

非定常流中のウォッシュロードの堆積と それに伴う川幅縮小過程

Channel Narrowing Process Caused by the Sediment Deposition in an Unsteady Flow

関根正人* ・ 鯨岡史歩**

By Masato SEKINE and Shiho KUJIRAOKA

Stable channel is realized through the process of (1) channel widening caused by a bank erosion, and (2) channel narrowing by a sediment deposition on a bank. The mechanics of the latter process is studied in the present paper. The deposited sediment in natural rivers is reported to be a very fine sand or silt transported as washload. So an idealized flume experiment together with a numerical computation were conducted in a steady or unsteady flow over a gravel bed with a fine sediment as washload. As a result, the deposition occurs around a water margin without any effect of vegetation by a significant amount in an unsteady flow but by an extremely small amount in a steady flow.

Keywords : washload, sediment deposition, channel narrowing, stable channel.

1 序論

流域に降る雨の特性やその土地の利用状況が大幅に変化しないならば、その流域を流れる河川の流量とそこへ供給される土砂量が大きく変化することはなく、その河川はその流量と供給土砂量に見合った安定な河道状態へと向かって変化する。このことは、河川改修などの人為的な作用が河道に加えられた後の河道の変化にも当てはまり、長い時間が経過した後にはその河道固有の安定な状態に回帰する¹⁾。この回帰の過程は、(1) 河道が側岸浸食により拡幅しつつ安定河道に到る過程と、(2) 側岸部に細粒土砂が堆積することにより川幅が狭まりながら安定河道に到る過程とに分けることができよう。前者に関してはこれまでに数多くの研究がある反面、後者に関してはほとんど研究がなされておらず、わずかに藤田ら²⁾の研究と泉ら³⁾の研究があるのみである。そのうち藤田ら²⁾の研究はいわば先駆的な研究と呼ぶにふさわしいものであり、川内川とパウダー川における現地調査結果に基づいてこのプロセスについて論じ、「川幅の縮小は、ウォッシュロードとして輸送されたシルトなどの微細粒子が河道側岸部へ堆積することで生じ、テラス状の地形を形成しながら進行していくことを明らかにした。さらに、この堆積のためには河岸付近によく見られる植生の存在が不可欠である」と結論づけている。ただし、この結論については後述する通り未だ議論の余地を残しており、これが本研究を行うに当たっての動機ともなっている。一方、泉ら³⁾は、側岸部が砂で、河道中央部が礫で形成された河川の存在を紹介し、それを「砂岸礫床河川」と名づけて、その平衡状態における横断面形状に関する理論を展開している。この理論によれば、砂の輸送を伴う礫床の河道の場合には、砂が河岸に堆積することで礫床河道より明らかに川幅の小さな河道となることが説明される。ただし、解析により得られるのは平衡状態における河道横断面形状であって、そこに到る過程についての説明は

* 正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科 〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

** 学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科

なされていない。このように、河道側岸部に微細粒子が堆積し、川幅が狭まるメカニズムについては今後の課題として残されているようである。

本研究では、川幅縮小のメカニズムを探る上でどうしても検討をしておくべき点、すなわち、「植生の存在が不可欠な因子であるのか」という本質的な点について改めて考えてみたい。これは、藤田らが、(1) 対象河川の流量データをその値に応じて離散化し、流れがその各々の流量に対する定常・等流であるとして解析を行い、(2) 流量の出現頻度を考慮してその結果を重ね合わせることで、堆積地形の経年変化を予測する、とした検討を行い、その結果をひとつの根拠として前出の結論を導いているが、実測流量の時系列的変化については何ら考慮しなかったことに更なる検討の余地が残されていると考えるからである。パウダー川の場合、ある規模以上の洪水を経験した年に顕著な堆積が生じているとの報告があり、これは単に水位および流量が大きいというだけではなく、その前後の流れの非定常性によって堆積が促進されると考えることもできよう。そこで、本研究では流れの非定常性に注目した解析を行い、植生の影響がなければシルトなどの微細粒子の堆積は生じないのか、という点に焦点を絞り、いわば理想化された条件下における水路実験と数値解析とを行うことで、上記の点の検討を行っている。

2 水路実験による検討

本論文において説明する実験は¹、全長 8 m、幅 60 cm のアクリル性可変勾配直線水路において、次のような理想化された条件下で行なわれた。水路には、礫を想定して粒径 2 mm のガラスビーズを用いて台形の横断面形状（底面幅 5 cm、側岸の傾斜角 25°）をもつ直線流路を形成し、これを初期状態として、流量の変化に伴う流路横断面形状の変化を調べた。流量については、流路が動的安定状態に達するまでは一定の流量 75 l/min. とし、その後 1 時間かけて 25 l/min. まで線形的に減少させることにする。なお、この減水時には、その流量に応じた量の微細粒子をウォッシュロードを模して供給する。本実験では、諸条件を勘案した上で微細粒子として「おがくず」を用いることにし、これを十分にふるい分けることで粒度ならびに形状を均一化するとともに、含水量を変えることで比重調整を行った上で使用した。また、その供給量については、現地観測の結果として、流量とウォッシュロードの輸送量との関係が後述する式(2)のようになることを参考にして、各時間の流量に応じて変化させることにした。ただし、実験で対象とする流量が実河川の流量範囲と大幅に異なること、ならびに供給する材料の特性が明らかに異なることなどから、試行錯誤の末、式中の係数を $a = 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $m = 2.1$ のように定めた。この値は、微細粒子が流路中央部に堆積しない程度に高い濃度の粒子を供給することに対応している。

以上のようにして行った実験の結果が図-1および2に示されている。ただし、これ以外にも、(1) 動的安定状態に達した後流量を一定に保ち、微細粒子を供給した「定常状態における実験」や、(2) 上記の実験の流量低下の後、再び流量を元の値にまで増加させ、さらにもう一度同様に低下させる「履歴効果を調べる実験」、なども行っている。

実験の結果得られた事項をまとめると次のようになる。まず、微細粒子の堆積の状況は図-1として示した写真（流れは上から下）に現れており、水際付近の色の異なった部分に堆積が生じ、水面の低下に伴ってその規模が増大する。さらに、流量低下が完了した時点で測定した流路横断面形状が図-2に示されている。図-2中の●と○とが併記されている区間に微細粒子が堆積しており、両者の差が微細粒子の堆積厚を表すことになる。このように、実験の時間規模が小さいことなどからその量自体はあまり大きくないものの、減水期には植生がなくても側岸部への微細粒子の堆積が生じることがわかる。なお、定常状態で行った実験では、ここで問題としている堆積はほとんど生じないことを確かめている。さらに、流量変動の履歴効果について調べた実験から、減水期において生じた堆積土砂は次の増水期に浸食を受けるものの、そのすべてを持ち去るほどではなく、次の減水期に再び生じる堆積によって、堆積土砂量が累積する結果が得られた。これは、このような堆積を生じさせる規模の洪水を複数回経験することにより、堆積地形は発達を遂げ、ゆっくりと川幅が縮小している可能性があることを示唆するものと考ええる。

3 川幅縮小に関わる数値実験

3.1 数値実験の概要

本研究では、ウォッシュロードの側岸部への堆積とそれに伴う川幅縮小に及ぼす流れの非定常性の影響を明らかにするために次のような数値実験を行った。数値実験は次のような理想化された条件下において行うものとする。

¹ここで説明する実験は、諸条件を変えて行った6通りの実験の一つであり、実験の詳細に関しては既に別論文⁴⁾で発表済みであるため、論文の構成上必要な事項についてのみ説明を記す。

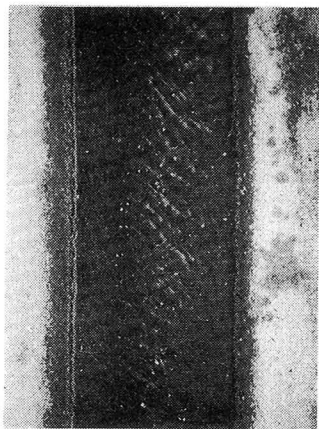


図 - 1 微細粒子の堆積状況：
流れは上から下

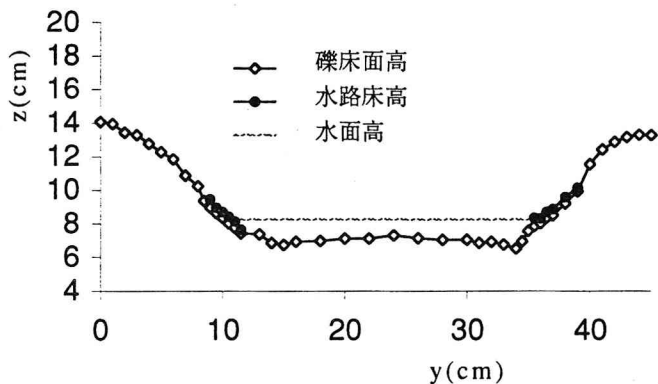


図 - 2 微細粒子が堆積した流路の横断面形状の実測結果：
上流から 4 m の断面。礫床面とはガラスビーズにより
形成された動的安定の流路形状を指す。

る。(1) 前章で説明した実験の結果から、複数回の洪水を経験するにつれて堆積地形が発達していくことが予想されるが、ここでは一回の流量低下に伴って、ウォッシュロードの側岸への堆積がどの程度の規模で生じるかを調べる。(2) 対象とする粒径として、ウォッシュロードとして流送されるシルト（粒径を D_1 ）と、主に河道を構成する礫（粒径 D_2 ）との 2 粒径を想定する。(3) 初期の流路は、礫のみにより構成され、初期流量（解析範囲内での最大流量）に対する静的安定な河道形状をとるものとする。すなわち、流路中心軸から y の位置での水深は次式で表されることになる⁵⁾。

$$h = h_o \cos \left(\pi \frac{y}{2B} \right) \quad (1)$$

ここに、 h_o は水路中心軸上の水深、 B は水路の半幅であり、河道構成材料の安息角 ϕ との関係で $B = \pi h_o / 2 \tan \phi$ の関係を満たす。このような設定をすることにより、減水期のみの解析を行う本計算に関する限り、河道を構成する礫の移動はないものと考えることができる。(3) 上流から供給されるウォッシュロードの濃度 C は、実河川におけるウォッシュロードの輸送量 Q_w と流量 Q との関係が⁸⁾、一般に、

$$Q_w = a \times Q^m \quad (2)$$

のように表される⁶⁾ことを考慮して、

$$C = a \times Q^{m-1} \quad (3)$$

のように与えることにする。ここに、 a および m は定数であり、実河川データからその値を定めるものとする。また、一度堆積したシルトの掃流砂としての移動についてはこれを無視する。

以上の前提条件の下で、簡略で見通しの利く「準二次元の解析モデル」をつくり、これを用いて解析することにした。すなわち、ここでは、横断面内の平均流速 U 、中心軸上の水深 h_o 、ウォッシュロードの平均濃度 $\bar{C}$ の縦断方向変化を求める一次元非定常計算と、着目する横断面内の水深平均の流速分布 u 、濃度分布 C を求める一次元非定常計算とを相互に組み合わせて解くこととし、着目する地点の横断面形状が時間的にどのように変化するかを調べる。個々の計算については以下に詳述する。

3.2 流速・水深および土砂濃度の横断面内平均量の縦断方向変化の計算

横断面内の平均流速 U 、中心軸上の水深 h_o 、ウォッシュロードの平均濃度 $\bar{C}$ の縦断方向変化を解析する際に依拠すべき方程式は、断面内の任意の点で成り立つ連続式、運動方程式および土砂濃度の拡散方程式を、それぞれ断面内で積分することによって得ることができる。流下方向に x 軸、横断方向に y 軸をとることにすれば、支配

方程式は次のように表わされる。なお、ここでは、流下方向への拡散の項を無視している。

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dAU}{dx} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} + \frac{d}{dx} \left(\frac{U^2}{2} \right) + g \left(\frac{dh_o}{dx} - i_o \right) + \frac{\bar{\tau}_o}{\rho R} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dA\bar{C}}{dt} + \frac{dA\bar{C}U}{dx} = w_o \left(S\hat{E}_{sa} - \frac{w_o}{\bar{\epsilon}_z} A\bar{C} \right) \quad (6)$$

ここに、 A 、 S および R は横断面の面積、潤辺長および径深であり、式(1)より次のように表される。

$$A = \frac{2h_o^2}{\tan \phi}; S = \int_{-B}^B \sqrt{1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2} dy; R = \frac{A}{S} \quad (7)$$

また、 ρ は水の密度、 i_o は河床勾配であり、 $\bar{\tau}$ は断面内平均の壁面せん断力であり、Manning の粗度係数 n との関係で $\bar{\tau}/\rho R = gn^2 U^2 / R^{4/3}$ のように表される。さらに、 w_o はシルトの沈降速度である。 $\bar{\epsilon}_z$ は鉛直方向への拡散係数であり、断面平均の摩擦速度 $\bar{u}^*$ および水深 $\bar{h}$ との関係で $\bar{\epsilon}_z = \kappa/6 \bar{u}^* \bar{h}$ のように与えることにする。また、 $\hat{E}_{sa}$ はシルトの河床からの無次元巻き上げ速度の横断面内平均値である。

式(4)~(6)を解くに当たっては、境界条件として、下流端で限界水深を、上流端で流量 Q およびウォッシュロードの濃度 $\bar{C}$ の時間変化を、それぞれ与えた。また、初期条件としては、初期流量に対して得られる定常解を与えることにした。

3.3 流速および土砂濃度の横断面内分布の計算

注目する断面における流速およびウォッシュロードの濃度の水深平均の値 u および C の横断面内分布については、次に示すいわゆる浅水流方程式に基づいて解析することができる。水深については、横断面内で水位が一定であるとして、縦断方向への解析で求められる中心軸上の水深 h_o から幾何学的に求めることができる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = g \left(i_o - \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\tau_o}{\rho h \cos \theta} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial hu}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{w_o}{h} \left(c_b - \frac{\hat{E}_s}{\cos \theta} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial hC}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y c_b \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (9)$$

ここに、 η は河床面高さであり、 θ は河床面の横断方向傾斜角である。また、 c_b はウォッシュロードの底面濃度であり、水深平均濃度 C との関係から次のように表される。

$$c_b = C \times \frac{hw_o}{\epsilon_z} \left(1 - \exp \left(-\frac{w_o h}{\epsilon_z} \right) \right) \quad (10)$$

また、 $\hat{E}_s$ はシルトの河床からの無次元巻き上げ速度である。鉛直および横断方向への拡散係数である ϵ_y および ϵ_z については、それぞれ $\epsilon_y = 0.13u^*h$ および $\epsilon_z = \kappa/6u^*h$ のように与えることにする。ここでの解析で問題となるのは、式(8)、(9)の左辺第二項に現れる移流項の取り扱いである。なぜならば、断面内の y の位置における u および C の x 方向変化についてはその計算を省略しているからである。そこで、次のような近似的な取り扱いをすることで、厳密な取り扱いに代えることにする。いま、流れの非定常性が弱く、局所的には疑似定常・平衡の状態に近いと考えれば、 u および C は横断方向に次のような相似な分布をとるものと考えることができよう。

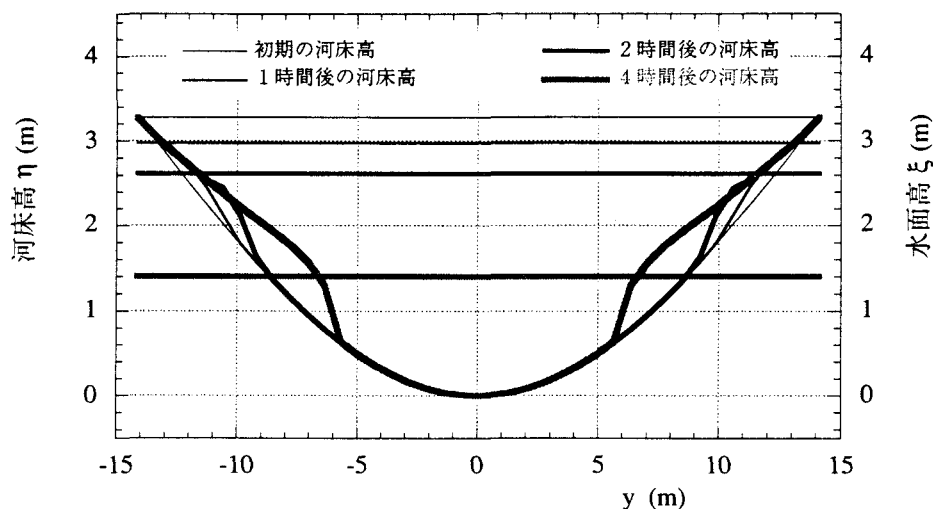
$$u \equiv U \times f_u(y/B(x)) \quad (11)$$

$$C \equiv \bar{C} \times f_c(y/B(x)) \quad (12)$$

さて、ここで、水路幅 $B(x)$ の x 方向変化が U および C の変化に比べて無視できるという仮定を導入すると、移流項はそれぞれ

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = u \times f_c \times \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = u \times f_u \times \frac{\partial U}{\partial x} \quad (14)$$



図ー3 ウォッシュロードの堆積による横断面形状の変化に関する数値計算結果

のように近似することができる。そこで、式(8)、(9)の解法に当たっては、 f_u および f_c を仮定し、繰り返し計算を行うことで収束解を得ることとした。これは x 方向に隣接する二断面間で横断面形状に大きな変化がないという前提に立ち、この間で河床面への土砂の堆積がほぼ一様に進行するとした扱いである。同時に、河床の縦断方向勾配 i_b は近似的に時間によらず一定であるとする。

3.4 シルトの河床からの巻き上げ率の算出

本研究では、礫により構成された河道面の間隙にウォッシュロードとして輸送されてきたシルトなどの微細粒子が堆積し、河道の一部はその粒子によりその表面を被われることすらあるような現象を対象にする。ここで注意を要するのは、想定する2つの粒径の間に大きな差があることである。このような場合には、河床材料として従来からよく使われるような粒度分布をもつ混合粒径砂礫を対象として得られた巻き上げ率の予測式を適用することは好ましくない。この点に関しては、芦田・藤田⁷⁾が本研究で対象とするものとはほぼ同様の条件下で行った浮遊限界ならびに巻き上げ率に関する先駆的な実験があり、確率論的な手法を用いて巻き上げ率の推定式を提案している。そこで、ここでは、この芦田・藤田の成果に依拠することにする。ただし、その説明については紙面の関係で省略する。詳細は原論文⁷⁾を参照されたい。

3.5 河道面への土砂の堆積計算

ウォッシュロードの側岸への堆積に伴う河道横断面形状の変化は次のような土砂の連続式に基づいて解析することができる。

$$(1 - \lambda) \frac{\partial \eta}{\partial t} = w_0 \times \left(c_b - \frac{\dot{E}_s}{\cos \theta} \right) \quad (15)$$

ここに、 λ は土砂の空隙率、 η は河床面高さである。

3.6 ウォッシュロードの堆積過程について

ここで説明に用いる計算の条件は次の通りである。すなわち、初期河道として粒径 2 mm の礫で構成された静的安定河道を想定し、ここに粒径 0.10 mm のシルトが式(2)により算出される量だけ上流から供給されるものとする。初期流量を $200\text{ m}^3/\text{sec}$ とし、これを最大値として4時間後に $20\text{ m}^3/\text{sec}$ にまで減少する間に生じる現象を解析する。ここで着目する断面は、下流端から 20 m (計算対象区間は 40 m) の位置にとっている。なお、流量一定の下

ではこの断面で既に平衡状態に達していることを確認している。また、式(2)中の係数を $a = 5.0 \times 10^{-5}$, $m = 2.1$ のように定めた。

図-3には通水後4時間の横断面形状の変化を示している。この図より、水際付近においてシルトの堆積が生じ、水際の後退とともにテラス状の堆積地形が形成・発達していくことが見てとれる。これは、水際付近の低速域において土砂の巻き上げ量が沈降量を下回るために生じ、流量低下に伴う水位の低下がその傾向をさらに顕著なものにしている。このことは、流量低下に伴う掃流力の低下ほど速やかにウォッシュロードの濃度が低下しないことを意味するものと推察され、むしろ巻き上げ量の方が速く低下するために水際付近で堆積が進行するものと考えている。

4 結論

本研究では、流れの非定常性が川幅縮小のプロセスに及ぼす影響について検討した。なお、ここで再現されたような側岸部への微細粒子の堆積は、流れが定常であっても非平衡の状態でありさえすれば生じるものであること、しかしその量は微量であること、などを別の計算を通じて確認している。このことから、河道側岸部に植生が存在しなくても、川幅縮小のプロセスの本質ともいえる微細粒子の側岸部への堆積が生じる可能性があり、それは流量一定の状態ではなく、たとえば流量が低下しつつある期間である可能性が高いことが示唆された。

しかし、今後に残された課題も多く、明確な結論は今後の検討を待って下すべきであると考えている。まず解析上問題となる点を以下に列挙する。すなわち、(1)簡易的な計算モデルを採用したため、式(11)、(12)に示すような相似の仮定によらざるを得なかったこと、(2)初期状態として静的安定状態にある礫床河道を想定したため、礫の移動はないものとしたこと、ならびに堆積したシルトの掃流砂として移動を考慮に入れなかったこと、(3)流量増加時の検討を行っていないこと、などである。これらについては今後の課題である。

さらに、ウォッシュロードの輸送について考えると、これが河道の形状変化に寄与しないものと考えられてきた経緯から、その輸送量あるいは輸送機構については、現地観測がなされるのみで、基礎的な研究はほとんど行われてこなかったように見受けられる。たとえば、ウォッシュロードの輸送量を表す式(2)中の係数(とりわけ a)は河川によって異なるとの指摘もある。本解析ではその値を既往のデータに基づいて定めたが、この値のとり方によってはここで注目した微細粒子の堆積が全く生じないこともありうる。そこで、今後は室内実験を行うなどしてウォッシュロードに関する基礎的な情報を蓄積していくことが必要であり、その意味で、たとえば塚原ら⁸⁾の研究は興味深いものといえよう。

謝辞：本研究を進めるに当たって、建設省土木研究所の藤田光一氏との議論が大いに参考になった。同氏にはあわせてパウダー川に関する貴重な資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表します。本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究C(代表者：関根正人、課題番号：06650572)の援助を受けて行ったものであることを記す。

参考文献

- 1) 山本晃一、藤田光一、佐々木克也、有澤俊治：低水路川幅変化における土砂と植生の役割、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp. 233 - 238, 1993.
- 2) 藤田光一、Moody, J. A., 宇多高明、Meade, R. H.：川幅縮小機構についての考察—パウダー川と川内川の観察結果から—、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp. 183 - 190, 1995.
- 3) 泉典洋、パーカー・ゲリー：礫床河道内に堆積する細砂について、水工学論文集、第39巻、665-670, 1995.
- 4) 関根正人、鯨岡史歩：流れの非定常性を考慮した直線河道の川幅縮小機構に関する研究、第51回年次学術講演会概要集、pp.616-617, 1996.
- 5) Lane, E. W.：Design of stable channels, Trans. ASCE, Vol. 120, pp.1234-1279, 1955.
- 6) たとえば、吉川秀夫編著：流砂の水理学、丸善、pp.143, 1985.
- 7) 芦田和男、藤田正治：平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル、土木学会論文集、第375号/II-6, pp.107 - 116, 1986.
- 8) 塚原隆夫、宇多高明、藤田光一：水路床に敷かれた薄い植生層が細粒土砂堆積に果たす役割、第51回年次学術講演会概要集、pp.544-545, 1996.