

低堰堤貯水池排砂の問題点とその土砂水理学的支援

Hydraulic approach to flushing method of sediment from reservoir behind a low dam

辻本哲郎*・寺本敦子**・後藤孝臣***

Tetsuro TSUJIMOTO, Atsuko TERAMOTO and Takaomi GOTOU

1. 序 論

低堰堤貯水池では堆積土砂の問題が日常的で、ダム堆砂堆積とはまた異なる問題点を抱える。特に満砂にいたる時間が極めて短いため日常的に堆積土砂対策をとらねばならないことで、洪水時などに貯水池の必要な部分から適切に排出することが望まれる。発電取水用堰堤などでは、取水口周辺には常に堆積が生じないように管理することも要求される。たとえば、写真1は長良川水系板取川奥美濃白谷堰堤を下流から見たもので、左岸側にある取水口部分の排砂のため、部分的にゴム布引堰が設置され、洪水時に倒伏させて左岸側に堆積を生じないように、あるいはみお筋を左岸側に固定する努力をしている。一方、堰の排出部直下に堆積や侵食が生じることも、排出ゲートの開閉や堰や護岸構造の維持から問題となる。

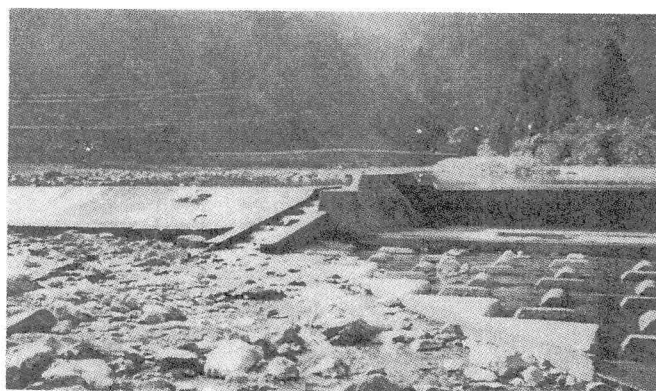


写真1 長良川水系板取川・白谷堰堤

本研究では、上記の観点から低堰堤貯水池とその開口部およびその下流の土砂動態を流れの平面2次元解析によって検討することを枠組みとした。こうした解析によって、堰上流の堆積域に侵食流路ができる状況、下流に堆積域ができる状況を再現し、その典型的パターンを認識した。又一部基礎実験でこうしたパターンを確認した。こうした検討の結果、開口部から上流に侵食流路が出来、それが平衡になることによって堆積土砂の排出が頭打ちすることが予想されたので、貯水池内堆積面にあらかじめ人工的に水路を掘削する方法についても同じ数値解析によって検討した。あらかじめ浅いながらの長く流路を掘った場合、斜めに流路を掘ってより幅広い領域から排出土砂を集めることなど、目的に応じて、土砂排出領域の制御や排出量の促進が可能かどうかの検討がなされた。

キーワード：ダム堆砂，排砂，河床変動，水系一貫土砂管理

* 名古屋大学大学院工学研究科助教授（〒464-8603 名古屋市千種区不老町，ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp）

** 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程学生

*** 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程学生（中部電力（株）技術技術開発本部電力技術研究所勤務）

上記では低堰堤の機能に着目したが、水系的視点から見れば、低堰堤に限らず、砂防、ダム貯水池での土砂の不連続が、河川の治水、利水及び生態系保全機能に与える影響は近年深刻化しており、その解消のための土砂制御の議論が必要となっており（辻本，1997），こうした視点の研究への第1歩とも考えている。

2. 現象の簡素化

本研究では、図1に示すように河幅 B の変化しない貯水池部と下流河道区間が直線河道を形成しており、非越流の固定堰の一部が開口して排砂出来る（ゴム布引堰のような）排砂ゲートを考える。開口幅を B_0 とする。貯水池、下流河道は共通の均一粒径 d の河床材料、路床勾配 i_b を有している。排砂前には貯水池の河床高が ΔH だけ高く、排砂のための開口直後に、この部分にただちに安息角の斜面が形成されるとした。本研究の計算例では、開口部を水路中央としているので、図1に示すように水路中心軸を対称軸として計算を行う。白谷堰堤のような発電水力との関連ダムでは河岸に取水口があり、その部分の堆積土砂を優先的に排出すべきであることより、実際には河道中央に設置することはむしろ稀であるが、ここでは水系土砂の不連続解消を主目的と考えていたので、中央に設置するものを想定した。

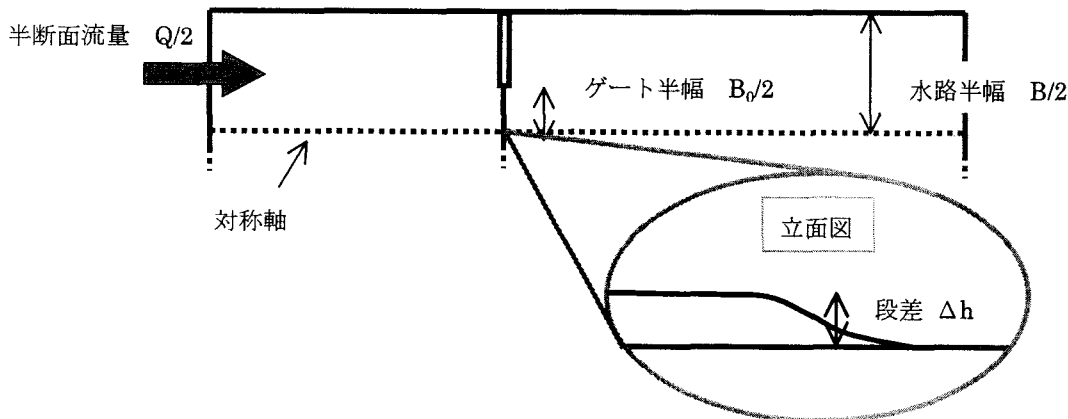


図1 本研究で想定された貯水池と下流側河道

3. 基礎実験による現象の概要把握

現象の概要を把握するため、実験室内で小規模実験を行って現象の概略を把握した。実験は水路半幅が $B/2=0.3\text{m}$ で、水中央に開口部のある状況を水路中心対象軸を透明アクリル樹脂板仕上げとして側方から観察（ビデオ撮影）できるようにして行った。移動床材料は $d=0.3\text{mm}$ の均一粒径砂とし、現象を強調するため段差は $\Delta H=0.4\text{m}$ とした。路床勾配は $i_b=1/1000$ とした。実験での下流側水路は固定床で、これは水叩きなどの存在を想定したものである。開口幅（ B_0 ）、流量をいくつか変えて実験を行い、側方から撮影されたビデオが像より、水路中心軸沿い（アクリル樹脂板沿い）の河床高の揭示変化を見た。図2はその一例で、初期に段差部に安息角程度の斜面が形成され、堆積域が下流へ押し流されていく状況が見られるが、堆積域はいつまでも下流へ伝播せず、ある程度の位置で発達して現象が鈍化する。一方、平面形状

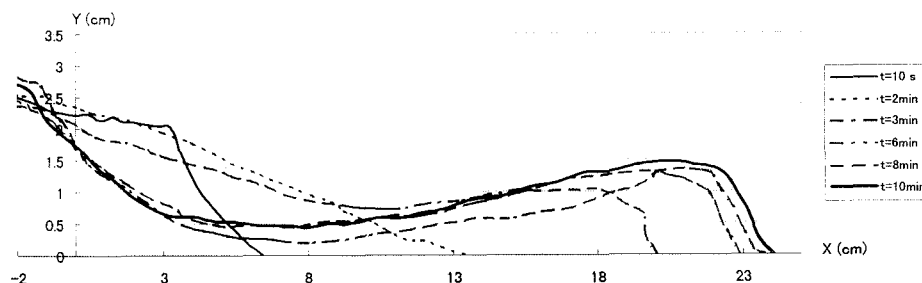


図2 基礎実験による堰開口部下流での河床形状変化

は、揭示的に観察できないが、最終形状を見ると固定堰の端部で局所的な洗掘が見られること、縦断方向への堆積だけでなく、堆積域の側方への広がり、開口端部の下流への山状の堆積が特徴的である。これらは、固定堰端部からの渦など3次元的な流れの挙動と関係するようで、後述するように2次元平面解析の対称とは状況の異なる場所と思われる。

4. 数値解析のための支配方程式

開口部のある堰の上下流河道の流れを、k-εモデルを用いた水深平均平面2次元解析で扱った。その支配方程式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 - h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWU - h\nu_T \frac{\partial U}{\partial z}\right) &= -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_T \frac{\partial W}{\partial x}\right) - \tau_{bx} \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(hWU - h\nu_T \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW^2 - h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) &= -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T \frac{\partial U}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}\right) - \tau_{bz} \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(hUk - h \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWk - h \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) &= P_k + P_{kb} - h\epsilon \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(hU\epsilon - h \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW\epsilon - h \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right) &= P_\epsilon + P_{k\epsilon} - h\epsilon \\ \tau_{bx} &\equiv C_f U \sqrt{U^2 + W^2}; \quad \tau_{bz} \equiv C_f W \sqrt{U^2 + W^2} \\ P_k &\equiv h\nu_T \left\{ 2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 \right\}; \quad P_{kb} \equiv \tau_{bx}U + \tau_{bz}W \\ \nu_T &= C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \end{aligned}$$

これらは、水深平均された連続式、流下方向・横断方向の運動量式、乱れエネルギー、その散逸率の輸送方程式である。ここで、(x, z): 流下方向・横断方向座標、(U, W): 流下・横断方向の水深平均流速、h: 水深、y_b: 基準面からの路床高、ν_T: 渦動粘性係数の水深平均値、k: 乱れエネルギーの水深平均値、ε: 乱れエネルギーの散逸率の水深平均値、C_f: 路床の摩擦抵抗係数である。乱流モデルのモデル定数C_μ, C₁, C₂, σ_k, σ_εについては標準値を用いる。底面摩擦抵抗に関わる係数C_{be}についてはRastogi & Rodi (1978)により次式から算定する。

$$C_{be} \equiv 3.6 \frac{C_2}{C_1} \frac{k}{\epsilon} \frac{C_\mu^{1/2}}{C_f^{3/4}} \sqrt{U^2 + W^2}$$

土砂輸送は掃流形式を仮定し、次の芦田・道上式(1971)を採用する。

$$q_{B*} \equiv \frac{q_B}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3}} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right); \quad \tau_* \equiv \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho-1)gd}$$

ここに、q_B: 掃流砂量(実質体積表示)、u_{*}: 摩擦速度、σ: 砂の密度、ρ: 水の密度、g: 重力加速度、τ_{*}: 無次元掃流力、τ_c: 限界掃流力である。上式で求められた掃流砂量は、掃流砂礫の運動方向角φによって縦断方向、横断方向成分、q_{Bx}, q_{Bz}に配分した。φは掃流砂礫の運動方程式を流れの偏向角γ、河床横断勾配(∂y_b/∂z)が小さいと仮定して線形結合として求められた次式(Nakagawa, et al., 1986)を粒径別に適用する。

$$\tan \phi = \tan \gamma + \frac{1}{\sqrt{\mu_d \mu_f}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial y_b}{\partial z}$$

ここに、μ_f, μ_d: 砂の静止摩擦係数及び動摩擦係数である。

河床変動過程は次式で記述される。

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\rho_0} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bz}}{\partial z} \right)$$

ここに、 ρ_0 ：砂の空隙率である。

5. 数値解析による低堰堤貯水池の排砂特性

本章では、上記枠組みでの数値解析を行って低堰堤貯水池の排砂特性を議論する。

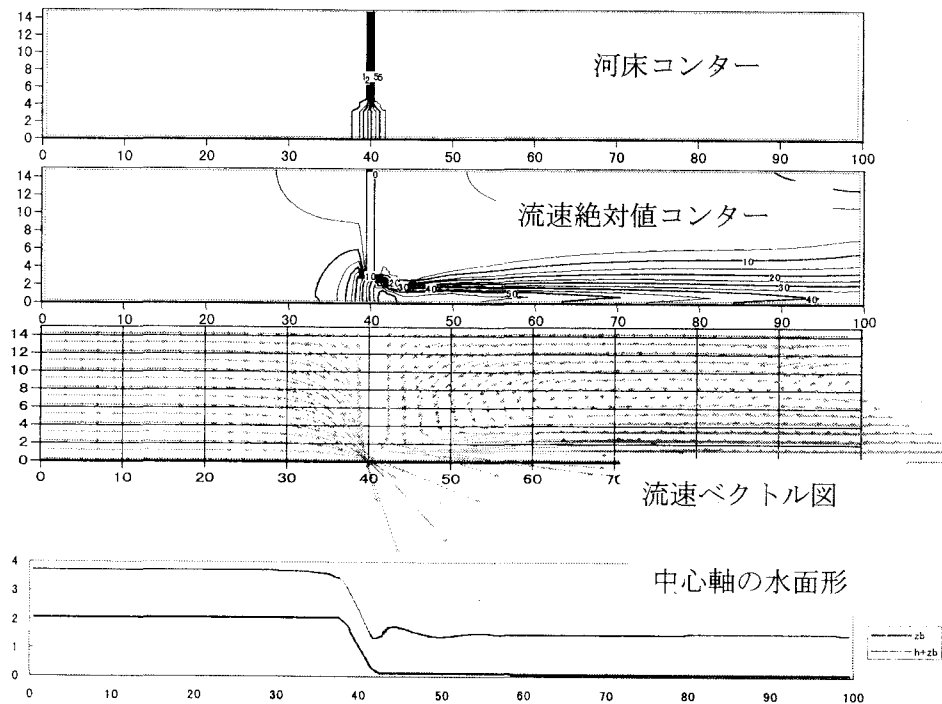


図3 初期の開口部周辺流れの状況

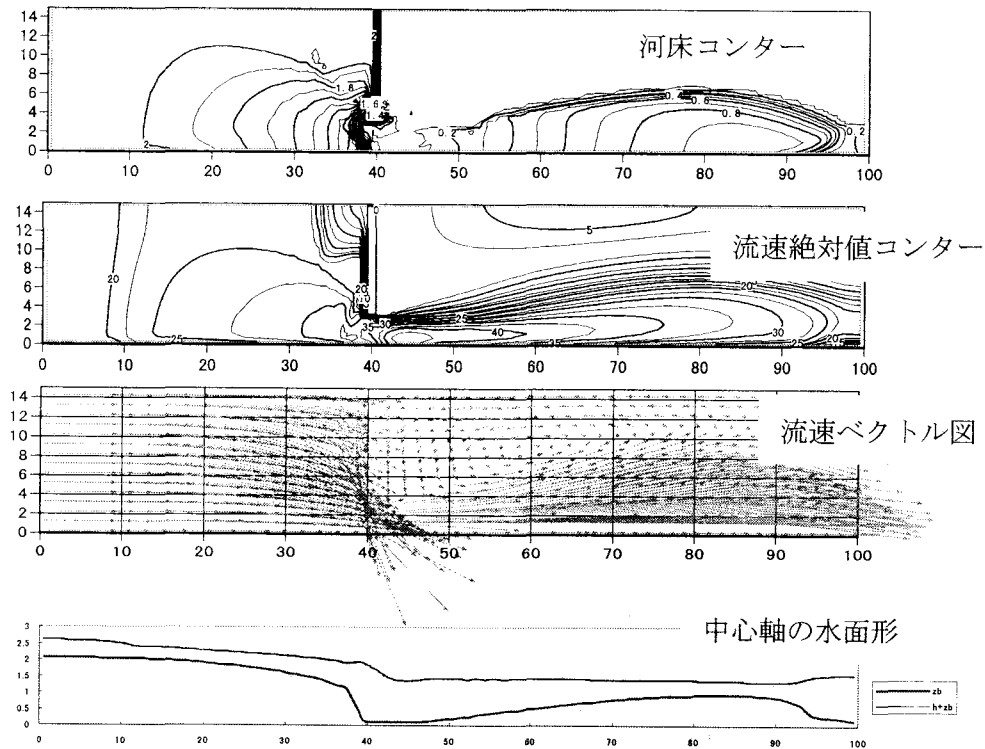


図4 通水10分後の開口部周辺流れと河床変化の状況

数値計算は水路実験による検討を予定していたため、そのスケールで行った（水路半幅 $B/2=0.15\text{m}$ ，河床材料粒径 $d=0.3\text{mm}$ ）。写真1に示したような現地との対応では、幾何スケールで1/100のオーダーである。河道の堰の中央に開口部（ $B_0/B=0.2$ ）を設けた場合で、水路中心を対称軸とし左岸側半幅河道について計算した。水路中心で対象条件を課した。河岸は滑面とする。上流で流量 Q ，下流ではそれに応じた等流水深を課した。初期河床は平坦で、段差 $\Delta H=0.02\text{m}$ ，上下流河道とも路床勾配 $i_b=1/5000$ とした（堆積後地形を考慮した）。

図3は初期状態での流れの解を示したもので（ $Q/2=150\text{cm}^3/\text{s}$ の場合），流れが開口部に集中し，また開口部下流に高流速が出現している。開口部下流では深掘れが予測されるが，写真1に示されるように，しばしばこの領域は水叩き工が設置されることを考え，固定床（侵食が生じない）と想定して計算を進めることとした。一方，図4は，10分後の地形と流れの状況である。開口部から上流に向かって侵食流路が形成され，この部分の排砂が進んだことがわかる。また，堆積域が下流へ延伸している。ただし，堆積域の上流側，下流側のコンターは同じ程度の間隔で，実験（図2に示した結果）のような非対称縦断形状を呈していない。実験では下流側斜面は安息角を呈した急斜面でこうした地形が本研究の2次元解析では説明しきれない面である。さらに，流れは下流では初期に比べ，横断方向へひろがっており，堆積域も拡幅してくることがわかるが，これも実験に比べて，過小評価されている。これは，水深平均した流れ以上に底面流向は堆積域によって横断方向へ逸らされ，このことによって堆積域の拡幅は助長されるはずであることが，解析に組み込まれなかったことと対応する。さらに，開口部周辺部の局所洗掘が数値解析で表現できていない。このように，現状の数値解析のいくつかの問題点が明らかにされた。

次に，排砂前に堆積面にあらかじめ予備水路を浚渫した場合について数値計算によって検討した。図4の(a)はすでに図3に示した河床形状であるが，(b)のケースでは開口部上流15mまで予掘（0.03m）した場合で，侵食流路の拡大が認められる。(c)のケースではさらに45度の角度で上流の岸に向かって予掘（0.03m）を追加した。これは，貯水池全体からの排砂をもくろむ場合で，排砂域の拡大が図られた。今回の基礎実験では河床形状測定が行えなかったが，こうした予掘は数値計算以上に効果的であるように見えた。これは数値計算が水深平均しているので，溝部への流量集中，流砂量集中が過小評価されてたためと思われる。

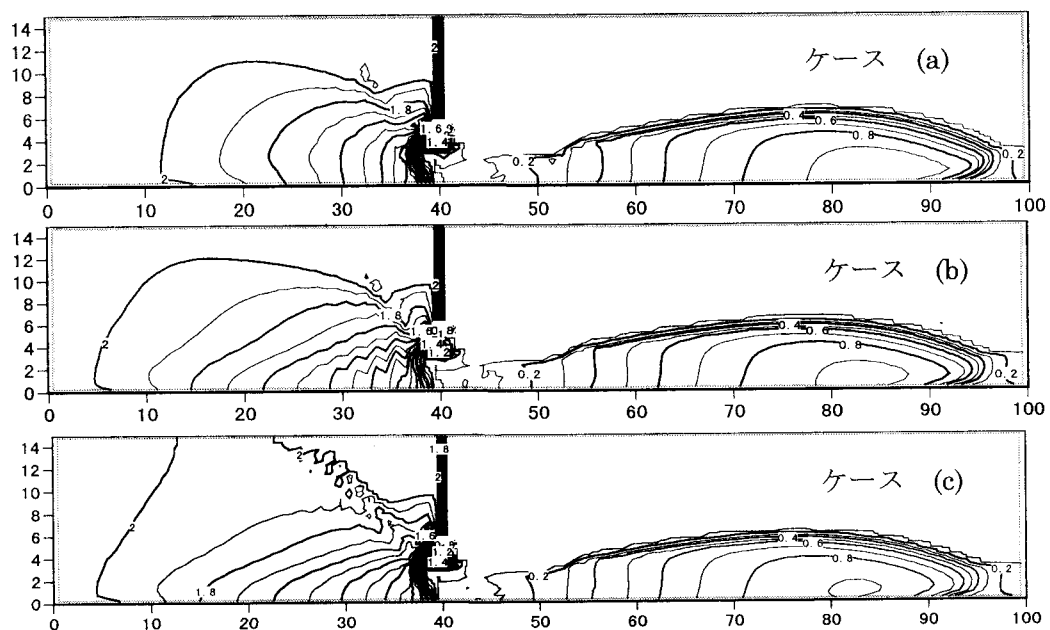


図5 排砂前にあらかじめ浚渫する場合の河床形状

6. あとがき

本研究では、上記の観点から低堰堤貯水池とその開口部およびその下流の土砂動態を流れの平面2次元解析とによって検討することを枠組みとした。こうした解析によって、堰上流の堆積域に侵食流路ができる状況、下流に堆積域ができる状況を再現し、その典型的パターンを認識しようとした。又一部基礎実験でこうしたパターンを確認した。これらの検討の結果、開口部から上流に侵食流路が出来、それが平衡になることによって堆積土砂の排出が頭打ちすることが予想されたので、貯水池内堆積面にあらかじめ人工的に水路を掘削する方法についても同じ数値解析によって検討した。あらかじめ浅いながらの長く流路を掘った場合、斜めに流路を掘ってより幅広い領域から排出土砂を集めることなど、目的に応じて、土砂排出領域の制御や排出量の促進が可能かどうかの検討がなされた。

精度のよい水路実験がまだ行えていないが、定性的な検討のための簡単な実験の結果、平面2次元解析を基礎とした解析では、水深が浅い地形の変化では、水深平均流向と底面流向の差が大きいことによる横断方向への現象の広がりが表現できないこと、3次元的な局所洗掘が記述されないなどの問題を抱えていることがわかった。また流砂についても安息角斜面の形成、非平衡性が重要な課題と思われる。現象におけるこうした事象の重要性に応じてこうした効果を取り込む工夫について研究を進めるとともに、洪水時に満砂する前から、流路維持管理（とくに河岸よりに期待される滞積を生じさせない岸寄りの開口部の設置）などの検討などへの応用を考えていきたい。

参考文献

- 1) 芦田和男・道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第14号B2，pp.259-273，1971.
- 2) 辻本哲郎：持続的発展のための流域管理 - 水系一貫土砂管理の観点から，世界河川会議論文集，岐阜，pp.III1-III8，1997.
- 3) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Murakami : Non-equilibrium bed load transport along side slope of an alluvial stream, *Proc. 3rd International Symposium on River Sedimentation*, Jackson, Mississippi, USA, pp.885-893, 1986.
- 4) Rastogi, A.K. and W.Rodi : Predictions of heat and mass transfer in open channels, *Jour. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.104, No.3, pp.397-420, 1978.