

連続した出水時の発電所土砂流入現象の再現と 出水履歴に関する考察

REPRODUCING OF SEDIMENTATION IN RUN-OFF-RIVER HYDRO POWER
PLANT AT CONTINUOUS FLOODS AND THE EXAMINATION OF HISTORY OF
FLOODS AND SEDIMENT RUNOFF

河内友一¹・細田尚²・大久保賢治³

Yuichi KOUCHI, Takashi HOSODA and Kenji OKUBO

¹正会員 工修 中国電力株式会社エネルギー総合研究所 (〒739-0046 東広島市鏡山3-9-1)

²正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-3号棟)

³正会員 工博 岡山大学大学院環境学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

Because the intake of the run-off-river hydro power plant faces the river, sediment in the riverbed flows in the waterway through intake when the flood occurs. Five floods by the typhoon occurred continuously on August - October, 2004 in the watershed of power plant in the Okayama prefecture. A large amount of sand flowed in the power plant due to this five floods. This phenomenon was reproduced by 1D and the 2D plane model, the numerical results was roughly corresponding to the experiment result. Furthermore, we examined the sedimentation process in the condition of changing the history of these five floods.

Key Words : Run-off-river hydro power plant, sediment runoff, graded sediment

1. はじめに

温室効果ガス削減への関心の高まりや原油価格の高騰を背景として、化石燃料を使用しない水力発電所はその重要性を大きく増している。しかし、水力発電所では発電用水として取水する河川水中の土砂に起因した運転制約が生じることがある。既設水力発電所の有する利点を充分に発揮させるためには、この問題を解決し発電量を増加させることが重要である。発電所土砂流入対策を検討するためには現象を時系列で再現するモデルの構築が求められる。流域規模の土砂生産については既に、砂田ら¹⁾、守利ら²⁾、舩屋ら³⁾、橋本ら⁴⁾など多くの研究が実施されており、高橋ら⁵⁾は土砂生産から貯水池の長期の堆積土砂量を予測している。しかし、これまでの研究では、流域からの土砂が流込み式水力発電所に流入する現象を検討した例は少ない。河川では出水によって上流域で生産された土砂が河道に供給され下流へと運搬される。その過程において、粒度分布や河床高といった状態は常に変動している。出水が生じた後、河床が細粒化する場合や、逆に粗粒化する場合があり、1出水時の発電所土砂流入量を予測するためには、それ以前の出水によって形

成された河床状態を考慮する必要がある。同じ規模の出水でも河床状態に応じて発電所の土砂流入量が変化するため、これを考慮しないで流入量を予測した場合には、流入量を過大評価して取水停止期間を必要以上に長くすることや、逆に過小評価して大量の土砂が流入し長期間の発電停止を要する懸念がある。したがって、合理的な水力発電所の運転判断には河床状態の変化を考慮した予測手法の開発が望ましい。

そこで、本研究ではその予測手法の開発を目的として、平成16年に連続して発生した台風出水とそのときの発電所土砂流入量について、1次元および平面2次元解析により再現し、その現象の特性を把握した。また、この再現モデルを用いて出水履歴と上流域からの流出土砂量の関係について検討を加えた。

2. 対象とした水力発電所と平成16年の出水

(1) 対象とした水力発電所

今回の研究対象とした水力発電所は岡山県に位置する最大取水量13.5m³/sの流込み式水力発電所であり、吉井

川の上流域に位置している。この水力発電所の取水口は図-1 に示すとおり幅30m程度の河川湾曲部の内岸側に位置し、排砂門は右岸側に設けられている。このように、この発電所は湾曲部内岸側に堆積した土砂が取水口内に流入しやすい平面レイアウトとなっている。

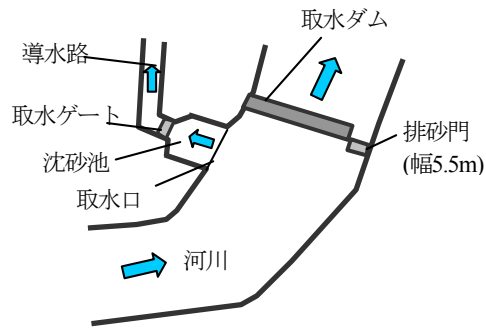


図-1 対象とした水力発電所の取水口付近概要図

(2) 平成16年の出水と土砂流入状況

平成16年の8月から10月にかけて、連続的に台風が上陸しそれぞれの台風による降雨でこの発電所の流域において5回の出水が発生した。各出水時の降雨の発生時期、継続時間と累計、最大降雨量は表-1 のとおりである。

表-1 平成16年8月～10月に発電所流域に上陸した台風と雨量

	発生 時期	継続 時間 (hr)	雨量観測所(St.1)		雨量観測所 (St.2)	
			累計 雨量 (mm)	最大時 間雨量 (mm)	累計 雨量 (mm)	最大時 間雨量 (mm)
台風11号	8/5	6	73	31	70	35
台風16号	8/30	19	169	43	118	32
台風18号	9/7	4	69	32	37	20
台風21号	9/29	31	182	22	115	17
台風23号	10/20	29	209	22	105	8

8月と9月上旬に発生した台風11号、16号および18号による降雨は最大時間雨量30mmを超えるものであった。一方、9月下旬と10月下旬に発生した台風21号、23号による降雨は、最大時間雨量はそれまでの3回の降雨と比較して約20mmと小さいが、継続時間は約30時間と長い。台風23号の累計雨量はこの5回の出水で最大であった。

台風11号から21号による出水が発生した後、この発電所では10月上旬に一度発電取水を停止し、取水口前面、沈砂池内および導水路内の土砂を取り除いた。このときの沈砂池内の堆積土砂量は406m³、導水路内の堆積土砂量は45m³、合計451m³であった。その後運転を再開したが、10月下旬に台風23号が上陸し、再び大量の土砂が流入した。出水後11月に土砂取除きを実施したが、このときの沈砂池内堆積土砂量は515m³、導水路内の堆積土砂量は28m³、合計543m³であった。以下ではこの5回の出水による発電所への土砂流入現象の再現を試みる。

3. 再現モデル

この水力発電所の土砂流入現象を再現するためのモデルは上流域モデルと取水口周辺モデルの2つを組み合わせたものとした。今回の再現計算に使用した式とモデルの一覧を表-2 に示す。上流域モデルでは山地斜面から河道へ水と土砂が流出するものとし、この流出量から上流域河道内の流れと土砂流出を開水路1次元計算により再現した。上流域の水の流出量については、数ヶ月単位の流出を評価するために出水時と通常時の状態を同時に評価できる永井ら⁶⁾による長短期流出両用タンクモデルを用いた。本研究では各支川からの流入量を評価する必要があるため、

表-2 再現モデルに使用したモデル・式

領域	項目	使用したモデル・式
上流域モデル	山地斜面の流出量（水）	長短期併用4段タンクモデル ⁶⁾
	山地斜面からの土砂流出量	各斜面からの流量の2乗に比例（ $Q_s = \alpha Q^2$ ） $\alpha = 0.00493$
	河道の流れ	開水路1次元非定常流（移流項TVD-MUSCL） ⁷⁾
	掃流砂量（混合砂礫）	芦田・道上式
	限界掃流利（混合砂礫）	Egiazaroff・浅田式 ⁸⁾
	浮遊砂（混合砂礫）	1次元連続式（移流項TVD-MUSCL） ⁷⁾
	浮遊砂浮上量（混合砂礫）	芦田・藤田式 ¹⁰⁾ （平均粒径で礫頂から浮上面の距離を評価） ⁹⁾
	河床交換層	平野の式
取水口周辺モデル	流れ	一般曲線座標系平面2次元非定常流 ¹¹⁾ （移流項TVD-MUSCL） ⁷⁾
	掃流砂量（混合砂礫）	芦田・道上式
	限界掃流利（混合砂礫）	Egiazaroff・浅田式 ⁸⁾
	浮遊砂（混合砂礫）	一般曲線座標系平面2次元連続式（移流項TVD-MUSCL） ⁷⁾
	浮遊砂浮上量（混合砂礫）	芦田・藤田式 ¹⁰⁾ （平均粒径で礫頂から浮上面の距離を評価） ⁹⁾
	河床交換層	平野の式
	安息角を越えた場合の処理	隣接する最急勾配の格子への強制的な土砂移動

全流域を60分割した各斜面ごとにタンクモデルを設定した。雨量についてはピーク時刻の再現性を高めるために10分雨量を用いた。斜面からの土砂生産については、各斜面から流量の2乗に係数を乗じた値が供給されるとした。水力発電所取水口付近河道の再現については、湾曲の影響や排砂門による排砂現象を再現するためには平面的な流れ・移動砂現象を再現する必要があることから、平面2次元解析モデルを採用した。上流域モデル(河道内)と取水口付近モデルの両方で混合砂礫の浮遊砂・掃流砂による河床変動および河床の交換層内の粒度の変化を計算した。

4. 計算条件

連続した出水時の計算を実施する上では河床の初期状態の設定を適切に行う必要がある。しかし、厳密な設定には詳細な河床材料の調査や測量が必要であり、実用的でない。そこで、ここでは以下の方法で初期の河床状態を設定した。はじめに、河床高は1/25000地形図から読み取った河床高を、河床材料は現地調査15点の平均を設定した。しかし、この河床高は数10mピッチに読み取った値であるため、実際の河床勾配と異なり折れ線状である。また、実際の河床材料は縦断方向分布が存在しており、全河川で一定の河床材料とするのは実際と大きく異なっている。試みにこの状態を初期条件として計算したところ、浮遊砂濃度が大きく実測値よりもかなり多い土砂流入量の結果が得られた。そこで、以下の方法で初期河床状態を設定した。清水¹²⁾は、出水の規模により定常状態の粒径分布が異なることを指摘している。そこで小規模の出水と大規模の出水の2種類を設定した。台風11号の出水は1年に1回、台風16号の出水は10年に1回発生する規模程度であったことから、前述の初期状態から計算を開始し台風16号の出水1回、台風11号の出水9回を1周期として、この周期を5回繰り返した。このとき、山地からの土砂生産は各斜面から流量の2乗に係数を乗じた値が供給されるとし、係数は台風11号の出水で芦田¹³⁾による中国地方の年間比流出土砂量の半分(15m³/km²/年)が山地斜面から河床に供給されるように設定した。

このときの発電所地点の掃流砂量、浮遊砂量の時系列結果を図-2に示す。50回の出水を与えることで掃流砂量、浮遊砂量がほぼ周期的に変化し、30回与えた程度で概ね定常状態に達している。また、本川の50回後の初期河床からの河床変動量は最大で1.5m程度であり、大きな河床変動は生じていなかった。

以上より、少なくとも地形図から読み取った河床高に均一な河床材料を敷き詰めた場合より、自然な河床状態が初期状態として設定されたと考えられる。以下の計算ではこの状態を初期状態として計算を実施した。その他の計算条件については表-3に示すとおりである。

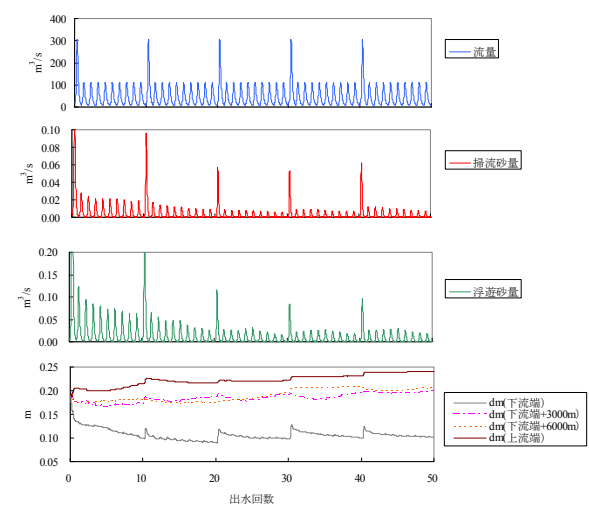


図-2 50回の出水を与えたときの発電所地点の掃流砂量、浮遊砂量および本川河床の平均粒径の変化（初期状態の設定）

表-3 計算条件一覧

河床	粒径	0.5mm～512mm（粒径階6分割）
	交換層	0.4m(90%粒径程度)
上流域モデル	流域面積	124.4km ²
	流域分割数	60
	河川数	本川11本、支川16本
	河川断面	矩形
	粗度係数	0.05～0.06 m ^{-1/3} s (Brayの式より評価)
	河川幅	流域面積の関数
	計算格子間隔	50m
取水口周辺モデル	合流点	強制横流入
	再現範囲	取水口上流200m～ダム下流200m
	粗度係数	0.047（Brayの式より評価）
	排砂門	台形せきでモデル化

5. 再現計算結果

(1) 上流域モデルと取水口周辺モデルの計算結果

上流域モデルによる各出水における流水の流出量の計算結果と実測結果および発電所上流200m地点の浮遊砂・掃流砂の流出量の計算結果を図-3に示す。流量は概ね観測された流量を再現できている。掃流砂量と浮遊砂量はそれぞれ幅と流量を乗じて単位時間当たりの発電所上流河道への流入体積として示している。図-3に各出水時の発電所の取水量および排砂門開度の実績をあわせて示す。30m³/s程度で排砂門が開き始め、その後ピーク前後で土砂流入防止のための取水停止が行われた。その後、流量が低減した後しばらくしてから運転を再開している。ただし、台風21号では2山のピークがあったため、後半のピークでは取水を継続していた。取水口付近の平面2次元計算ではこれらの上流域モデルによる流量、

掃流砂量、浮遊砂量を上流端境界条件として、実績の取水および排砂門開度を計算条件として与えた。

取水口周辺モデルによる台風11号から21号までの累積の土砂流入量は854m³と実測値451m³に対して大きく、台風23号による土砂流入量の計算結果は329m³と実測値543m³に対して小さい値であった。台風11号から23号までは16号のようにピーク流量300m³/sを超える出水や21号のように出水中長期間取水を継続した出水があったにも関わらず、実測した累積の土砂流入量は台風23号出水1回の量よりも小さい。これは斜面からの土砂流入を流量にのみ依存するモデルとしたことによると考えられる。宮縁ら¹⁴⁾は2005年の台風14号豪雨による森林試験地における土砂流出の大部分が過去の崩壊により生産された土砂であることを指摘しているが、この流域でも台風11号から21号の出水で生産された土砂が斜面に貯留され、23号の出水で一度に流出してきた可能性がある。そこで、これらの現象を再現できるように以下の改良を試みる。

(2) 山地斜面の土砂生産モデルについて

山地斜面の土砂生産については様々なモデルが提案されているが、この発電所の流域のように裸地の少ない森林斜面における土砂生産量を物理モデルによって正確に予測するのは難しく、ここでは実用性を考慮してパラメータによる同定が可能な概念モデルによる改良を試みる。高橋ら¹⁵⁾は、タンクモデルの貯留高さによって斜面

崩壊のリスク評価を実施している。そこで、本研究では上段タンクの水位がある一定以上の時には地下水位が高く斜面や側岸からの崩壊による土砂供給が行われると考え、この量を式(1)で評価する。

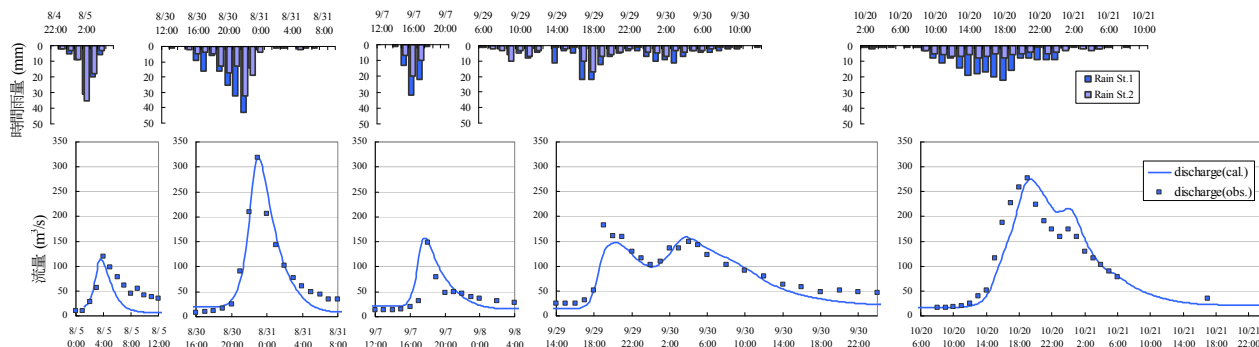
$$Q_{s1} = \begin{cases} \beta_1 & H_1 > H_c \\ 0 & H_1 \leq H_c \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 Q_{s1} :土砂生産量、 H_1 :上段タンクの水位、 H_c :崩壊が始まる上段タンクの水位でここでは3mmとした。

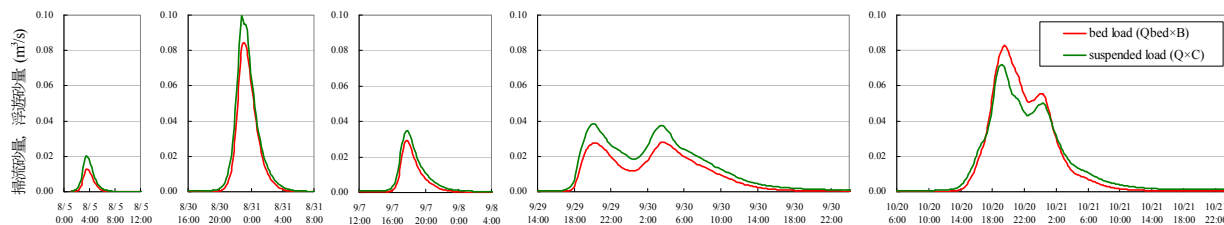
β_1 は生産土砂の多さを示すパラメータである。斜面の土砂は表面流などによって運搬されるが、蓄積されている崩壊土砂量に応じて河川への供給量が変化すると考え、河川への供給土砂量は式(2)で評価した。

$$Q_{s2} = \frac{\beta_2 h_s}{A} Q^2 \quad (2)$$

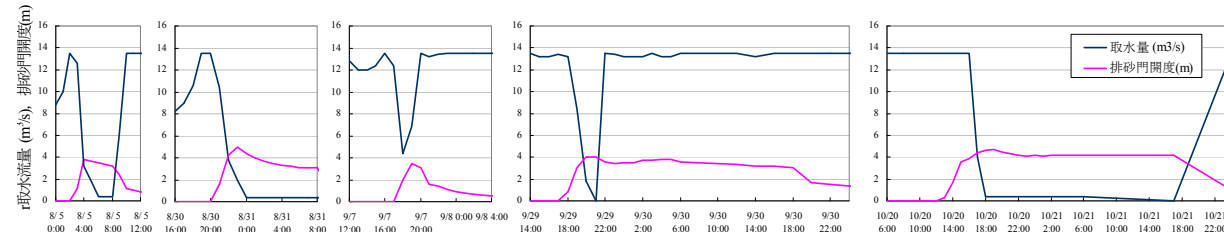
ここに、 Q_{s2} :河道への土砂供給量、 h_s :斜面における土砂の堆積量で、 Q_{s1} と Q_{s2} の収支から計算される。 A :斜面の面積、 Q :斜面からの流出量、 β_2 は流出しやすさのパラメータである。このモデルの概念図を図-4に示す。式(1),(2)のパラメータとして $\beta_1=4.0$ $\beta_2=2.5$ と $\beta_1=1.0$ $\beta_2=5.0$ の2ケースを実施した。このモデルを上流域モデルに加えたときの発電所土砂流入量を表-4に示す。斜面への貯留効果を考慮したモデルの台風11号～21号までの土砂流入量は、改良前のものと比較して実測値に近い値であった。斜面への土砂貯留効果を考慮したモデ



(a) 各出水の雨量と流量時系列の上流域モデルによる計算結果と実測結果の比較



(b) 上流域モデルによる各出水における発電所上流200m地点の掃流砂量・浮遊砂量時系列計算結果



(c) 各出水における発電所取水および排砂門開度（実績）

図-3 上流域モデルの計算結果と発電所の運転実績

崩壊等による土砂生産

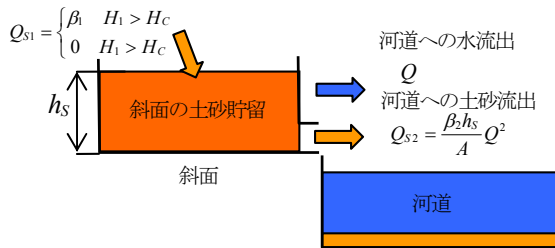


図-4 斜面における土砂の貯留を考慮したモデル

表-4 各モデルの発電所土砂流入量と実測値の比較

河道への 土砂供給	$Q_{s2} = \alpha Q^2$	式(1),(2) $\beta_1 = 4.0$ $\beta_2 = 2.5$	式(1),(2) $\beta_1 = 1.0$ $\beta_2 = 5.0$
台風11号 (計算)	1	1	1
台風16号 (計算)	79	73	72
台風18号 (計算)	196	186	181
台風21号 (計算)	578	551	519
合計(T11~21) (計算)	854	811	773
実測値(T11~21)	451		
台風23号 (計算)	329	323	321
実測値(T23)	543		

ル $\beta_1 = 4.0$, $\beta_2 = 2.5$ の場合の取水口付近モデルの計算結果から各出水後の河床高コンターを図-5 に示す. 台風11号ではほとんど河床変動が生じていないが, 16号ではピーク流量が $300\text{m}^3/\text{s}$ を超える大きな出水であったため, 取水口前面まで土砂が堆積している. その後18号, 21号の出水では大きな河床変動は生じないが16号による取水口前面の堆積により土砂が直接取水口内に流入している. 23号の出水ではピーク流量が約 $280\text{m}^3/\text{s}$ で, その継続時間も長いので取水ダム上流がほぼ満砂状態に達し, その後沈砂池内に土砂が流入している.

(3) 解析結果の検証と考察

土砂生産モデルの改良によりやや改善されたものの, 台風11号~21号における土砂流入量計算結果は 773m^3 と実測値 451m^3 の1.7倍であった. 試みに山地斜面からの土砂供給量を0とした条件の計算を実施したところ, 700m^3 程度の土砂流入量であったことから, 計算結果が実測値よりも大きくなるのは上流域モデルの初期河床状態の設定に問題があると考えられる. この流域では春期に雪解けにより規模の小さい出水が発生するため, この出水を考慮して初期条件を設定することで計算結果の改善が期待される. 一方, 台風23号出水による土砂流入量計算結果は 321m^3 と実測値 543m^3 の0.6倍であった. 23号出水後の取水口前面河床高について計算結果と実測値を比較すると図-6 のとおりである. 河床高は概ね再現できているが, 計算結果は左岸(取水口)側の堆積が過大である. このことから, 実際には左岸に堆積した土砂が出水後の取水再開時に取水口に流入したことが推察され, この現

象を2次元解析で再現できていないことが, 実測値と計算結果の差の原因と考えられる. 取水再開時のような水深が小さく流速が早い状態の平面2次元の河床変動解析の計算精度を高める必要があり, 今後の課題としたい.

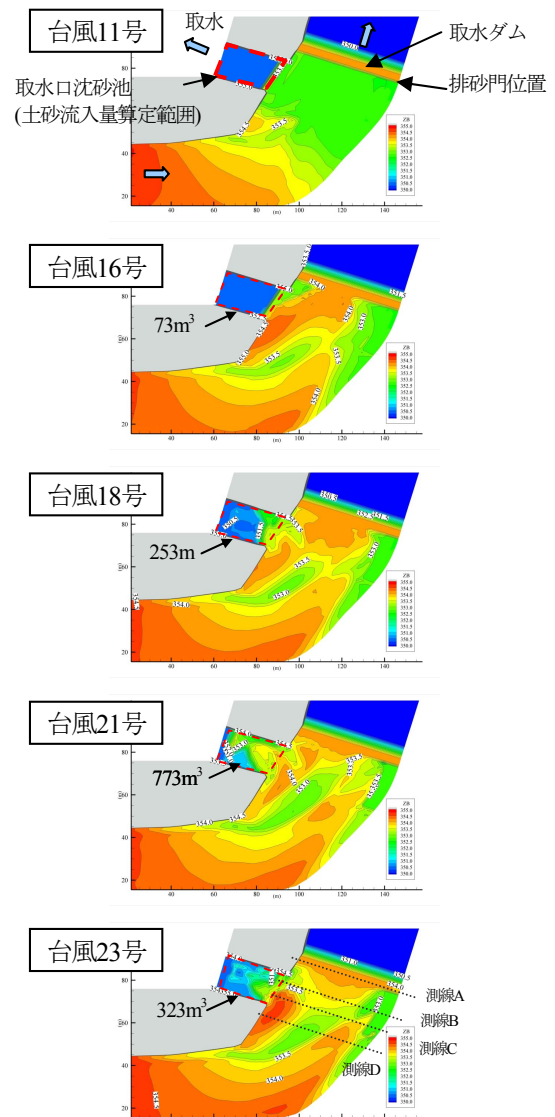


図-5 各出水後取水口周辺モデル計算結果 (河床高コンター)

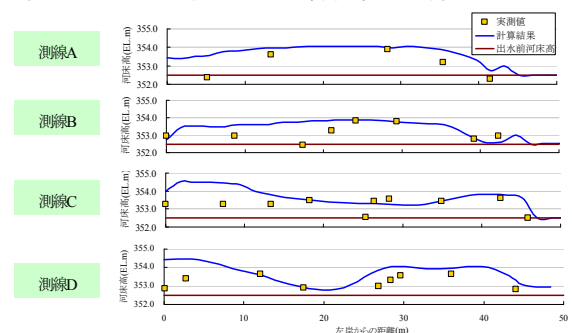


図-6 台風23号出水後取水口前面河床高 (計算と実測)

6. 出水履歴と上流域からの流出土砂量

各出水の履歴と上流域からの流出土砂量の関係を把握

するために、5出水の順序を変えた条件で上流域モデルによる計算を実施した。対象とする出水は台風16号、21号および23号の出水で、実際の発生順序と、順番を変更した条件で計算を実施した。このときの各出水における上流域モデルによる流域からの流出土砂量を比較すると表-5のとおりであった。出水履歴の違いによる各出水の上流域からの流出土砂量の変化は最大で15%程度であり、それほど大きい変化は認められなかった。

表-5 出水履歴と上流域からの流出土砂量

台風 16 号	出水 履歴	T11⇒T16⇒T18 ⇒T21⇒T23	T11⇒T18⇒T21 ⇒T16⇒T23	T11⇒T18⇒T23 ⇒T21⇒T16
	流出土砂量	1,776	1,912(1.08)	2,037(1.15)
台風 21 号	出水 履歴	T21⇒T11⇒T16 ⇒T18⇒T23	T11⇒T16⇒T18 ⇒T21⇒T23	T11⇒T16⇒T18 ⇒T23⇒T21
	流出土砂量	2,277(0.94)	2,419	2,415(1.00)
台風 23 号	出水 履歴	T23⇒T11⇒T16 ⇒T18⇒T21	T11⇒T16⇒T23 ⇒T18⇒T21	T11⇒T16⇒T18 ⇒T21⇒T23
	流出土砂量	4,398(0.93)	4,572(0.97)	4,706

流出土砂量は km^3 括弧内は実際の履歴の値との比

図-7 に23号の出水履歴を変えた場合の浮遊砂濃度ヒステリシスの変化を示す。同じ出水でも出水順序によって反時計回りと時計回りの異なるヒステリシスを示している。解析結果から履歴を変更した場合のそれぞれの23号出水前の交換層内における8mm以下の粒径の割合は23号が1番目に発生した場合の河床よりも5番目に発生した場合の河床の方が約15%少なかった。すなわち、出水履歴によって出水前の河床に含まれる浮遊砂になりやすい粒径の総量に差があり、これがヒステリシスの変化の一因と考えられる。河床条件によっては出水ピークを過ぎた後も浮遊砂濃度が高い状態で保たれる場合が考えられるため、台風23号のように継続時間が長い出水のピークを過ぎた後の発電取水再開には、これらのヒステリシスの変化を考慮する必要があると考えられる。

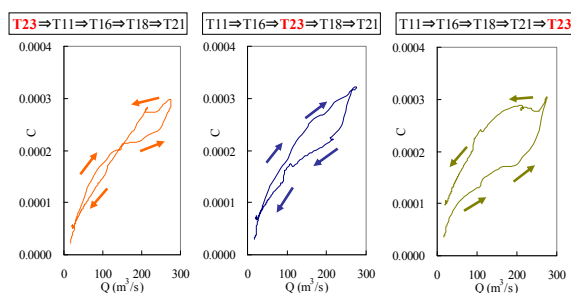


図-7 出水履歴の違いによる浮遊砂濃度ヒステリシスの変化

7. おわりに

本研究では、平成16年に発生した連続的な台風による5回の出水時における流込み式発電所の土砂流入現象の再現を実施し、その精度を検証して今後の課題をあきら

かにした。さらに、そのモデルにより出水履歴の影響について検討したところ、上流域からの流出土砂量には大きな違いがないが、履歴によって浮遊砂濃度ヒステリシスが時計回りと反時計回りの両方を示す結果が得られた。

今回の再現モデルは計算時間を要するため、実際の出水時には発電所の取水停止・再開の判断に用いる簡易モデルが必要である。今回の解析結果から、簡易モデルの作成にあたっては、それ以前の出水による取水口前面堆積状況と浮遊砂濃度ヒステリシスの変化を考慮することが望ましいといえる。今後、解析の精度向上を試みるとともに、出水時に取水停止・再開の判断に用いることができる簡易モデルを構築したい。

参考文献

- 1) 砂田憲吾, 長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp.37-44, 1994.
- 2) 守利悟朗, 椎葉充葉, 堀 智晴, 市川 温: 流域規模での水・土砂動態のモデル化および実流域への適用, 水工学論文集, 第47巻, pp.733-738, 2003.
- 3) 舩屋繁和, 清水康行, ウォンサ サニット, 村上泰啓: 流域規模での洪水流出および土砂流出特性について, 水工学論文集, 第50巻, pp.319-324, 2006.
- 4) 橋本晴行, 朴埵燦, 高岡広樹, 荒渡光貴: 山地流域における豪雨時の水と土砂の流出解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.745-750, 2003.
- 5) 高橋 保, 井上素行, 中川 一, 里深好文: 山岳流域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測, 水工学論文集, 第52巻, pp.613-618, 2001.
- 6) 永井明博: 長短期流出両用モデルの標準的定数について, 農業土木学会論文集, No.180, pp.59-64, 1995.
- 7) 細田尚, 長田信寿, 村本嘉雄: 移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集, No.533, PP.267-272, 1996.
- 8) 浅田宏: 山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究, 電力中央研究所報告, 総合報告 No2, 1976.
- 9) 河内友一, 細田尚, 大久保賢治: 上流域河道内からの土砂流出を考慮した流込み式水力発電所土砂流入現象の再現, 水工学論文集, 第52巻, pp.745-750, 2008.
- 10) 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.
- 11) 長田信寿: 一般曲線座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値計算, 水工学における計算機利用の講演会講義集, 土木学会, pp.45-72, 1999.
- 12) 清水康行: 沖積河川の縦断形と河床材料分布形の形成について, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.69-78, 1995.
- 13) 芦田和男・奥村武信: ダム堆砂に関する研究, 京大防災研究所年報, 第17号B, pp.555-570, 1974.
- 14) 宮縁育夫, 玉井幸治, 小川泰浩, 清水貴範: 九州南部の森林流域における2005年台風14号豪雨による出水と土砂流出, 地形, 第28巻第2号, pp.127-142, 2007.
- 15) 高橋健二, 大津宏康, 大西有三: タンクモデル法を用いた地下水位変動挙動を考慮した斜面リスク評価の研究, 土と基礎, Vol.51, No.10, pp.15-17, 2003.

(2008.9.30受付)