

ダム下流における濁水の流下過程とその影響に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：自然共生研究センター、
水理チーム

研究担当者：萱場 祐一、宮川 幸雄、
小野田 幸生、末吉 正尚
箱石 憲昭、石神 孝之、
中西 哲、本山 健士

【要旨】

ダム下流の河川において、濁水が長期的に発生する事例が、全国で確認されている。濁水による魚類等の河川生物への影響については、地元住民の関心も高く改善要望もあるが、現場の河川管理に応用できる知見が少なく、河川管理者が許容される濁水の濃度および継続時間を把握することは現状困難である。そこで、本研究では濁水が発生するダム下流を対象に、濁水が流下する際のメカニズムを明らかにするとともに、影響をおよぼす範囲を解明し、濁水のダム下流への分布状況を予測する水理的なモデルを構築した。また、濁水の影響を受ける生物種群を特定するとともに、SS 濃度に応じて、生物の行動の変化を誘発させる可能性があることを確認した。キーワード：濁水、減少係数、アユ、テレメトリー、SS 濃度

1. はじめに

ダムは上流から流入する水とともに、土砂も貯める。この土砂はダム湖に堆積するが、その中で粒径の細かい粘土やシルト（～0.062 mm）¹⁾は、ダムの放流時に水と攪拌され、濁水となって下流に流出する。濁水は洪水時にダムから大量に放流する際に発生しやすいが、ダム湖に水が少ない時期に、降雨でダム湖に堆積した粘土やシルトが巻き上がることで、平水時でも発生する²⁾。洪水時の濁水は、高濃度だが放流後に収まる場合が多い一方、平水時の濁水は洪水時よりも低濃度だが数ヶ月にわたる場合もある。濁水による魚類等の河川生物への影響については、地元住民の関心も高く改善要望もあるが、現場の河川管理に応用できる知見が少なく、河川管理者が許容される濁水の濃度および継続時間を把握することは現状困難である。

この理由として、次の2つの課題があるためと考えられる。1つは、実河川において、濁水を構成する土粒子の沈降するメカニズムが未解明であり、ダム下流で濁水が及ぶ範囲を予測する技術が不足していることである。水中を浮遊する粒子の沈降速度は、Stokesの式によって計算可能であり³⁾、濁水の流下速度と組み合わせることで、濁水の縦断方向の濃度分布をある程度予測できると考えられる。しかし、実河川の多様な構造に応じて、濁水の濃度分布は変化する。例えば、途中で支川が合流すれば、合流地点より下流の濁水は

希釈される³⁾。このため、実河川における濁水の濃度分布を定量的に予測するためには、河川の物理環境で濁水に関わる変数を把握し、予測モデルに反映する必要がある。この点については、縦断方向に複数の地点で測定されたデータがあれば、簡易なモデル式(式(1))⁴⁾⁶⁾で予測できる。

$$E = E_0 \exp(-K_d \cdot t) \quad (1)$$

ここで、E：ダム下流のある地点のSS濃度、E₀：濁水発生地点のSS濃度、K_d：減少係数、t：経過時間を表す。しかし、現場に変化（例：河道形状、河床粒径分布等）が生じた場合にはその都度、モデルの減少係数を見直す必要がある上、現場に変化（減少係数の変化）を伴う場合の予測には適用できないと考えられる。

もう1つの理由は、濁水が生物に及ぼす影響について、単純な室内実験で検証した事例が大部分であり、これらの成果を実河川スケールにあてはめることが可能かどうか不明な点である。濁水による河川生物、特に魚類への影響については、既往文献でも報告されており、濁りの濃度に応じて忌避行動、産卵障害等、魚類の応答が異なることも解明されている⁶⁾。しかし、これらの応答は、濁りの濃度のみに影響されるわけではない。Newcombらは、実験室内で、濁水の濃度と継続時間の2つの尺度で魚類への影響の程度を調査し、同じ濃度でも継続時間が長くなれば魚類への影響がより深刻化することを報告している⁶⁾。また、これら

の条件が同じであっても魚種によって反応が異なる⁶⁾。このため、これらの成果を活用するためには、成果内容を濁りの濃度、継続時間、魚種の複数の尺度で分類し、体系的に整理する必要がある。また、このような調査は、濁りの濃度および継続時間をコントロール可能な状況下で行う必要があるため、必然的に室内実験が多くなり、濃度分布がより複雑な実河川では検証事例が少なく、室内実験と実河川スケールでの実験で得られた成果を比較・検証した研究がほとんどないのが現状である。

そこで、本研究では、上記の課題を解決するため、2つの研究に取り組む。1つは、濁りが発生するダム下流を対象に、濁りが流下する際のメカニズムを明らかにするとともに、影響をおよぼす範囲を解明し、濁りのダム下流への分布状況を予測する水理学的なモデルを構築するものである(2.濁りの流下する範囲の特定)。もう1つは、既往の知見を整理した上で、濁りの影響を受ける生物種群を特定するとともにその生物がいなくなる濁度(閾値)を推定し、実河川スケールの分析および実験にて確認するものである(3.濁りの影響を受ける生物種群の特定と閾値の推定および4.濁りの濃度に対するアユの行動の変化に関する実河川スケールでの実態の解明)。本研究の成果は、濁りのダム下流への影響評価および濁りの管理に関する技術開発に資すると考えられる。

2. 濁りの流下する範囲の特定

2.1 はじめに

濁りの影響を適切に評価するためには、濁りの流下過程における変化を把握することが重要である。これまでに濁りを構成する土粒子が流下過程において沈降することが示されているが、そのメカニズムや流下範囲は十分に明らかとなっていない。そのため、ダム貯水池における濁水長期化の現状やダム下流における濁水流下の流下範囲について分析した。次に実験により濁水流下過程における浮遊物質(以下、SS)低減メカニズムについて検討を実施した。また、実験による検討を踏まえSS低減について新規モデル式を構築するとともに、実河川への適用について検討するため、ダム下流河川における現地調査と新規モデルの適用性に関する検討を実施した。

表-1 濁水長期化の現状

(単位:%)

	あり		なし
濁水長期化が確認されたダム	27		73
濁水長期化対策の有無	あり	なし	
	79	21	

対策事例一覧

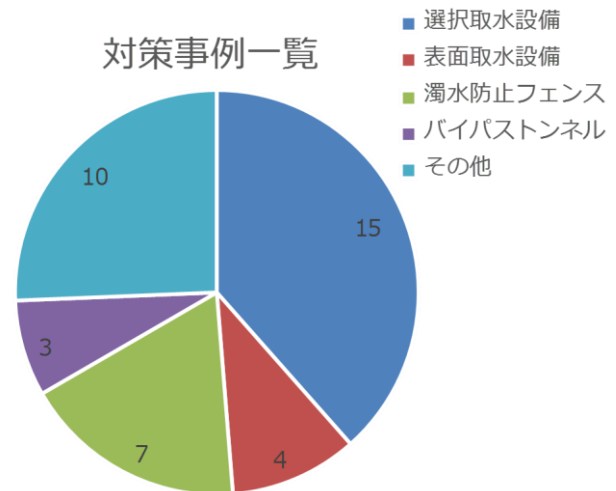


図-1 濁水長期化の対策事例

2.2 濁りの流下する範囲に関する現状分析

2.2.1 ダム貯水池における濁水長期化の現状

ダム管理者の観測データ等をもとに、国土交通省・水資源機構所管のダムを対象にダム貯水池における濁水長期化の現状について分析した。

表-1に濁水長期化の現状を示す。これまでに濁水長期化が確認されたダムは全体の27%であり、そのうち濁水長期化の対策が行われているダムは79%である。また、濁水長期化対策の一覧を図-1に示す。対策として選択取水設備等により、下流に放流する水を制御する事例が多くみられた。

2.2.2 濁水流下範囲に関する調査

ダムから濁りが下流のどの範囲まで及ぶかを把握するため、ダム管理者の観測データや現地観測から流下範囲について調査した。

・Aダムを対象にした現地調査

2016年11月17日にAダム下流において現地調査を実施した。図-2~4に現地調査の結果を示す。調査は大きな支川流入のないAダムの下流約10kmの範囲において6地点を選定し、濁水を採水し濁度・SSを測定した。図-3より、濁りが流下していく過程において、SSが低減することを確認した。また図-4に採水した濁りの粒度分布の1事例を示す。図より濁りを構成する濁質の粒径は1~数100μmであり、沈降速度が非常に小さいため、濁質の沈降のみによりSSが低減しているのではないと考えられる。



図-2 A ダム下流河川

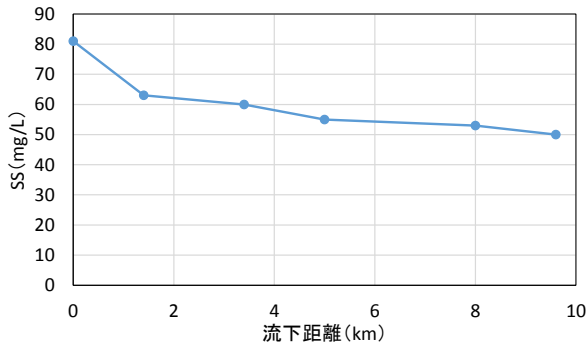


図-3 A ダム現地調査結果

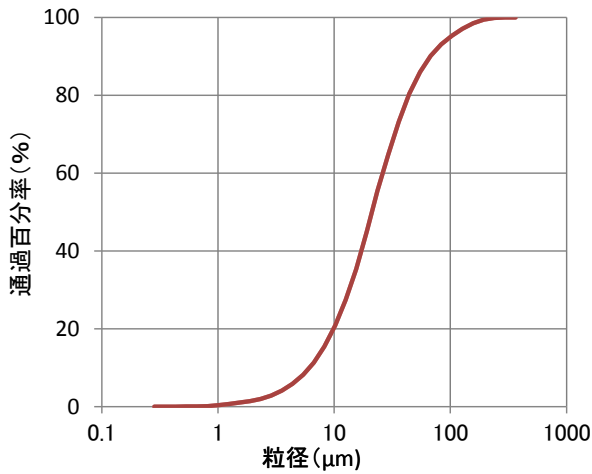


図-4 A ダム下流濁水の粒度分布調査結果

・B ダムを対象にした調査

図-5 に平成 25 年に B ダム貯水池において、濁水が発生した際の下流河川での調査結果を示す。調査はダム管理者が濁度を観測しており、過年度の B ダムにおける濁度-SS 相関関係をもとに整理したものである。図よりダムより 50km 以上下流においても SS が環境基準 (AA~B 類型の河川では、25mg/L 以下) を超過していることが分かる。

A ダム、B ダムにおける調査結果より、河道・水理条件等により異なるが、ダムより数十 km 下流まで濁水の影響が及ぶことを確認した。

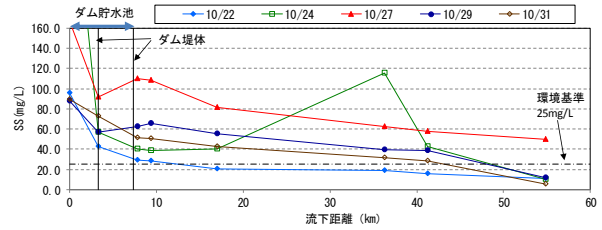


図-5 B ダムにおける濁水調査結果

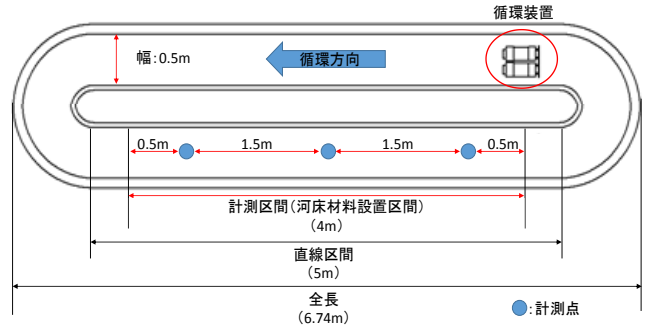


図-6 循環水路概要

表-2 実験ケース一覧

ケース番号	河床材料		平均流速 (m/s)	初期水位 (cm)	実験時間 (h)
	河床材料の粒径	層厚			
Case1	なし		0.23	54.0	48
Case2	10cm	約6.5cm	0.22	50.5	
Case3	10cm, 1cm		0.23	50.0	
Case4	10cm, 1cm, 1mm		0.23	48.5	
Case5	1cm		約3cm	0.25	
Case6	3mm	0.25		45.0	

2. 3 SS 低減メカニズムに関する検討

濁水の流下過程において、SS が低減する現象について確認されたが、そのメカニズムについては十分に明らかとなっていない。そこで、河床材料による SS 低減効果について着目し、実験より SS 低減メカニズムについて検討した。

2. 3. 1 水路実験における実験概要

図-6 に実験に使用した循環水路の概要を示す。当水路は幅 50cm・高さ 70cm であり、循環装置としてポンプ 2 台を使用している。実験時にはポンプの水流などの影響のない区間を計測区間とし、当区間に異なる河床材料を設置し、河床材料ごとの濁質沈降等への影響について検討した。表-2 に実験ケースを示す。計測は、3 点の計測点において、上(水面-5cm)・中・下(底面+5cm)の水深の合計 9 点の濁度を計測した。実験において使用している濁水は浦山ダムの底泥を濁質の粒径が 0.2mm 以下、濁度が約 40NTU になるように調整したものを使用した。図-7~8 に実験に使用した濁水の濁度-SS 相関図を示す。ここで、case1~4 と case5~6 で使用した濁水の濁度-SS 相関が異なるのは、case4 終了後に、濁水回収・河床材料の交換等の作業の際に濁質が流出したため、濁質の追加による濁水の調

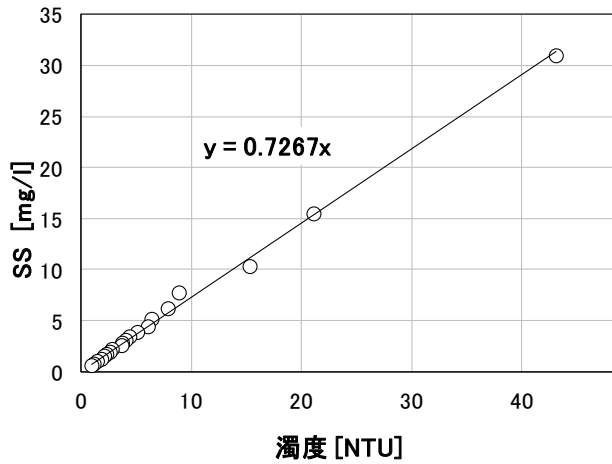


図-7 濁度-SS 相関 (case1~4)

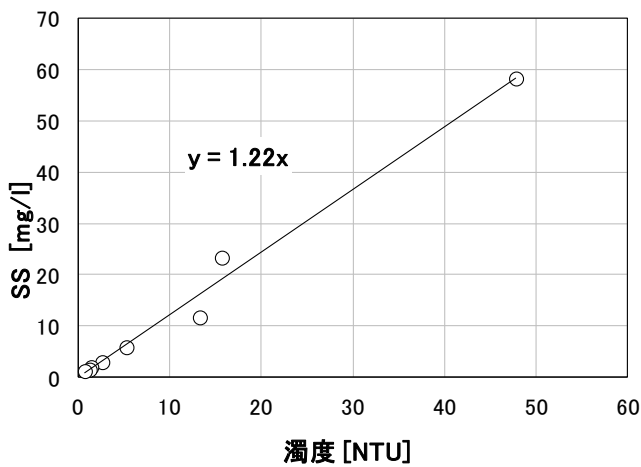


図-8 濁度-SS 相関 (case5~6)

整を実施したことによるものである。

2. 3. 2 水路実験における実験結果

図-9~10 に全実験ケースの SS 経時変化を示す。SS は各計測時間の濁度を全計測箇所でも平均したものから、濁度-SS 相関より算出したものである。図-9~10 より実験の初期条件等が異なるものの、Case1 の河床材料なしのケースでは、SS がほとんど低下していないのに対して、Case2~6 の河床材料ありのケースでは、SS が低下しているとともに河床材料ごとに SS の低下量が異なる。

2. 3. 3 実験結果の考察

SS の計測値の経時変化から SS の低下量には河床材料の影響があると考えられる。そこで実験結果を減少係数 K を用いて整理した。算出方法を式 (2) に示す。各実験ケースにおける減少係数 K は式

(2) をもとに最小二乗法を用いて解析した。解析には Python の数値解析ライブラリである scipy を用いた。また、河床材料ではなく、水路による濁質の低減の影響を考慮し、河床材料なしの実験より得られ

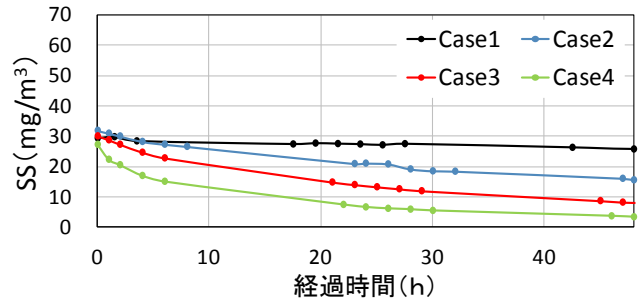


図-9 濁度の経時変化 (case1~4)

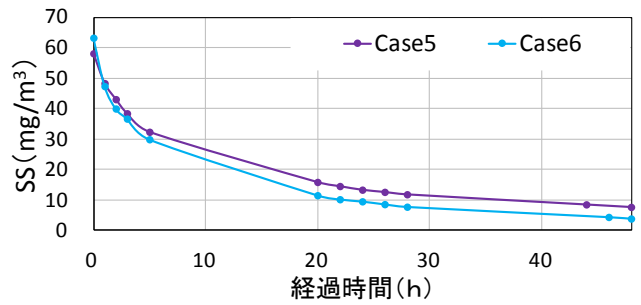


図-10 濁度の経時変化 (case5~6)

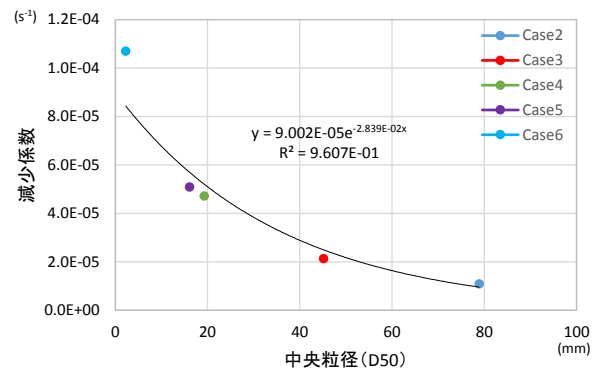


図-11 河床材料中央粒径と減少係数 K

た減少係数をもとに補正した。

$$E = E_0 \exp(-K_0 \Delta t) \quad (2)$$

$$\Delta t = t \times (t_1/t_0)$$

$$K = K_0 - \hat{K}$$

ここで、 E : 経過時間 Δt における $SS(mg/L)$ 、 E_0 : 初期 $SS(mg/L)$ 、 K_0 : 各実験における減少係数、 Δt : 計測区間総流下時間(s)、 t : 実験時間(s)、 t_1 : 循環水路一周のうち河床材料設置区間を流下する時間(s)、 t_0 : 循環水路一周を流下する時間(s)、 K : 補正後減少係数 ($1/s$)、 \hat{K} : 水路の減少係数 ($1/s$) (case1 より算出) を表す。

減少係数と河床材料の粒径の関係を図-11 に示す。図より、河床材料の粒径と減少係数の間に相関関係があることが分かる。そこで、河床材料の粒径の影響を踏まえた新規モデル構築した。新規モデルについて式 (3) (4) に示す。

$$E = E_0 \exp(-KT) \quad (3)$$

$$K = a \exp(-bx) \quad (4)$$

ここで、 T ：流下時間(s)、 a, b ：係数（実験より $a = 9.002 \times 10^{-5}$ 、 $b = 2.839 \times 10^{-2}$ ）、 x ：河床材料の中央粒径(mm)を表す。

既存のモデルは、式 (3) の減少係数を現地調査より算出するのに対し、新規モデルでは式 (4) のとおり河道の中央粒径より算出する。よって、出水やダムからの土砂供給等により河道環境が変化した場合でも適切な減少係数を算出することができると考えられる。

新規モデルおよび実験より算出された係数の適用性について検討するため、ダム下流河川における現地調査結果について既存モデルによる分析を行い、新規モデルによる予測計算との比較を行った。

2. 3. 4 既存モデルによる現地調査結果の分析

A ダム現地調査から観測された SS 低減について既存の減少係数モデルによる分析を行った。既存モデルの減少係数の算出に必要な流下時間 T (s)について、1次元河床変動計算より平均流速を算出し、平均流速と流下距離から流下時間を算出した。

図-12 に現地調査結果を示す。図より、濁水が流下していく過程において、SS が低減することを確認した。また、現地調査結果をもとに設定した区間の上下流端の2地点より減少係数を算出し、減少係数をもとに区間途中の SS を算出した。0km 地点と 9.6km 地点より算出した減少係数では、計算結果と現地調査結果が大きく乖離する結果となった。それを踏まえ、全区間を上流端より 0km~1.4km の区間 1 と 1.4km~9.6km の区間 2 の2つに分け、減少係数を算出し計算を行った。その結果、計算と現地調査結果がほぼ同程度となっている。これより現地調査をもとに減少係数を算出する手法においては調査地点が重要であり、調査地点が異なることにより、減少係数及び SS の計算結果が大きく異なることが分かった。

2. 2. 5 現地調査結果と新規モデルの比較

新規モデルおよび実験より算出された係数の適用性について検討するため、新規モデルを用いた SS 予測計算を実施した。予測計算に必要な河床材料の粒径は流下距離 6km 地点における平成 25 年度の調査結果より中央粒径 30.01mm を用いた。また、現地調査の分析結果を踏まえ、区間 2 を対象とし予測計算を実施した。予測計算結果と現地調査結果の比較を図-13 に示す。図より、新規モデルによる予測計算結果と現地調査結果は概ね同程度の値となっており、これより新規モデルにより濁水の流下過程における SS の低減を概ね予測することが可能であると考えられる。また、区

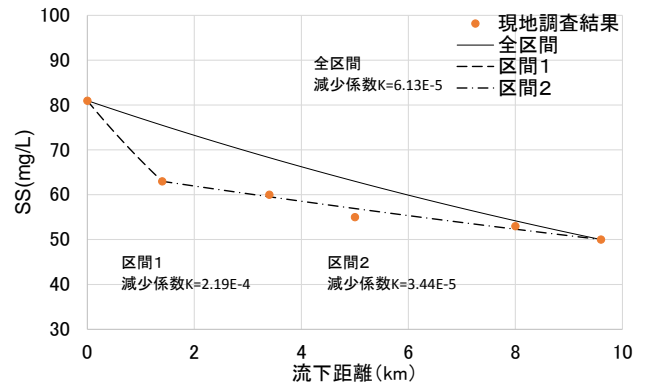


図-12 現地調査結果と既存減少係数モデルの比較

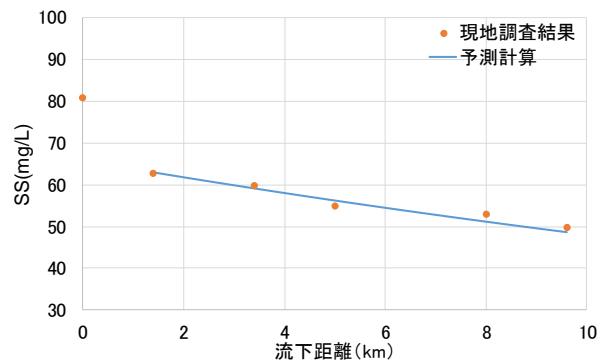


図-13 現地調査結果と新規減少係数モデルの比較

間 2 を対象にした場合は、実験により算出された係数を用いることが可能であるが、区間 1 を対象にした場合、現地調査結果を再現することはできない。よって、係数の適用性について引き続き検討を進める必要性がある。

3. 濁水の影響を受ける生物種群の特定と閾値の推定

3. 1 はじめに

ダムは水や土砂をためる機能を有するため、貯水池の水はしばしば土砂由来の濁質を多く含んだ状態となり、ダム下流における長期的な濁水を発生させることが知られている⁷。それらの対策として、上流からダム貯水池に入る前のきれいな水をバイパスさせダム下流に直接流したり（清水バイパス）⁸、自然状態に近い濁水の流下となるよう取水する層を選択する（選択取水）⁹などの措置がとられる場合もある¹⁰。これらの濁水対策の効果を評価するためには、まず、どのような生物種群、成長段階が濁水の影響を受けやすく、どのような応答様式に注意が必要かについて整理をする必要がある。特に水産業では、濁水がに及ぼす影響について強く懸念されており¹¹、濁水対策の場合にも水産魚を含む魚類を対象とした評価が現実的であ

ると考えられる。

これまでの研究でも、濁水と魚類との関連についての知見は多い。たとえば、Y字水路を用いた濁水/清水選択実験¹²⁾や濁水に対する魚類の致死濃度の検討¹³⁾などが行われている。濁水と魚類との関連をレビューした先行研究^{6),14)}のように、これらを再整理すれば、濁水の影響を受けやすい魚種や応答を特定することができ、濁水管理に資する知見を獲得できる。ただ、既往知見では室内実験による影響検証が多く^{15),16)}、実河川への適用可能性についてはほとんど検討されていない。

そこで、本研究では文献調査による濁水の影響を受けやすい種（濁水に鋭敏に反応する種）の特定とその閾値の推定を行うとともに、全国のダム下流における濁水濃度と魚類の在・不在との関係性を整理することで、濁水の影響を受けやすい種の確認を行った。

3. 2 方法

3. 2. 1 濁水による魚類への影響についての文献調査

「濁水、懸濁土砂、魚類」などのキーワードをもとに論文を検索し、魚種（あるいは分類群）に対する、濁水濃度の影響の有無を整理した。なお、魚類の成長段階（卵、仔魚、稚魚、成魚）によっても濁水濃度に対する耐性が異なることが知られているため¹³⁾、成長段階の情報も収集した。供試魚の体サイズから成長段階が推定できる場合もこれに含めた。

濁水に対する影響項目については、既往文献^{6),11),15)}における分類を参照し、致死的影响、受精・発生阻害（生残率の低下を含む）、忌避行動、遡上阻害、摂食障害（成長率の低下を含む）に分類した。なお、影響がなかった場合の情報も、濁水に対して鋭敏に反応する種類を探索するのに役立つと考え、同様に整理した。

なお、本レビューでは濁水濃度についてのみ整理し、濁水の継続時間⁶⁾については対象外とした。その理由は、濁水の継続時間に関する記述が少ないことに加え、河川やダムにおける水質の定期観測データも濁水濃度に着目して整理されており、対応が良いと考えたからである。

3. 2. 2 ダム下流の濁水濃度と出現魚種との関連

全国35基のダムを対象として、ダム下流の濁水濃度と魚種の在・不在との関連を調べた。ダム下流における魚種の在・不在については河川水辺の国勢調査（1-4巡目）を利用し、ダムに最も近い下流地点のデータを用いた。なお、魚類データは濁水の発生しやすい夏から秋季を経た、秋季データのみを用いた。ダム下流の濁水濃度については水文水質データベースを参照し、ダムからの放流水または最もダムに近い下流地点において月1~2回計測された濁度の年間平均値（以下、年平均濁度）を利用した。これは本研究が濁水の長期化を念頭に置いたものであり、平均的な濁りに対する魚類の応答を解析しようとしたためである。これらのデータから、濁水濃度に鋭敏に反応する魚種を探索するため、各魚種が確認された地点における年平均濁度の範囲を求めた。

3. 3 結果と考察

影響項目ごとに整理すると、致死的影响は成魚では数千 mg/L 程度の高濁度の条件下で生じるため（図-14）、忌避行動^{13),15),24)}などを併せて考えると、実河川ではあまり生じにくいと考えられる。ただし、仔稚魚については数百 mg/L という1オーダー低い濁度であっても生残率が低下するという報告もあり¹³⁾、注意が必要だといえる。受精・発生阻害はほとんど確認されなかったが、0~80mg/Lの条件下で濁度が高いほど発眼卵の重量の減少が確認されている¹¹⁾。濁水によるストレスは、アユの事例で濁水の継続時間によって変

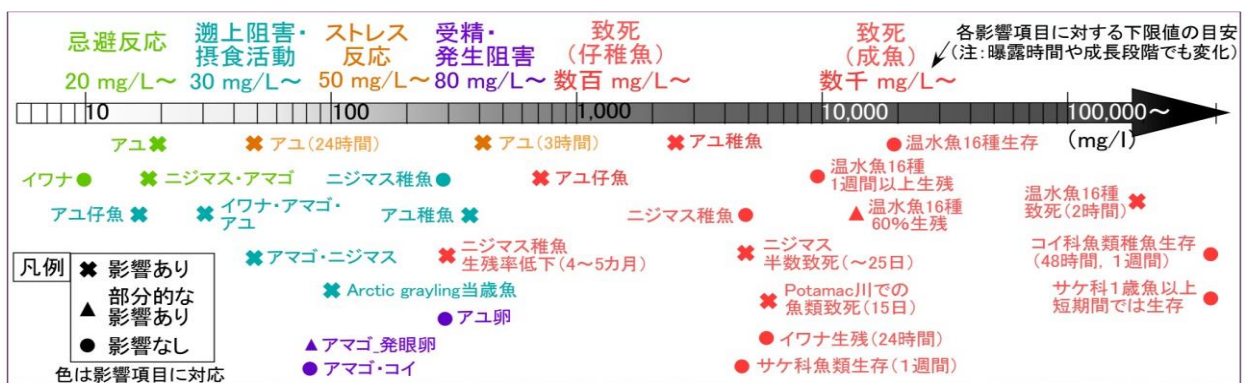


図-14 既往文献による濁水濃度と魚類の応答との関連図^{11),13),16)-23)}

化するという報告があり、3 時間の場合には 300mg/L でストレス反応を示したのに対して、24 時間の場合には 50mg/L であってもストレス反応を示した²²⁾。このように、ダムからの濁水が長期化する場合には、このような時間の効果についても考慮する必要があるといえる。比較的low濁度での反応として遡上阻害・摂食障害(約 30mg/L~) や忌避行動(約 20mg/L~) が挙げられる。このうち忌避行動は、その場所から魚類が消失するという点で致死的影响と類似の効果を及ぼすため注意が必要であるという指摘もあるため¹⁵⁾、ダム下流における濁水の流下の影響を考慮するとき重要な視点となる。

濁度の影響は、海外だけでなく日本でも水産有用魚種(イワナ、アマゴ、アユ、ニジマス等) について検討事例が多かった(図-14)。これらの多くが冷水性魚類だが、コイ科魚類のような温水魚と比べると、濁水に対する感受性は高い傾向が見られた¹¹⁾。極端な例では、タナゴ類の一種では濁水を好む例も報告されており²⁵⁾、温水魚は比較的濁水に対する耐性が高いと考えられる。以上のことから水産有用魚種の忌避行動に着目したモニタリングが重要であることが示唆される。ただし、イワナやアマゴは渓流域に生息するため、ダム下流の濁水の影響を考える際の一般化が困難である。上記の観点から中流の代表的魚種であるアユの忌避反応を対象にすることが適切だと考えられる。

上記の考察は、河川水辺の国勢調査と水文水質データベースのデータを用いた解析でも支持された。すなわち、アユやアマゴなどの水産有用魚やカジカなどの冷水魚は年平均濁度が 16mg/L の範囲で出現したのに対し、コイ科魚類のオイカワやウグイなどの温水魚はそれぞれ 22mg/L、32mg/L の相対的に高い濁度でも確認された(図-15)。もちろん、各魚種の分布する流程の違いなど、濁度以外の条件も混在している可能性も

考えられるが、室内実験で濁水に対する感受性が高いと推定されたアユが低い濁度の範囲に限られたことは興味深い。

ただし、出現範囲の年平均濁度の最大値は、既存知見よりも低い(図-14 参照)。これは水文水質データベースに収録されている水質データが月 1 回の計測頻度によるものが多いことや、雨天時を回避して計測したことも影響していると考えられる。また、年平均ではなく、最大濁度が影響している可能性も考えられる。したがって、このデータはダム下流の魚類に影響を及ぼす閾値としてではなく、相対値として、どの魚種が濁度に対する感受性が高いかの推定に用いるのが適切だろう。

また、実河川における濁度と魚類の応答の関連の理解のためには、実河川スケールの実験などで検証することが必要である。なぜなら、Y 字管のように濁水と清水を選択できるような条件は野外ではまれで、忌避しても濁水から脱出できない場合には、異なる反応を示すことも考えられる。また、濁質は均一に分布しているわけではなく、垂直方向にも水平方向にも偏りがあり²⁶⁾、局所的に低濁度の空間で濁水をやり過ごす可能性もありうる。事実、野外において河川区間スケールで濁水濃度とアユの忌避行動を調べた事例では、アユが忌避行動を起こす濃度よりも高い濃度で忌避行動が確認された事例もあるため²⁷⁾、実河川スケールにおける、濁水濃度と魚類の行動との関連性の理解のために、知見を集積する必要がある。

4. 濁水の濃度に対するアユの行動の変化に関する実河川スケールでの実態の解明

4. 1 実験の背景

前項の 3 によって得られた成果から(図-14)、アユ

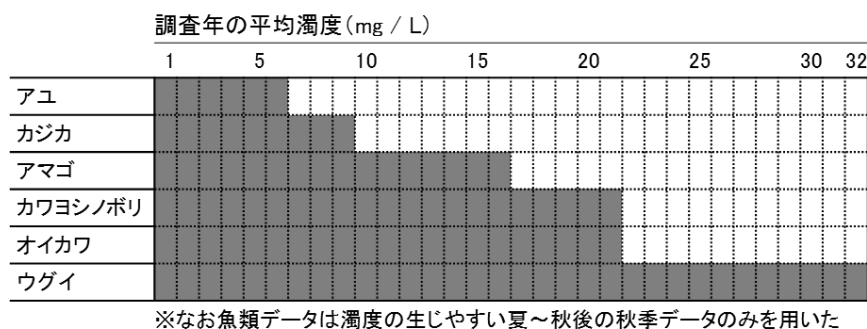


図-15 各魚種の年平均濁度に対する出現範囲。暗色部分の範囲で各魚種が出現することを示す。

が濁りの影響を受けやすく、日本の有用水産魚種の一つでもあり、既存の知見も多いことが示された¹¹⁾⁷⁾。さらに、全国のダム下流を対象とした在・不在の解析結果から(図-15)、年平均濁度が高い場合に、アユが不在の可能性が高くなることが示唆された。しかし、このように報告例が多いアユに関しても、実河川スケールで、濁水に対し行動の変化を検証した事例はわずかである²⁷⁾。

そこで、本研究では、実河川を模した野外の実験施設を用いて、流量とSS濃度を制御した下で、濁水の濃度に応じたアユの行動の変化について、実河川に準じるスケールにて検証を行った。

4.2 実験方法

実験は、岐阜県各務原市の自然共生研究センターにある実験河川の一区間にて行った。区間の延長は、縦断方向に濁水の濃度勾配が発生すると考えられる約200mとした(図-16)。実験区間の両端には、アユが実験区間外に出ないように、仕切り網を設置した。川幅は全区間において約2mである²⁸⁾。実験の時期はアユの遊泳行動が活発な8月とした。実験区の準備として、事前に以下の通り条件を設定した。実験中の流速および水深は、それぞれ約0.4m/sおよび約30cmに維持した。河床に生育する水草は、アユの本来の生息場には少なく、濁度の分布にも影響を及ぼすと考えられたため除去した。また、観測者が魚の視界に入らないよう実験区全体に遮光ネット(遮光率50%)を設置した。実験期間中の水温は、概ね25°C前後であり、アユの適温範囲内だった。

実験時の濁りの条件について、以下に記載する。はじめに、実験区間の最上流に給砂装置(マルタニ施工社製)3台を設置し、各給砂口に粘土(笠岡特殊粘土、粒径約63μm)を投入して、装置から自動で一定量の粘土が実験河川に供給されることで濁水が発生するように設定した。実験で発生させる濁水の濃度および継続時間は、3台の装置による性能をもとに、平均約100mg/L程度、約24時間で設定した。

また、実験には養殖アユを用いた。購入したアユは、実験河川の水質に馴致させるため、実験前の少なくとも2日間以上、実験河川の別の区間に設置した籠内で蓄養した。そして、実験前に、アユの行動を追跡するため、アユにテレメトリーのタグを取り付けた。テレメトリーとは、タグ付きの魚類などが河川のある横断地点に設置したアンテナを通過した際の通過時間とタグ番号を自動で計測するシステムである²⁹⁾。タグは

Biomark社製の12mmのもの(図-17a)を用い、魚類・甲殻類用麻酔剤(FA100)でアユを麻酔させた後、素早く注射針で腹腔内に挿入した(図-18)。タグ装着後は再び籠に戻した。

また、アンテナはBiomark社製の0.3m×0.8mの長方形型(図-17b)を用い、横断方向に2つ並べて取り付けて隙間を土嚢で埋めることで、その地点を通過したタグ付きアユが確実にアンテナで読み取れるようにした。上記のアンテナを設置した地点を実験区間の最下流付近から50m間隔で4か所設けた(図-16)。各地点には、ワイパー式メモリー濁度計

(JFE Advantech社製、ACLW-USB)を1台ずつ設置し、実験中10分間隔で濁度を自動計測した。計測した濁度は、同時刻に採取した濁水のSS濃度をもとに、SS濃度に変換した。

実験当日、はじめに清水状態にて、アンテナによって区切られた3区間にてアユを10匹ずつ、計30匹放流した(図-16)。放流から2時間程度経過し、アユの

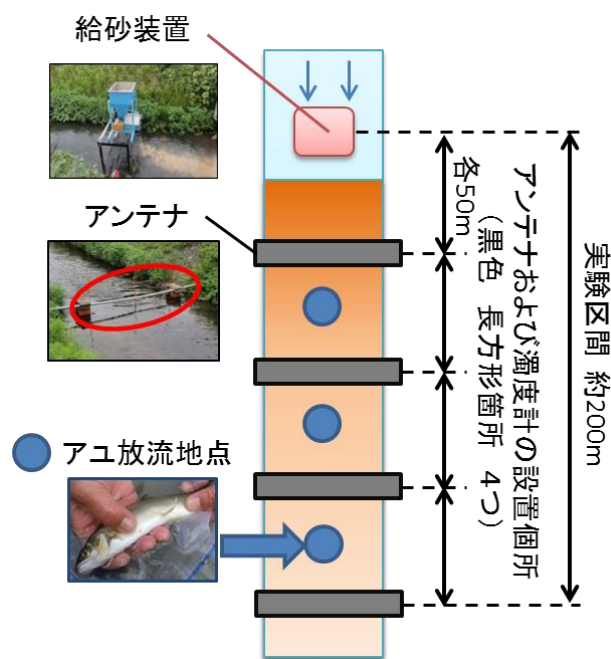


図-16 実験区間における給砂装置、アンテナ、濁度計の設置箇所およびアユの放流地点

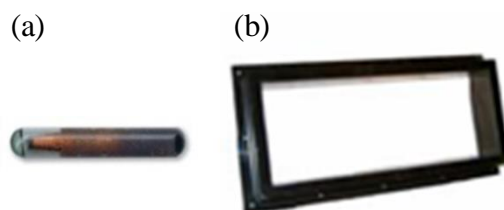


図-17 (a) 12mm タグ (b) 長方形型アンテナ(ともに Biomark 社製)

移動が落ち着いたことを確認した後、最上流から濁水を約 24 時間発生させた。濁水の発生を止めた後も、河川中の濁りが収まるまで 12 時間の間、アユの行動をテレメトリーにて観測した（合計 36 時間）。これら一連の実験を 8 月 24～25 日と 8 月 27～28 日の 2 回実施した。

実験後、アユの下流から上流への移動（以下、上流移動）および上流から下流への移動（以下、下流移動）とその時の SS 濃度との関係を分析した。これらのデータをもとに、SS 濃度に応じたアユの行動の変化を把握するため、SS 濃度に対する上流移動および下流移動の頻度のヒストグラムを作成した。また、上流移動および下流移動が発生したときの SS 濃度に違いがあるかを t-test を用いて解析した。解析には、統計ソフト Stat-View 5.0J を用いた。

4. 3 実験結果

濁水が収まるまで（36 時間分）の濁水発生地点からの距離と観測された SS 濃度との関係は図-19 のとおりだった。この結果、1、2 回目とも 50 m 地点で平均約 50 mg/L の SS 濃度が観測され、下流にいくにしたがい減衰する傾向が見られた。

実験区の濁水発生中の 24 時間、および発生後、濁りが収まる 12 時間の計 36 時間の間のアユの上流移動、下流移動の頻度を計測した結果は図-20 のとおりとなった。この結果、上流移動の頻度のピークが SS 濃度が 0～10 mg/L で発生したのに対し、下流移動のピークが 20～30 mg/L のピークで発生した。ただし、SS 濃度が 60 mg/L 以上では上流移動、下流移動ともに発生しなかった。また、双方の移動発生時の SS 濃度の平均値を算出し t-test を行った結果、下流移動が発生した時の SS 濃度が、上流移動が発生した時よりも高かった（図-21、 $p < 0.016$ ）。

4. 4 考察

実験結果から、アユは、平水時に濁水が発生した場合、SS 濃度が低濃度（0-10 mg/L）では上流へ、中濃度（20-40 mg/L）では下流へ、高濃度（> 60 mg/L）では移動しないことが予想される。このように、河川で発生する濁水は、室内実験のケースと同様、SS 濃度に応じて、アユの行動の変化を誘発させる可能性があることが確認できた。高濃度でアユが移動しなかった理由としては、アユが遊泳時にエラが濁質で詰まり窒息す



図-18 アユへのタグ装着箇所

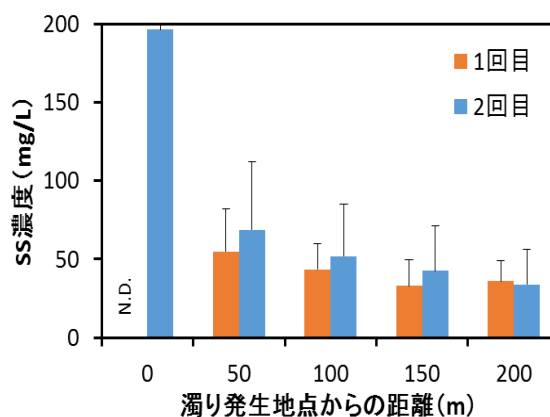


図-19 濁り発生地点からの距離と SS 濃度との関係（棒グラフは平均値、エラーバーは標準偏差（2回目 0m の標準偏差は表示されていないが、約 206）、N.D. はデータなし（1 回目、0m）を示している）

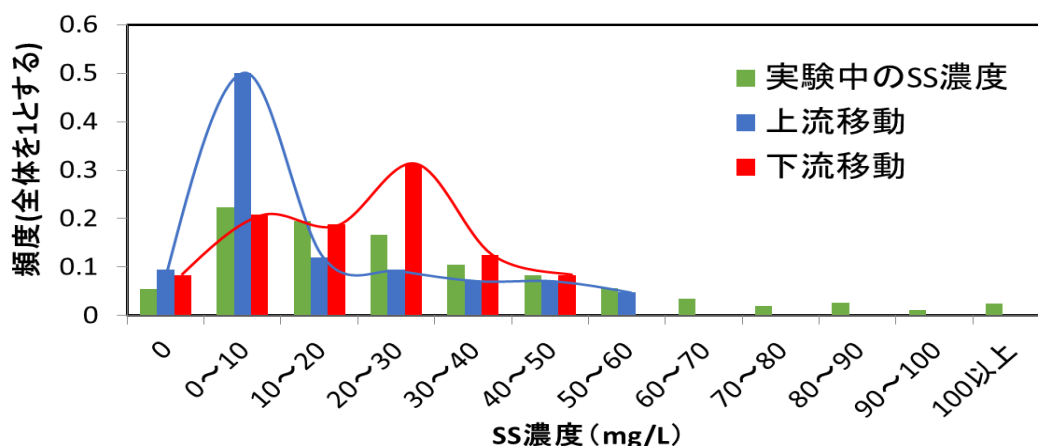


図-20 SS 濃度に対する上流移動、下流移動のヒストグラム

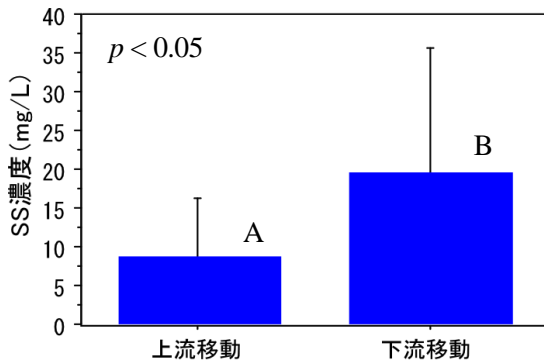


図-21 上流移動、下流移動発生時のSS濃度 (A、Bは両者に有意差がある ($p < 0.05$) ことを示している)

るおそれ³⁰⁾を回避したため、等が考えられる。ダム下流で平水時に濁水が長期化した場合、2.1の成果から、本実験と同様に下流にいくにしたがい濁水の濃度の減衰が起これると考えられる。このため、アユについて、高濃度の上流(ダム直下)から下流への移動が生じやすいことが示唆される。ただし、濁水のSS濃度に応じて応答が異なる(60 mg/L以上で遊泳行動の鈍化と考えられる行動を示す、等)点も本実験で示されたので、実河川では、SS濃度の時間経過および場所による変動に注意して、濁りに対するアユの行動の変化を評価する必要があるといえる。そして、ダムから濁水が放流される場合の、SS濃度の制限または継続時間の短縮を図る技術の向上によるこれらの影響の緩和が期待される。

5. まとめ

本研究では、ダム下流における濁水の流下過程とそれに対する魚類への影響について基礎的な研究を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 濁水の流下範囲について、ダム管理者の観測データや現地調査結果から、河道・水理条件等により異なるが、数十km下流まで濁水の影響が及ぶことを確認した。
- 2) 濁水流下時のメカニズムとして、河床材料による濁質の低減を確認し、濁質低減メカニズムを踏まえた分布予測モデルを構築した。
- 3) 魚類を対象として、濁りに反応する魚種、そのときのSS濃度、反応の内容について、既存の知見を体系的に整理した結果、濁りの影響を受けやすい魚種(アユ、アマゴ等)を確認し、その中で中流の代表的魚種であるアユが濁水の影響を調査するための魚種に適していることが示唆された。全国35ダムの下流を対象とした解析でも、上記と同じ結果が得られた。

- 4) アユを対象として、自然共生研究センターの実験河川にて、24時間濁りを発生させた場合の行動を観測した結果、20-40mg/L程度のSS濃度でアユの下流への移動が生じやすくなる等、SS濃度に応じて、アユの行動の変化を誘発させる可能性があることを確認した。

謝辞：

2.のダム下流における濁水に関する現地調査は、国土交通省、地方整備局等にご協力いただいた。また、4.で使用したテレメトリーシステムは、九州大学の流域システム工学研究室よりアンテナ、リーダー等の機材をお借りして実現したものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 関根正人：移動床流れの水理学、共立出版
- 2) 角哲也、井口真生子、藤井智康：貯水池下流部に堆積した微細粒土砂の巻き上げ特性に関する実験的研究、水工学論文集、Vol.50、925-930、2006
- 3) 田村広丈、首藤伸夫：北上川上流域における流出と濁質発生量の解析、水理講演会論文集、Vol.31、179-184、1987
- 4) Kirk J.T.O.: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge, 401, 1983
- 5) (財)ダム水源地環境整備センター：ダム事業における環境影響評価の考え方、pIII-118～III-120、2000.3
- 6) Newcombe C P, MacDonald D D: Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems, North American Journal of Fisheries Management, Vol. 11, pp. 72-82, 1991
- 7) 中村昭、今村瑞穂、横道雅己：多目的ダム貯水池における濁水長期化調査、水理講演会論文集、24、pp. 259-264、1980
- 8) 原田稔、寺田昌史、出野尚、葛岡昌基：貯水池のバイパス排砂システムによる濁水長期化軽減効果の検討、水工学論文集、40、pp. 613-618、1996
- 9) 堀田哲夫、陳飛勇、山下芳浩、東海林光：成層型ダム湖における濁水特性と選択取水効果に関する事例的研究、水工学論文集、46、pp. 1079-1084、2002
- 10) 池淵周一(編著)：ダムと環境の科学I ダム下流生態系、京都大学出版会、285 pp、2009
- 11) 日本水産資源保護協会：観光が河川生物および漁業に及ぼす影響判断するための「判断基準」と「事例」、62pp、1994
- 12) 本田晴朗：アユの遡河行動におよぼす濁りおよび水温低下の影響、海洋科学、15、pp. 223-225、1983

- 13) 藤原公一：濁水が琵琶湖やその周辺河川に生息する魚類へ及ぼす影響、滋賀県水産試験場研究報告、46、pp. 9-37、1997
- 14) 堀雅文、若林洋、山本圭介、加藤茂、小島紀徳：ダム排砂が魚介類に与える影響の評価、日本海水学会誌、61、pp. 352-359、2007
- 15) Waters T F：Sediment in streams: sources, biological effects, and control, American Fisheries Society, Maryland, 251pp., 1995
- 16) Herbert, D. W. M., Wakeford, A. C.: The effect of calcium sulphate on the survival of rainbow trout. *Wat. Waste Treatm. J.*, 8, pp. 608-609, 1962
- 17) Kemp H A: Soil pollution in the Potomac River basin. *Journal (American Water Works Association)*, 41, pp. 792-796, 1949
- 18) Herbert, D. W., Merckens, J. C.: The effect of suspended mineral solids on the survival of trout. *International journal of air and water pollution*, 5, pp. 46-55, 1961
- 19) 木下篤彦、水山高久、藤田正治、澤田豊明、吉濱守：ヒル谷における人為的排砂のイワナへのインパクト、河川技術に関する論文集、7、pp. 363-368、2001
- 20) Wallen, I. E. : The direct effect of turbidity on fishes, *Bulletin of the Oklahoma Agricultural and Mechanical College*, 48, 27pp. 1951.
- 21) Redding J M, Schreck C B, Everest F H : Physiological effects on coho salmon and steelhead of exposure to suspended solids, *Transactions of the American Fisheries Society*, 116, pp.737-744, 1987
- 22) 安房田智司、武島弘彦、鶴田哲也、矢田崇、井口恵一朗：短時間・長時間の濁りに対するアユのストレス応答、水産増殖、58、pp.425-427、2010
- 23) McLeay, D. J., Ennis, G. L., Birtwell, I. K., Hartman, G. F.: Effects on Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) of prolonged exposure to Yukon placer mining sediment: a laboratory study. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1241, pp.30-34, 1984
- 24) 本田晴朗：サケ科魚類稚魚の濁りに対する行動、電力中央研究所報告、483024、12 pp、1984
- 25) 関根雅彦、浮田正夫、中西弘、内田唯史：河川環境管理を目的とした生態的モデルにおける生物の環境選好性の定式化、土木学会論文集、503/II-29、pp.177-186、1994
- 26) 野満隆治、軽部末藏、川口武雄：河川の横断面に於ける鹽分並に浮游沙泥の分布と横流（阿蘇黒川の研究、第1報）、地球物理、6、pp.16-36、1942
- 27) 加藤康充、小野田幸生、森照貴、萱場祐一：河川での低濃度濁水の発生に対するアユの反応事例：野外における河川区間スケールでの実験、応用生態工学、18、pp.155-164、2015
- 28) 萱場祐一：野外研究サイトから、日本生態学会誌、64、265-270、2014
- 29) Kano Y., Kawaguchi Y., Yamashita T., Sekijima T., Shimatani Y., and Taniguchi Y.: A passive integrated transponder tag implanted by a new alternative surgical method: effects on the oriental weather loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) and application in a small irrigation system. *Landscape Ecological Engineering*, 9, 281-287, 2013
- 30) 村岡敬子、天野邦彦、土居隆秀、久保田仁志、三輪準二：高濃度濁水下におけるアユの生存率と懸濁物質の粒度組成の関係、魚類学雑誌、58(2)、141-151、2011

BASIC RESEARCH ON THE FLOW-DOWN PROCESS AND IMPACT ABOUT TURBID WATER AT THE DOWNSTREAM OF A DAM

Research Period : FY2014-2016

Research Team : Aqua Restoration Research Center
River and Dam Hydraulic
Engineering Research Team

Author : KAYABA Yuichi
MIYAGAWA Yukio
ONODA Yukio
SUEYOSHI Masanao
HAKOISHI Noriaki
ISHIGAMI Takayuki
NAKANISHI Satoru
MOTOYAMA Kenshi

Abstract : Long-term persistence of turbid water is confirmed at downstream of a dam in Japan. The influence on aquatic lives of rivers such as fishes by the turbid water have been concerned about. Moreover, it is necessary to mitigate the effect of turbid water for aquatic lives. Because, however, there is little knowledge how turbid water flow down a river, it is difficult for river managers to predict the concentration and the duration of the turbid water. In this study, we clarified the mechanism of turbid water flowing down along a river system. Following these works, we constructed a hydraulic model to predict distribution of turbid water downstream of the dam. Furthermore, we identified the species affected by turbid water. And then we confirmed possibility to change the movement of fishes by the concentration of suspended solid.

Key words : turbid water, reduction coefficient, a sweetfish, telemetry, concentration of suspended solid