

II-18

山地河川の分岐流路形態とその変動

—— 白水川調査より

北海道大学工学部 正 員 長谷川 和義
同 上 大学院 学生員 石 川 伸
同 上 工学部 学生員 高 橋 一浩

1. はじめに

沖積河川への土砂供給源であり、降雨流出水の集中・運搬路である山地河川を工学的立場から研究することが近年重要視されるようになり、様々な研究が行われるようになってきた。著者^{1)~4)}らも、これまでに豊平川流域の3つの山地河川試験地において詳細な縦・横断測量、平面測量、粒径分布測定、流速測定などを実施し、これらの結果として、山地河川には小規模・中規模・大規模なる性質の異なった3種の河床波形が共存しており、しかも小規模波については(1)リブ、および(2)ステップ・プールの2種類が、中規模波に関しても(3)交互砂州と(4)反砂堆の2種類のものがあることを確かめてきた。性質の不明なものが大規模波である。これについては流路の分岐・合流が密接に関係していることが知られているので、本年度は特にこの点に主眼を置き調査を進めることにした。目的にあった調査資料を蓄積するため、対象を分岐流路の著しく発達している薄別川支流白水川に置き、その降雨前後の変動を上記測定項目に準じて観測することにした。

2. 調査の概要

2-1) 調査区間 調査は図-1に示す薄別川合流点から1.3km上流を起点として、上流に1kmの区間を選んで行われた。区間内には谷幅が100m以上にもなる谷底平野の区間と30m位の狭窄部が交互に現れ、狭窄部より谷底平野に出る所で分岐が発達している。また狭窄部内では基岩が露出している所も数カ所ある。なお、白水川のより下流区間において、過去に森ら⁵⁾による調査が行われたことがある。その区間は今回の調査区間に比べて幅が狭く、水深深く、分岐の発達がみられず著しい対照をなしている。

2-2) 調査の項目と方法 札幌では過年度の降雨記録によれば、8月下旬から9月上旬にまとまった降雨があることが多く、これらの出水前後での河道の変化、礫の移動等を見ることを目的と

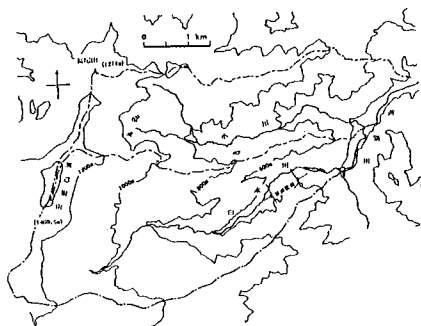


図-1 白水川の流域既形

して、降雨前の形態把握のために1989年7月22-23日および8月4-23日に第1次調査が行われた。その後9月4日に3日間で107mmの雨を見たのち、10月27日に変動調査(第2次調査)を行った。内容は以下の通りである。

(1) 縦断測量 河床変化を詳しく調べるために、リブと見なされる短波長・低波高の波まで細かくひろうことを基本として測定した。標高基準点は470m付近に建てた平面測量用タワーの下にB.Mを設け、それを基準としている。

(2) 平面測量 前述のように夏(8/4)・秋(10/27)の2度実施し、比較を行うことにした。ただし、測量箇所は調査区間内で最も大きな分岐の発生している440~500mの区間のみである。方法は一般カメラの斜め地上写真にもとづく写真測量によることにした。すなわち、図-7に示すような河原上の任意標定点を設け、B.Mを原点として、その位置、標高を光波測距儀およびレベルによって詳細に測定した。これらの点は、一枚の写真につき5~10点写るように配置を工夫した。写真は470m付近に建てた高さ約8mのタワーの上より一般カメラ(Nikon New FM2)で区間内を分割して撮るようにした。これを引き延ばし、デジタイザー入力したのちに、「一般カメラによる三次元座標解析」(日本写真測量学会)によって図化した。この市販ソフトは4点以上の既

Field study on a braided mountainous river of Shiramizu —— the form and its change
by K. HASEGAWA, S. ISHIKAWA and K. TAKAHASHI

知点の写し込みにより、設置カメラの相対位置、回転傾斜角を推定し、あわせてレンズの歪、フィルム面の歪の補正をも考慮して、平面図化するものになっている。この方法を用いることにより、精度1/300程度で非常に短時間で現場での測量を行うことができた。ただし、木立など視野をさえぎるものがある場合にはまったく無力であるほか、遠距離になるほど俯角が小さくなり、平面投影図が極端の引き延ばされる欠点がある。

(3)横断測量 平面図区間内における分岐部について、その分岐点上流、分岐点、分岐・合流点の中央、合流点、及びその下流の計5断面について横断形状を測定した。その際、変動によって取り残された旧流路断面をも測るようにした。

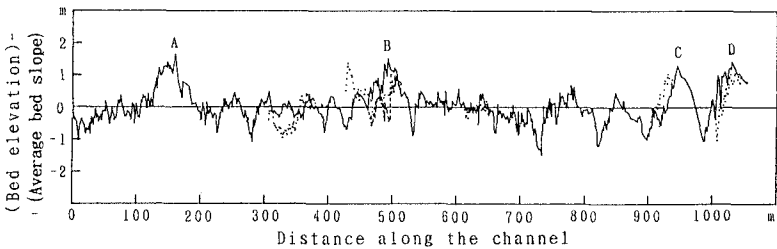
(4)河床砂礫の粒径分布観測 調査区間内における流路中心の河床表面粒子につき、1mおきの線格子法により1000個の礫について調査した。礫径は長・中・短軸を測っている。

3. 調査結果

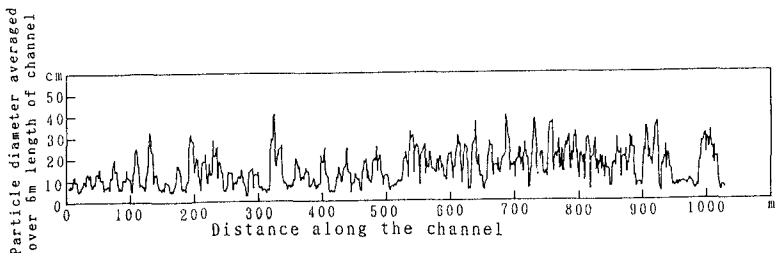
(3-1)縦断波形 図一

2は今回の縦断測量で得られた河床の縦断波形を示している。のこぎり波のような1つ1つの波がリブないステップ・プールであり、観測区間内に213個（平均波長4.96m）見だされている。各々の波のヒストグラムを図一4・5に示す。両図から言えることは、著者ら^{3・4)}が調査した小川（平均波長4.17m、平均波高57.6cm）に比べて、波長が長く、波高が低くなっていて、森ら⁵⁾が調査した白水川の別区間（平均波長5.5m、

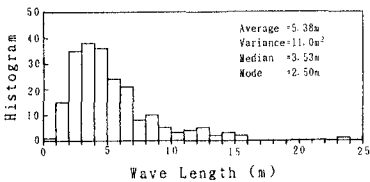
平均波高39cm）とはほぼ同じ値であり、振幅が小さく、周期の長い波が白水川の特徴となっている。この短波長の波がいくつか集まって大きな波が形成されている。すなわち後の解析にも触れるように波長80～100m程度の中規模波が認められているが、更に長い大きな波が図一2・ABCDの4ヶ所で認められる。そしてこの場で例外なく流路分岐が確認されている。（A地点では第1次調査時（7/22・23）には分岐が生じていなかったが、第2次調査では発生が認められている。）図一2において波形の背面（左上がりの場所）は勾配が緩く、前面（左下がりの場所）は急勾配となっているが、



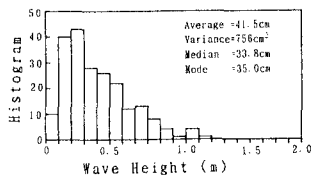
図一2 平均河床を引いた河床高の縦断変化



図一3 6m区間で平均した河床砂礫径の流路に沿う変化



図一5 ステップ波長の頻度分布図



図一4 ステップ波高の頻度分布図

緩勾配の場に流路分岐が生じ、その直下流で急勾配をなして流れていることが大きな特徴となっている。このことは、分岐発生要因を探る上で重要な手がかりを与えているものと思われる。

(3-2)河床礫の粒径分布 図-3は主流路中央の河床礫径の距離変化を見たものである。7点6mの移動平均をとっている。縦断面と比較してみるとA～Dの大規模な波の前面（急勾配部）で粒径が大きく、背面（緩勾配部）で粒径が小さくなっている様子がよく表れている。この事実がやはり分岐と密接な関係にあると考えられる。一方B点を境にして上流と下流で粒径の大きさが幾分異なるのが見いだされる。図-6は長・中・短軸ごとの粒径加積曲線であり、対数正規確率紙にプロットしてある。従来の粒径調査結果では粒径加積曲線が一直線になる場合が多かったが、今回は三軸径とも約70%付近でいったん勾配が緩くなり、95%あたりから再び最初の直線の傾きに一致するように変化している。言いかえると中軸径で10cm～60cm位の礫が少ないということになる。現時点では、このことを的確に説明できる理由が見いだされていない。また長軸と中軸の間隔に比べて中軸と短軸の間隔が広く礫が薄く偏平なものが多いことを示している。なお各軸の中央粒径および84%粒径を表-1に示す。

(3-3)平面形状 図-7に平面測量成果を示す。なお今回は8月4日の第1次調査における撮影分のみを掲載した。図は撮影中心（タワー）から離れるにしたがって放射状に細長になる歪がみとめられるが、礫の分布や流路の概略の形態を見る上ではさほど支障はないものと思われる。特に右岸の分岐流路の流路形態は縦断面図とよく一致しており、まずまずの成果といえる。

第2次調査の図は割愛したが、主な変化についてのべる。右岸流路との分岐点（図-2・A点）の形状が変化し、第1次調査の時は細いものであったのが、評定点を含む石（図-2・B点）を含むように幅広くなり、その結果として右岸流路の流量は著しく増大した。他に図-2・C点付近にも右岸流路への流出路が発生している。

(3-4)横断形状 図-8に各断面の測量成果を示す。図中、

水面のマークのない水路は旧流路であり、その数から、変動の激しさが推測される。旧流路には現流路よりも深いものが存在しており、流路変動が流路の一部の閉塞によって生じるものであることを示唆している。

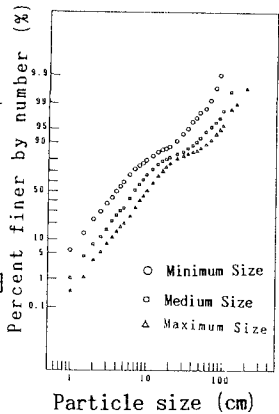


図-6 粒径分布図

	長軸	中軸	短軸
$d_{50}(\text{cm})$	10.1	6.8	4.0
$d_{84}(\text{cm})$	35.0	25.0	10.3

表-1
粒径調査の結果

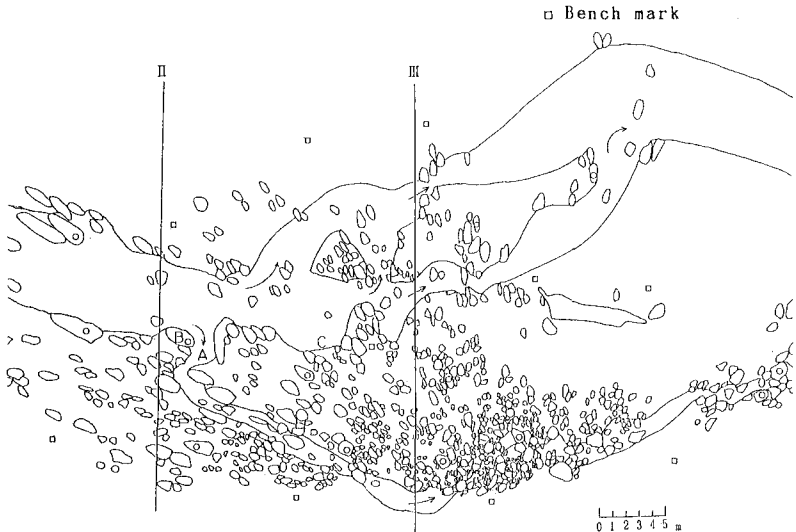
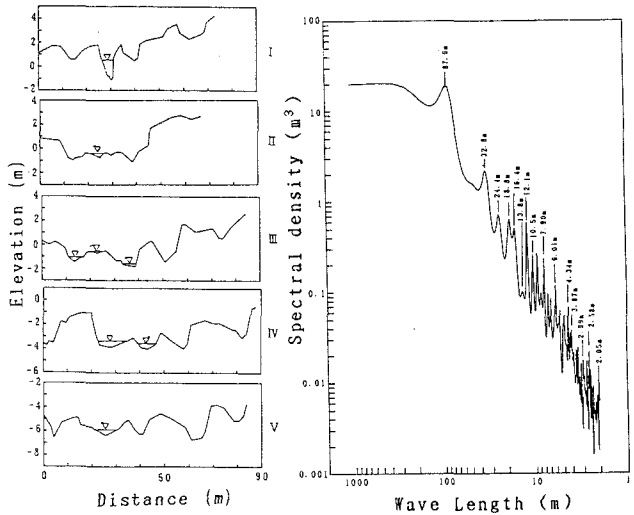


図-7 平面測量成果図

但し流路の新旧を推定するには至らなかった。

4. 解析と考察

(4-1)河床形態に関する解析 (1)河床波の形態を詳しく知るためにスペクトル解析を行った。算定法としては、少ないデータ数に対しても比較的高い分解能を示すMEM（最大エントロピー）法を用いた。縦断測量によるデータの間隔を内挿法によって1mとして補足し、定間隔とした。得られたスペクトル結果を図-9に示す。非常に数多くの卓越波が検出されたが、興味深いことに波長が2mの倍数の波が特に卓越していることがわかる（表-2参照）。河床波の卓越波長がある数の倍数になるという現象は小川でも見



られ、水面波(Airy波)と密接に関連して 図-8 横断測量成果図 図-9 河床波のスペクトル図
いる可能性がある。従来著者らはB.T.法を改良した赤池のパワースペクトルを求めていたが、この方法では長波長の卓越波をうまく捕まえることができなかった。MEM法では88mのところに一つの明瞭なピークが見いだされるが、これは分岐を含む中規模波の波長にはほぼ一致している。

図-8 横断測量成果図 図-9 河床波のスペクトル図

n	1.0	-	1.5	2.0	-	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	12.0	16.0	44.0
2.0n	2.0	-	3.0	4.0	-	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	24.0	32.0	88.0
λ(m)	2.05	2.58	2.99	3.97	4.34	9.01	7.90	10.5	12.1	13.8	15.4	18.8	24.4	32.8	87.8

表-2 ピーク波長と基本波長の倍数值の比較

(2)これらの河床波の形態区分と成因を知るために、検討を行ったものが図-10・11・12である。なお、これらの図に使用した水理量は以下のようにして得ている。流量は1989年9月4日および1985年9月1日の洪水時に薄別川合流点で観測されたピーク水位から得た流量を、それぞれ流域面積比を使って調査区間流量とすることにした。平均流速式としてHeyの式(表-3)を用い、断面IIを使用して平均水深hを求めた。勾配は調査区間の平均 $i_0=0.0495$ を使うことにする。諸量を表-3に示す。

図-10は、林^①による領域区分図に、図-9のスペクトルピークをあたえる波数とフルード数をプロットしたものである。ただし、黒丸は大出水(1985年9月)、白丸は小出水(1989年9月)を表す。大出水の場合は一応反砂堆領域に入っているが、小川と同じくスペクトルの卓越波が倍数

になっており、フルード数が1に近いので、水面波による波すなわチスタンディングウェーブであると考えてよいと思う。ただし調査区間内には、リブ(反砂堆起源)も存在して

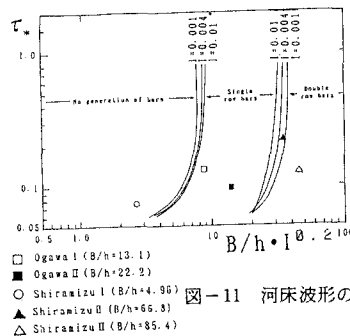
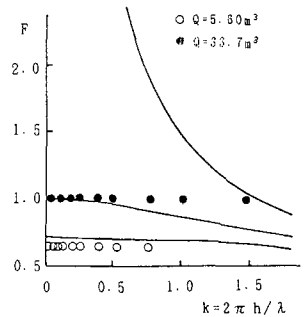


図-11 河床波形の領域区分 図-10 卓越波の領域区分



いる。一方図-11は、黒木・岸⁷⁾の領域区分図を見たものである。明らかに小出水時にも大出水の場合にも複列砂州の領域に入る。このことから、白水川の複雑な分岐合流流路の初期的な成因が交互砂州にあることが推察される。この点をさらに明確にするために中規模波の波長について、黒木・岸⁷⁾の砂州波長との比較を行うと図-12のように、理論波長の範囲にはいる。したがって、この地において複列砂州が原因となって流路が次々に枝分かれする可能性が強いものと言える。

(3)しかし、大規模波は波長／幅比が10倍程度であり、交互砂州として認めがたい。この点から考えると大規模な波は、さらに異なる成因（おそらく土石流の波状堆積、あるいは谷幅の周期的な広がり）によって形成された可能性が高い。今次調査でわかったことは、この様な大規模波の勾配の緩い背面には必ず流路分岐が発生し、これが契機となって激しい流路変動が生ずるということである。長谷川・石川⁸⁾論文に詳述しているように、射流流れにおいては急縮部でジャンプが発生しやすい。分岐後の流量に対する流路幅の割合が、分岐前の流量に対する流路幅の割合よりも小さくなるとジャンプを引き起こすことになる。このとき大量の土砂が堆積するであろうことは容易に想像される。さらに、射流流れでは分岐流路への流量配分比の自由度が大きい。すなわち、下流側の条件によらず、分岐点の形態のわずかな違いによっても容易に分配流量が異なり得る。その極端な場合が一方の流路がまったく流れなくなる場合で、このとき廃棄流路ができるわけである。分岐点での急激な堆積は、この様に下流側流路の大幅な変動を呼び起こすであろう。大規模波の変形は主にこの様な形で進行し、結果的に大量の土砂を下流に移動させるものと思われる。

(4-2)礫の残留確率 前述のように、分岐点では堆積が生じている可能性が高い。そこで図-6の粒径加積曲線が、表層下の河床材料（原河床材料）の分布と同じとみて、分級を受けるある箇所の粒径加積曲線を求める式（式(1)）を用いて礫の残留確率 q_a を求めてみる。

$$F_a(k) = \frac{\sum_{k=k_{max}}^k q_a(k) \cdot \Delta F_0(k)}{\sum_{k=k_{min}}^{k_{max}} q_a(k) \cdot \Delta F_0(k)} \quad (1)$$

$F_a(k)$: 分級を受けた河床の粒径加積曲線
 $\Delta F_0(k)$: 原河床の粒径加積曲線の差分
 $q_a(k)$: 粒径 k の礫の残留確率
 $k_{max} \cdot k_{min}$: 最大および最小粒径

$$\Delta F_0(k) = \{ \Delta F_0(k+1) - \Delta F_0(k-1) \} / 2 \quad (2)$$

この式は、本来侵食を前提としたアーマリングの形成を算定する式であり、 $q_a(k)$ は何らかの出水の後に粒径 k の礫の残留しうる確率を表している。しかし、ここでは上記のように $F_0(k)$ として流域全体の粒径加積曲線を取り、 $F_a(k)$ を代表的な流路形態の4カ所（起点～100mの複列砂州状区間(a)・550～600mの狭窄区間(b)・分岐の前・後区間各々の合計(c),(d)の粒径加積曲線とし、 $k=1.6, 2.3, 2.9, 3.3, 3.9, 4.4, 5.1, 5.6, 6.1, 6.7, 7.6, 8.6, 9.5, 11.3, 13.2, 17.0, 28.0, 45.0, 65.0, 150.0$ cmの20種の粒径を使用する。図-13にこれらの粒径分布の比較を示している。(1)式により $q_a(k)$ に関する連立方程式を立て、それぞれの粒径の残留確率を求めようとすると、未知数の数が元の数より1つ多く、解が求まらない。 $q_a(k_{max})=1$ として、 $q_a(k_{max})$ に対する $q_a(k)$ の比率を求めてみた。結果は図-14・15に示すとおりである。堆積傾向の著しい(a)では

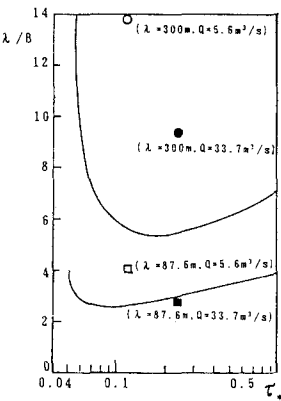


図-12 無次元砂州長の変化範囲図による領域区分

$Q = 5.751 \log \left(\frac{2h}{2.5d_{50}} \right) \cdot B h \cdot \sqrt{2\tau_b}$ $\tau_b = \frac{\rho \cdot h \cdot l}{S \cdot d_{50}}$ $Q=5.60\text{m}^3/\text{s}(1989.9.4), 33.7\text{m}^3/\text{s}(1985.9.1)$: 流量 $a=11.6$ $d_{50}=0.25\text{m}$: 84%粒径 $g=9.81\text{m/s}^2$: 重力加速度 $l=0.0435$: 平均河床勾配 $s=1.65\text{kg/m}^3$: 礫の水中比重 $d_{50}=0.068\text{m}$: 中央粒径	
---	--

表-3 諸量図

$q_a(k)$ が1を越える大きい値をとっているのに比し、侵食傾向の(b)では1を下まわっている。分岐の前後ではこれほど明確な相違が認められないものの、分岐前の(c)ではkが3~20cmにかけて $q_a(k)$ が1を上回る傾向を示し、逆に(d)ではそれが1を下回るように現れている。これらの粒径の堆積・侵食の盛んなことが窺われる。こうした性質は図-13の粒径分布の違いから判断しにくい。

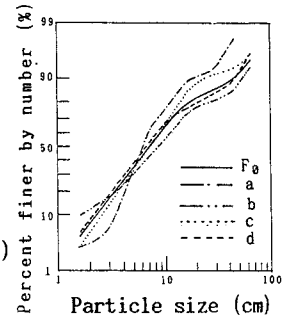


図-13 粒径分布比較図

5. まとめ

(1) 分岐流路の成因として中規模波(波長80m前後)、大規模波(波長300m前後)との関連性が大きいと思われる。また分岐は、緩勾配部で発生して、急勾配部を流れ落ちて行くが、それに伴う大きな波が見いだされる。

(2) 分岐点付近の領域区分では交互砂州領域に入り、分岐流路の初期的な成因がこれによるものと考えられる。

(3) 勾配が同じ様なところでも、谷幅等によって堆積傾向のところが、侵食傾向のところがある。

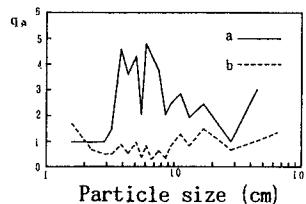


図-14 粒径別残留率図(a, b)

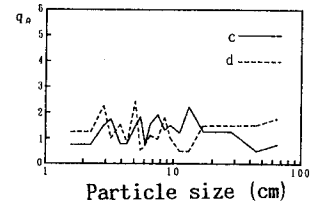


図-15 粒径別残留率図(c, d)

6. あとがき

分岐流路形態の特徴および発生要因とその後の変化を探るために、様々な調査・解析を行い、いくつかの関連性の高いものが見いだされた。理論的裏付けが不十分なものが多く、今後さらに検討を要すると思う。

謝辞 本研究は、平成元年度文部省科学研究費一般Cの補助を受けておこなわれた。現地観測にあたり、林野庁札幌管区署定山溪管区事務所の関係者の方々並びに新太平洋建設安武良平氏、北見工業大学早川博氏より多大な援助をいただいた。末尾ながら、これらの方々に深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 藤田、長谷川、大貫：山地河川の流路形態に関する調査研究—豊平川上流部・冷水沢を例として—
土木学会北海道支部 論文報告集 41号(昭和59年度)II-31 1984.2
- 2) 長谷川、藤田、大島：山地河川の流れの抵抗則に関する研究
土木学会北海道支部 論文報告集 41号(昭和59年度)II-32 1984.2
- 3) 長谷川、藤田、新野：山地河川における流れ、流路形態と砂礫の移動
土木学会北海道支部 論文報告集 42号(昭和60年度)II-19 1985.2
- 4) 長谷川、藤田、山田、平野：山地河川におけるステップ・プールの構造および土砂流出
土木学会北海道支部 論文報告集 43号(昭和61年度)II-24 1986.2
- 5) 森、黒木、岸、戸島、谷口：白水川における階段状河床形の調査研究
土木学会北海道支部 論文報告集 42号(昭和60年度)II-13 1985.2
- 6) 林：河川蛇行の成因についての研究 土木学会 論文報告集 180号 1970
- 7) 黒木、岸：中規模河床形態の領域区分に関する研究 土木学会 論文報告集 342号 1984
- 8) 長谷川、石川：山地河川における分岐・合流流れの数値計算法
土木学会北海道支部 論文報告集 46号(平成元年度) 1990.2