

流込み式水力発電所における出水時の土砂流入量予測モデルの構築について

STUDY ON REAL-TIME FORECAST OF SEDIMENTATION IN RUN-OFF-RIVER HYDRO POWER PLANT

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 岡山市北区津島中 3-1-1)

Because the intakes of the run-off-river hydro power plants faces rivers, sediment in the riverbed flows in the waterway through the intakes when floods occurs. We developed a model to forecast sedimentation in the run-off-river hydro power plants. By this model, operators in the power plant can judge the stop of the water-intake to make damage with sedimentation a minimum.

This model is composed of three parts, the forecast of river discharge at the river by tank model, the forecast of total load at the river in front of the intake and the forecast of the ratio of sedimentation to total load in the river. Each model was constructed with results of 1-D and 2-D numerical analyses. We reproduced sedimentation of a hydraulic power plant in Okayama Prefecture from 2003 to 2008 by this model and compared the result with the observation data. This comparison showed that this model was able to reproduce the sedimentation process in this run-off-river hydro power plant.

Key Words : *Run-off-river hydro power plant, sediment runoff, sedimentation, real-time simulation, tank model*

1. はじめに

流込み式水力発電所は比較的低い取水ダムにより流水を取水する構造であり、出水時には流水中の土砂が取水口から導水路へ流入する。この対策として取水口付近に排砂設備・沈砂池等が設けられているが、一部の発電所では出水時に処理能力を超えた土砂が流入し発電に支障が生じることがある。大規模な対策設備の新設・改修を伴わない土砂流入対策として、出水時に取水停止する方法がある。しかし、取水停止が早すぎると本来得られていたはずの発電量を損失し、遅すぎると取水口から大量の土砂が流入するため、適切な取水停止の判断が求められる。

これまでの研究で、筆者らは岡山県北部の流込み式水力発電所を対象として出水中の土砂流入現象の数値解析を実施した¹⁾。上流域河道を1次元、発電所取水口付近を平面2次元でモデル化し過去の出水時の土砂流入現象を再現した。この数値解析をもとに、本研究では、実際の出水中に設備管理箇所が取水継続・停止・再開の判断を

することが可能となる計算負荷の少ない実時間土砂流入量予測モデルを構築した。

このモデルの予測手法は以下のとおりである。まず、現在の上流域雨量観測所の時間雨量を入力条件とし、長短期併用タンクモデルで1時間後の取水口地点の河川流量を予測する。つぎにこの河川流量から取水口地点の全流砂量を予測する。この取水口地点の河川流量と全流砂量との関係は、上記の上流域河道の1次元数値解析による再現結果から求めた。最後に、全流砂量のうち取水口へ土砂が流入する割合を求め、1時間後の取水口土砂流入量を予測する。この全流砂量のうち取水口へ流入する割合は、現在の取水口前面河道の累積堆積土砂量と河川流量から評価する。累積堆積土砂量、河川流量と取水口流入割合との関係は様々な流量条件で実施した取水口付近の平面2次元解析から求めた。このモデルを用いた土砂流入量の計算結果を2003年から2008年までの6年間の実測値と比較したところ、概ね良好な再現結果が得られていることが確認できた。この予測モデルにより、流込み式水力発電所における出水時の取水継続・停止・再開の適切な判断が可能となることが期待される。

2. 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。

この発電所では2004年に連続して発生した出水により累計で約1000m³の土砂が流入したため、数日にわたって発電を停止し取水口および導水路内の土砂を取り除いた。この発電所では土砂流入が維持管理上の課題となっており、出水中に適切な取水停止・継続・再開の判断が可能となれば維持管理費用の低減や発電電力量の増加が期待できる。

3. 予測モデルの内容

発電所土砂流入量予測モデルは、①上流域雨量を入力条件とした河川流量予測、②取水口前面河道の全流砂量の予測、③取水口への土砂流入量予測の3つの部分で構成する。以下にそれぞれについて述べる。

(1) 上流域雨量を入力条件とした河川流量予測

流域からの流出量予測手法は、通常時には日雨量、出水時には時間雨量を入力条件とすることができ、計算負荷が小さい長短期併用のタンクモデルを用いることとした。なお、タンクモデルのモデル定数は永井²⁾による吉井川の標準値を用いた。この長短期併用タンクモデルによる2004年の連続的に発生した台風出水時を対象とした計算結果を実測値と比較したところ、1時間の遅れ時間を考慮すると取水口地点における流量ピーク時刻の再現性が高いことがあきらかとなった。これは式(1)に示す長短期併用タンクモデルの遅れ時間の推定式³⁾に対象流域の流域面積を入力した値とほぼ同じである。

$$t = 0.09\sqrt{A} \quad (1)$$

ここに、 t ：遅れ時間(hour)、 A ：流域面積(km²)。そこで、ここでは遅れ時間として1時間を採用する。この遅れ時間を考慮することで現在時刻の時間雨量から1時間後の取水口地点の流量を予測することができる。以上のモデルにより、2004年8月から11月を対象として時間雨量を入力条件とした流出解析を実施した。この結果、河川流量の計算値と実測値との相対誤差は平均で41.7%であった。この流量の予測精度を向上させるために、永井⁴⁾が示した最上段のタンク水深を状態変数とし、現在時刻観測流量から1ステップ前のタンク水深を逆算して

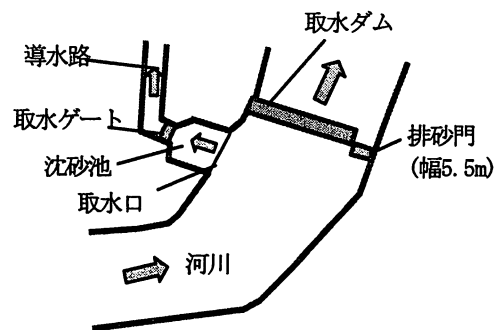


図-1 対象とした水力発電所の取水口付近概要図

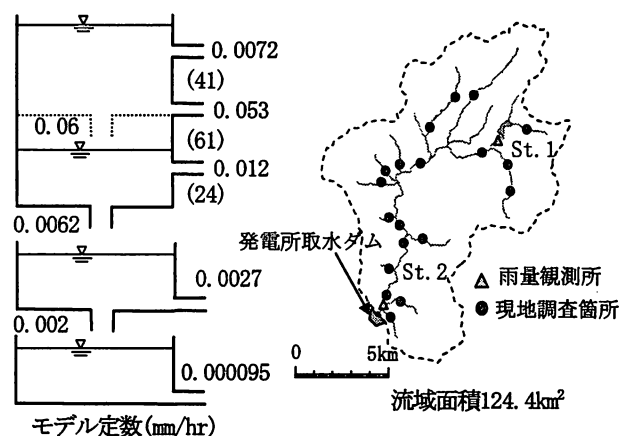


図-2 長短期併用タンクモデルと対象流域

修正していく逆算推定法を用いることとした。実際の発電所取水口地点ではダム水位を継続的に計測しており、この水位から現時点の流量を計算することは容易である。この逆算推定法を用いることで、前述の相対誤差は23.9%まで低減された。モデル定数を最適化することでさらなる精度向上は期待できるが、ひとまず本研究では、上流域雨量を入力条件とした実時間流出予測計算として、吉井川の標準定数を用いた長短期流出タンクモデルを採用し、逆算推定法により精度を向上させることとした。

(2) 取水口前面河道の全流砂量の予測

上流域からの流水により山地斜面や河道内の土砂は取水口地点まで輸送される。取水口前面河道の流量と輸送されてくる土砂量との関係があきらかであれば、河川流量から全流砂を予測することができる。ここでは、上流域河道網を1次元河道で構成した解析モデル（以下上流域モデルと呼ぶ）の数値解析結果からこの関係を求めることとした。この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、全流域を60分割したサブ流域ごとに長短期流出両用タンクモデルを用いて計算した。河道内では浮遊砂・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。計算の詳細については参考文献¹⁾を参照されたい。山地斜面か

表-1 上流域モデルにおける斜面の土砂生産量

	年1回規模出水時（ピーク流量100m³/s）における斜面の土砂生産量
ケース1	15.0m³/km²
ケース2	7.5m³/km²
ケース3	3.0m³/km²

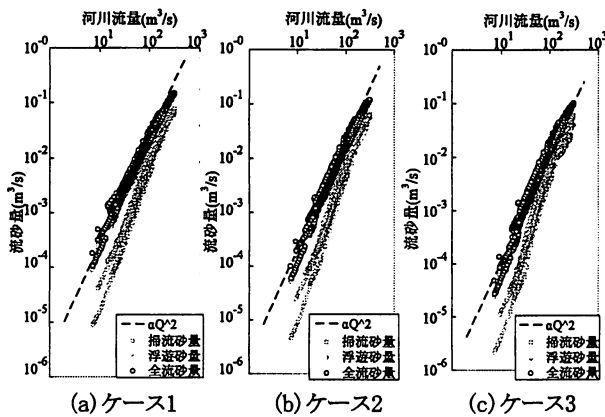


図-3 上流域モデルによる取水口地点の河川流量と流砂量関係

らの土砂生産量は芦田⁹⁾による中国地方の年間比流出土砂量(30m³/km²/年)を参考として、年1回規模程度の出水（ピーク流量100m³/s時）で流域全体の斜面の土砂生産量が表-1の3ケースとなるように設定し各斜面ごとに与えた。この解析手法を用いて2004年の連続的な出水の発生時（8月～11月）の雨量を与えたときの各ケースの取水口地点における流量－掃流砂量・浮遊砂量および全流砂量の関係を図-3に示す。斜面の土砂生産量によって値は異なるが、全流砂量は概ね取水口地点の河川流量の2乗に比例している。そこで、簡単のために取水口地点の河川流量と全流砂量の関係を式(2)であらわし、その量を決定する比例係数 α は後ほど述べる土砂流入量の実測値の再現性が良い値を試行錯誤的に求めることとした。

$$V_{TL} = \alpha Q^2 \quad (2)$$

ここに、 V_{TL} ：取水口地点全流砂量(m³/s)、 α ：比例係数、 Q ：取水口地点河川流量(m³/s)である。

(3) 取水口への土砂流入量予測

以上で求められた上流域から取水口地点の河道まで輸送されてきた全流砂量（掃流砂・浮遊砂）は、①取水口への流入、②取水口前面河道への堆積、③取水ダム下流への流下の3つに配分される。図-4に解析の初期河床と各変数の意味を示す。式で示すと式(3)のとおりである。

$$V_{in} = \phi_{in} V_{TL}, V_{dp} = \phi_{dp} V_{TL}, V_{dwn} = \phi_{dwn} V_{TL} \quad (3)$$

$$\phi_{in} + \phi_{dp} + \phi_{dwn} = 1$$

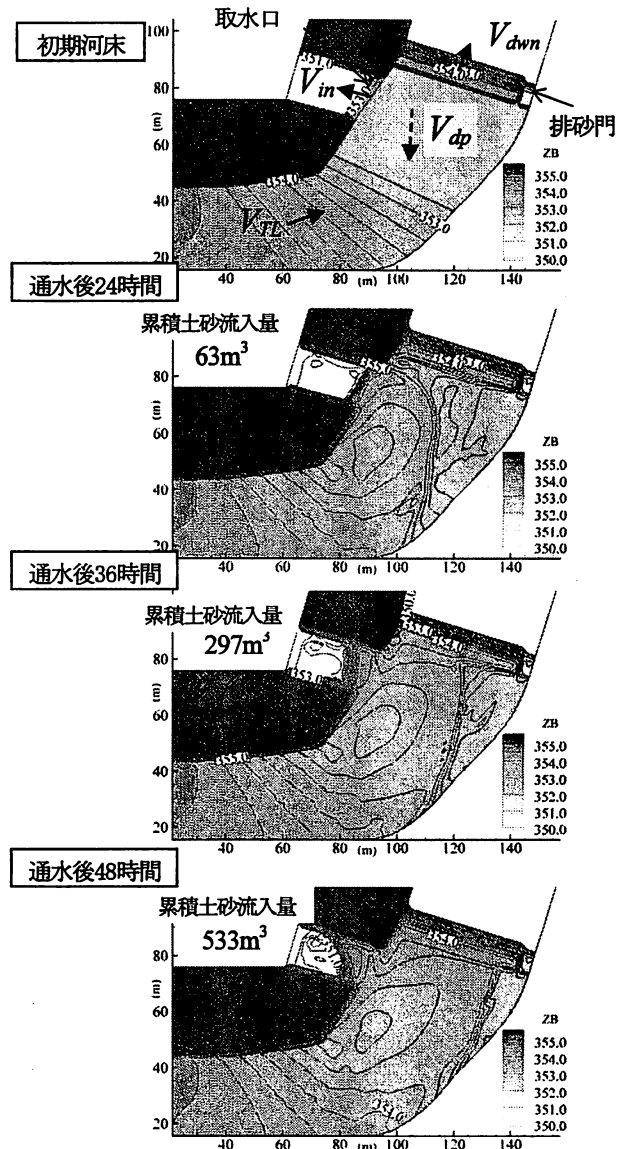


図-4 河川流量100m³/sの場合の2次元河床変動解析結果

ここに、 V_{in} ：単位時間あたり取水口土砂流入量(m³/s)、 V_{dp} ：単位時間あたり取水口前面河道への堆積土砂量(m³/s)、 V_{dwn} ：単位時間あたり取水ダム下流への流下土砂量、 ϕ_{in} ： V_{TL} に対する取水口土砂流入量の割合、 ϕ_{dp} ： V_{TL} に対する取水口前面河道への堆積量の割合、 ϕ_{dwn} ： V_{TL} に対する取水ダム下流への流下量の割合である。取水口への土砂流入量を予測するためには、この割合(ϕ_{in} , ϕ_{dp} , ϕ_{dwn})の評価が必要であるが、これらの値は河川流量と取水口前面の累積堆積土砂量によって大きく変化すると考えられる。そこで、この割合を評価するために上流から一定の流量・土砂量が供給された条件で取水口付近の平面2次元の河床変動解析を行った。平面2次元の河床変動解析は一般曲線座標系で、浮遊砂・掃流砂を考慮し、混合砂礫河床の交換層を考慮したものである。詳細な計算手法については参考文献¹⁾を参照されたい。この平面2次元解析では、取水口前面河道に土砂が堆積していない状態を初期河床とし、上流からの土砂が取水口前面河道に堆積し取水口へ流入する過程

を再現した。

実施した解析の河川流量条件は、現地の出水規模を参考にして、50, 100, 150, 200, 250および300 m^3/s の6ケースとした。このときの掃流砂・浮遊砂土砂量は上流域モデルのケース3の値を用い、各流量ケースごとに一定とした。また、これらの粒度分布は上流域モデルの解析結果から該当する流量のときの粒度分布を平均して与えた。このときの取水量は最大取水（13.5 m^3/s ）とし、取水口内に累積で800 m^3 の土砂が流入するまで解析を継続した。これまでの運転実績を参考に右岸の排砂門は常に全開条件とした。この解析結果のうち、河川流量が100 m^3/s のケースの河床高コンターの変化を図-4に示す。上流域からの土砂が取水口前面に堆積し、取水口内へと流入していく状況が数値解析により再現されている。図-4から、土砂流入現象は、取水口前面に土砂が堆積し、その後にとまった土砂が取水口に流入するという過程を経ていることがわかる。すなわち、取水口への土砂流入の割合は前面累積堆積土砂量に大きく左右される。この取水口前面河道の累積堆積土砂量 V_{dpsum} と土砂流入割合 ϕ_{in} の関係を図-5に示す。ただし、累積堆積土砂量は前面土砂量が満杯になった場合の量 $V_{dpsummax}$ で除して無次元化している。各流量ケースにおいて V_{dpsum} がある値以上になると、 ϕ_{in} が急増し、その後一定になる傾向がある。 ϕ_{in} が急増し始める V_{dpsum} の値は河川流量により異なり、流量が少ないほどこの値は小さい。これは、河川流量が少ないほうが流速成分のうち取水口へ向かう方向成分の割合が大きくなり、比較的少ない堆積土砂状態でも流入する割合が増加しやすいためと考えられる。以上の解析結果から、上流からの供給土砂量に対する土砂流入量の割合 ϕ_{in} は流量ごとに図-5に示した近似曲線により求めることとした。ただし、流量が200 m^3/s 以上の場合は大きな違いがないことから近似曲線は同じものを用いることにした。つぎに、図-6に解析結果から求めた取水口前面河道への堆積土砂に配分される割合 ϕ_{dp} と無次元化した V_{dpsum} との関係を示す。 ϕ_{in} の場合ほど明確な傾向は認められないが、平均的には、満杯の半分程度まではある一定の割合で堆積し、その後堆積土砂に配分される土砂量は少なくなり最終的には0になるという傾向である。そこで、 ϕ_{dp} はすべての流量で図-6中の近似曲線から求めることとした。ただし ϕ_{in} と ϕ_{dp} を加えたものが1を超える場合があるので、そのときは $\phi_{dp} = 1 - \phi_{in}$ とした。

実際の計算では、出水の経過とともに上流から土砂が供給され、取水口前面に堆積していく。この現時点の累積堆積量を出水中の時間の経過とともに求めておき、この値から図-5と図-6を用いて ϕ_{in} 、 ϕ_{dp} が評価できる。得られた ϕ_{in} から取水口への土砂流入量が、 ϕ_{dp} から取水口前面への堆積土砂量が求まり、この堆積土砂量から次の時刻の累積堆積土砂量が求まる。この計算を繰り返すことで出水中に変化する土砂流入量割合を評価することができる。

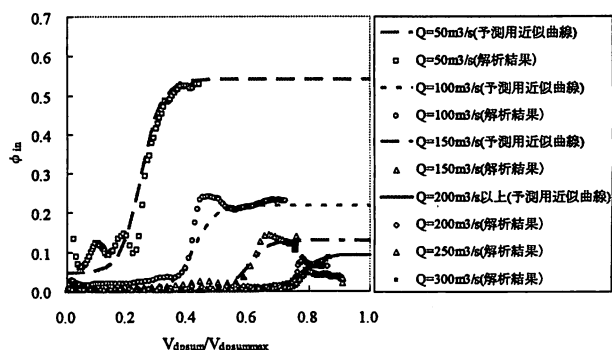


図-5 取水口土砂流入割合と前面河道累積堆積土砂量の関係

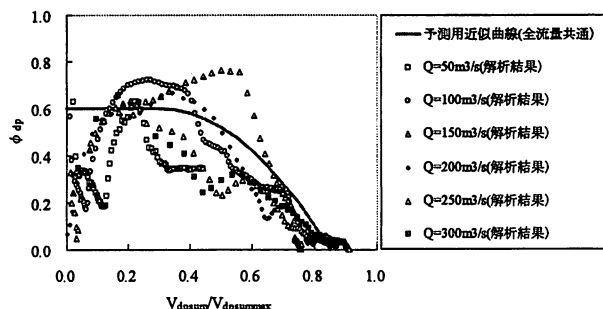


図-6 堆積土砂割合と前面河道累積堆積土砂量の関係

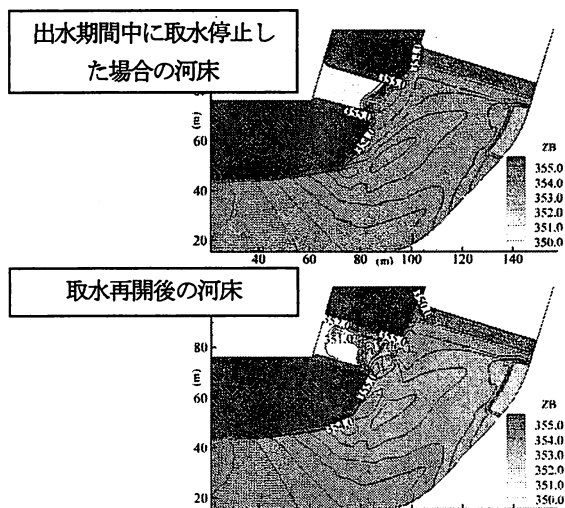


図-7 出水中取水停止した後取水再開した場合の河床高コンター

一方、出水期間中に取水を停止しても、取水口前面に大量の土砂が堆積していると、取水再開後にその堆積土砂が取水口内に流入する。停止後に取水を再開するときにはこの点を考慮する必要がある。そこで、取水を停止した状態で100 m^3/s の河川流量・土砂量を連続して与え、累積堆積土砂量が200, 400, 600, 800, 1000および1150 m^3 になった河床を初期条件として、出水後の取水再開時を模擬した河川流量20 m^3/s 、最大取水の条件で平面2次元解析を実施した。水位が下がった状態で最大取水するために、取水口前面の流速が大きく、すぐに前面堆積土砂が取水口内に流入しやがて定常状態に至る。出水再開前後の河床高計算結果を図-7に示す。この定常状態における累積土砂流入量と初期の前面累積堆積土砂量との関係を

示すと図-8のとおりであり、累積堆積土砂量の増加に伴い出水再開後の土砂流入量が増加することがわかる。ただし、実際に停止後に取水再開した出水時(2004年台風23号出水)の解析結果と実測河床高を比較すると取水口側(左岸側)の再現性が悪い結果が得られた¹⁾ことから、この近似曲線に補正係数 β を乗じた値が土砂流入するものとし、この値は実測値から試行錯誤的に求めるものとした。実際の予測では、取水停止した後の取水再開時にはそのときの前面累積堆積土砂量から図-8の近似曲線に補正係数を乗じた値を加えるものとした。

4. 実測値との比較

以上の検討により、上流域雨量を入力条件として1時

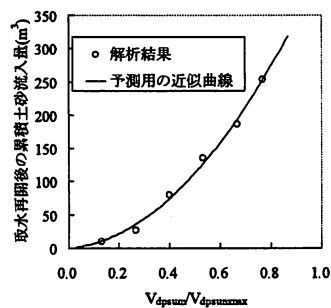


図-8 累積堆積土砂量と取水再開後の累積土砂流入量

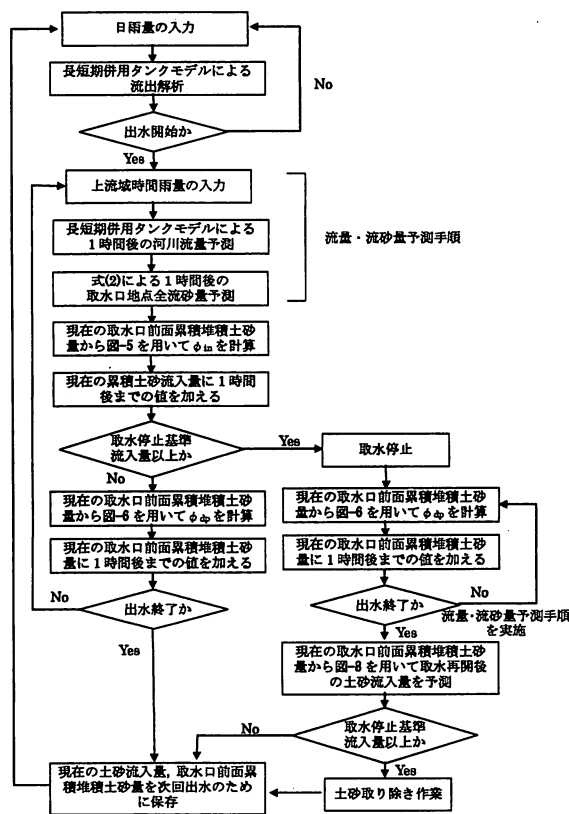


図-9 土砂流入量予測計算フロー

間後までの土砂流入量を予測できるモデルを構築した。具体的な予測計算フローを図-9に示す。タンクモデルおよび簡易な計算式を用いており、実時間予測に用いるのに支障はない。実運用上の手順としては、出水時でないときには日雨量を入力しタンクモデルの水深を更新しておき、出水時には時間雨量から土砂流入量を予測する。そして、予測した土砂流入量により累積土砂流入量が予め設定しておいた限界値を超えた場合には取水を停止し、超えない場合は取水を継続するという判断を行えばよい。

この予測モデルにより2003年から2008年の6年間を対象として、実際の発電所取水口の土砂流入量を再現した。この発電所では毎年11月に取水口内の土砂除去作業を実施しており、そのときの実測した累積の土砂流入量と計算結果を比較した。なお、上流からの土砂量の比例係数 α および出水再開時の補正係数 β は試行錯誤的にそれぞれ 4.8×10^{-7} 、1.7とした。

図-10に上流観測所の時間雨量、河川流量計算結果と実測結果、土砂流入量計算結果および累積土砂流入量の実測結果を示す。このときの取水量は実績値を用いている。累積の土砂流入量の計算値を横軸に実測値を縦軸にプロットしたものを図-11に示す。累積土砂流入量の計算結果は、少なからず実測値との誤差があるものの、2004年の連続出水時に2回の土砂取除きが必要であった規模や2008年の土砂流入量が少ない場合などが再現できており、概ね許容できる誤差であると考えられる。例えば取水口の土砂流入防止を優先する場合では、実用上はこの誤差を安全率として考慮すればよい。実現象では沢田⁶⁾が指摘しているように河道貯留土砂によって流域からの流出土砂量に変化するのに対し、河川流量と土砂量の関係を式(2)のように一定の関係としたことがこれらの誤差の要因のひとつと考えられる。これらの出水前の河床状態と土砂流入量の関係を求めるためには、長期間の土砂流入量データが必要であり、今後、対象とした発電所における計測データの蓄積により本予測モデルの精度向上を図りたい。

5. おわりに

出水時の土砂流入が維持管理上の課題となっている流込み式水力発電所を対象として、上流域からの土砂流出解析および取水口付近の平面2次元解析を実施した結果をもとに、時間雨量を入力条件とした実時間の土砂流入量予測モデルを構築した。今後の課題として、河道貯留土砂量の変化による上流域流出土砂量の違いを考慮できるモデルへの改良があげられる。

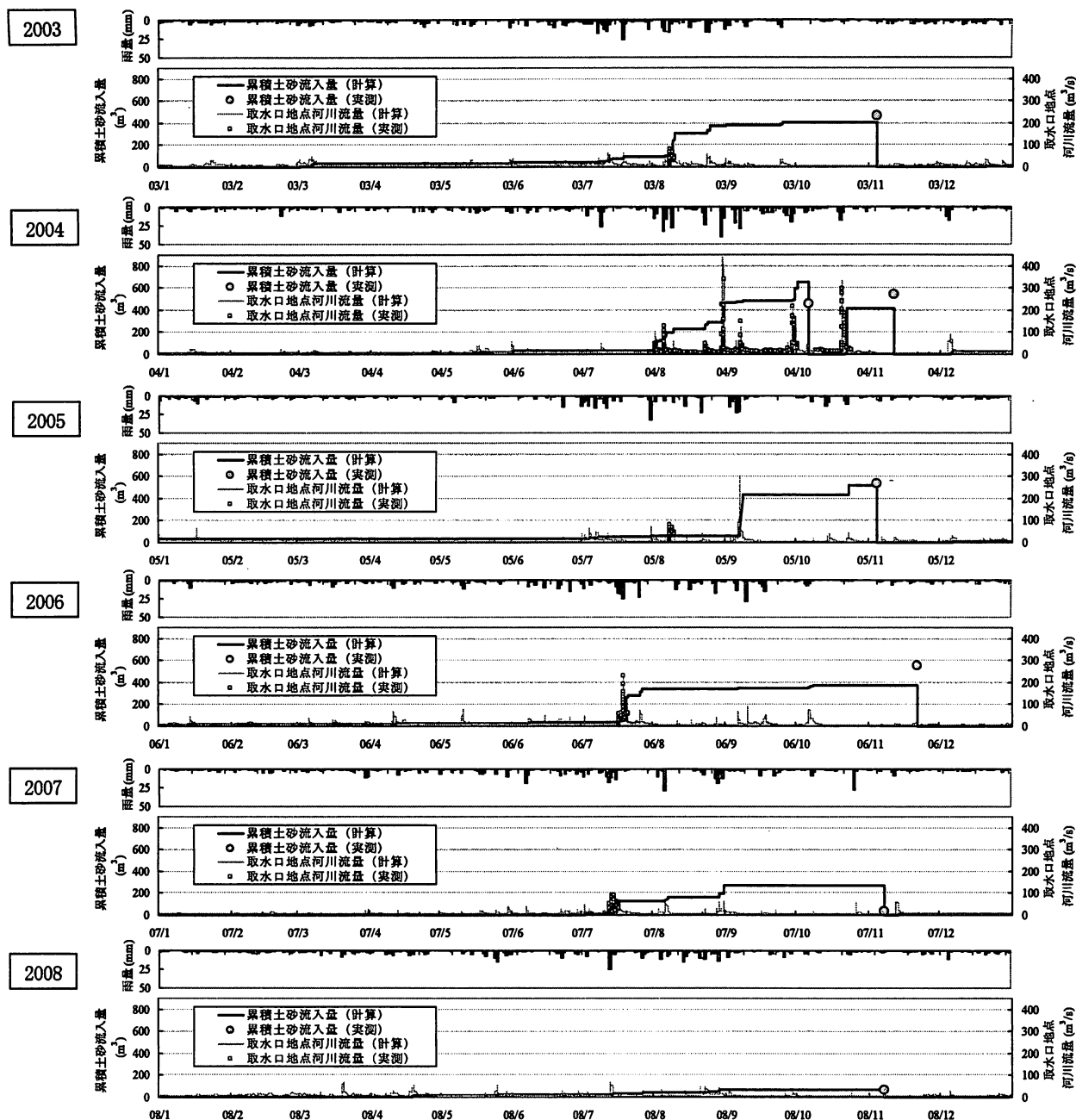


図-10 土砂流入量予測モデルによる再現計算と実測値の比較

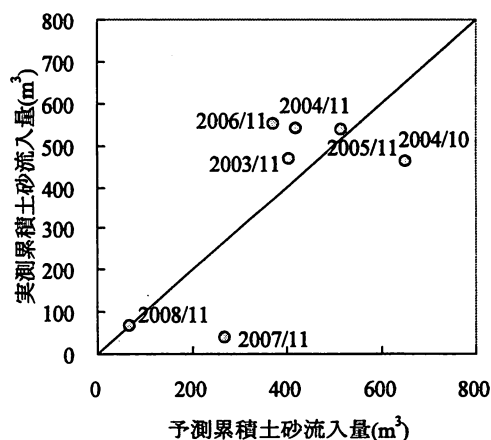


図-11 累積土砂流入量の実測値と予測値の比較

参考文献

- 1) 河内友一, 細田尚, 大久保賢治: 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, 水工学論文集, 第53巻, pp. 781-786, 2009.
- 2) 永井明博: 吉井川流域の長短期流出解析とその考察, 農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 200-201, 1988.
- 3) 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.
- 4) 永井明博: タンクモデルの長短期流出への拡大適用と考察, 農業土木学会論文集, No. 167, pp. 89-95, 1993.
- 5) 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.
- 6) 沢田豊明: 山地流域の土砂流域に関する研究, 京都大学学位論文, pp. 62-63, 1985.

(2009. 4. 9受付)