

沖積河道縦断形の形成機構に関する研究

On the Formation of Longitudinal Bed Profiles of Alluvial Rivers

山本晃一*・藤田光一**・赤堀安宏***

By Koichi YAMAMOTO, Koh-ichi FUJITA and Yasuhiro AKABORI

The study focused on the type of river composed of a gravel-bed reach with steep slope and a sand-bed reach with mild slope. Supplied sediment to the river during Holocene was investigated by measuring the volume and the grain size of an alluvium. The investigation showed that a gravel supply was much smaller than a sand supply and that the longitudinal profile of a sand-bed reach was almost the same as the equilibrium profile for the sand supply. Through the experiments and 1-D calculation on an alluvial process, mechanisms of the channel formation with the clear longitudinal sorting and the sediment transport mentioned above were estimated.

Keywords: sediment supply, alluvial process, longitudinal sorting
river-bed variation

1. はじめに

河道縦断形は河道計画上最も重要な河道諸元の1つであり、その変化特性を充分踏まえて河道縦断計画を策定しなければならない。河道縦断形の変化予測には従来1次元河床変動計算が用いられてきた。しかしこの計算方法は、上流境界条件（供給土砂の質・量）の与え方と河床材料の縦断的分級機構の反映に関して物理的に不明確な点を残しているため、河床材料が縦断的に大きく変化する河道における供給土砂量の変化に伴う縦断形変化を予測対象とすることは實際上困難であった¹⁾。本研究は、今後一層重要となる河道改修後の長期的維持・管理や流域状況変化への対応に際してこのような縦断変化の予測が不可欠になることを踏まえて、日本の河川における供給土砂、河床材料の縦断的分級、縦断形相互の基本的関係を明らかにし、上記の縦断形変化予測のための基本的知見を得ようとするものである。

2. 河道縦断形と河床材料、供給土砂の特性

2. 1 各セグメントの縦断勾配と河床材料粒径との関係

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部河川研究室 室長

(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

** 正会員 工修 建設省土木研究所河川部河川研究室 主任研究員

*** 正会員 日本建設コンサルタント株式会社(研究当時、建設省土木研究所河川部河川研究室部外研究員)(〒141 東京都品川区東五反田5-2-4)

日本の主要河川の縦断面形は、図-1に示すようにほぼ同一の河床勾配、河床材料を持つ河道区間がいくつか集って形成されていると見ることができ、著者らはこの区間を河道セグメントと呼んでいる²⁾。主要河川の河道セグメントについて河床材料の代表粒径 d_{50} と河床勾配 I_b との関係を整理すると、図-2 a)に示すように $[d_{50} \geq 15\text{mm}, I_b \geq 1/1500]$ のグループ(以後Gセグメントと呼ぶ)と $[d_{50} \leq 1\text{mm}, I_b \leq 1/2000]$ のグループ(以後Sセグメントと呼ぶ)、 $[d_{50} = 2\text{mm前後}, I_b = 1/1000\text{前後}]$ のグループ(以後S'セグメントと呼ぶ)には

きり分離できる河川と、図-2 b)に示すように明確に分離できない河川があることがわかる。大きな沖積地平野を持つ河川のほとんどは前者に属し、Gセグメントの下流にSセグメントが接続するパターン、すなわち急勾配砂利河道から緩勾配砂河道に急変する縦断面形を持つ。図-1の河道もこれに該当する。本研究では、図2 a)に示される縦断

形パターンを持ち、大きな支川を持たずその影響が無視できると考えられる河道を対象にする。

2. 2 供給土砂の質と量

GセグメントとSセグメントが接続する縦断面形を持つ河川とS'セグメントを持つ河川について、沖積平野形成期間(過去1万年程度)の平均的な供給土砂の質と量を調べた。土砂がほとんど深海へ流出しない内湾域で河川の土砂運搬作用により形成されたに沖積平野については、沖積層の土

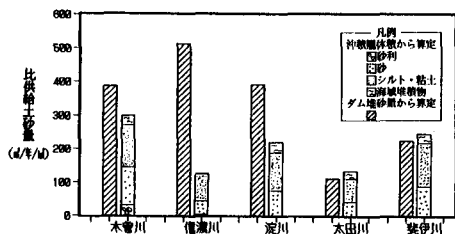


図-3 比供給土砂量比較図

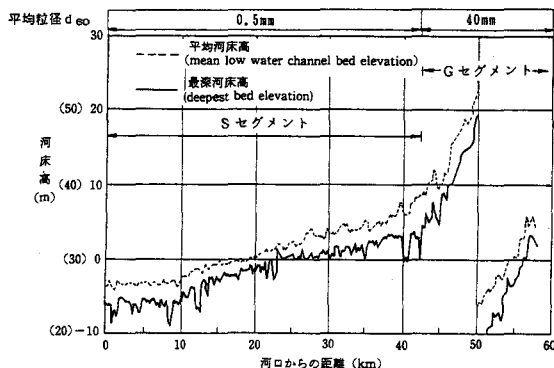


図-1 河道縦断面形とセグメント区分(木曽川の例)

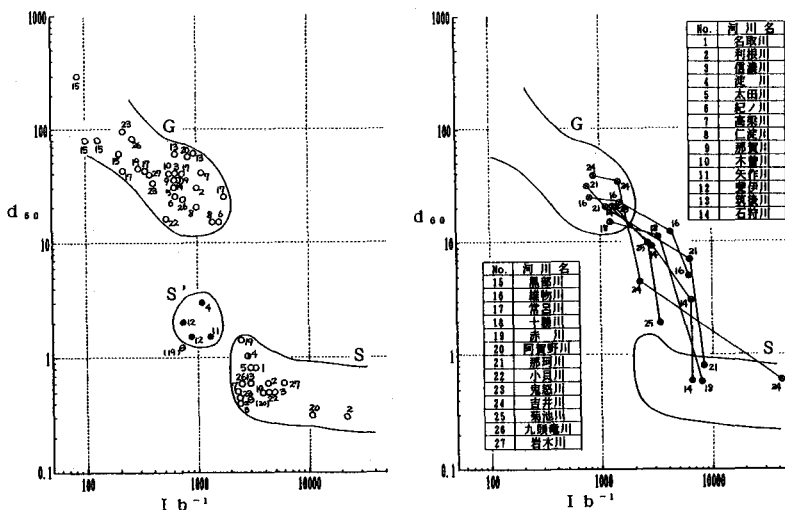


図-2 セグメントの河床勾配と粒径との関係

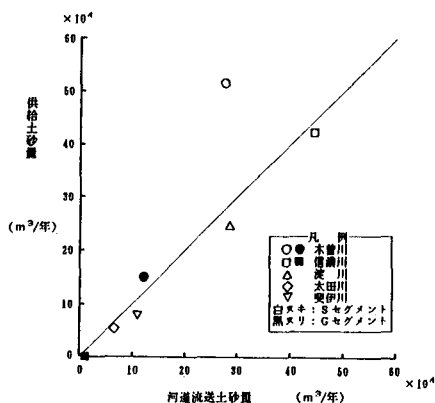


図-4 供給土砂量と河道流送土砂量との比較

質別体積をボーリング資料から算定することにより、沖積作用が生じた期間の平均的な河川への供給土砂量を種類別に把握することができる。この条件を満たすと考えられる河川（平野）として木曽川（濃尾平野）、信濃川（新潟平野）、淀川（大阪平野）、太田川（広島平野）、斐伊川（簸川平野）を取り上げ、シルト・粘土、砂、砂利別の供給量を調べた。方法の詳細については文献(3)を参照されたい。

図-3に、上記の方法で求めた供給土砂量(1万年程度の年平均値)と、流域内ダム総堆砂量の資料存在期間(10～30年程度)の年平均値(文献6, 7)のデータより算出)とを、土砂生産流域面積(≒山地面積)で割り比供給土砂量の形にして示す。本論文では、供給土砂量を1年当たりの堆積した状態での体積(空隙を含む)で表現する。この図から、算定期間が大幅に違うにもかかわらず、2つの方法による供給土砂量は信濃川と淀川を除き比較的良く対応していることがわかる。このことは、最近数十年の供給土砂量が過去1万年程度の超長期の平均量と同程度であることを意味する。信濃川と淀川については、両川とも上流に盆地を持つことから、そこでの堆積が2つの算定供給土砂量のズレに関係している可能性がある。供給土砂の質については、対象河川による大きな違いがなく、いずれも砂利:砂:シルト・粘土=(0%～10%):(35%～40%):(50%～65%)程度の構成比となっている。このことは、供給土砂の大部分が砂とシルト・粘土で占められていることを示している。砂利供給量の精度は、砂利堆積時期の判定(沖積世か洪積世か)が難しいため他の種類に比較して劣る。

図-4は、得られた供給土砂量と現河道における河道流送土砂量(河床構成主材料の1年当たりの流送量:堆積した状態での体積で表現)を比較したものである。ここで砂利の供給量はGセグメントの河道流送土砂量と、砂の供給量はSセグメントの河道流送土砂量と比較している。河道流送土砂量は、流砂量式(掃流砂量:芦田・道上式、浮遊砂量: Lane-Kalinske 式)と平均的年間流況、堆積した状態での空隙率(砂:0.4、砂利:0.3)を用いて算定している。掃流力は、各セグメント上部の河道諸元から等流近似により求めている。この図から、木曽川を除き供給土砂量と河道流送土砂量とはかなり良い対応を示していることがわかる。木曽川のデータについては、戦前から継続している供給土砂一部抑止の影響が現河道に現れていることが考えられる。以上のことは、G及びSセグメント上部がそれぞれの河床主構成材料の供給量に対して動的平衡に近い状態にあることを示唆している。

3. 河道縦断形形成機構の検討

縦断形形成において特に重要と考えられる2つの機構、すなわち砂利、砂、シルト・粘土から成る供給土砂の下でG、Sセグメントが形成される機構、各セグメントが動的平衡勾配に近い勾配を持つ理由について検討する。

3. 1 砂と砂利の縦断的分級機構についての実験的検討

(a) 実験方法

G及びSセグメントの形成メカニズムは沖積平野の形成に密接に関係している。そこで、沖積平野形成モデル実験を行い、セグメント形成メカニズムを定性的に把握した。実験は、図-5に示す一定水位を持つ実験水路に上流端から一定量の水と土砂を供給し、実験水路(以後河道と呼ぶ)内に土砂を堆積させるというものである。実験条件を表-1に示す。実験方法は、沖積平野が図-6に示す海面高変化⁴⁾の下で形成されたこと⁵⁾を踏まえ、その過程を定性的に再現することを基本に次のように定めた。

①給砂する材料の設定: Gセグメントの河床構成主材料(砂利)はSセグメントの構成主材料(砂)に対して30～60倍の粒径を持ち(図-2a)参照)、同じ摩擦速度に対して砂の砂利に対する無次元掃流力比 τ_{*r} は30～60倍となる。このため、砂利と砂は同じ流砂形態をとらない(砂が掃流形態で移動するとき砂利は移動せず、砂利が掃流形態で移動するとき砂は完全な浮遊形態となる)。この性質を実験で再現することが最も重要と考え、表-1下欄に示す石炭粉と粗砂をS、Gセグメントの砂、砂利それぞれに対応する材料として用いた。これらの材料の τ_{*r} は22であり、粗砂についての限界掃流力が発生している時、石炭粉は $\tau_{*r}=1.1$ 、 $u_{*0}/w_0=$

3.2となり浮遊形態となる。なお、シルト・粘土は縦断形形成に直接関係しないとして無視した。

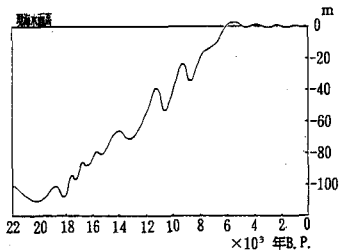


図-6 海面高変化の推定例⁴⁾

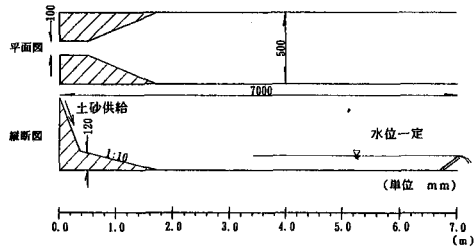


図-5 沖積平野形成モデル実験装置

②各材料の供給量比の設定：2章の結果を踏まえ、砂利に対して砂分の供給量が相当多いことが重要と考えて、実験での粗砂と石炭粉の供給量比を1：4とした。実験水路への供給は、両者を充分混合してから行った。

③初期河道と実験水路内水位の設定：実験の最初に、実験水路内水深がほぼ0の状態では粗砂のみを供給して、沖積地河道の基盤となっている沖積層基底隙層に対応する河道を造り、沖積地形成モデル実験の初期条件とした。次に実験水路内水深を7cmとして(海面の急上昇を模擬)、②に示した材料を供給した。
(b) 実験結果

図-7に、4時間毎の縦断図と実験終了後の掘削結果から得た縦断面堆積状況を示す。この図から、石炭粉の堆積領域と石炭粉混じり粗砂の堆積領域(以後それぞれ石炭粉、粗砂堆積域と呼ぶ)にはっきり分かれ、明確な縦断的分級が生じていることがわかる。各領域内では縦断形が概ね直線であり、粗砂堆積域の河床勾配が石炭粉堆積域の勾配より大きいため、2領域の境界で勾配の急変が起こっている。石炭粉堆積域の勾配は供給された石炭粉量に対する動的平衡勾配に概ね一致し、粗砂堆積域の勾配は粗砂供給量に対する動的平衡勾配よりやや小さくなっている。実験中は、大量の石炭粉供給により湛水部分が埋立てられるに伴い石炭粉堆積域が海部に向かって急速に伸張し、それよりかなり遅い速度で粗砂堆積域が下流に広がるといふ堆積、分級過程を示している。この間、各領域の勾配には大きな変化は見られない。流水幅は粗砂堆積域で10cm程度、石炭粉堆積域で30cm程度を保ち、流路位置が横断方向に変動するため横断方向にほぼ均等に河床上昇が起こった。堆積物の粒度分布を調べると、各領域内ではほぼ一様であり、粗砂堆積域の粗砂・石炭粉比は6:4(実質

表-1 実験条件

実験名	流量 (l/s)	給砂材料	給砂量 (cm³/s)	通水及び 給砂時間	下流端 水深
初期河道形成実験 (沖積層基底隙層形成実験)	0.15	粗砂のみ	2.04	3時間	0 cm
沖積河道形成実験	0.15	粗砂 石炭粉	0.61 2.44	20時間	7 cm

* 給砂量は堆積した状態での体積で表現(空隙率 0.4により換算)

* 粗砂は粒径 2mm、比重 2.65、石炭粉は粒径 0.3mm、比重 1.5

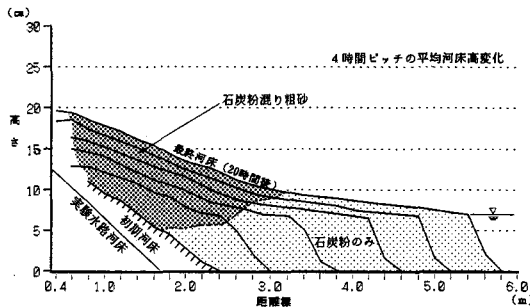


図-7 縦断形形成過程と堆積物粒度分布

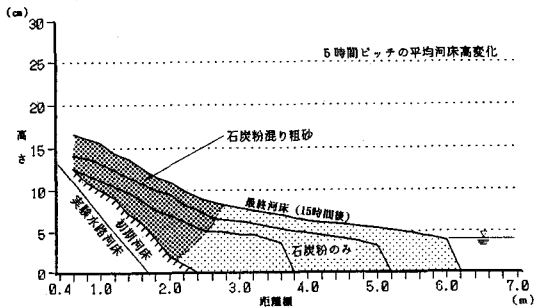


図-8 縦断形形成過程と堆積物粒度分布
(海部水深4cmで実験した場合)

体積比)、石炭粉堆積域は0.10であった。空隙率は、石炭粉堆積域では0.5程度であり、粗砂堆積域においては0.2程度であった。0.2は粗砂あるいは石炭粉だけの場合の空隙率0.4よりもはるかに小さい。このことは、粗砂だけの場合の粗砂粒子の隙間を石炭粉粒子が埋めた状態と粗砂堆積域の堆積構造が似ており、石炭粉が河床変動に対して有効な働きをしていないことを示している。

以上のような特性が現れた理由としては、1)石炭粉が粗砂に比べて非常に動きやすいため、勾配の大きい粗砂堆積域に留まる石炭粉は粗砂堆積構造の隙間にトラップされた石炭粉粒子だけである；2)同様の理由により粗砂が石炭粉堆積域に侵入することができない；3)1)のトラップ量よりはるかに多量で、海部を埋めて新たなセグメントを造るだけの石炭粉量が供給されていること、があげられる。また、縦断形が変化している過程であるにもかかわらず石炭粉堆積域が動的平衡勾配に近い勾配を持ったのは、流送された石炭粉のかなりの量が海部の埋立てに使われるため石炭粉堆積域前縁線の移動速度が遅くなり、前縁線に固定堰を設けた条件に近い状況になったためと考えられる。石炭粉堆積域と粗砂堆積域の境界位置の移動特性は、境界付近での粗砂供給による河床上昇速度と石炭粉堆積による河床上昇速度との相対関係で決まる。図8は海部水深を4cmにしたことを除いて表-1と同じ条件で行なった別の実験の結果である。図7と比較すればわかるように、より小さな海部水深設定により海部埋立てに要する石炭粉量が減り石炭粉河床上昇速度が大きくなったため、境界位置が下流方向ではなく上方さらには上流方向に移動している。

3. 2 河床変動計算による縦断形形成過程の追跡

前節で示した実験において形成された縦断形と縦断的分級特性、土砂流送特性は、石炭粉、粗砂をそれぞれ砂、砂利と置き換えればG、Sセグメントが接続する縦断形を持つ河川の特徴と定性的に非常に良く一致しており、実験水路における縦断形形成機構が実河川の縦断形形成の説明に有効であると考えられる。そこで、その機構を反映させた簡単な数値シミュレーションにより、実際の河道縦断形形成の再現を試みる。対象にしたのは、図-1の木曽川をモデルとしたモデル沖積河川の1万年間の形成過程である。

(a) シミュレーション方法

計算は、一次元の土砂収支を表わす次式を用いて行った。

$$(1-\lambda)B\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\sum_i b q_{si}) = 0 \quad (1)$$

ここで、B：沖積平野幅（沖積作用が生じる堆積空間の幅）、z：河床高、x：沖積平野の中心線沿いに海方向に取った座標、b：河道幅、 q_{si} ：各粒径別の河道内流砂量、添字i：粒径の種類を表わす記号、 λ ：空隙率、である。 q_{si} は、河川流量が幅bの河道幅を流れるとして不等流計算により求めた各点の掃流力から流砂量式を用いて算定した。上式は、土砂の輸送が河道幅で行われ、堆積は沖積平野の堆積空間全幅で生じる状況を表現したものである。

計算条件の設定は、木曽川および濃尾平野沖積層の諸元を参考に次のように設定した。まず、沖積平野幅Bと初期河床高は図-9のとおりとした。木曽川は河道幅の縦断変化が小さいので、河道幅bとして全区間一定の500mを与えた。海水面高には、図6に示した沖積世における海水面高変化をもとに、1万年前から6千年前にかけて-40mから0mまで年間1cmづつ上昇し、それ以後現在まで一定という変化を与えた。流量は、木曽川犬山地点流量データに準じて設定した。供給土砂については、前節までの結果を踏まえて砂利、砂、シルト・粘土の3種を与え、それぞれの粒径を30mm、0.5mm、0.01mmとし、供給量を砂利：8.4万m³/年、砂：32.1万m³/年、シルト：40.1万m³/年とした。

計算は1次元河床変動計算で用いられている方法に準じて行った。ただし、通常の混合粒径の計算法を1万年間の河床変動に適用すると莫大な計算労力がかかるので、次のような簡略化を行った。各計算ステップで、設定した各粒径それぞれについて均一粒径の河床変動計算を行い、各粒径別の河床変動量を合計したものを当該計算ステップでの最終河床変動量とする方法を用いた。均一粒径の計算において着目している粒径が存在しない区間については固定床とみなした。これは、3.1で述べた縦断的分級機構を最も簡単にモデ

ル化したものである。また、すべての粒径で掃流砂のみの計算としている。計算ステップは5年間とした。

この計算法は、セグメントGの河床材料中にトラップされる砂がセグメントSへの砂供給量に影響しないことを前提にしている。セグメントG河床材料中の砂分割率は多くの場合10%以下である。この比率を10%とおいても、図-3に示したように砂供給量は砂利供給量より相当多い(4倍以上)ので、砂利中にトラップされる砂量は全砂供給量の数%となり、上記の前提は妥当と考えられる。

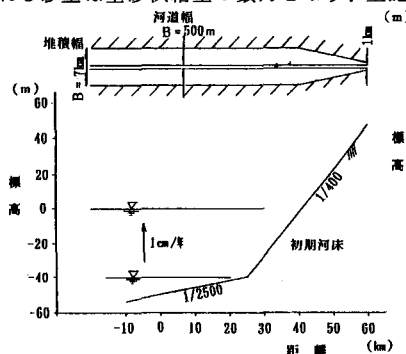


図-9 計算条件

(b) シミュレーション結果

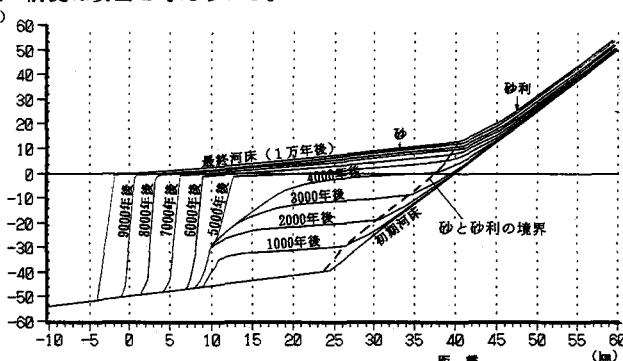


図-10 縦断形形成過程のシミュレーション結果

図-10に示したシミュレーション結果から、モデルとした木曾川(図-1参照)に良く似た縦断形が得られたことがわかる。最終的に形成された縦断形のSセグメントにおいては勾配の縦断変化が小さく(下流に向かって1/2500から1/3000程度まで変化)、全体的に動的平衡勾配である1/2500に近い値を持っているのに対して、Gセグメントの勾配はSセグメントとの接合点に向かって動的平衡勾配である1/400から1/1000程度まで大きく変化する。S、Gセグメントとも堆積上昇速度は海水面高がほぼ安定したここ数千年間で年間平均1mm~2mm程度となっている。S、Gセグメントの接合点は上方に移動している。

4. まとめ

GセグメントとSセグメントが接続する沖積河川の縦断形形成機構は以下の通りである。

1)供給土砂は砂利($d_{50} \geq 1.5\text{mm}$)、砂($d_{50} \leq 1\text{mm}$)、シルト・粘土から成り、砂利に対してそれ以外の供給量ははるかに多い。2)Gセグメントが流送できる砂の量は上流からの砂供給量に比較して非常に大きく、またGセグメントでは砂利と砂が同じ流砂形態(静止、掃流形態、浮遊形態の別)をとらない。このためGセグメントは砂にとっての通過流路とみなせる。3)砂利はSセグメントにほとんど侵入できない。4)河床縦断形形成過程は、上記の分級機構にしたがって河道を通じて流送される土砂について、沖積平野となる堆積空間全体での1次元的な土砂収支を考えることにより定量的に記述できる。5)このようにして形成されるG、SセグメントのうちSセグメントは砂供給量に対する動的平衡勾配に近い勾配をセグメントほぼ全域にわたって持つ。以上から、河床材料の急変がある縦断形の河床変動予測について以下のことが言える。1)砂利供給量に応じたGセグメント河床変動、砂供給量に応じたSセグメント河床変動を基本的には独立に計算することにより予測が可能になる。2)この際必要となる砂、砂利それぞれの供給量は、沖積層体積あるいはダム堆砂量から把握される量と流砂量計算より把握できる各セグメント河道流送土砂量(砂、砂利別)に関する情報を組合せることによりある程度推定できる。

参考文献

- 1)山本ほか：一次元河床変動計算法の改良、土研資料第3099号。
- 2)山本：河道特性論、土研資料第2662号。
- 3)赤堀ほか：河道供給土砂の質と量、第47回年講Ⅱ。
- 4)T-Y-H-A：一般地質学Ⅱ、東京大学出版会。
- 5)例えば井関：沖積平野、東京大学出版会。
- 6)吉良ほか：貯水池の堆砂に関する基礎的諸問題、神戸大学農学研究報告、Vol. 11, No. 2。
- 7)松山・波多野：貯水池土砂堆砂状況に関する調査、土研資料、第982号。