

II-37

山地河川における分岐・合流流路の突発変動機構

北海道大学 正員 長谷川和義
北海道大学大学院 学生員 石川 伸

1 はじめに

近年の豪雨災害では河川の増水による被災は激減したものの土砂崩れや鉄砲水といった土砂災害、または山間地域での災害はいっこうに減少していない。また、山地河川は降雨の集中運搬路であり、沖積河川に対する土砂生産、供給の場であり、その実態、性質の解明は様々な方面から要請されている。これらのことをふまえ、山地河川の形態および流れの構造に関する研究が盛んに行われるようになった^{1) 2)}。山地河川で特徴的なことは勾配が大きく、流れは射流域が卓越する常射流混在流れであること、河床材料の粒径分布が非常に広くシルト、粘土から数メートルもある巨礫も存在すること、河道が不整で基本的な水量を測定、見積ることが難しいこと、降雨による流出が早く、ハイドログラフが非常に鋭いことなどが挙げられる。著者らは山地河川の流路形態について数年にわたり現地調査、実験等を行い、次のような結果を得ている^{3) 4)}。

山地河川の流路は一見非常に複雑に見えるが、詳細な河床縦断測量及び平面測量を行い、山地河川には波長の違う大規模、中規模、小規模の3種類の河床波が同時に存在していることが明らかになった。このうち大規模河床波は波長が100m~400m程度のもので、谷の地形的制約、土石流、土砂崩れ等大規模な土砂移動が河床に反映したものであり、挟窄部、谷底平野といった谷幅の変化との対応がはっきり見られる。しかし、その起源や変動機構については不明な点が多いのも事実である。また、谷底平野には分岐・合流流路あるいは網状に発達した流路が見られる。この分岐・合流流路は大規模な河床変化と密接な関係があると思われる。

分岐・合流流路は洪水時に溪岸浸食、流路閉塞等をおこして激しく変動し、その流路を突発的に変更して新河道、廃棄河道を生み出す。その際、大量の土砂を生産する。この結果、溪間の様子も大きく変化する。

本稿では、分岐・合流流路が著しく発達している山地河川の調査を行い、その結果より、分岐・合流流路の実態を踏まえて、その流れの特性、および突発的な変動について数値計算の結果を基に見解を示し、分岐・合流流路の成因と変動機構を明らかにする。

2. 山地河川における分岐・合流流路の実態

分岐・合流流路の実態を把握するための現地調査は、札幌市の南西約20kmに位置する豊平川支流白水川において行われた。流域面積は16.53km²、流路長は8.2kmであり、この川は谷を埋めた土石流堆積地を浸食し終わろうとしている川で、基岩が露出している所も見られる。調査区間は図-1に示したとおり、薄別川合流点より1.3kmの地点から上流に1kmを選んだ。調査区間の中央には大規模な分岐・合流部および廃棄流路が網状に存在する谷幅約100mの谷底平野がある。調査は縦横断測量、写真測量による分岐部の平面測量、河床材料粒径調査、さらに出水時の流量観測等を行った。これらの調査の詳細は参考文献5)に詳しい。

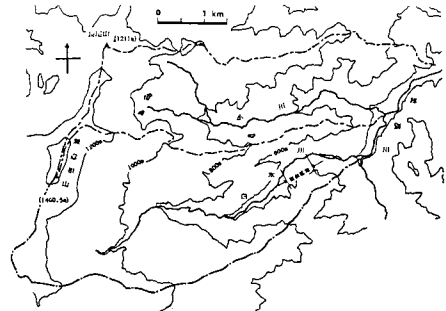


図-1 白水川の流域概形

図-2は調査区間の河床縦断面を詳細に測量した結果を示したものである。縦軸は測定された河床高から観測区間の平均勾配 $I=1/20$ を引いた値を示している。図中のA,B,C,Dの地点は大規模河床波のCrestの部分にあたり、例外なく分岐流路の存在が確認された。図に点線で示した分岐流路以外にもそれぞれで廃棄された分岐流路が確認されている。分岐は勾配の緩いところで発生し、急になったところで合流している。廃棄された河道の入口には大きな礫の堆積があり、流路はその礫の堆積で閉塞された状態になっている。この現象は

Harvey²⁾などによっても指摘されている。廃棄された流路の河床面は現在流れがある流路より低い場合がほとんどで、入口の堆積状況のみで分岐流路の流況、土砂移動が決定されることを示している。

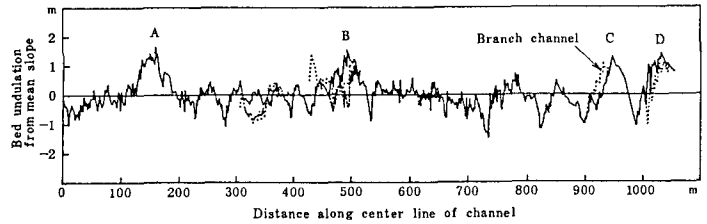


図-2 平均勾配を引いた河床高の縦断変化

3. 分岐・合流流路の河床変動計算

現地調査で確認された分岐・合流流路の堆積状態を理解するため、図-3に示すような分岐・合流流路のモデルにたいして流況把握の不定流計算、および急勾配を考慮した河床変動計算を行う。これらの計算は1次元とし、粒度構成も一様とする。

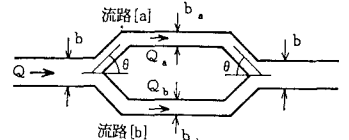


図-3 分岐・合流流路モデル

3-1 MacCormac法による不定流計算⁷⁾ 山地河川の流れは射流域が卓越する常射流混在流れである。このような流れを計算するためには従来のような不定流計算では計算が非常に複雑になってしまう。そこで、不連続解を認める保存則差分法を用いる。MacCormac法は保存則差分法の一つで時間空間とも2次の精度を有する。分岐・合流に伴う横流出（流入）を考慮した流れの連続式および運動方程式を次に示す。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + S = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Au \end{bmatrix} \quad (2) \quad E = \begin{bmatrix} \frac{A u^2}{2} + \frac{1}{2} g b h^3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{bmatrix} q \\ S_a + S_f - S_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_a = q u_b \cos \theta + \frac{1}{2} g b_b h_b^2 \quad (5) \quad S_f = \left(\frac{u}{6.5} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_{s4}}{h} \right)^{1/2} b \quad (6)$$

$$S_o = g b h I \quad (7) \quad \frac{u}{u_*} = 6.5 \left(\frac{h}{d_{s4}} \right)^{1/4} \quad (8)$$

上式中、Aは流路断面積、bは流路幅、uは流下方向流速、qは単位幅当りの横流出流量（流出を正）、 θ は流出および流入角度、hは水深である。添字bは分岐流路での値を示す。式(5)は分岐・合流に伴う運動量の出入りと外力を示す。さらに式(6)の摩擦勾配は平均流速式として Hey式の射流に対する式を式(8)のように近似して与えた。

以下にMacCormac法の差分スキームを示す。

$$\text{予測子段階} \quad \bar{U}_i = U_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_i - E_{i-1}) + \Delta t S_i \quad (9)$$

$$\text{修正子段階} \quad U_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ U_i + \bar{U}_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\bar{E}_{i+1} - \bar{E}_i) - \Delta t \bar{S}_i \right\} \quad (10)$$

式(9)(10)の差分方向は任意に選択できるがここでは崇田ら⁷⁾にならい予測子段階では上流から下流へ、修正子段階ではその逆として誤差の片寄りを防いだ。また、計算の安定化のため $\varepsilon (U_{i-1} - 2U_i + U_{i+1}) / \Delta x$ を人工粘性として用いた。

3-2 急勾配流路での限界掃流力および掃流砂量 限界掃流力および掃流砂量の研究は土砂水理学の主要テーマとして従来から数々の実験、研究が行われ、多くの掃流砂量式が提案されてきた。しかしそのほとんどは緩勾配で相対水深の大きい場合を対象にしており、山地河川のような急勾配で、しかも相対水深が小さい場合については最近になってようやく活発に研究されるようになった。急勾配流れでの無次元限界掃流力 τ_{cs} は力のつり合から次式のようになる。

$$\tau_{xcs} = \frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{C_L}{C_D} \tan \phi\right) \cdot \left(\frac{u_t}{u_*}\right)^2} \cdot \left(\tan \phi \cos \alpha - \frac{s+1}{s} \sin \alpha \right) \quad (11)$$

ここで、 u_t は礫頂付近の流速、 α は河床の傾斜角（河床勾配 $I = \tan \alpha$ ）、 $\tan \phi$ は礫の静止摩擦係数で1.0、 s は礫の水中重量で1.65、 C_D 、 C_L は抗力および揚力係数である。式(11)より τ_{xcs} の算定には礫への接近流速が重要となるが、急勾配で相対水深が小さい場合、流速分布が河床近傍で対数分布則から外れることが実験などの結果より明かになっている。その原因を河床近傍での混合距離の変化に求めるものや、対数則の定数項の変化に求めるものなどがある。この結果、相対水深が同じなら無次元限界掃流力は勾配の増加とともに増加することを、芦田ら³⁾辻本⁹⁾などが指摘し、経験式を提案している。しかしながら、礫には重力の斜面水平方向成分が作用し、結果として τ_{xcs} は勾配の増加とともに減少する。

ここでは礫頂付近の流速は芦田ら³⁾の実験結果を参考にする。芦田らは均一なガラス粒子（ $d = 24.5\text{mm}$ および 12.6mm ）を河床に一樣に張り付け勾配を $1/10 \sim 1/50$ に変化させ（ $d/h = 1.154 \sim 0.242$ ）、流速分布を測定した。それによると、 $y = 0.8d$ 付近を境にして上層と下層でそれぞれ異なった勾配をもつ対数分布形になっているので、式(12)の対数分布式に対して、 $y \leq \delta$ では $B = \psi$ 、 $y \geq \delta$ では $B = 1/\kappa$ と仮定した。 δ は粗度領域の厚さ（ $= 0.8d$ ）、 κ はカルマン定数、 ψ は実験結果より0.87である。

$$\frac{u}{u_*} = A_r + B \ln \frac{y}{\delta} \quad (12)$$

ただし、河床面は粒子頂点より $0.15d$ 下がった高さにとる。式(12)より断面平均流速 u_0 を $y = \delta$ の上層と下層それぞれでもとめ、礫頂付近の流速 u_t を u_0 を使って表すと次式のようになる。

$$\frac{u_t}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\delta} + \frac{1}{\kappa} \frac{h - \delta}{h} + \psi \frac{\delta}{h} + \psi \ln \frac{0.15d}{\delta}, \quad h \geq \delta \quad (13)$$

$$\frac{u_t}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} - \psi \left(\ln \frac{h}{\delta} - 1 \right) + \psi \left(\ln \frac{0.15d}{\delta} \right), \quad h < \delta \quad (14)$$

芦田らは $u_0/u_* = \sqrt{8/f}$ として、実験から求めた f を用いて無次元限界掃流力を得ている。ここでは平均流速に式(8)のHey式を用いることし、式(11)の C_D 、 C_L 等についても便宜上 $\frac{1}{C_D} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_L}{C_D} \tan \phi\right)} = 1$ とする。

掃流砂量式はMayer-Peter-Müller式を用いる。掃流力についても重力の影響を受けると考えたと単位幅掃流砂量 q_B は次式のようになる。

$$\frac{q_B}{\sqrt{s g d^3}} = 8.0 \left\{ \tau_* \frac{1}{\tan \phi \cos \alpha - \frac{s+1}{s} \sin \alpha} - \tau_{xcs} \right\}^{1.5} \quad (15)$$

河床変動の計算は式(16)の横流入を考慮した流砂連続式を差分して行う。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial q_B}{\partial x} + q_{Bs} \right\} \quad (16)$$

ただし、 λ は河床の空隙率、 q_{Bs} は横流入流砂量である。

3-3 計算結果 図-4に河床変動計算の計算フローを示す。初期条件として全計算断面で等流水深を仮定する。 Δx は一定とし、CFL安定条件を満たすように Δt を次式で計算して与える。

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{|u| + \sqrt{gh} + 2 \frac{e}{\Delta x}} \quad (17)$$

式(1)をMacCormac法により計算した後、式(16)で河床変動を計算する。

図-3のような流路に対する水面形のための計算例を図-5に示す。水面形

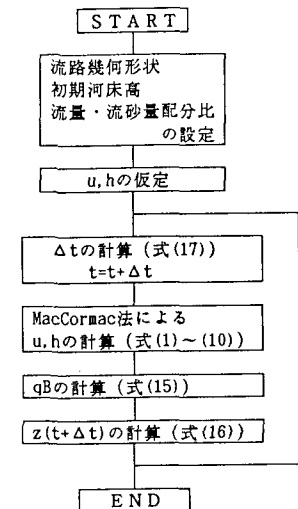


図-4 河床変動計算フロー

と河床形を流下方向に表示している。縦にいれた垂線は分岐部および合流部を示し、破線は分岐流路の水面形と河床形を示す。このような分岐・合流流路では流れの特徴を決定する要因として流路幅、分岐角度、勾配などの平面幾何形状および分岐流量配分比が挙げられ、特に分岐流量配分比は重要な要因である¹⁰⁾。流れが射流の場合は下流の条件が上流に伝わらないので、分岐部でのこれらの条件は分岐流路の流れにとって非常に重要になる。また本来、分岐流量比は分岐部の諸条件によって調節され、適切に決定されると考えられる。さらに、決定される分岐流量比には任意性があることも考えられる。しかしながら、どのような機構で流量配分比が調節、決定されるかは不明な点も多く、計算ではその値を最初に与え、以後変化しないものとした。これについてはさらに検討が必要である。図-5で注目すべきことは分岐前に跳水が発生していることである。これは分岐で流量が減少すること、あるいは分岐に伴う流路幅変化、ならびに中の島の存在による反力が引き起こしたものと考えられる。また、分岐・合流流路での実験においても分岐前に跳水が発生することが確認されている。跳水内部ではせん断力が著しく減少するという報告¹¹⁾もあり、このことは分岐前の跳水が分岐・合流流路の変動の原因となることを示すものである。しかし、計算では分岐部、合流部の流量が急激に変化する場所で数値的振動が見られる。これはMacCormac法の欠陥である。また、計算の安定のためには人工粘性項を考慮することが不可欠であるが、その関数形及び係数の見積りは経験的あるいは実験値などと比較して決定せざるをえない。また、実験の詳細は別報で報告する。¹²⁾

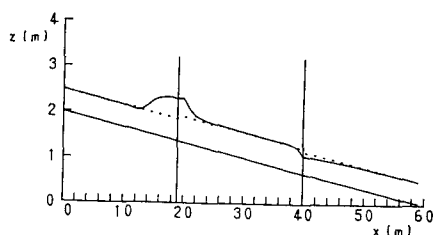


図-5 水面形計算例
($Q=30\text{m}^3/\text{s}$, $I=1/30$, $b=20\text{m}$,
 $b_1=9\text{m}$, $b_2=6\text{m}$, $r=0.6$)

図-6は河床変動を含めた計算例を時間を追って示したものである。 $t=90(\text{sec})$ 以後はほとんど変化がみられないので、そこまでの結果を示した。流路の幾何形状等の条件は、白水川での調査結果を参考にして与えている。ただし流路変化を大局的に捉えるために流量は $50\text{m}^3/\text{s}$ 、河床砂粒径は 10cm としている。 $t=10(\text{sec})$ では分岐直前に跳水が発生し、そのために河床に堆積が生じている。この跳水は時間を追うにしたがって消失して射流に変わり、突起を越える流れになる。それにつれて堆積は上流にさかのぼり、初期勾配より緩い勾配で落ちつく。一方、合流部付近では侵食が進み、新たな河床面が分岐流路に形成される。そのため最終的には主流部と分岐部それぞれの勾配が違ったものになる。このようにして分岐・合流に呼応した新たな河床面が形成される。2つの分岐流路はそれぞれが異なった勾配で落ちついており、流量が多い流路（実線で示した流路）の河床面が低くかつ急な勾配になっている。現実の分岐流路の特性が再現されたものといえる。

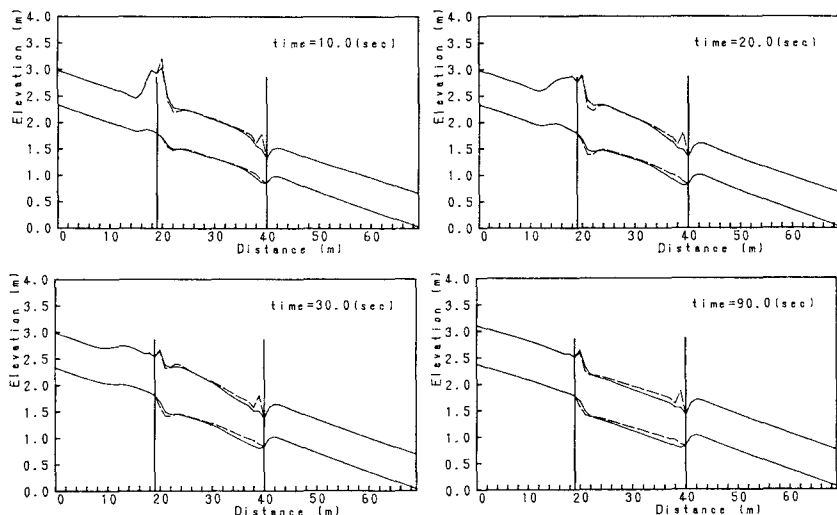


図-6 河床変動計算例
($Q=50\text{m}^3/\text{s}$, $d=10\text{cm}$, $I=1/30$, $b=20\text{m}$, $b_1=12\text{m}$, $b_2=8\text{m}$, $r=0.7$)

4. 突発変動とその機構

図-7は白水川の調査区間の上流約1kmの地点の砂防ダムにおいて、1990年8月13日から8月16日まで流量観測を行った結果である。サンプリング間隔は10分である。この間、豊平峡ダムで総雨量約100mmの降雨があり、その時の流出が図中に現れている。観測されたハイドログラフは非常に鋭く山地河川の特徴がよく現れている。このような流出の非定常効果が分岐・合流流路を突発的に変動させる要因と考え、先に示した河床変動計算に図-8のようなハイドログラフを与えて計算を行った。

結果は図-9に示したとおりである。増水期およびピーク時に分岐部上流に礫の堆積が形成される。その後、流量の減少とともに河床せん断力も低下し、礫は移動出来なくなり、その位置に残ってしまう。さらに流量が減ると流れはその堆積を乗り越えられなくなる。計算では、流れは跳水によって堆積を乗り越えられるように水深を変化させて堆積を乗り越えている。この結果より、山地河川の流路形成には流量の非定常性が重要であることが分かる。

この非定常効果は分岐・合流流路の突発変動に大きく関わってくる。分岐部において上流から運ばれてきた礫は、そこに発生している跳水のために停止し、主流路を閉塞するかたちで堆積する。そのために流れは全く別の方向に流れ出す。このようにして分岐部の突発変動が引き起こされると考えられる。その結果、河床面が一方の分岐流路に比べて低い主流路が廃棄される。これは現地観測より明らかになった、廃棄河道の河床面が現流路に比べて低い位置にあることをうまく説明する。さらに実際の現象をより忠実に再現するには混合粒径での取扱いが不可欠である。これは今後の課題としたい。

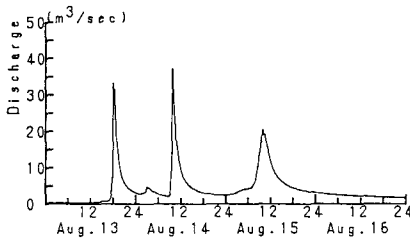


図-7 白水川ハイドログラフ
(1990.8.13~8.16)

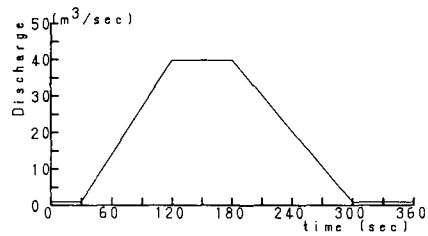


図-8 計算に与えたハイドログラフ

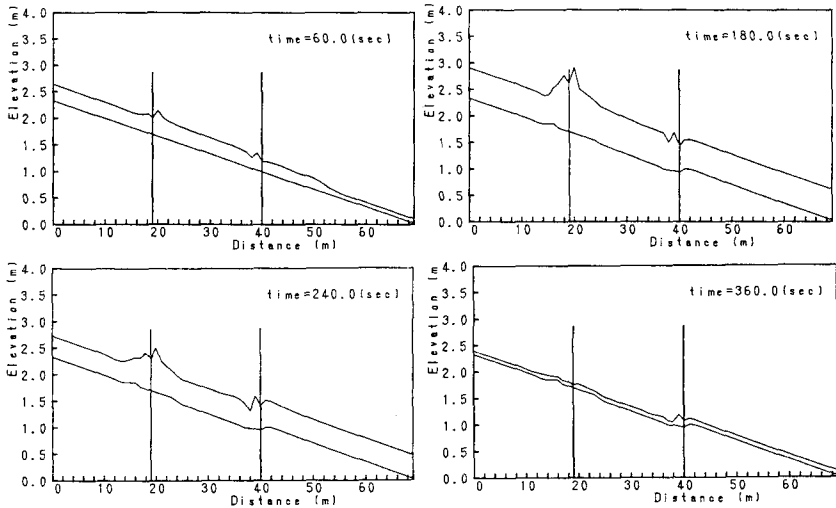


図-9 ハイドログラフを与えての河床変動計算例
(主流路のみの計算: $d=20\text{cm}$, $I=1/30$,
 $b=20\text{m}$, $b_1=12\text{m}$, $b_2=8\text{m}$, $r=0.5$)

5. 結論

本研究の結論として次のようなことが挙げられる。

(1) 山地河川の河床形態は大規模、中規模、小規模の3種類の河床形態が混在しているが、大規模河床形態は谷幅の変化と密接な関係がある。谷底平野のような谷幅が広い場所に分岐・合流流路がみられ、網状に発達している場合や、すでに廃棄され水が流れていない流路も存在する。廃棄流路の分岐部には大きな礫の堆積があり、それが流路を閉塞している。さらに、分岐・合流流路は河床勾配が緩いところで分岐し、勾配が急になったところで合流している。

(2) 射流域が卓越する山地河川の流れの不定流計算には保存則差分法が有効であり、そのスキームの一種であるMacCormac法は取扱が簡単で便利である。しかし、衝撃波の前面での数値的振動は避けられなく、計算の安定を図るための人工粘性の与えかたにも問題がある。

(3) 分岐・合流流れでは、流路幅、分岐・合流角度など流路の幾何形状や、分岐流量配分比が重要な要因となる。特に流れが射流の場合、分岐部でのこれらの条件が非常に重要になると考えられる。不定流計算の結果では、条件により分岐部直前、合流部直前で跳水が発生する。射流での分岐流れの構造は、分岐流量配分比の調節、決定機構も含めさらに検討を要する課題である。

(4) 河床変動計算により、跳水が発生する分岐部直前では河床堆積が引き起こされる。また合流部では河床浸食が起こり、それぞれ上流にさかのぼる。結果として、主流路、分岐流路それぞれ違う勾配の新たな河床面が形成される。

(5) 山地河川における分岐・合流流路の突発変動は、洪水中に分岐部で発生する跳水によって上流から運ばれてきた礫が主流路入口に堆積し、流路を閉塞することによって引き起こされると考えられる。またハイドログラフが鋭く非定常効果が無視できないことが、変動が突発的であることの理由の一つと考えられる。

本研究では分岐・合流流路の突発変動を現地調査、数値計算から大局的に考察した。しかしながら、山地河川の形態、流れ、変動は非常に複雑で局所的にはまだ不明な点もかなり残されている。山地河川での土砂の生産、貯留、輸送の現象、機構を明かにするためにも、これからの課題として遮蔽効果を含んだ混合粒径での取り扱いの必要性が挙げられる。

謝辞：本研究の一部は、北海道開発局の受託研究費によって進められた。また、白水川調査に際しては、札幌営林局定山溪営林事務所の厚意を得た。末尾ながら関係諸方に深謝の意を表す次第である。

【参考文献】

- 1) Grant, G.E., Swanson, F.J. and Wolman M.G. : Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Geological Society of America Bulletin, v.102, pp340-352, 1990
- 2) Harvey, A.M.: Sediment Supply to Upland Streams, Influence on Channel Adjustment, Sediment Transport in Gravel-bed Rivers, John Wiley & Sons Ltd., pp121-150, 1987
- 3) 長谷川和義: 山地河川の形態と流れ、水工学シリーズ88-A-8, 1988
- 4) Hasegawa, K., Mori, A. and Ishikawa, S.: Bed Topographies and Sediment Transport during Flood in Mountainous Rivers, International Conf. on RIVER FLOOD HYDRAULICS, pp327-336, 1990
- 5) 長谷川和義・石川伸・高橋一浩: 山地河川の分岐流路形態とその変動－白水川調査より、道支部論文報告集第46号、II-18, pp269-274, 1990
- 6) 流れの数値シミュレーション、日本機械学会編、コロナ社、1986
- 7) 崇田徳彦・清水康行・北條紘次: MacCormac法を用いた不定流計算、第45回年講概要集、II-190, 1990
- 8) 芦田和男・大同淳之・高橋保・水山高久: 急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究、京大防災研究所年報第16号B, pp481-494, 1973
- 9) 辻本哲郎・細川迭男: 急勾配水路における礫の限界掃流力と流砂量、土木学会論文集第411号、II-12, 1989
- 10) 長谷川和義・石川伸: 山地河川における分岐・合流流れの数値計算法、道支部論文報告集第46号、II-17, pp263-268, 1990
- 11) 今井悟・中川武夫: 跳水内部の流れ特性の水路幅方向依存性、第45回年講概要集、II-176, 1989
- 12) 長谷川和義・石川伸・大高道夫: 分岐・合流を含む急勾配流れの特性に関する実験的研究、道支部論文報告集第47号、1991