生占有面積で122haから104haに減少した(植生の減少率14.7%)。内訳は多年生草本群落で45%、樹林27%である。
55	植生から見た河床特性(河床変動特性に関する研究)	佐々木肇	1998	河川環境管理研 団106-112	植生の変化について	多摩川	1	・植生地の経年変化 ・植生密度の変化	・最近20数年間で最大流量は1994年ご記録され、植生占有面積の増減が確認された。 ・最近20数年間で、最大流量を記録した年は1994年で、右岸地区で最大日平均流量2500m ³ /sを記録した。この際、植生占有面積で122haから104haに減少した(植生の減少率14.7%)。内訳は多年生草本群落で45%、樹林27%である。	・水位-流量曲線と植生の有無との関係が破綻している。水位差は1.5~2.0mに達する。 ・水位-流量曲線がループを描くが、原因は不明と推察されるため、ループが顕著になる。 ・最近20数年間で、最大流量を記録した年は1994年で、右岸地区で最大日平均流量2500m ³ /sを記録した。この際、植生占有面積で122haから104haに減少した(植生の減少率14.7%)。内訳は多年生草本群落で45%、樹林27%である。
56	瀬川河川に於ける砂州の固定化と河道内植生の変遷に関する研究	清水義彦	1998	河川環境管理研 団124-142	瀬川河川における河道内植生の変化について	瀬川河川	1	・植生地の経年変化 ・植生密度の変化	・瀬川河川に於ける砂州の固定化と河道内植生の変遷に関する研究	・水位-流量曲線と植生の有無との関係が破綻している。水位差は1.5~2.0mに達する。 ・水位-流量曲線がループを描くが、原因は不明と推察されるため、ループが顕著になる。 ・最近20数年間で、最大流量を記録した年は1994年で、右岸地区で最大日平均流量2500m ³ /sを記録した。この際、植生占有面積で122haから104haに減少した(植生の減少率14.7%)。内訳は多年生草本群落で45%、樹林27%である。
57	河川の流量と底生動物の群集組成	小田泰史	1995	熊本県環境科学研究所 25:24-28	河川の流量変動に伴う底生動物の群集組成の変化	球磨川	M	底生動物調査	・底生動物の群集組成を多段階で調査し、結果を比較し、相対的な変化の傾向を明らかにした。 ・底生動物の群集組成を多段階で調査し、結果を比較し、相対的な変化の傾向を明らかにした。	・生活史と流量変動との関係 ・生活史と流量変動との関係
58	変動を加味した平常流量に関する基礎調査(河川・湖沼の環境及び管理における自然との共生技術の開発)	島谷幸宏	2000	土木研究所資料 90-91	洪水のフラクショナル効果と蓄積効果の整理	自然共生センター 一宮野川	?	洪水実験を基礎とし、洪水前後の付着量を比較 ・洪水流量1.0~2.0m ³ /s ・ピーク継続時間約20分	・洪水実験を基礎とし、洪水前後の付着量を比較し、相対的な変化の傾向を明らかにした。 ・洪水実験を基礎とし、洪水前後の付着量を比較し、相対的な変化の傾向を明らかにした。	・生活史と流量変動との関係 ・生活史と流量変動との関係

No	資料名	編著者	発刊年	発刊文献	概要	河川・ダム名	Seg	調査項目	成果	具体的な成果と課題	今後の課題等
93	本町川下流部における砂州地形の特徴と植生域の変遷について	寺本敦子ほか	2004	河川技術論文集 10: 375-380	本町川下流部の様々な砂州及び植生帯の形成と変遷について、砂州の相互関係・変遷傾向を調べ、なせか維持される	本町川(0~約20km)	2	・砂州縁に凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係・植生帯と砂州平面形状の関係	・本町川下流部における砂州の植生帯の変遷・砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係
94	アユの産卵に必要なたんぱく質と植生域の関係に関する研究	鬼丸幸樹ほか	2004	河川技術論文集 10: 447-452	アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした	五ヶ瀬川(水大瀬川)	???	・河床高、水深、流速、河床の関係を明らかにした	・アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした	・アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした	・アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした
95	土砂投入が付着藻類の分布に与える影響に関する研究	菅川朋子ほか	2004	河川技術論文集 10: 477-482	土砂投入が付着藻類の分布に与える影響を明らかにした	多摩川(水田地区)	1	・土砂供給サイト上の付着藻類の分布・付着藻類の分布・付着藻類の分布・付着藻類の分布	・土砂投入が付着藻類の分布に与える影響を明らかにした	・土砂投入が付着藻類の分布に与える影響を明らかにした	・土砂投入が付着藻類の分布に与える影響を明らかにした
98	砂州の変遷	村岡敬子	2003	本町の総合研究 突: 29-32	本町川下流部の砂州の変遷と植生域の関係	本町川(0~30km)	2	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係
99	本町川下流部における砂州地形の特徴と植生域の変遷	辻本哲朗・鷲見哲也	2003	本町の総合研究 突: 33-41	本町川下流部の砂州地形の特徴と植生域の変遷について	本町川(0~20km)	2	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係
100	中川川内における砂州地形の特徴と植生域の変遷	辻本哲朗・鷲見哲也	2003	本町の総合研究 突: 43-56	中川川内における砂州地形の特徴と植生域の変遷について	本町川(0~20km)	2	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係	・砂州縁の凸凹植生域と非孤立植生域を分け、それぞれ植生帯を境界として、砂州平面形状の類似・砂州平面形状の類似・植生帯と砂州平面形状の関係
109	最近の天竜川の濁りについて	上田信夫	2004	はまなま 506: 2-7	近年のアユの産卵量の減少について	天竜川	???	・天竜川の濁りの原因として、アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした	・天竜川の濁りの原因として、アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした	・天竜川の濁りの原因として、アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした	・天竜川の濁りの原因として、アユの産卵に適した水深・流速・河床の関係を明らかにした
110	ダム放流効果の検証のための超低空リモートセンシングによる調査方法	大野博之・斎藤大・伊藤尚敬・後藤健之輔	2004	土木学論文集 769: 65-74	ダム放流効果の検証のための超低空リモートセンシングによる調査方法について	三春ダム	M	・超低空リモートセンシングによる調査方法について	・ダム放流効果の検証のための超低空リモートセンシングによる調査方法について	・ダム放流効果の検証のための超低空リモートセンシングによる調査方法について	・ダム放流効果の検証のための超低空リモートセンシングによる調査方法について

参考資料 2 植生モデルによるシミュレーション実施フロー

対象河川とした手取川，肱川，大井川，小瀬川の4河川11断面における検証結果から，「植生モデル」が適用できる河川の条件は，以下のとおりである．

- ・セグメント1～2-1の河川
- ・河床変動が比較的小さく，滞筋が固定化の傾向にある河川（区間）

図-参 2.1 に，「植生モデル」によるシミュレーションの実施方法をフローで示す．

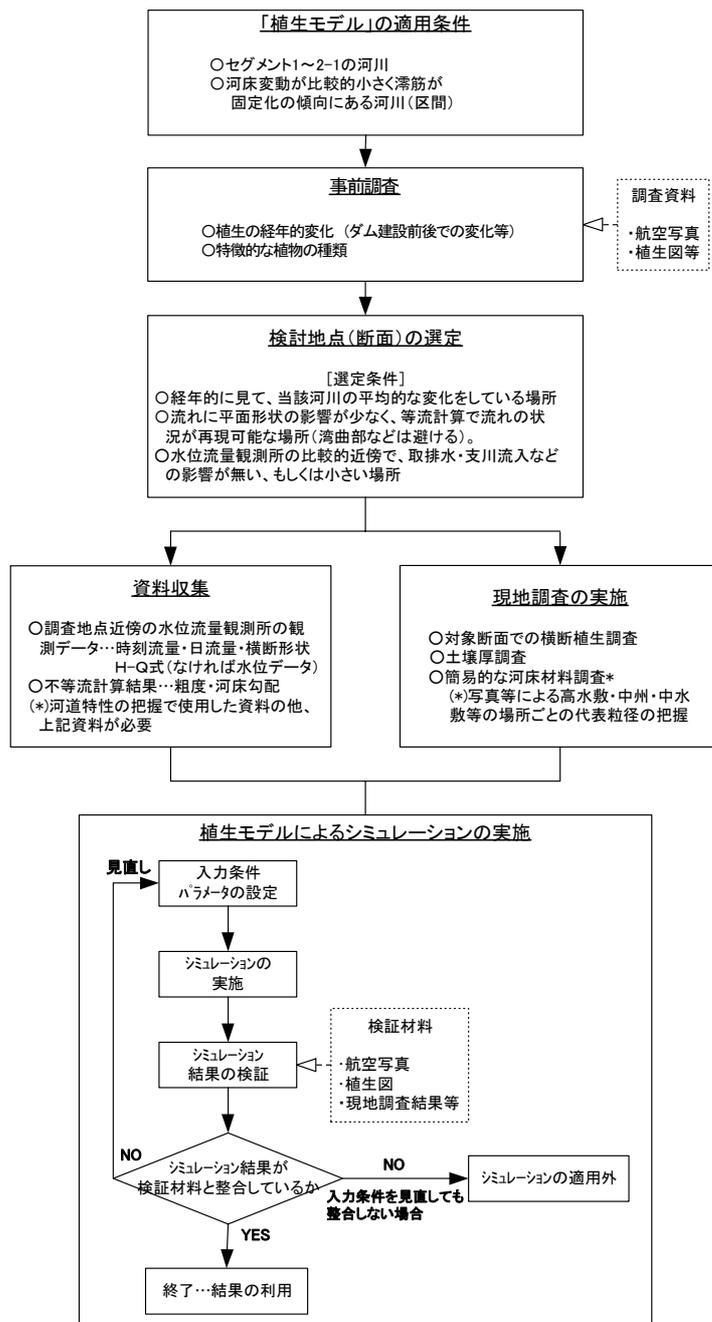


図-参 2.1 「植生モデル」によるシミュレーションの実施フロー

以下にフローで示した実施方法の各段階について述べる。

(1) 事前調査

航空写真及び植生図をもとに当該河川の植生の変化を把握する。着目すべき点は以下のとおりである。

【着目すべき点】

- ・ダム建設前後における植生の状況に変化の有無
- ・樹林を構成している種，草本の群落を構成している特徴的な種 等

(2) 現地調査地点（断面）の選定

事前調査結果をもとに現地調査対象とする地点（断面）を選定する。この地点の植生の変化を対象河川の植生の変化とするため、「代表的な地点」を選定する。また、植生の変化を検証するため、地点は複数選定することが望ましい。

地点選定にあたっての留意点は以下の通りである。

【調査地点選定にあたっての留意点】

- ・経年的に見て、当該河川の平均的な植生の変化をしている場所
- ・流れに平面形状の影響が少なく、等流計算で流れの状況が再現可能な場所（湾曲部などは避ける）
- ・水位流量観測所の比較的近傍で、取排水・支川流入などの影響が無い、もしくは小さい場所

(3) 資料収集

シミュレーションの入力条件の作成にあたって、特に重要な資料として、下記が挙げられる。

【入力条件作成のために特に重要な資料】

- ・調査地点近傍の水位流量観測所の観測データ：
時刻流量，日流量...平常時は日流量，洪水時は時間流量で計算する。
（計算対象期間分必要。欠測時等は適宜補間を行う。
H-Q式（なければ水位データ）… 調査地点近傍の水位の検証に使用する。
- ・調査地点の横断形状，当該河川の不等流計算結果：
粗度係数，河床勾配の設定の参考とする。
- ・当該断面の横断形状のデータ：
経年的に把握する。大きく河床が変化している場合には，適宜横断形状を入れ替える。

(4) 現地調査の実施

対象河川の現状の植生や，植生が形成される場の特性を把握するために現地調査を実施する。調査項目および調査内容は以下の通りである。

【調査項目】

- ・横断植生調査：表層細粒土層厚と地被状態
- ・土壌調査：表層細粒土層厚の把握，細粒土層を除いた部分の代表粒径

【調査内容】

・ 横断植生調査

調査横断線上の植物群落の境界について、既往の植生図等をもとに把握し、現地で確認・修正して記録する。また、各植物群落について植物群落名、群落高と植被率（群落全体と優占種の2種類）の判読を行い、記録する(図-参 2.2)。

・ 土壌調査

「横断植生調査」で区分した植物群落毎に数点の土壌調査を地点として設定する。土壌調査地点での調査項目は以下のとおりである。

a) 土壌表面状態の分類

図-参 2.3 に示す表面状態の分類区分を基準に、ア～ウに分類する。

b) 表層細粒土層厚の測定

土壌表面状態の区分がウ(表層細粒土層がある場合)であった場合、表層細粒土層厚を測定する。測定には検土杖を用いる。

c) 代表粒径の把握

表層細粒土層がある場合はそれを取り除き、河床の写真撮影を行う(図-参 2.4) (⇒注 1)。

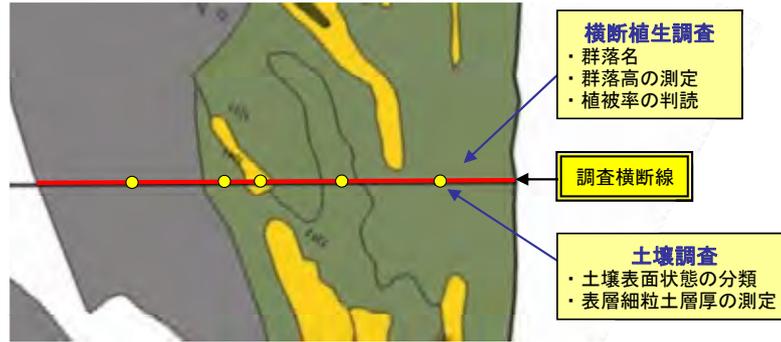


図-参 2.2 横断植生調査のイメージ

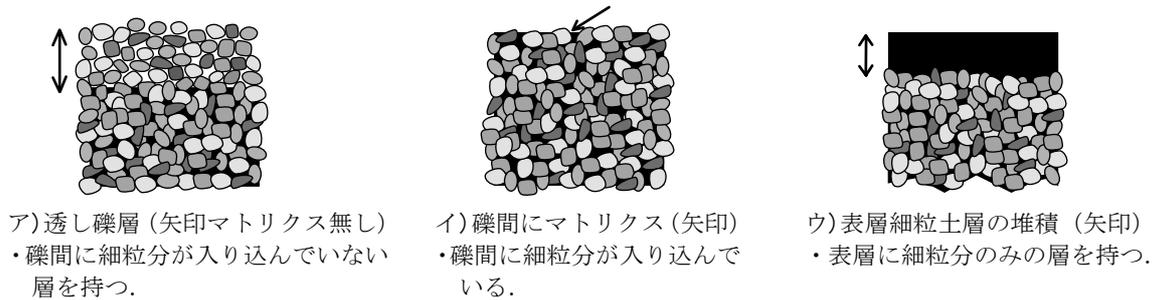


図-参 2.3 河床表面状態の分類区分 (土壌調査 a))



図-参 2.4 代表粒径の把握のための写真撮影 (土壌調査 c)

(5) 「植生モデル」によるシミュレーションの実施

シミュレーションの実施にあたって、特に留意すべき点は以下の通りである。

- ・ 代表粒径の設定：この値はシミュレーション結果に大きな影響を及ぼす。

「植生の再現過程の対象となる箇所」の代表粒径を設定することが必要である。

- ・ 水位の検証の実施：この「植生モデル」では、流れを等流計算で解析している。当該断面の流れの状況（特に水位）が等流計算で再現することが可能かどうかを予め検証しておく。
- ・ スプリットの区分：各スプリットはある一定の長さに設定しておくこと、シミュレーション対象期間内で横断形状を入れ換える場合等に便利である。

シミュレーション結果の検証は、アウトプットとして得られる「経年的な植生タイプの分布」からある時点を抽出し、①解析対象期間内の航空写真、②河川水辺の国勢調査による植生図及び

③実施した現地調査結果と比較することによって、どの程度植生の変化の再現性が確保されたのかを検討することによって行う(図-参 2.5).

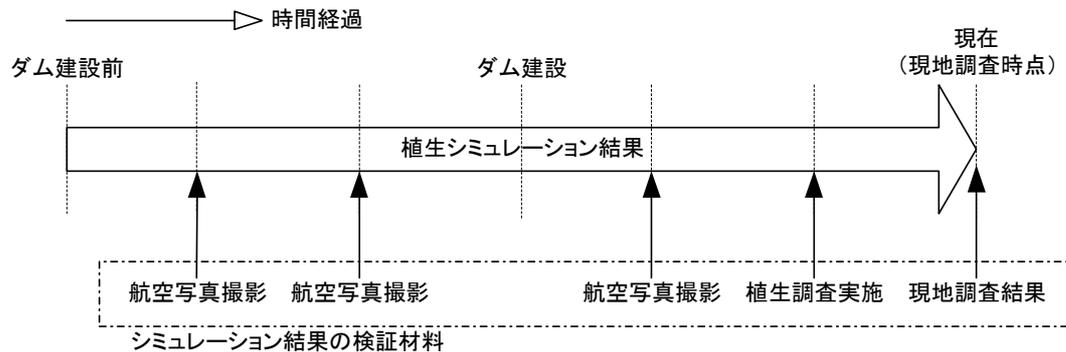


図-参 2.5 シミュレーション結果と検証材料の関係

なお、航空写真及び植生調査結果からの読み取りにおいて、「植生タイプⅡ」と「植生タイプⅢ」の区分を行うことが困難である場合には、整合しているかの判断を「植生タイプⅠ（裸地）」か「植生タイプⅡ・Ⅲ（植生がある）」かの区分にとどめるという方法もある。

解析対象期間中の航空写真、植生調査との整合状況を「中間時点の適合度」、新たに実施した現地調査結果との整合性を「現時点の適合度」とし、それぞれ区分して整理し、適合度の評価を行う(表-参 2.1).

表-参 2.1 適合度の評価方法

	中間時点の適合度	現時点の適合度
比較対照とする材料	航空写真・植生図からの読み取り (読取のため、現地調査結果よりも精度が落ちる)	現地調査結果
比較対照レベル	各スプリット(断面内の階段状の区切り)における植生の有無が整合しているかどうか	

なお、植生シミュレーション結果を検証した結果、適合度が低かった場合の対応として、下記が挙げられる。

①代表粒径 (d_R)、粗度係数 (I)、河床勾配 (n) 等の条件の変更による再計算

【入力条件の確認のポイント】

- ・ 植生の再現課程の対象となる箇所代表粒径を入力条件としているか。
- ・ 等流計算で水位が正しく再現されるような入力条件としているか。

②①を実施しても整合状況が低い場合

◎部分的に整合状況が低い箇所がある場合

上流側の横断形状の影響等から、その場所の流れが再現できていない場合が考えられる。このような場合は、その場所を検討対象から外し、それ以外の部分を検討対象とする。

◎全体的に整合状況が低い場合

当該河川，或いは当該箇所は本植生モデルの適応範囲外と考えられる．

注 1) 表層材料の調査に当たっては，その方法と測定データの整理法については，「構造沖積河川学」（山本，2004，山海堂）pp. 74-77 に従うこと．

参考資料 3 アユとウグイの産卵場の実態調査法と産卵場の確保流量の考え方

[1] 既往の知見の整理

(1) アユの産卵場

アユは北海道西部以南の日本各地に分布するアユ科の魚類である。春から秋にかけて主として川の中流域で生活するが、孵化した仔魚は秋に海に下り、翌春まで稚仔魚期を海で生活する回遊魚である。

産卵期は北方では8月下旬～9月、南方では10月下旬～12月である(図-参 3.1)。成熟した雄雌は彼岸頃から11月下旬にかけて産卵場に集合する。この頃のアユは体が黒ずみ腹部は赤く、サビアユと呼ばれる。雌の産卵回数は通常1回で、産卵数は体長120mmの雌で1～2万粒である。卵は強い粘着力をもち川底の砂利にしっかりと付着し、砂の層に埋もれて孵化を待ち、水温15℃で約半月、10℃で約1ヶ月で孵化する。

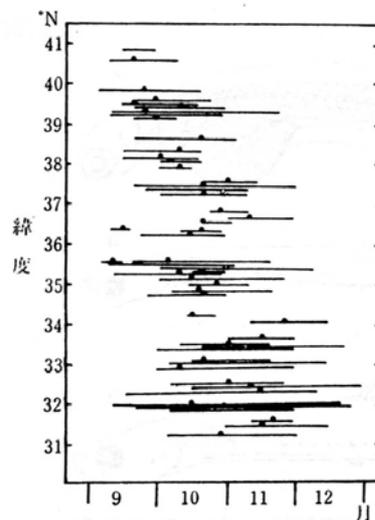


図 37.5 日本の諸河川におけるアユの産卵期間(白石・武田, 1961)

図-参 3.1 日本の諸河川における鮎の産卵期間 (落合ほか, 1998)

1) 産卵場の地形について

産卵水域は一般には上流から河口までの区間で河川の勾配が急に緩やかになる部分である。このため河川勾配の急な川では河口近くに限って形成されるが、勾配が緩やかな場所では河口から離れる傾向がある。

しかし現在多くの河川ではアユの種苗放流が実施されているため、適切な産卵場となる環境があれば産卵場が形成される可能性がある。

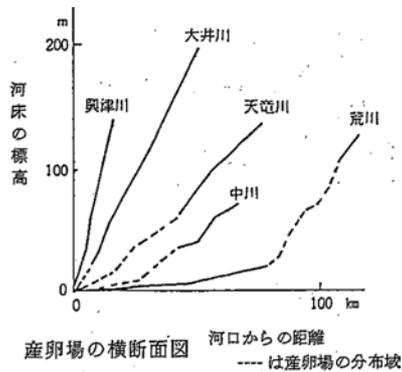


図-参 3.2 産卵場縦断面
(全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

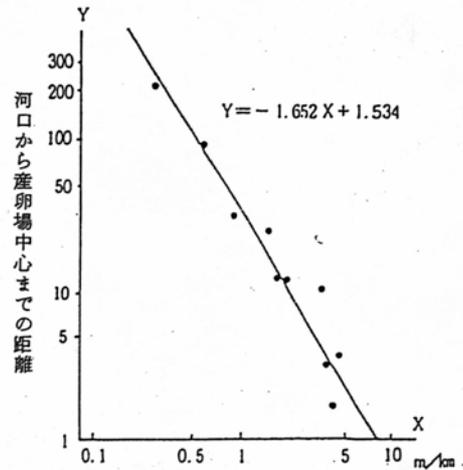


図-参 3.3 標高50mまでの平均勾配と河口から産卵場中心までの距離
(全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

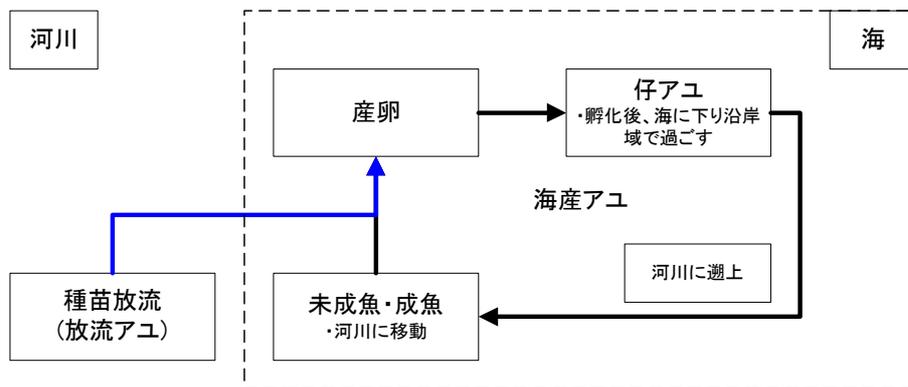


図-参 3.4 アユの産卵場形成 模式図

産卵場の地形条件としては、流速の割に砂礫の粒が小さいため軟質になっている場所、中流域最下部の流速の速い砂利底の浅瀬、砂礫底で軟質の場所等であり、全体的に見て産卵場は平瀬に最も多く、早瀬がこれに次ぐ。特に平瀬から早瀬に移り変わる部分(“カタ”)に多い。

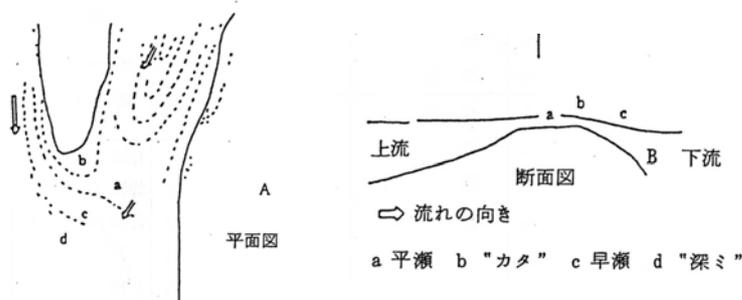


図-参 3.5 産卵場の模式図 (全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

また合流点，湾曲部，河川構造物周辺のように，上流から下流にかけて地形的な連続が乱れているところに認められる．このような場所は流下した砂礫が堆積して不安定な瀬(かけ上り)となり，川底が浮き石状態となっている．またヒヤリングによると巨石を投入することで産卵場が形成されるとの知見が得られている．巨石によりその周辺に産卵に良い小礫が集積する環境が形成されるのであろう．

相模川，狩野川，における産卵場の地形特性を整理すると表-参 3.1 のようである．

表-参 3.1 産卵場の地形特徴 (全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

場所	産卵場名	地形の特徴			
		二つの川の合流点	曲流部	中洲	河構造物
相模川	1 厚木(相模川)	○	○	○	○
	2 厚木(小鮎川)	○	○	○	○
	3 厚木(中津川)	○		○	○
	4 芦田	○		○	○
	5 田村		○	○	○
	6 四之宮		○		○
狩野川	1 神島橋	○	○	○	○
	2 守木条			○	○
	3 南		○		○
	4 白石		○		○
	5 楠		○		○
	6 松原			○	○
	7 日守	○	○		○
	8 -		○		○
	9 御園	○	○		○
	10 徳倉			○	○
	11 沼津大滝	○	○	○	○
	12 黒瀬橋			○	○

これらの既往の知見から，産卵場の地形として平瀬と早瀬の存在が必要であると考える．

- ・ 平瀬に最も多く，早瀬がこれに次ぐ
- ・ 特に平瀬から早瀬に移り変わる部分("カタ")に多い
- ・ 流下した砂礫が堆積して不安定な瀬(かけ上り)となり，川底が浮き石状態

2) 産卵場の流速について

既往の研究を見ると，0.2~1.0m/s の流速で Suitability index が最大を示し，産卵場条件として好適であることを示している(図-参 3.6)．しかし実際に現地調査に基づいてさまざまな河川における選好性を整理した結果を見るとアユの産卵に適した断面平均流速の最小値は0.1m/sで，最大値は2.5m/sであり，流速についても広い適応性を示している(表-参 3.2, 表-参 3.3)．しかし流速 1.0m/s 以上の流速では砂礫に付着したアユ卵が流出する危険性があることが指摘されている．上記の知見から平水時に概ね 1.0m/s 以下の流速を確保できる瀬が必要であると考えられる．

4. アユ *Plecoglossus altivelis altivelis*

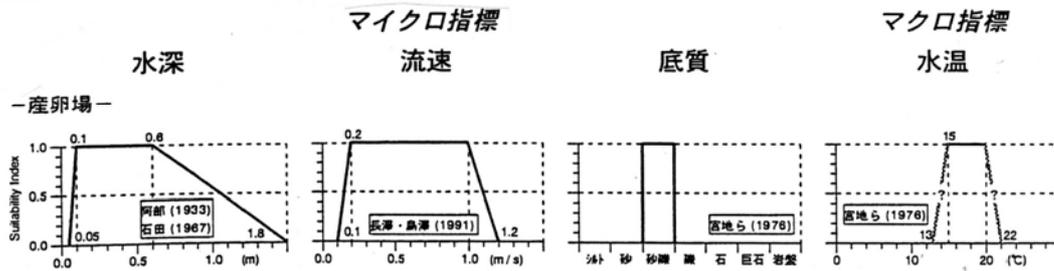


図-参 3.6 アユの産卵場条件
(アメリカ内務省・国立生物研究所, 1999)

表-参 3.2 相模川水系における産卵期間, 水深, 流速, 面積及び最も産卵数の多かった場所
(全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

川	産卵期間	水深 (cm)	流速 (cm/s)		面積 (㎡)	産卵数の多い場所 ()内面積㎡	
			上層	下層			
中津川	1954年9月下旬 ~10月初旬	30~60	50~250	40~120	1000	"d"	(300)
小鮎川	1954年11月初旬 ~12月末	10~30	-	20~50	300	"b"	(50)
"	1954年11月初旬 ~12月初旬	10~30	50~80	-	500	"b"	(100)
"	1955年11月初旬 ~12月初旬	10~30	50~80	-	600	"b"	(80)
相模川	1955年10月中旬 ~11月末	30~60	60~110	40~70	5000	"a", "b"	(500)
"	1955年10月中旬 ~11月末	25~50	70~120	50~85	3000	"a", "b"	(1000)

表-参 3.3 既往の研究に基づくパラメータの選好値 (鬼束ほか, 2004)

発表者	流速 (m/s)	水深 (m)	粒径 (mm)	対象河川	備考
波江(1908)	瀬				
青木(1924)		0.45-1.2	200以下		
阿部(1933)		1.8			
川那部ら(1957)					
鈴木(1958)	0.264	0.11 1.0		員弁川(1954.10.22) 宮川(1954.11.11)	
石田(1961)	0.73(上層),0.48(下層) 0.75(上層),0.65(下層) 0.46(上層),0.42(下層)	0.33 0.28 0.25	浮き石	姉川(1957.9.17-9.25)	河床耕転後の計測 琵琶湖
石田(1961)	1.0	0.05-0.1		大分川(1958)	河床耕転後の計測
石田(1972)			10以下		
大野(1975)	0.5-0.7				
石田(1976)	0.5-2.5(上層),0.4-1.2(下層) 0.2-0.5(下層) 0.5-0.8(上層) 0.5-0.8(上層) 0.6-1.1(上層),0.4-0.7(下層) 0.7-1.2(上層),0.5-0.85(下層) 0.5-2.5(*1),0.4-0.8(*2) 0.1(*1) 0.5-1.0(*1),0.2-0.5(*2) 1.2(*1) 0.8-1.3(*1)	0.3-0.6 0.1-0.3 0.1-0.3 0.1-0.3 0.3-0.6 0.2-0.5 0.3-0.6 0.5 0.1-0.3 0.65 0.3-0.6		中津川(1954.9下旬~10初旬) 小鮎川(1954.11初旬~12末) 小鮎川(1954.11初旬~12初旬) 小鮎川(1955.11初旬~12初旬) 相模川(1955.10中旬~11末) 相模川(1955.10中旬~11末) 中津川(1957.10.12) 相模川(1954.11.1) 小鮎川(1954.11.1) 相模川(1956.11.5) 相模川(1956.11.5)	河床耕転後の計測 *1:水面下5-10cm *2:底面から5-10cm
Ishida & Ichijo (1990)	0.6, 0.5-0.65	0.2-0.25	10以下	安曇川・姉川	琵琶湖
Hara(1990)	0.5	0.1-0.2	5-25	安曇川・姉川	琵琶湖
Akazaki(1990)			礫床	一般的 五ヶ瀬川	
中川・小池(1999)	0.6	0.3			
五ヶ瀬川(2001)	0.5-1.6	0.15-0.7	5以下	五ヶ瀬川	
永矢・松尾(2002)	0.35	0.3	礫床		
新高内水試	0.5-0.8 0.3-0.6	0.05-0.15	10以上	海川(1990-1992)	
多摩川県水試		0.5-1.5	20-80	荒川(1988)	
神奈川県淡水増試	0.1-0.7		5-20	酒匂川(1983-1984)	
淡水区水研		0.05<	0.5<	西湖(1952)	
滋賀水試	0.3-0.7 0.4-0.6	0.1-0.3 0.1-0.2	10	芹川(1972-1973) 琵琶湖周辺の河川	琵琶湖
和田吉弘(1964)	0.35-1.5			長良川(1964)	
岐阜県	1.1 1.27-1.48 0.738-1.33 0.886-1.21	0.3-0.5 0.49-0.6 0.05-0.5 0.1-0.4	100< 50	長良川(1978-1991)	
	0.58-1.66 0.56-1.48	0.12-0.58 0.1-0.4	100<	揖斐川(1981-1991)	
静岡県水試	1.0-2.0 0.1-1.0	0.4-0.8 0.05-0.4		天竜川(1965, 1972-1986)	
	0.4-0.9 0.4-0.5 0.2-0.6	0.2-0.4 0.1-0.3 0.05-0.1 0.05-0.4		都田川(1965)	
和歌山内水漁協センター	0.3-1.65 0.4-1.3	0.12-0.38 0.08-0.46	22-75 20<	日高川(1986) 日高川(1987)	
三重水試	0.264	0.11		員弁川(1954) 千代川(1967)	
鳥取水試		0.2-0.4 0.03-0.15			
	0.25-1.0	0.2-0.6		天竜川(1968)	
	1.3-1.6 0.25 0.6 2-2.5	0.1-0.4 0.3 0.1-0.2 0.5		日野川(1969)	
広島県南部淡水魚指導所		0.2-0.3 0.3 0.17		太田川(1966) 沼田川(1966)	
宮崎水試		0.2-0.25		五ヶ瀬川(1983-1984)	
全国内水面漁業協同組合連合会(1993)	1.01	0.3		海川(1990)(新潟)	河床耕転後の計測
	0.519	0.08		海川(1990)(新潟)	河床耕転後の計測
	0.312	0.06		海川(1990)(新潟)	河床耕転後の計測
	0.588	0.12		海川(1990)(新潟)	河床耕転後の計測
		0.7	浮き石	木曾川(岐阜)	河床耕転後の計測
		0.3	浮き石	揖斐川(岐阜)	河床耕転後の計測
		0.3-0.5	浮き石	天竜川(静岡)	河床耕転後の計測
		0.1-0.5	浮き石	知内川(滋賀)	河床耕転後の計測
		0.4	浮き石	由良川(茨城)	河床耕転後の計測
		0.2-0.4	浮き石	日高川(和歌山)	河床耕転後の計測
		0.4	浮き石	千代川(鳥取)	河床耕転後の計測
		0.3-0.4	浮き石	大野川(大分)	河床耕転後の計測
		0.03-0.1		酒匂川(神奈川)	
		0.05-0.45		揖斐川(岐阜)	
		0.15-0.45		長良川(岐阜)	
		0.08-0.46		日高川(和歌山)	
		0.482-0.515		大野川(大分)	
	0.05-1.4		荒川(埼玉)		
	0.2-2.0		太田川(広島)		
	0.3-1.0		沼川(広島)		

3) 産卵場の水深について

アユの産卵に適した水深について既往研究を整理した結果、アユの産卵に適した水深の最小値は0.03mで最大値は2.0mとなっていた。また、実験池において水深およびアユの体長を系統的に変化させて、産み落とされた卵数を計測した結果より、卵数と水深の間に明確な相関関係が認められなかった(図-参3.7)。これらの知見よりアユの産卵に際しては、水深は重要なファクターではないと考えられる。

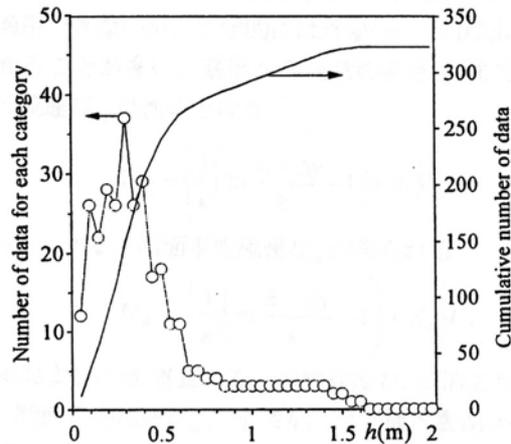


図-参 3.7 既往の研究におけるアユの産卵に適した水深 (鬼束ほか, 2004)

表-参 3.4 人工産卵床各水深での産卵数と産卵アユの大きさ
(全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

産卵アユ		各産卵床の卵数 ()内は水深、cm			実験日	産卵日
平均全長 (cm)	数	a (69~74)	b (47~52)	c (25~30)		
15.9±1.1	♀ 3 ♂ 8 合計 11	3069	3116	1266	1957年 11月9~30日	11月19~21日
		1208	-	-		" 21~22日
		5302	-	-		" 22~23日
		-	-	524		" 24~25日
		<10	<10	159		" 28~29日
		<10	5886	34		" 29~30日
15.9±1.1	♀ 10 ♂ 9 合計 19	<10	<10	<10	12月3~6日	12月3~4日
		<10	-	-		" 4~6日
13.6±1.0	♀ 13 ♂ 21 合計 34	-	-	>100	12月6~16日	12月8~9日
		-	-	>100		" 11~12日
		-	-	>100		" 12~13日

ただし、小さいアユは主として浅いところで産卵するが、大きいアユは浅いところでも深いところでも産卵するという指摘もある。例えば人工産卵床における水深毎の産卵数を見ると、小さいアユ(平均全長 13.6±1.0cm)では、主に浅い場所(水深 25~30cm)で産卵するが、大きいアユは浅い場所(25~30cm)でも深い場所(69~74cm, 47~52cm)でも産卵している。

4) 産卵場の河床材料について

河床の状態としては「砂礫底で、軟質の場所」, 「河床が浮き石状態でザクザクしている」等が指摘されている。

相模川水系小鮎川におけるアユの産卵場における卵の付着率と砂礫の組成についての現地調査結果を見ると、卵の大部分が径 10mm 以下の砂礫に付着しているが、特に 5mm 以下の砂礫に多いことが指摘されている(表-参 3.5)。また砂礫を 5mm 以下, 5~10mm, 10~29mm, 20~30mm, 30~50mm にふるい分け、この砂礫を厚さ 10~15cm 敷いた池において、どの大きさの砂礫が産卵に最も適しているかを実験的に調べた結果、10mm 以下、特に 5mm 以下の砂礫を敷いた場所を選んで産卵していることが判っている。

表-参 3.5 産卵場における卵の付着率と砂礫の組成

(全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

相模川水系, 小鮎川の厚木(上)と田村(下)

最大径mm	砂		礫		卵	はくりしたもの
	全 数	付着数	付着数	付着率		
~ 5	- aa	40	99	46.3		
5~10	1449	25	51	23.8		
10~20	287	15	28	13.0		
20~30	55	5	6	2.9		
30~40	15	5	23	10.7		
40~50	3	0	0	0		
50~	1	1	7	3.3		
合 計	1810 ^b	91	214	100.0		26
~ 5	- c	1820	2093	65.9		
5~10	2039	166	562	17.7		
10~20	402	74	269	8.5		
20~30	122	16	63	2.0		
30~40	62	12	84	2.6		
40~50	27	14	86	2.7		
50~	31	9	19	0.6		
合 計	2683 ^d	2111	3176	100.0		528

付着率は付着卵全数で各砂礫に付着した数を除したもの。

a) 数えず, 119.5 g b) 5mm以下の数は入れていない。総重量 1,159.5 g

c) 数えず, 376.5 g d) 5mm以下の数は入れず, 総重量 6,848 g

採取日は厚木 - 1955年11月5日、 田村 - 1955年11月29日

表-参 3.6 実験池における産卵床の砂礫の大きさと産卵数の関係
(全国内水面漁業協同組合連合会, 1993)

実験 番号	池	産卵床		卵 数					使用アユ数及び全長
		最大径 (mm)	容積 (cc)	a	b	c	d	合 計	
I	A	~10	1500	1848	0	449	2708	5005	♀ 5 : 14.8 ± 1.0 cm ♂ 9 : 14.8 ± 0.8 "
		10~20		0	0	65	863	928	
		20~30		0	0	0	459	459	
		30~		0	0	0	0	0	
II	B	~10	360	720	713	-	877	2310	♀ 4 : 13.5 ± 0.6 " ♂ 8 : 13.3 ± 0.2 "
		10~20		32	4	1	-	37	
	B	~10	1300	827	-	-	467	1294	♀ 4 : 15.2 ± 1.2 " ♂ 8 : 15.9 ± 1.4 "
		10~20		-	337	1410	-	1747	
III	C	~ 5	700	6854	8423	4794	-	20071	♀ 38 : 13.5 ± 1.0 " ♂ 34 : 13.3 ± 0.3 "
		5~10		958	108	420	-	1486	
		30~50		3	160	231	-	394	

a ~ d は人工産卵床区分

また産卵場における粒径 0.425mm 以下の砂泥の含有率と産卵量、死卵率の対応関係を見ると、0.425mm 以下の砂泥が多いところでは、産卵量が少なく死卵率が高い傾向があり、0.425mm 以下の砂泥が産卵の妨げになることが示唆された(図-参 3.8)。

礫の形状としては、アユ卵は角の全くない円形の小石によく付着し、丸みのない角礫には付着しにくいことが知られている。

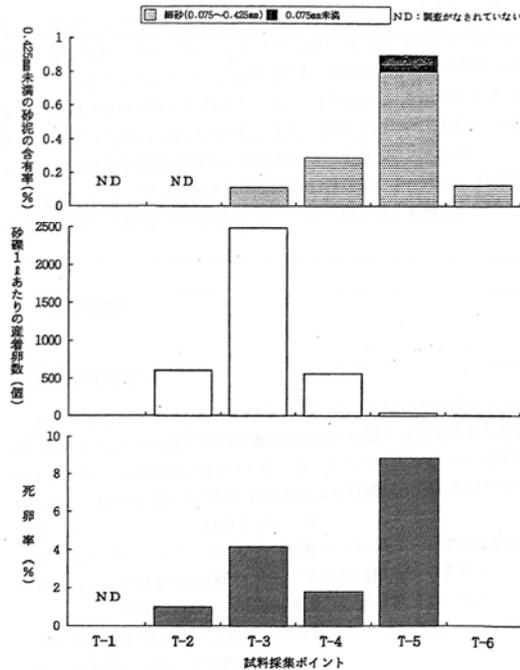


図-参 3.8 高橋産卵場における砂泥の含有率と産着卵数・死卵率の関係 (高橋ほか, 1998)

(2) ウグイの産卵場

ウグイは樺太，南千島，北海道，本州，四国および九州に生息するコイ科魚類である．産卵時期は，春ないし夏で，東京付近では3月中旬から5月下旬まで，最盛期は4月中旬である．長野県千曲川では4月中旬～7月中旬(水温 11.5～22.4℃)，北海道鶴川では5月中旬～6月上旬(15～20℃)，千歳川は7月上旬，中旬(13～15℃)等とされている．水温が 10℃以上に昇温した時に多く，水温上昇が産卵の引き金になると考えられている．

卵は球形で，直径 1.8mm～2.0mm の粘着卵であり，礫中に産み込まれ，砂利の裏などに付着する．このように生み付けられた卵は水温 15℃で 5 日，水温 10℃，13 日で孵化する．

1) 産卵場の地形について

ウグイの産卵場は河川の上流域から下流域の広い範囲に及び，早瀬から淵の落ち込む斜面が利用される．

早瀬から淵の落ち込む斜面，やや平坦な礫底の下流が急に段をなして深くなるような斜面が利用されることから，瀬と淵が一体的に存在している場所を産卵場とすると考えられる．

このような下流部の淵は，人工産卵床の調査においてウグイふ化稚魚が，おもに流速 10 cm/s 以下の緩流部に生息することから，産卵床の下流部に流れの停滞部（ワンド）や緩流部がある必要があるためと考えられる．

- ・ 早瀬から淵の落ち込む斜面が利用される．
- ・ やや平坦な礫底の下流が急に段をなして深くなるような斜面
- ・ 瀬と淵が一体的に存在している場所を産卵場とする
- ・ 産卵床の下流部に稚魚の生息する流れの停滞部（ワンド）や緩流部が必要．

2) 産卵場の水深について

水深については，「水深 30～60cm 程度の比較的浅い場所で，30～70cm/s 程度の流速がある．」，「水深 20～70cm の砂礫底」「瀬の礫底に産卵する．水深は多摩川，千曲川及び鑓川などで観察したのは何れも 20～50cm であったが，60～90cm の場所でも産卵する」といった知見が報告されている．また人工産卵床においては水深 0.3～1m の範囲で産卵行動が確認されている．これらを総合すると，水深 30～60cm 程度の比較的浅い場所を中心として，水深 1m～20cm の広い範囲で産卵すると考えられる．

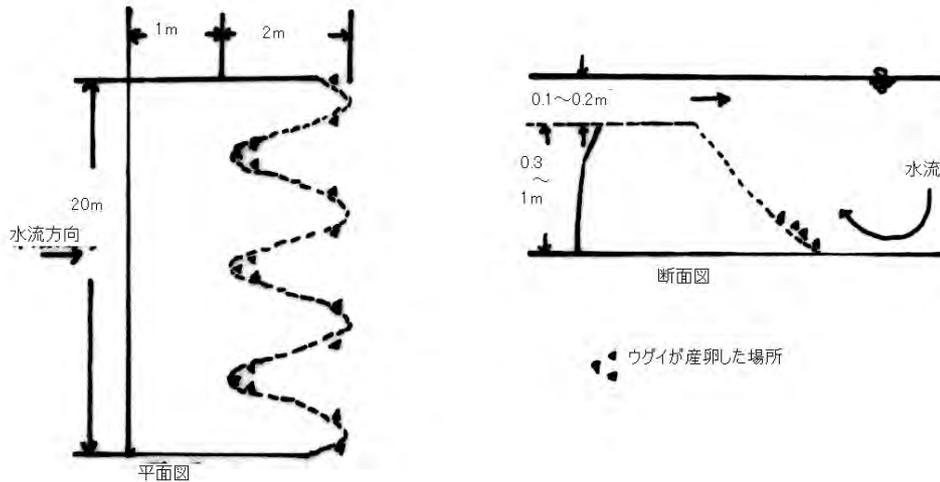


図-参 3.9 人工産卵場における産卵場の例
(埼玉県農林総合研究センター水産研究所 HP)

流心付近に洗浄した砂利（碎石）を投入して造成したウグイの人工産卵床造成場において産卵床の場所は，早瀬から淵に落ち込む「かけ上り」という比較的水深の浅い場所であるが，水深 1m~0.3m の範囲内では水深の深い部分での産卵が多かった。

3) 産卵場の流速について

既往の研究を見ると，0.2~1.2m/s の流速で Suitability index が最大を示し，産卵場条件として好適であることを示している。

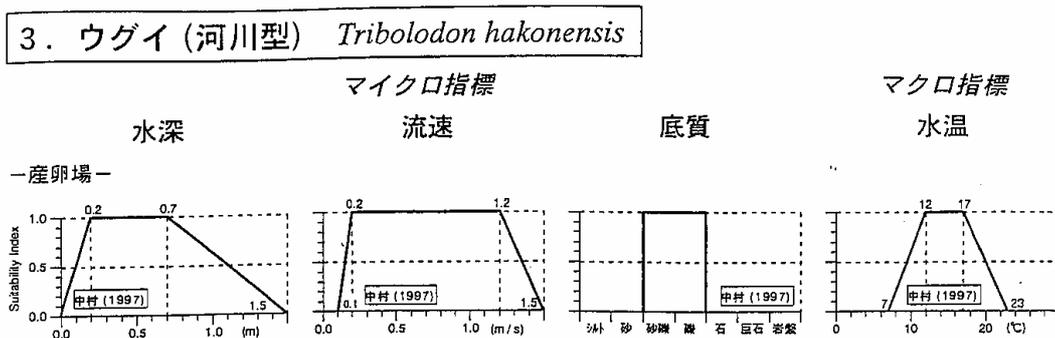


図-参 3.10 ウグイの産卵場条件 (アメリカ内務省・国立生物研究所, 1999)

4) 産卵場の河床材料について

河床材料については，2~4cm 程度のきれいな砂礫を利用する，増水で洗われた浮き石状態の礫底，特に特に雨後の増水で洗われた浮き石状態の礫底が好まれ，1 産卵期中，降雨ごとに数度集中して産卵することが示されている。

また浦山ダムの下流河川で，貯水池上流端に堆積した土砂を堤体下流に投下する土砂投入を実

施したところ、ウグイの産卵が確認された。産卵場が確認された河床状況を整理すると、以下の通りであった。

- ・ 河床は主に平瀬であった
- ・ 河床構成材料は主に石や砂利であった。
- ・ 河床構成材料は浮き石状態であり、礫の表面は洗われていた(洗い砂利)。

また平瀬で河床構成材料が石や砂利という条件を満たす環境は産卵場以外でも何カ所も確認されたが、礫表面が洗われているという条件を満たす環境は、産卵場以外に確認できなかったことから、洗い砂利がウグイの産卵に適した条件と言われている。

総合するとウグイの産卵場所に適する条件は、以下であると推定される。

- ・ 瀬である。
- ・ 河床構成材料は主に石や砂利(2~4cm程度)で、浮き石状態である。
- ・ 上記の河床構成材料の条件が維持される水深・流速を持つ。ただし、あまり速い流速の場所では産卵できなかつたり、卵が流出する危険性があるため不都合である。

表-参 3.7 ウグイの産卵場所のハビタットの特徴 (梶野ほか, 2003)

No. of Research point	Habitat	Main bed material	Flow Velocity (cm/s)	Water temperture (cm)	Water temperature (°C)	Presence of tracer in the river bed	Condition of bed material
Spawning ground							
①	Run (Hirase)	Stone & Gravel	40.7	29	10.5	○	Loose & Washed
②	Riffle (Hayase) Run (Hirase)	Stone & Boulder	24.3	15	10.5	○	Loose & Washed
③	Run (Hirase)	Stone & Gravel	99.5	25	10.5	○	Loose & Washed
④	Run (Hirase)	Gravel & Stone	82.3	20	10.5	×	Loose & Washed
⑤	Run (Hirase)	Stone	32.6	85	14.0	×	Loose & Washed
⑥	Run (Hirase)	Stone & Gravel	57.0	30	12.0	×	Loose & Washed

浦山ダムの下流河川で、貯水池上流端に堆積した土砂を堤体下流に投下する土砂投入を実施した後形成されたウグイの産卵場の条件を整理した。この結果、ハビタットは平瀬、河床材料は石(Stone)・砂利(Gravel)、河床材料の状態は“Loose & Washed”であることが判った。

[2] 産卵場の調査法

砂州の形態と魚類の産卵場の関係等を調査する調査方法等を示す。

(1) 調査目的

砂州の形態と魚類の産卵場の関係、河道形状（砂州，瀬・淵）と産卵場の位置の関係などから，既往の知見等の併せて，産卵場となり得る河道の必要条件を検討することが目的である．このため以下の観点から調査を設定する必要がある．

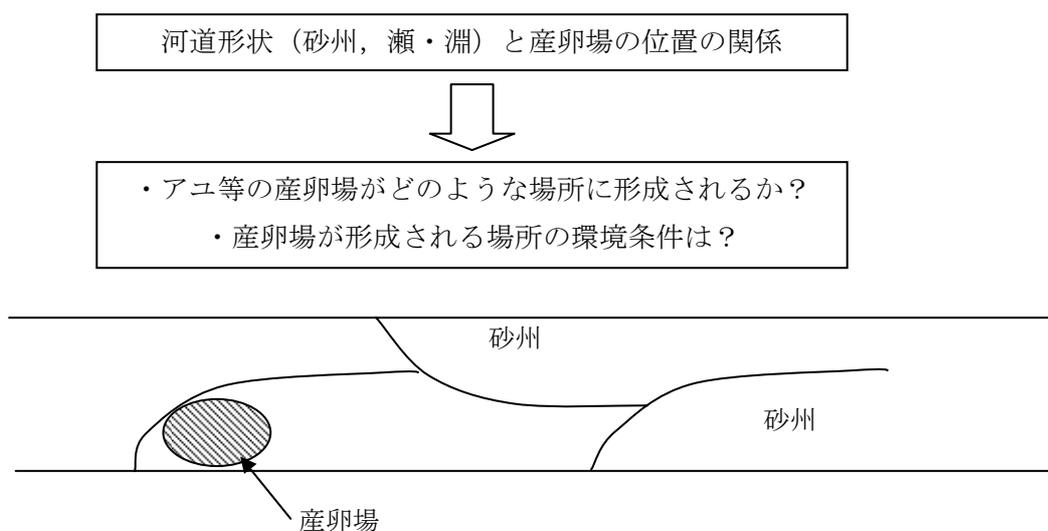


図-参 3.11 魚類の産卵場のイメージ

(2) 調査項目

IFIM 入門(財団法人リバーフロント整備センター，1999)では，アユ及びウグイ(河川型)における適性基準について，産卵場の指標として水深，流速，底質及び水温の4つの項目を提示し，それらの指標の適性値(Suitability Index)によって産卵場に適した環境を示している．またその他の既往知見を見ても，概ね上記の4つの項目について示されていることから，これらの項目を調査項目として設定する．

(3) 調査内容

1) 事前調査

文献調査及び聞き取り調査をもとに現地調査を実施する産卵場を抽出する。

○文献調査

河川水辺の国勢調査及び既往の生物調査等から産卵場の位置を把握する。

○聞き取り調査

漁協、県内水面試験場等に対して以下の点から聞き取り調査を実施する。

- ・産卵場を形成する魚種と産卵場の場所
- ・産卵場の現状、規模～新たな産卵場、現状の産卵場の状態等
- ・産卵場が減少したと思われる理由等

2) 現地調査

産卵場が形成される瀬の特性及び産卵床の特性を把握するために、現地調査を実施する。

- ・周辺環境の状況：産卵場が形成される場所周辺の瀬の分布状況
- ・河床材料：産卵場が形成される場所の河床材料、瀬の主な河床材料
- ・水深・流速：産卵場が形成される瀬の水深・流速

【調査項目】

- ・周辺環境の写真撮影
産卵場周辺の環境が判るような写真を撮影する。
- ・河床材料の写真撮影
平瀬・早瀬においては河床材料の礫径等が判るような写真を撮影する。
- ・水深・流速の測定
河床材料の写真撮影を行った地点において、水深と流速を測定する。

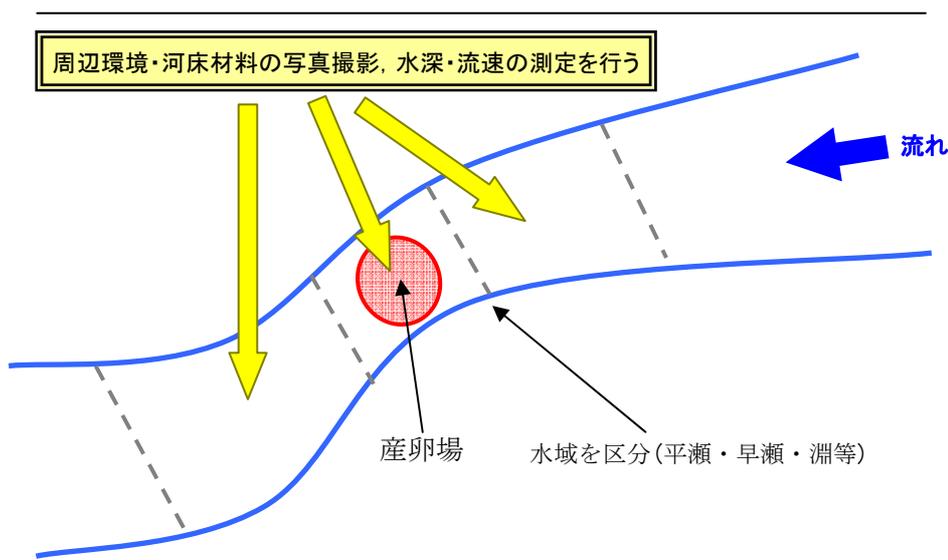


図-参 3.13 産卵場調査のイメージ

[3] 安定的産卵場とは

[1]で整理した内容をもとに安定的な産卵場に必要となる条件を整理した。

表-参 3.8 アユの安定的な産卵場の条件(仮説)

既往の知見	必要な河道特性(仮説)
<ul style="list-style-type: none"> ・河川の勾配が急に緩やかになる部分 ・合流点, 湾曲部, 河川構造物周辺等の, 上下流の地形的な連続が乱れている場所 ・合流点や橋の周辺のように, 流れの状態が周囲とは際だったところに集合 ・平瀬に最も多く, 早瀬がこれに次ぐ 	<ul style="list-style-type: none"> ○礫が堆積しやすく砂州(平瀬・早瀬)が形成されやすい ・経年的に州が形成されている ・最深河床高の変化が小さい(深掘しない) ・河床勾配の変化点 ・州が形成される河道特性を有する(川幅水深比)
<ul style="list-style-type: none"> ・流下した砂礫が堆積して不安定な瀬(かけ上り)となり, 川底が浮き石状態 ・浮き石状態 ・河床が浮き石状態でザクザクしている 	<ul style="list-style-type: none"> ○浮き石の瀬が維持されている 瀬を構成する礫(平均 3cm 程度)が掃流される(アーマー化抑制・浮き石状態の維持)
<ul style="list-style-type: none"> ・10mm 以下, 特に 5mm 以下の砂礫を敷いた場所を選んで産卵 ・0.425mm 以下の砂泥が多いところでは, 産卵量が少なく死卵率が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ○産卵場が形成される 産卵場を構成する礫(10mm 以下, 5mm 程度)が掃流される 常に細粒土砂(0.425mm 以下)が掃流される。

表-参 3.9 ウグイの安定的な産卵場の条件(仮説)

既往の知見	必要な河道特性(仮説)
<ul style="list-style-type: none"> ・早瀬から淵の落ち込む斜面 ・やや平坦な礫底の下流が急に段をなして深くなるような斜面 ・瀬と淵が一体的に存在している場所 ・産卵床の下流部に稚魚の生息する流れの停滞部(ワンド)や緩流部が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ○礫が堆積しやすく砂州(平瀬・早瀬)が形成されやすい ・経年的に州が形成されている ・最深河床高の変化が小さい(深掘れしない) ・河床勾配の変化点(セグメントの境界・橋梁の前後など) ・州が形成される河道特性を有する(川幅水深比) ○流速の緩やかな場所が近傍に存在する
<ul style="list-style-type: none"> ・流下した砂礫が堆積して不安定な瀬(かけ上り)となり, 川底が浮き石状態 ・浮き石状態 ・河床が浮き石状態でザクザクしている 	<ul style="list-style-type: none"> ○礫が動きやすい場所 瀬を構成する礫が(5cm 程度)が掃流される(アーマー化抑制・浮き石状態の維持)
<ul style="list-style-type: none"> ・2~4cm 程度のきれいな砂礫を利用する ・河床構成材料は浮き石状態であり, 礫の表面は洗われていた(洗い砂利) 	<ul style="list-style-type: none"> ○産卵場が形成される 産卵場を構成する礫(3cm 程度)が掃流される 常に細粒土砂(0.425mm 以下)が掃流される。

[4] 産卵場の保全流量の考え方

魚類の産卵場の保全にあたっては以下の点に配慮する必要がある。

1) 産卵場が形成されている砂州の条件を維持する。

礫が堆積しやすく砂州(平瀬・早瀬)が形成されやすい場所に産卵場が形成されることから、以下のような砂州が形成される条件を維持する必要がある。

①土砂の堆積

産卵場が形成される砂州では土砂の堆積傾向にあり、すなわち生きた砂州が形成され、上流から産卵床として適切な粒径が流送されてくる。

河床低下傾向にあるところでは河床がアーミングし、産卵床として好ましくない。

②砂州が発生する川幅水深比

砂州が形成されることから、砂州形成領域の川幅水深比をもつことが必要となる。直線状の平面形態を持ち河床低下傾向でない河川では、平均年最大流量時の川幅水深比が15程度以上あれば砂州が形成される。蛇行河川ではより小さい川幅水深比でも瀬と淵(ポイントバー)が形成される。

2) 流量

産卵場は河床が浮き石でザクザクしていることが必要である。また「砂泥が多いところでは、産卵量が少なく死卵率が高い」ことから、産卵場を形成する砂州が掃流される出水が発生する必要がある。(年2回程度)

上記のような出水が自然状態で望めないような場合には、上流からの土砂供給によって供給量を維持したり、瀬がき等により人工的に浮き石状態を造成したり、フラッシュ放流等により必要な流量を確保することなどが考えられる。

参考文献

- アメリカ内務省・国立生物研究所（1999） IFIM 入門. 財団法人リバーフロント整備センター編.
- 落合明・田中克（1998） 新版魚類学(下)改訂版, 恒星社厚生閣.
- 鬼束幸樹ほか（2004） アユの産卵に必要な水理環境に関する研究, 河川技術論文集 10, pp. 447-452.
- 梶野健ほか（2003） 浦山ダム下流に投入した土砂がウグイの産卵にもたらす効果についてーダム下流河川における土砂投入の効果ー, 応用生態工学 6, pp. 51-58.
- 川那部浩哉・水野信彦・細谷和海編・監修（2001） 日本の淡水魚 第3版.
- (株)山と溪谷社財団法人リバーフロント整備センター編集（1996） 川の生物図典, 平文社.
- 埼玉県農林総合研究センター水産研究所, 工事中重機によるウグイの人工産卵床造成, 埼玉県農林総合研究センター水産研究所 HP.
- 全国内水面漁業協同組合連合会（1993） アユの産卵場づくりの手引.
- 高橋勇夫・新見克也（1998） 矢作川におけるアユの生活史 I 産卵から流下までの生態, 矢作川研究 2, pp. 225-245.
- 玉井信行・水野信彦・中村俊六編（1998） 河川生態環境工学 第8刷, 財団法人東京大学出版会.
- 中村守純（1969） 日本のコイ科魚類, 昭文堂.
- 永矢貴之・松尾景治（2002） 平面流況解析を用いた動植物の生息・生育環境の評価, 河川技術論文集 8, pp. 73-78.
- 宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦（1976） 原色日本淡水魚図鑑, 保育社.
- 山本晃一（2004） 構造沖積河川学, 山海堂.

報告書作成に関わった人達

- 編集・企画 山本晃一 (河川環境管理財団河川環境総合研究所所長)
- 執筆者 山本晃一 (同上 序, 2.1.2, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2 加筆修正, 3.3.1
および 3.3.2 加筆修正, 3.3.3, 4)
- 白川直樹 (筑波大学機能工学系 2.1.1)
- 大塚士郎 (株式会社建設環境研究所 1, 3.2)
- 伊藤英恵 (同上 3.3.1, 3.3.2, 参考資料 2)
- 内田士郎 (同上 1, 3.2 加筆, 参考資料 3)
- 企画・調整・調査
- 岸田弘之 (元河川環境管理財団研究第二部長)
- 阿部徹 (河川環境管理財団研究第二部長)
- 裊義光 (河川環境管理財団研究第二部次長)
- 並木嘉男 (河川環境管理財団研究第二部主任研究員)

国土交通省河川局河川環境課との研究内容の調整にあたっては

藤田光一 (国土交通省国土政策技術研究所環境部河川環境研究室長)

宮武浩司 (元国土交通省河川局河川環境課課長補佐)

氏から貴重な情報の提供と調査の方向性の指示を, また

大沼克弘 (国土交通省国土政策技術研究所環境部河川環境研究室主任研究員)

には植生モデルの提供と技術指導を受けた。

記して感謝したい。

河川環境総合研究所資料 第16号 平成17年10月編集・発行 ISSN 1347-751X

流量変動と流総土砂量の変化が沖積河川生態系に及ぼす影響とその緩和技術

編集・発行 財団法人 河川環境管理財団 河川環境総合研究所

〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 11-9

TEL 03-5847-8304 FAX 03-5847-8309

URL <http://www.kasen.or.jp> E-mail info@kasen.or.jp

印刷・製本 西印刷株式会社

〒102-0093 千代田区平河町 1-4-15

TEL 03-3263-5579 FAX 03-3239-4890