

取水堰ゲート直下の堆砂のゲート操作によるフラッシュ過程

Process of Flushing Sand Accumulated under Gates on a Dam by Sluice Outlet

岩手大学農学部 三 輪 式 Hajime MIWA

In some new diversion dams, sand and gravel were accumulated under gates by floods. But occasionally accumulated sand is flushed by sluice outlet at closing gates after flood. Analysis of this process by two methods (field surveys and flume experiments) clarified as follows : (1) To flush accumulated sand, the difference of water levels at upstream and downstream of a gate should be five times as large as the maximum size of sand or gravel. (2) In a dam on a sand-bed river, flushing sand by sluice outlet is so easy to occur that controllable gates are easily closed after flood. (3) In a dam on a gravel-bed river, gravel flushing is difficult. Therefore, even if gravel can be flushed, gates will get damaged by collision of gravel.

Keywords : diversion dam, accumulated sand, controllable gates, flushing, sluice outlet

1. 研究の目的と方法

取水堰の新改設にあたっては、洪水の疎通を妨げないように、堰の敷高を「計画河床高」（現況河床より低いことが多い）に合致させられる。そのさい、堰の上下流部のある区間だけは、計画河床高まで掘削されるが、河床掘削範囲は狭いので、洪水が出た場合、堰上下流の掘削部が埋め戻され、さらに、可動堰のゲート直下に堆砂する¹⁾。そのため、洪水減水時のゲート閉鎖のさいに、ゲート下端からの流出流によって、堆砂のフラッシュが試みられるが、フラッシュすることができず、ゲートがびったり閉鎖できなくなって、人為的に除去しなければならなくなる場合があった。

堰や床止めの下流の局所洗掘、橋脚や堰柱の周辺の洗掘などの研究はあったが、ゲート流出流による堆砂フラッシュについてはあまり進められていないので、そのメカニズムや進行状況、フラッシュ可能な限界条件などを追及し、併せてフラッシュによる堆砂除去の可能性を検討した。

本研究の対象は、開放されていた数門以上のゲートを洪水減水時に順次閉鎖させて、堰上流水位をせき上げるさいに堆砂がフラッシュされる現象であるから、各ゲートの開度と流量は時々刻々変化するし、下流水位によって流出の形態が自由・もぐり流出と変化したり、洪水時に埋め戻されて堆積した堰周辺の砂礫面の高さや凹凸なども影響する複雑な現象である。

そこで、取水堰での実態を知るための調査を実施した。そのさい、堰付近に堆積した砂礫粒径の大小が、堆砂フラッシュの難易に影響するので、砂・礫・大礫などの河床材料の異なる取水堰について、ゲート操作記録や堰の管理者の見聞を分析し、さらに、入手可能な場合には、堰上下流の河床縦横断面測量図を比較解析し、ゲート流出による堆砂フラッシュの実態とそのときに発生する諸トラブルを把握した。

一方、実験水路においてゲート付近の砂礫のフラッシュ状況を再現することを試みた。そのさい、砂礫は粒径の異なる3種類を用い、それぞれについて水理条件（通水流量や堆砂高・堆砂形状、下流水位など）を変化させた多様な実験を実施した。この実験結果と諸事例の分析結果を比較検討し、フラッシュの進行過程とフラッシュ可能な限界条件を追究した。

2. 洪水減水時のゲート操作による堆砂フラッシュの実態

(1) 砂床河川に設けられた取水堰の場合

表-1の淀川大堰

以下3事例は、河川下流部の緩勾配の砂床河川に設けられた取水堰である。いずれも河床材料の平均粒径は1mm程度であり、フラッシュの対象となる粒子は最大径でも1cm以下と思われる。これらの堰では、洪水のたびに堰上下流部及び可動堰ゲートの直下に、いったんは堆砂するが、洪水の減水時に洪水中開放されていた数門以上のゲート

を順次閉鎖して、堰の上流側水位をせき上げていくさいに、ゲート直下周辺の堆砂が自動的にフラッシュされ、ゲートの再閉鎖が可能になっている。

1例として、淀川大堰での堆砂のフラッシュ後の形態を図-1に示す。可動堰ゲートの数高は0.P.-4.0mであるのに、堰の上流部下流部とも高位部は0m以上になっている。したがって、洪水のさいには、ゲートの直下周辺部にも3~4mの厚さで堆砂していたが、ゲート閉鎖のさいの下端からの流出流によって、堆砂が局所的にフラッシュされ、ゲートの再閉鎖が可能になったのである。

なお、淀川大堰では、河道中央部の制水ゲート4門に先行して、左右両岸の調節ゲートだけを全閉する操作を行なうが、そのさい、堰の上下流にあまり水位差がつかないために、調節ゲート直下の堆砂が完全にはフラッシュされず、閉鎖途中で堆砂に衝突して、閉鎖できなくなる事態も発生している。だが、制水ゲートの閉鎖が始まり、堰の上下流に水位差がつくようになると、調節ゲートでの排砂も進み全閉が可能になる。阿武隈大堰でもこれと類似のトラブルが発生したことがある。

(2) 礫床河川に設けられた取水堰の場合

表-1の北空知頭首工以下の5取水堰は礫床河川の取水堰である。(表中の「排砂対象最大粒径」とは、ゲート直下付近に堆積した砂礫の、まれに混じる極大粒子を除いた大粒子の粒径である。)

写真-1(1989年8月の洪水直後)は、飯泉取水堰での排砂後の状況である。図-2の堰上下流の河床縦

表-1 今回調査した取水堰での堆砂状況の概要

堰名	河川名	計画河床勾配	排砂対象最大粒径	最高堆砂高	堆砂範囲	ゲート諸元* 径間長×ゲート高
淀川大堰	淀川	1/4,000	約1cm	約4m	6門全門	55.0m×7.8m(4門) 40.0m×7.8m(2門)
阿武隈大堰	阿武隈川	1/2,030	約1cm	約2m	10門全門	43.0m×3.8m(7門) 43.0m×3.8m(3門)
邑楽頭首工	渡良瀬川	1/2,700	約1cm	約2m	3門全門	40.0m×4.2m(2門) 40.0m×4.3m(1門)
北空知頭首工	石狩川	1/934	約5cm	約2m	4門中 右岸2門	38.1m×4.9m(3門) 16.5m×5.0m(1門)
近文頭首工	石狩川	1/223	約10cm	約0.7m	4門中 中央1門	33.5m×2.0m(3門) 20.0m×2.4m(1門)
飯泉取水堰	酒匂川	1/240	約10cm	約1.5m	7門中 右岸5門	34.0m×2.4m(5門) 34.0m×3.4m(1門) 10.0m×3.4m(1門)
赤川頭首工	赤川	1/140	約20cm	約1m	5門中 左岸1門	29.7m×3.05m(4門) 20.0m×3.55m(1門)
太田頭首工	渡良瀬川	1/141	約20cm	約1.5m	4門中 中央2門	35.0m×2.35m(3門) 20.0m×3.15m(1門)

* 上段：制水ゲート。r洪水吐ゲート、下段：調節ゲート。r土砂吐ゲート
ただし飯泉堰は最下段が土砂吐ゲートで、他に転倒式洪水吐ゲート2門あり。

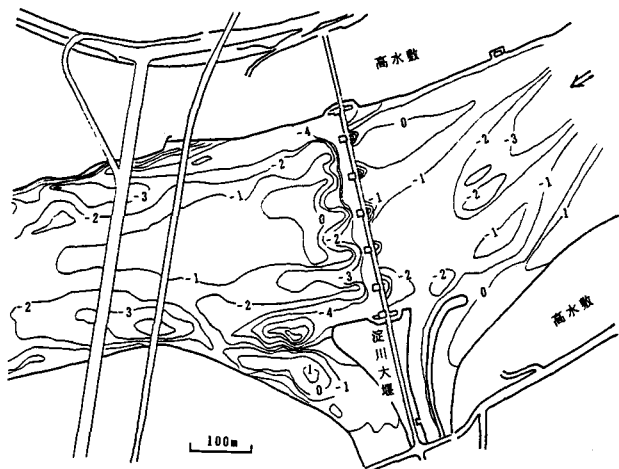


図-1 淀川大堰での堆砂フラッシュ後の状況
(1986年8月洪水後、原図：建設省淀川工事事務所提供)

断面と併せてみると、ゲート近傍のみが局所的に排砂されて、ようやく閉鎖できていることがわかる。筆者は、1989年8月の洪水後のゲート閉鎖の現場に立ち会ったが、そのとき次のようなゲート操作によってフラッシュを実行していた。

①飯泉堰は、洪水中でも取水しており、洪水の減水時に河川水位が低下してくると、さっそうとゲートの閉鎖操作を開始する。

②全ゲートの開度をそろえて降下させ、開度が1m程度になったら、取水口から遠い7号ゲートから順次全閉しようとする。

③ところが7号から手前の3号にかけてのゲートの直下には1m~1.5m厚の堆砂があり、ゲート下面が砂礫につかえて全閉できなかったで、いったんそのゲートを再度30cm程度上昇させる一方、隣接のゲートを降下させて堰上流水位を高め、堆砂をフラッシュする。

④このような操作を繰り返してフラッシュし、最終的に全門を再開鎖した。

北空知頭首工でも、同様のゲート操作で堆砂のフラッシュをしたが、近文頭首工と赤川頭首工は、堆砂の高さが低く、範囲も狭かったので、容易にフラッシュできた。

一方、太田頭首工でも洪水減水時に堆砂のフラッシュが試みられたが、全閉することはできなかった。ゲート直下付近に堆積した砂礫の粒径は赤川頭首工と同程度であるが、堆砂高が高く堆砂範囲も広いのに、ゲート高が小さくて十分な水位差をとれなかったことが、原因であろう。

3. ゲート流出流による堆砂フラッシュの実験的研究

(1) 実験の概要

1988年度に板状のゲートを用いた実験を行ない、堆砂フラッシュの基本的なメカニズムと粒径の異なる河床材料でのフラッシュ可能な限界条件を解明した²⁾。だが、飯泉堰のフラッシュ時に、現在のシェル構造の長径間ゲートで下流側に（河口堰では上流側に）膨らんだ形状の下面に、砂礫がつかえてゲート閉鎖の支障になっていたので、本年度は、図-3のような単純化したシェル構造タイプのゲート（扉高0.24m）を用いて実験した。

ゲートは、既設の水路（幅0.50m、高さ0.50m、長さ17m、水平勾配）

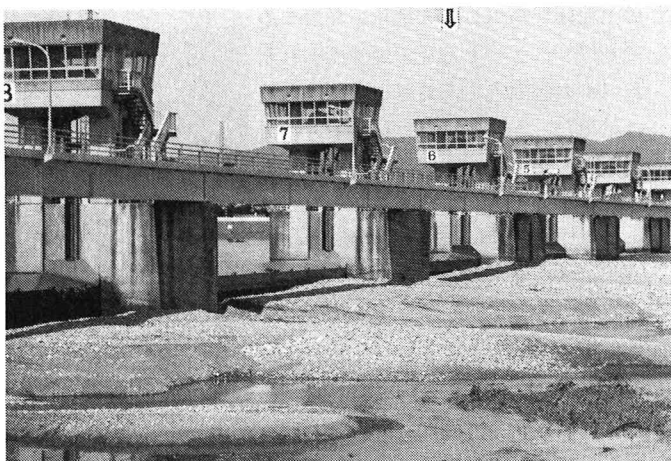


写真-1 飯泉堰でのフラッシュ後の状況
1989年8月洪水直後、堰下左岸から

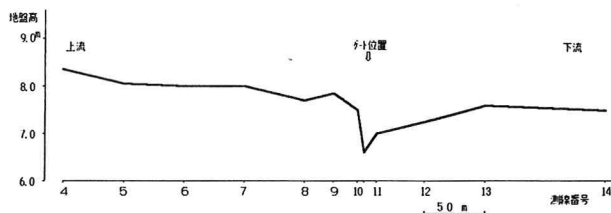


図-2 飯泉堰上下流縦断面図（写真-1の5号ゲートを通る河川縦断面）
1989年10月測量、神奈川県飯泉取水管理事務所提供の測量図から作成

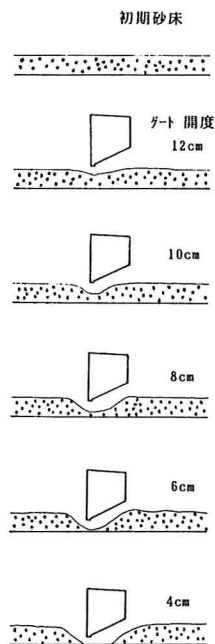


図-3 実験での堆砂フラッシュの進行状況例
（S砂、 $Q=101/s$ 、末端堰上げ高11.5cm）

の上流端から 11.2mの地点に設置することにし、ゲート地点の上下流それぞれ 1m の区間にある厚さで砂礫を敷き詰めた。水路側壁に支柱を取付けた関係上、ゲートの径間長は 0.45mである。実際のゲートに比べると相対的に短い径間長のゲートになっている。なお、水路末端の堰高を調節して下流水位を変化させることができる。

実験は、粒径の異なる 3 種類の砂礫（M砂：0.5~2.0cm, S砂：0.2~0.5cm, SS砂：0.08~0.1cm）を用い、それぞれについて水理条件（通水流量や堆砂高・堆砂形状、下流水位など）を変化させ、フラッシュの進行過程とその相違、さらにフラッシュ可能な限界条件を追及した。

(2) 堆砂フラッシュの進行状況

図-3は、ゲートを徐々に降下させていったときに、ゲート下端からの流出流によって砂礫面が順次洗掘され、洗掘範囲も広がってゲートの再閉鎖できた状況を示す例である。この実験の開度 8 cmのときのゲート近傍の流跡線

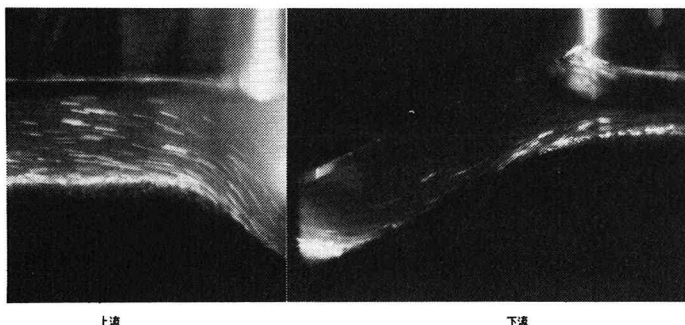


写真-2 ゲート近傍の流跡線
(水路中央部スリット面、露光時間:1/15sec)

表-2 堆砂フラッシュ実行時のゲート上下流の水位差（初期砂厚10cmの場合）

実験条件				ゲート開度						
砂	流量	末端堰		14cm	12cm	10cm	8cm	6cm	4cm	2.5cm
M砂	25 l/s	10cm		6.6	9.2	9.0	8.3	9.0		
M砂	20 l/s	10cm			7.2	8.5	8.0	8.9	8.9	
S砂	10 l/s	20cm	1.3		1.8	2.1	2.2	2.2	2.4	
S砂	10 l/s	15cm			2.2	1.6	1.8	1.9	1.9	
S砂	10 l/s	11.5cm			1.9	1.2	1.2	1.7	2.3	
S砂	5 l/s	15cm				1.7	1.4	1.4	1.7	2.2
SS砂	10 l/s	20cm	0.7	0.7	0.7	0.9	1.3	1.4	1.2	
SS砂	5 l/s	20cm		0.6	0.7	0.7	1.0	1.0	1.1	
SS砂	5 l/s	12.8cm				0.6	0.4	0.5	0.8	

(単位: cm)

(水路中央部縦断スリット面内)は、写真-2のとおりであり、ゲート手前から集中して潜り込んだ流跡線は、そのままゲートの下面に並行して砂面に沿ったまま流れていく。流跡線の長さから、ゲートに近付いて急に流速は大きくなり、ゲートの直下で最大となっていることがわかるが、それはちょうどゲート直下で砂礫面が大きく洗掘されていることに対応している。

この堆砂フラッシュの進行状況は、①相対的に流量が大きい場合には、下流の洗掘範囲が広がり、②下流水位が高い場合には、下流の砂面上に小山のように堆積するという点で相違はあるものの、③砂礫の種類による差はそれほど大きくなかった。

(3) 堆砂フラッシュのために必要なゲート上下流の水位差

図-3の例の場合のように、ゲートの下面と砂礫面との間に適当な間隔を保ったまま堆砂のフラッシュが進行していく場合には、ゲート下面に砂礫がつかえたりぶつかったりすることもなく、スムーズにゲートが再閉鎖される。このような順調な再閉鎖は、3種類のどの粒径の砂礫の場合にも可能であったが、フラッシュに要するゲート上下流の水位差は、粒径の大きいほど大きい必要があり（表-2）、フラッシュ後半の深く洗掘した場合に、より大きな水位差が必要になっている。その後半の水位差で比較して、M砂の場合には 9.0 cm、S砂 2.5 cm、SS砂 1.0 cm 程度である。

静止した砂礫を始動させるのに必要な流速は、ゲート流出によって砂礫を移動させる場合にも、砂礫粒子の粒径の平方根にほぼ比例する²⁾。一方、ゲート流出流の流速は、基本的にはゲート上下流の水位差の平方根に比例するから、ゲート流出によって砂礫をフラッシュするのに要するゲート上下流の水位差は、砂礫粒子の粒径に比例するはずである。実験砂の最大粒径と比較すると、M砂では粒径の 4.5倍、S砂では 5.0倍

とほぼ一定の値であるし、1988年度の板状ゲートの実験での、最大粒径 4cm砂利の場合にも、4倍程度の水位差でフラッシュ可能であったから、河床材料が礫の場合には、最大径の5倍の水位差があれば、フラッシュ可能であると見なすことができよう。ただし、粒径の小さいSS砂の場合には、理由は不明であるが、相対的により大きな水位差が必要であり、最大径の 10 倍程度の水位差によってフラッシュ可能である。

(4) 堆砂のフラッシュが困難な場合

今回の実験で、ゲート直下近傍の堆砂がフラッシュできなかったのは、ある流量（M砂：15 l/s，S砂：3 l/s，SS砂：2 l/s）以下の場合に、堆砂面凹凸の凸部（①当初から水路に敷き詰める砂礫面の一部を切り下げた場合の高位部、②当初は平らであるが、堆砂の一部のみが洗掘されて残された高位部、③粒径の大きいM砂の粒子の頭）にゲートの下面がつかえ、全流量が、ゲートと砂礫との隙間から、フラッシュに必要な流速以下で流下してしまう場合である。

順調にフラッシュできる場合と不能になる場合との境界の現象としては、いったんゲート下面が砂礫につかえた後、そのままおいてるとフラッシュできる場合がある。ゲートと砂礫が接触したためにゲート流出の流下断面が減少し、流量も減少するので、ゲート上流側にいったん貯留され、上流水位が上昇する。そのために、上下流の水位差が大きくなって、ゲートと砂礫面凹部との隙間を流下する流速が大きくなり、フラッシュ可能になる。ただし、この場合には、礫がゲート下面にぶつかりしながら流下することになる。

なお、淀川大堰のような河口に近い堰では、上流側に膨らんだシェル構造になっている場合が多いが、そのような場合にも、ほぼ類似の堆砂のフラッシュが可能である。

4. 実験結果と諸事例との比較

実験は、径間長の相対的に短いゲートを用い、通水流量を一定とした条件で実施したが、現実の取水堰での堆砂フラッシュ現象とフラッシュ実行時のトラブルを、定性的には再現することができた。

(1) 砂床河川の取水堰

実験によれば、ゲート直下周辺の堆砂をフラッシュするためのゲートの上下流の水位差は、砂床河川の場合は、河床材料最大粒径の10倍が必要である。砂床河川の取水堰では、排砂の対象となる砂礫粒子の最大粒径はせいぜい1cm程度であるので、洪水減水時のゲート閉鎖操作時に10cm以上の水位差が確保され続けられれば、自動的にフラッシュが可能になると思われる。淀川大堰での操作記録を見ると、制水ゲートを徐々に降下させ始めると、直ちに数10cm程度の水位差がつき始め、閉鎖操作中はそれ以上の水位差が維持されている。したがって、ゲート直下に3~4mもの堆砂があるのに、ゲートの降下につれて自然と堆砂がフラッシュされて再開鎖できたのであろう。

なお、制水ゲートに先行して左右兩岸の調節ゲートだけを閉鎖させていくさいには、上記のような大きな水位差はつかないので、ゲートの下面が堆砂面につかえて一時的に閉鎖できなくなったものと推察される。

(2) 礫床河川の取水堰

礫床河川の取水堰の場合には、実験によれば、河床材料最大粒径の5倍程度の水位差があれば、堆砂がフラッシュできると推定される。したがって、北空知頭首工では25cm、近文頭首工及び飯泉堰では50cm、赤川頭首工及び太田頭首工で1m程度の水位差が必要であらう。

一方、ゲート上下流で得られる水位差は、①ゲート上流側の水位が、計画取水位（ほぼゲート閉鎖時の天端高に等しい）に制限されるのに対し、②ゲート下流側の水位は「堆砂高+水深」であり、両者の差から求められる。つまり、ゲート高が高く、堆砂高が低いほど、より大きな水位差を得ることができる。（河川勾配が急だから、ゲート下流の水深は、下流からの背水の影響は受けず、ゲートを流下する流量に見合った水深になる。飯泉堰での観察によれば、ゲート下面につかえたりしながらようやくフラッシュできる状態のときの水深は、数10cm以下の小さい水深である。）

たとえば赤川頭首工では、上流側は、可動堰ゲートの数高から3.05mまで堰上げられるのに対し、下流側

は、1 m の堆砂高に水深 0.5m を加えても 1.5m 程度であり、1.5m 程度の水位差を得ることができるので、容易にフラッシュ可能である。だが、太田頭首工では、上流側の水位 2.35m（ゲート敷高から）に対し、下流側水位は、堆砂高 1.5m に水深 0.3m としても 1.8m にもなり、上下流の水位差は 75cm しか得られず、フラッシュは困難である。飯泉堰では、上流側水位がゲート敷高から 2.4m であるのに対し、下流側は、堆砂高 1.5m に水深 0.3m とすれば、ようやく 60cm の水位差が得られ、何とかフラッシュが可能になる。

北空知頭首工については、ゲート高が高くて上流水位を高くすることができる上、河床材料の粒径が小さい点からは、フラッシュしやすいはずであるが、堆砂高が高く堆砂範囲が広いので、ゲートが砂面につかえるような事態も発生したのであろう。逆に、近文頭首工では、ゲート高は低いにもかかわらず、堆砂高が低いので、比較的容易にフラッシュが可能であった。

5. まとめ

可動堰ゲート直下周辺の堆砂が、洪水の減水時にゲート下端からの流出流によってフラッシュされる現象について、取水堰 8 例の調査と再現実験が実施され、両者の比較検討から、堆砂フラッシュの進行状況とそのメカニズム、さらには、フラッシュ可能な基本的な限界条件が明らかになった。

(1) 洪水のさいに、かりに可動堰ゲート直下周辺に堆砂しても、洪水の減水時にゲートを閉鎖していくさいに、ゲートの上下流に、堆砂のフラッシュに必要な水位差が維持される場合には、堆砂はゲートの戸当たり部までフラッシュされ、ゲートの完全な再閉鎖が可能になる。

(2) 堆砂のフラッシュに要する水位差は、河床材料の粒径と密接な関係があり、礫床河川の取水堰では、最大粒径の 5 倍以上、砂床河川では 10 倍以上の水位差が必要である。

(3) 砂床河川の取水堰では、河床材料の最大径はせいぜい 1 cm 程度であるので、10 cm 以上の水位差が得られれば、堆砂のフラッシュは可能であり、ゲートの再閉鎖は容易である。ただし、一部のゲートを先行させて全閉までもっていく操作方法をとっている堰では、十分な水位差が得られないうちに、ゲートが降下してしまい、堆砂面に衝突して、片吊りやワイヤゆるみといったトラブルが発生する場合がある。全ゲートの開度をそろえながら徐々に閉鎖していけば、そのようなトラブルは回避され、支障なく堆砂のフラッシュは可能である。したがって、砂床河川の取水堰では、堆砂後に、この方法で除去可能である。

(4) 礫床河川の取水堰では、堆砂のフラッシュのためには、ゲートの上下流水位差として数 10 cm 以上の水位差を必要とする場合が多い。堰上下流部の堆砂は、ゲート下流の水位を高くしてしまうのに加えて、上流側水位は、計画取水位以上には上げられないから、十分な水位差が得られない場合も多い。複雑なゲート操作によって、辛うじて排砂できる場合もあるが、排砂操作を実行するさいに、ゲート下面に石礫がつかえたり、ぶつかりながら流下したりするので、ゲートを傷付け塗装をはがすといったトラブルが起りやすい。私見では、礫床河川の堰では、この方法に頼ることなく、すでに提案³⁾した堰の上下流区間の河床掘削によって対応し、ゲート直下付近の堆砂を防止・軽減することが重要である。

本研究を進めるにあたって、自由学園最高学部・木下良作博士から数々の貴重な御示唆を頂戴した。岩手大学農学部・岡本雅美教授からは多くのご助言を頂いた。飯泉取水堰を始めとする諸堰の関係者には、貴重な資料を多数提供して頂いた上、種々ご指導・ご配慮を頂いた。調査にあたって、資料収集などでいろいろとお世話下さった方も多い。また実験にあたっては、岩手大学農学部農業水利研究室の専攻生（1988、1989 年度）の協力を得た。本研究の費用の一部は、文部省科学研究費補助金・総合研究 A「水利施設管理の水理学的研究」（代表・三重大学 松下玄教授）の補助を得ている。以上、記して改めてお礼申し上げる。

〔参考文献〕

- 1) 三輪 式：将来計画河床高に敷高を合わせた取水堰の堆砂問題、第31回水理講演会論文集、1987。
- 2) 三輪 式：可動堰のゲート流出による堆砂フラッシュの実験的検討、東北地域災害科学研究25、1989。
- 3) 三輪 式：模型実験による岡島頭首工上下流の河床掘削計画の検討、第33回水理講演会論文集、1989。