

山地河川に見られる河床形態と網状流路の再現実験

Reproductive experiments of bedforms and braided streams found in mountain rivers

北海道大学大学院 ○学生員 目黒 嗣樹 (Hideki Meguro)
 北海道大学大学院 正員 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
 北海道大学工学部 学生員 大塚 剛史 (Takeshi Ohtsuka)
 水資源開発公団 正員 竜澤 宏昌 (Hiromasa Tatsuzawa)

1. はじめに

自然環境の保全を考慮した河川改修や、土砂の流砂系としての一環管理のためには、山地流域における形態・流れ・土砂流出についての機構をさらに詳しく解明する必要がある。山地河川の形態に関して長谷川・藤田¹⁾、森ら²⁾、長谷川³⁾は、現地観測によって河床が[1]谷幅スケールの大規模波、[2]流路幅スケールの中規模波、[3]水深スケールの小規模波の重畳によって構成されていることを明らかにしている。Grant・Swanson・Wolman⁴⁾も、この結果に非常に近い形態分類を示している。また、複数スケールの形態は、沢田・芦田⁵⁾によっても確認されている。3つの形態のうち、小規模波に関しては礫段・礫列といった2種類の河床形態の存在とそれらの成因や性質が明らかにされている⁶⁾。また、中規模波に関しては沖積河川の交互砂州に類似した砂礫堆であることが確認されている⁷⁾。さらに、混合砂礫の分級不安定にもとづく縦横断交互分級波の存在なども指摘されている⁹⁾。しかし、大規模河床波については現地観測から流路の網状化が関係していること以外詳しいことはわかっていない。網状流路を対象とした実験は、藤田ら¹⁰⁾、芦田・江頭・里深ら¹¹⁾¹²⁾によって行われており、種々の興味深い結果を得ているが、これらは流路形成と土砂流出特性の把握が目的とされており、山地河川の大規模波との関係にはふれられていない。本論文は、山地河川の3つの形態の重畳の再現を試みた著者らの実験結果¹³⁾とともに、幅広い水路を用いた追加して行なった実験の結果を報告するものである。

2. 実験の内容

次章に示す白水川や隣接する小川における観測結果より、山地河川における大規模波は流路の網状化とセットになって生起していると考えられる。このため、大規模河床波は、イベント的な大流量時に形成された長波長の砂州に起因するものであり、その後には、はじめよりも小さい流量が重なることで、中規模・小規模波が形成されて3つの形態が重なるのではないかという仮定のもとで実験を行った。

2.1 実験方法

実験には、タルボット型の粒度分布 $P=(d/d_{max})^n$ (P : 粒径 d の砂礫の通過重量比率, d_{max} : 最大粒径) に従い、最大粒径 1.5cm、べき数が $n=1/4$ の混合砂礫を使用した。これを12cmの厚さでフラットな状態に敷き詰めた後、水路中央に深さ 2.0cm、幅 30cm の矩形の溝を作製し、そこに無給砂の条件で通水を行なった。なお、Run. L2 実験には、勾配 1/20、長さ 20m、幅 60cm の直線水路を、Run. L4 の実験には、勾

表-1 実験条件

実験条件								
Run.	記号	勾配	Q (l/s)	B (cm)	B/H	τ^*_{*m}	Fr	通水時間(分)
L2	●	1/20	1.78	30	20	0.152	1.037	10
L2-1	■	1/20	0.6	15	12	0.126	0.935	83
L2-2	▲	1/20	0.9	15	10	0.152	1.037	50
L4	○	1/15	2.09	30	18.4	0.165	1.252	6.5
L4-1	□	1/15	0.843	15	10.2	0.149	1.001	70

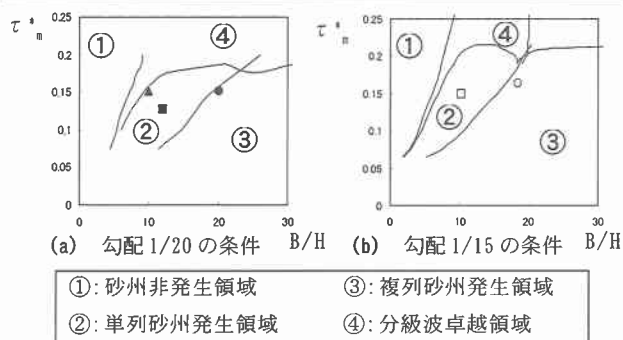


図-1 領域区分図

配 1/15、長さ 10m、幅 120cm の直線水路をそれぞれ用いた。

2.2 実験条件

急勾配混合砂礫水路において複列砂州の発生条件を与えるために、長谷川・藤田ら¹³⁾による線形不安定解析を行い、図-1(a)(b)のような領域区分図を作成した。これをもとに表-1に示すような実験条件を決定した。図-1、表-1中の記号で、●、○は複列砂州の発生領域にある条件、■、▲、□は単列砂州の発生領域にある条件を示している。実験は、Run. L2、Run. L4それぞれにおいて網状流路が形成され、必要な計測を行った後に、生起した河床をそのまま用いて Run. L2-1、2 および Run. L4-1 の通水を行った。なお、表-1中の Q , B , H , τ^*_{*m} , Fr は、それぞれ流量、流路幅、平均水深、平均粒径礫 (0.3cm) に対する無次元掃流力、フルード数であり、これらを求める際には抵抗則として、礫床河川や急勾配混合砂礫実験でよく合うとされている⁶⁾⁷⁾⁸⁾、Hey の式を用いた。

3. 山地河川の現地観測 - 白水川上流の例

図-2(a)は、1989年7月に測量された豊平川水系薄別川支川白水川 (流域面積 13.63km², 流路長 8.2km, 平均勾配 1/20) の合流点から上流 1.3~2.3km 区間における河床縦断変化図である。流路中央に沿って小規模波のステップ部とプール部を交互に水準測量したもので、平均勾配を差し引いて描いている。図中の、のこぎり刃のような細かい波が

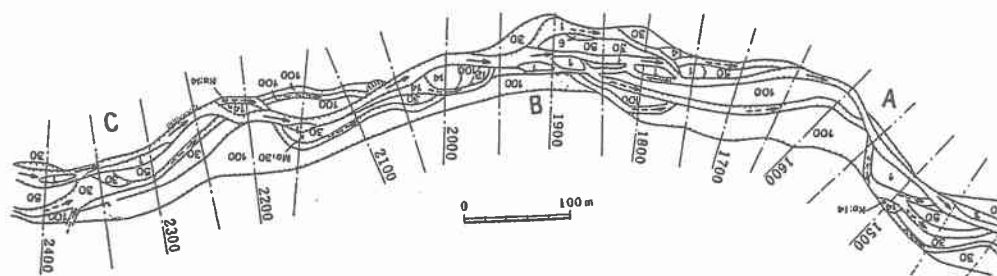
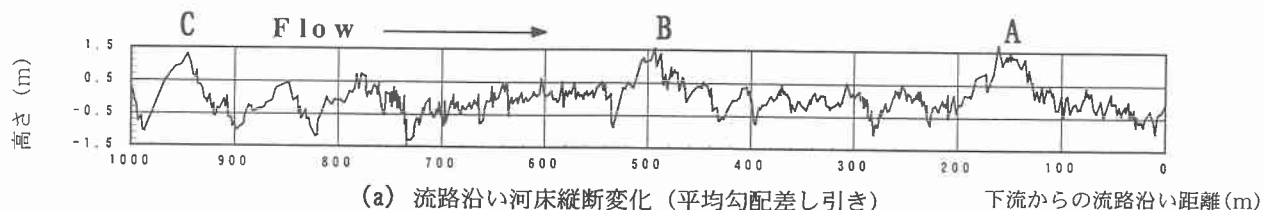


図-2 白水川の現地観測データ

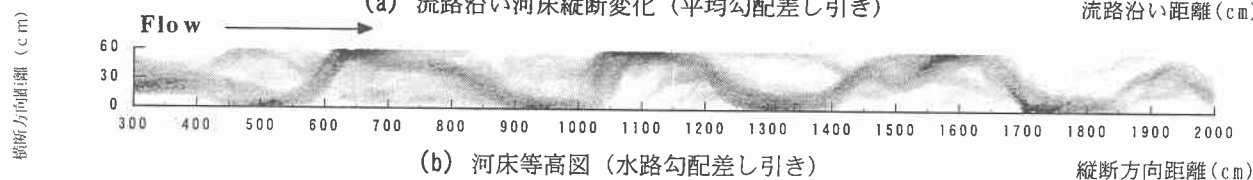
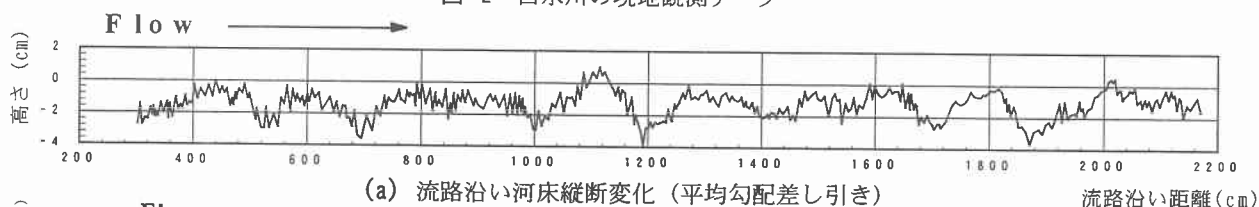


図-3 Run. L2-2の河床計測データ

階段状の小規模河床波であり、区間内に214個確認された。平均波長は5.38m、波高は42cmである。この小規模波がいくつか集まって波長30～50mの波を形成している。これが中規模波である。また、現地では、350m、650m、750m付近の中規模河床波のところに、やや小さい主流路に対する分岐・合流流路が見られた。また、図-2中のA,B,Cで示す地点は相対的に河床が高くなっていて、この付近には大規模な分岐流路または、廃棄された分岐流路が確認されている。さらに、谷幅との対応をみるとA,B,Cの地点は、狭窄部から谷幅の広い谷底平地に出るところである。谷幅は、狭窄部で20-30m程度、谷底平地では100m以上になっていた。図-2(b)は、縦断測量を行った地点付近の平面図を表している。図中の数字は測量時の植生年代で堆積の経年数を表している。実線の矢印は現流路、点線の矢印は旧流路を表している。A,B,C付近から下流において分岐・合流が活発に生じ網状化している様子がわかる。我々は、このような谷幅スケールの河床形態を大規模波と見なしている。

4. 実験結果

4.1 Run. L2 シー・ズ 実験

Run. L2は、網状化の原因となる複列砂州の形成条件で、大規模河床波が生起するような大洪水を想定したものである。この通水では、通水開始後まもなく低水路の側壁の侵食が周期的に活発になり、ひょうたん型の流路形状が現れ

た、これからまもなくして中州が生起し、8の字蛇行が発生した。この様子を写真-1に示す。

Run. L2-1は、Run. L2の河床に対して、中・小の洪水を想定して行った通水で、流路幅を15cmに設定した場合に、単列砂州が形成する条件である。この通水では、写真-2に示すような小規模波や写真-4に示すような中規模波長クラスの複列砂州が形成された。これらは、写真-3の白水川現地の小規模波の様子や、現地観測時に発見されている分岐・合流を伴っている中規模波の様子と非常によく似ている。

Run. L2-2は、Run. L2-1の河床に対して通水を行ったもので、水理条件の想定は、Run. L2-1とほぼ同じであるがこちらの方が少し流量が大きくなっている。この通水では、侵食傾向の強まった部分で、分岐流路が閉塞して流路の集中が見られた以外は、Run. L2-1とほぼ同様の流状であった。図-3にRun. L2-2の河床データを示す。図-3(a)は、主流路の流心沿いに小規模波のステップ部とプール部を交互に計測し、平均勾配を差し引いた河床縦断図である。図中の細かいギザギザが小規模波を表し、図-2(a)ほど明確ではないが部分的にみられる30-80cmの起伏が中規模波で、約200cmの大きい起伏が大規模波である。図-3(b)は、河床等高図であり、この図から流路の位置や形状がわかる。

この実験により、[1]大・中・小規模河床波の重なりが再現できたとともに、[2]大規模河床波が大流量時に形成される複列砂州に起因することが明らかとなった。しかし、分岐した流路がすぐに水路側壁に接触してしまったため、谷幅との関係を見ることがむずかしい。そこで、Run. L4では、幅

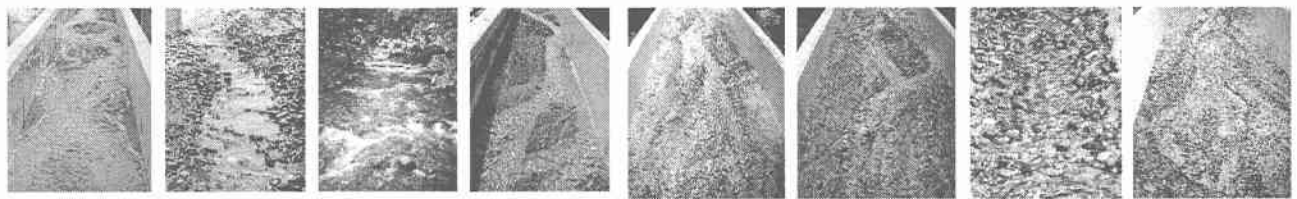


写真-1 写真-2 写真-3 写真-4 写真-5 写真-6 写真-7 写真-8

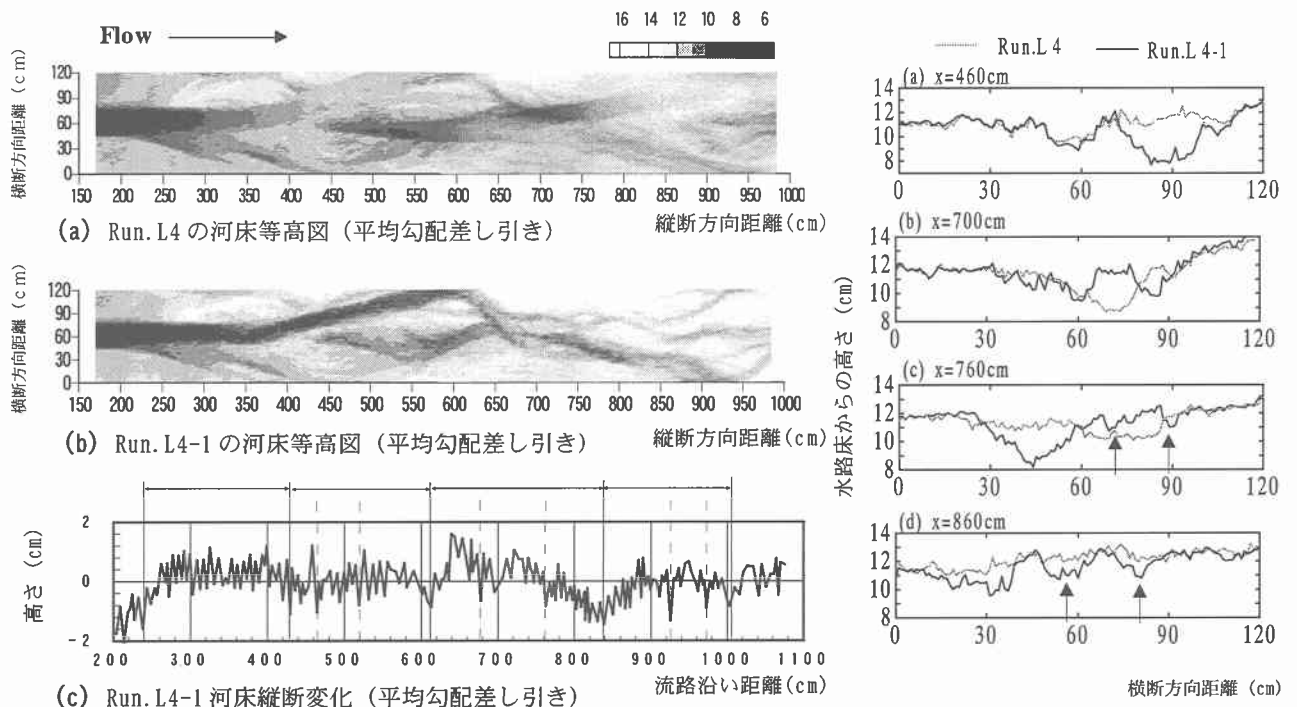


図-4 Run. L4 と Run. L4-1 の河床データ

図-5 Run. L4 と Run. L4-1 の河床断面図

広の水路を用いた追加実験を行なった。

4.2 Run. L4 シリズ実験

Run. L4は、Run. L2と同様に網状化の原因となる複列砂州の形成条件で、大規模河床波が生起するような大洪水を想定したものである。この通水では、通水開始からまもなく、縦断方向に $x=250 \sim 450\text{cm}$ の左岸側の複列砂州を発端として、 $x=450 \sim 650\text{cm}$ の左岸側、 $x=350 \sim 550\text{cm}$ の右岸側の順に複列砂州(約 200cm の波長)が発達し、水路全体で見ると、やや変則的ではあるがモード3の複列砂州が生起した。その後は、時間経過とともに、上流側で侵食傾向が強まり、初めに形成された分岐流路は閉塞した。これとは逆に $x=600\text{cm}$ 付近では、堆積傾向がみうけられ、この地点から下流側は、流路を左右に振りながら網状流路を形づくっていた。

Run. L4-1は、Run. L4の河床に、やや小さい流量の通水を行ったものである。こちらは、通水初期から $x=300\text{cm}$ 付近で侵食傾向が強く見られた。このため $x=350 \sim 550\text{cm}$ 、 $450 \sim 650\text{cm}$ の左岸側に存在している分岐流路が閉塞し、流路が1本に集中した。この様子は、図-5の $x=460\text{cm}$ の横断面図でも見ることができる。すなわちRun. L4の時点では、 $y=60\text{cm}$ に流路があり、Run. L4-1の $y=60\text{cm}$ ではその形状がほとんど変化していないことから、水がほとんど流れなかったことがわかる。そのかわり $y=90\text{cm}$ 付近が掘れており、この部分が新しく主流路となったことがわかる。このような上流側の流路の変化に伴って、 $x=700\text{cm}$ の中央付近の合流点が時間と

共に位置を変え最終的には $x=660\text{cm}$ 付近のやや右岸側に位置するようになった。写真-5から写真-6にかけて流状の変化と図-5(b)の横断面図および図-4(b)をあわせて見てみると、Run. L4では $y=70\text{cm}$ 付近が主流路となっているが、Run. L4-1では $y=70\text{cm}$ では、土砂の堆積によって河床が高くなり、その両脇に水みちが生起している様子がわかる。つまりRun. L4-1における $x=700\text{cm}$ 付近が、合流点ではなく分岐流路に変わったことを確認できる。さらに、この合流点の位置の変化がその下流の流路に大きく影響しているのが観察できた。この様子は、図-4(a) (b)の比較および図-5(c) (d)からも確認できる。まず、図-5(c)ではRun. L4の時点では主流路が $y=60 \sim 80\text{cm}$ にあったが、Run. L4-1では $y=40\text{cm}$ 付近に移動している。さらに、 $y=60 \sim 80\text{cm}$ のところに土砂が堆積して少し高くなり、図中の矢印で示すところには流路が形成されている。また、図-5(d)および図-4(a) (b) $x=860\text{cm}$ においてはRun. L4の時点では水路横断方向全体で水を被っている状態であり主流路は右岸側壁付近であった。しかしRun. L4-1の時点では主流路は、 $y=30\text{cm}$ のところに存在しているほか、 $y=60\text{cm}$ 、 $y=80\text{cm}$ に水みちを確認できる。

この他、図-5(c) (d)より明らかのように、主流路と図中矢印で示したような分岐流路とでは、その流路の高さに違いが生じている。これは実際の山地河川でも発見されており、分岐・合流流路の閉塞の原因の1つとされている。この様子も今回の実験により再現されていると考える。

この実験においても写真-7に示すような小規模波、写真-8に示すような中規模波に相当する蛇行が確認できた。

表-2 平均河床波長一覧

波長(m)	大規模	中規模	小規模	中/小	大/中
小川	125.0	34.0	4.2	8.10	3.68
白水川下流	157.0	31.0	5.5	5.64	5.06
白水川上流	400.0	44.0	5.4	8.15	9.09
Run.L2-2	2.272	0.722	0.097	7.424	3.147
Run.L4-1	1.889	0.642	0.082	7.791	2.942

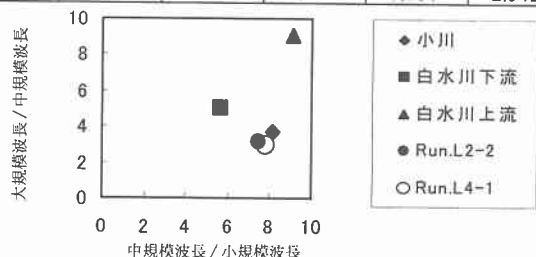


図-6 山地河川の大中小規模波長の比

また、図-4(c)は、図-3(a)と同様に主流路にそって河床高の計測を行い、同様な方法で描いたものである。細かいギザギザが小規模波、図中の縦の細い破線の間隔の起伏が中規模波、細い実線の間隔の起伏が大規模波を示している。さらに、図-4(c)の650cm付近の起伏は、図-4(b)と見比べると流路が集中している狭窄部から流路が分岐し、谷幅が拡幅していく位置に対応していることがわかる。頂部は、複列砂州の先端部（上流砂州の末端部）に対応しており白水川の場合に見る様子と一致している。

4.3 各形態の波長の検討

表-2は、3章で紹介した白水川上流部の他に、長谷川ら⁹⁾によって測定の行われた、白水川下流観測区間、および小川観測区間のデータと、今回のRun.L2-2、Run.L4-1での各河床波の平均波長を示したものである。今回の2つの実験については、大・中・小規模の波長はそれぞれで同じような長さとなっているが、Run.L4は、幅広の水路を用いているためRun.L2のものよりも長波長になると予想されたが、今回与えた条件下では、水路が幅広になったぶん、複列のモード数が増加することで、Run.L2と近い波長となったようである。図-6は、波長の検討のために横軸に中規模と小規模の波長比、縦軸に大規模と中規模の波長比で表したものである。ここで、中・小規模波長比は白水川下流のものがやや小さめの値となっている他は、実験値と2つの観測値がいずれも8程度とよく一致している。これは、長谷川らの実験⁹⁾によっても確認されている。一方で、大規模波と中規模波比は実験値で3程度で、小川では3.68と近い値を示すが、白水川の上流で9.09、下流で5.05となっており、かなり異なる結果となっている。この原因として考えられるのは、[1]大規模波が観測前のイベント的な大流量によって形成されたものと考え、その流量は様々な値をとっていたことが予想される。したがって大・中規模波長比が様々な値になるものと考えられる。[2]白水川は山地河川の中でも谷幅が広く、拡幅部で100m以上、狭窄部でも20-30m程度であるのに対して小川では10-40mとかなり狭い。[3]複列砂州の形成条件およびモード数は、初期の低水路幅の影響を受けており、[1]で述べた形成流量の違いと関連して異なる形態が生じうる。したがって、山地河川の大規模波長は、形成流量、谷幅、初期低水路幅が相互に関係して決まるものと想定され、それは広範囲のものになると考えられる。

5. まとめ

- (1) 複列砂州の形成領域内の大流量と分岐後の流路幅に対応する中・小の流量を重ねることによって、大・中・小規模の河床波の重畳を再現することができた。
- (2) このことにより、山地河川に見られる大規模河床波は、大流量時に形成される複列砂礫堆の起伏に対応していることが明らかになった。
- (3) 網状流路の形成は、拡幅、分裂、集中の要素で構成されること、その変化過程においては、侵食傾向の強いところで、分岐流路が閉塞しやすいことなどは、芦田・江頭・里深ら¹¹⁾¹²⁾の結果とほぼ同様である。
- (4) 観測結果と実験との波長の比較によって大規模波長は、流量、谷幅および初期流路幅によって広い範囲をもつことが考えられる。
- (5) したがって、今後は、初期流路幅と流量設定を変えた多くのケースの実験、および給砂をおこなった場合の実験を行って河床形状の変化過程を調べることなどが必要である。

参考文献

- 1) 長谷川和義・藤田陸博：ステップ・プールに視点をのせた山地河道の流れの抵抗，第30回水理講演会論文集，pp.79-84，1986。
- 2) 森明巨・黒木幹男・岸力・戸嶋光映・谷口伸也：山地河川における階段状河床形の分類と形成機構に関する研究，第30回水理講演会論文集，pp.229-234，1986。
- 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，pp.1-22，1988。
- 4) Grant, G. E., F. J. Swanson and M. G. Wolman: Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon, Geological Society of America, Vol.102, pp.340-352, 1990。
- 5) 沢田豊明・芦田和男：山地溪流における流路形態と土砂流出，第33回水理講演会論文集，pp.373-378，1989。
- 6) 長谷川和義：溪流の淵・瀬の水理とその応用，1997年度（第33回）水工学に関する夏期研修会テキスト，pp.A-9-1～A-9-20，1997。
- 7) 長谷川和義・藤田豊彦・竜澤宏昌・林日出喜・森高信：山地河川に見られる中規模・小規模共存河床形態の実験的検証，水工学論文集，第43巻，pp.749-754，1999。
- 8) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：溪流の小規模河床形態に関する研究 - 魚類等の生息環境保全対策への応用を目指して -，土木学会論文集，No.656/Ⅱ-52，pp.83-101，2000。
- 9) 長谷川和義・藤田豊彦・目黒嗣樹・竜澤宏昌：河床不安定および分級不安定をともしう急勾配混合砂礫床の形態，水工学論文集，第44巻，pp.659-664，2000。
- 10) 藤田裕一郎・赤松英樹・村本嘉雄：複列砂州と網状流路の形成過程に関する実験，京都大学防災研究所年報，No.29B-2，pp.451-472，1986。
- 11) 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之：網状流路の流路変動と流砂量，京都大学防災研究所年報，No.33B-2，pp.241-260，1990。
- 12) 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之・寺西直之：網状流路における混合砂礫の分級と流路変動，京都大学防災研究所年報，No.34B-2，pp.247-260，1991。
- 13) 目黒嗣樹・長谷川和義・大塚剛史・竜澤宏昌：山地河川に見られる大・中・小規模共存河床形態の再現実験，水工学論文集，第45巻，2000。（投稿中）