

河川環境総合研究所資料
第 27 号

大規模災害復旧工事後の河道・環境特性の変化
—余笹川の事例—

2009 年 9 月

(財)河川環境管理財団
河川環境総合研究所

大規模災害復旧工事後の河道・環境特性の変化 —余笹川の事例—

目 次

大規模災害復旧工事後の河道・環境特性の変化 ―余笹川の事例―

1	はじめに	1
2	河川の概要	1
2.1	河川の概要	1
2.2	流域の地形・地質	1
2.3	自然環境	3
2.4	社会環境	6
2.5	河川関連事業の経緯	7
3	検討区間の河道・環境特性	8
3.1	河川沿いの地形・河道の平面形状と小セグメント区分	8
3.2	検討区間の河道・環境特性の縦断変化	14
3.3	河道特性のまとめ	26
4	平成10年8月出水と被災	29
4.1	降雨特性と出水状況	29
4.2	被災状況と形態	31
4.3	河道および沖積地地形の変化	33
4.4	環境特性の変化	33
5	災害復旧計画と工事	34
5.1	災害復旧事業の流れ	34
5.2	災害復旧事業の概要	34
6	工事中・後の河道・環境特性の変化	39
6.1	災害後の降雨・洪水	39
6.2	河道地形および景観の変化	41
6.3	水生生物相の変化	78
7	おわりに	91
	参考文献	98
	ノート 狭隘谷中小河川における大規模災害復旧計画の課題と対応	100

大規模災害復旧工事後の河道・環境特性の変化 –余笹川の事例–

河川環境総合研究所 所 長 山 本 晃 一

前河川環境総合研究所 主任研究員* 和 田 健 一

*（現・応用地質株式会社）

1. はじめに

1998年（平成10）年8月末、栃木県北部は、台風4号に刺激され活性化した前線の活動により豪雨に見舞われ、那珂川支川余笹川・黒川では大災害となった。（財）河川環境管理財団は、翌年12月、栃木県の委託を受け、災害復旧工事の進捗状況を踏まえて改良復旧事業計画の基本的な姿を変えないという与件下で、環境に配慮した改善方策を検討し、当該年度の3月に計画の一部を変更する等の提案を行った。また、その後の復旧工事において工事中の環境変化のモニタリングとその評価を依頼された。モニタリング調査は、改良復旧事業の終了、すなわち5年目の2003年（平成15）1月27日で終了した。

しかし、大規模災害復旧工事という河川に加えた大きな人為的インパクトに対する河川環境の応答が平衡に達したとは思えず、環境変化のモニタリングを継続し記録に残しておく必要を感じ、財団の自主研究として、写真撮影によるモニタリング調査を継続した。

本論では、余笹川本川筋（那珂川合流点から16km）とその右支川四ツ川（余笹川合流点から7.50km）の河川環境特性の変化について、1997年（平成9）から2009年（平成21）5月までの観察データを提示し、それにより狭隘谷底平野を流れる急勾配河川の大洪水および大規模河道改変後の河道の応答特性を記載・分析し、大規模災害復旧計画論に資するものである。

2. 河川の概要

2.1 河川の概要

一級河川那珂川の左支川である余笹川は、 2.1.1 の流域図に示すように那須郡那須町の朝日岳（標高1,896m）に発し、その流域は茶臼岳（1,915m）を頂点とする東南に広がる那須火山麓、高久丘陵を開析して流下し、那珂川に合流している流域面積343.5km²、幹線流路長37.2kmの河川である。余笹川本川は、那珂川合流点から7.9kmにおいて棒川（流域面積13.6km²）、16.1kmにおいて四ツ川（流域面積19.7km²、流路長10.4km）が右側から流入する。那珂川との合流点より3.6km地点において左から流入する黒川（流域面積189.2km²）は、高久丘陵を開析して流下し、余笹川合流点から18km地点より下流は高久丘陵と八溝山地の境界辺を流下している。なお、本論では、河川の距離は災害復旧後の距離呈で表示する。

2.2 流域の地形・地質

余笹川流域の河床、河岸の地質は、上記の地形を反映して、複雑に変化している。 2.2.1 に余笹川流域の表層地質図を示す。

黒川の東側に分布する八溝山地の地質は、中生代に堆積した砂岩と粘板岩の互層を主体とし、

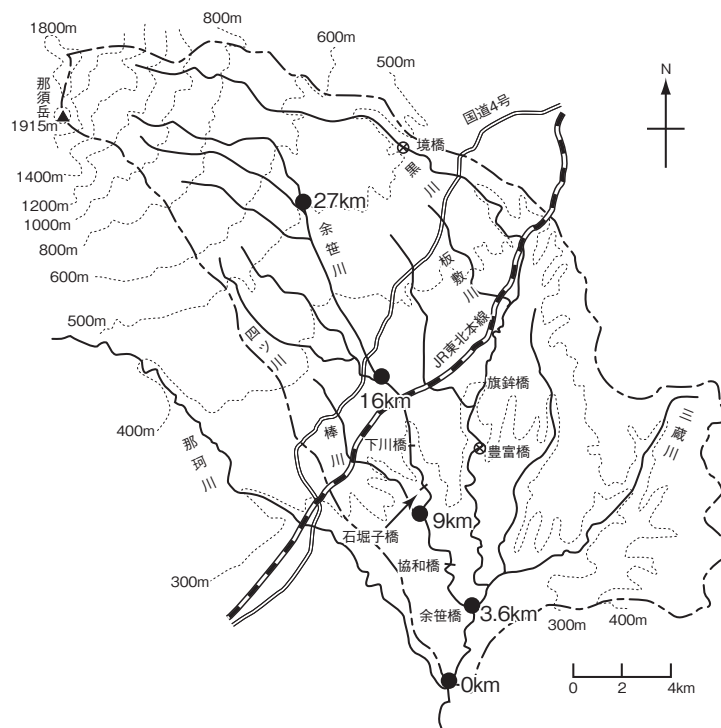


図2.1.1 余笹川流域図(上野(2005)に付加)



記号	地 質
Ag	砂礫
Dmsg	礫・砂・泥
Psm	砂岩・粘板岩互層
Py	火山碎屑物
Pm	軽石凝灰岩
L	ローム
Ab	安山岩
Pt	溶結凝灰岩
Cr	花崗岩

図2.2.1 余笹川流域の表層地質図
(国土庁監修:土地分類図(栃木県), 昭和49年を参考にして作成)

所々で花崗岩の貫入が見られる。その西側に広がる高久丘陵は、火山碎屑物（那須火山を起源とする火山角礫岩、岩屑なだれ堆積物とその上に堆積する火山灰層（関東ローム層））からなる。これらの下位には、丘陵地のほぼ全域にわたって溶結凝灰岩（白河デイサイト）が分布している。さらに、段丘部分には、上流域や周辺の山地、丘陵から供給された砂礫が堆積している。

山元（2006）によると、本検討区間（余笹川那珂川合流点から16～0km）とその右支川四ツ川（余笹川合流点から7.50～0km）周辺の高久丘陵には、岩屑なだれ堆積物が広く分布している。

余笹川6.5km付近より上流には4～3万年前の御富士山岩屑なだれ堆積物が表層に堆積し、その下流には黒磯岩屑なだれ堆積物が堆積する。余笹川3.1km付近の左岸侵食崖では河成堆積物である鍋掛礫層を挟んで上に黒磯岩屑なだれ堆積物（27～25万年前）が、その下に余笹川岩屑なだれ堆積物（層厚3.5m、30～27万年前）が河成堆積物を覆っている（⇒写真3.1.8）。なお、余笹川岩屑なだれ堆積物は5km付近までしか追跡できない。

余笹川沿いには、3～4段の河岸段丘が形成されている。20km下流の沖積谷の幅は200～800mで、周囲の山地、丘陵の山脚が川に近接している。

2.3 自然環境

[1] 気候

余笹川流域は、年間を通じて比較的降水量の多い温帯湿潤気候に属するが、海から遠いこともあり寒暖の差が大きい。夏季には発雷が多い。余笹川流域周辺の降水量を雨量観測所の資料より見ると、黒磯、宇都宮が年降水量1400mm前後であるのに対して、山岳地形の影響により那須観測所では1800mmと多い。表2.3.1に見るように月別降水量は何れも5～9月に多い（栃木県、2003）。

表 2.3.1 余笹川流域周辺の月別降水量

観測所	降 水 量 (mm)												年
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
那 須	42.9	66.0	90.0	162.3	155.1	200.8	236.9	283.3	282.6	158.2	95.9	43.6	1814.8
黒 磯	20.3	48.6	78.3	123.2	125.8	156.3	192.8	206.9	225.2	126.5	69.0	23.2	1403.4
宇都宮	25.6	46.6	74.1	109.6	137.7	201.3	170.7	194.2	206.6	118.7	65.3	31.9	1382.5

[2] 植生

余笹川流域の植生は、大部分がコナラ等の代償植生および水田雑草群落である。河川沿いの平野部是水田・畑地として利用されているほか、スギ・ヒノキ植林およびアカマツ・ヤマツツジ群集が処々に分布する。丘陵地は主としてコナラ林およびスギ・ヒノキの人工林が分布している。

[3] 生物

(1) 鳥類

既存の文献によると余笹川流域では、16目40科155種の鳥類が確認されている。そのうち河川およびその周辺を餌場、繁殖場所として利用していると考えられるのは、表2.3.2のようである。

表 2.3.2 余笹川流域で確認された鳥類が利用すると考えられる河川周辺の環境

	餌 場						繁殖場所			
	州・砂 礫地	湿性 草原	陸上 草原	樹林	水域	水田	砂礫地	湿性 草原	陸上 草原	樹林
カイツブリ類					○			○		
サギ類	○	○	○		○	○				○
カモ類		○			○	○		○	○	
ミサゴ					○					
ハイイロチュウヒ	○		○			○				
クイナ類	○	○			○	○		○		
チドリ類	○	○				○	○		○	
シギ類	○	○				○	○		○	
カワセミ類					○					
セキレイ類	○	○	○							
カワガラス					○					
ミソサザイ				○						○
オオヨシキリ		○	○			○		○		
セッカ		○	○			○			○	

※参考資料 川の生物図典（1996）財団法人リバーフロント整備センター
 原色日本野鳥生態図鑑〈水鳥編〉（1995）保育社
 水辺環境の保全（1998）朝倉書店

(2) 魚類

余笹川流域では、漁業実績および聞き取り調査によると5目7科16種の魚類が確認されている（表2.3.3）。一般に河川上流域に生息するイワナ、ヤマメ、カジカ、中流域に生息するウグイ、オイカワ等のコイ科魚類、池沼や流れの緩い場所や細流に生息するコイ、フナ類、ドジョウ等が確認されており、関東地方の河川における普通の魚類相である。

両側回遊魚としてアユが、遡河回遊魚としてはイワナ等のサケ類の他、ウグイ、降河回遊魚としてはウナギが生息している。

表 2.3.3 余笹川流域で確認されている魚類

No.	目	科	種 名	聞き取り	漁業実績	
					漁獲	放流
1	ウナギ	ウナギ	ウナギ	●	●	－
2	サケ	サケ	イワナ	－	－	●
3			ニジマス	●	－	－
4			ヤマメ	－	●	●
－			マス類	－	●	－
5		アユ	アユ	●	●	－
6	コイ	コイ	ウグイ	●	●	－
7			オイカワ	●	－	－
8			タモロコ	●	－	－
9			モツゴ	●	－	－
10			ニゴイ	●	－	－
11			コイ	●	●	－
－			フナ類	●	－	－
－			コイ類	●	－	－
12			タビラ（アカヒレタビラ）	●	－	－
13		ドジョウ	シマドジョウ	●	－	－
14			ホトケドジョウ	●	－	－
－			ドジョウ類	－	●	－
15	ナマズ	ナマズ	ナマズ	●	－	－
16	スズキ	カジカ	カジカ	●	－	－
種 数				14	6	2
				16		

聞き取り：栃木県水産試験場那珂川分場、那珂川北部漁業協同組合への聞き取り調査による。

漁業実績：河川環境調査業務報告書（那珂川水系の魚介類調査）、栃木県大田原土木事務所、平成 11 年 1 月による。

2.4 社会環境

[1] 土地利用

余笹川流域は、栃木県北部に位置する那須町、那須塩原市、大田原町、福島県南部に位置する白河市、西郷村からなるが、大部分は那須町が占めている。那須町の人口は2000年（平成12）で約27千人、ここ数年横這いである（栃木県、2003）。

余笹川の谷底沖積地、段丘面は広く水田として利用され、丘陵地はコナラ林やスギ・ヒノキの植林地となっている。栃木県土地利用基本計画図によると、余笹川と黒川は上流部が森林地域に、中・下流部の谷底沖積地は農業地域に指定されている。また那須都市計画総括図によると、余笹川・黒川の周辺丘陵は、下流部の一部を除き、都市計画区域に指定されている。図2.4.1に那須町の土地利用割合を示す。森林が66%を占めている。

余笹川の沖積地の幅は、那珂川合流点から15～22kmにおいて最も広く、比較的古くから開発され、国道4号沿いの丘陵地に那須町役場があり、那須町の中心部となっている。

また、関東と東北を結ぶ主要な交通路として、奥州街道であった国道4号、東北自動車道、国道294号、東北新幹線、JR東北本線などの主要交通路が余笹川を横断している。

那須町は日本で有数の別荘地として知られ、四ッ川沿いは別荘地として開発されている。

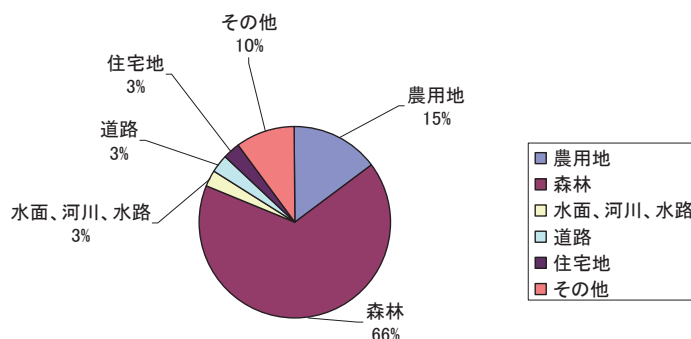


図2.4.1 那須町の土地利用状況(平成7年)

[2] 河川利用

余笹川流域には水田が分布しており、狭い沖積谷を流れる急勾配河川の利水形態の例に漏れず、多数の取水堰が存在し、用水が反復利用されている。農業用取水堰は、余笹川本川に10堰、四ッ川に3堰が存在する。

表2.4.1に流域河川別の魚類の放流実績および漁獲量を示す。主としてアユの他、イワナ、ヤマメ、マス等のサケ科魚類が放流されている。このため入漁期間中には多くの釣り人が訪れている。

余笹川では、余笹川ふれあい公園（14.5km付近右岸）が整備され、積極的な親水利用が図られている。

表 2.4.1 流域河川の漁業実績および放流量

種名	漁業実績					
	余笹川		黒川		那珂川	
	漁獲等(尾)	放流(尾)	漁獲等(尾)	放流(尾)	漁獲等(尾)	放流(尾)
ウナギ	20	—	20	—	—	—
イワナ	—	3,500	—	—	—	58,500
ヤマメ	2,600	7,800	2,600	4,100	400	89,750
マス類	10	—	10	—	—	—
アユ	4,400	—	4,400	—	5,700	—
ウグイ	5,700	—	5,700	—	1,500	—
オイカワ	—	—	—	—	200	—
コイ	50	—	50	—	—	—
ドジョウ類	100	—	100	—	—	—
カジカ	—	—	—	—	200	—

出典) 河川環境調査業務報告書(那珂川水系の魚介類調査) 平成11年1月
 栃木県大田原土木事務所 財団法人 栃木県建設技術センター

2.5 河川関連事業の経緯

余笹川の治水事業は、災害復旧事業や県単独事業による局部的かつ小規模な河川整備が実施されてきた。一定計画に基づく一連の河川改修は特に実施されなかったが、0～17km（東北本線）までの河岸には崖線を除き、ほぼ護岸が敷設されていた。平成10年洪水による被災後、那珂川合流点から右支川四ツ川合流点直上流（0～16km）において改良復旧工事がなされ2000年度（平成12）完了した。

16km地点上流では砂防事業として、平成10年災害前に余笹川火山砂防事業として16km地点から上流5.4km（河床勾配1/70程度）で**写真2.5.1**のような流路工が設置されていた（川幅60～80mで床止工が約200mピッチで整備）。災害後は、その上流5.6km（河床勾配1/30程度）が余笹川上流砂防事業として、**写真2.5.2**、**写真2.5.3**のような砂防堰堤6基、流木止め工4基、床止工14基および護岸工が、31億円で2002年度（平成14）竣工した。また、山地上流部には砂防事業により砂防ダムが設置されている（**写真2.5.4** 北温泉付近の砂防ダム）。

余笹川4.92km地点に東京電力の取水堰が設置されている。堰の湛水池には黒川から電力用水がトンネルで導水されている。この取水堰で取水された電力用水は、那珂川合流点付近で落とされ、余笹川には戻らない。この取水堰は平成10年洪水で被災し改築された（**写真2.5.5**）。



写真2.5.1 余笹川上流域の流路工
(2008年(平成20)6月撮影)



写真2.5.2 余笹川上流域の砂防堰堤
(2008年(平成20)6月撮影)



写真2.5.3 余笹川上流域の砂防堰堤(流木止工)
(2008年(平成20)6月撮影)



写真2.5.4 余笹川山地上流部(北温泉)付近の砂防ダム(2008年(平成20)6月撮影)



写真2.5.5 余笹川4.92km付近の取水堰
(2008年(平成20)6月撮影)

3. 検討区間の河道・環境特性

3.1 河川沿いの地形・河道の平面形状と小セグメント区分

まず河川沿いの地形、河道の平面形状について概説する。

余笹川の最上流部は、火山崩壊性の広く深い侵食域となっている。その下流の山麓部は侵食抵抗の小さい火山性の堆積物が分布しているため、流水により深く狭い侵食谷が形成されている。この区間を経て、河床勾配が1/30程度となると河川周辺は丘陵地形となり、勾配1/70程度となる20km付近から侵食された土砂および谷壁を侵食した層厚の薄い沖積堆積物からなる狭い谷底平野となる。沖積谷は下刻傾向にあり、その侵食過程で数段の段丘が形成されている（写真3.1.1）。



a) 余笹川右岸 1.5 km付近（河岸段丘の段丘面と段丘崖）



b) 余笹川左岸 4.5 km付近（現河道と河岸段丘）

写真3.1.1 河道沿いの段丘の状況(1999年(平成11)12月撮影)

図3.1.1に、地形解析と地表踏査に基づいて作成した河道沿いの地形区分を示す。なお図中の距離呈は那珂川合流点からの距離であり、四ツ川は余笹川合流点(16km地点)からの距離である。

余笹川は狭い沖積谷を蛇行しつつ流れる制限蛇行であるが、その大局的な蛇行波長を見ると被災前の河道幅の20倍を超えるものが多く、沖積河川の自由蛇行の波長(川幅の10～15倍)に比べて長い。なお詳細に見ると大局的な蛇行の中により波長の短い蛇行が存在する区間がある。

次に河川の縦断形と平面形状の特徴について小セグメント毎に取りまとめる。検討の対象にするのは災害前の1996年(平成8)の河道である。河道の平面形状の特徴について、この時点で撮影された航空写真を基に検討した。

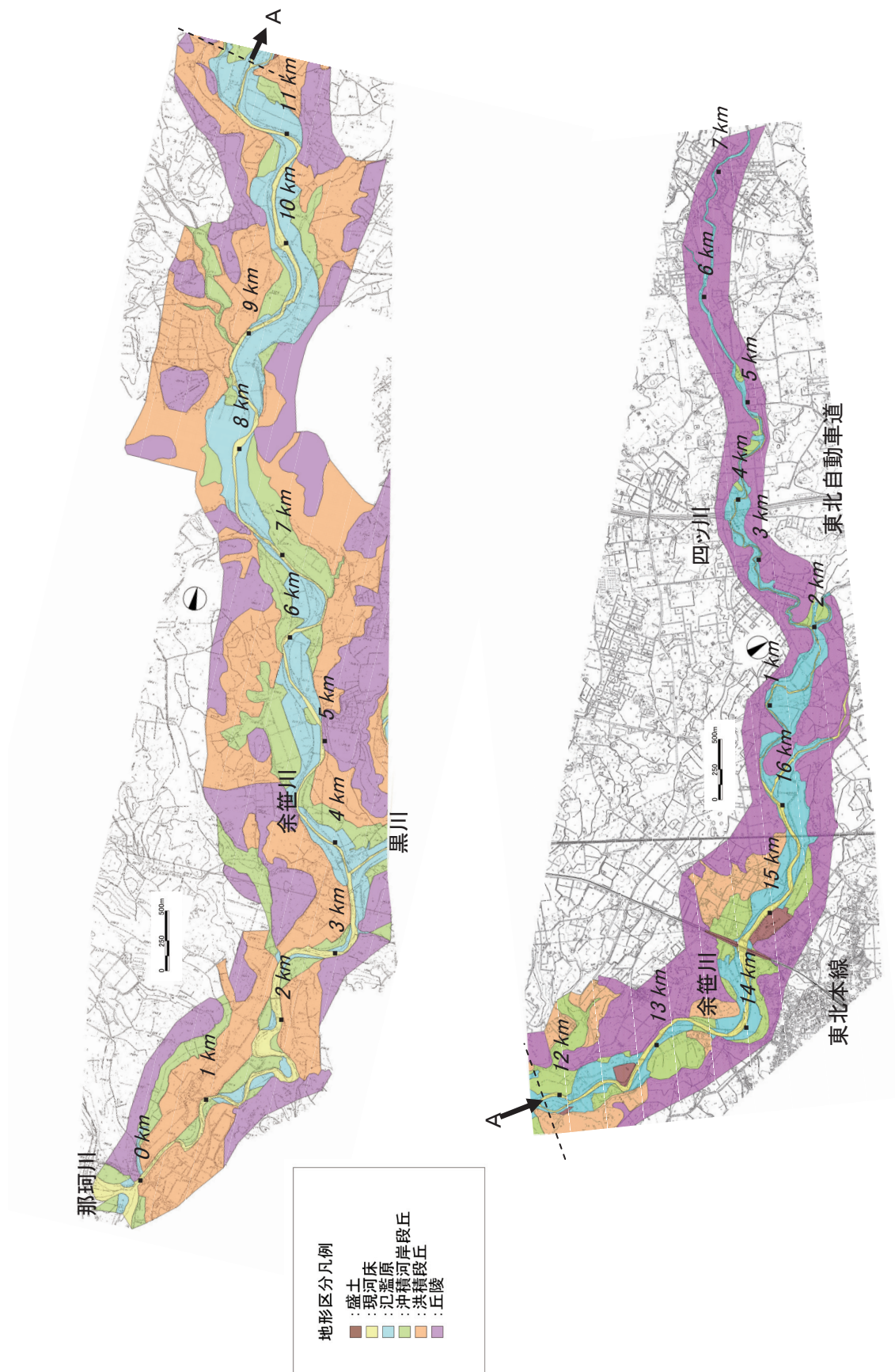


図3.1.1 余笹川・四ツ川沿いの地形区分図(縮尺:1:50,000)

河川の縦断形は、ほぼ同一勾配を持ついくつかの区間に分けることができる。このような河床勾配がほぼ同一である区間は河床材料や河道の種々の特性が似ており、河道を分節化して河道の特徴を記述し、その特徴を踏まえて技術的に働きかける空間単位となっている。これをセグメントといっている。山本（2004a）はセグメントの分類および命名法について定義している。本論ではそれに従う。

検討する河道区間は、被災後の災害復旧区間である余笹川（那珂川合流点を0kmとした16km区間）、四ツ川（余笹川との合流点16km地点を0kmとした7.25km区間）である。

小セグメントごとに河道の平面形状の特徴を以下に記す。

[四ツ川]

(1) セグメント四M-①=7.25～2.1km

本区間は、被災後の改修区間を上流端とするもので、一部谷幅の広い沖積谷の区間があるが、大部分は丘陵を下刻して流れている穿入河道である。沖積谷幅の広い3～4km区間では100m程度の波長を持つ蛇行河道となっている。

河床勾配は1/60～1/45程度である。なお6.2～5.0km区間は前後の区間に比べて勾配が急で1/40程度である。

(2) セグメント四1-①=2.1～0km

本区間は沖積谷幅が広がる2.1kmを上流端とし、余笹川の合流点を下流端とする小セグメントであり、沖積谷形状に規定された850m程度の大蛇行と100m程度の波長を持つ小屈曲の蛇行が共存している。被災前の川幅（川幅の定義は⇒3.2(4)）は、概略10m程度である。小屈曲は川幅と調和的である。なお、調和的とは、通常の沖積河川の蛇行長と川幅の関係である蛇行波長が川幅の10～15倍であることをいう。段丘崖に寄った河岸には写真3.1.2の様に岩屑なだれ堆積物である巨大礫が存在する。

河床勾配は1/107程度である。なお本区間の1.2～2km区間は改修に当って河道位置が付け替えられ河道距離が220mほど短くなった（図3.1.2参照）。



写真3.1.2 四ツ川0.3km岩屑なだれ堆積物の巨大礫
(1999年(平成11)12月撮影)

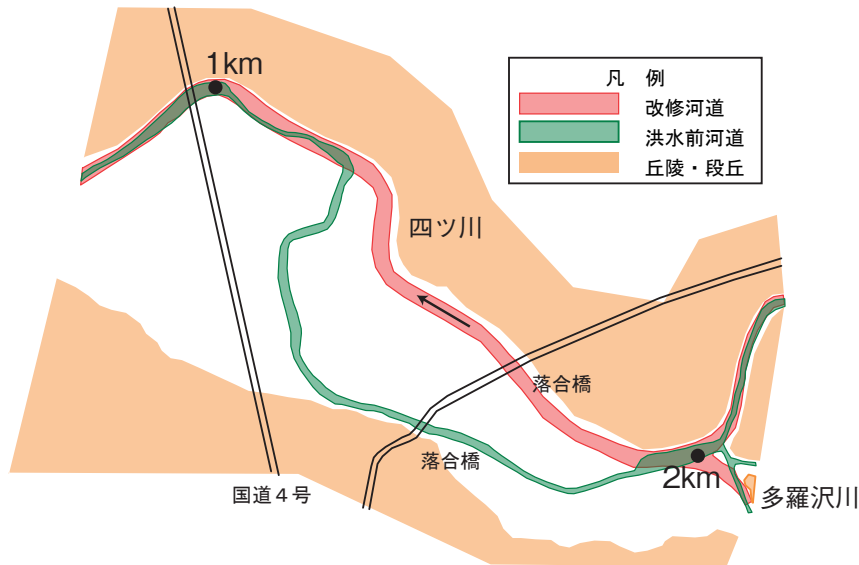


図3.1.2 四ツ川の河道の付替え

[余笹川]

(1) セグメント余1-①=16.0～11.5km

本区間は、上流端を四ツ川の合流点とする長さ4.5kmの小セグメントである。河道の平面形状は、沖積谷形状に規定され不規則な蛇行形態となっている。被災前の川幅 B （⇒3.2(4)）は20～30m程度である。河道内に砂州は存在しないか、あっても不明瞭であり、唯一14.7～15.0km区間に前縁線の不明瞭な交互砂州が存在し、波長 $L_s=280\text{m}$ 、 $L_s/B=11.2$ である。11.8～11.0kmの区間は中島を伴う二派となって流れている。河道の屈曲が砂州長に対応している区間もあるが、ほとんど川幅の10～15倍より長い波長を持つもので、沖積谷の形状に規定された平面形状となっている。

河床表面には巨礫（⇒3.2.(3)）が散在する。河床勾配は1/100である。

(2) セグメント余1-②=11.5～3.6km

本区間は、上流端を余笹川が右岸洪積台地に突き当たる地点、下流端を黒川の合流点とする長さ7.9kmの小セグメントである。沖積谷幅は150～200mであり、その中を余笹川は蛇行長1,500m程度で蛇行して流れている。蛇行度 S を（流路長）/（谷中心線長）とすると1.1程度で大きなものではない。流路が丘陵に寄ったところでは、丘陵構成材料である更新世の岩屑なだれ堆積物が側岸に露出している（写真3.1.3, 写真3.1.4, 写真3.1.5）。被災前の川幅は20～30m程度である。蛇行長は川幅の30～40倍であり、この川幅が大蛇行を規定しているとは言えない。不明瞭な砂州がわずかに存在する区間がある。その波長 L_s は150～200mであり一般的な交互砂州の波長である。大波長は、1998年（平成10）の災害後の河道幅および沖積谷壁の平面形状と調和的である。

河床表面には巨礫、巨大礫が散在する。河床勾配は1/120程度である。

(3) セグメント余1-③=3.6～0km

本区間は最上流部を黒川の合流点とし、下流端を那珂川本川との合流点とする3.6kmの区間である。本区間の河道平面形状は、黒川からの河川流量の増大にもかかわらず、上流の小セグメント（セグメント余1-②）に比べ、蛇行波長が短く蛇行度が大きい。特に0.5kmから2kmの区間

において顕著である。この区間は沖積河道とは言えず、河岸に堆積岩に貫入した花崗岩が分布し、余笹川はこれを下刻して流れる穿入河道となっている（写真3.1.6，写真3.1.7）。この区間の河道幅（⇒図3.2.8）は30～50mである。蛇行波長は400～500mで川幅の10～15倍である。川幅と蛇行長の関係は沖積河川とほぼ等しい。すなわち下刻化の過程において、川幅はほとんど変化しなかったと推定される。



写真3.1.3 余笹川10.8km左岸岩屑なだれ堆積物
(1999年(平成11年)12月撮影)



写真3.1.4 余笹川5.0km付近左岸 岩屑なだれ堆積物
(1999年(平成11年)12月撮影)



写真3.1.5 余笹川4.9km左岸左側:新第三紀凝灰質砂岩, 右側:岩屑なだれ堆積物, 上部:岩屑なだれ堆積物(1999年(平成11年)12月撮影)



写真3.1.6 余笹川右岸2.28～2.48km(新第三紀泥岩砂岩互層)(1999年(平成11)12月撮影)



写真3.1.7 余笹川左岸1.62km付近(くらやみ淵)
(花崗岩)(1999年(平成11)12月撮影)

2～3.6kmの区間の蛇行波長は1kmであり、川幅40mの10～15倍より長く、この川幅が蛇行長を規定したものではない。2.0～2.7km地点は砂州長 $L_s=350\text{m}$ 程度の交互砂州が形成されている。 $L_s/B=9$ 程度である。砂州の配置形態と河道の蛇行とは対応していない。蛇行長は1998年（平成10）の被災後の川幅100m程度の10倍である。3～3.7km地点河床表面には巨礫、巨大礫が散在している。3.6km付近には堆積岩（泥岩・砂岩）と見られる河床が露出している（2009年（平成21）5月現在）。3.1km付近の左岸侵食崖の様子を写真3.1.8に示す。黒礫岩屑なだれ堆積物が上層に、その下に河成堆積物である鍋掛礫層、角礫の巨礫を含む余笹川岩屑なだれ堆積物の層序となっている。

なお平成10年洪水においては1.6～2.0kmの付近の大きく蛇行した花崗岩質地質を基部に持つ段丘のうち、下位の段丘面上を洪水が流れ、その上にあった牛舎が破壊され牛が流された。洪水後の復旧工事においてこの2つ蛇行部の首部は掘削され（風化された花崗岩）、新たな河道となり旧河道は分派水路（⇒写真3.1.7 くらやみ淵）として存置された（⇒図3.1.3参照）。

ショートカット以前の河床勾配は1/155程度である。



写真3.1.8 余笹川左岸3.1km付近の侵食崖
（2009年（平成21）5月撮影）、A：鍋掛礫層

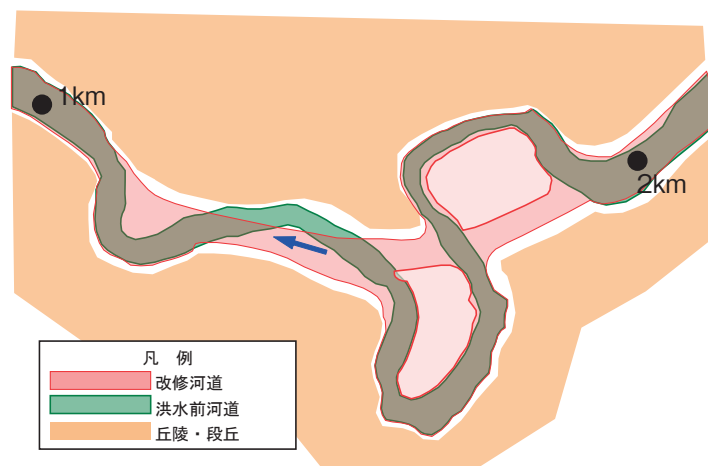


図3.1.3 余笹川のショートカット

3.2 河道・環境特性の縦断方向の変化

以下に余笹川の検討対象区間の河道および環境特性の縦断方向の変化を記す。

(1) 平常時の流量および平均年最大流量の評価

余笹川流域では、2002年（平成14）から14.69km地点および3.55km地点で水位観測がなされ、水位流量曲線により流量が評価されるようになった。

3.55km地点の平水流量および低水流量は、それぞれ $5.13\text{m}^3/\text{s}$ （7年平均）、 $2.72\text{m}^3/\text{s}$ （7年平均）であり、14.69km地点はそれぞれ $4.1\text{m}^3/\text{s}$ （6年平均）、 $3.42\text{m}^3/\text{s}$ （5年平均）である。

3.55km地点の7年間の平均年最大流量は $225\text{m}^3/\text{s}$ であり、14.69km地点は欠測を除く5年平均で $119\text{m}^3/\text{s}$ であった。観測年数が少なく余笹川の平均年最大流量を的確に評価できない。そこで、図3.2.1に示す東北地方の河川比流量と流域面積の関係図よりクリーガーのCを7として推定すると、0km地点で $440\text{m}^3/\text{s}$ 、3.7km地点で $190\text{m}^3/\text{s}$ 、9km地点で $170\text{m}^3/\text{s}$ 、四ッ川で $67\text{m}^3/\text{s}$ となる。

(2) 河床縦断形と勾配

図3.2.2に余笹川および四ッ川の河床縦断図を示す。同図には小セグメント区分と主要支川流入地点、主要横断構造物位置を示した。

なお余笹川16km地点より上流は砂防事業区間であり、河床勾配は約1/70から1/30と急となる。25kmより上流では1/10程度の勾配となる。

(3) 河床材料と河岸物質

検討対象区間の余笹川の河床材料は、上流部の山麓および河床を侵食し運搬されたもの、沖積谷壁を侵食し供給された土砂が堆積したものである。一部、河床および河岸に基岩が露出している。図3.2.3は、橋台付近のボーリングデータを整理したものである。ボーリング柱状図右横のN値の垂直分布図に示された数値は、河床面の標高を示すものである。最深河床高はこれより標高が低いので、最深河床高より0～数m下には、火山碎屑物（ある程度固結度がある）があり、河床の低下を防いでいる。

事実、2009年（平成21）5月13日における現地調査によると、セグメント余1-①、1-②区間である黒川の合流点（3.6km）より上流の河床において火山礫凝灰岩（巨大礫を含む場所もある）が露出している箇所が多々見られた。この火山礫凝灰岩の堆積年代は不明であるが、下流ほど古く上流部ほど新しい堆積物である。3.8～10.1km区間の河床に露出した基岩は褐色に変色した凝灰岩（写真3.2.1）、10.9km右岸は白っぽい固結度の小さい火山礫凝灰岩で、スレーキング現象が

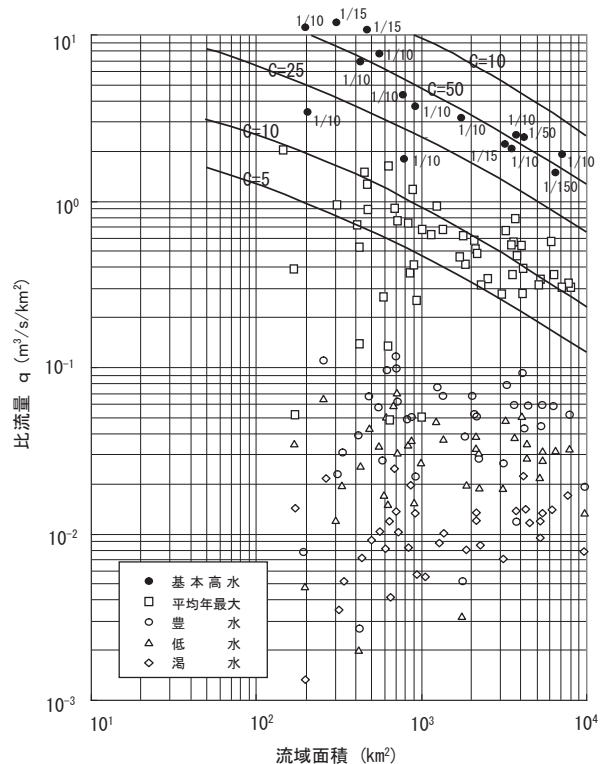


図3.2.1 東北地方の河川比流量と流域面積の関係（山本, 1989）

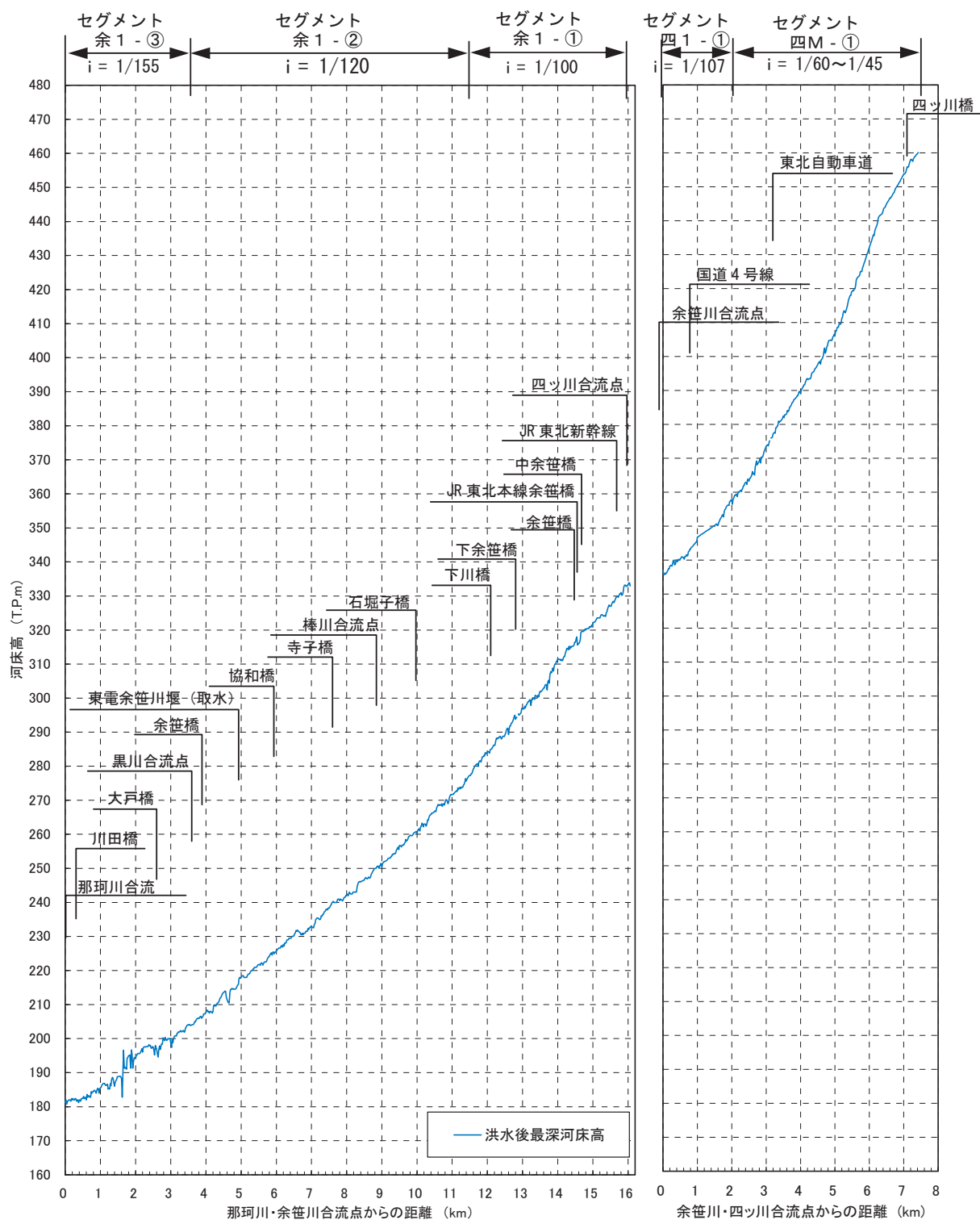


図 3.2.2 余笹川, 四ッ川の改修前の河床高

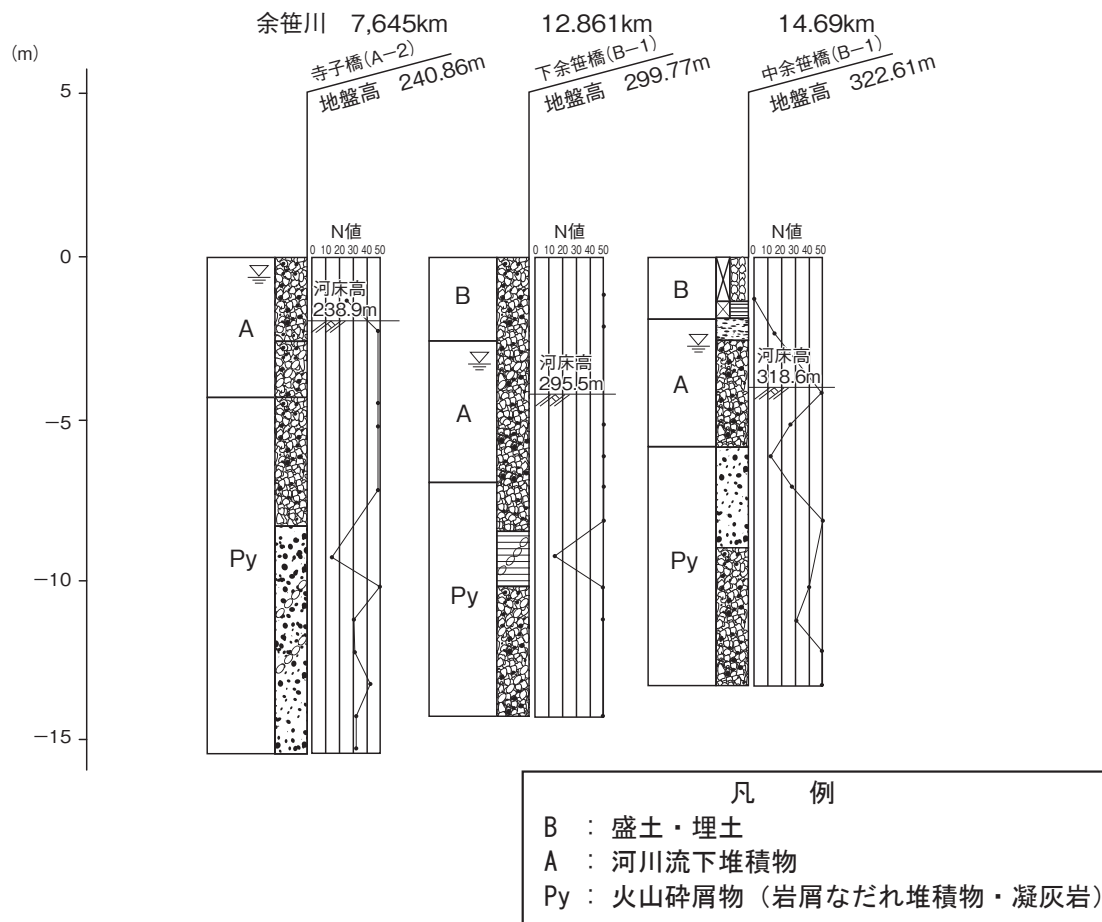


図3.2.3 橋台付近ボーリング柱状図

生じていた(写真3.2.2)。11.7kmは角ばった巨礫を多量に含む火山礫凝灰岩で岩屑なだれ堆積物と推定される(写真3.2.3)。

セグメント余1-③区間の3.6～2kmには堆積岩(砂岩泥岩互層)が河床に露出している箇所が見られた(写真3.2.4)。2km～0kmの区間においては河床に堆積岩に貫入した花崗岩が露出している。栃木県の調査によると洪水後河床表層に巨礫が多く存在した区間は、3.7～4.7km, 6.95～7.6km, 7.87～7.94km, 9.24～9.85km, 12.66～12.68kmであった。これらの巨礫は護岸や捨石に使用され、ほとんどが姿を消した(三品, 2009)。

2000年(平成12)1月, 直線に引いたテープの下にある河床表面の材料を全量採取し礫の長径, 短径を測定した(⇒メモ1)。調査時点は災害復旧工事中であるが, 写真3.2.5に示す調査地点の河床材料の状態に示すように, 工事で荒らされていない地点の表層材料を調査したものである。このサンプルデータより, ある粒径の石が表面に存在する面積支配確率密度を評価し, その累加曲線を作成した(⇒注1)。結果を図3.2.4に示す。面積支配確率密度は, 表層材料が河床下においても同じものであれば, 河床下の材料の粒度分布密度(通常の篩分け試験による方法)とほぼ等しい(山本, 1971, 1976)。表層材料はほぼ粒径2cm以上の礫からなり, 2～8cmのものが10～14%, 8～30cmのものが50～70%, 30～100cmの巨礫が0～20%であり, 10～30cmの大礫が目立つ。2cm以下の小礫は流され表層には存在せず, 中礫(平均6cm)が, 大礫(平均20cm)と巨礫(平均65cm)の間に20～30%存在する。



写真3.2.1 褐色を示す凝灰岩(余笹川4.8km)
(2009年(平成21)5月撮影)



写真3.2.2 表面にスレーキングが生じている火山礫
凝灰岩(余笹川10.9km)
(2009年(平成21)5月撮影)



写真3.2.3 巨礫を含む火山礫凝灰岩
(余笹川11.7km)
(2009年(平成21)5月撮影)



写真3.2.4 堆積岩(砂岩泥岩互層)
(余笹川2.4km)
(2009年(平成21)5月撮影)影



a) 四ッ川 1.32km



b) 四ッ川 0.10km



c) 余笹川 14.66km



d) 余笹川 2.66km



e) 余笹川 5.12km



f) 余笹川 1.14km

写真3.2.5 河床材料調査位置の河床状況(2000年(平成12)1月撮影)

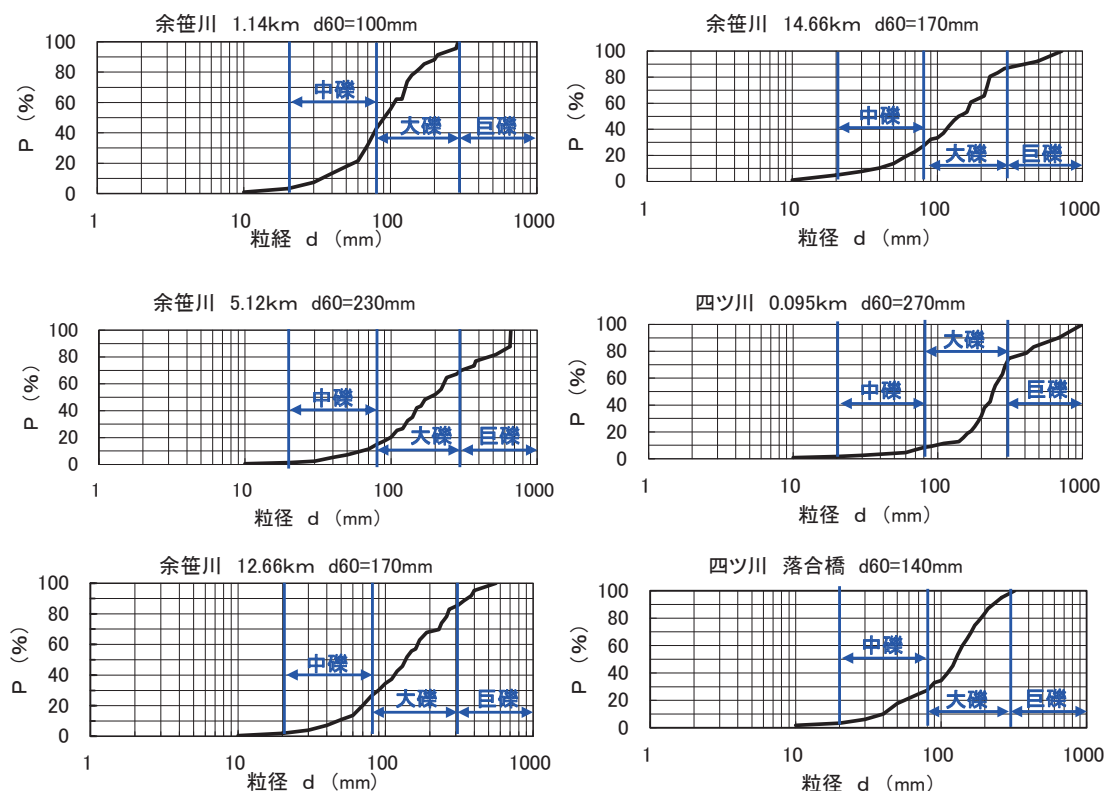


図3.2.4 表層の粒度分布と代表粒径(2000年(平成12)1月調査)

図3.2.5は、須賀他(2000)による洪水後の河岸侵食部(4.4km地点付近)の河岸表層氾濫原堆積物(砂層)、その下の砂礫層、および河床部の粒度分布を示したものであり、河岸上層は細砂、崖部は8～25cmの大礫とそれ以下の礫と砂からなり、河床礫は粒径100cmを超えている。なお河床礫は1mを超え単一粒径の分布曲線となっており、通常の粒度分布曲線とは思えず、測定空間が小さく、そこに径1.3m程度の巨大礫が1個存在していることを示すに過ぎないと判断する。図3.2.6は河床に存在する90パーセント相当礫径の縦断方向変化を示したものである(須賀他, 2000; 伊藤他, 2000)。なお池田の談(2007)によると、粒度分布の測定は実施しておらず、調査地点の最大礫相当とみなされる礫径を90%径としている。洪水後において粒径が100cmから400cm近い巨大礫が河床に点在していたのである。

2001年(平成13)8月、栃木県は、余笹川22箇所、四ツ川3箇所において河道内の土砂の粒度分布調査を実施している。各採取箇所において、1層(表層より20～30cmの間)、2層(20～30cmより40～60cmの間)、3層(40～60cm以下の層)において土砂を採取し篩分け試験を行い粒度分布を求めている。試料採取地点は、河床表面に水の無い地点(砂州部、河岸寄りが多く、堆積傾向にある場所の堆積物であると推定される)、試料採取地点近傍に重機搬入坂路が存在する地点としている。なお採取地点の写真によると巨礫が存在しない地点である。掘削はバケットで長さ1～2m程度の溝を掘り、四分法により採取した材料の1/4程度の35～60kg(約30cm四方)をふるい分け、粒度分布を求めている。河床表層は工事により整正された(細粒物質の露出)後に流水にさらされた地点である。その結果の一部を図3.2.7に示す。1層は表層材料も含むので10cm以上の材料が含まれるが、3層(60cmより下)は、ほとんどが10cm以下の材料の礫と砂からなっている。これより表層下60～100cmの層においては10cm以上の粒径がほとんど存在し

ないといえる。1m以下の層については不明である。図3.2.5の崖部（氾濫原表層堆積物下の礫層）において10cm以上の粒径を除いた場合の粒度分布と似ている。滞筋部でない所の掃流堆積物と判断される。なおヒヤリングによると、災害復旧工事における河床および河岸付近の氾濫原の掘削時に巨礫および巨大礫が多々出現した（全ての改修区間で出現したものではない）。

これらの資料より余笹川の河床材料および流送材料の粒径集団は、シルト・粘土集団、砂集団（0.2～2mm、平均0.6mm）、小礫集団（0.2～2cm）、中礫集団（2～8cm、平均5cm）、大礫集団（8～30cm、平均19cm）、巨礫集団（30～100cm、平均65cm）、巨大礫集団（100～400cm）からなると判断される（礫集団のネーミングは、日本で使われている通称を参考としたが、余笹川の河道特性分析のために便宜的に付けたものであり、本論でしか使用しないものとする）。

洪水後の余笹川河床表層材料のA'集団は大礫集団、A''団は中礫集団、C集団は巨礫および巨大礫集団とみなされる（⇒注2）

巨礫および巨大礫は角の磨耗度が小さく角ばっており、河川流水によって運ばれてきたものではない。河川侵食崖の岩屑なだれ堆積物中の巨大礫、巨礫が河川に落ち、あるいは下刻中に露出したものと推定される。余笹川の河床表層材料の巨礫および巨大礫は、沖積谷形成期に取れ残されたchannel lag deposit といえよう。

2001年（平成13）の河床材料調査結果では、河床表層下60cmにおいて巨礫集団が存在せず、大礫集団の存在割合も小さい。図3.2.5に示す河岸侵食部の崖堆積物も20cm以下の材料からなり、かつ中礫成分以下が80パーセントを占める。湾曲部外岸の河岸侵食後、主流部より河床高が高い湾曲部内岸側に堆積する材料（中礫集団）がこの粒度成分に相当するのであろう。

湾曲部内湾側では小出水により運ばれた小礫や砂集団がマトリックスとして堆積し、草本やヤナギなどの木本類も侵入し、さらに堆積速度が増加される。そこの流速が2～3m/sとなるような中出水では、草本や樹木とともに小礫以下の成分が流され中礫が堆積し、中礫成分を主体とした河岸が形成されるのである。大洪水においては、滞筋部に大礫集団以上の粒径成分からなる層厚の薄い礫層が残り、河岸および氾濫原の表層下の主構成粒径集団である中礫が侵食され、川幅が急拡すると推定される。

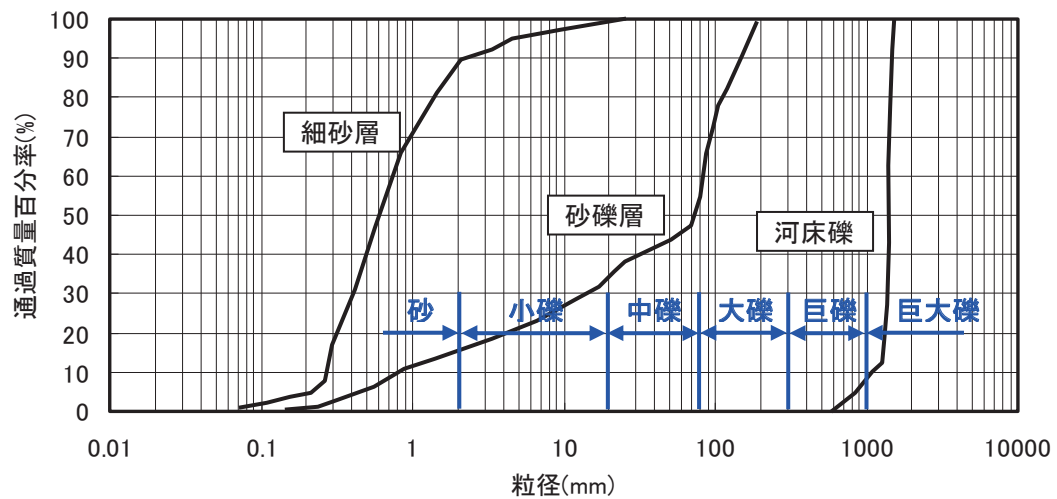


図3.2.5 余笹川4.4km付近の側岸部の粒度分布(須賀他(2000)微改変)

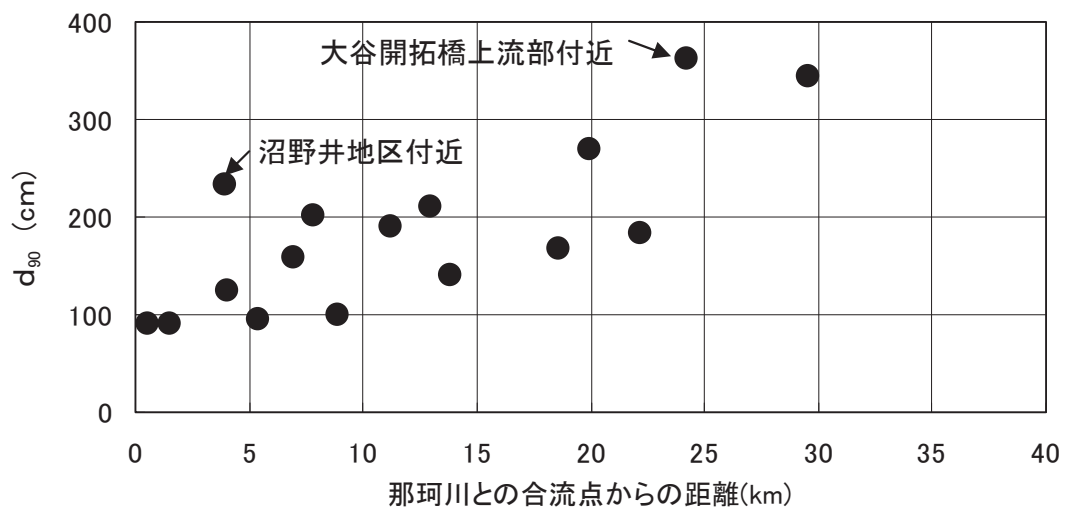


図3.2.6 余笹川の d_{90} の縦断変化(須賀他(2000)を改変)

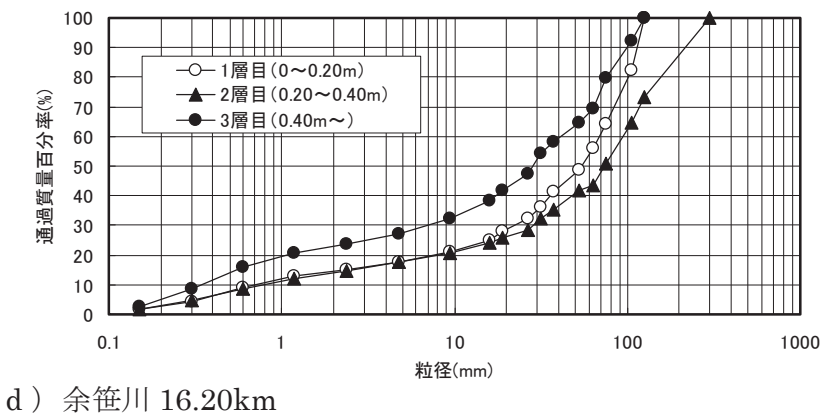
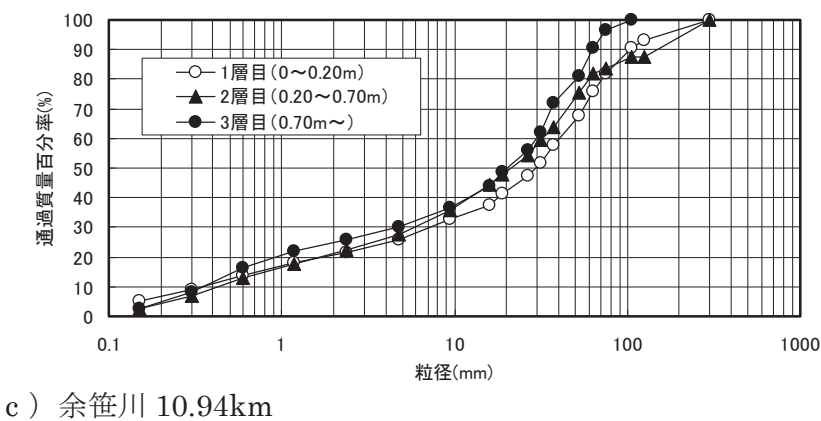
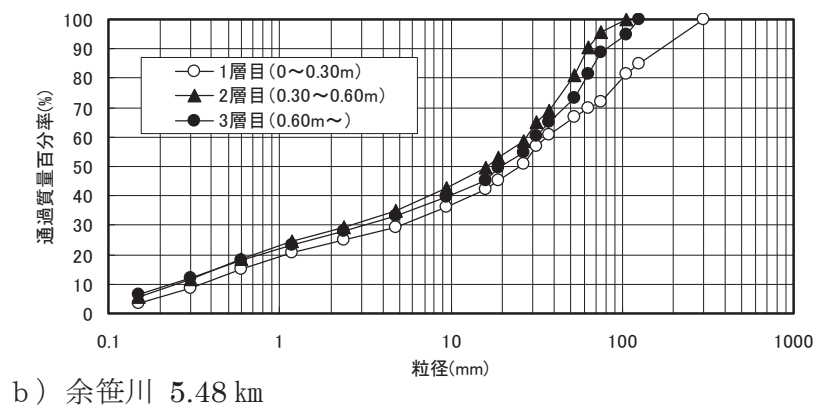
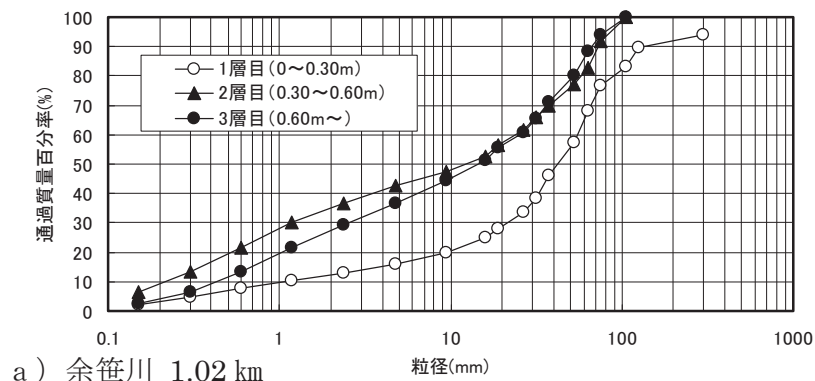


図3.2.7 工事後(流水にさらされた後)の河道内の土砂の粒度分布

メモ1 表層河床材料の測定法と測定されたものの意味

河床に存在する混合砂礫の全粒径が移動するような水理条件であっても河床の表層の粒度分布形と表層下の粒度分布形には違いが生じる。河床材料の中に移動しないものがあり上流からの補給砂もない場合には、河床はアーマリングされ表層は粗粒化する。混合粒径河床材料の移動床の水理特性を把握するためには河床表層材料の粒度分布を測定する必要がある。

実河川の河床材料の粒度分布形は通常表層下の材料を採取し、それをふるい分け、重量を求め、あるふるい目を通した重量を全重量で除した通過累加関数 $F(d_i)$ で表わす。したがって表層の河床材料の粒度分布形は、これと同じ意味を持つ採取測定法によって求めなければならない。

これにかなう採取測定法は、ある粒径 d_i の表層に占める面積支配確率密度累加関数 $S(d_i)$ を求めることである。これは線格子法あるいは面積格子法によって河床表層砂礫を採取し、その個数分布確率密度累加関数 $E(d_i)$ を $S(d_i)$ とすることによって求めることができる（山本, 1971, 1976）。

(4) 川幅

急流である砂利川の川幅の定義は難しい。攪乱頻度の高い水面部および裸地部の幅の和とすると、洪水の発生頻度により植生の侵入状況が異なるので、川幅が変化してしまう。洪水前の河道横断形状図がないので、ここでは以下のようにして川幅を求めた。

被災前：1996年（平成8）撮影の航空写真より兩岸に樹木繁茂する河畔林ライン、護岸ライン基本とし、さらに平面図に示された等標線を参考にして0.25kmピッチで川幅を求めた（山本が同定）。

被災後：河岸が侵食された部分を含む河道幅とする。

改修後：護岸の法尻間の距離とする。

図3.2.8に被災前、被災後、改修後の川幅の縦断方向変化を示す。改修後の川幅は災害前の1.5～2倍となった。

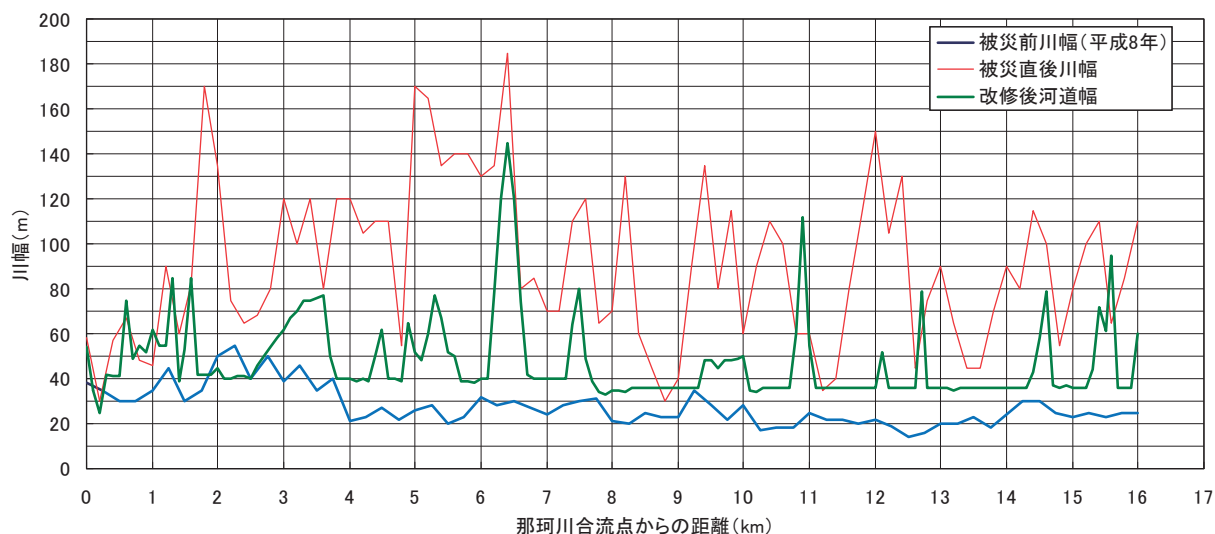


図3.2.8 被災前・被災後・改修後の川幅縦断面図

(5) 水深と掃流力

前記の河道特性量を用いて、余笹川の小セグメント毎に平均年最大流量時の平均的な水深と掃流力を評価すると表3.2.1のようになる。水深は上流のセグメントから、1.87m、2.09m、2.65mである。なお少ない実測横断形状から判断すると(須賀他, 2000)、河岸高相当の水深はセグメント1-③の最上流で2.7m程度、セグメント余1-②の最下流部で2m程度である。ほぼ評価結果の水深と同程度である。

表 3.2.1 余笹川河道特性量総括表(復旧前河道)

セグメント	Q_m (m^3/s)	I_b	B (m)	ϕ	H (m)	u_*^2 (cm^2/s^2)	τ_{*65}	τ_{*19}	τ_{*5}
余-①	190	1/100	25	9	1.87	1829	0.0170	0.059	0.20
余-②	190	1/120	25	9	2.09	1706	0.0162	0.056	0.21
余-③	440	1/155	40	10	2.65	1695	0.0160	0.055	0.21

河岸満杯時の u_*^2 は、セグメント余-①で $1,827cm^2/s^2$ 、セグメント余-②で $1,706cm^2/s^2$ 、セグメント余-③で $1,695cm^2/s^2$ である。

平均年最大流量程度の洪水に対して、大礫集団(A'集団, 19cm)は移動限界に近い掃流状態($\tau_{*19}=0.055 \sim 0.053$)、巨礫集団(C集団65cm)は動かない状態($\tau_{*65}=0.017 \sim 0.016$)であるが大礫集団中に孤立・散在した形で存在すれば移動する。巨大礫集団は動かない(⇒注4)。

余笹川の河道の河積および川幅を決めている代表粒径 d_R は、大礫集団と中礫集団の混在物であり15cm程度(河岸満杯流量時の代表粒径に対する無次元掃流力 τ_{*d_R} は0.072程度)であろう。中礫集団(5cm)に対する河岸満杯流量時の無次元掃流力 τ_{*5} は0.22～0.145であり、中礫集団は河床の代表粒径であるといえない。大礫および巨礫は滞筋部に存在し、アーマコートを形成し河床低下を防いでいるが、大洪水では河岸材料中に大礫および巨礫が少なく河岸侵食が生じ川幅の

拡大が生じるのである。

平成10年洪水のような大洪水時、4.9km地点の水深4.5m ($u_*^2=4,010\text{cm}^2/\text{s}^2$)、3.6km地点の水深6m ($u_*^2=4,200\text{cm}^2/\text{s}^2$) においては、大礫集団(19cm)に対する無次元掃流力が0.17～0.18であり、巨礫集団(65cm)に対して0.038～0.040、巨大礫集団(200cm)に対して0.009～0.0098程度となる。大礫集団(19cm)は掃流形式で移動し、巨礫集団(65cm)は散在していれば転がり、集合すれば動くか動かないかの移動限界掃流力に近い。巨大礫は孤立して存在すれば動く可能性がある(⇒注5)。この掃流力は、アーマコートを破壊する可能性のある掃流力である。

ところで平成10年洪水はアーマコートを破壊したのだろうか。中礫の材料が多い河岸侵食および氾濫原の侵食が生じ川幅が拡大したが、急激な河床低下が生じていないことより、破壊されなかったと判断される。河岸侵食および氾濫原侵食により中礫集団の補給量が急増し、中礫が河床を覆う面積が増えた可能性が高い。たとえ破壊されてもある程度の固結度のある火山砕屑物が露出し急激な河床侵食は生じなかったであろう。

(6) 自然環境特性

余笹川の検討対象区間の自然環境特性について、小セグメント毎に河床勾配、川幅、蛇行特性が多少変わるので、自然環境特性も変わる。大きくは表3.2.2の余笹川0～3.6km、その上流3.6～16km、四ッ川の3つに区分できる。

各環境区分における特徴的な河岸風景を写真3.2.6に示す。

表 3.2.2 河川環境区分とその特徴

河川環境区分	河川環境の特徴								
	河床勾配	河床材料	河川形態	淵	砂州	河岸の地形	植生	社会環境	主な生息魚類
余笹川 0～3.6km (那珂川合流点～黒川合流点)	1/200	$d_{60}=100\text{mm}$	Aa - Bb 移行型	M型淵が多い	砂州の発生する区間と無発生区間あり	山地・丘陵	河畔林が多い	集落が多く、周辺は水田	ウグイ ヤマメ カワムツ
余笹川 3.6～16km (黒川合流点～四ッ川合流点)	1/60～1/150	$d_{60}=170\sim 230\text{mm}$				沖積低地			
四ッ川	1/34～1/130	$d_{60}=140\sim 270\text{mm}$	Aa II型	S型・M型淵が多い	少ない	山地・丘陵		集落がほとんど無い	



a) 余笹川 0 ～ 3.6km区間



b) 余笹川 3.6 ～ 16.0km区間



c) 四ツ川

写真3.2.6 河川環境区分の特徴的な環境要素(復旧工事後)

3.3 河道特性のまとめ

余笹川は河床や河岸に分布する土質・地質が河川流水で運ばれた河床材料と異なり、それが河道形状（縦断形状，平面形状）を規定する重要な要因になっている。さらに山地に近い侵食性の河道であるため、河床表層がアーマ化され、河岸侵食や河床高の変化に影響を与えている。

その特徴を再整理すると以下ようになる。

- ① 山脚が近接し、沖積谷幅が狭く、河床・河岸に岩屑なだれ堆積物が露出する部分が多い。2008年（平成20）時点において、セグメント余-③の下流部は花崗岩、八溝山地の砂岩・シルト岩・頁岩、新第三紀の泥岩砂岩が露出している。
- ② 沖積層（未固結の河床材料）は、層厚が薄い。沖積層の部分の河岸物質は中礫がメイン集団をなっている。
- ③ 河床および河岸の地質により侵食抵抗が大きく異なる。
- ④ 大洪水時には、河岸の側方侵食および氾濫原侵食により土砂が供給される。また、大規模な洪水により、河岸が侵食される場合には、大量の流木が発生する。
- ⑤ 河床勾配が大きく、掃流力大きい。
- ⑥ 河床の巨礫・巨大礫の大部分は、上流から河川の運搬作用によってもたらされたと考えるより、段丘を構成する岩屑なだれ堆積物に含まれていたものが侵食を受けて河道内に転げ落ちた

ものと推定される。巨礫と巨大礫は、河床に取り残された channel lag deposit であり、アーマコートを形成し河道の安定に貢献している。図3.3.1に河岸に河道が寄った場所のイメージを示す。

- ⑦ 余笹川沖積谷における蛇行形状には2つのモードがある。ひとつは、1998年（平成10）洪水のような確率規模の大きい洪水（確率規模1/50～1/150程度）によるもので、谷壁の平面形状に規制された氾濫水の流向、侵食による実質川幅の増大に対応した800～1500mの波長を持つものと、もうひとつのモードは確率規模が数年の洪水に対応した被災前川幅の10～15倍程度の交互砂州に起因するものである。後者は大蛇行と共存するが、砂州に対応する河道の曲がりが多く、また直線状の河道のままの区間が多い。なお、1909年（明治42）に作成された地図による河道平面形状と被災前の河道位置とを比較すると（上野，2005），大蛇行の形状に大きな変化が無く、小蛇行の発達も小さい。

大洪水時には、沖積面にあふれ出た主流が沖積谷の平面形状に対応したものとなり、かつ沖積平坦面表層下の中礫を侵食するほどの掃流力を持ち、河岸侵食と合わせて川幅が急増する。その後、通常の出水による主流部の河床低下を伴いつつ巨礫のアーマ化と水裏河岸への中礫以下の土砂堆積により川幅が縮小する。余笹川の河道はアーマ化されつつ形成された河道であるので砂州は発生しにくい（侵食性の河道は砂州が発生しにくく、かつアーマ化されると砂州は消滅してしまう）。さらに平均年最大流量時の川幅水深比は15～20程度であり、直線河道であれば砂州が形成されるが砂州高が小さい河道であり（山本，2004b），その上河岸満杯流量程度では移動しない河川侵食崖の岩屑なだれ堆積物である巨礫・巨大礫が存在するので、自らの川幅に対応した蛇行形状の発達が悪く、大局的には大洪水時の滞筋が河道の位置となったと推察される。

大蛇行は急拡した川幅の残像（大洪水時の川幅が広がり中礫集団の供給により河床上昇傾向にある河道）である。小蛇行は多少堆積傾向を持つ区間に生じた不明瞭な砂州に起因すると解釈される。

- ⑧ 穿入河道の区間の蛇行波長は、川幅に対応したものとなっている。大洪水時においても川幅があまり変わらず、水衝部位置が安定しているのである。

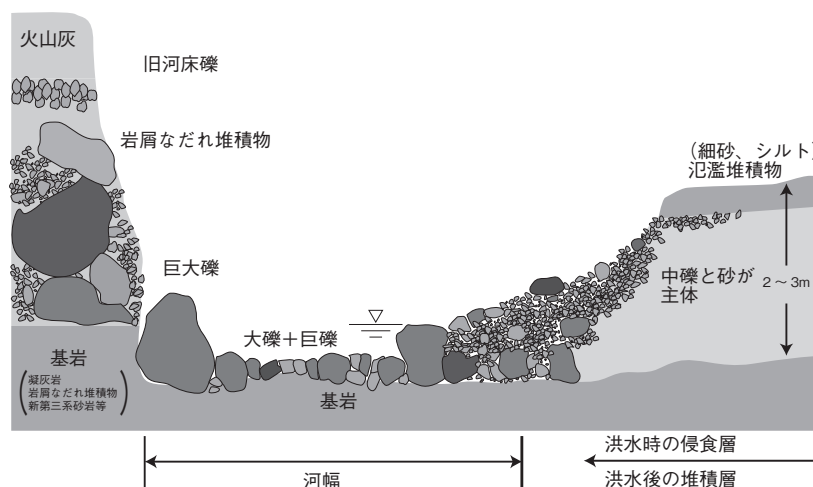


図3.3.1 河岸に河道が寄った場所のイメージ図

メモ2 砂防区間の流路工工事後の砂州形状

1996年（平成8）時点において、16km上流の5.4km区間は砂防事業として流路工の工事が進行中であった。航空写真によると国道4号が通過する余笹橋上流0.2～0.5kmには3基の流路工が完成し、そこには前縁線の不明瞭な多列砂州が形成されていた。砂州の列数は3列程度である。この地点の河床勾配は1/70、川幅70mである。勾配が急であり、また形成初期のものであるので、うろこ状の砂州幅 $B_s=25\text{m}$ を水深の40倍程度とすると（山本，2004），砂州を形成した水深は0.62m程度となる。この水深時の u_*^2 は $864\text{cm}^2/\text{s}^2$ となる。この掃流力に対して、中礫集団では無次元掃流力 τ_* が0.089であり動ける集団である。大礫集団（20cm）は分散していれば移動するが、集まると移動し得ない。流路工の施工途上であり河床を平坦化した後に形成された砂州であり、河床下の中礫集団が表層に露出し、これがメイン集団となり砂州が形成されたのであろう。なおこの水深時の流量は $102\text{m}^3/\text{s}$ と評価され（ $\phi=8$ とした），平均年最大流量と推定される $100\text{m}^3/\text{s}$ に近い。

1998年（平成10）の洪水後は河道平面形状に対応した単列砂州となっている。

4. 1998年（平成10）8月出水と被災

4.1 降雨特性と出水状況

1998年（平成10）8月26日から31日にかけて、前線が日本付近に停滞したところに、台風4号が日本の南海上をゆっくり北上し、前線を刺激した結果、栃木県と福島県の県境付近は断続的な豪雨に見舞われ、河川の氾濫や土砂崩れなどにより大きな被害が発生した。栃木県那須町では図4.1.1に示すように総雨量が1,254mmに達した。図4.1.2に総降水量の分布を示す。

余笹川では顕著なピークは27日早朝、27日夜、27日深夜および29日深夜にあり、概ね4山の洪水となった。

流域平均雨量を示すと表4.1.1の様である。また余笹川沓掛観測所（黒川合流後、流域面積290km²）では観測機器が濁流に飲まれ、観測不能に陥ったが、痕跡水位より最大水位は推定6.3mに達し（平水位0.2m）、流出解析等により最大流量は2,720m³/s（比流量9.37m³/s/km²）と推定されている。また中余笹橋（流域面積133.43km²、セグメント余1－②）で1,721m³/s（比流量12.8m³/s/km²）と推定されている。

伊藤他（2000）は横断測量と痕跡水位の調査を11地点で行い等流計算によりピーク流量を推算し、図4.1.3を得ている。比流量は、セグメント余1－①および②で12～13m³/s/km²、セグメント余1－③で8m³/s/km²程度と評価されている。

一連の総降水量は平均年総降雨量の約1/3に達し異常なものであったが、余笹川の流域面積は小さく洪水到達時間が2時間程度であるので、2から3時間降雨量が洪水ピーク流量をもたらす。比流量から推定すると1/100年確率程度の洪水であったと推定される。

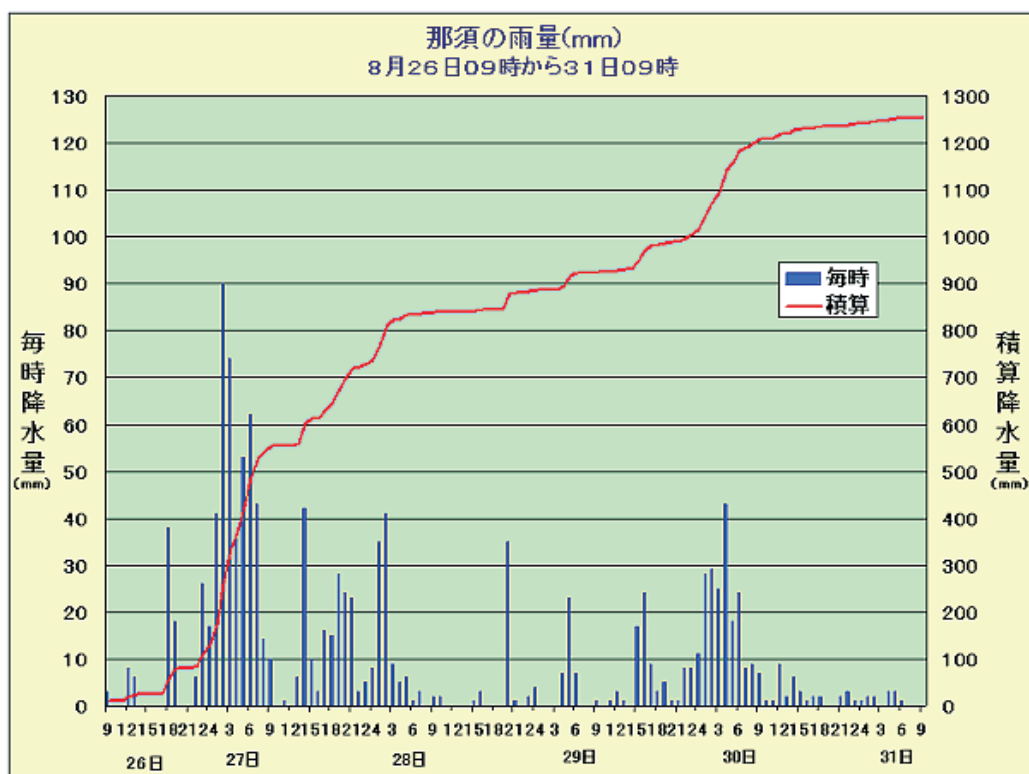


図4.1.1 那須観測所の降水量の変化

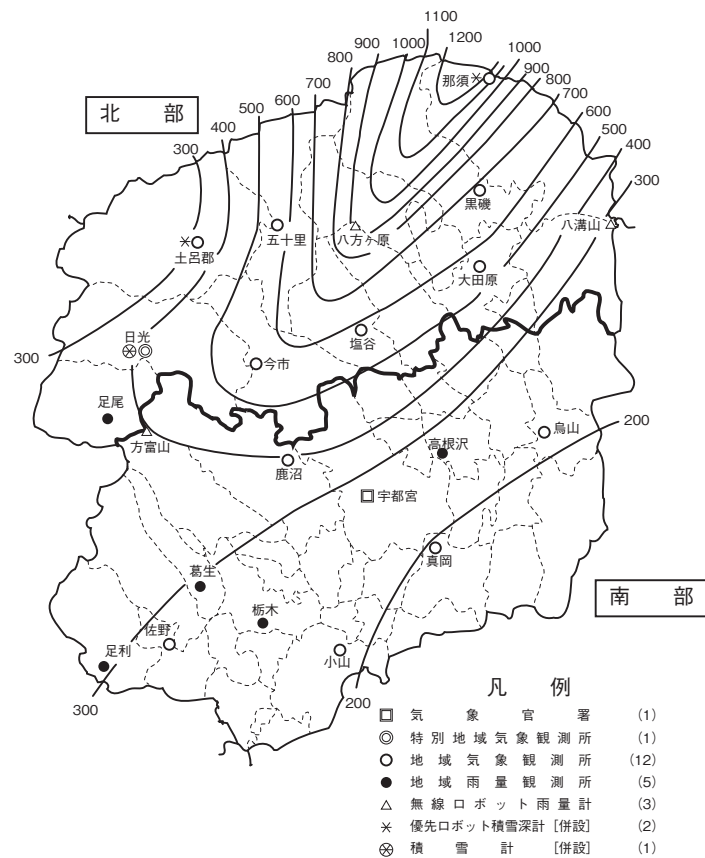


図4.1.2 平成10年8月洪水の総雨量の等雨量線図(栃木県(2003))

表 4.1.1 平成10年8月洪水の流域平均雨量，観測所雨量（栃木県（2003））

	余笹川 黒川合流点	黒川 三蔵川合流点	那珂川 余笹川合流点	那須観測所
48時間連続雨量 (mm)	677.5	644.4	565.6	830
2日最大雨量 (mm)	676.2	643.4	564.5	829
日最大雨量 (mm)	368.6	325.8	295.3	535
時間最大雨量 (mm)	52.7	43.9	39.2	90

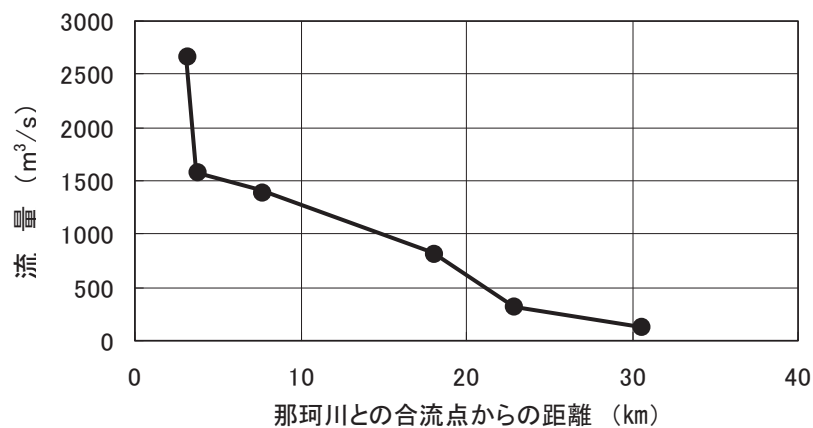


図4.1.3 平成10年8月洪水のピーク流量縦断面図(伊藤他(2003)微改変)

4.2 被災状況と形態

1998年（平成10）8月洪水前の余笹川の治水事業は、災害復旧事業や県単独事業による局部的かつ小規模な河川整備が実施されてきたが、一定計画に基づく一連の河川改修は特に実施されなかった。ただし0～17km（東北本線）までの河岸には、崖線を除き、橋梁や河川横断構造物周辺、河岸侵食が生じた所に護岸が敷設されていた。ここに、豪雨が襲ったのである。

家屋の被災状況および田畑の被害状況は表4.2.1、表4.2.2のごとくである。人的被害と建物被害は表4.2.3のごとくである。橋、道路、鉄道、河川施設も多大の被害を受けた。公共土木施設の被害額は余笹川流域で447億円に上った。

表 4.2.1 平成 10 年 8 月洪水による家屋被害状況（栃木県（2003））

河川	一般家屋被害（戸）					事業所・公共施設（戸）				
	全壊	流失	半壊	床上	床下	全壊	流失	半壊	床上	床下
余笹川	4	16	16	32	49	1	3	1	9	2
黒 川	2	1	1	110	102	0	0	0	8	6
四ッ川	4	0	2	32	12	0	0	2	1	1
計	10	17	19	174	163	1	3	3	18	9

表 4.2.2 平成 10 年 8 月洪水による田畑被害状況（栃木県（2003））

河 川	浸水面積（ha）			
	浸水深 0～0.5m	浸水深 0.5～1.0m	浸水深 1.0～1.5m	合計
余笹川	14.0	38.6	82.2	134.8
黒 川	5.5	100.0	139.5	245.0
四ッ川	3.6	8.3	10.4	22.3
計	23.1	146.9	232.1	402.1

表 4.2.3 平成 10 年 8 月洪水による人的被害、建物被害状況（栃木県（2003））

			余笹川流域
人的被害	死者		4 名
	行方不明		2 名
	負傷者		19 名
建物被害	住家	全壊家屋	10 棟
		半壊家屋	19 棟
		流失家屋	17 棟
		床上浸水	174 棟
		床下浸水	163 棟
		一部破損	—
	非住家被害		34 棟
田畑流失・土砂流入			402ha

栃木県(2003)の報告より余笹川の被害状況を概説する。なお被災状況を分類すると、次の3タイプとなる(栃木県:2003)。

タイプ1: 橋梁断面が流下物の付着により閉塞し、堰上げられた洪水水が橋の左右岸へ氾濫し、周辺家屋に被害を与え、また氾濫水により橋の取り付け道路および低水護岸が侵食され、河岸決壊や橋の流出となるタイプ

タイプ2: 河川の流下能力不足により、洪水水が氾濫し、家屋および耕地の浸水や流送土砂による家屋の埋没・倒壊・流出、耕地の侵食破壊・埋没となるタイプ

タイプ3: 洪水の高速流に伴う河岸の側方侵食による家屋の倒壊・流出および耕地の破壊となるタイプ

以下に小セグメント毎に被害状況の特徴を記す。

①四ツ川

下流の国道4号付近では流下能力不足により氾濫し、周辺家屋が浸水している。東北自動車道橋梁では、流下能力を大きく超えた洪水が自動車道路盛土にさえぎられ広く氾濫し、河道の左岸に位置する道路上を流れた痕跡がある。また道路盛土の一部が侵食された。

四ツ川支川多羅沢川では別荘地を高速流が流れ被災した。

②余笹川上流(セグメント余1-①の上流:国道4号から高津橋)

余笹橋(国道4号)ではタイプ1の被災より橋の流出、左岸の河岸の侵食により家屋の流出、全半壊を生じた。

砂防区間の河床勾配は1/70、川幅約60～80mで流路工(床止め工は約200m間隔設置)が整備されていた。この整備区間ではほとんど被害が生じなかった。河道沿いには家屋が少なく、一部水田が存在していた。この河道整備により、この区間は被害がほとんど見られず、一部高津橋下流左岸の別荘一戸が流出した。耕地の冠水は生じなかった。

③余笹川中流(セグメント余1-①および1-②)

この区間は河床勾配1/110、川幅約20～40mで、沖積低地は水田に利用されていた。低水護岸の整備が比較的行われていた区間であった。家屋の多くは橋の付近に集中していた。

この区間の被害は、タイプ1およびタイプ2に相当している。下流より余笹橋(国道294号)、協和橋、寺子橋、石堀子橋、下川橋、下余笹橋、中余笹橋のいずれも取り付け道路が流出した。家屋被害も橋の周辺に集中した。

高速流により護岸の流出被害、河岸侵食および高速流による新水路の形成などにより耕地が流出し、また流出した土砂が氾濫原に堆積した。痕跡より洪水流下幅は通常の10倍(原文献を修正)、約250mにもなり、水田地帯は河原化してしまった。

河道部の水深は平均4～5mであった。

④余笹川下流(セグメント余1-③)

この区間の河道は無堤の穿入河道で蛇行して流れ、河道幅約30～50m程度で、段丘との比高差は、下流部で10数mあり、集落のほとんどがこの段丘上にある。

合流点直上流の旧川田橋は左右岸が岩盤であり、侵食されなかったが、大量の流下物が、橋桁、高欄に付着し一時不通となった。

稲沢地区の蛇行部を洪水が流下し、この位置にあった牛舎等が流出、床上浸水した。また低位

段丘面にあった耕地の一部が侵食された。

河道部の水深は川田橋付近で10m、平均6～7mであった。

上流山地においては一次谷の崩壊は多くは無かった。流路工敷設区間の上流で河岸侵食や迂回路が形成され、流木化した樹木の堆積により砂防区間に設置されていた橋梁に被害が生じた。

4.3 河道および沖積地地形の変化

本洪水による河道および沖積低地の変化の特徴は、河岸侵食および氾濫水による高流速によって氾濫原（水田、樹林等）を侵食し、新水路が生じたことである。

須賀他（2000）は余笹川の侵食幅を河岸侵食と新水路形成によるものに分け、**図4.3.1**のようにまとめている。15kmより下流において侵食幅が60mを超えた箇所では氾濫原が侵食され新水路が形成されている。河岸侵食幅は40m程度以下である。なお15～16kmでは河岸侵食幅が60mと大きい。

氾濫原上の水深は0～1.5mに達している。水深1mで2.5～3m/s、1.5mで3～4m/sの流速になったと推定される。流速が2m/sを超えれば地表面が侵食される可能性が高く、新水路を形成する十分な掃流力があつた。

4.4 樹林の変化

須賀他（2000）によると河岸侵食および新水路の形成により、耕地および樹林が破壊された。0～25km区間で0.41km²の樹林が流出した。なお余笹川の沖積地面積は8.56km²で樹林地面積は2.68km²と評価されている。河川沿いの樹林（河畔林）は栗、松、コナラが多い。これらが河岸侵食および新水路の出現により流出した。

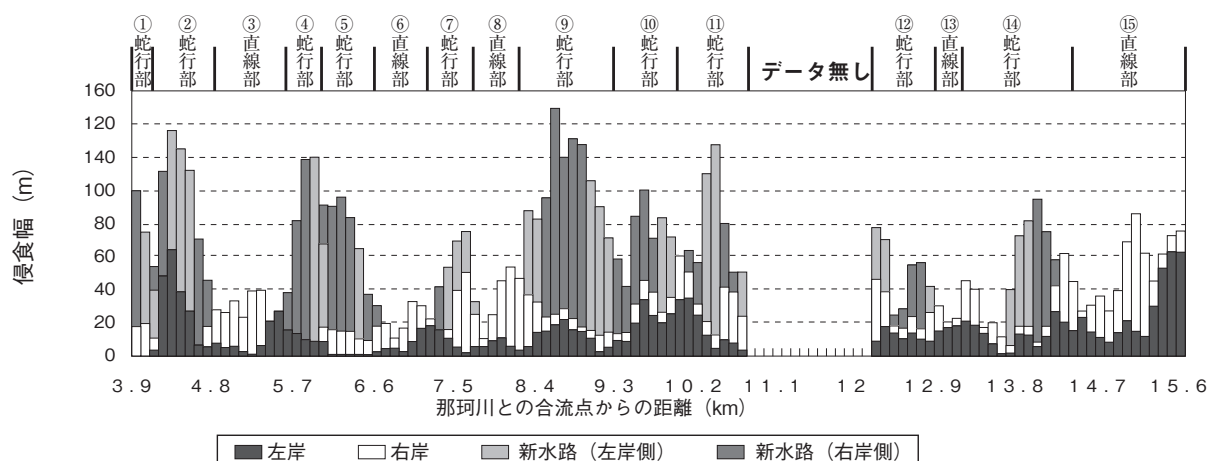


図4.3.1 侵食幅の分類(河岸侵食と新水路形成) (須賀他, 2000)

5. 災害復旧計画と工事

5.1 災害復旧事業の流れ

災害復旧事業は、被災の状況や被災原因により、災害復旧事業（原形復旧）と改良復旧事業に大別される。災害復旧事業の種類によって異なるが、被災から復旧工事実施までの間に、被害調査、被災原因の究明、復旧方針の設定、復旧計画（河道計画、施設計画）の策定、現地調査（査定）、全体計画（整備計画）の策定及びこれに伴う関連機関との協議や用地の取得等を短期間に実施する必要がある。

図5.1.1に1998年（平成10）8月末豪雨で被災した余笹川における災害発生から改良復旧事業実施までの流れを示す。余笹川では、1998年8月26日～8月31日にかけて災害が発生したが、11月30日～12月4日に行われた災害査定までの約3ヶ月の間に復旧計画と計画策定に必要な調査・検討が行われている。

また、災害復旧工事は、余笹川3年、黒川5年、四ッ川4年で実施された。それぞれの河川の事業対象延長は、16.0km、28.9km、7.25kmである。

5.2 災害復旧事業の概要

1998年（平成10）8月末豪雨による余笹川の被害は甚大なものであった。

この甚大な被害に対して、災害復旧（原則現状復帰）では十分な効果を期待できないため、上下流と整合を図り改良復旧整備を行うこととなった。被害が激甚であったことから一定計画による災害復旧（一定災）で実施した。一定災とは、公共土木施設災害負担法により、河川等が広範囲にわたって被災し、その被災の程度が激甚であり、原形に復旧することが著しく不適当な場合においては災害を発生させた洪水を対象規模として、被災していない区間を含め、その全区間について全額災害復旧費で改良復旧を行うことができる制度である。栃木県では初めてこの制度が適用された。

計画区間は、那珂川合流点から砂防区間下流地点である四ッ川合流点上流までの16.0kmである。

四ッ川は災害復旧助成事業として実施され、計画区間は四ッ川橋上流山付きまでの7.25km区間である。

(1) 計画規模

余笹川は今回の災害により多大の被害を被っていることから、災害流量を対象とすることが考えられたが、降雨規模から考えると過大な計画となり、水系のバランスが図れなくなること、流域規模、氾濫区域内の資産、人口規模等を総合的に配慮し、1/50の計画規模とした。

(2) 計画高水流量

余笹川流域について、支川流入を考慮し、24の小流域に分割し、計画波形群の12波形を2日雨量で1/50年確率に引き伸ばし、下流那珂川本川小口地点における基本高水のピーク流量5,600 m^3/s との整合を図り、カバー率80%として各地点の計画洪水流量を設定した。計画対象降雨は1/50年確率、2日雨量248mmである。

基準点（川田橋）における計画高水流量は、図5.2.1に示すように1,400 m^3/s であり、比流量では4.08 $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ となる。平成10年洪水の推定ピーク流量の約半分である。

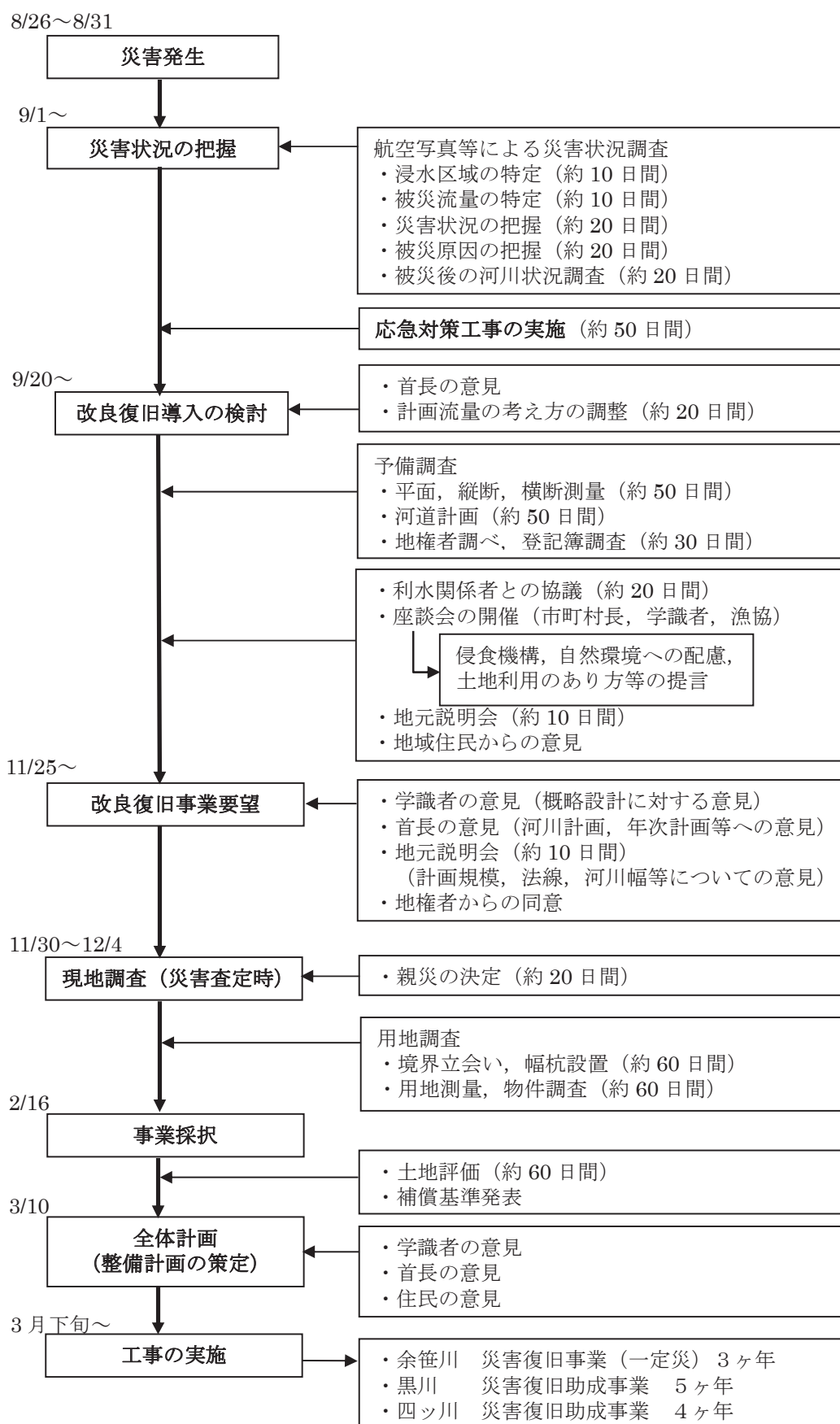


図5.1.1 災害復旧の流れ 平成10年8月末豪雨 余笹川流域災害復旧事業
(栃木県(2003)に基づき作成)

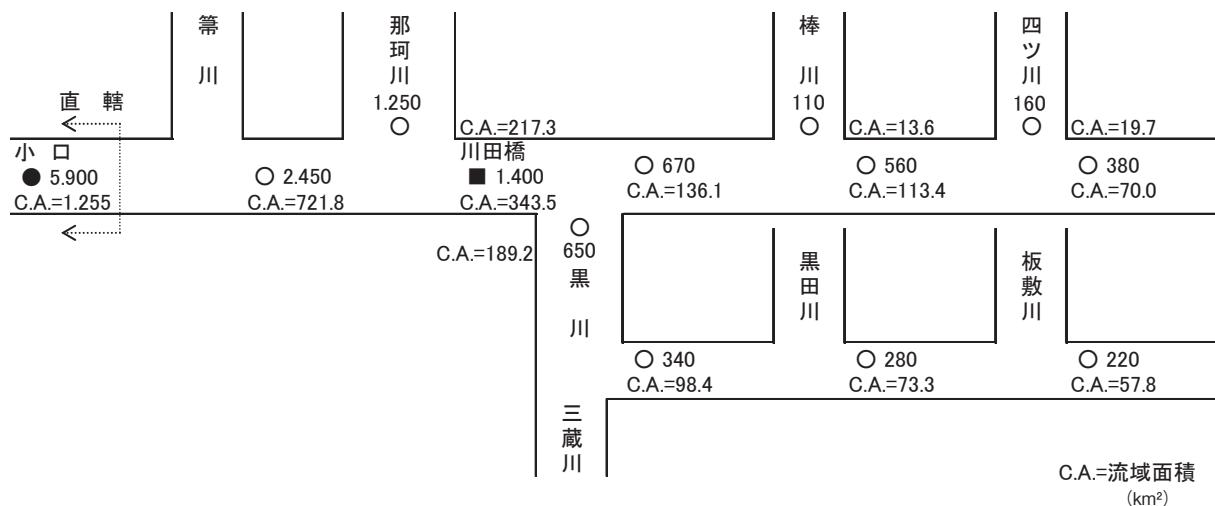


図5.2.1 計画流量配分図(単位 m^3/s) (栃木県(2003))

(3) 河道計画の基本方針

計画の策定には、次の基本方針が採られた。

[平面計画]

- ・ 平面線形は旧河道を原則とするが、洪水後の変動河道にも合わせた河道とする。
- ・ 特に河道が蛇行している箇所については、今回の洪水による河道の変動を考慮して、ショートカットを検討する。
- ・ 上流部の15.8kmから16kmの区間においては、上流部砂防計画断面（土砂混入量を見込んだ計画断面）に合わせ、緩和区間を設けた法線形とする。
- ・ 崖堆地、屈曲部などについては、法線形の円滑を図るとともに、山付き部については極力保全する。
- ・ 従来、地域住民がキャンプ、釣り場などに利用していた場所の保全について配慮する。

[縦断計画]

- ・ 現況の河道勾配を尊重する。
- ・ 計画高水位は後背地盤高と同等とし掘込河道とする。
- ・ 床止工は取水が必要となる箇所以外は極力設置しない。
- ・ 支川や水路との生態系の連続性について考慮する。

[横断計画]

- ・ 縦断計画（勾配）の異なる区間毎に代表断面形状を設定する。
- ・ 掘込河道を原則とする。
- ・ 被災前の川幅を参照し低々水路を設けるものとする。なお帯工の水通しについても切り込みを設け、低々水路とする。
- ・ 被災前の川幅が計画より広い場合は、その川幅を尊重する。
- ・ 岩盤が露出している箇所については、環境保全、景観を考慮した計画とする。
- ・ 護岸は極力自然石護岸とする。

(4) 施設計画

施設設計の基本方針，具体的施設形状については，栃木県（2003）を参照されたい。

(5) 改修工事業費

余笹川の災害復旧事業費は，採択で285億円，実施費で236億円であり，四ツ川は，採択で38.6億円，実施費で36.4億円であった。

工事は余笹川については2000年度（平成12），四ツ川については2001年度（平成13）で完了した。

2000年（平成12）時点での，余笹川の改修計画の平面計画，床止工の位置，護岸の位置とタイプなどの計画と河道内の砂州状況，周辺の樹林状況などの河道特性を図表化した。一部を図5.2.2に示す。これにより改修という人為的インパクトが加えられた後の初期状況が読み取れる。図5.2.3には改修計画の河道縦断形を示す。

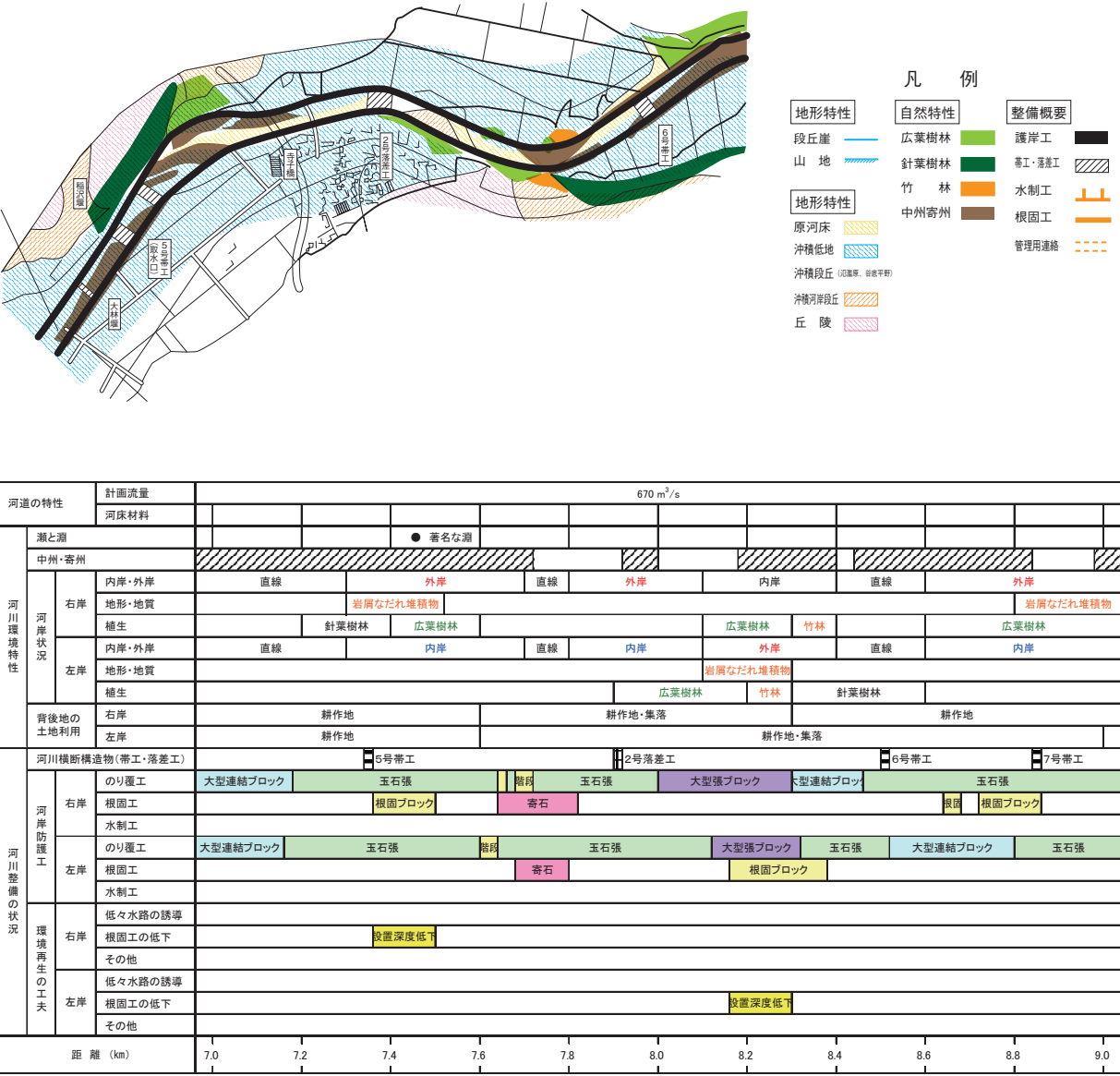


図5.2.2 改修計画と河道特性, 河川環境特性の図化例

6 工事中・後の河道・環境特性の変化

6.1 災害後の降雨・洪水

余笹川・四ツ川の災害復旧は2001年（平成13）10月に竣工した。表6.1.1に、その後の河道の変化を生じさせる洪水攪乱の履歴と洪水規模を図6.1.1に1998年（平成10）以降の那須観測所における降雨状況を月ごとの日最大雨量の時系列にて示す。

降雨あたり総雨量が最も多かったのは2002年（平成14）7月洪水で総雨量が396mm、1時間最大雨量が29mmであった。

表 6.1.1 災害復旧完了後の洪水攪乱履歴

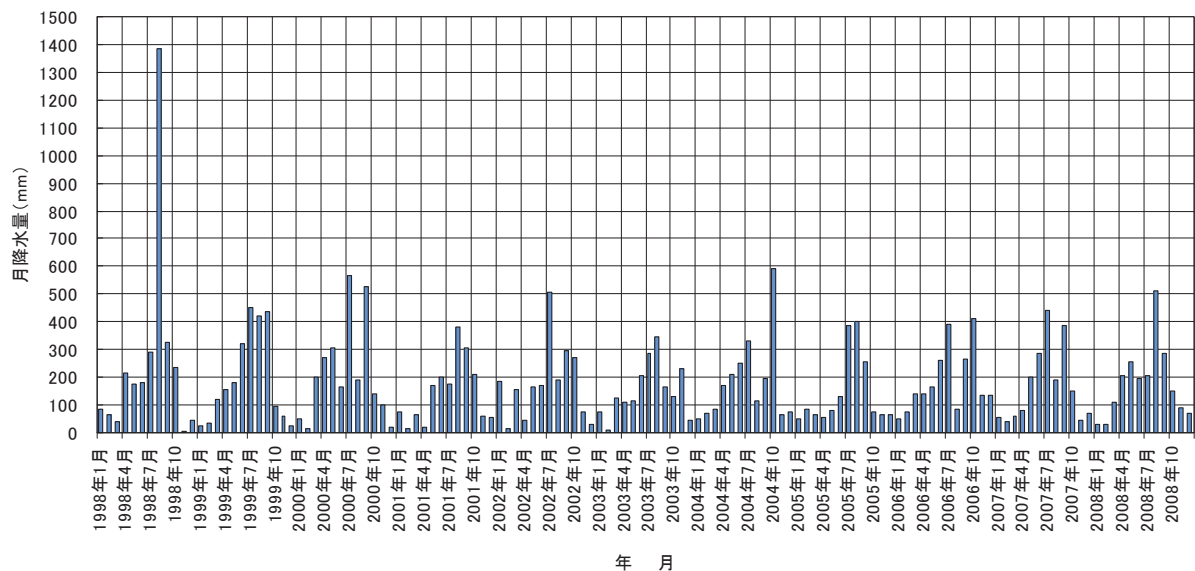
年	観測所 ^{#2)}	発生日時	年最高水位 (m) ^{#3)}	年最大流量 (m ³ /s) ^{#4)}	降雨量（那須観測所）		降雨原因
					総雨量(mm)	時間最大雨量 (mm)	
平成 13 年 (2001)	中余笹橋	—	—	—	223	18	台風 15 号
	稲沢陸橋	9 月 11 日 8 時	1.31	400			
平成 14 年 (2002)	中余笹橋	7 月 11 日 5 時	1.81	260	396	29	台風 6 号
	稲沢陸橋	7 月 11 日 5 時	2.16	520			
平成 15 年 (2003)	中余笹橋	9 月 11 日 19 時	0.46	20	13	6	—
	稲沢陸橋	9 月 11 日 20 時	0.96	110			
平成 16 年 (2004)	中余笹橋	—	—	—	181	18	台風 23 号
	稲沢陸橋	10 月 20 日 24 時	1.42	250			
平成 17 年 (2005)	中余笹橋	7 月 30 日 19 時	0.65	60	134	12	台風 7 号
	稲沢陸橋	7 月 27 日 24 時	0.52	40			
平成 18 年 (2006)	中余笹橋	—	—	—	106	9	前線
	稲沢陸橋	6 月 16 日 11 時	1.20	200			
平成 19 年 (2007)	中余笹橋	9 月 7 日 13 時	0.93	130	196	36	台風 9 号
	稲沢陸橋	9 月 7 日 14 時	1.31	240			
平成 20 年 (2008)	中余笹橋	8 月 5 日 23 時	0.83	120	116	39	前線
	稲沢陸橋	8 月 5 日 24 時	1.30	230			

#1) 水位、流量：日水位流量表（栃木県）から抽出

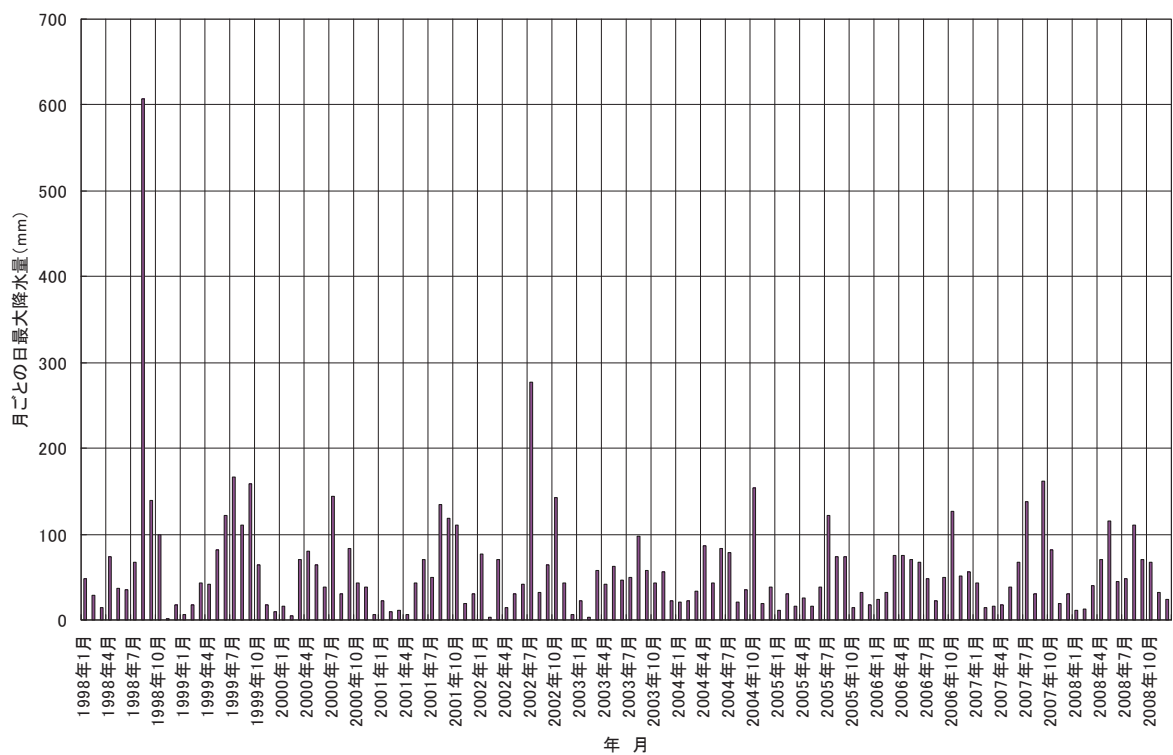
#2) 中余笹橋：余笹川 14.69km、稲沢陸橋：余笹川 3.55km

#3) 水位：計画河床高からの水位 —：欠測

#4) 斜字：参考値 —：欠測



a)月降水量



b)月ごとの日最大雨量

図6.1.1 1998年(平成10)以降の降雨状況(気象庁:那須観測所)

6.2 河道地形および景観の変化

河道および河道景観の変化を図6.2.1に示す定点（橋梁地点）において、定点からの河道形状および河道景観（植生）の変化を写真撮影により記録し、1998年（平成10）洪水およびその後の災害復旧工事というインパクトに対して河道がどのように応答したかを把握した。表6.2.1に調査地点の河道特徴とモニタリングの視点を示す。

(1) 観測地点の変化状況

① 余笹川12.8km（下余笹橋下流側）

余笹川12.8km付近の平面形状の変化（1996年（平成8）12月（洪水前）、1998年（平成10）9月（洪水直後）、2000年（平成12）7月（復旧工事中）の空中写真および2002年（平成14）3月測量（復旧工事竣工後）の平面図を写真6.2.1に示す。また、下余笹橋下流側の河道形状・景観の変化を写真6.2.2に示す。

余笹川12.8kmは、河床勾配約1/80の直線河道部である。約300m下流のモトドオリ淵で丘陵に突き当たり、流れの向きが大きく変わる。洪水前の空中写真からは、この300m区間には河床に巨礫が点在し、左岸側に砂州が形成されている様子が読取れる。砂州は樹林化しているが水際には裸地が認められる。

1998年（平成10）洪水では、下余笹橋に流下物が付着して河道を閉塞し、堰上げられた洪水が下余笹橋の左右岸へ氾濫し、氾濫した流水によって橋の取付道路が侵食され、下余笹橋が落橋した。

災害復旧では、川幅が25m程度から35mに拡げられ、両岸に護岸が設置された。護岸の基礎は寄石で防護した。

竣工後約半年が経過した2001年（平成13）8月の洪水では、左岸側に中礫が堆積し、滞筋が右岸側に寄っている。その後、左岸側に形成された砂州は、2002年（平成14）11月には早瀬に変化し、2008年（平成20）には本流（右岸側）と副流（左岸側）が形成され、これを分ける形で中州状に砂州の一部が固定化しつつある。1998年（平成10）洪水後に架け替えられた下余笹橋は、低水路中央に橋脚があり、中州状の地形は橋脚の下流側に形成されたものである。滞筋部分の河床は低下傾向にあり、所々、基岩が露出している。

竣工後間もない2001年（平成13）8月の時点で、寄石上には草本が見られる。また、2001年（平成13）8月洪水で形成された左岸側の砂州には翌年6月には草本が芽生えている。その後、2008年（平成20）には、寄石や砂州にツルヨシやヤナギ類が繁茂し、定着している。

護岸基礎の侵食防止のために寄石が設置されているが、下余笹橋の直下流50m程度の区間（左岸側）では、2001年（平成13）8月洪水によって寄石が崩れた形跡が見られる。洪水中に寄石前面の河床が侵食されて寄石が崩れ、洪水後期中礫が堆積したものと考えられる。護岸の変状は認められないが、橋脚などによる局所的な流れの影響を考慮した設置方法を検討する必要があることを示唆していよう。

また、竣工時に河床に置かれた巨石は砂州の形成などにより埋没したものがあるが、ほとんど移動していない。

② 余笹川10.0km（石堀子橋下流側）

余笹川10.0km付近の平面形状の変化を写真6.2.3に示す。また、石堀子橋下流側の河道形状・景観の変化を写真6.2.4に示す。

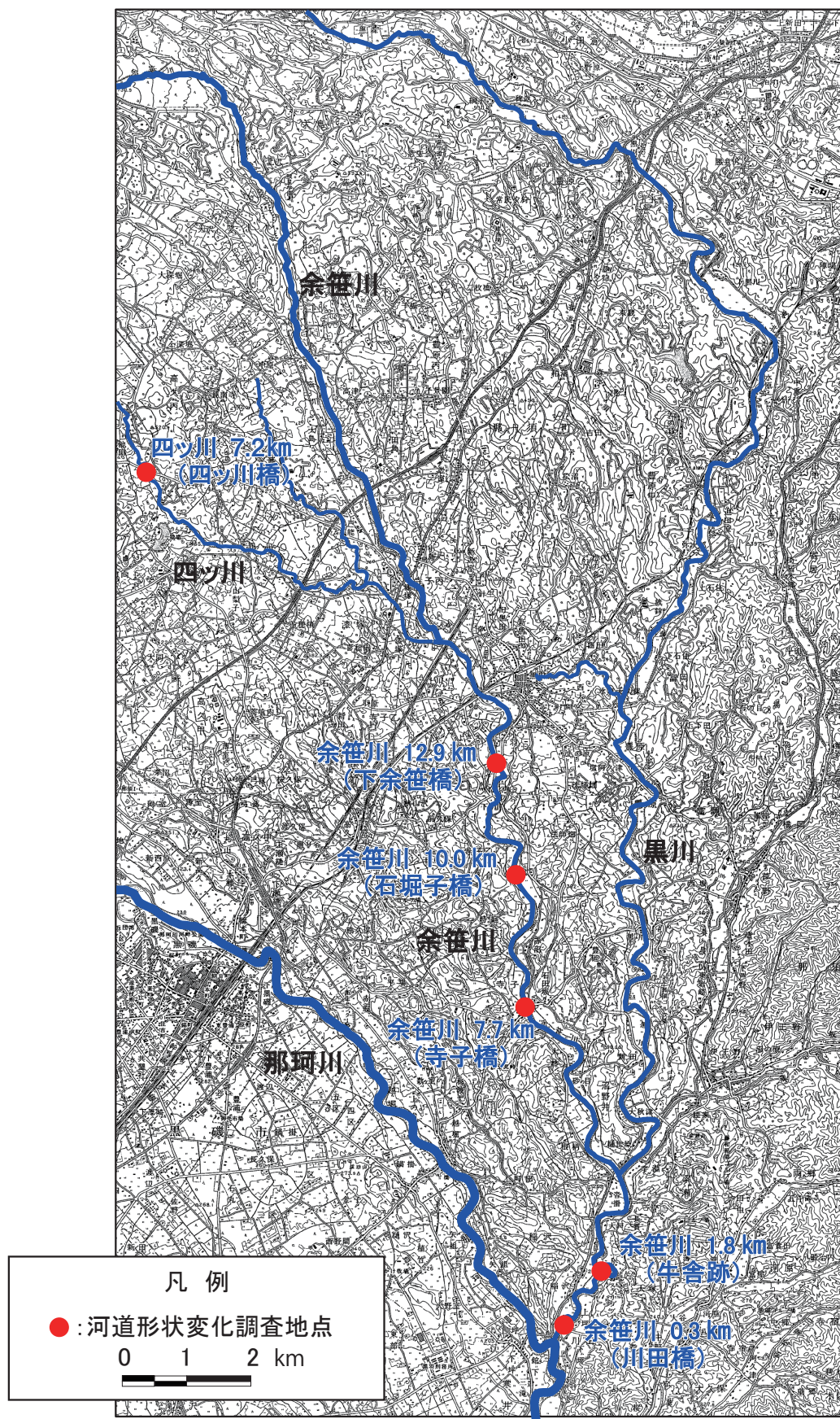


図6.2.1 余笹川河道変化調査地点位置図

表 6.2.1 河道形状変化調査地点とモニタリングの視点

調査地点		調査地点の特徴	モニタリングの視点
余笹川	川田橋 (0.3km)	・那珂川合流点上流の直線河道 ・右岸側の河床・河岸に花崗岩が露出(護岸の設置を取止めた箇所) ・左岸は玉石積護岸を設置し、基礎を寄石で防護	・岩盤河床・河岸での砂州の形成 ・砂州への植生の侵入と変化 ・天然河岸存置箇所の景観
	牛舎跡 (1.8km)	・強風化花崗岩に貫入蛇行していた河道を直線化(ショートカットした箇所) ・旧流路を平水時の流路として残している。	・ショートカット部の河道変化 ・ショートカット部(岩盤)への植生の侵入と洪水時の攪乱 ・旧流路の変化
	寺子橋 (7.7km)	・拡幅部 ・右岸山付部の護岸根固工の設置深度を低下させ淵の再生を期待した箇所 ・下流に堤外水路の取水口があり、巨石により流水を誘導している。	・拡幅部の河道変化(滯筋の変化、砂州の形成) ・植生の進入と変化 ・転石(巨石)の移動 ・右岸寄りの淵の再生
	石堀子橋 (10.0km)	・河床勾配 1/110 の直線河道 ・平成 13 年冬に被災前の形を模した河道を人為的に整斉	・直線河道部の河道変化 ・下流水制周りの河道変化(水制間の土砂堆積、植生の侵入・定着、水制先端の流水環境)
	下余笹橋 (12.9km)	・河床勾配 1/80 の直線河道 ・平成 13 年冬に被災前の形を模した河道を人為的に整斉	・直線河道部の河道変化 ・寄石による護岸の防護効果 ・寄石周りの植生の侵入と変化 ・橋脚周りの土砂の堆積と侵食
四ッ川	県道 四ッ川橋 (7.3km)	・河床勾配 1/77 の直線河道・兩岸を玉石積護岸で固定した箇所	・急勾配直線河道部の河道変化 ・置石・転石の移動と土砂



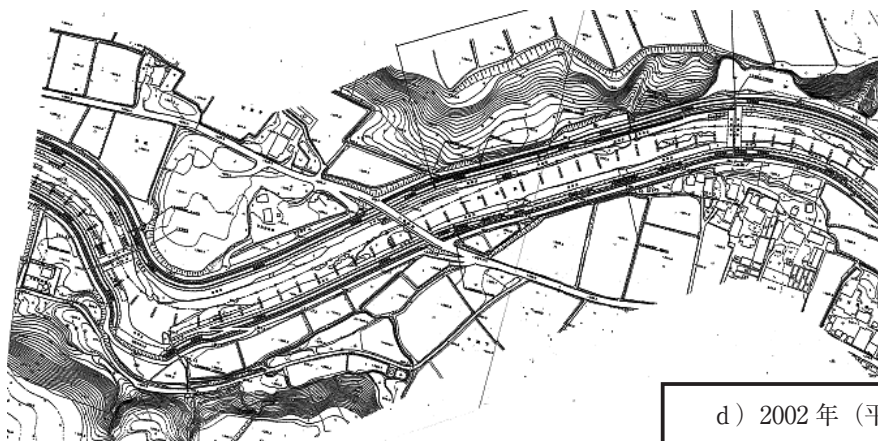
a) 1996 年 (平成 8) 12 月



b) 1998 年 (平成 10) 9 月



c) 2000 年 (平成 12) 7 月



d) 2002 年 (平成 14) 3 月

写真6.2.1 余笹川12.9km(下余笹橋)の河道状況の変化



a) 2001 年 (平成 13) 8 月 20 日 (台風前)



b) 2001 年 (平成 13) 8 月 24 日 (台風後)



c) 2002 年 (平成 14) 6 月 26 日



d) 2008 年 (平成 20) 6 月 11 日



e) 2009 年 (平成 21) 5 月 13 日

写真6.2.2 余笹川12.9km(下余笹橋下流側)の河道・景観の変化



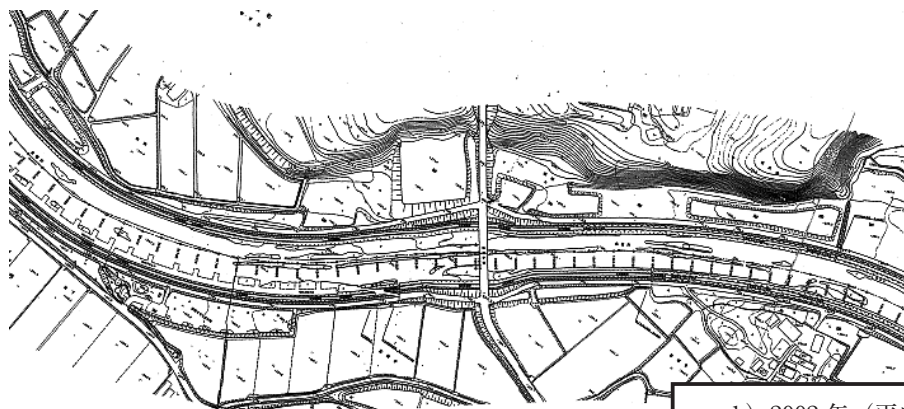
a) 1996 年 (平成 8) 12 月



b) 1998 年 (平成 10) 9 月



c) 2000 年 (平成 12) 7 月



d) 2002 年 (平成 14) 3 月

写真6.2.3 余笹川10.0km(石堀子橋)の河道状況の変化



a) 2001 年 (平成 13) 8 月 20 日 (台風前)



b) 2001 年 (平成 13) 8 月 24 日 (台風後)



c) 2002 年 (平成 14) 11 月 9 日



d) 2004 年 (平成 16) 9 月 16 日



e) 2007 年 (平成 19) 4 月 17 日



f) 2008 年 (平成 20) 6 月 11 日



g) 2009 年 (平成 21) 5 月 13 日

写真6.2.4 余笹川10.0km(石堀子橋下流側)の河道・
景観の変化

余笹川10.0km（石堀子橋）の下流側は、河床勾配約1/100の直線河道部で、右岸側は丘陵に近接している。洪水前の空中写真からは、砂州に樹木が繁茂している様子が見られる。

1998年（平成10）洪水では、石堀子橋上流で氾濫し、左岸側の畑の上を洪水が流下した。また、河道内の樹林や右岸側の丘陵との間の樹林が流出している。

災害復旧では、兩岸に護岸が設置され、護岸の基礎は寄石で防護された。また、下流の左岸側には水制が設置されている。復旧後の川幅は45mで、被災前とほとんど変わらない。

災害復旧後、低水路には工事の影響が残り、直線的な溝が残されたままであった。2001年（平成13）年8月の洪水では、溝を形成している土砂の帯はほとんど移動していない。その後、2001年（平成13）冬に、市民団体「郷土の河川の環境と生態系を愛する会」と連携して、被災前の河道の形状に近づけるための河道の整齊が行われた。石堀子橋付近では、砂礫を両側に寄せ、流路を河道中央に設置した。2002年（平成14）11月には、河床が全面的に移動し、平瀬状になっている。さらに、その2年後の2004年（平成16）9月には、右岸側への土砂の堆積が拡大し、滯筋が固定化されてきている。

2001年（平成13）冬の河道整齊から2年後の2004年（平成16）9月には、橋脚の下流側に中州状の堆積地形が形成され、右岸側にも土砂が堆積し、草本が定着している。右岸側に堆積した土砂は、交互砂州状の形状にはならず、河岸との間には水路状の流れが形成されている。

さらに、2年半後の2007年（平成19）年4月には右岸の砂州状地形が拡大し、ヨシ、ツルヨシが生育し、ヤナギ類の幼木も確認できる。右岸側の砂州状地形の内部には水路状の小流路が見られるが、この地形は、土砂の供給量が多くないことから、河床整齊時の河床の形状や置石の影響が残ったものと考えられる。

③ 余笹川7.7km（寺子橋下流側）

余笹川7.7km付近の平面形状の変化を写真6.2.5に示す。また、寺子橋下流側の河道形状・景觀の変化を写真6.2.6に示す。

余笹川7.7km（寺子橋）の下流側は、右岸側に大きく河道幅を拡幅した地点である。1998年（平成10）洪水の前は、上下流の湾曲に調和して、左岸側に砂州が形成されていた。

1998年（平成10）洪水では、寺子橋に流木等の流下物が付着して河道を閉塞し、堰上げられた洪水が寺子橋の左右岸へ氾濫し、氾濫した流水によって橋の取付道路や護岸の背面が侵食された。

災害復旧では、川幅が25mから40mに拡げられ、寺子橋下流の湾曲部では最大80mに拡幅された。兩岸に護岸が設置され、根固工で護岸基礎を防護している。寺子橋下流右岸の湾曲部では、淵の形成を阻害しないように、根固工の天端を護岸基礎の天端まで下げて施工されている。

工事がほぼ終了した2000年（平成12）12月は、ザラ瀬状の河床であったが、翌2001年（平成13）8月の出水前には、河床の高まりに草本が侵入している。2001年（平成13）8月の出水では、右岸側の草本が土砂とともに流出し、左岸側の草本も少なくなっている。2002年（平成14）11月には、左岸側の植生が減少し、砂州状の地形をショートカットするような流路が形成されている。これは、2002年（平成14）7月の洪水によるものと考えられるが、2001年（平成13）冬に行われた河道整齊との関連は確認できていない。

2004年（平成16）9月には、左岸（湾曲部の内岸側）に砂州状の堆積地形が形成され、滯筋が右岸側に寄り、水面の幅が縮小している。右岸側は、護岸基礎の根固工を下げた箇所であり、淵（深

み)が形成されている。2008年(平成20)6月には、砂州にヤナギ類が見られ、左岸側の砂州状地形の護岸沿いに、帯状に分布している。

竣工時に河床に露出していた巨礫は、川幅の拡大空間なので砂州状地形が形成され、多くが土砂に埋没した。



a) 1996 年 (平成 8) 12 月



b) 1998 年 (平成 10) 9 月



c) 2000 年 (平成 12) 7 月



d) 2002 年 (平成 14) 3 月

写真6.2.5 余笹川7.7km(寺子橋)の河道状況の変化



a) 2000 年 (平成 12) 12 月 10 日



b) 2001 年 (平成 13) 8 月 20 日 (台風前)



c) 2001 年 (平成 13) 8 月 24 日 (台風後)



d) 2002 年 (平成 14) 11 月 9 日



e) 2004 年 (平成 16) 9 月 16 日



f) 2008 年 (平成 20) 6 月 11 日



g) 2009 年 (平成 21) 5 月 13 日

写真6.2.6 余笹川7.7km(寺子橋下流側)の河道・景観の変化

④ 余笹川1.8km (牛舎跡)

余笹川1.8km付近の平面形状の変化を**写真6.2.7**に示す。

余笹川1.8km地点(牛舎跡)は、風化花崗岩を穿入し、蛇行して流れていた。1998年(平成10)洪水では、蛇行に沿って洪水が流下できず、蛇行部を直進したため、牛舎や耕地が流出した。

災害復旧では、**写真6.2.7d**)に示すように、蛇行部をショートカットするように洪水時の流路を開削した。平水時は旧流路を流れ、洪水時には開削した新川部を流下するように計画された。

・ショートカット部

2つのショートカットのうち、上流側の河道形状・景観の変化を**写真6.2.8**に示す。

竣工直後は、掘削した河床が露出し、流水は見られない。2001年(平成13年)8月の洪水により、河床の強風化部分が侵食され、河道の中央部に流路が形成された。流水は風化が強い箇所を選択して侵食し、特異な景観を呈している。また、護岸の基礎は河床を掘削して施工され、一部はコンクリートで埋め戻し、一部は寄石状に巨礫が置かれた。コンクリートで埋め戻した箇所は基礎部の侵食は免れているが、巨礫を置いた箇所では、前面の河床が侵食され崩落し、石が散乱した。

河道内には、土砂の堆積が見られず、植生の侵入は部分的である。

掘削のり面の下部は玉石護岸が設置され、上部は張芝が施された。工事後3年間は、芝の養生(除草)が行われ、部分的にシロツメクサの侵入が見られるものの、芝が維持されていた。養生期間が終了した2004年(平成16)8月にはセイタカアワダチソウ、ヨモギなどの先駆的な植物が一面を覆い、2008年(平成20)6月には、小段に堆積した土砂を基盤にして根付いたイヌコリヤナギ、タチヤナギ、ネムノキなどの木本も確認されている。

・旧川部

2つのショートカットの下流側旧川部の河道形状・景観の変化を**写真6.2.9**に示す。

左岸側の河岸と滞筋は存置されたが、右岸側に流路が拡幅された(ショートカットとの取り付け部では左岸側を掘削)。竣工後間もない2001年(平成13)8月の台風前は、掘削した河床が露出し、中礫、大礫が散在していたが、2002年(平成14)11月(2001年(平成13)8月、2002年(平成14)7月洪水後)には、湾曲の形状に対応して小礫、中礫が堆積し、砂州や早瀬を形成し、左岸の河岸沿いの淵も維持されている。

その後、2004年(平成16)9月には砂州に草本が侵入し、約4年が経過した2008年(平成20)6月になると、砂州をヨシ、ツルヨシが覆っている。

⑤ 余笹川0.3km (川田橋上流側)

余笹川0.3km付近の平面形状の変化を**写真6.2.10**に示す。また、川田橋上流側の河道形状・景観の変化を**写真6.2.11**に示す。

余笹川0.3km(川田橋)の上流は、那珂川合流点上流の直線河道部で、河床や右岸側の河岸に花崗岩類が露出している。

1998年(平成10)洪水では、旧川田橋による堰上げが生じ、痕跡水位は河床から最大10mに達した地点である。災害復旧では、左岸側には河岸の上に民家があることから護岸を設置したが、右岸側は護岸の計画を取りやめて、天然河岸を存置した。

この地点は、上流に湾曲があり、左岸側に砂州が形成されやすい平面形であり、1996年(平成8)の空中写真でも、河畔林に覆われているが、砂州の一部が確認できる。2001年(平成13)8月



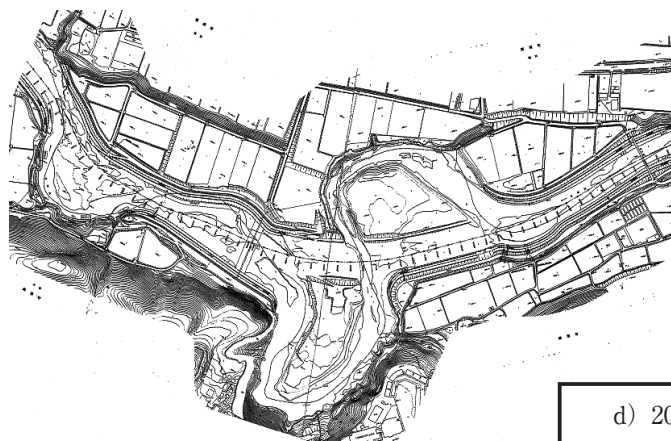
a) 1996 年 (平成 8) 12 月



b) 1998 年 (平成 10) 9 月



c) 2000 年 (平成 12) 7 月



d) 2002 年 (平成 14) 3 月

写真6.2.7 余笹川1.8km(牛舎跡)の河道状況の変化



a) 2001 年（平成 13）8 月 20 日（台風前）



b) 2001 年（平成 13）8 月 24 日（台風後）



c) 2002 年（平成 14）11 月 9 日



d) 2003 年（平成 15）4 月 28 日



e) 2004 年（平成 16）9 月 16 日



f) 2008 年（平成 20）6 月 11 日



g) 2009 年（平成 21）5 月 13 日

写真6.2.8 余笹川1.8km(ショートカット部)の河道・
景観の変化



a) 2001 年（平成 13）8 月 20 日（台風前）



b) 2001 年（平成 13）8 月 24 日（台風後）



c) 2002 年（平成 14）11 月 9 日



d) 2003 年（平成 15）4 月 28 日



e) 2004 年（平成 16）9 月 16 日



f) 2008 年（平成 20）6 月 11 日



g) 2009 年（平成 21）5 月 13 日

写真6.2.9 余笹川1.75km(旧川流入部)の河道・景観
の変化



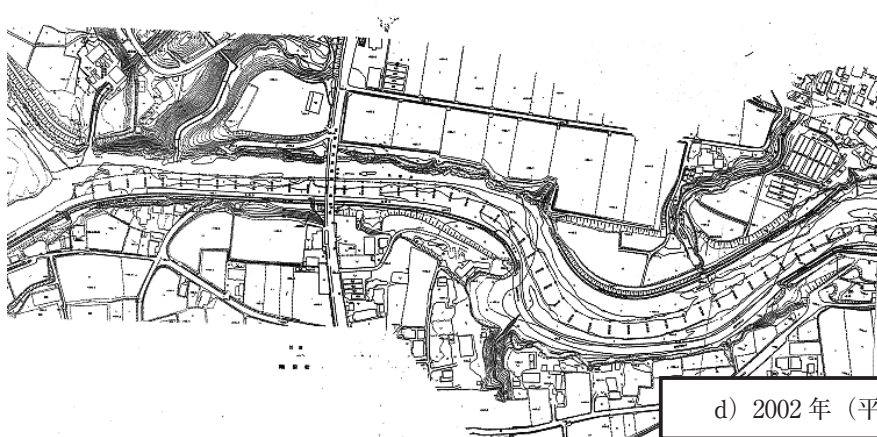
a) 1996 年 (平成 8) 12 月



b) 1998 年 (平成 10) 9 月



c) 2000 年 (平成 12) 7 月



d) 2002 年 (平成 14) 3 月

写真6.2.10 余笹川0.3km(川田橋)の河道状況の変化



a) 2000 年 (平成 12) 6 月 6 日



b) 2001 年 (平成 13) 8 月 20 日 (台風前)



c) 2003 年 (平成 15) 4 月 28 日



d) 2004 年 (平成 16) 9 月 16 日



e) 2007 年 (平成 19) 4 月 17 日



f) 2008 年 (平成 20) 6 月 11 日



g) 2009 年 (平成 21) 5 月 13 日

写真6.2.11 余笹川0.3km(川田橋上流側)の河道・景観の変化

の洪水前は、左岸側の河床に復旧工事の跡が残っているが、洪水後は、河床の草本が土砂に覆われ、護岸沿いの寄石上にも土砂が堆積した。2004年（平成16）9月には右岸の河岸の形状に対応した滯筋が形成され、左岸に堆積した小礫、中礫の上にはツルヨシなどの草本が侵入している。その後、左岸の護岸より土砂の堆積が徐々に進行し、2008年（平成20）6月には、ヤナギの幼木も確認された。また、護岸の上部からはクズなどの植物が垂れ下がり、護岸を覆い始めている。

2009年（平成21）5月13日における**写真6.2.11g**のA地点の様子を**写真6.2.12**に示す。ポールの立っているところは、基岩である花崗岩が露出し、そこから約80cmの高さにヨシで覆われた斜面が立ち上がり、表層は粒径0.3mm程度の中砂が堆積していた。

⑥ 四ッ川7.2km（県道四ッ川橋下流側）

県道四ッ川橋下流側の河道形状・景観の変化を**写真6.2.13**に示す。

四ッ川7.2km（県道四ッ川橋）は、河床勾配1/70の直線河道部で、栃木県管理区間の最上流部に位置する。丘陵内を流下する掘込河道である。直上流の未改修区間には、**写真6.2.14**に示すような、ステップアンドプールの河道となっている。

1998年（平成10）洪水では、両岸の河岸が侵食され、右岸側の畑の一部が流出した。

災害復旧では、両岸に玉石護岸が設置された。また、河床には、河床の多様性を早期に回復するために、置石が配置された。

礫径30cm程度以上の置石や巨礫は、その背面が侵食されて転がり、河床に埋没したものがあるが、大きく移動した形跡は見られない。また、直径10cm程度までの中礫は移動しているようである。

2002年（平成14）には、平坦であった河床の右岸側に小礫や砂の堆積が見られ、そこに草本が侵入している。2008年（平成20）には、植生帯が広がり、ヤナギ類も定着している。右岸側に高まりができ、植生が侵入した理由は明らかではないが、災害復旧後の河床は平坦であり、置石の配列がきっかけになって、その背面に小礫がトラップされた可能性も考えられる。



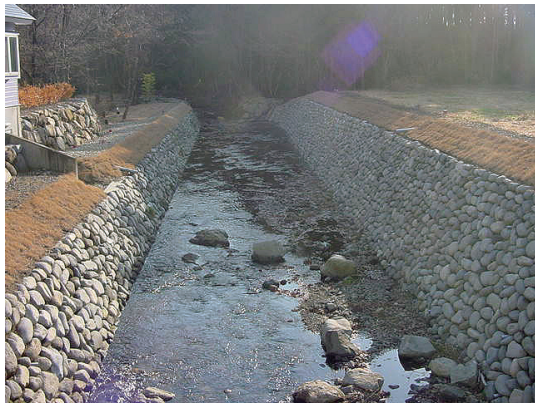
写真6.2.12 川田橋上流の堆積物
（2009年（平成21）5月13日）



a) 2001 年（平成 13）8 月 20 日（台風前）



b) 2001 年（平成 13）8 月 24 日（台風後）



c) 2002 年（平成 14）11 月 28 日



d) 2004 年（平成 16）9 月 16 日



e) 2008 年（平成 20）6 月 11 日



f) 2009 年（平成 21）5 月 13 日

写真6.2.13 四ッ川7.2km(県道四ッ川橋下流側)の河道・景観の変化



写真6.2.14 四ッ川未改修区間の河道状況(四ッ川7.25km)

(2) 2002年（平成14）7月洪水による河道変化

2002年（平成14）7月10日の台風6号は、余笹川流域の水位観測所での記録によるとピーク流量が計画流量の60%弱となり、工事完成後最大規模の出水であった。表6.2.2に平成14年洪水ピーク時の水深（計画河床高からの平均水深）、川幅、河床勾配およびマニングの粗度係数0.035として評価した推定流量、河床に働いた掃流力および粒径5cm、19cm、65cmに対応する無次元掃流力の評価結果を示す。本洪水の最大流量は平均年最大流量の2倍弱であり、確率規模1/10程度と推定される。

中礫集団（5cm）は活発に移動する掃流力、大礫集団（19cm）は集合しなければ移動する掃流力、巨礫集団（65cm）は孤立すれば移動限界に近い掃流力であったと評価される。

この河床材料が移動する規模の洪水後の変化は、改修に当って配慮された環境改善対策の効果（今後の環境改善対策のあり方）を判定するのに良い機会となった。

河道の変化状況と環境改善対策の効果および改良点について以下に記す。

① 河床侵食・堆積状況

現地調査によれば、改修後の滞筋部（平水時の水面下の部分）は全般的に河床が低下する傾向が認められる。目視の観測では、直径50～100cm以上の巨石および巨大礫は移動していないが、それ以下のものは移動している。基盤の浅い地点では基岩が露出している箇所が見られる。例として稲沢陸橋下流（3.5km地点）の状況を写真6.2.15に示す。河床の未固結堆積物はほとんど流出し、地山に溝状に侵食痕が形成されている。

一方で次のような場所では土砂の堆積が見られた。

- ・川幅の急拡部
- ・橋脚の背後
- ・湾曲部の内湾側

これらの場所はいずれも流速が低下する場所であり、上流で侵食移動してきた中礫および大礫が堆積した。

- ・曲がり角度の大きい蛇行部での砂州の形成と内湾側の侵食

改修工事により被災前の河道に比べ川幅が1.5～2倍程度拡幅されたため、曲がり角度が大きい蛇行部では、内湾側の土砂の堆積（固定砂州の形成）が見られるが、砂州の内湾側上流部の護岸沿いに溝状の侵食地形が見られる場合が多かった。下川橋（12.14km）の様子を写真6.2.16に示す。

表 6.2.2 2002年（平成14）7月洪水のピーク時推定流量、掃流力

河川名	地点名	距離 (km)	計画流量 (m^3/s)	流量 (m^3/s)	水深 (m)	u_*^2 (cm^2/s^2)	τ_{*5}	τ_{*19}	τ_{*65}	V_m (m/s)
余笹川	川田橋	0.3	1400	459	2.3	1060	0.11	0.033	0.010	
	牛舎跡	1.8	1400	459	1.9	1210	0.12	0.036	0.011	
	余－1	2.6	1400	459	1.8	1190	0.12	0.036	0.010	
	余－2	6.3	670	377	1.1	880	0.09	0.027	0.008	
	寺子橋	7.7	670	377	1.8	1170	0.12	0.036	0.011	3.4
	石堀子橋	10.0	560	377	1.3	1220	0.13	0.038	0.012	
	余－3	10.9	560	377	1.2	1370	0.14	0.074	0.013	
	下余笹橋	12.9	560	328	1.4	1800	0.19	0.056	0.017	
	余－4	13.4	560	328	1.4	1710	0.18	0.053	0.016	
四ッ川	四－1	4.3	70	39.8	0.9	1510	0.16	0.047	0.014	
	県道四ッ川橋	11.5	70	39.8	1.0	1350	0.14	0.042	0.013	

※それぞれ粒径5cm、19cm、65cmに対する無次元掃流力



写真6.2.15 余笹川稲沢陸橋下流の河床状況
(2004年(平成14)11月28日)



写真6.2.16 余笹川下川橋下流の河床状況
(2004年(平成14)11月9日)

これは、湾曲部で川幅が上下流より広く、改修後の時間経過が少なく湾曲部の砂州の形成が未発達で河床が平坦に近いこともあり、湾曲部流入点から湾曲前半部は自由渦により内湾側の流速が早くなること、さらに川幅一杯に流水が流れると湾曲部の前半部では外湾側より内湾側の水面勾配が急となることによる。

・ショートカット部での旧流路の閉塞

1.8km地点付近では、穿入蛇行していた河道を直線化し、平水時には流水が旧流路を流れ、洪水時にはショートカット部を流れるように改修された。

2002年(平成14)7月出水時にはショートカット部を流水が流れ、風化花崗岩が露出し一部が侵食され河床は溝状(2つのショートカット部の内、上流のもの)に写真6.2.17のように侵食された。旧河道部の入り口部分に多量の石礫が堆積したため、同年11月平水時において流水がショートカット部を流れていた。その後、土砂の堆積により平水時には旧河道部に流水が流れなくなった。

② 覆土の流出

コンクリート張りの護岸に植生を生育させるため、土砂による覆土を施した施設では、掃流力が大きいため、写真6.2.18のように多くの地点で流水部の覆土が流出した。



写真6.2.17 余笹川1.8km付近ショートカット部の河床状況(2002年(平成14)7月洪水後)



写真6.2.18 余笹川寺子橋上流左岸コンクリート張り護岸の覆土の流出状況
(2001年(平成13)8月20日)

③ 湿生植生の流出と埋没

改修により植生がまったくない状態に改変されたが、短期間の内に、平水時の水位（地下水位）に応じた植生が侵入していた。これらの植生は、洪水時の流水によって引き抜かれるというよりも、植生周辺の土砂の移動により植生基盤と共に流出した。また急拡部や内湾部で流速が遅いところに土砂が堆積し、草本類の埋没が生じた。

④ 置石の流出

魚類の生育基盤の改良のため置石が配置された箇所があった。11箇所の調査によると粒径50cm程度以下のものは移動が見られたが、1m以上は移動しなかった。巨礫集団（65cm）の無次元掃流力は本洪水ピーク時で0.01～0.015程度であり、ちょうど孤立した巨礫の移動限界掃流力であったため、移動したものが生じたのである。

⑤ 巨大礫の置石によるR型淵の形成

巨大礫の置石の目的は、水深の浅い単調な流れ（ざら瀬）に配置し、R型淵やよどみの形成を促し、河川環境に多様性をもたらし魚類等の生息場を創出することにあった。4地点における状況と2002年（平成14）9月時点の魚類の確認状況は表6.2.3のごとくであった。また巨大礫の移動は生じなかった。

⑥ 寄石の変化

寄石は護岸基礎部や根固め工の破壊原因となる河床洗掘を軽減および根固めの代わりとするという治水目的、および寄石上や間隙に小礫や砂を堆砂させ植生の侵入を図る目的で河岸付近に置かれた。9地点について、寄石の前面における淵の有無、根固・護岸の防護効果、植生の有無、移動の有無を調査した。表6.2.4にその結果をまとめた。

淵の形成された箇所では写真6.2.19、図6.2.2のように洗掘により寄石が洗掘部に移動し、離散的状态になり本洪水で移動した。

表 6.2.3 2002 年（平成 14）7 月洪水後の魚類の確認状況

	調査地点 (定点)		淵の形成		魚類の確認		底生動物の確認		備 考
	河川名	地点名	結果	評価	結果	評価	結果	評価	
生態系の変化	余笹川	余-1	形跡	○	なし	×	なし	×	水位上昇により、淵の形成の期待は大きい
		余-2	形成	◎	カワムツ×1	○	モンカゲロウ科 ユスリカ科	○	早瀬の環境に近い
		余-3	形成	◎	カワムツ(稚魚)×15 シマドジョウ×2	◎	イトミミズ科 トンボ目 ユスリカ科	○	水制工とともに淵が形成される
		余-4	形成	◎	カワムツ(稚魚)×3ウ グイ×2	◎	ガガンボ科 ユスリカ科	○	大きな淵が形成される
	四ツ川	四-1	形成	◎	カワムツ×1	○	モンカゲロウ科 トンボ目 ユスリカ科	○	早瀬の環境に近い

◎：明確に形成 ◎：稚魚や底生魚の確認

○：淵の形跡・よどみ ○：魚類の確認

×：なし ×：なし

◎：瀬と異なり、堀潜・携巣型を多数確認

○：瀬と同じで、堀潜・携巣型を確認

×：堀潜・携巣型を未確認

表 6.2.4 寄石の効果

	調査地点 (定点)		砂州の 形成	植生の 有無	淵の 形成	根固・護岸 の防護	移動の 有無	$\tau * 65$
	河川名	地点名						
河道形状 の変化	余笹川	川田橋	○	○	—	—	○	0.010
		寺子橋	○	×	—	—	○	0.011
		石堀子橋	×	○	—	—	○	0.012
		下余笹橋	×	○	×	○	○	0.017
生態系の 変化	余笹川	余-1	—	○	○	○	×	0.010
		余-2	—	○	×	○	○	0.008
		余-3	○	○	○	○	○	0.013
		余-4	○	○	—	○	×	0.016
	四ッ川	四-1	○	○	—	—	○	0.014

○：形成 ○：あり ○：形成 ○：防護 ○：移動なし
 ×：なし ×：なし ×：なし ×：なし ×：移動あり
 —：対象外 —：対象外 —：対象外 —：対象外



写真 6.2.19 洗掘が生じた箇所での寄石の移動および離散状況
 (余笹川 2.6km, 2002 年(平成 14) 10 月 10 日, 下流側から撮影)

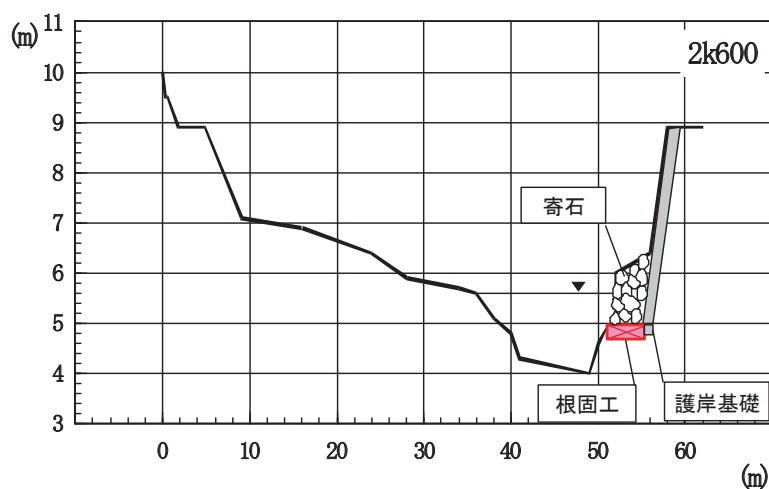


図 6.2.2 根固工設置深度を低下させた箇所の状況(余笹川 2.6km)

⑦ 淵の形成と根固め工の設置深度の低下効果

(財)河川環境管理財団は、当初案の護岸根固め形式では、河道の曲がりや砂州の形成による深掘れが生じ、護岸が破壊される恐れがある箇所について、護岸の基礎高および根固め工の設置深度を低下させることを提案した。結局、経済性等の検討により1mほど根固め工の設置深度を低くして設置された。

4調査地点について効果の判定を実施した。その結果を表6.2.5に示す。なお調査地点は一連区間として護岸根固め工が設置されている。余-4を除き淵が形成された。根固め工設置高より深くなったのは余-1であった。その状況はすでに写真6.2.19および図6.2.2で示した。

⑧ 低々水路の変形

低々水路は、改修による平坦な河床をより速やかに淵や瀬のある河床に誘導するために、改修後の滯筋を想定し、その部分に流水を導くというものであった。しかしながら、流水を河岸近くに導くことへの不安等から河道の中央に低々水路を掘削し、また低々水路を造成しない区間も多かった。

黒川では豊原橋(余笹川合流点より17.2km)下流に写真6.2.20のように河道の中央に低々水路を造成した。本区間は穏やか湾曲区間である。2001年(平成13)8月洪水前は、河道の中央に平瀬が形成されていたが、洪水後右岸側が侵食され川幅が広がり、2002年(平成14)7月洪水で河床全面が動き、低々水路は消滅した。

石堀子橋(10.0km)地点では改修終了後、市民団体「郷土の河川の環境と生態系を愛する会」の要望より、平水時流路の誘導や置石の設置が為された。写真6.2.21のように誘導前は工事の影響が残り、流路が2分されていたが、砂礫を両側に寄せ流路を河道中央に設定した。また水深が深い場所の造成や置石が配置された。2002年(平成14)7月洪水後は河床が全面的に移動し平瀬化した。

以上、2002年(平成14)7月洪水による河道変化状況を述べた。河道内に多少植生は存置したが、この洪水以前に侵入した草本類の大部分が破壊された。滯筋部からは大礫・中礫集団が抜けだし巨礫および巨大礫が残り、抜け出した中礫・大礫は湾曲部および川幅の広い所に砂州状に堆積した。この洪水によって形成された河道地形は、その後の河川景観変化の土台となり、地形の基本形状はそのまま存置された。2009年(平成21)5月時点において、滯筋以外(平水時水面以上のところ)は、植生が侵入し砂の堆積を促した。風景は変化した。河道形状は基本的に変わっていないのである。

表 6.2.5 根固め設置効果

調査地点（定点）			高さの差（cm）		根固前面 の侵食	前面の 水深 (cm)	淵の形成		代表流速 ^{※3} V _d (m/s)	洪水時の 流速(m/s)
河川名	地点名	距離	竣工断面図 ^{※1}	現地調査 ^{※2}			有無	備考		
余笹川	余－1	2k480	400	382	無	30	×	・ 寄石前は細流	－	3.4
		2k560	400	290	無	30	×	・ 寄石がなく露岩		
		2k600	400	400	有	160	○	・ 寄石前面は急深のM型淵		
	余－2	6k080	349	299	無	57	○	・ 寄石前面はM型淵	7.8	2.7
		6k180	350	283	無	35	×	・ 寄石前は平瀬		
	余－3	10k740	－	290	無	60	○	・ 寄石前はM型淵	－	3.5
		10k800	－	320	無	40	×	・ 寄石前は早瀬		
		10k900	－	250	無	70	×	・ 寄石前は早瀬		
		10k960	－	220	無	80	×	・ 寄石前は早瀬		
	余－4	13k360	331	46	無	20	×	・ 寄石前は細流	8.6	3.9
		13k380	336	22	無	10	×	・ 寄石前は細流		
		13k400	329	53	無	25	×	・ 寄石前は細流		

※1 天端（護岸中段）～根固工

※施工直後は浅瀬と仮定

※2 天端（護岸中段）～河床

※3 設計のための流速値

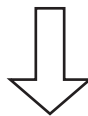


2001 年（平成 13）8 月 20 日

台風 11



2001 年（平成 13）8 月 24 日

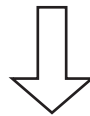


2002 年（平成 14）10 月 5 日

写真6.2.20 低々水路誘導箇所の河道形状の変化(黒川17.2km豊原橋下流)



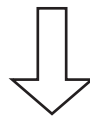
2001 年（平成 13）8 月 20 日



人為的改変（低々水路の誘導）



2002 年（平成 14）3 月



2002 年（平成 14）11 月 9 日

写真 6.2.21 低々水路誘導箇所の河道形状の変化(余笹川 10.0km 石堀子橋下流)

メモ3 余笹川災害復旧工事における環境等に配慮した工法

計画洪水流量時、巨礫集団はC集団であり集合していれば（寄石として集めれば）移動しないが、孤立すれば移動すると評価された。平成14年7月洪水後の観察によると、寄石の前面が洗掘され落ち込み移動変形されたことより、洗掘を前提にした寄石の配置とすべきであった。根固め工の上部のみならず根固め工前面にも配置し（洗掘深の評価に関係する）、2層化や設置深さに工夫が必要であったと言えよう。

従来、災害復旧工事においては一律に護岸基礎高を決定してしまうことがほとんどであった。改修後の河道平面形より、湾曲および砂州の発生により護岸基礎高より深掘れによる最深河床高が深くなる恐れが強いとして護岸基礎高を深くするよう提案したが、十分でない箇所が生じた。水衝部位置の変化および深掘れ深を評価し根固めの設計を行う時期に来ている。また評価が可能になりつつある（山本他，2003）。

低々水路は当初理念と異なった形で設置された。技術的信頼度が薄く、まだ試験的段階であったのである。洪水により河道の形が形成されるのを待つという考えもあるだろうが、河道の変化方向が見えるのなら、低々水路でなりたがる河道を誘導し、早期に瀬と淵を回復することを受け入れても良いのでなかろうか。

(3) 2002年（平成14）9月後半における水際植生

2002年（平成14）9月25～27日、水際植生の調査を行った。2002年（平成14）7月洪水後、約2月半が経過している。各調査地点のうち、協和橋上流（6.3km付近）の植生状況を代表例として記す。

本地点は、改修により河道幅が大幅に拡大された湾曲部に当たり、流路は左岸に寄っていた。右岸は中礫と大礫からなる広大な寄州が形成され、寄州内には水たまりが点在する。図6.2.3に河道平面形状、河床型、植生分布を示す。植生は疎らであるが、寄州上や早瀬の水際ではツルヨシが生育していた。左岸の寄石の上部や細流付近ではミゾソバやオオイヌタデが生育していた。河畔林を形成する木本類ではヤナギ類が4種（カワヤナギ、イヌコリヤナギ、タチヤナギ、オノエヤナギ）確認され、オノエヤナギが代表種であった。オノエヤナギは6k240地点の左岸水際の寄石の上面に堆積した細砂の上に生育していた。高さ1.5mほどで20株程度が固まり、オオイヌタデとミゾソバと混生していた。本調査地点で確認された植物種数は22科70種であった。群落としてまとまっていた種、個体数が多かった種は、オノエヤナギ、オオイヌタデ、ミゾソバ、ツルマメ、アメリカセンダングサ、ヒメムカシヨモギ、ツルヨシ、アキノエノコログサであった。

寄州上には7月出水により河床が動き侵食された跡が見られ、洪水前において草本類が河床に生育していた範囲は9月段階より多かったと推定される。

他の調査地点を含め表6.2.6に示す湿生草本は水際の付近の砂礫地で、乾生草本は乾燥した砂礫地や護岸の上部で生育していた。木本類は表6.2.7に示すオノエヤナギ、オニグルミなどが生育していた。平水時の水面から比高1m程度のやや高い水制や寄石などに堆積した細砂を基盤として成育している。この中でオノエヤナギが他種より成長しており分布範囲が広い。ヤナギ類は基盤が破壊されなければ、倒伏しても写真6.2.22のように萌芽形成により生き残る。

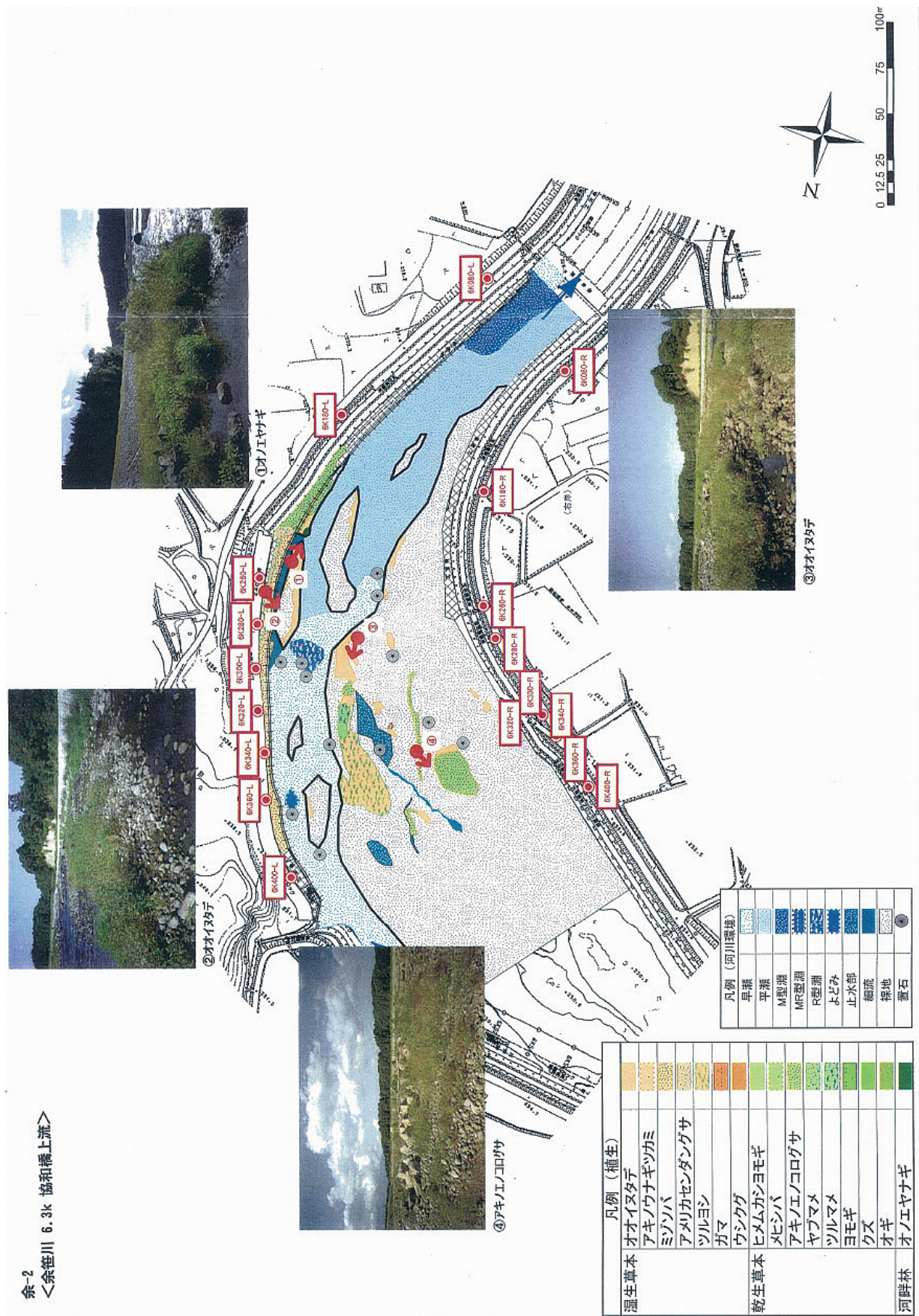


図6.2.3 余笹川6.3km付近(協和橋上流)の植生状況(2002年(平成14)9月)

表 6.2.6 河道内で確認された主な植物

分類	種名
湿生草本	オオイヌタデ
	アキノウナギツカミ
	ミゾソバ
	アメリカセンダングサ
	ツルヨシ
	ガマ
	ウシクグ
乾生草本	ヒメムカシヨモギ
	メヒシバ
	アキノエノコログサ
	ヤブマメ
	ツルマメ
	ヨモギ
	クズ
	オギ
その他	オノエヤナギ

表 6.2.7 木本類の確認状況

調査地点 (定点)		木本類の 有無	オノエヤナギ のまとまり	状 態
河川名	地点名			
余笹川	余-1	○	×	・オニグルミのみ
	余-2	○	○	・オノエヤナギは左岸寄州で、20 株ほどまとまって生育 ・その他の木本類：カワヤナギ、イヌコリヤナギ、タチヤナギ
	余-3	○	○	・オノエヤナギは堆砂した水制工で、10 株ほどまとまって生育 ・その他の木本類：カワヤナギ
	余-4	○	○	・オノエヤナギは左岸護岸の上部で、20 株ほどまとまって生育 ・その他の木本類：オニグルミ、ネコヤナギ、イヌコリヤナギ、イヌシデ
四ツ川	四-1	○	○	・オノエヤナギは護岸際で、10 株ほどまとまって生育

○：あり ×：なし



余笹川 稲沢睦橋下流

(2002 年(平成14)11 月28 日)

同左(拡大)

写真 6.2.22 ヤナギの萌芽再生状況

(4) 2009年(平成21)5月13日における堆積物調査から見た湾曲部の土砂堆積プロセス

① 石堀子橋上流湾曲部(10.9km)

2002年(平成14)7月洪水後、**写真6.2.23**のような堆積地形が形成された。内湾側の滞筋は外湾側に比較して滞筋は浅く、幅も狭い。外湾側の中・下流部は流水が集中し流速が早くなり侵食され河床には巨礫が目立つが、中洲では中礫や大礫が堆積し河床が上昇したのである。

外湾側の淵の河道景観の変化を**写真6.2.24**に示す。2002年(平成14)7月洪水後、砂州上に侵入していた草本は一掃されたが、その2年後には草本が再生している。2009年(平成21)5月13日における内湾側の滞筋部の様子を**写真3.2.2**に示した。固結度の小さい凝灰岩が露出している。**写真6.2.25**は砂州状の堆積地形の頂部付近の様子である。シナダレスズメガヤの侵入が見られるが礫床のままである、この地点の表層材料を線格子法で採取し表層材料の粒度分布を求めた結果を**図6.2.4**に示す。砂州状地形の構成物は大礫および中礫である。洪水時に移動堆積した粒径集団を示している。

② 寺子橋上流(8.0km)

2001年(平成13)8月、左岸側は護岸の工事中で河道中央部に工事場所に流水が流入しないように人為的に土手が形成されていた。工事後河床は整齊されたと推定される。2002年(平成14)7月洪水後、**写真6.2.26**に示すように左岸側に砂州状の堆積地形が形成され、右岸側に滞筋が形成され巨礫が散在した。

その後、砂州に草本類が侵入し、表層に細粒物質が堆積した。2009年(平成21)5月13日、**写真6.2.26**に示す横断方向にトランスセクトを設定し、表層堆積物の調査を実施した。左岸護岸の法尻から距離による表層材料の変化と様子を**表6.2.9**に示す。砂州状の表層における細粒物質の堆積厚さは、左岸護岸位置より0～18m間は8cm以下で薄く掃流堆積物である砂利層がその下に存在する。20～26mの区間はヨシが繁茂している。この区間は洪水履歴を反映し2～3層の粒径の異なる堆積物が表層を覆っていた。また地下水面が高く地表から数cmで地下水のしみ出しが確認された。

水際に近い方が土壌水分が高く、湿生植物の侵入が進行しやすいのである。植生の繁茂は浮遊堆積物をトラップさせるが、砂層の上に小礫層があるなど洪水攪乱規模の違いが堆積物の差異に現れている。

図6.2.5に水際部の河床表層材料の粒度分布を示す。水際堆積物は巨礫を10%ほど含む。

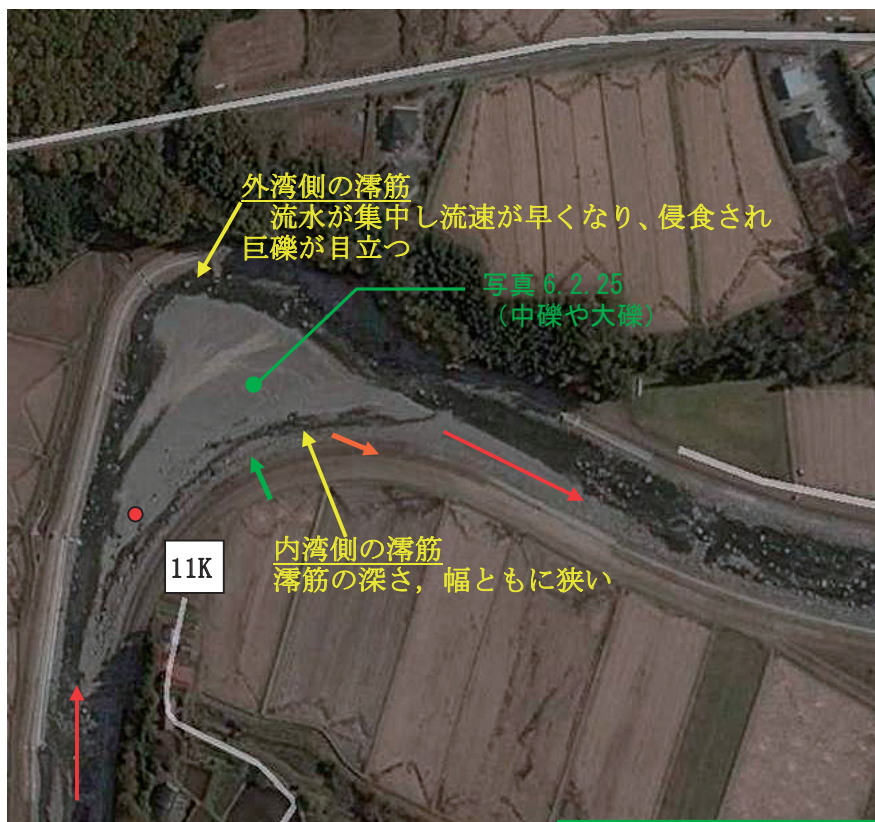


写真6.2.23 石堀子橋上流湾曲部(10.9km)の土砂堆積状況



a) 2001 年 (平成 13) 8 月 20 日



b) 2002 年 (平成 14) 11 月 9 日



c) 2004 年 (平成 16) 9 月 16 日



d) 2009 年 (平成 21) 5 月 13 日

写真6.2.24 外湾側の淵の河道景観の変化状況



写真6.2.25 砂洲の堆積地形の頂部付近の河床材料と
シナダレスズメガヤの侵入
(2009年(平成21)5月13日)

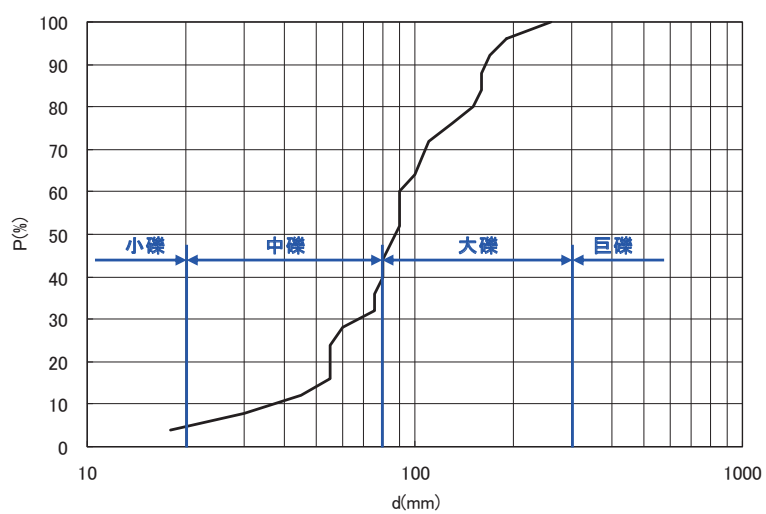


图6.2.4 10.9km 中州表层堆积物(裸地)表层材料粒度分布(N=25), 写真6.2.25地点



写真6.2.26 寺子橋周辺の様子(2002年11月1日)と2009年における景観

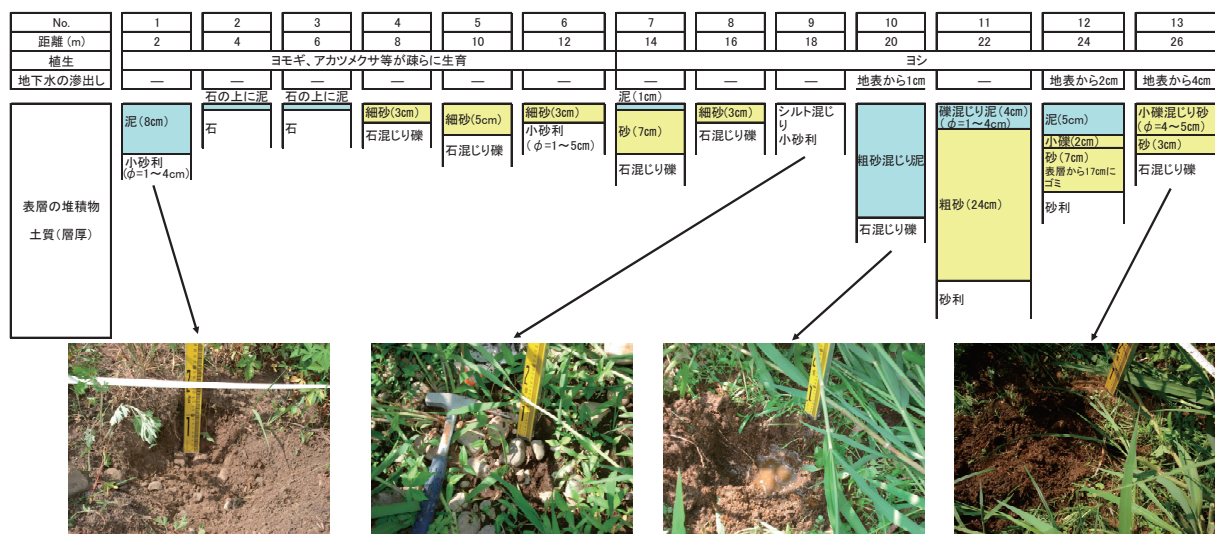


表6.2.9 表層堆積物の様子と横断方向の変化(寺子橋上流)
(調査位置は, 写真6.2.26に示す)

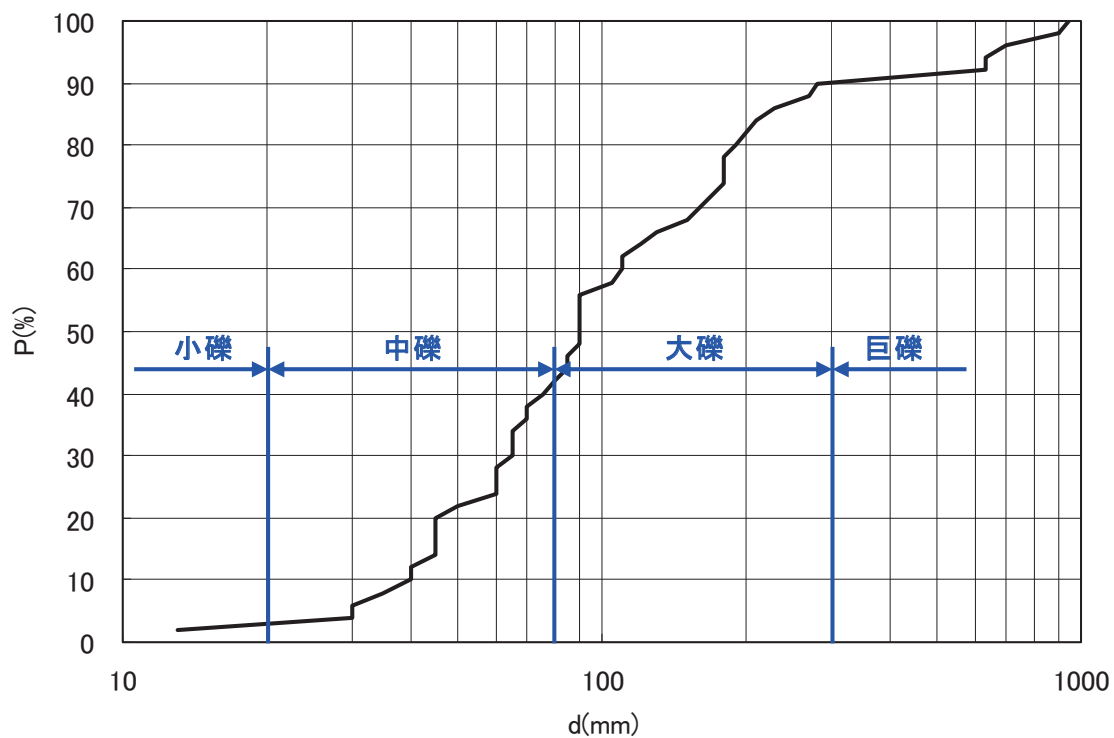


図6.2.5 寺子橋上流 水際表層材料粒度分布 (N=50)

(5) 河道景観の今後の方向

改修工事により、図3.2.8に示したように川幅が被災前に比べて1.5～2倍程度拡大された。川幅が拡大されたため、土砂の堆積による川幅の縮小が予想された。

実際、2009年（平成21）5月時点において、河床高が相対的に高い所、河岸付近および湾曲部内湾に草本類の侵入、ヤナギ類の侵入が見られ、裸地である面積がほとんど無くなっている。平水時に水面下とならないところは植生に覆われ、細粒成分が堆積している。ただし、植生生育部における細粒土砂の堆積による河床上昇量は大きくなく、10cm以下であった。堆積が進まなかったのは、改修区間上流の流路工化、上流砂防ダムの設置、河床部の堆積土砂層が薄く基岩が露出していることより、上流からの中礫供給量が少ないこと、また改修区間の河床勾配が急であるため砂やシルト層の植生部への堆積が進まないことが理由である。流路部（平水時の水面幅にほぼ等しい）はアーマ化が進み、大礫・巨礫が目立つ。河床から抜け出した中礫以下の礫は、川幅の広い湾曲部や河岸寄りの河床の高い所に堆積し、河岸化の進行を助長したが、その量は少なく顕著な砂州の形成を見なかった。

今後、流路部の河床は低下傾向にあると判断されるが、アーマ化と基岩の露出により、100年単位の時間では河床低下はそれほどないと考える。

河道は侵食傾向にあり、直線河道部での顕著な砂州の発生をあまり望めない。瀬と淵が規則的に発生する可能性は少ないが、大礫・巨礫が集中し、早瀬が生じる場所もあろう。ただし、湾曲部および河道幅の拡幅部には固定砂州が形成されており、淵や早瀬が生じよう。

巨大礫は移動せず、周辺に淵やよどみを形成し、河川環境の多様性が生じ、また河道景観のポイントとなろう。巨礫の移動も少なからう。

現在河岸沿いに植生域となっている所は、徐々に土砂の堆積が進み、河道内にテラス状の地形が形成される可能性がある。ただし、河岸侵食防止工の設置と上流の流路工化、砂防ダムの設置により中礫の供給源が減少しているので、その進行速度は遅い。河岸沿いの水制や寄州には砂が堆積しヤナギ類が侵入しているのでヤナギの成長に伴い樹林化していこう。

計画高水位に達するような洪水時にはヤナギ類は倒木・流出しよう。樹林化していたところでも掃流力が大きいので堆積より侵食が卓越すると予想され、表層の細粒部分はワッシュロードとして流出し、中礫以上のものは掃流形式で移動する。河道内においてテラス化していた部分は掃流力の増大に伴う表層の侵食を受け、樹木の流出と河岸侵食による中礫・大礫の供給源となろう。

メモ4 河道管理の方向

今後低水路内にテラス状の地形が形成され、そこには河原性の樹木が侵入し、さらにテラスの標高は少しずつ上昇しよう。すなわち河道の河積が減少し治水安全度は低下する。これに対して樹木の伐採やテラスの掘削を河道管理として実施すべきであろうか。財政制約という与件の元で実行は不可能と見る方が妥当であろう。

余笹川の場合、計画規模の出水においては樹木の流出とテラス堆積物の流出により河積の回

復が期待できるが、勾配の緩い河川ではそれを期待できない。だとしたら改修計画の段階で改修度50年後の河道の姿（成りたがる川幅）を想定した河道計画とするべきではないのか。

6.3 水生生物相の変化

平成10年洪水および災害復旧工事により余笹川の水生生物相にどのような変化が生じたのかを把握するために、1998（平成10）年11月から2002（平成14）年11月において調査された魚類、底生生物、濁度のデータを分析する。

(1) 調査地点・項目・方法

調査地点は図6.3.1に示す。なお各地点の調査年月は、図中に示した。表6.3.1に調査内容の概要を示す。

魚類の調査方法である投網（網目12mm・網裾）は調査地点ごとに水面幅や河床形態が異なるので、投入箇所と箇所数が異なり、3～10箇所の投入を実施した。タモ網（径50cm）による調査は2人で10～30分採取した。セルびんの調査は0～3個を設置30分とした。調査地点における投網、タモ網、セルびんにおける採取箇所の事例を図6.3.2に示す。捕獲努力や採取箇所が調査地点ごと、時期により変化していること、また河道の形状が変化していることにより、調査結果の調査地点間の比較分析、時間変化の分析は、統計的有意性を確保できないと考えるが、採取箇所が調査地点に広く分布していることにより、調査地点における魚種出現数は、ある程度調査地点近傍の環境を表現するものとなっていよう。

底生生物は各調査地点に25cm×25cmのコドラートを4ヵ所設定し、すなわち2,500cm²の底生生物採取した。同時に河床型、流速、水深、水温、河床礫の状態（浮石、沈石）、河床材料（優占する河床材料の区分）を測定した。

(2) 調査結果

①濁度

図6.3.3、図6.3.4に各調査地点の魚類および底生生物調査時の濁度の推移を示す。2001年（平成13）早春までは濁度の高い傾向であるが、工事終了後は濁度が低くなった。2000年（平成12）早春の濁度が高く工事の最盛期であったと推察される。工事により河床材料および河岸材料が掘り返され、敷きならされて河床材料中に含まれるシルト・粘土が流水にさらされる機会が増加し、濁度が増加したのである。

2000年（平成12）12月14～15日にかけて1時間ごとに24時間連続の濁度測定が行われた。その観測結果を図6.3.5に示す。余笹川では黒川が合流する前では、比較的濁度が低く、最大でも20時の62であったが、黒川合流後（St.Y-3地点）は黒川の濁水の影響を受け濁度が高くなった。濁度は、日中に高くなり、黒川および黒川合流後の濁度は13～16時、19～20時にピークが見られ、その後徐々に減少し3～9時に最も低い値となり、11時から再び上昇している。工事は日中に行われ、流水にさらされる場所での河床掘削、敷均時に濁水が発生し、それが流下して濁度の上昇となる。工事は17時には終了するので、工事による濁水発生要因の影響はSt.Y-3地点で10時間ぐらい残るといえよう。

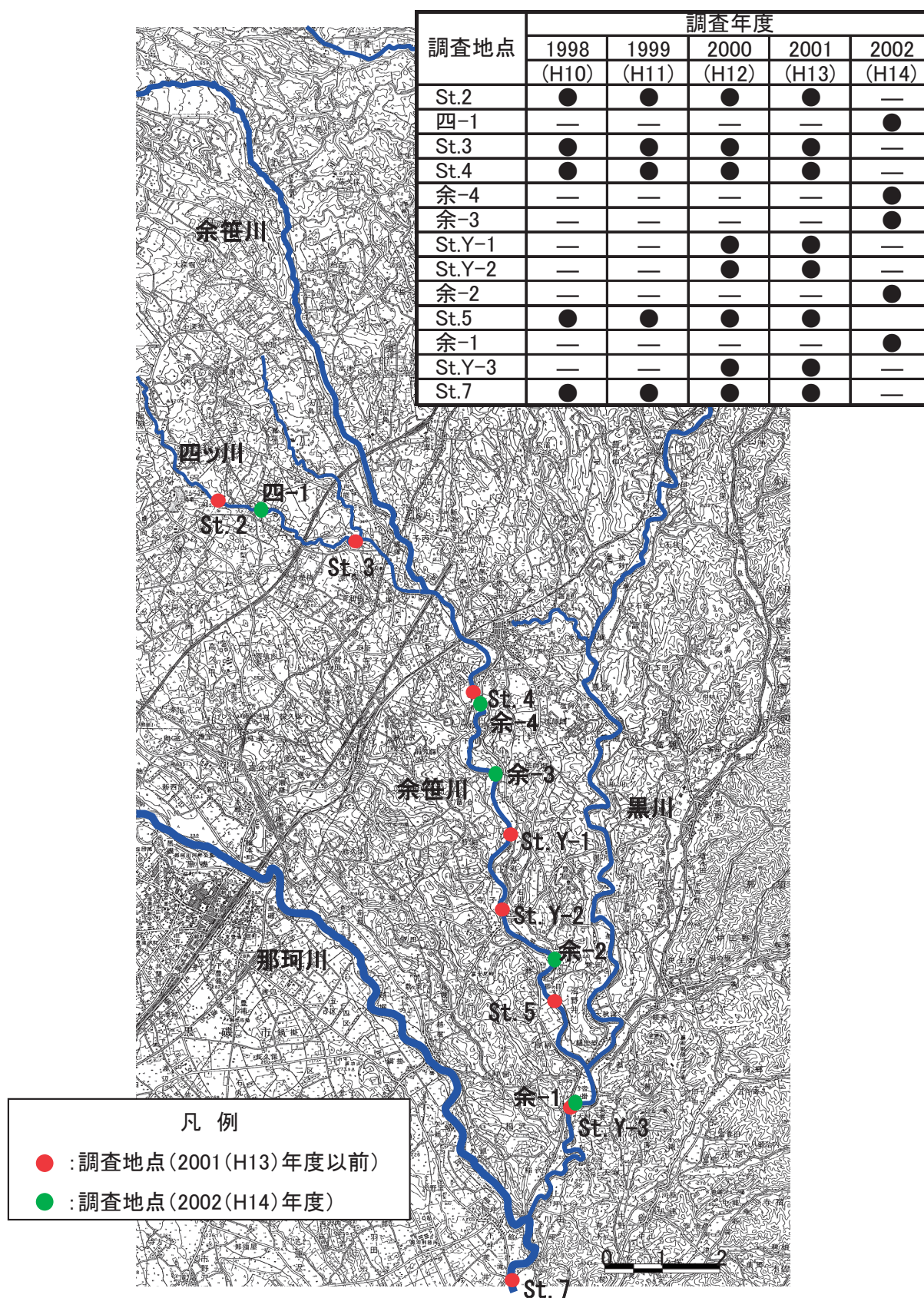


図6.3.1 水生生物相の変化の調査地点

表 6.3.1 水生生物相の変化の調査内容の概要

調査項目		調査時期	調査方法
生物	魚類	●夏季：魚類の行動が活発になり、捕獲が容易になるため。また、アユの捕獲が期待されるため。 ●冬季：種組成、個体数の増減を比較するため。	●投網 ●タモ網 ●セルビン 等を用いた捕獲調査
	底生動物	●夏季：夏から秋にかけて羽化する水生昆虫を把握するため。 ●冬季：冬季に羽化する水生昆虫は少ないため、出現種が多くなることが期待できる。	●コドラート調査：50cm × 50cm の方形区を設定し、方形区内の底生動物を捕獲する。採取回数は、1 地点につき 3 箇所とする。 ●任意採取：多様な河川環境に生息する底生動物を確認するために行う。
無機環境	濁度	●夏季：魚類、底生動物の調査時 ●冬季：魚類、底生動物の調査時	●濁度計を用いて濁度を測定する。濁度は、精製水 1 L 中に標準物質 1mg を含む場合と同程度の濁りを 1 度とする。調査には、標準物質として、ホルマジンを使用する。
	SS	●夏季：魚類、底生動物の調査時 ●冬季：魚類、底生動物の調査時	●室内分析により SS を測定する。SS は、孔径 1 μ m のガラス繊維ろ紙を使用して対象とする水をろ過し、その残存物の量で定義する。

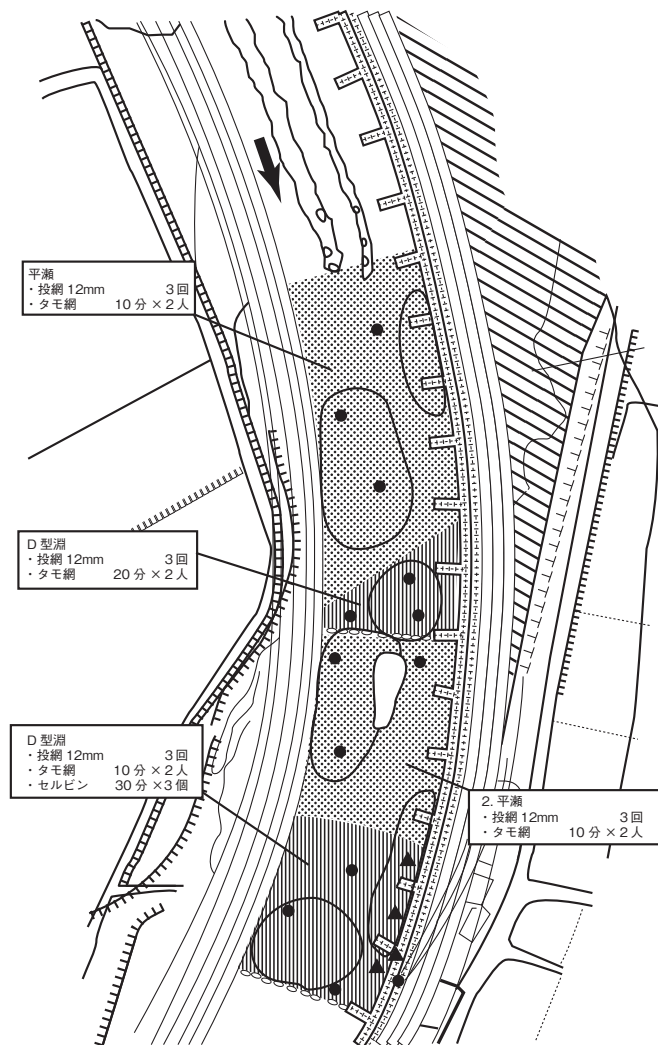


図6.3.2 魚類調査の方法, 場所, 調査量の例

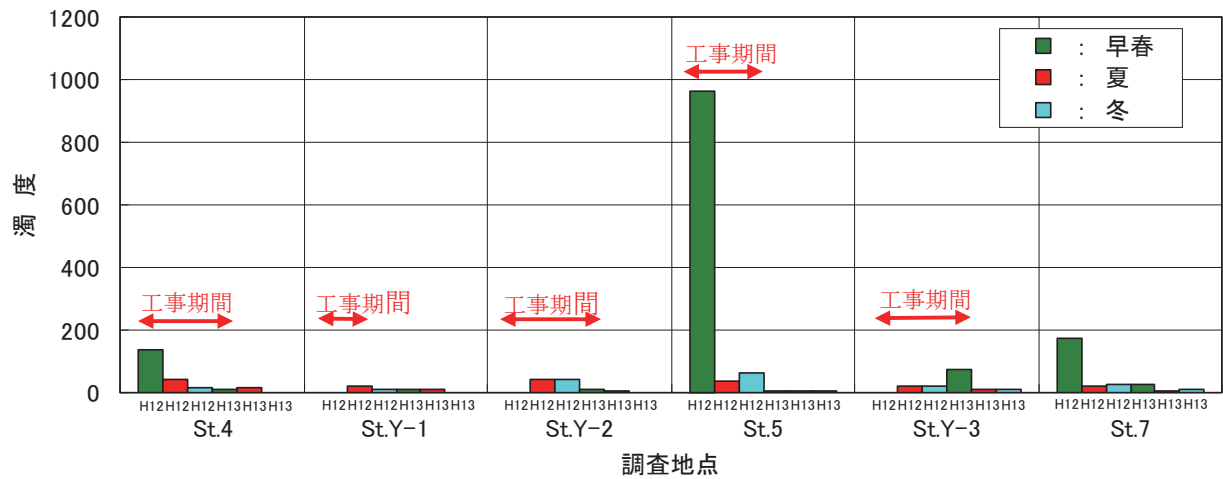


図6.3.3 余笹川の濁度の推移

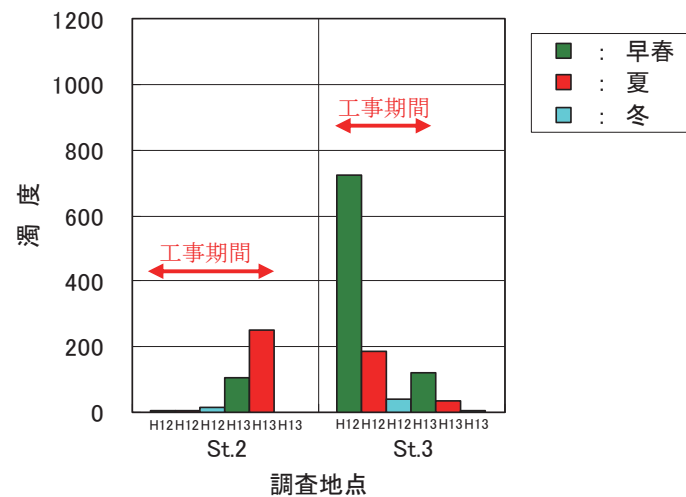


図6.3.4 四ツ川の濁度の推移

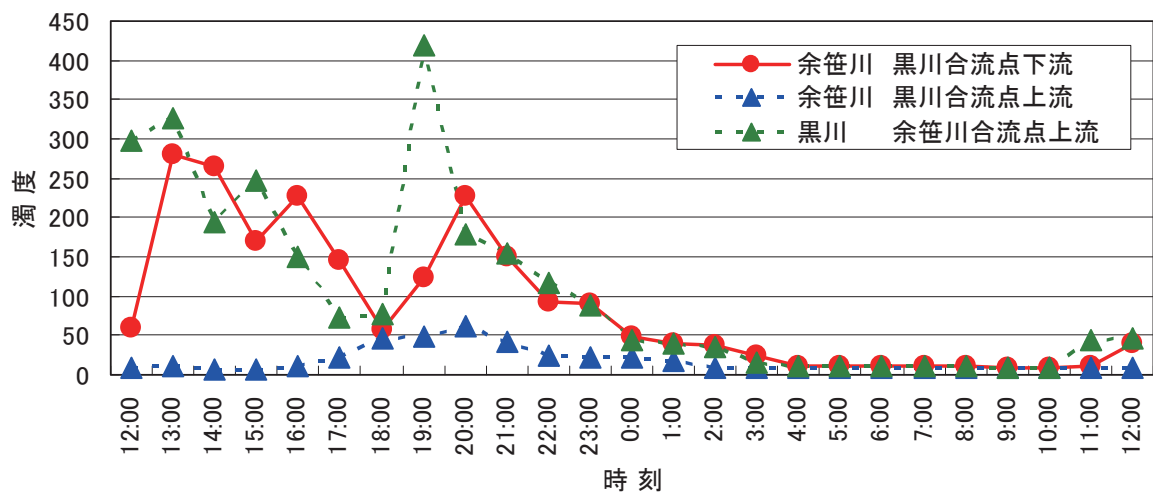


図6.3.5 余笹川・黒川における24時間の濁度の変化(平成12年12月14～15日)

② 魚類

表 6.3.2に余笹川および那珂川で確認された魚種の一覧表を示す。**表 6.3.3**に四ツ川の一覧表を示す。なお那珂川の観測所地点は復旧工事が行われていない。

図 6.3.6および**図 6.3.7**に余笹川本川および那珂川の各調査地点における魚類の確認種数および個体数の推移を示す。工事が始まっていない洪水後約4ヶ月後の1998年（平成10）冬に比較して工事中の魚類の種数および個体数は少ない傾向が見られ、工事後は種数が増加している。各調査地点において種数および個体数は夏季のほうが冬季より多い。

図 6.3.8および**図 6.3.9**に四ツ川の各調査地点における魚類の確認数および個体数の推移を示す。出現種数および個体数に工事の影響があるか明確でない所がある。工事後は種数および個体数は増加している。

2002年度（平成14）の調査結果より各調査地点の河床型と主な生息魚種の間係を**表 6.3.4**に示す。なお河床型の定義は**表 6.3.5**に示す。

表6.3.2 余笹川および那珂川で確認された魚類

No.	種名	余笹川																那珂川						
		St.4				St.Y-1				St.Y-2				St.5				St.Y-3				St.7		
		H10	H11	H12 夏	H12 冬	H13 夏	H13 冬	H12 夏	H12 冬	H13 夏	H13 冬	H10	H11	H12 夏	H12 冬	H13 夏	H13 冬	H10	H11	H12 夏	H12 冬	H13 夏	H13 冬	
1	コイ						2																	
-	フナ属の一種																					1		
2	タナゴ																					1	1	
3	アカヒレタビラ																					1	1	
-	タナゴ属の一種																							
4	オイカワ																							
5	カワムツB型	6																						
6	アブラハヤ																							
7	ウグイ	10	2	3	2	9	2	3	5	9	8	2	12	6	5	13	18	1	4	4	49	7	30	
8	モツゴ																							
9	タモロコ																							
10	カマツカ																							
11	ニゴイ																							
-	コイ科の一種																							
12	ドジョウ																							
13	シマドジョウ	1																						
14	ホトケドジョウ																							
15	ギバチ																							
16	アユ																							
17	ヤマメ	6																						
18	オオヨシノボリ																							
19	トウヨシノボリ																							
20	カワヨシノボリ																							
-	ヨシノボリ属の一種																							
種数		4	1	3	1	8	7	9	8	10	11	4	3	8	5	5	3	2	2	10	7	10	6	
個体数		23	2	6	2	77	23	24	19	144	84	6	15	56	13	32	131	6	2	59	68	62	57	

#1) 赤字は、H13 調査において、各地点で初めて確認された種

#2) 調査日

H10 調査 平成 10 年 11 月 6 日
 H11 調査 平成 11 年 12 月 20、21 日
 H12 夏調査 平成 12 年 8 月 28 日～9 月 1 日
 H12 冬調査 平成 12 年 12 月 10 日～12 月 14 日
 H13 夏調査 平成 13 年 9 月 3 日～7 日
 H13 冬調査 平成 13 年 11 月 30 日～12 月 4 日

表 6.3.3 四ツ川で確認された魚類

No.	種名	四ツ川											
		St.2						St.3					
		H10	H11	H12 夏	H12 冬	H13 夏	H13 冬	H10	H11	H12 夏	H12 冬	H13 夏	H13 冬
1	スナヤツメ										1	1	
2	フナ属の一種											1	
3	タナゴ									1		5	15
4	アカヒレタビラ			1						1		3	
－	タナゴ属の一種											2	20
5	オイカワ											1	4
6	カワムツB型	6	4	28	1	7	27	3		12	4	18	4
7	アブラハヤ		9	3		3							
8	ウグイ	3	14	2	2	2	13	19	7	11	35	11	15
9	モツゴ			1							1	3	10
10	カマツカ											4	
－	コイ科の一種								6	2		4	
11	ドジョウ					2	1	4				8	10
12	シマドジョウ										3	3	1
13	ホトケドジョウ									2			
14	ギバチ					1				2		4	
15	ヤマメ	2		1				2			1	1	
16	トウヨシノボリ		1	1	1	1							
17	カワヨシノボリ									1	2		
－	ヨシノボリ属の一種		1	3	10	17	5			5	2	4	7
種数		3	4	7	3	6	4	4	1	7	7	14	8
個体数		11	29	40	14	33	46	28	13	37	49	73	86

#1) 赤字は、H13 調査において、各地点で初めて確認された種

#2) 調査日

H10 調査 平成 10 年 11 月 6 日

H11 調査 平成 11 年 12 月 20, 21 日

H12 夏調査 平成 12 年 8 月 28 日～9 月 1 日

H12 冬調査 平成 12 年 12 月 10 日～12 月 14 日

H13 夏調査 平成 13 年 9 月 3 日～7 日

H13 冬調査 平成 13 年 11 月 30 日～12 月 4 日

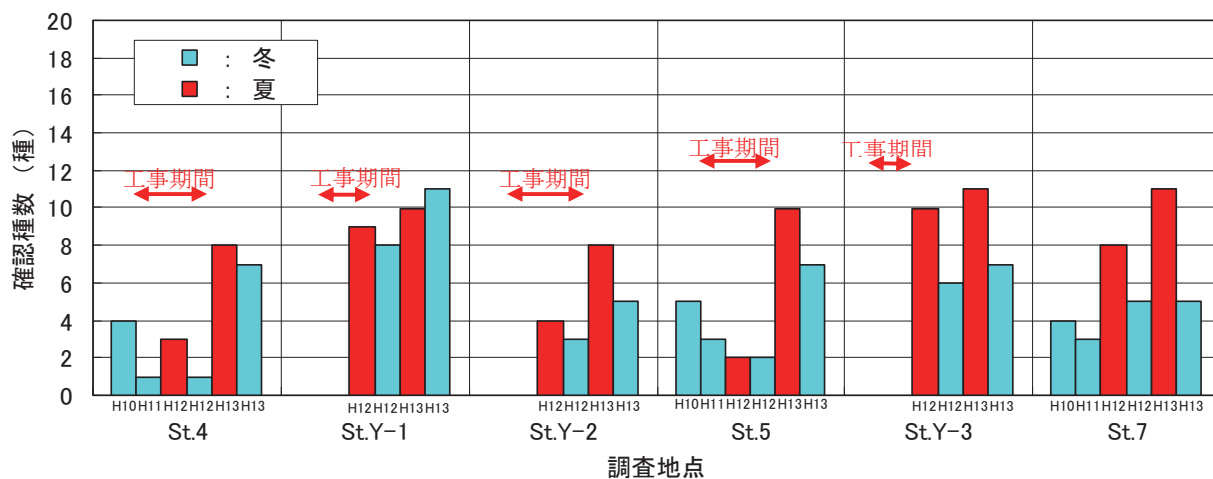


図6.3.6 余笹川および那珂川における魚類確認種数の推移

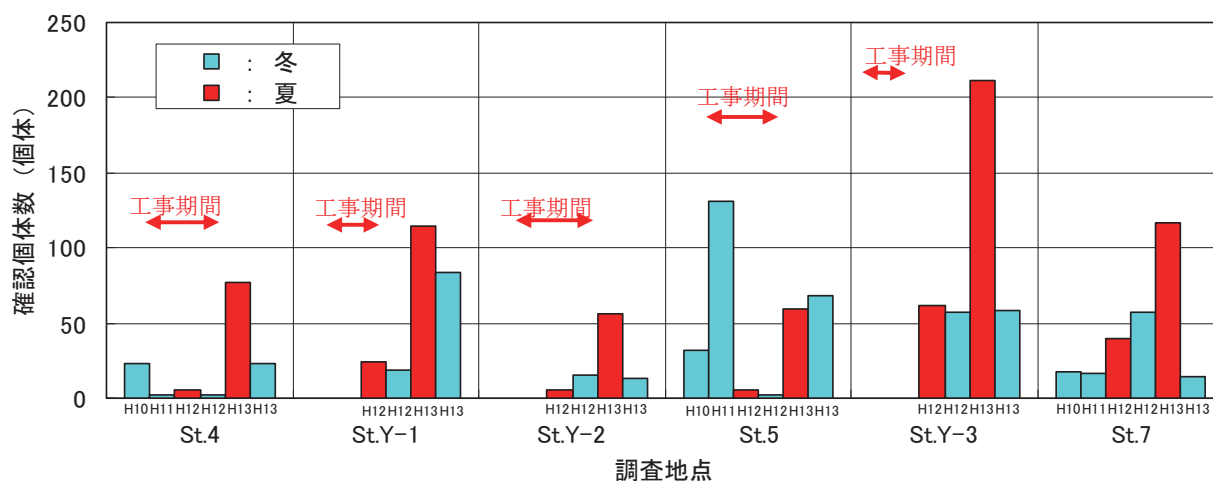


図6.3.7 余笹川および那珂川における魚類確認個体数の推移

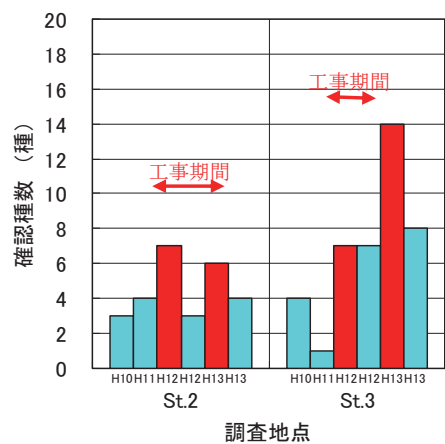


図6.3.8 四ツ川における魚類確認種数の推移

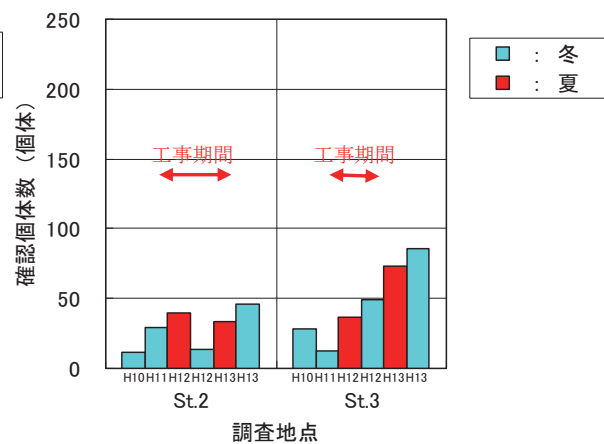


図6.3.9 四ツ川における魚類確認個体数の推移

表 6.3.4 各調査地点の河床型と主な生息魚種の関係

河川	地点		瀬	淵	その他
余笹川	余－1	形態	早瀬，平瀬	M型淵	細流，止水部
		流速	50～100cm/sec	0～50cm/sec	0～10cm/sec
		水深	約70cm	約150cm	約10cm
		河床材料	礫	礫・岩	礫・砂
		生息魚類	－	タナゴ カワムツB型 ウグイ ニゴイ アユ	－
	余－2	形態	早瀬，平瀬	R型淵	細流
		流速	50～100cm/sec	0～50cm/sec	0～10cm/sec
		水深	約80cm	約100cm	約10cm
		河床材料	礫	砂・礫	礫
		生息魚類	オイカワ カワムツB型	カワムツB型	カワムツB型※ ドジョウ
	余－3	形態	早瀬，平瀬	R型淵	細流
		流速	0～60cm/sec	20cm/sec	0～10cm/sec
		水深	約60cm	約80cm	約10cm
		河床材料	礫	礫	砂・礫
		生息魚類	カワムツB型※ シマドジョウ	カワムツB型※ ドジョウ シマドジョウ ヨシノボリ属の一種	カワムツB型※ カマツカ シマドジョウ
	余－4	形態	早瀬，平瀬	R型淵	細流
		流速	0～80cm/sec	20cm/sec	0～10cm/sec
		水深	約60cm	約80cm	約10cm
		河床材料	礫	礫	礫
		生息魚類	オイカワ カワムツB型※ シマドジョウ	カワムツB型※ ウグイ	－
四ッ川	四－1	形態	早瀬，平瀬	R型淵	－
		流速	20～80cm/sec	10cm/sec	－
		水深	約40cm	約50cm	－
		河床材料	礫	礫	－
		生息魚類	カワムツB型※ ウグイ ドジョウ シマドジョウ ギバチ トウヨシノボリ	カワムツB型※	－

注1) －は，調査時に魚類が確認されたなかったことを示す。

注2) カワムツB型の※は，確認固体に稚魚が含まれていたことを示す。

表 6.3.5 瀬・淵・置石の分類

項 目	説 明
早 瀬	水深が浅く、水面が白波立ち流速がもっとも速い場所
平 瀬	水深が浅く、水面がしわのように波立ち流速が速い場所
M型淵	蛇行の水衡部が深掘れした場所 砂礫堆の形成で流路が蛇行し、形成される場合あり
MR型淵	M型淵とR型淵の複合型で、水衡部に岩があり深掘れした場所
R型淵	岩・橋脚、水制工等の周りが深掘れした場所
よどみ	淵のように深掘れしていないが、岩の周りで流速が遅い場所
止水部	流路から隔離され、水たまりになった場所
細 流	流路から分岐し、水深が浅く流速が遅い場所
裸 地	中州・寄州などの砂礫堆
置 石	河道内に点在する 50cm 以上の岩石 調査目的により、識別が容易なものを任意で選定した

※ 出典 河川の生態学 1993 年 水野信彦
平成 9 年度河川水辺の国勢調査マニュアル（河川版）1997 年 国土交通省

②底生動物

表 6.3.6 に余笹川および四ツ川の調査地点で確認された分類群別底生動物確認種数を示す。

図 6.3.10 および図 6.3.11 に余笹川および四ツ川の各調査地点における底生動物確認種数の推移を示す。1998 年（平成 10）8 月末洪水後の 11 月における確認種数が少なく、その後 St.5 を除けば種数は増加している。工事後はさらに種数が増加した。四ツ川では工事による種数の減少が読み取れる。工事が行われていない那珂川 St.7 は種数が増加している。

2002 年（平成 14）調査の調査結果より各調査地点のコドラート調査箇所に出現した底生生物とその生活型（表 6.3.7）、河床型（瀬や淵）の関係を表 6.3.8、表 6.3.9 に示す。地点によって異なるが、生活型別の種数では掘潜型が多いが、個体数では遊泳型と滑走型が多い傾向にある。掘潜型のユスリカ類で多数の種が確認されたが、個体数では遊泳型と滑走型のカゲロウが多かったことによる。瀬と淵では種数および個体数とも瀬のほうが多い傾向にあり、種数より個体数のほうがその差異が大きかった。

同様に、2002 年（平成 14）調査により河川の物理環境と植生、魚類、底生生物の関係は表 6.3.10 のようである。各河床型と生物の関係をまとめると以下のようである。

・瀬

平水時、早瀬や平瀬は水深が浅く、流速が比較的に速い環境である。調査の結果、魚類はオイカワ・カワムツ B 型・ウグイなどの遊泳魚が主であり、底生動物は遊泳型、匍匐型のトビケラ類が多く確認された。植物はミゾソバ・オオイヌタデ・ツルヨシが確認されたが、流速の大きい水際は土砂が動き不安定領域であるので裸地であり、比較的流速の遅い穏やかな場所に生育していた。

・淵

平水時、淵は水深が大きく、流速が小さい環境である。調査の結果、魚類はカワムツ B 型、ウグイ、シマドジョウが確認され、底生動物は余-1 を除いて瀬と同様な種が確認された。余笹川の淵は砂州の形成が顕著でなく淵の水深が小さく、M 型淵に特徴的な掘潜型・携巢型の種は確認できなかった。

・止水域・細流

細流や止水域は水深が小さく、流速が遅いので、一般的には稚魚の生活場として利用され、底生動物では匍匐型・掘潜型の種が生息する。調査の結果、魚類ではカワムツB型（稚魚が多い）・ドジョウ・シマドジョウが、底生動物では掘潜型のトンボ類が確認された。植物はミゾソバ、オオイヌタデが確認された。

表 6.3.6 余笹川・四ツ川の分類群別底生動物確認種数

分類群		平成 10 年 12 月	平成 11 年		平成 12 年			平成 13 年	
			12 月	3 月	8 月	12 月	3 月	9 月	12 月
ウズムシ綱		0	0	1	0	0	0	0	1
線形動物門		0	0	0	0	0	0	0	1
ハリガネムシ綱		0	0	0	0	0	0	0	1
マキガイ綱		0	1	0	2	3	1	4	4
ニマイガイ綱		0	0	0	0	1	1	1	1
ミミズ綱		0	0	2	1	3	2	1	2
クモ綱		0	0	0	0	0	0	0	0
ヒル綱		0	0	0	1	1	0	1	1
甲殻綱		0	1	1	1	3	1	4	3
昆虫綱	トビムシ目	0	0	0	0	0	0	0	1
	カゲロウ目	8	16	22	22	21	19	21	23
	トンボ目	0	2	5	9	6	3	12	12
	カワゲラ目	1	6	8	4	9	8	3	9
	カメムシ目	0	2	2	3	1	1	6	7
	アミメカゲロウ目	0	1	1	1	1	1	1	2
	トビケラ目	9	14	12	9	15	16	6	19
	チョウ目	0	0	0	0	0	0	0	0
	ハエ目	4	10	12	12	15	21	14	28
	コウチュウ目	1	0	1	4	4	3	10	7
	小計	23	51	63	64	72	72	73	108
合計		23	53	67	69	83	77	84	122

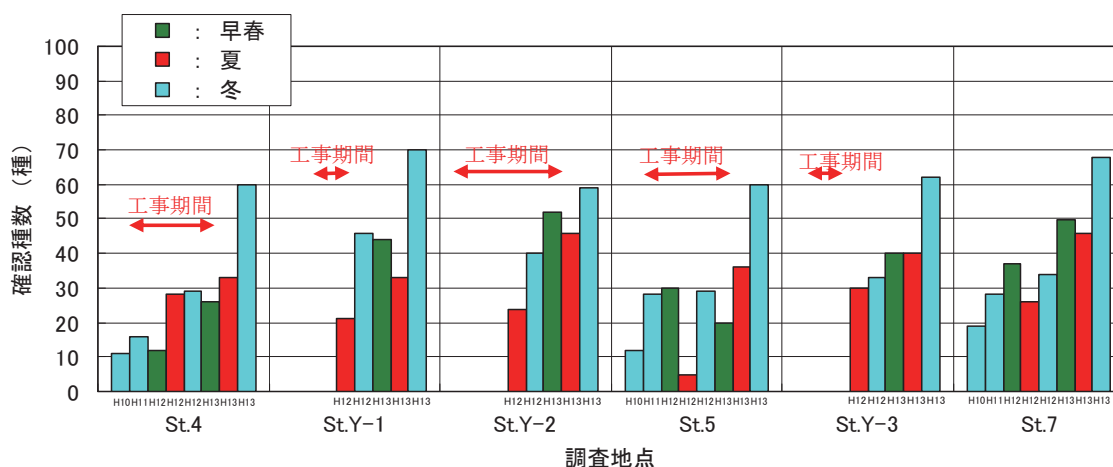


図 6.3.10 余笹川における底生動物確認種数の推移

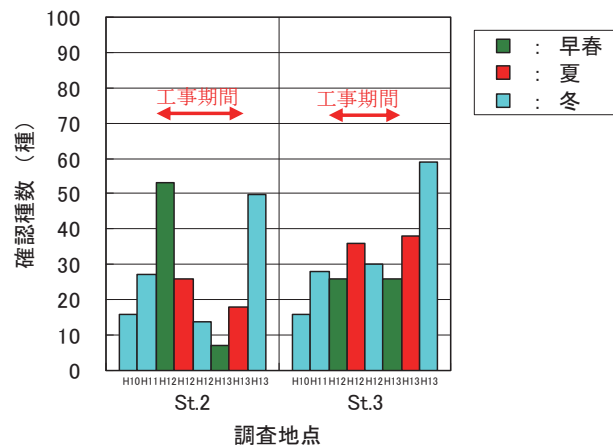


図6.3.11 四ツ川における底生動物確認種数の推移

表 6.3.7 底生生物の生活型

型	特徴	該当する分類群
固着	石表面に吸着し、あまり移動しない	ウスバガガンボ属
造網	糸を用いて網を張り、餌をとる	シマトビケラ科 ヒゲナガカワトビケラ科
携巢	石や落葉で巣を造る	ニンギョウトビケラ科 ヒゲナガトビケラ科
匍匐	のしのしといった感じで歩いて移動する	ヒル類・マキガイ類 マダラカゲロウ科・カワゲラ科
滑走	体は扁平で、石の表面を滑るように移動する	ヒラタカゲロウ科
掘潜	砂や泥の中に潜っている	ミミズ類・モンカゲロウ科 トンボ類・ユスリカ科
遊泳	石の間隙を泳いで移動する	コカゲロウ科
スケート	水の表面を滑走する	アメンボ科
不明	不明	—

※出典 原色 川虫図鑑 2000年 全国農村教育協会

表 6.3.8 生活型別の底生動物の確認種数

地点		余-1		余-2		余-3		余-4		四-1	
形態		早瀬	M型淵	早瀬	R型淵	早瀬	R型淵	早瀬	R型淵	平瀬	R型淵
生活型	固着	1	—	2	1	1	—	1	1	1	3
	造網	3	—	4	4	5	3	5	2	3	5
	携巢	1	—	1	—	1	—	—	—	1	2
	匍匐	3	1	6	8	11	2	6	7	7	8
	滑走	3	—	3	5	4	2	2	4	3	4
	掘潜	4	3	6	5	12	11	11	11	20	14
	遊泳	6	—	9	6	10	5	9	8	9	10
不明		1	—	—	—	3	2	1	2	1	2

表 6.3.9 生活型別の底生動物の確認個体数

地点		余－１		余－２		余－３		余－４		四－１	
形態		早瀬	M型淵	早瀬	R型淵	早瀬	R型淵	早瀬	R型淵	平瀬	R型淵
生活型	固着	1	—	8	5	32	—	13	1	35	34
	造網	22	—	41	21	304	17	35	15	10	147
	携巢	1	—	1	—	1	—	—	—	1	5
	匍匐	3	1	29	21	97	19	27	37	15	21
	滑走	42	—	80	38	119	88	182	117	94	126
	掘潜	7	6	12	8	51	44	36	18	266	178
	遊泳	34	—	222	38	211	87	293	220	229	489
不明		4	—	—	—	—	2	1	5	21	14

表 6.3.10 物理環境と主な魚類、底生動物、水際植物の確認種

河川	地点			瀬	淵	その他	
余笹川	余－１			形態	早瀬，平瀬	M型淵	細流，止水部
				流速	50～100cm/sec	0～50cm/sec	0～10cm/sec
				水深	約70cm	約150cm	約10cm
				河床材料	礫	礫・岩	礫・砂
		主な確認種	魚類	－	カワムツB型 ウグイ	－	
			底生動物	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	ユスリカ科	トンボ目	
			水際植物	－	－	ミゾソバ	
						オオイスタデ	
	余－２			形態	早瀬，平瀬	R型淵	細流
				流速	50～100cm/sec	0～50cm/sec	0～10cm/sec
				水深	約80cm	約100cm	約10cm
				河床材料	礫	砂・礫	礫
		主な確認種	魚類	オイカワ カワムツB型	カワムツB型	カワムツB型※ ドジョウ	
			底生動物	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	トンボ目	
			水際植物	ツルヨシ	－	ミゾソバ	
				ミゾソバ		オオイスタデ	
	余－３			形態	早瀬，平瀬	R型淵	細流
				流速	0～60cm/sec	20cm/sec	0～10cm/sec
				水深	約60cm	約80cm	約10cm
				河床材料	礫	礫	砂・礫
		主な確認種	魚類	カワムツB型※ シマドジョウ	カワムツB型 ※ シマドジョウ	カワムツB型※ シマドジョウ	
			底生動物	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	トンボ目	
			水際植物	ミゾソバ オオイスタデ	－	オオイスタデ	
	余－４			形態	早瀬，平瀬	R型淵	細流
				流速	0～80cm/sec	200cm/sec	0～10cm/sec
				水深	約60cm	約80cm	約10cm
				河床材料	礫	礫	礫
		主な確認種	魚類	オイカワ カワムツB型※	カワムツB型 ※ ウグイ	カワムツB型（稚） －	
			底生動物	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科		
水際植物			－	－	ミゾソバ		
四ッ川	四－１			形態	早瀬，平瀬	R型淵	－
				流速	20～80cm/sec	10cm/sec	－
				水深	約40cm	約50cm	－
				河床材料	礫	礫	－
		主な確認種	魚類	カワムツB型※ シマドジョウ	カワムツB型 ※	－	
			底生動物	カゲロウ目 カワゲラ目 トビゲラ目	カゲロウ目 トビゲラ目 ユスリカ科	－	
			水際植物	ミゾソバ	－	－	

注1) —は調査時に確認されなかったことを示す。

注2) カワムツB型の※は、確認固体に稚魚が含まれていたことを示す。

(3) まとめ

余笹川の底生動物は平成10年8月末洪水という自然攪乱とその後の改修工事という人為的攪乱という2つの攪乱を受けた。

自然攪乱により河床材料は移動攪乱を受けた。移動性の少ない底生動物は壊滅的破壊を受けたと想定される。2000年（平成12）11月における底生生物種数および個体数が少ないことはこれを裏づけている。同様に2002年（平成14）7月洪水直後も底生動物の種数および個体数が減少している。底生動物の自然および人為的河床攪乱からの回復は早く、1年程度で回復するようである。

魚類は工事により生息場である河床の攪乱および濁度の増加、餌の減少により種数および現存量が減少したと推定されるが、調査結果では明確に結論できない。

メモ5 魚類の調査法

洪水および人為的河道整形による魚類の応答（種構成、サイズ、個体数の変化）を把握するのに、余笹川の調査で実施された調査計画が適切であったか反省するところがある。

時間の経過の中で河床地形、河床材料が変わり、また調査時点での河川流量や、調査時刻、天気が異なり、また投入され得る資源制約下で魚相と現存量の変化を捉えるための調査計画をいかに設計したらよいのであろうか。

7. おわりに

日本の河川の河道計画および河川構造物の設計論は一級河川の大管管理区間の河道特性を基に構築されている。山間谷底平野を流れる河川の河道特性は、一級河川の大管管理区間と似ているのであろうか。気になっていたが調査研究する機会が無かった。今回、余笹川の河道特性を検討する場を得て、その特異性に気付かされた。

時間軸上でのC集団の機能変化についての研究が必要である。また河道特性の分析に当って、小セグメントに河道を区分し、さらにリーチスケール（蛇行、砂州のスケール）で地質構造と岩質を同定し、それが河道特性に及ぼす影響について研究する必要がある。

1級河川の大管管理区間（直轄区間、10,534km）については、河川管理行為のため河道、河川環境について継続的にモニタリングがなされ、その変遷を分析する基礎情報として利用可能であるが、指定区間（77,025km）および2級河川（36,010km）を管理する県では、管理区間が直轄区間の約11倍もあり、また財政の制約から、山間部の河川についての河道および河川環境の調査を実施できる状態にはない。

大規模災害後の改良復旧後の河道および河川環境の変化について河川管理行為として調査がなされないのである。大規模人為インパクトとその応答を把握するのは10年以上に亘る目的意識を持った継続調査が必要である。調査結果の分析とその評価は、今後の災害復旧費のコスト削減や環境を内部化する復旧計画の策定方針の改善に役立つはずである。今はそれを担う組織体がない。調査結果を分析・統合化する公的研究センター（既存組織で良い）が必要であると考え。

本報告の図表、写真の整理および2009年（平成21）5月の現地調査に当っては、当研究所第4部研究員 鈴木克尚、佐々木博章の手を煩わした。記して感謝する。

注

注1) サンプル資料の処理

本来の線格子法（山本，1971）によるサンプリングを実施すれば，測定時間の短縮が可能であったが指示の徹底がなされず，テープ下の表層河床材料を全て採取した。この採取法からいかに表層材料の面積支配確率密度 $s(x)$ を評価するか示す。

一定の長さ L を考える。その直線の直下にある石径 $x=d$ を Δx の小区間にわけ $(n-1)\Delta x \leq x < n\Delta x$ にある礫個数を $g(n\Delta x)$ とする。

$$L = \beta_1 \sum X_n \cdot g(n\Delta x) \dots\dots\dots (A-1)$$

となる。ここで $X_n = (2n-1)/2 \cdot \Delta x$ である。ここで β_1 は礫の相互の重なり率であり，粒径階毎に異なるが一定値とする。

L の長さを持つ幅 Y の長方形の面積を考える。ある礫径がランダムに存在すれば， L 方向に直線を置いたとき，その線下に存在する $(n-1)\Delta x \leq x < n\Delta x$ にある礫個数は，どこに線を置いても $g(n\Delta x)$ であるから，面積 $L \cdot Y$ の存在する礫径 X_n の面積支配密度 $s(X_n)$ とすると，

$$\begin{aligned} s(X_n) \Delta x \cdot L \cdot Y &= \beta_1 \pi/4 \cdot X_n^2 \cdot g(n\Delta x) \cdot Y \cdot X_n \cdot (\pi/4 \cdot X_n^2) \\ &= \beta_1 \cdot X_n \cdot g(n\Delta x) \cdot Y \dots\dots\dots (A-2) \end{aligned}$$

したがって

$$s(X_n) \Delta x = X_n \cdot g(n\Delta x) / \sum [X_n \cdot g(n\Delta x)] \dots\dots\dots (A-3)$$

となる。

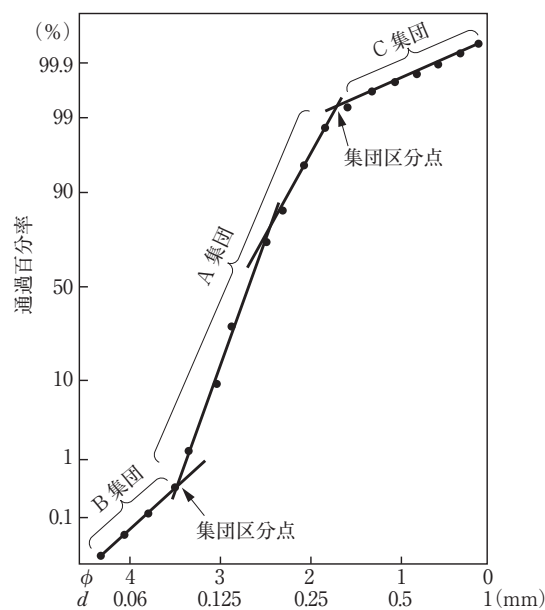
表層と粒度分布が表層下も同じだとすると，篩分け試験による粒度分布密度（重量による） $f(x)$ と $s(x)$ は，ほぼ同じ密度を持つので，式（A-3）を用いて表層材料が地表と同じである場合の $f(x)$ を推定できる。

注2) 粒径集団

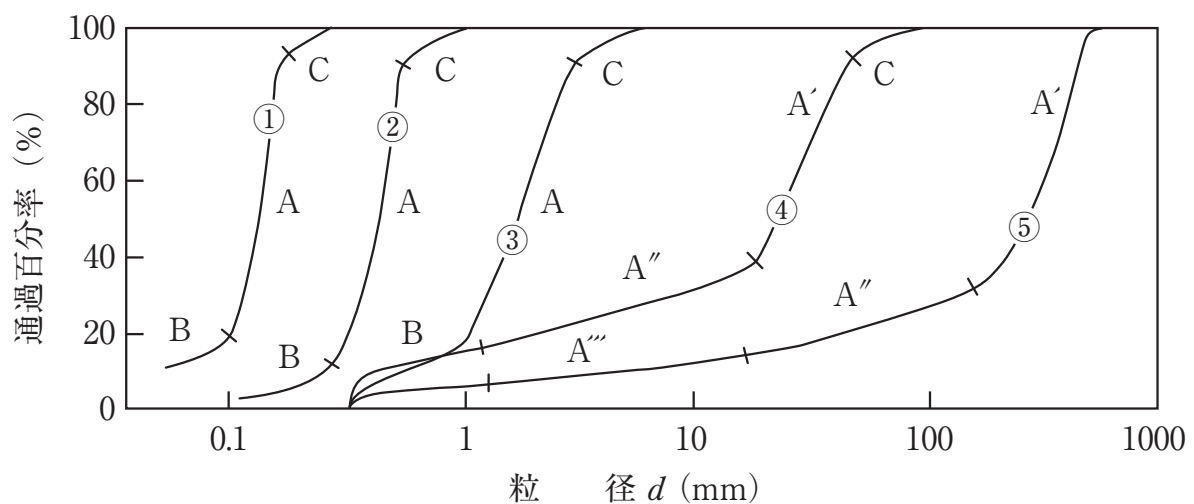
河床材料の ϕ 粒径（ $\phi = -\log_2 d$ であり， d は粒径で単位は mm）の粒径分布形は，正規分布形に近いといわれているが，実際には，特性の異なる三つ以上の集団を持っているのが普通である。堆積学では図 B.1 のごとく河床材料の主モードである集団を A 集団，それよりも細かいものを B 集団，A 集団より粒径の大きいものを C 集団と呼んでいる。河床材料の粒度分布形は，A，B，C 各集団の粒度分布形が対数正規確率密度を持つ粒度分布形とみなし，各集団の粒度分布形の合成されたものと解釈されることが多い（Spencer，1963；Klovan，1966；Visher，1969；Middleton，1976）。確かに砂床河川では，A，B，C 各集団の粒度分布形が対数正規確率密度を持つ粒度分布形とみなし，各集団の粒度分布形の合成されたものと解釈することは経験的事実と合い妥当性を持っているが，砂利河川では A 集団と見なされる粒径範囲が広く，それを1つの集団と見なすことには問題が多い。A 集団を2つあるいは3つに分けた方がよい場合が多く，その場合は，大きい方からそれぞれ A'，A''，A''' 集団と名付ける。

対数正規分布を持つ粒径集団を合成したものとして河床材料の分布形を解釈していく場合には、各集団の粒径存在範囲を設定することができないが、河床材料の分級堆積現象の解釈や工学上の技術問題を取り扱うには、**図B.2**に示すように集団区分粒径 (diameter of population break) を決め、この区分粒径によって粒径の存在範囲を定め、その範囲ごとの粒径集団の移動特性と移動量を評価することが、河床変動の解釈・評価や土砂の分級機構を説明・解釈する上で実用的だからである。

ところで河川工学、地盤工学では、一般に粒度分布形を**図B.2**に示すように片対数紙に描くのが普通である。この場合、粒径集団区分粒径は、**図B.2**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。なお、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。



図B.1 河床材料の粒度分布 (ϕ スケール)



図B.2 種々の粒度分布形におけるポピュレーションブレイク

- 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、河床に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。勾配の急変点が明確でない場合は、2.0mm を区分粒径と仮設定する。
- ④ A' 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うることが多いが、細粒分の多い河床材料の場合、勾配の急変点 that 明確でないことがある。この場合は、滞筋部の表層材料の粒度分布 (ほぼ C 集団と A' 集団からなることが多い。線格子法 (山本, 1971) 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。
- ⑤ A' 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を把握すること、河川で生じる種々の現象を解釈することが、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原因は、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, 1973), 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。なお、流下土砂は、流下過程においても磨耗・碎破が生じるが、流下方向の河床材料の粒度分布への影響度は沖積地においては大きなものでない。

④、⑤における 8 という数字は、混合粒径河床材料での移動床実験より同一運動形態を持つ粒径範囲の検討 (山本, 2004c)、実河川の河床材料の粒度分布形より定めたものであるが、セグメント 1 における小セグメント間の粒径分布形の変化を詳細に見ると 4 程度で粒径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，砂州や湾曲部の土砂の平面的な土砂の粒度分布における粒径集団の差異などである．いずれにしても⑥のプロセスを実施し対象河川の実態に合った、また技術目的に合った粒径集団区分を行うべきである．余笹川では4程度で粒径集団の分離があるとした．

なお砂河川におけるA 集団の d_{60} とB 集団の d_{60} との関係は、セグメント間の粒径変化、粒度分布形、高水敷堆積物粒度分布形と分級特性から、概略、表B.1のようにまとめられる（山本，2002）．

次に代表粒径の考え方について記す．代表粒径 d_R とは、河床の動きやすさを規定する粒径である．ところで河床材料、特に60%粒径が1cm以上である場合は、大粒径から小粒径まで含む均一度の悪い粒度構成となっている．このうち小粒径のものは大粒径間に存在するマトリクス集団であり、低水路河床高の変化にあまり関係しない．河床変動に影響するのはC, A' 集団であり、また河床の動き易さを規定するのもこの集団である．

そこで河床の動き易さ、河床変動に影響を与える指標として、C 集団、A' 集団のみからなる河床材料の粒度分布より、その平均粒径、あるいはその60%通過粒径を、これを求めて代表粒径とする．

一般にA'' 集団以下の粒径成分が20%以下の場合には、60%通過粒径 d_{60} （あるいは平均粒径 d_m ）を代表粒径としてもよいが、A'' 集団以下の材料が30%以上を占めるような場合は、C 集団とA' 集団のみからなる河床材料の粒径加積分布曲線を新たに作成し、その60%通過粒径（あるいは平均粒径）を求め、これを代表粒径 d_R とする．

表 B.1 砂および小礫を河床材料に持つ河川のA 集団とB 集団

A 集団 (mm)	B 集団 (mm)	事例
0.15 ～ 0.2	シルト・粘土	利根川・鶴見川
0.3 ～ 0.4	0.1 ～ 0.2	利根川・江戸川・木曽川
0.5 ～ 0.6	0.2 ～ 0.3	木曽川・関川・Apure 川
2.0 ～ 3.0	0.3 ～ 0.6	揖斐川・庄内川・矢作川

注3) 沖積河川の川幅

山本（山本，2004e）によると、沖積河川の川幅は、代表粒径、河床勾配、平均年最大流量の関数である．代表粒径を中礫集団の6cm、 $\tau_{*d_R}=0.065$ 、河床勾配1/110、平均年最大流量170m³/s とすると、川幅は86mと評価される．代表粒径を大礫集団の25cm、 $\tau_{*d_R}=0.065$ とすると14.3mと評価される．

注4) 混合粒径の移動限界掃流力

混合砂礫の移動限界掃流力の評価法を示す（山本，2004c）．

Egiazaroff, I.V. (1965) は、混合砂礫の粒径別移動限界掃流力を表わす式として以下の式を提案した．

$$\tau_{*ci} = u_{*ci}^2 / sgd_i = 0.1 / [\log_{10} 19 (d_i / d_{ave})]^2 \dots\dots\dots (C.1)$$

ここで、 u_{*ci} は粒径 d_i のものが移動限界状態であるときの摩擦速度である。 d_{ave} は河床材料の平均粒径 d_{bm} と流砂の平均粒径 d_{sm} の幾何平均値を取るのがよいとしている。

この式は、粒径 d_i の粒子に作用する流体力 R_{Ti} を評価するための流速 u_i が河床面より $a \cdot d_i$ の位置にある流速であり、河床凹凸を表わす相当粗度 κ_s はほぼ d_{ave} と等しく、流速分布が対数分布則にのるものとし、

$$u_i/u_* = 5.75 \log_{10} (30.2a \cdot d_i/d_{ave}) \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

で評価され、次に移動限界状態では R_{Ti} がそれに抵抗する摩擦力 F_i とつり合うとして求めたものである。すなわち

$$R_{Ti} = \rho_w / 2 \cdot C_{Di} \cdot u_i^2 \cdot \pi / 4 \cdot d_i^2 \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

$$F_i = \pi / 6 \cdot d_i^3 (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot \mu \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

が等しいとして、式 (C.2) を代入し、 $C_{Di}=0.4$ 、 $a=0.63$ 、摩擦係数 $\mu=1.0$ として求めたものである。

芦田・道上 (1971) は、アーマリング過程にある混合砂の粒径別移動限界掃流力として Egiazaroff の式を用いると小粒径が大粒径より移動限界掃流力が大きくなってしまい実際の現象と合わないとし、これを修正し

$$\begin{aligned} d_i/d_m > 0.4 \text{ で } u_{*ci}^2/u_{*cm}^2 &= \tau_{*ci}/\tau_{*cm} \cdot d_i/d_m \\ &= [\log_{10} 19 / \log_{10} 19 (d_i/d_m)]^2 \cdot d_i/d_m \quad \dots\dots\dots (C.5) \end{aligned}$$

$$d_i/d_m < 0.4 \text{ で } u_{*ci}^2/u_{*cm}^2 = \tau_{*ci}/\tau_{*cm} \cdot d_i/d_m = 0.85 \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

とした。

これは平野の実験 (初期河床材料 $d_m=1 \sim 1.3\text{mm}$ 、 $d_{84}/d_{16}=5 \sim 7$) (平野, 1972) および芦田・道上の実験 (初期河床材料 $d_m \div 2.5\text{mm}$ 、 $d_{84}/d_{16}=14$ 、ただし 0.3mm と 5mm の二峰性粒度分布) の結果より求めた $q_{si}/u_* d_i f_{bi}$ と τ_{*i} の関係図より、流砂量の急減していく τ_{*i} を τ_{*ci} とし、また d_{ave} の代わりに表層河床材料の d_m を用いて求めたものである。なお平野は $q_{si}/u_* d_i f_{bi}/\tau_{*i} = 0.2$ となる点の τ_{*i} を τ_{*ci} としている。さらに上式の d_m に対する τ_{*cm} は彼らの実験結果より評価している。

以下に実験結果を用いて式 (C.5)、(C.6) の適用性について検討してみよう。

(1) d_{84}/d_{16} が4以下の場合

木下 (1961) の実験および山本ほか (1978) の行った実験によると、 d_{84}/d_{16} が4以下の場合、河床材料は同時に動き出し、また停止し、均一砂とみなしてよい。したがって粒径別移動限界掃流力は、

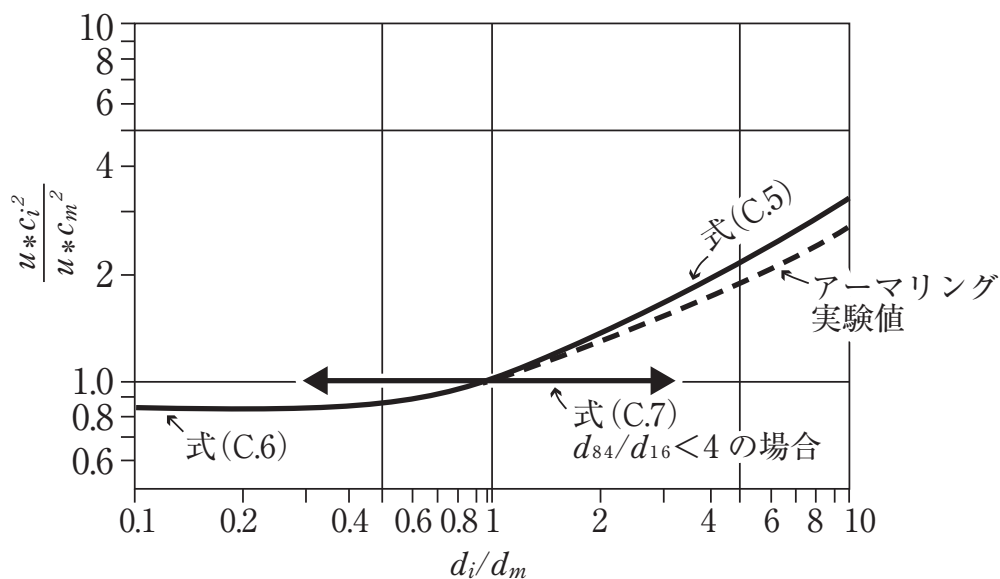
$$u_{*ci}^2/u_{*cm}^2 = \tau_{*ci}/\tau_{*cm} \cdot d_i/d_m = 1 \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

となる。ただし、適用 d_i/d_m の範囲は0.3から3程度の間である。図C.1に式 (C.7) より評価された u_{*ci}^2/u_{*cm}^2 と d_i/d_m の関係を図示した。

(2) 河床表層材料の d_{84}/d_{16} が4以上で、河床がアーマ化過程にある平坦河床の場合

平野 (1972) の実験 (初期河床材料の $d_m=1 \sim 1.3\text{mm}$ 、 $d_{84}/d_{16}=5 \sim 7$)、深見他 (1978) の実験 (初期河床材料の $d_m=3.3 \sim 4.5\text{mm}$ 、 $d_{84}/d_{16}=12 \sim 25$) の結果より粒径別移動限界掃流力を求めると、式 (C.5)、(C.6) とほぼ一致するが、 d_i/d_m が2以上では多少式 (C.5) で評価される値より小さく、図C.1の太点線くらいの値である。

表層河床材料の d_m 相当粒径の無次元移動限界掃流力 τ_{*cm} は、平野の実験で0.04程度、深見他



図C.1 混合粒径河床材料の移動限界掃流力

の実験では0.03程度となっている。実験終了時の d_m は、平野の実験で2～2.5mm、深見他の実験で4～10mmくらいであるので、均一粒径であれば移動限界無次元掃流力は、それぞれ0.05, 0.06程度となる。以上のことは、アーマ化過程にある河床材料表層の d_{84}/d_{16} が大きいほど、 d_m に相当する均一粒径の無次元移動限界掃流力 τ_{*cmu} に対する混合砂礫の無次元移動限界掃流力 τ_{*cm} の比、 τ_{*cm} / τ_{*cmu} が小さくなることを示している。

なお、混合粒径河床材料を用いた移動床実験における表層の材料の採取法は、通常最大粒径程度の厚さの表層砂礫をていねいに採取し（実際には採取厚に相当する材料を確実に採取できない）、ふるい分け試験を行い、重量を測定し、ふるい目の通加累積関数 $F_s(d_i)$ を求め、これを表層の河床材料の粒度分布としている。

この方法は、河床表面に存在する全粒子と表面にある小粒径下の河床材料のうち、大きい粒径成分を除いたものを採取し、その重量密度累加関数を求めたことに相当する。これは、河床表面に存在する全粒子の重量分布密度累加関数 $B(d_i)$ に河床材料の小粒径分を付加し修正した累加関数といえる。

ここではこの方法で求めた各測定者の表層材料の粒度分布形を、そのまま $S(d_i)$ の概略推定値と位置づけて、混合粒径河床材料の移動床の水理特性を分析している。既存の混合粒径河床材料を用いた移動床実験データを用いる限り、 $S(d_i)$ が測定されていないので、これしか方法が無いのである。

実河川のアーマ化した河床表層（線格子法によるある粒径の表面における面積支配確率密度の累加関数）の d_{84}/d_{16} は4～5程度である。（1）によれば、この状態の表層河床材料は同時に動き、停止し、無次元移動限界掃流力は0.06程度となる。粗粒化前の状態では、この無次元掃流力以下で移動し得た粗粒集団が一旦表層を覆うと移動し得なくなるのである。

注5) 表層河床材料の粒度分布と移動限界掃流力

完全にアーマ化した河床表層材料とアーマ化過程にある河床表層材料で、ある粒径に対する移動限界掃流力がなぜ異なるのであろうか。アーマ化された河床ではアーマ化された表層は最大粒径程度であり、河床表層材料は均一性を増し、大礫は河床から突出せず、小粒径はアーマ層の下部に存在する。一方、アーマ化過程にある表層材料は小粒径が表層上部にも存在し、また大礫が突出する機会があるので、大礫に作用する流体力が大きく、かつ回転半径が大なので、移動に要するより流体力が小さくなるのである。また表層材料の d_{84}/d_{16} が大きいほど移動し易いことも理解できよう。

参考文献

- 芦田和男, 道上正規: 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京大防災研究所報告第 14 号 B, pp.259 - 274, 1971.
- 池内幸司: 北川激特事業における良好な河川環境の保全・復元を目指した川づくり, 河川 (通巻 641 号), (社) 日本河川協会, 1999.
- 伊藤和典ほか: 平成 10 年 8 月末の那須出水による余笹川の流路変化の特性, 水工学論文集, 第 44 巻, 2000.
- 上野鉄男: 余笹川流域の 1998 年水害の発生構造について, 自然災害科学 JJSNDS24 - 3, pp.303 - 321, 2005.
- 木下良作: 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料第 36 号, pp.73 - 138, 1961.
- 国土庁土地局国土調査課: 土地分類図 (栃木県), 昭和 49 年 (復刻版), (財) 日本地図センター, 1996.
- 国土庁土地局国土調査課: 土地分類図 (福島県), 昭和 49 年 (復刻版), (財) 日本地図センター, 2001.
- 須賀堯三, 池田裕一, 伊藤和典: 横侵食河道の治水対策と土地利用のあり方—余笹川の場合, 河川整備基金助成事業報告書 11 - 1 - ④ - 14, 2000.
- 栃木県余笹川流域河川改修事務所: 安全で緑豊かな川を目指して～平成 10 年 8 月末豪雨 余笹川流域河川災害復旧事業の記録～, pp.128 - 130, 2003.
- 栃木県: 1 級河川那珂川水系 余笹川災害復旧事業計画書 (一定災), p.49, 1999.
- 深見親雄, 葛西敏彦: 混合粒径砂の流送実験資料集, 土木研究所資料第 1390 号, 1978.
- 三品智和, 須賀如川: 余笹川大洪水災害復旧 10 年後の河道変化に関する考察, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp.261 - 266.
- 平野宗夫: 混合砂礫の流砂量と平衡河床に関する研究, 土木学会論文集 201 号, pp.118 - 127, 1972.
- 山本晃一: 礫河床のサンプリングと統計処理, 土木技術資料 Vol.13 - 7, 1971.
- 山本晃一: 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, pp.1 - 20, 1976.
- 山本晃一: 気候・地形・地質が河道特性に及ぼす影響に関する研究ノート, 土木研究所資料第 2795, pp.47 - 65, 1989.

- 山本晃一：構造沖積河川学，山海堂，pp.126 - 137, 2004a.
- 山本晃一：同上，pp.81 - 100, 2004b.
- 山本晃一：同上，pp.54 - 80, 2004c.
- 山本晃一：同上，pp.385 - 458, 2004d.
- 山本晃一：同上，pp.157 - 172, 2004e.
- 山本晃一：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.
生態系基盤としての河川地形に及ぼす自然的攪乱・人為的インパクトとその応答，（財）河川環境管理財団，p.46, 2002.
- 山本晃一，深見親雄：河川における土砂の移動機構に関する研究ノート，土木研究所資料第 1416 号，pp.18 - 151, 1978.
- 山本晃一編著：護岸・水制の計画・設計，山海堂，2003.
- 山元孝広：1/20 万「白川」図幅地域の第四紀火山：層序及び放射年代地に関する新知見，地質調査研究報告，第 57 巻，第 1/2 号，pp.17 - 28, 2006.
- 山脇正俊：近自然工学～新しい川・道・まちづくり～，信山社サイテック，pp.79 - 80, 2000.
- （財）河川環境管理財団：ノート 河道・河川環境特性情報編集とその展開，河川環境総合研究所資料第 22 号，2007.
- （財）リバーフロント整備センター：河川環境表現の手引き（案），1999.
- Egiazaroff, I.V.:Calculation of nonuniform sediment concentrations, ASCE, Vol.91, Hy.4 July, pp.224 - 227,1965.
- Klovan, J. E.: The use of factor analysis in determining depositional environments from grain - size distributions;Journal of Sedimentary Petrology, Vol.36, No.1, pp.115 - 125, 1960.
- Middleton, G. V.:Hydraulic interpretation of sand size distribution, Journal of Geology, Vol.84, pp.405 - 426, 1976.
- Spencer, D. W.:The interpretation of grain - size distribution curves of clastic sediments, Journal of Sedimentary Petrology Vol.33, No.1, pp.180 - 190, 1963.
- Visher, G. S.:Grain size distributions and depositional processes, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.39, No.3, pp.1074 - 1106, 1969.

ノート 狭隘谷中小河川における大規模災害復旧計画の課題と対応

大規模災害復旧計画に関わり考えることがあった。ノートとして残しておく。

[1] 災害復旧計画策定上の課題

災害復旧事業は、被災を受けた施設を復旧するための事業であることから、通常の河川改修事業とは実施の考え方や手続きが異なり、災害復旧計画を策定する上で種々の制約がある。その主な事項は、以下の2点と考えられる。

① 時間的な制約

災害復旧事業は、被災の状況や被災原因により、災害復旧事業（原形復旧）と改良復旧事業に大別される。災害復旧事業の種類によって異なるが、被災から復旧工事実施までの間に、被害調査、被災原因の究明、復旧方針の設定、復旧計画（河道計画、施設計画）の策定、現地調査（査定）、全体計画（整備計画）の策定及びこれに伴う関連機関との協議や用地の取得等を短期間に実施する必要がある。

論文、図5.1.1に示した平成10年豪雨で被災した余笹川における災害発生から改良復旧事業実施までの流れのように、余笹川では、被災後災害査定までの約3ヶ月の間に復旧計画と計画策定に必要な調査・検討が行われている。また、災害復旧工事は、余笹川3年、黒川4年、四ッ川5年で実施された。それぞれの河川の事業対象延長は、16.0km、28.9km、7.25kmである。

② 復旧計画策定に必要な環境等の情報の不足

災害復旧に限らず、河川の改修計画による河道改変による環境の変化を検討する際には、河川特性と河川及び流域の環境特性、社会特性（土地利用、用水など）を把握し、環境の保全と整備の目標を設定し、河道改変等のインパクトに対する河道形態等の物理的応答とその上に乗る生態系の応答を評価することが必要となる。さらに、災害復旧計画の策定にあたって、被災状況、被災原因に関する情報も必要である。

一般に、直轄管理河川では、河川水辺の国勢調査が行われ、河道の縦横断測量も定期的実施されている。一方、その上流部に位置する指定河川は、都道府県等が管理する。近年に改修を行った場合や改修計画を策定中である場合を除けば、平面図や縦断面図・横断面図も整備されていない場合が多い。したがって、被災前の河道状況や河川環境を把握するための情報が限られている。

[2] 大規模な災害復旧計画に求められていること

災害復旧工事の原則は、速やかに災害前の河川の機能を回復することにあるが、中小河川の大規模災害後の復旧は再度災害の防止の観点から改良復旧となり、河川の形が大きく変わるのが常である。すなわち災害前の治水安全度が確率規模で1/3～1/10年程度であったものが、1/30～1/100年程度に引き上げられるのである。

従来、災害後であり早期の治水安全度の向上を望む地元の要望が強く、治水安全度の向上を第一とした計画・設計がなされてきたが、平成9年の河川法の改定により、河川管理の目的に「河川環境の整備・保全」が取り入れられたことより、災害復旧工事に当たっても環境に配慮した災害復

旧工事を行うことが基本とされ「美しい山河を守る災害復旧基本方針」（河川局防災課，海岸課，1999）等，基本的な考え方が整備されつつある．しかしながら，災害復旧であるため計画の策定，構造物の設計，復旧工事には時間的な制約があることに加え，環境情報等・計画関連情報の不足という現実がある．この制約を乗り越えて環境にも十分考慮した復旧計画を策定することが求められている．

さらに狭隘谷を流れる河川では，狭い沖積平野の灌漑用水を河川に頼り，取水用の堰（床止め）が多く，改良復旧事業計画では，従前の利水秩序を乱さない，あるいは改良することも求められる．

すなわち，短い検討時間のうちに，治水，利水，環境の3機能が調和した計画となる策定体制および技術が求められている．

[3] 河川の特徴・生態・景観を捉える方法

現存する河川生態系は，物理・化学系，生物系，人間系の3つの系の統合体とみなされる．3つの系は独立な系ではなく，相互依存系であるが，生物系は他の2つの系に従属される項が多い．

災害復旧に限らず，河川へのインパクトに対する河川環境の変化を予測・評価するためには，物理・化学環境，生物環境，社会環境に関する情報が必要になり，河道特性・環境特性図集として編集することが必要である．環境特性の編集方法としてリバーフロント整備センター（1999）で指針化した河川環境情報図作成や河川環境管理財団（2007）が編集した資料が参考になる．

低平地の大河川では，大セグメントごとに河道特性が整理され，その特徴を規定する要素と河道特性項目の普遍的関係が明らかにされつつある．狭隘谷河川では，本論で示したように，河床と河岸の地質，周辺地形形態，河床材料の粒径集団特性によって河道特性が影響されることから，それを把握した上で小セグメント区分し，リーチスケールでの情報の収集，編集と河床と河岸の地質，周辺地形形態，C粒径集団材料が河道特性に及ぼす影響を分析する必要がある．しかしながら，これらに関する知見が少なく，対象河川ごとに要素間の関係性を抽出せざるを得ない状況にある．

このスケールでの調査を行うためには，膨大な費用と時間を要する．平常時の維持管理の中でデータを蓄積しデータベース化することが望ましいが，現実には予算措置を含めて課題が多い．

自然が残されている狭隘谷河川において，環境を考慮した改修（復旧）計画を策定する場合には，治水・利水上の機能を確保しつつ，自然の環境を保全することが基本となると考えられる．したがって，既存資料，現地踏査資料，空中写真等の情報に基づいて，流域の概況を把握し，これに基づく基本方針を立案し，災害復旧工事に向けた施設の設計を行うとともに，復旧工事の実施段階においても詳細に現場の河道および環境情報を再確認する必要がある．そして，その情報に基づき，河川環境の保全や護岸等の河川構造物の安全性などを確認し，必要に応じて柔軟な設計変更を行いながら，工事を進めることが必要と考える．しかしながら調査・計画に取れる時間の制約のため，これが実行し得ないのが現実であろう．このためには，現行の工事の管理体制，設計変更の制度の見直し等が必要となる．そのイメージを[4]で提案する．

なお，自然環境の保全に配慮した災害復旧を実施するには，事前に河道特性・環境特性を把握しておく必要があり，このため，従来に比べて手間と時間がかからざるを得ないことから，各都道府県は，それぞれの地域固有の条件等を考慮の上，独自の「美しい山河を守る災害復旧事業実

施方針」を事前に策定するものとされている（国土交通省河川局，1999）。この実施方針を策定する場合においても，狭隘谷を流れる河川においては，上記の特性を十分考慮した内容とする必要がある。

余笹川の災害復旧においては，河川環境に配慮した復旧計画・工事とするため，表1に示す流域の河川環境特性情報を収集し，河川環境特性図を作成した。被災前には定期的な測量や生物調査がほとんど行われていなかったことから，空中写真や既存の地質図，土地利用図等を用いて河道特性，自然環境特性の概況を把握し，現地踏査により確認したが，短い時間では種々の制約があり各種情報の相互関連性までは十分に把握し得なかった。

表1 収集した流域環境情報

物理環境	地形（山地，丘陵，段丘，沖積低地等の区分） 地質（河床・河岸の地質（踏査による）） 河川形状（河床勾配，川幅，背後地の地盤高，砂州の分布）
生物環境	植物（広葉樹林，針葉樹林，竹林等の区分） 魚類（生息が確認されている魚種）
社会環境	土地利用（集落，樹林地，水田・畑等の区分）

[4] 工事管理と設計変更

平成9年洪水により被災した宮崎県の五ヶ瀬川水系北川においては，北川「川づくり」検討委員会を組織して所要の治水安全の確保と良好な河川環境の保全・復元方法を検討し，改修計画案を策定している（池内，1999）。しかしながら，広範囲で被災した多くの中小河川では，災害復旧に伴う施設設計を確定する段階で河床・河岸の地質を確認することは困難である。このため，空中写真等により被災前の河川形状，河川環境と周辺環境に関する情報等を収集し，復旧方針に基づき環境に配慮した設計を行うとともに，復旧工事と並行して現地の河道・地質・環境状況に応じて変更を行いながら，より環境に配慮した川づくりを進めるのが現実的な方法であると考え

① 複数の専門家を含むチームによる事業の実施の必要性

自然環境の保全・整備を織り込んだ河道計画を立案するためには，水理学，河川工学の技術者のみで対応することは困難であり，生物学，地形学，地質学などの自然環境に関連する分野の技術者や問題に応じて社会学，景観工学，化学（水質）などの複数の専門化が一体となったチームを組織して取組む必要がある。現状では委員会形式で知見の集約と計画策定がなされる場合が多いが，災害復旧に伴う改修計画では，意思決定を早急に行わなければならず，より実効性のある対応が求められる。

中小河川の大規模災害復旧にあたっては，計画段階において河川工学，地形・地質学，生態学（魚類・底生動物，植物）の専門家を含むチームを構成し，基本検討の結果に基づき，現地での確認，協議に基づいて最終形を決定する必要があると考えられる。しかしながら，現実には河道計画，構造物設計，河川環境計画は別々のコンサルタントに発注され，その統合化は県の技術者に担われている。県の技術者をサポートする技術集団のチーム（コンサルタント）を形成し，プロジェ

クトマネジメント (PM) 業務を担わせるべきである。

また、復旧の基本となり、水系としての整合性を図るべき計画流量、平面形（法線）、縦断形（床止め工の位置・高さ等）などは基本計画の中で決定すべきであるが、護岸の構造・設置範囲、寄石や根固めの要否・構造等は、現地において工事段階に最終形を決定すべき事項であり、臨機応変に意思決定していくPM集団を現場に配置しておくべきである。従来、PMは、国民・県民から付託を受けた県の河川管理者が行ってきたものであるが、官民含めた河川技術者集団の現実の業務形態を見ると、県の技術者をサポートするPMコンサルタントが必要な時期にきている。数100億円に達する大規模災害復旧においては、このような組織を活用していくことができないことはあるまい。ただし、それを担える高度な技術判断を実行し得る技術者が少ないので技術者を育てる方が先かもしれない（卵が先か、鶏が先か）。

スイス・チューリッヒ州やドイツ・バイエルン州の河川改修では、少なくとも、土木工学、景觀工学、生態学の3名の技術者が参加するプロジェクトチームを編成して取組んでいる（山脇，2000）。さらに、プロジェクトの規模や場所、問題の種類によって、複数の専門家や地質学、化学（水質）、建築、歴史学、社会学、心理学、法律（土地買収、収用問題）などの専門家が参加する場合がある。これらのプロジェクトチームでビジョンの作成、コンセプトの設定、設計、施工監理、施工後の評価までの一連の事業を推進している。我が国においても新たな社会に対応していくために今後必要となってこよう。

② 柔軟な設計変更と契約方式の必要性

上述の方法を実施するためには、計画立案、工事管理の方法と契約方式を工夫する必要がある。

通常の工事管理では、仕様に定めた出来形と品質を確認する方法が取られるが、災害復旧に限らず、河川環境に配慮した河川改修を行うためには、プロジェクトチームが現場に常駐し、河川管理者、施工業者を含めた協議の決定事項に基づいて、柔軟に設計変更が可能な契約システムを整備する必要がある。特に、山地を流れる中小河川においては、沖積谷の谷壁の地質・平面形態、河床・河岸の土質・地質が、河川生態系の基盤となる河道形態を規定する重要な要因のひとつになっている。これらの情報は、計画段階で詳細に把握することが困難であることから、復旧工事と並行して再度確認し、柔軟な設計変更を行うことが必要である。このためには、河川環境保全の目標の設定方法、計画策定における意思決定システム、工事段階での仕様の確定と設計変更を考慮した契約方法などとあわせて、災害復旧事業の進め方を検討する必要がある。

スイスやドイツにおいては、設計や施工の契約は、文書で大まかな取り決め（概算数量による発注、または施工条件）をし、細部はプロジェクト進行過程に度々行われるミーティングで決定し、変更される。支払いは、工事日数、作業員人数、使用機械、使用材料、運搬量、難易度などにより、見積りにより契約を交わすか、事前に概算し後から出来高払いの形で行われている。

[5] 工事後のモニタリング

環境に配慮した災害復旧を行うためには、復旧計画・工事中の各段階、復旧工事によるインパクトに対して河川生態系等の河川環境へのレスポンスを予測する必要がある。直轄河川については、インパクトによるレスポンスの実態の分析等により応答関係が明らかにされつつあり（山本，2004）、河道計画・構造物設計論に取り入れられつつあるが、中小河川については実態把握も分析

もほとんどなされず、技術化されていない。

自然再生等の事業においては、順応的管理（アダプティブマネジメント、見直しシステム）の考え方が導入されつつあるが、災害復旧事業においては事業期間に制約があるため、小出しシステムが取れない。復旧後の物理・化学的な環境、生態系の変化をモニタリングし、その情報と得られた知見を今後の復旧計画に役立てていくことが必要である。大規模な災害復旧においては、河道形態がほぼ動（静）的な平衡状態に達し、一定の生態系が形成されるまでの期間（少なくとも20年程度）のモニタリングを継続し、物理環境・生物環境の情報を収集・分析・評価すべきである。

現状では制度的な制約があり、災害復旧事業竣工後の予算措置が取れず調査を行うことが難しい状況であるが、制度化を含めて検討すべきことであると考えます。

モニタリングの目的が明確であれば、定点からの定期的な写真撮影と踏査のみでも十分に有意な情報を得ることができる。

[6] 河床材料調査

山間地狭隘谷を流れる河川の表層河床材料はchannel lag depositである可能性が高い。災害復旧に当っては、表層下の材料と粒径が異なる可能性が高いので、表層材料の調査（山本、1971,1974）と表層下の材料の調査を行った上で、河道の安定の観点から表層材料の存置が必要か判断する必要がある。

河床直下に新第三紀、洪積世の未固結堆積物が存在する場合は、河床からC集団を取り出して災害復旧用資材として利用すると、アーマコートが破壊され河床低下を生じ、再度、災害を被りやすいので、周辺地質を調べ、調査が必要か判断する。

なお、粒径10cm以上の堆積物が存在する場合の篩分け粒度試験調査は、採取法、採取量および粒度10cm以上の粒径の取り扱いが適切でない事例が目立つ。発注者の仕様書を適切に改定、徹底すべきである。また表層材料調査も資料の整理法に間違いが多い。

[7] 維持管理を考慮した改修計画

大規模災害後の改修計画に当っては、計画流量が大幅にアップするため低水路幅を拡大する計画が常であった。そのため改修工事後拡大された川幅の中に、従前の川幅に対応した常水路が形成され、維持管理しないと常水路外は草本の進入、さらには木本類も生育し、複断面化していく。治水安全度の劣化であり、管理瑕疵を問われる局面も生じる可能性がある。

財政的裏付けと管理ができないのであれば、河川のなりたがる方向に改修計画の段階で、それを前提に計画を立案するべきではないのか。中山間地の社会経済状況の変化を考えると、河川管理区域の幅を広く取り、維持管理の容易な河道形状とすべきであろう。それが河川環境の質を高める道でもある。

[8] 生物調査

大規模災害復旧工事後の生物環境変化の調査については、方法論、調査期間については種々の制約条件があり、工事後の生態系の変化に関する調査は、河川管理として位置づけと調査方法論が

確立していない。県管理の河川で河川管理行為として調査が為されたのは余笹川が初めてでなかろうか。国管理の河川では北川の激甚災害による復旧工事後の河川環境の詳細な調査がなされたが、これは河川生態学術研究会という学術研究グループの調査・研究という枠組みでなされたものである。

河川管理行為としての調査は改修中および後の生物環境のモニタリングであり、学術の発展を意図したものではない。少ない調査費用で、いかに環境の質をモニターし、その後の河川管理方針に役立てるためのものである。

だとしたら、何を、何時、何処で、いかに調査すべきか調査指針が欲しい。特に水生生物の調査指針が欲しいところである。評価空間をセグメント、リーチ、ハビタットとするかにより方針が異なるはずであり、また時間の経過に伴う変化を検出する能力のある調査法が求められる。

参考文献

池内幸司：北川激特事業における良好な河川環境の保全・復元を目指した川づくり，河川（通巻 641 号），（社）日本河川協会，1999.

建設省河川局防災・海岸課：美しい山河を守る災害復旧基本方針，建設省河川局防災・海岸課，1999.

（財）河川環境管理財団：ノート 河道・河川環境特性情報編集とその展開，河川環境総合研究所 資料第 22 号，2007.

（財）リバーフロント整備センター：河川環境表現の手引き（案），1999.

山本晃一：礫河床のサンプリングと統計処理，土木技術資料 Vol.13 - 7，1971.

山本晃一：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，pp.1 - 20,1974.

山本晃一：構造沖積河川学，山海堂，pp.387 - 458, 2004.

山脇正俊：近自然工学～新しい川・道・まちづくり～，信山社サイテック，pp.79 - 80，2000.

河川環境総合研究所資料 第27号 平成21年9月編集・発行 ISSN 1347-751X
大規模災害復旧工事後の河道・環境特性の変化 ー余笹川の事例ー

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