

貝沢試験流域における隣接する三流域の降雨流出特性と浮遊土砂動態

白木克繁*・片岡宏介*・工藤 司**

Characteristics of rainfall-runoff processes and stream turbidities at adjacent three basins in Kaisawa experimental watershed

Katsushige SHIRAKI*, Kousuke KATAOKA*, and Tsukasa KUDO**

要 旨

神奈川県相模原市の相模川支流の貝沢を試験流域に選定し、降雨流出特性と浮遊土砂動態の特徴を調査した。試験地内に隣接する第1、第2および第3流域を設置し、それらと残流域を合わせた第4流域、および全体を内包する最下流に第5流域を設定し量水堰を設置した。調査の結果、地形図上で流域条件が類似していると考えられた第1流域、第2流域、第3流域の流出特性に違いがみられることが明らかとなった。特に第1流域においては総流出量が第2、第3流域よりも多く、降雨時、無降雨時ともに流出量が多いことが分かった。一方、第2流域と第3流域の流出特性は類似していることがわかった。浮遊土砂動態に関しては、第1流域において濁度濃度が高くなる傾向があった。浮遊土砂による各流域からの土砂流出量は、第1、第2、第3流域の合計浮遊土砂量よりも第4流域からの流出量が少なく、第4流域内部で浮遊土砂の堆積が起こっている可能性が示唆された。

I はじめに

日本は多雨地帯に位置しているが、急峻で狭小な地形的特徴や、降雨量の地域格差や季節変動、都市と工業の発展に伴う大量の生活用水および産業用水等の大量の水需要が発生するため、安定した水資源の確保が重要な課題となる。

そのため、国土の約7割を占め主要な水源地帯である森林山地流域の水源涵養機能が期待される。また、手入れの行き届いていない人工林が森林の水源涵養機能へ与える影響や、下流への土砂流出被害が懸念されており、全国の各自治体では森林税や水資源税が導入され森林の水源涵養機能と土砂の流亡防止に着目した森林管理計画・手法の確立へ向けた取

り組みが行われている。

本報告の対象流域である神奈川県貝沢試験流域は、県より水源の森林エリアに指定されている。水源の森林エリアの一部では、「かながわ水環境保全・再生事業」の一環により、山地森林流域の管理計画・手法の確立を目的として県内の複数個所に試験地が設定され研究調査が行われている。特に本調査地である貝沢試験流域では、水文試験である対照流域法を用いて森林整備による山地の水源涵養機能へ及ぼす影響の実証検証を長期にわたって行うことが計画されている。

そこで本報告では、貝沢試験流域内の隣接する三流域の流出特性を把握することと降雨流出に伴う浮遊土砂流出の現状について把握することを目的とした。

* 東京農工大学大学院 農学研究院 (〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8)

** 砂防エンジニアリング株式会社

Ⅱ 貝沢水文試験地の概要と観測方法

1 貝沢水文試験流域の概要

貝沢水文試験地(北緯 $35^{\circ} 37'$, 東経 $139^{\circ} 10'$)は相模川水系相模川上流、神奈川県相模原市緑区与瀬地区(旧津久井郡相模湖町)に位置しており、源流域における隣接した三つの小流域(流域1, 2, 3)とそれらを含む流域(流域4)が入れ子状に設定してある(図1、図2)。

気候は、流域内に設置した気象ステーションNo.1(図1参照)の記録(2010年5月～2011年9月)より平均気温 15.3°C 、最暖月(8月)の平均気温 23.7°C 、最寒月(1月)の平均気温は -0.6°C であった。平均年降水量は 1673.5mm (相模湖アメダス1981年～2010年)で、最も平均降水量の多い月は8月の 271.1mm 、最も平均降水量の少ない月は12月で 46.4mm となっている。

地質は、白亜紀から古第三紀系の小仏層群に分類され、基岩は堆積岩となっている。土壌は褐色森林土亜群となっており乾性褐色森林土・適潤性褐色森林土が分布している。

植生は、スギ・ヒノキからなる植林地と一部のコナラ群落からなる二次林になっている。

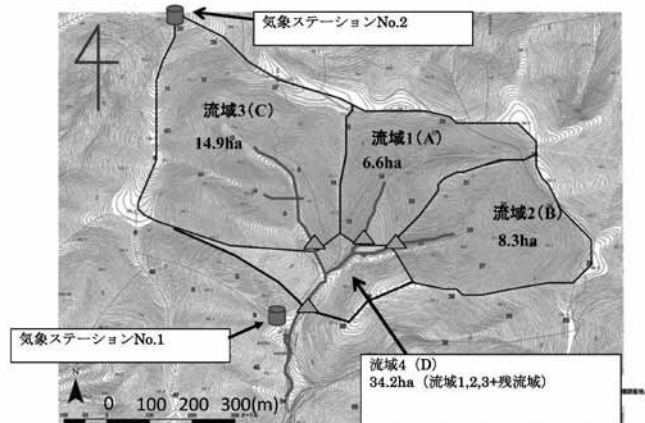


図2 流域1から4と量水堰の位置

2 観測方法

(1) 雨量

雨量は、気象ステーションNo.1、No.2(位置は図1を参照)において 0.5mm 転倒マス式雨量計を用いて観測を行った。本報告では、比較的上空の開けたNo.2雨量計の雨量データが、流域の情報としてもっとも適当として解析に用いている。

2010年5月21日～2011年4月までは1分毎に、それ以降は10分毎に自動記録を行った。なお、全ての観測項目は2010年5月21日より観測を開始した。

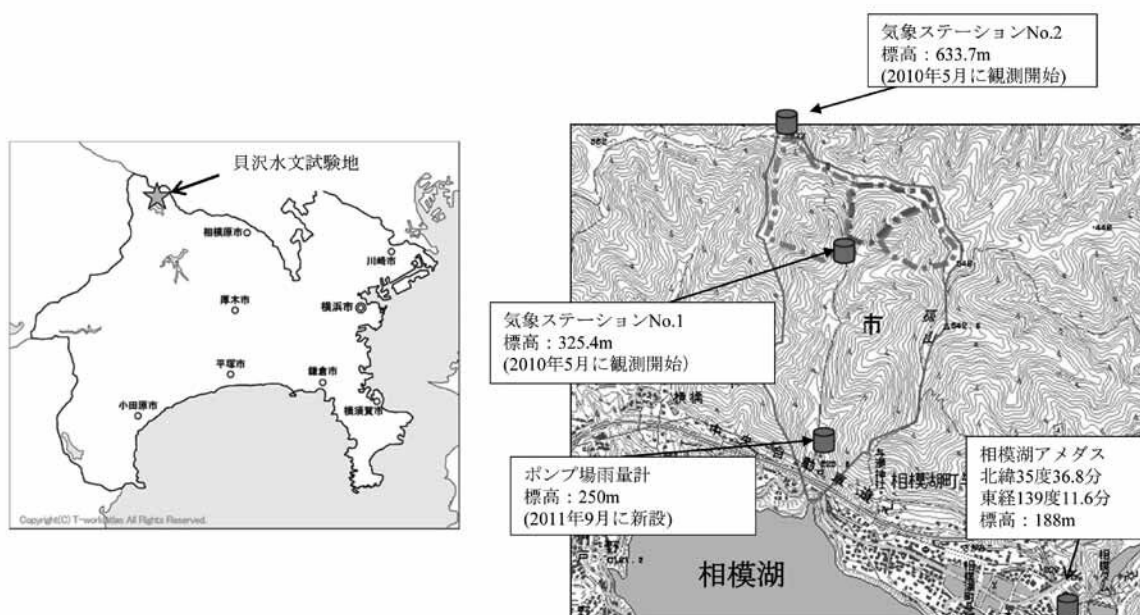


図1 貝沢試験流域の位置と各雨量計、気象ステーション位置

(2) 流量

各流域（1、2、3、4）の末端部において 90° V ノッチの量水堰を設置し、水位観測を行った。また各量水堰には圧力式水位計と、ステンレス製の定規（以下、水位ゲージと表記）の設置を行い、事前調査により作成した水位流量換算式（以下、H-Q 式と表記）を用い流量への換算を行った。

(3) 濁度 (Formazine Turbidity Unit)

各流域の堰プール内に濁度計（測定範囲は 0-500FTU）を設置して、濁度データの自動記録を行った。

濁度は、Formazine Turbidity Unit（以下 FTU）を指標に用いて測定を行った。FTU とはホルマジン濁度標準液を基準液として、試料を通過した透過光の強度を測定し作成した検量線から求める濁り具合の指標のことである。値が小さければ水が澄んでいることを表し、値が大きければ水が濁っていることを表す。

III 観測データの精度

1 水位 - 流量換算式 (H-Q 式) の作成過程

(1) H-Q 式の概要

水位と流量の関係式である H-Q 式を各流域において作成した。H-Q 式には次の 90° V ノッチの水理公式を利用した。この式は以下のようにあらわすことができる。

$$Q = C \cdot H^{2.5} \quad \dots (1)$$

但し、Q: 流量 (m³/sec)、C: 流量係数、H: 越流水位 (m)

上記の水理公式を利用するには C と H の決定が必要となる。以下、決定方法について簡単に示す。なお、H-Q 式は堰のメンテナンスやエッジの摩耗、ステン板のゆがみが生じることを考慮し定期的に確認し、更新していくことが望ましい。

(2) 越流水位 H の決定

本報告において越流水位 H は、以下の式より算出した。

$$H = H_r - H_0 \quad \dots (2)$$

但し、H_r: ゲージ水位 (m)、H₀: 0 水位 (m)

本報告において、H_r (ゲージ水位) は堰内ノッチ部付近に固定したステンレス製定規の目盛を指し、H₀ (0 水位) は、実測した H-Q の関係から決定した流

量が 0 の時のゲージ水位のことである。

(3) 0 水位 H₀ の決定

H₀ は、越流水位 H を求めるために必要となる。そこで本報告では、H₀ を求めるために、全量チェックと 0 水位チェックを行った。

全量チェックとは、量水堰からの越流水を時間を計りながら集水し、集水した越流水の容量の測定と、集水時のゲージ水位 H_r の測定を行う作業のことをいう。集水した越流水の容量は、メスシリンダーやビーカーを用いて測定した。容量を測定した越流水は、水位との対応関係をみるため集水時間で除して単位時間あたりの流量 (m³/sec) を求めた。この全量チェックを、水位を変化させながら各水位にて 3 回以上行った。本報告において、水位の変化は塩ビ管やホースを使用し堰プール内から下流へ流すことで行った。但し、全量チェックは水位の安定の確認をしてから行った。

0 水位チェックとは、堰からの越流がなくなるまで水位を下げ、越流が止まる瞬間のゲージ水位 (H_{0e}) と越流が始まる瞬間のゲージ水位 (H_{0s}) を測定する作業をいう。

0 水位チェックにより測定した H_{0e} と H_{0s} をもとに、全量チェックで得られたゲージ水位 H_r から越流水位 H を算出し、越流水位 H (m) と流量 Q (m³/sec) の関係を同じ散布図上に 2 つ (H_{0e} と H_{0s} の場合) 作成し近似線と決定係数 (R² 値) を求めた。この際 R² 値が 1 に近い方を、越流水位 H を求める際に用いる 0 水位 (H₀) に決定する。

なお本報告では、より流量データの精度を高めるために、求めた 2 つの近似線の間を通り、かつ R² 値が最も 1 に近づくような 0 水位 (H₀) を試行により決定した。

(4) 流量係数 C の決定

90° V ノッチの量水堰において、流量係数 C の決定には沼知・黒川・淵沢公式（以下、沼知式）が用いられることがあるが、本調査流域ではデータ精度を高めるため全量チェックで得られた実測流量と越流水深から最小二乗法を用いて流量係数 C を導いた。各量水堰の HQ 曲線と実測流量の値を図 3(a) (b) に示した。

以上より、各流域の水位 - 流量換算式 (H-Q 式) は以下ようになった。

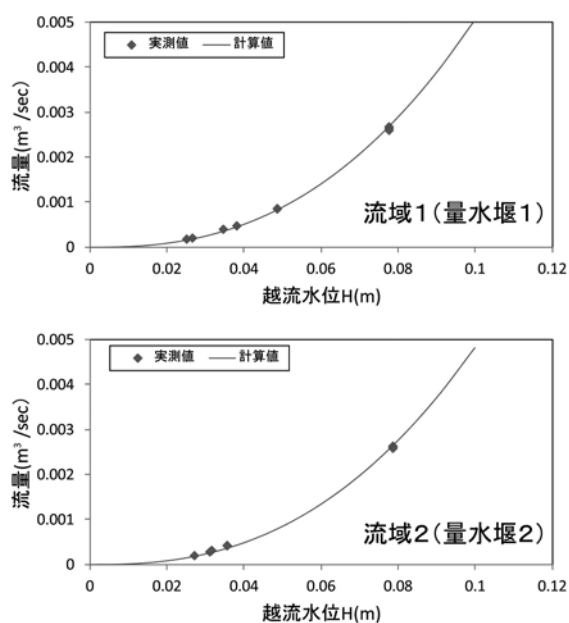


図3(a) 流域1(量水堰1)と流域2(量水堰2)のH-Q曲線

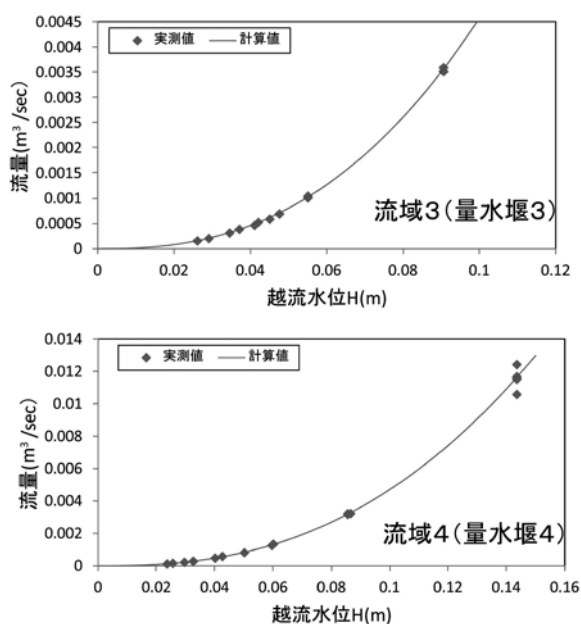


図3(b) 流域3(量水堰3)と流域3(量水堰3)のH-Q曲線

流域1

$$Q_1 = 1.592754 (Hr_1 - 0.3195)^{2.5} \quad \dots (3)$$

流域2

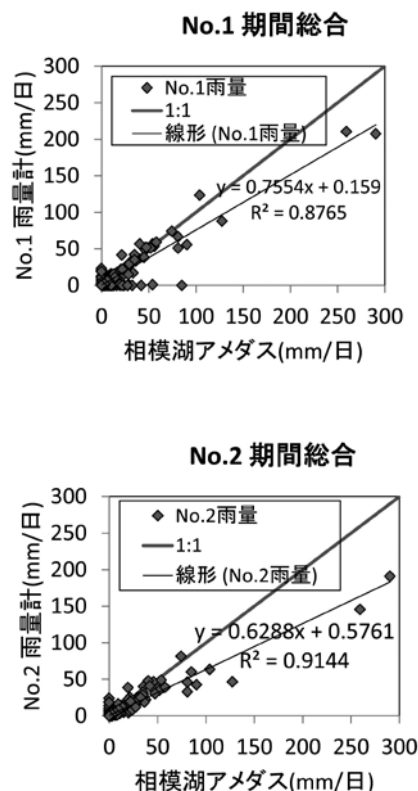
$$Q_2 = 1.52341 (Hr_2 - 0.2125)^{2.5} \quad \dots (4)$$

流域3

$$Q_3 = 1.439928 (Hr_3 - 0.412)^{2.5} \quad \dots (5)$$

流域4

$$Q_4 = 1.485121 (Hr_4 - 0.4035)^{2.5} \quad \dots (6)$$

図4 相模湖アメダスと各雨量計の関係(日雨量)
期間総合 2010年5月～2011年12月

2 解析に用いた雨量データ

流域量水試験を行うためには、信頼できるデータ精度が重要な課題となる。特に雨量は、降雨流出過程の入力情報として高い精度が要求される。そこで解析に用いるデータ精度のチェックを行った。データ精度のチェックには、雨量計 No. 1、雨量計 No. 2、相模湖アメダスの日雨量 (mm/day) データを用い各雨量計の日雨量の関係によって検討した。図4に、相模湖アメダスと No. 1 雨量計・No. 2 雨量計の関係を、日雨量データを用いて整理したものを示す。図より、雨量計 No. 1、雨量計 No. 2 とともにアメダス相模湖の値と比較して降水量が少なくなっていることが分かる。これは特に降雨量の多い期間でのデータに顕著である。この原因として、実際に降雨空間分布に差があり、アメダス相模湖の地点での降水量が多い場合と、貝沢雨量計の雨量補足率が少ない可能性が考えられる。今後貝沢気象ステーション周辺の樹木の位置や風の強度、およびレーダー雨量計で求められる降水空間分布について比較検討を継続していく必要がある。

そのほかに詳細な比較を行ったところ、一方の気象ステーション雨量計で強制的に強い雨が観測されているが、もう一方の気象ステーション雨量計およびアメダス雨量計では無降雨となる日がみられた。これらの日は、いずれか一方の雨量計において、雨量計へのいたずらを含めた転倒マスの誤転倒、もしくは記録されていない転倒マスチェックである可能性が考えられる。そこで誤転倒の可能性が考えられる日における1時間データの降雨-流出応答から誤転倒の有無の判定を行った。また、誤判定と判断したものはアメダスデータを用いた。

本報告では、流域の近辺であり、上空の開空度の比較的高いNo. 2雨量計の値を解析に用いる値としている。

IV 結果および考察

1 各流域のハイト・ハイドログラフ

2010年6月より2011年12月までのハイトグラフ、ハイドログラフを図5(a)(b)に示す。流量、雨量ともに水高換算して記してある。

水高換算した流量(mm/day)のハイドログラフからは、降雨の少なかった2011年1月、12月の流域1に逓減が他の流域に比べて緩やかであり、他流域より流域1の基底流出成分が多いことが考えられた。

基底流出成分は、地下水流と遅い地中流であるとされていることから、流域1において基底流出が多くみられた原因として、①土層厚の違いによる遅い地中流の影響、②流域界外からの地下水流入の影響等が考えられるが、流域1の基底流出成分が多いのではなく他流域の基底流出成分が少ない可能性もある。原因として、③各流域における蒸発散量の違い、④山体深部への浸透等が考えられる。流域1において基底流量が多い理由については、今後も継続して分析が必要である。

2 観測期間の水収支

観測期間(2010年6月～2011年12月)の月別水収支を表1に示す。

また、図6には月別降雨量と月別流出量の関係を示す。

観測期間の月別水収支より、流域1の流出量が他

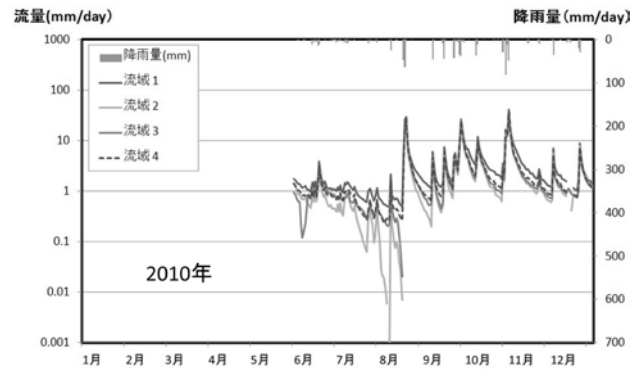


図5(a) ハイトグラフとハイドログラフ
(2010年6月から12月)

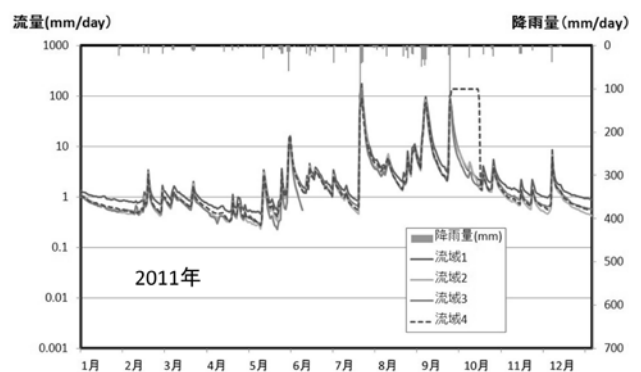


図5(b) ハイトグラフとハイドログラフ
(2011年)

流域よりも大きく流出率が高いことがわかる。比較的にデータの信頼性が高かった2011年3月～6月にかけての平均流出率は流域1で51.2%流域2で40.2%、流域3で34.2%(但し、補完箇所含む)、流域4で41.1%となり、流域1の流出率が10～15%程度高い結果となった。

また、各流域において2010年10月、2011年1月、7月、9月に流出率(流出量/降雨量×100)が100%以上の流出がみられた。流出率が100%以上の流出がみられた月の雨量をみると、2011年1月を除いて、いずれも200mmを超える雨量(mm/month)が確認された。このことは、No. 2雨量計の降雨の過小評価の影響の可能性と、各流域に流域外からの水供給がある可能性が考えられる。2010年10月、2011年1月は、当該月の降水量が少なく、前の月の降水量の影響を受け当該月の流量が多くなっていることが流出率が高い原因である。

表1 月別水収支（網掛けは補完箇所、－はオーバーフローのため欠測）

年 year	月 month	No.2 降雨量 (mm) Precipitation	流出量 Discharge (mm)				流出率 (%)			
			流域①	流域②	流域③	流域④	流域①	流域②	流域③	流域④
2010	6	58.5	41.9	24.9	27.1	30.8	71.6	42.5	46.4	52.6
	7	56	30.9	11.2	17.5	19.4	55.1	20.0	31.3	34.7
	8	140.5	112.1	77.2	91.5	90.5	79.8	55.0	64.0	64.4
	9	232.5	157.1	114.5	118.9	129.2	67.6	49.2	51.1	55.6
	10	177	246.7	175.3	179.8	193.7	139.4	99.0	101.6	109.4
	11	70	68.2	37.7	40.9	46.7	97.4	53.9	58.4	66.7
	12	105	70.8	53.8	47.9	58.1	60.6	45.9	45.6	47.2
2011	1	0.5	31.2	22.1	20.9	22.6	102.3	72.3	68.5	73.9
	2	67	32.1	22.3	21.6	22.7	47.9	33.3	32.2	33.9
	3	53	31.1	23.5	21.7	24.2	58.7	44.3	40.9	45.6
	4	26.5	19.7	13.0	12.9	14.5	48.6	32.1	31.8	35.9
	5	180.5	81.4	72.0	54.3	72.8	40.8	36.1	27.2	36.5
	6	128	72.7	62.0	60.0	59.3	56.8	48.4	36.8	46.3
	7	314	486.3	379.9	362.4	288.8	154.9	121.0	115.4	92.0
	8	154.5	148.0	117.7	113.4	123.4	95.8	76.2	73.4	79.9
	9	347.5	674.8	540.9	483.1	—	194.2	155.6	139.0	—
	10	84.5	89.32	72.48	65.23	—	105.7	85.8	77.2	—
	11	53	39.90	22.41	27.29	25.12	75.3	42.3	51.5	47.4
	12	51	48.08	31.30	33.91	33.78	94.3	61.4	66.5	66.2

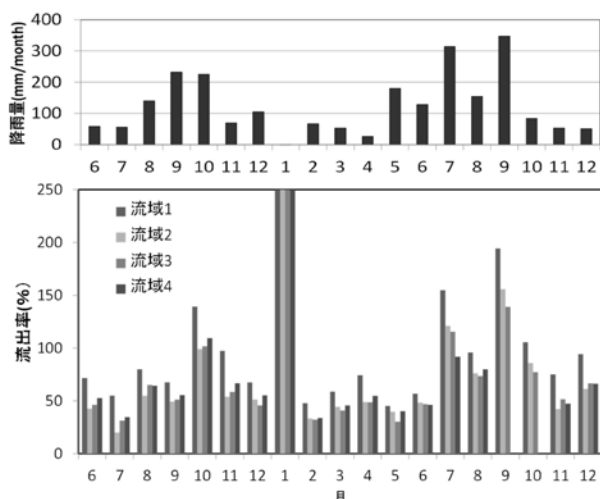


図6 月別降雨量と流出量

3 直接流出特性

直接流出は表面流と早い地中流から構成されており、流域内の内部情報を知るための手掛かりとなる。そこで直接流出の分離を行い各流域の相違を調べた。

直接流出量の分離には、1時間データ (mm/hour) を用いた。分離方法は、変曲点法を用いた（ごく少規模の流出に対しては水平分離法）。具体的には、ハイドログラフを対数上にとり、降雨に伴い流出量が増加する直前を始点として逡減期間の変曲点まで直線を引き、ハイドログラフと直線に囲まれる部分を直接流出量として算出した。変曲点の決定は、対数軸上にとったハイドログラフの逡減期において6時間以上が直線とみなせる時刻とした。また、ごく

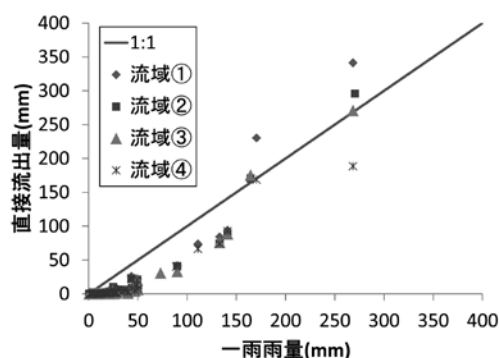


図7 直接流出量と一雨の関係

小規模の出水において変曲点が現れないまま始点と同じ流量に戻る場合は水平分離法を用いた。

直接流出の分離の結果を図7に示す。どの流域においても一雨雨量が約20mm付近から直接流出量が顕著に増加する傾向がみられた。一方で、約150mm以上の大規模な降雨があった場合には、流域1において直接流出の割合が他流域よりも大きくなる傾向がみられた。さらに流域4での結果を除き、降雨量が多くなると降水量の全量が直接流出として流出する結果となった。これは、水収支での結果と同様、一雨単位でも流出量が過大となっていることを示している。この現象が、降水量の過小評価であるのか、流域外からの流入が流域1から3で発生しているかどうかを、今後検討していく必要がある。

また、同程度の直接流出量がみられる150mm以下の各流域の平均直接流出率は、流域1で11.6%、流

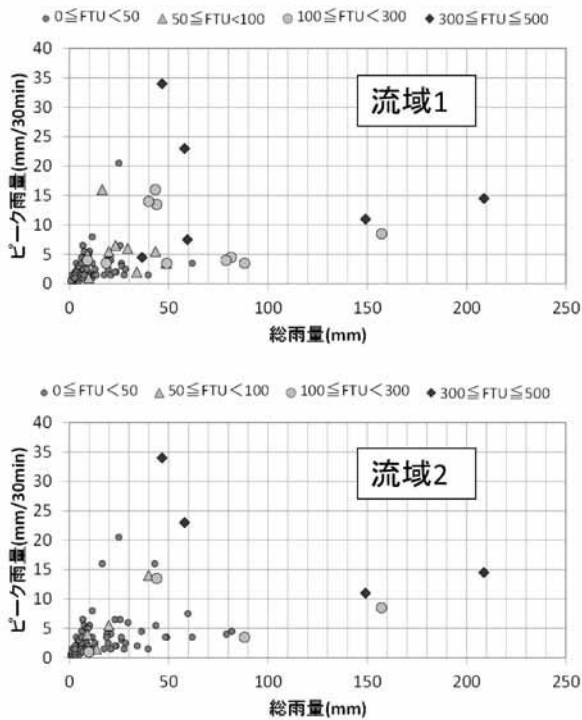


図 8(a) 降雨特性と濁度濃度

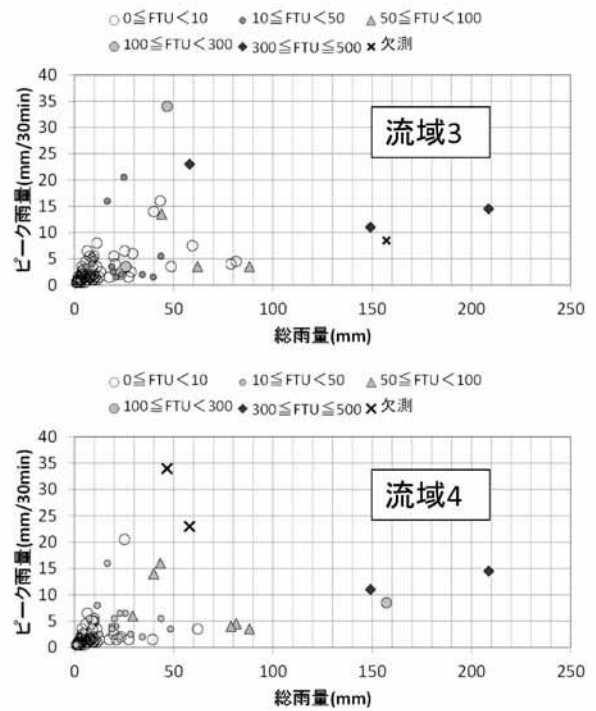


図 8(b) 降雨特性と濁度濃度

域 2 で 9.8%、流域 3 で 8.7%、流域 4 で 9.6% であった。

4 各流域の浮遊土砂量

図 8(a) (b) に、降雨イベントごとの降雨特性（総雨量、ピーク雨量）と、降水イベント最大濁度を流域ごとに示した図を示す。この図より、流域 1、2 において濁度の値が高い傾向があり、総雨量が少なくピーク雨量が少なくても比較的高濃度の濁水が生じることが分かった。流域 3 は流域 1、2 と比較すると濁度が低いことが分かる。

各流域の浮遊土砂量の相違を検討するため、FTU を浮遊土砂濃度に相当する量と仮定し、30 分ごとに観測されている FTU 値に流量 ($\text{m}^3/30\text{min}$) を乗じて総流出浮遊土砂量の指標（以下、SSi）を算出した。本報告では、各流域において濁度計に欠測がなくデータ精度が高いとみられる期間の抽出をおこなった。

図 9 に各流域の SSi 値を図示した。この図より、流域 1 の土砂流出量が最も高く、流域 2 はその半分程度であった。流域 3 からの流出土砂量は流域 1、2 と比較すると極めて少ないことが分かった。流域 4 は流域 1 に次いで土砂流出量が多くなったが、流域 4 は流域 1 から 3 および残流域が合流したものである。流域 1 から 3 の SSi 値の合算値よりは流域 4

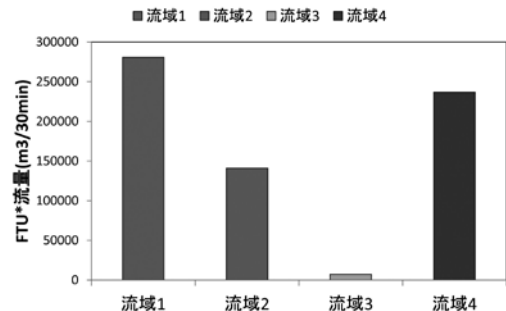


図 9 流出土砂量の指標

の SSi 値が少ないので、流域 1 から 3 を流下した土砂の一部は、流域 4 の量水えん堤を流下する前に流域 4 内に堆積したと考えるのが妥当であると思われる。

V 結 論

本報告は、神奈川県貝沢水文試験地において、対照流域試験の候補地に選定されている隣接した三流域の現状の降雨流出特性と浮遊土砂動態の実態を明らかにすることを目的として、①雨量・流量データの精度、②各流域の流出特性、③各流域の浮遊土砂動態、について検討を行った。結論を以下に記す。

(1) 雨量データの精度

- ・相模湖アメダスの日雨量データに対する雨量計 No. 1、No. 2 との関係は、日雨量が大きくなるほど、より標高の高い No. 1、No. 2 雨量計での雨量が小さく観測されており、樹冠等による過小評価の可能性が考えられるが、実際に貝沢流域内の雨量が小さい可能性についても否定できない。
- ・近隣アメダスとの比較を行った結果は、最も標高の低い相模湖アメダスにおいて最も多く雨量が観測されていたので、標高による降雨分布の違いなどから、No. 1、No. 2 雨量計における雨量の過小評価を説明することはできなかった。そのため 2011 年 9 月に新たに設置したポンプ場の雨量計の情報やレーダー雨量計による降水量分布情報も含めて今後も慎重に検討する必要がある。

(2) 流量データの精度

- ・H-Q 式の作成に関しては、実測値に沿うように作成することができた。しかし 2011 年 1 月に流域 2 において補修メンテナンスが行われたことや、流域 4 において台風イベント時に大量の土砂が流入し、流域内の状態が大きく変化した可能性を考慮すると 2012 年度においても H-Q 式の更新を行うことが必要である。
- ・2010 年に流域 2、流域 3 において微量ながら漏水が確認されているため、2011 年 1 月に補修が行われる以前のデータの取り扱いに注意する必要がある。
- ・2011 年 5 月、6 月の流域 3 における圧力式水位計のデータがロガーの電池切れのような異常値がみられた。メンテナンス等以外でも圧力式水位計に何らかの異常値がみられることがあるため注意が必要。

(3) 各流域の降雨流出特性

- ・水高換算によるハイドログラフの比較からは、流域 1 において降雨の少ない時期で逓減が緩やかで基底流量が大きいことが顕著にみられた。また直接流出量の解析から、洪水流出においても流域 1 の流出量が多いことが分かった。
- ・比較的データ精度の高いと思われる 2011 年 3 月～6 月にかけての月別水収支の結果から、平均流出率は流域 1 で 51.2%、流域 2 で 40.2%、流域 3 で

34.2%(但し、補完箇所含む)、流域 4 で 41.1% となり、流域 1 の流出率が 10～15% 程度高い結果となり、流域 1 での流出率が最も高いことがわかった。

(4) 各流域の浮遊土砂量

- ・各流域における降雨特性とピーク濁度の濃度別整理を行った結果、流域 1 において濁度発生回数が多く、流域 4 において濁度発生回数が少なくなる傾向がみられた。
- ・浮遊土砂流出量の指標 (SSi) を算出し、降雨イベント毎に各流域の SSi を求めた結果、流域 1 から SSi 値が最も大きかった。また流域 3 で最も小さかった。
- ・流域 1、2、3 の SSi 値合算値より流域 4 の SSi 値が小さく、流域 4 で流出に至るまでに浮遊土砂が堆砂している可能性が考えられた。

VI 引用・参考文献

- 藤枝基久 (1995) : ブラジル・サンパウロ州海岸山脈における流出特性, 森林総研研報, No. 369, 63-152
- 藤田正治・澤田豊明・水山高久 (2003) : 山地小流域における土砂動態のモニタリング手法, 京都大学防災研究年報, 第 46 号 B,
- 服部重昭・志水俊夫・荒木誠・小杉賢一朗・竹内郁雄 (2001) : 森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方 (I) — 湧水地域上流森林整備指針策定調査報告 —, 水利科学, 260, 1-40
- 株式会社総合環境計画 (2008) : 平成 20 年度対照流域法調査地森林環境調査業務報告書
- 神奈川県 HP : かながわ水環境保全・再生施策大綱 — 水源環境保全・再生の将来展望と施策の基本方向 — (2008)
- 倉茂好匡 (1996) : 河川の浮流土砂研究における最近の動向, 北海道大学物理学研究報告 59, 1-13
- 小田智基・浅野友子・鈴木雅一 (2008) : 塩化物イオンの物質収支を用いた新第三紀層山地小流域における深部地下水浸透量の推定, 水文・水資源学会誌, Vol. 21, No. 3, pp195-204
- 恩田裕一編 (2008) : 人工林荒廃と水・土砂流出の

実態, pp163-209

澤田昇平 (2009) : FM 草木小流域における溪流流量
の空間分布特性, 東京農工大学卒業論文
白木克繁・劉若剛・唐鎌勇・執印康裕・太田猛彦

(1999) : 東京大学農学部附属千葉演習林袋山
沢水文試験地の水収支解析, 東京大学演習林報
告, 102, p71-86

