

貯水池からの排砂に対する下流河川での土砂応答特性

南 修平・藤田正治

要 旨

ダム建設による流砂の遮断は、下流河川に様々な負の影響を及ぼす。これに対して、近年、フラッシングや置土といった土砂をダム下流へ供給する取り組みが行われている。これらの取り組みによる下流河床の応答特性を明かにすることは、土砂管理上の重要な課題である。そこで本研究は、宇奈月ダムと出し平ダムの連携排砂を対象に、一次元河床変動シミュレーションモデルを用いて、ダムからの人工的な土砂供給に伴う下流河川の土砂応答特性を明らかにし、今後の土砂管理への有用な情報を得ることを目的とする。

キーワード：フラッシング排砂，土砂管理，一次元河床変動計算

1. はじめに

我が国では、ダム堆砂、ダム下流河床の低下および河床材料の粗粒化、海岸侵食等の土砂に係わる様々な問題が顕在化している。最近では流砂環境の変化に伴う生態系への影響も指摘されている。このような中、近年、貯水池では堆砂およびダム下流環境対策のために、フラッシング、バイパッシング、置土など、土砂をダム下流へ供給する取り組みが行われている。これらの対策にあたっては、このような人工的な土砂供給に伴う下流河川の物理環境の応答特性を明らかにし、その結果を対策に反映させることが肝要である。しかし、このような取り組みは最近になって行われ始めたものであり、人工的な土砂供給というインパクトに対する下流での河床変動や粒径変化といったレスポンスについては、十分明らかになっているとは言い難い。

貯水池からの人工的な土砂供給に対する下流河川での土砂応答特性を知ることは、多くの河川や貯水池における土砂管理上の主要課題の1つと考えられる。そこで、本研究では実河川での排砂オペレーションに基づく貯水池からの人工的な土砂供給条件と下流河川の土砂動態を一次元河床変動シミュレーションにより解析し、その解析結果に基づき、下流河川の河床位や河床材料の粒度分布の長期的変化特性、下流河川へ供給された土砂の伝播特性、排砂による河床攪乱特性を明らかにし、今後の土砂管理に有用な情報を得ることを目的とする。

2. 対象河川と土砂動態の実態

本論文では、実河川として富山県の黒部川を例にあげて解析する。黒部川を対象とした理由は、河口から約20km上流に位置する2001年完成の宇奈月ダムと、その上流約7kmに位置する1985年完成の出し平ダムが、2001年以降、連携して排砂を行っており、また土砂に係わるデータが豊富なためである。

黒部川は、富山県東部に位置する一級河川である。鷲羽岳にその源を発し、途中、多くの溪流を合わせて溪谷を形成し、Fig.1に示す河口から約13km上流の愛本地点で平野部に出る。それより下流では、扇状地を北西に流下し、日本海に注いでいる。流域面積は682km²、流路延長85km、河川勾配は1/5～1/100と我が国有数の急流河川である。流域は地形が急峻、地質は脆弱であり、単位流域面積当たりの土砂生産量は我が国で最上位にランクされる。流域の年間平均雨量は約4,000mmと多雨地帯であることから、流域に設置されたダムでは洪水時に大量の土砂が流入する（建設省土木研究所，1993）。このような大量の土砂流入に対して、宇奈月ダムと出し平ダムは、フラッシング方式による排砂を行っている。排砂方法は、所定の出水、洪水時に貯水位を低下させ、自然流下状態とすることで、掃流力を増加させ、土砂をダム下流へと流下させるものである。出し平ダムは1991年より単独で排砂を行っており、また宇奈月ダム完成後の2001年以降、2007年12月までの間、両貯水池は連携して14回の排砂操作を行っている（国土交通省黒部河川事務所，2008）。

Sea of Japan



Fig.1 Location of dams in the Kurobe River basin

黒部川の土砂動態の実態を把握するため、宇奈月ダムより下流の河床変動量の実測値を、主なダムが完成した時期とともにFig.2に示す(西川・栢木, 2006)。ここに河床変動量は、河口から宇奈月ダム直下までの20.4kmの区間を3つに分け、1963年を基準とした河床変動量の各区間における平均値で示した。1960年頃から現在にかけて河床が1.5~2m低下しており、とくに1970年頃から1985年頃にかけて河床低下が認められるが、これは砂利採取等が一要因と考えられる。近年は砂利採取量が減少したこともあり、顕著な河床低下は認められない。

出し平ダムが排砂を開始した1991年、連携排砂が始まった2001年以降に着目すると、河床高は若干の低下を示している領域もあるが、ほとんど変化していないと言える。排砂による下流河川の河床高等の応答は、すでに生じていると考えられるが、これらの実測データからは明瞭に検討できない。そこで、ここでは、両貯水池と下流河川を対象に一次元河床変動シミュレーションを行い、排砂に対するダム下流河川の土砂応答特性等を詳細に検討する。

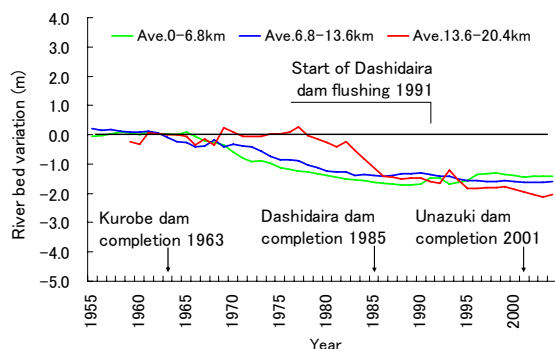


Fig.2 River bed variation based on 1963 in the Kurobe River

3. 計算モデルとその妥当性

3.1 モデルの概要

用いた計算モデルは、掃流砂、浮遊砂およびウォッシュロードを対象とした一次元河床変動計算モデルである。

流れの計算は一次元不等流とし、河床材料を掃流砂・浮遊砂となる0.1mmより大きな成分と、ウォッシュロードとなる0.1mm以下の成分に分け、掃流砂量は芦田・道上式、浮遊砂量およびウォッシュロード量は、粒子の浮上と沈降を考慮した一次元移流拡散方程式により得た断面平均濃度に断面通過流量を乗じて求める。浮遊砂およびウォッシュロードの浮上量は、それぞれ芦田・道上式、侵食速度式を用いて算定する。粒度分布は、河床を表層から鉛直方向に分割し、河床変動に応じて各々の分割された層の粒度分布が変化する多層モデルにより解析する。これらの詳細については、Jian Liu et al. (2004a, 2004b)を参照されたい。

3.2 計算条件

連携排砂が行われた2001年から2006年における貯水池とその下流の河床変動の再現計算を下記の様な条件で行い、実測値との比較により計算モデルの妥当性を検証する。

まず、対象領域はFig.3に示すとおりで、河口から出し平ダム湛水域上流の約30kmとする。この区間には、愛本堰堤、宇奈月ダム、出し平ダムが設置されており、宇奈月ダムより上流約4.5km地点に黒薙川が流入する。宇奈月ダム上流の初期河床位は2000年12月の実測値に基づく平均河床高とするが、宇奈月ダムより下流では2000年度に測量が実施されていないため、初期河床を1999年12月の実測値に基づく平均河床高とする。ここに、計算断面間距離は100~200mとする。

河床材料の初期粒度分布は次のように与えた。まず、出し平ダム上流については、別途実施したダム

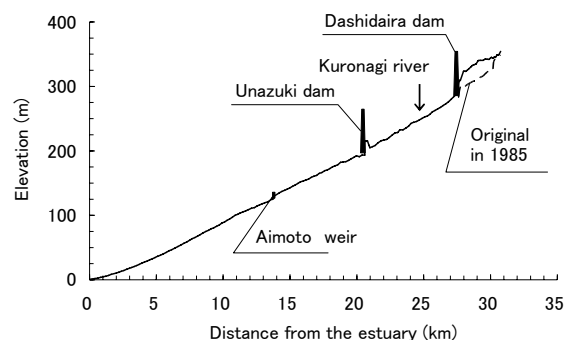


Fig.3 Initial river bed profile

完成後の1985年6月から2000年12月までを対象とした再現計算により得られた2000年12月の計算値を用いる。出し平ダムより下流では1998年度の実測値に基づき与える。

水位の境界条件に関しては、河口地点で富山湾の平均潮位El.0.21mを与え、両ダム地点では毎時の貯水位の実測値を与える。また、流量は出し平ダム上流端と黒薙川で与える。出し平ダム上流端の流量は、毎時の出し平ダム流入量の実績値を用い、黒薙川の流量は宇奈月ダム流入量の実績値から出し平ダムゲート放流量および宇奈月ダム貯水池内への発電放流量の実績値を差し引いて求める。

給砂は出し平ダム上流端および黒薙川から行うものとし、給砂地点の河床勾配をそれぞれ実績値に基づく1/55, 1/30とした等流計算により水量を求め、流砂量を計算して与える。この際、粗度係数はそれぞれ0.03, 0.04とし、給砂の粒度分布は過去の調査結果に基づき設定する。掃流砂量は芦田・道上式、浮遊砂量はレーン・カリンスキー式より得られる断面平均濃度に流量を乗じて求める。ここに、底面濃度は芦田・道上式を用いて算定する。ただし、上記により算定した給砂量では河床変動が正確に計算できなかったため、ここでは便宜上、出し平ダム上流端では、掃流砂量と浮遊砂量を計算値の0.4倍、黒薙川では0.6倍の量を給砂量として与えた。さらに、出し平ダム上流端および黒薙川の有効流量をそれぞれ300m³/s, 100m³/sとする。ここに、有効流量は掃流砂と浮遊砂を流入させる下限の流量であり、各上流端におけるアーモアコート破壊流量程度である。また、ウォッシュロードについては、Fig.4およびFig.5に示すとおり、2001年から2006年に出し平ダム上流端と黒薙川で観測した濁水実測値に基づき流量の関数で給砂する。ウォッシュロードが流入する流量は、過去の実測結果を考慮して、出し平ダム上流端において100m³/s, 黒薙川で35m³/s以上とする。なお、出し平ダム上流については500m³/s以上の濁水実測値が無いことから、出し平ダム建設前に調査された濁度の実測値に基づき得た関係式を適用する。

河床材料は11粒径階に分けられ、掃流砂と浮遊砂の代表粒径は707.1mm, 361.2mm, 118.3mm, 37.42mm, 11.83mm, 3.742mm, 1.183mm, 0.374mm, ウォッシュロードの代表粒径は0.1mm, 0.0158mm, 0.0022mmと設定する。

計算時間間隔は、流量および水位データの入力間隔の3600秒を最大とし、河床変動量に応じて随時調節する。具体的には、計算の全ての断面で1回の河床変動量が25cmを超えないような時間間隔にて設定する。

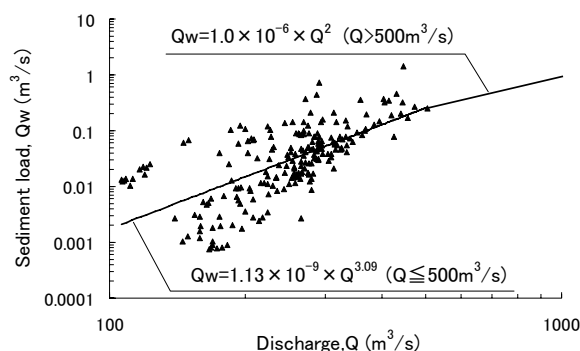


Fig.4 Relationship between water discharge and wash load at an upstream point of the Dashidaira dam

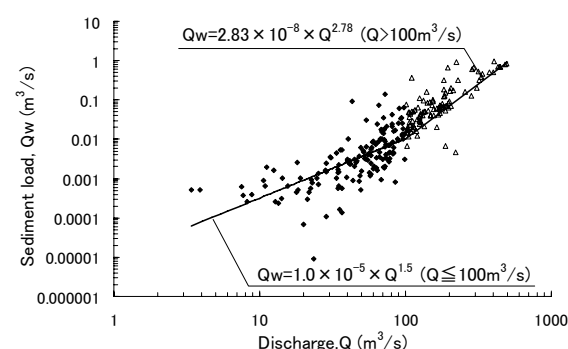


Fig.5 Relationship between water discharge and wash load at the Kuronagi river

3.3 計算結果

実際の排砂操作を考慮して両貯水池およびその下流の河床変動をシミュレーションし、計算モデルの妥当性を検証する。

Fig.6に、両貯水池の堆砂縦断形状の計算結果を実測値と比較して示す。これより計算結果は、2006年12月時点の堆砂形状の実測値を良好に表現できていることがわかる。また、Fig.7にダム下流河川における初期河床からの河床変動量を、計算結果と実測値で比較して示す。愛本堰堤より上流を中心に、毎年

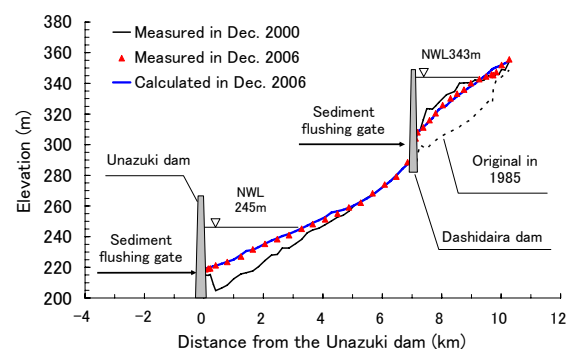


Fig.6 Measured and calculated longitudinal profiles in the Unazuki and the Dashidaira reservoir

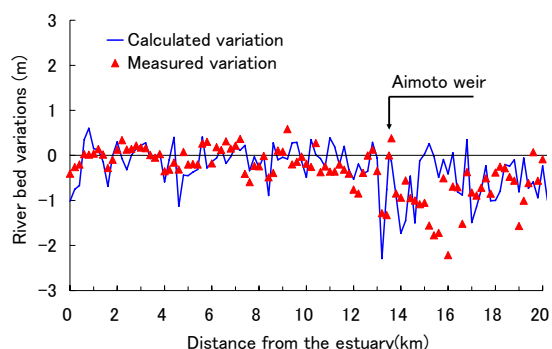


Fig.7 Measured and calculated river bed variations in the downstream of the Unazuki dam

数万 m^3 の砂利採取が行われていること等により、実測値では2m近く河床低下している箇所が認められる。計算では砂利採取を考慮していないため、これら砂利採取が行われた領域における再現性が比較的劣るものの、全体的な河床変動傾向は実現象を良好に表現できている。これらの計算結果より、本計算モデルは排砂操作下での両貯水池ならびにその下流の河床変動を適切に表現できると評価できる。

4. 排砂に対する土砂応答特性の分析

4.1 分析の概要

排砂の量と粒径および排砂頻度と関係するダム下流の長期的な河道変化やパルス状に流出した土砂によるダム下流の短期的河道変化は、総合土砂管理を行う上で重要な視点となる。とくに後者は、河川への適度な攪乱が生態系に必要であるということに対する重要な情報になりえる。そこで、排砂に伴う長期的河床変動特性および河床の粒度分布の変化特性だけでなく、パルス状にダムから流出した土砂の伝播特性や短期的な河床変動特性を検討するために、次のような河床変動計算を行った。

初期河床高は両貯水池およびその下流河川において2006年12月の実測値とし、1972年から2006年の35年の流量の実測値を順に繰り返して与えることにより100年間の河床変動計算を行う。ただし、ダム完成以前はダムへの流入流量データが無いため、ダム地点近傍の測水所のデータからダム流入量を求めた。また、河口水位および給砂条件は3章での再現計算と同様の方法で与える。

両貯水池では毎年6月～8月において、出し平ダムで $300\text{m}^3/\text{s}$ を超える出水、あるいは宇奈月ダムにおいて $400\text{m}^3/\text{s}$ を超える出水が生じたとき、貯水位を低下させ、自然流下状態にして連携排砂を行うこととしている。その年の連携排砂以降に、出し平ダムで $480\text{m}^3/\text{s}$ あるいは宇奈月ダムで $650\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水

が発生すれば、再度排砂操作が行われる。ここでは、これらの排砂ルールに基づく排砂操作を考慮した河床変動計算を行うが、自然流下時間は過去の実績値を参考に12時間と設定した。排砂ルールの詳細は参考文献（国土交通省黒部河川事務所，2007）を参照されたい。

4.2 排砂による長期河床変動

Fig.8は、宇奈月ダムからの年間流出土砂量のうち、下流河床変動に寄与する掃流砂量と浮遊砂量の合計を示したものである。その年の洪水規模や回数によって、流出土砂量が大きく変動している。

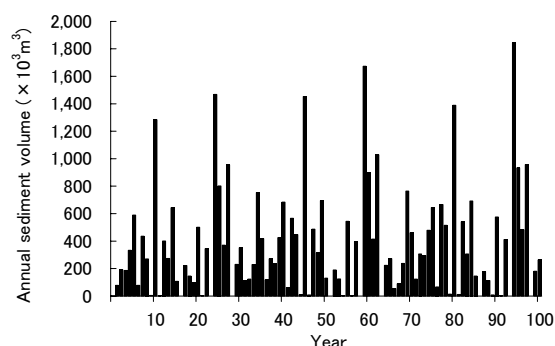


Fig.8 Annual sediment volume of the suspended load and bed load released from the Unazuki dam

Fig.9は宇奈月ダム下流の3区間の河床変動量を示したもので、流出土砂量の変動によりダム下流の河床位も変動している。長期的な河床変動を見ると、10年後までは下流のどの区間でも河床変動はあまり見られないが、愛本堰堤より上流、すなわち13.6km～20.4kmのダム直下の区間では10年後あたりから徐々に河床が上昇している。その下流の2区間では25年後あたりから河床が上昇している。したがって、排砂による河床上昇は上流ほど早く生じるが、少なくとも10年程の年数が必要となる。Fig.9には、各区間の河床表層の平均粒径の経年変化も示されている。

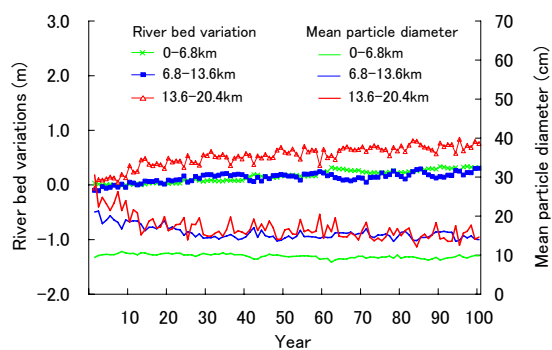


Fig.9 Time variation of calculated sediment deposition depth and calculated mean particle diameter in bed surface layer in the downstream of the Unazuki dam

河口付近では、ほとんど平均粒径は変化していないが、ダム直下の区間や愛本堰堤より下流の扇状地出口付近では河床表層が細粒化している。

このような長期的な河床変化が治水、利水および環境上許容されるものか、また環境上望ましいものかは別途検討する必要があるが、もし長期的な河床変動が大きいと判断される場合には、この解析で明らかにされたような排砂と河床上昇の時間遅れを考慮しながら、排砂操作を工夫することも選択肢の1つであろう。

4.3 パルス状の流出土砂の伝播特性

Fig.8のような様々な大きさのパルス状の流出土砂は、Fig.9に示すように下流の河床位を短期的に変動させ、河道に様々な攪乱を与えられと考えられる。しかし、Fig.9は土砂供給地点から離れると、流出土砂の変動が平滑化され、短期的な河床変動も緩和されることも示している。このような事項について先の計算結果から詳細に考察する。

Fig.10はFig.8に示す宇奈月ダムからの年間流出土砂の経年変化をスペクトル解析した結果を示したものである。概ね2~3年、5年、18年の卓越周期が見られる。Fig.8からも18年周期程度で大規模な土砂流出が発生していることがわかる。Fig.11はダム下流の3区間の年間河床変動量の経年変化をスペクトル解析した結果を示したもので、ダム直下の区間では概ね2~3年、4~5年、9年および18年の卓越周期が見られ、他の2つの区間と違い流出土砂のスペクトル分布に近い分布を呈している。Fig.12は、河床表層の平均粒径についても同様の検討を行った結果を示したものである。河床変動と同様に、ダム直下の区間では概ね2~3年、4~5年、9年の卓越周期が見られるが、流出土砂や河床変動に見られた18年程度の卓越周期は見られない。これは、たとえ10年以上の周期で発生する大規模な土砂流出であっても、ダム直下区間における河床材料の平均粒径は、ほとんど変化しないことを示すものである。以上のように排砂地点に近い区間では、流出土砂の変動に応じた短期の河床変動が生じ、排砂に対する応答性が高いことがわかる。

Fig.13は宇奈月ダムからの年間最大日流出土砂量とそれが発生した日の区間平均日河床変動量の絶対値の関係を示したものである。図には両者の相関係数が示されている。ダム直下の区間では流出土砂量に対して河床変動量の絶対値が大きく、両者の相関も高いのに対して、その下流2区間では河床変動量の絶対値は小さく、相関係数も小さい。このようにダム直下区間では排砂による土砂供給に対する応答性が高く、流出土砂の増減に連動して河床変動量も増減するのに対し、その下流2区間では流出土砂量の増

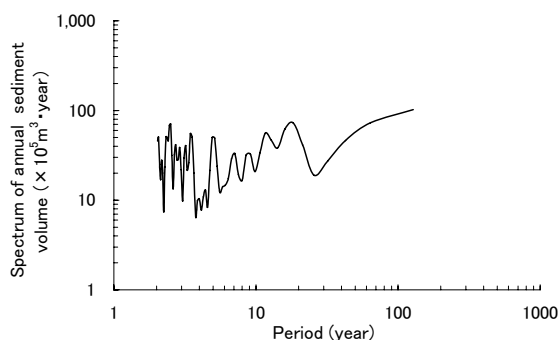


Fig.10 Spectrum of annual sediment volume released from the Unazuki dam

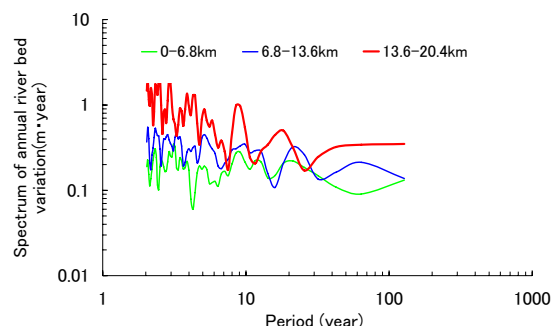


Fig.11 Spectrum of annual river bed variations in the downstream of the Unazuki dam

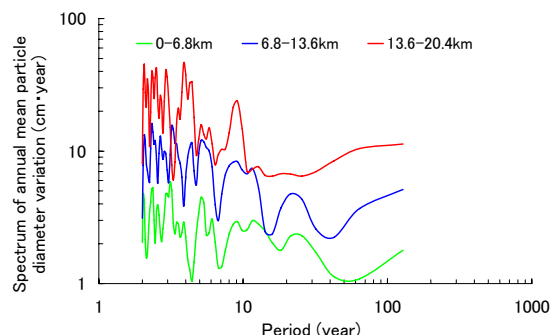


Fig.12 Spectrum of annual mean particle diameter variations in the downstream of the Unazuki dam

減にはあまり関係なく、その変動量もさほど大きくない。

Fig.14は宇奈月ダムからの年間最大日流出土砂量とその日からN日後の区間平均日河床変動量の絶対値の相関係数を示したものである。ダム直下の区間ではNが0日のとき、最も相関が高くなるが、5日程経過するとほとんど相関が無くなる。これより下流の2区間では、同日の相関係数はFig.13に示すように非常に小さいが、1日ないし2日後の相関係数が少し大きくなっている。しかし、ダム直下区間と同様に5日程経過するとほとんど相関は無くなっている。何れの区間も6~9日後に再度相関係数が0.3程度に大きくなっているが、これは排砂後に発生した出水によっ

て、河床が変動したためである。このように、ダム直下の区間に比べて、その下流の2区間では、流出土砂の河床への伝播が多少遅れることになる。

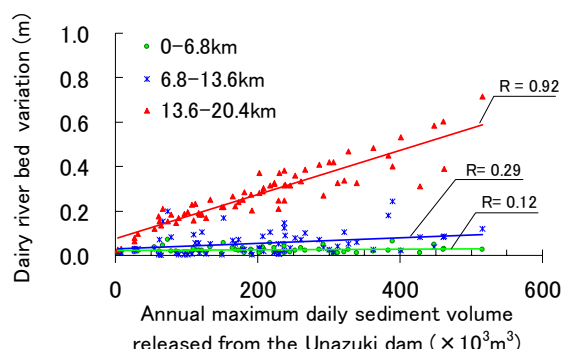


Fig.13 Relationship between the annual maximum daily sediment volume released from the Unazuki dam and absolute values of segment averages of the daily river bed variations when the annual maximum sediment volume occurs

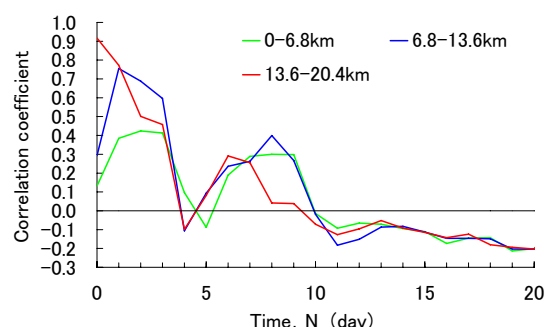


Fig.14 Correlation coefficients between annual maximum daily sediment outflow volume released from the Unazuki dam and absolute values of the daily river bed variations on N days after the annual maximum sediment outflow occurs

4.4 パルス状の流出土砂による短期河床変動特性

排砂により土砂がパルス状に流出し、その結果河床に適度な攪乱を与えることができれば、環境面でその効果が評価されることになろう。環境面で有効な排砂の量と頻度を定めるためには、生態系としてどのような攪乱が必要であるかという知見が必要である。しかし、現状ではそのような知見が不足しているため、ここでは、まずどのような攪乱が与えられているのかということを短期河床変動特性から検討する。

河床位の時間変化率に着目し、時間河床変動の絶対値のランクと、それらの年間平均発生頻度との関係を整理してFig.15に示す。これより、河口～6.8km

は河床の微小変動が多く、逆に愛本堰堤(13.6km)～宇奈月ダム直下(20.4km)では大きな河床変動が多いことがわかる。河口付近では粒径が細かく、少しの流水で河床が微小に変動する。一方、それより上流では、河床材料が比較的粗いこともあり、微小な河床変動の頻度は少ないが、比較的大きな河床変動の発生頻度が多くなる。

このような整理から、ダムからの流出土砂量やダムからの距離、川幅や河床勾配といった地形条件などに起因して、ダム直下の区間では、比較的大きな河床変動の発生頻度が多いが、下流ほどそれらの発生頻度は少なくなり、河口付近では河床の微小変動が多くなることが明らかとなった。

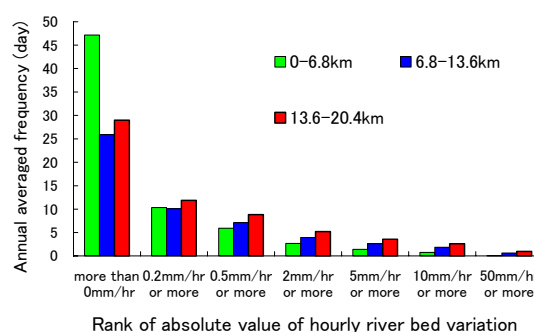


Fig.15 Relationship between the ranks of absolute values of hourly river bed variations and their annual averaged frequencies

5. まとめ

本論文では土砂管理上、有用となる情報を得るために、黒部川を例に、貯水池からの排砂に対するダム下流の長期的な河道変化特性、パルス状に流出した土砂の伝播特性および短期的河床変化特性をシミュレーションにより検討した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 排砂操作を含む、貯水池および下流河川の土砂動態を概ね表現できるシミュレーションモデルを得た。
- (2) 貯水池からの排砂に対するダム下流の長期的な河道変化特性として、河床は徐々に上昇するが、その量やタイミングは区間によって異なる。また、河床表層の粒径は一部の区間を除き、細粒化の傾向を示す。
- (3) ダム直下の区間では、流出土砂の周期に応じた河床変動、粒径変化が生じるが、その下流の区間では流出土砂の周期と違った周期を示す。また、ダム直下区間では年間最大日流出土砂量が発生した日に、河床変動が最も大きくなるが、

それより下流の区間では1日ないし2日後になって河床変動が生じるなど、区間によって流出土砂の河床への伝播特性が異なる。

- (4) 排砂に伴う下流の攪乱を調べたところ、ダム直下の区間では比較的大きな河床変動の発生頻度が多いが、下流ほどそれらの発生頻度は少なくなり、河口付近では河床の微小変動が多くなる。

謝 辞

本研究を行うに際し、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所、関西電力株式会社より各種調査データ等の貴重な資料を提供いただいた。ここに深謝致します。

参考文献

建設省土木研究所（1993）：黒部川の河道特性と河道計画
国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所（2008）：第28回黒部川ダム排砂評価委員会資料

国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所（2007）：第27回黒部川ダム排砂評価委員会資料
西川一・栢木敏仁（2006）：黒部川流砂系，砂防学会誌，Vol.59，No.2，pp.64-72
Jian Liu, Shuhei Minami, Hideki Otsuki, Bingi Liu, Kazuo Ashida（2004a）：Environmental impacts of coordinated sediment flushing, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.42, No.5, pp.461-472
Jian Liu, Shuhei Minami, Hideki Otsuki, Bingi Liu, Kazuo Ashida（2004b）：Prediction of concerted sediment flushing, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.130, No.11, pp.1089-1096

The Sediment Responses in the Downstream by Sediment Flushing of the Reservoirs

Shuhei MINAMI and Masaharu FUJITA

Synopsis

In order to alleviate negative influences on the downstream environment of the dam due to the reservoir sedimentation, the measures such as sediment flushing and sediment relocation have been adopted to supply sediment to the downstream channel. It is very important to understand the responses of the downstream channel to the sediment supply by the above measures. In this paper, the responses of sediment discharge by sediment flushing of the Dashidaira and Unazuki reservoirs on the downstream channel were studied by means of one dimensional numerical model of bed variation. The responses of the downstream physical environment to the sediment flushing of these reservoirs are analyzed to acquire useful information on the sediment management.

Keywords: sediment flushing, sediment management, one-dimensional numerical model