

クルド火山噴火後のブランタス川における 河床変動および河床材料の変化特性

RIVERBED VARIATION AND CHANGE OF BED MATERIAL IN THE BRANTAS RIVER AFTER AN ERUPTION OF MT. KELUD

藤田正治¹・里深好文²・江頭進治³

Masaharu FUJITA, Yoshifumi SATOFUKA and Shinji EGASHIRA

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所流域災害研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助教授 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 草津市野路東1の1の1)

So far huge sediment production due to the eruption of Mt. Kelud has given serious damage to the Brantas river basin. On the other hand the eruption has provided soil and sand for agricultural land and construction material. So, as a first step to establishing an advanced control system both of the sediment runoff and the sediment utilization, we have investigated the change of sediment transport properties after the eruption in 1990. The field survey result shows that the sever sediment deposition occurred immediately after the eruption, but 1 year after the eruption the bed aggradation changed into the bed degradation because of active sand mining. Also we obtained the sediment supply condition at the confluences with the tributaries after the eruption and presented a way to estimate the condition. Furthermore the field observation result on wash load indicates the wash load transport rate decreased rapidly after the eruption.

Key Words: *sediment runoff, wash load, Brantas river, Indonesia, integrated sediment management*

1. はじめに

ブランタス川はインドネシア東ジャワを流れる流域面積 12,000km², 長さ 320km の河川であり, 東ジャワの貴重な水資源として, 灌漑, 水道水, 工業用水, 発電などに利用されている. 流域には火山が点在し, その中でもクルド (Kelud) 山とスメル (Semeru) 山が現在も噴火を繰り返し, それによって生産される多量の土砂は流域に大きな災害をもたらすと同時に, 農地や建設用骨材として有効に活用されている. また, 社会経済的背景から, 森林伐採や砂利採取が過度に行われ, このような人的インパクトも流域に大きな影響を与えている. したがって, ブランタス川流域の土砂管理においては, 水や土砂などの資源の有効活用だけでなく, 火山噴火, 洪水などの自然的インパクトや水資源開発, 砂防事業, 森林伐採, 砂利採取といった人的インパクトが流域の安全や環境に与える影響についても考慮し

なければならない. しかし, これまで, このような安全, 環境, 利用の面からの総合的土砂管理が適切に行われていないため, 貯水池堆砂, 河床低下などの問題が顕在化しているのが実情である.

本研究では, 自然的インパクトとして最も影響の大きいクルド山の噴火を取り上げ, 1990 年の噴火がブランタス川の流域や河道に与えた影響について調査するとともに, 人的インパクトとして影響の大きい砂利採取の実態も考慮しながら, この流域の総合的な流域土砂管理に必要な基礎情報である噴火後の河床材料や本川への流入土砂量の時間変化について明らかにする. なお, 現地調査では水文や河床変動に関する十分なデータが得られなかったため, 精緻な解析を行うことができたとは言えない. しかし, 発展途上国の火山地域における河床変動と関連した諸特性についての一つのケーススタディーの結果, 提示される本知見は, 今後の同様な地域での総合的土砂管理における問題点や着目点を探るうえで有用になるものと思われる.

2. ブランタス川流域

(1) 流域の概要

図-1 はブランタス川流域を示したものである。本川は、クルド山を取り巻くように、マラン(Malang)、トルンググン (Tulungagung) クディリ(Kediri)、クルトソノ (Kertosono)、プロッソ (Ploso)、モジョケルト (Mojokerto) を通ってスラバヤ(Surabaya)に流れている。この間に多くの支川が流入しており、その主なものとして、スメル山からのレスチ(Lesti)川、クルド山からのプチ(Putih)川、バダック (Badak)川、ヌゴボー (Ngobo)川、コント(Konto)川が挙げられる。本川上流には、ロドヨ(Lodoyo)ダム、ウリンギ(Wlingi)ダム、スタミ(Sutami)ダム、スングル(Sengguruh)ダムなどの多目的ダム群が建設されている。

ブランタス川の河床変動に関係する要因は多くあるが、自然的要因として火山噴火と洪水が挙げられる。とくに、クルド山およびスメル山は現在も活発に活動している。クルド山は 1919, 1951, 1966, 1990 年に噴火しており、平均すると 15 年に 1 回の割合で噴火が発生している。洪水は 11 月から 4 月までの雨季に起こるスコールによる。表-1 はクディリおよびプロッソ地点における 1981 年から 1986 年までの主な洪水のピーク流量を整理したものである¹⁾。洪水の継続時間は比較的長く、1985 年のピーク流量 $1,033\text{m}^3/\text{s}$ の洪水では、 $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が 3 日間続いた。ついで、人的要因としては、ダム等の水資源開発、砂利採取、森林の開発などが挙げられるが、本支川での不法な砂利採取や森林開発が流域の環境や土砂動態に大きな影響を与えており、それが重要な社会的問題になっている。

(2) 1990 年のクルド山噴火前後の河床変動

クルド山は標高 1,731m の火山であり、1990 年に噴火し、約 1 億 2500 万 m^3 の土砂が生産されたと推測されている²⁾。この噴火後多量の土砂が支川に流入し、いくつかの支川では土砂が河道に厚く堆積した。写真-1 は 1994, 1998, 2004 年におけるバダック川下流の旧テルマス (Termas Lama) 川の河道の状態を示したものである。図-2 はこの地点で 1994, 1999, 2003 年に採取された河床表層材料の粒度分布を示したものであり、噴火後 0.01mm から 10mm 程度のシルト、細粗砂、礫が河道に堆積したことがわかる。著者らは 1994 年から毎年同じ地点を調査しているが、河道の状態は 1994 年の写真の状況とほとんど変わらなかった。1998 年には、写真に見られるように、河床が攪乱され多少低下しているが、これは人的なものと考えられ、全体的に流水で侵食されている様子はほとんど見られなかった。このように、噴火後少なくとも 1994 年から 1998 年までは堆積土砂が流水により侵食されている様子はなか

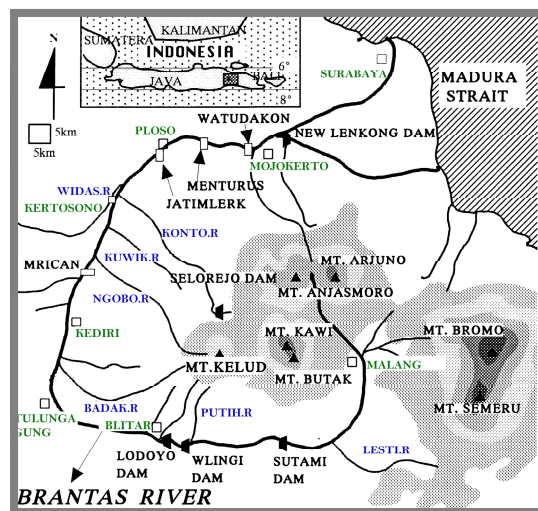


図-1 ブランタス川流域

表-1 主な洪水のピーク流量 (単位: m^3/s)

Year	Kediri	Ploso	Year	Kediri	Ploso
1981	593	-	1984	610	1047
1981	526	808	1984	830	1205
1981	765	952	1984	955	1103
1982	712	962	1984	955	1205
1982	630	977	1985	1033	1124
1983	747	921	1986	843	1004
1983	-	804	1986	726	1118

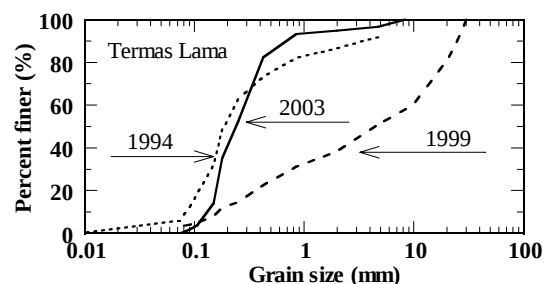


図-2 旧テルマス川の河床表層の粒度分布

ったが、これは上流で流水が灌漑水路に取水されるため、雨季といえども流量が少ないことが原因であると考えられる。しかし、2004 年には写真のように埋没していた床固めの位置まで大幅に河床が低下し、噴火前の状態に戻っていた。流水の作用もあると思われるが、むしろ人的な掘削がかなり活発に行われたようである。図-2 より、1994 年以降の河床表層材料は、1999 年には粗粒化、2003 年では細粒化している。これは、洪水の影響と人的な攪乱が複合的に関係していると思われる。その結果、1994 年に存在していた 0.1mm 以下の成分が兩年にはほとんど見られず、本川のウォッシュロードの流出特性へ変化をもたらすものと考えられる。

図-3 は噴火前の 1978, 1987, 1989 年、噴火後の 1990, 1991, 1996 年における河床縦断形状のデータから、1978~1987 年、1987~1989 年、1989~1990 年および 1991~1996 年の 4 つの期間における年間、単位 km 当



写真-1 旧テルマス川の河床状態の変化

たりの堆積土砂量の流下方向の変化を示したものである¹⁾。これらの図から噴火前は河床低下傾向にあったのに、噴火直後その傾向が堆積に変化していることがわかる。とくに、支川との合流点の下流で堆積量が多い。しかし、1年後から再び侵食傾向に戻っている。噴火前と噴火1年後からの河床低下は、プロッソの上下流とクディリの下流で顕著である。図-4は河道に沿った砂利採取量の分布を示したものである。河床低下量の分布はこの砂利採取量の分布にかなり対応していることがわかる。これは、ブランタス川本川の河床低下は砂利採取の影響が強いことを示唆するものである。

(3) 河床材料の粒度分布

1994年から本川と支川で河床材料の粒度分布を調査した。図-5はクディリにおける1994、1999、2004年における河床表層の粒度分布の変化を示したものである。噴火直後の粒度分布はわからないが、粗粒化が進行していることがわかる。図-6(a)、(b)は支川、本川の河床材料の平均粒径を示したものである。本川では上流からトルングガン、クディリ、クルトソノ、プロッソのデータが示されているが、上下流を通して平均粒径が年々増加し、本川で粗粒化が進行していることを裏付けている。また、支川の内、バダック川やプチ川のサンプルはそれぞれの上流域で採られたとられたもので、その他は支川の下流側で採取されたものである。支川上流域は粗粒化が進行しているが、下流域ではそれほど河床材料が変化していないことがわかる。ところで、支川においても砂利採取は活発であり、流域調査によると、河床から細砂のみを採取し、握りこぶし大の礫を河床に放置していた。このような人的な分級作用も河床材料の変化に大きな影響を与えている。

(4) 流域の土砂環境

写真-2はプチ川のサンドポケット内の状態の変化を示したものである。噴火後サンドポケット内に多量の土砂が堆積し、1994年の写真では、左下に小さな流路が形成されている様子が見える。その後、1998年には、堆積地は耕作地として区画整理され、最初の自然流路は灌漑用の人工水路になっていた。このように、噴出土砂は農地としても有効に活用されている。

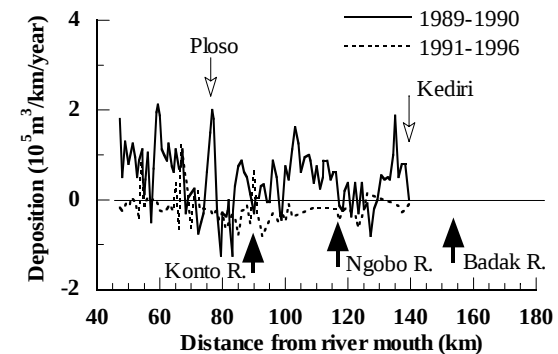
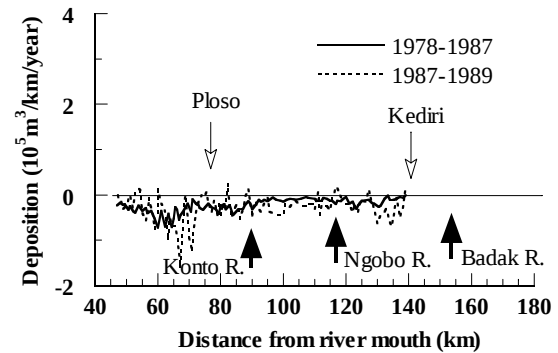


図-3 噴火前後の河床変動

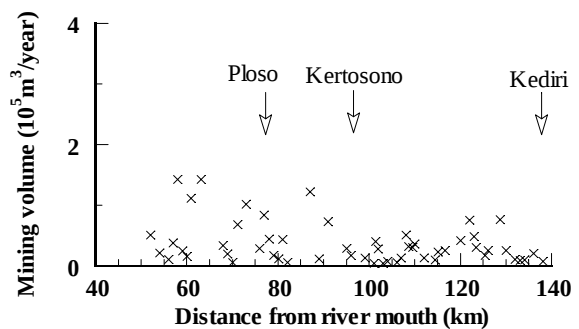


図-4 河道に沿った砂利採取量の分布

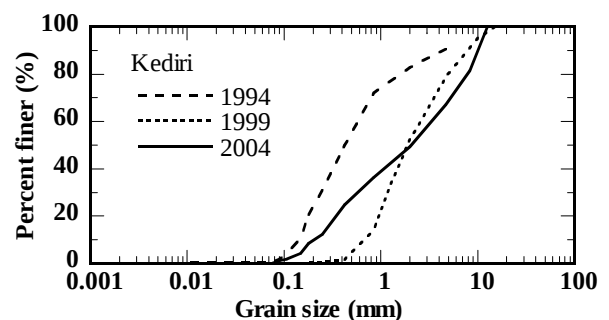


図-5 クディリにおける河床表層の粒度分布



写真-2 Putih 川のサンドポケット内の状態の変化

3. ウォッシュロードの流送量の変化

(1) 観測の概要

1998, 1999, 2001, 2004 年の主要な洪水時に、トルンガゲン、クディリ、プロッソにおいて、浮遊物質濃度と流量の現地観測を行った。濃度の測定は橋梁からのバケツによる採水による。図-7 はトルンガゲンで採取された浮遊物質の粒度分布と河床材料の粒度分布を比較したものである。この図から粒径 0.1mm 以下の浮遊物質成分は河床材料にほとんど含まれていないことがわかる。そこで、ここでは 0.1mm 以下の細粒成分をウォッシュロードと定義し、この定義に基づいて浮遊物質濃度からウォッシュロードの流送量を求めた。ただし、ウォッシュロードの濃度分布は一様であると仮定した。

(2) ウォッシュロードの流出特性の変化

ウォッシュロードの流送量は一般に次式で表される。

$$Q_w = \alpha Q^\beta \quad (1)$$

ここに、 Q_w ：ウォッシュロードの流送量、 Q ：流量である。 α は流域の土砂生産特性に関連した係数で、 β は多くの観測結果から決定される定数である。ここでは、過去の研究成果に従って $\beta=2$ と仮定する。

さて、係数 α は土砂生産特性と関係しており、噴火直後のように土砂生産流出が活発な場合は大きく、火山噴出物が侵食により安定化すると小さい値をとると考えられる。そこで、この係数の経年変化を調べることで、噴火後の土砂流出特性の変化を探ることができる。本研究では、 Q_w と Q の実測値が得られているので、両者の関係から α を推定した。図-8 は α の経年変化を示したものである。噴火直後は大きく、徐々に減少すると予想されるが、1998 年から 2001 年まではそのような傾向を表している。噴火直後の値はわからないが、噴火後ウォッシュロードの流出量は急激に減少したものと考えられる。2004 年の調査結果では、予想に反し α が増加傾向にある。この主要な原因はわからないが、ブランタス川本川およびレスチ川流域で違法な森林の伐採、森林の農地化および砂利採取が活発化していることも原因の一つだと思われる。

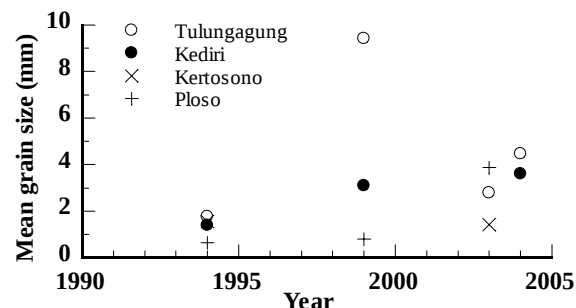


図-6(a) ブランタス本川の河床表面材料の平均粒径の経年変化

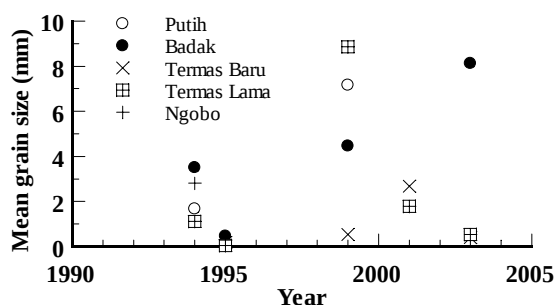


図-6(b) ブランタス支川の河床表面材料の平均粒径の経年変化

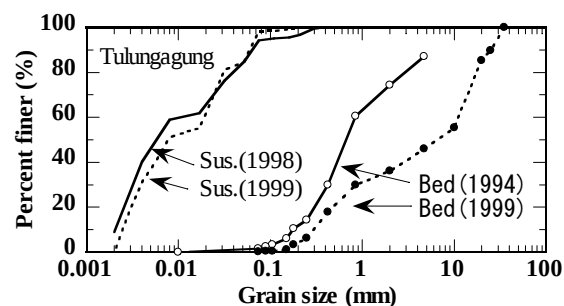


図-7 トルンガゲンにおける河床材料と浮遊物質の粒度分布

4. 支川からの土砂流入量の変化

(1) 支川からの流入土砂の量と質の推定法

ブランタス川の土砂管理を進めるに当たって、噴火後の本川への土砂流入量に関する情報は重要である。写真-1 に示したように、1990 年のクルド火山噴火後、支川には多量の土砂が流入し、河道に土砂が堆積した

ことからわかるように、本川への土砂供給は非常に大きく、それによる河床上昇は流域の治水安全度を低下させる。また、その後、支川内の堆積土砂がほとんど移動していない状況を考えると、支川から本川への土砂供給はほとんどなくなったものと考えられる。もちろん、砂利採取なども河床変動に大きな影響を与えているので、支川からの土砂供給量だけで本川の河床変動は議論できないが、流域の土砂管理において、噴火後の支川からの土砂流入条件を明確にしておくことは重要である。

本研究で有しているデータは、過去の主な洪水のハイドログラフ、1978年から1996年までの河床形状の測量結果、本支川の河床材料の粒度分布である。これらのデータを有効に使って支川からの土砂流入量を推定する。

解析のためのツールは混合砂礫に対する1次元の河床変動モデルである。初期条件、流量条件を一定にして、支川と本川上流からの流入土砂量とその粒度分布の条件を変化させ、実際の河床変動を最もよく再現できるような条件を見つける。ただし、粒度分布は、1994年以降の河床材料の調査結果の最小、最大粒径の範囲内で4.(2)で述べるような方法で決定する。

解析の範囲はトルンガングからモジョケルトまでの114kmの区間であり、その間に合流するバダック川、ヌゴボー川、コント川を対象にし、そこからの流入土砂量の推定を行う。初期河床形状は1991年の調査結果を用い、各地点の河床材料の粒度分布には、トルンガング、クディリ、クルトソノ、プロッソにおける1994年の調査データの中から最も近い場所のデータを用いる。計算区間の下流端にはニューレンコンダムがあり、ダムの高さを境界条件として与えた。

流量条件は流量のデータが少ないため正確に与えることができない。そこで、表-1を参考にして、本川上流端で $800\text{m}^3/\text{s}$ 、各支川から $200\text{m}^3/\text{s}$ とした。また、この流量の継続時間は年間5日間と仮定した。正確な解析のためにはこの条件についてもう少し吟味しなければならないが、ここではこれらの値を採用する。

(2) 供給土砂の粒度分布

噴火直後の各支川からの流入土砂量を求める前に、流入土砂の粒度分布について検討した。まず、図-9に示すようなA～Eまでの一様砂を $1.5\text{m}^3/\text{s} \sim 3.0\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で供給したときの河床変動を計算し、図-3に示した噴火直後の土砂の堆積分布特性と比較した。ここに、A, B, C, D, Eの粒径はそれぞれ0.17mm, 0.22mm, 0.34mm, 0.64mm, 1.44mmである。その結果、Aは洪水時にはウォッシュロード的に流送され土砂堆積に寄与せず、Eは粒径が大きいために土砂供給点付近だけに堆積し、得られた河床変動は噴火直後の堆積分布特性を有していなかった。一方、B, C, Dを与えた場合、

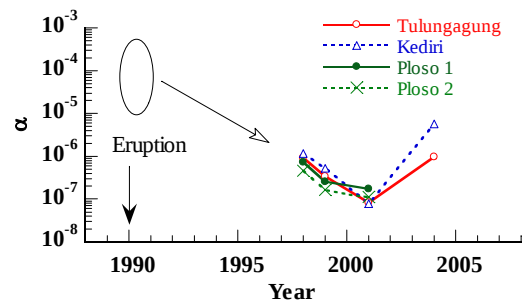


図-8 係数 α の経年変化

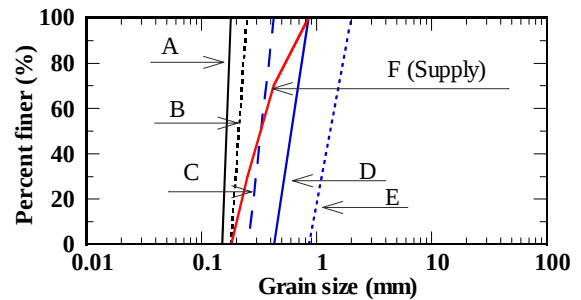


図-9 供給土砂の粒度分布

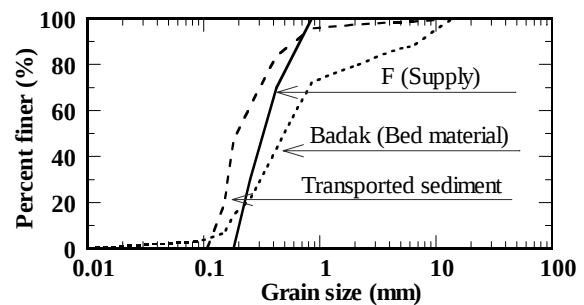


図-10 供給土砂量、バダック川の河床表層の粒度分布

噴火直後の広い堆積分布が表現された。したがって、これらの粒度分布を適当に配合したものを供給すれば、噴火直後の堆積分布特性を再現できるものと考えた。そこで、試行錯誤の上、粒度分布Fを供給したところ、河床変動の全体的な傾向を説明することができた。そこで、供給土砂の粒度分布にはFを用いることにする。

図-10は供給土砂とバダック川上流域の噴火後の河床堆積物の粒度分布を比較したものである。供給土砂がバダック川の粒度分布の細粒成分と粗粒成分を除外したものであることがわかる。同図にはバダック川の本川との合流点付近の水利条件とバダック川上流域の河床堆積物から前述したウォッシュロード成分(0.1mm以下)を除いた材料の粒度分布を用いて計算された流砂の粒度分布も示されている。流砂の粒度分布には1mm以上の成分が少なく、Fの粒度分布は流砂の粒度分布から0.2mm以下の成分を除いたものとよく一致している。0.2mm以下の成分はウォッシュロード的に流送されることを考えると、この流砂の粒度分布を求めるような方法で、河床変動を議論する場合の供給土砂の粒度分布が推定できるものと考えられる。

(3) 噴火直後の流入土砂量

つぎに、河床変動をよく再現するような各支川、本川上流からの流入土砂量を求めた。その結果、噴火直後の一年間では、図-11 の上図に示すように、本川上流から $2\text{m}^3/\text{s}$ 、バダック川から $3\text{m}^3/\text{s}$ 、ヌゴボー川から $3\text{m}^3/\text{s}$ 、コント川から $1\text{m}^3/\text{s}$ の土砂を供給したとき、河床変動の計算値は測定値をよく再現することができた。4.(3) で述べたバダック川における流砂量の計算では、流砂量が $3.3\text{m}^3/\text{s}$ となった。この中には 0.2mm 以下の成分が 50% 程度含まれることを考慮すると、再現計算で推定された供給土砂量は 2 倍程度大きいがおおよその値として、噴火後支川上流域に堆積した土砂の粒度分布と本川合流点付近の支川の水利条件から供給土砂の粒度分布だけでなく量も推定できると思われる。

(4) 噴火 1 年後以降の流入土砂量

噴火 4 年後の支川の河道状況を見ると、ほとんど土砂が動いていなかったの、噴火 1 年後以降支川からの供給土砂量を $0\text{m}^3/\text{s}$ 、本川上流からの供給量を $0.5\text{m}^3/\text{s}$ として計算を行った。再現計算の結果は図-11 の下図のとおりである。図-12 はクディリ地点における河床材料の粒度分布の計算値を示したものである。噴火後、一旦、河床材料が供給土砂量に置き換わり、その後粗粒化が進んでいる。図-5 の調査結果ともよく対応しており、計算の妥当性が示唆される。しかし、河床変動の計算結果は実際の河床低下特性を再現していない。与えた供給条件が妥当であるかは別にして、土砂供給をこのように減じても、図-3 に示す噴火 1 年後以降の広範囲な河床低下は説明できないようである。これは前述したように噴火後すぐに砂利採取の影響が直接河床変動に現れているからだと推察される。

5. おわりに

本研究は、クルド火山の噴火後のブランタス川の河床材料および本川への土砂流入条件の変化について検討した。主な成果は以下のようなものである。

- (1) 1990 年のクルド火山噴火前、ブランタス川は河床低下傾向にあったが、噴火後急激な河床上昇が起こった。しかし、1 年後にはまた侵食傾向に戻った。この河床低下には砂利採取の影響が大きい。
- (2) 土砂生産の活性度を表すウォッシュロードの流送量式中の係数 α は噴火後大きく減少したが、最近また増加傾向にある。この理由として支川上流の森林開発、砂利採取の影響が考えられる。
- (3) 噴火後支川から本川へ流入する土砂の量と粒度分布を正確に見積もることは難しいが、支川上流域における堆積物の粒度分布と本川合流点付近の支川の水利条件からそれらが程度推定できる。

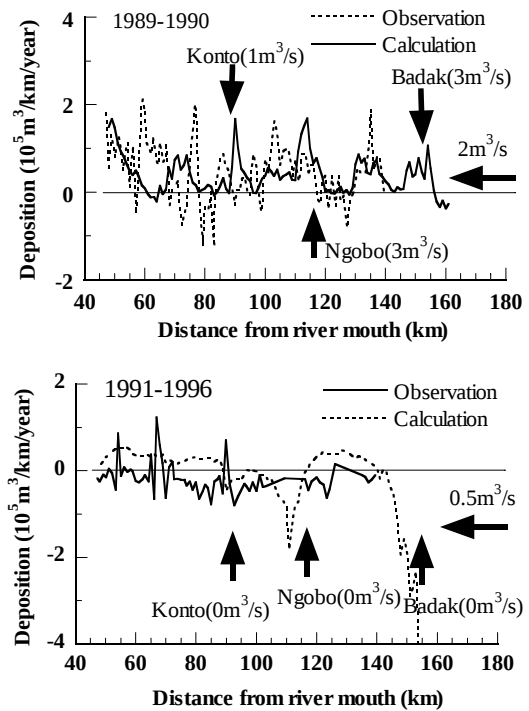


図-11 河床変動の再現計算

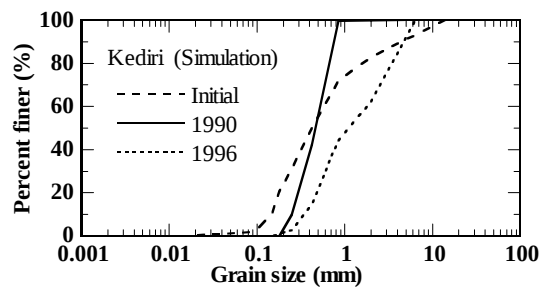


図-12 クディリにおける河床表層の粒度分布の経年変化の計算値

謝辞：本研究の一部は平成 17 年度科学研究費（基盤研究 B，代表藤田正治）の助成を受けて行われた。また、現地観測調査では、京都大学實馨教授、京都大学学生の広重敬嗣君、当時立命館大学学生だった中西史尚氏、望戸昌観氏、増田亜友美氏、当時京都大学学生であった杉江友介氏、インドネシア公共事業省の Isnugroho 氏、Sutikuno 氏等、多くの方の協力を得た。また、河床形状、流量、砂利採取量のデータは JASA TIRTA(水管理公団)に提供していただいた。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤田正治，江頭進治，里深好文，中西史尚，望戸昌観：ブランタス川中流域の河床変動，京都大学防災研究所年報第 40 号特別号，pp.53-62，1997。
- 2) 日本工営コーエー総合研究所：ブランタス河の開発，山海堂，1997。

(2005. 9. 30 受付)