

排砂に伴う濁水によるイワナへの影響評価法

AN EVALUATION METHOD OF THE IMPACTS ON CHAR OF TURBID WATER BY SEDIMENT FLUSHING FROM DAMS

木下篤彦¹・藤田正治²・水山高久³・澤田豊明⁴

Atsuhiko KINOSHITA, Masaharu FUJITA, Takahisa MIZUYAMA and Toyoaki SAWADA

¹学生会員 農修 京都大学大学院生 森林科学専攻(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 農博 京都大学助教授 森林科学専攻(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁴正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所穂高砂防観測所(〒506-1422 岐阜県吉城郡上宝村中尾)

In this study, we discuss about the impacts on fish of sediment flushing from dams by points of turbid water. The aims of this study are to make a model for evaluation for the impacts of the increase of suspended solids concentration on Char(*Salvelinus leucomaenis*) and to check the feature of the model. Firstly, we have examined the variations of concentrations of dissolved oxygen and suspended solids of the three sites where sediment flushes were done. Secondly, we have made the model. We have thought that if suspended solids concentration increased, the uptake volume of oxygen by fish decreased by the adhesion of the sediment on the gills. By using the model, if we know the time variation of concentrations of suspended solids and dissolved oxygen, we can calculate the time variation of the rate of dead fish or fish in asphyxia and the adhesion area of sediment on the gills, and can evaluate no impact time on chars, and have found that if dissolved oxygen concentration decreased, more chars died earlier.

Key Words : sediment flushing, fish, suspended solids concentration, dissolved oxygen concentration

1. はじめに

ダムからの排砂がイワナに与える影響は水質の点から評価することが重要であり、そのなかでも溶存酸素濃度と浮遊物質濃度がイワナの生死を左右する上で重要であり、影響評価のための指標となりうる。

これまで、水質の点ではいくつかの知見が得られている¹⁾⁹⁾。溶存酸素濃度について Shepard¹⁾はカワマスを用いて水槽実験を行い、溶存酸素濃度と致死率との関係を調べ、尾崎²⁾は Shepard¹⁾の実験結果より、カワマスは溶存酸素濃度が 1.7mg/l まで低下すると窒息症状を起こし、0.5mg/l まで低下すると即死状態になると述べている。浮遊物質濃度については、村岡・角³⁾、Newcombe and Macdonald⁴⁾、木下ら⁵⁾によって研究されており、村岡・角³⁾はアユを用いて水槽実験を行い、浮遊物質濃度と生存率との関係を調べ、Newcombe and Macdonald⁴⁾は、浮遊物質濃度とその継続時間の積の自然対数をストレス・インデックスと定義し、浮遊物質濃度の増加による魚類への影響度をランク付けし、ストレス・インデックスと影

響度との関係を求め、木下ら⁵⁾は Newcombe and Macdonald⁴⁾の手法がイワナへの影響評価に適用できることを現地実験によって示した。溶存酸素濃度の低下と浮遊物質濃度の上昇の両方の影響について、Garric *et al.*⁶⁾は水槽実験から溶存酸素濃度、浮遊物質濃度と致死率との関係を調べ、角⁷⁾はこの結果から溶存酸素濃度が 3mg/l 以下になると浮遊物質濃度に関わらず危険であると述べている。浮遊物質濃度の増加と魚類への影響についての研究の中でも Newcombe and Macdonald⁴⁾によるストレス・インデックスによる評価方法は使い易いという点から排砂の影響評価にはよく用いられているが⁵⁾⁷⁾⁸⁾、影響度とストレス・インデックスとの関係性に物理的意味合いが薄いこと、大きい浮遊物質濃度が短時間続くのと小さい浮遊物質濃度が長時間続くのが同じ影響度になってしまうこと、などの問題点もある。

この他、浮遊物質濃度の増加に対する魚類の抵抗行動については尾崎²⁾、Servizi and Martens⁹⁾が研究している。

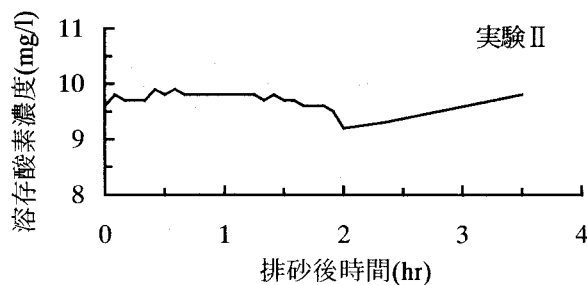


図-1 溶存酸素濃度の変化

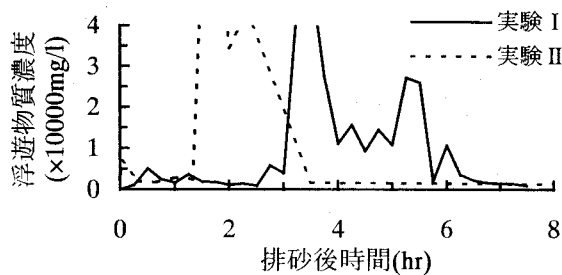


図-2 浮遊物質濃度の変化

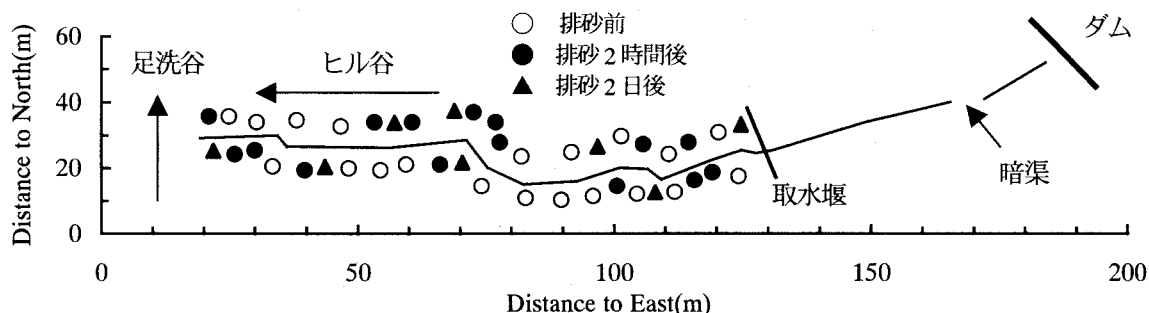


図-3 イワナの生息分布の変化

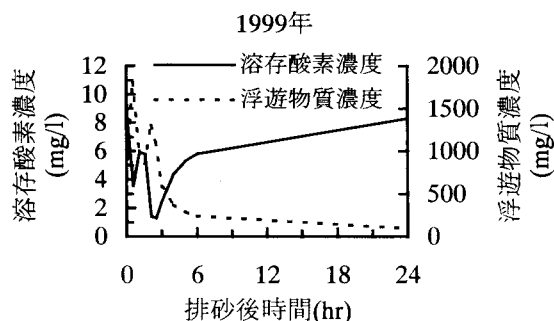


図-4 熊取沢での排砂後の影響データ

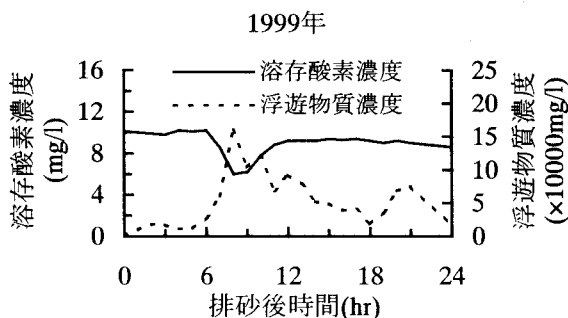


図-5 黒部川での排砂後の影響データ

尾崎²⁾は呼吸水流の方向は周期的に逆転すると述べ、この運動を洗浄運動と呼んでいる。Servizi and Martens⁹⁾はこの運動は酸素交換を潤滑するために行われ、エラをきれいにすると述べている。

本研究では、まず、実際に排砂が行われているヒル谷、熊取沢、黒部川での排砂後の溶存酸素濃度、浮遊物質濃度の変化と魚類への影響についての実態の一例を紹介する。次に、水質の点で、浮遊物質濃度がある一定量を越えて増加すると、エラへの土砂の付着によってイワナの酸素摂取量が減少し窒息して死ぬと考え、影響評価のためのモデルを作る。これを用いて清水中の致死率の変化を求める方法を示すとともに一定の浮遊物質濃度のもとでの許容排砂時間のグラフを提示する。最後にヒル谷と黒部川の排砂に本手法を適用し、魚類への影響について考察する。

2. 排砂の実施例

本研究では排砂の実施例としてヒル谷、熊取沢、黒部

川での排砂を例に挙げる。ヒル谷は神通川水系蒲田川上流の足洗谷流域の源頭部に位置し、その流域面積は0.85km²である。ヒル谷のダムは京都大学防災研究所穂高砂防観測所の調査研究用に設置され、ダムの高さは4.7m、幅は7.5mで、左右には排砂ゲートが2つある。このダムは1年に1～2回排砂が行われており、さらに1997年からは排砂に際して水質、河床変動、魚類の生態調査などを行っている。これまで6回の実験が行われ、実験Ⅰ～Ⅵの流量はそれぞれ0.026, 0.080, 0.050, 0.049, 0.075, 0.015 m³/s、空隙も含めた排出土砂量は20, 49, 25, 40, 50, 32 m³であった。実験Ⅱ, Ⅳでは溶存酸素濃度の変化を、実験Ⅰ, Ⅱ, Ⅴでは浮遊物質濃度の変化を、実験Ⅱ, Ⅳ, Ⅴではイワナの生態調査をそれぞれ排砂前後に行っている。熊取沢は信濃川水系福山川支流に位置し、ゲート付き砂防ダムである福山川第3号砂防ダムからの排砂が行われている。ダム上流の流域面積は1.4km²、ダムの高さは9.0m、堤長は32.65mである。このダムが1995年に竣工して以来、2002年までに4回の排砂が行われている。黒部川での排砂は貯水ダムの出し平ダムで行われている。黒部川の流域面積は682km²、ダムの高さは76.7m、堤頂長は136.0m

である¹¹⁾。このダムでは1991年に初めて排砂を実施してから1999年までに計8回の排砂を実施している¹¹⁾。

図-1にヒル谷で行われた流量 $0.080\text{m}^3/\text{s}$ 、排砂量 49m^3 の実験IIでのダム下流180m付近のプールにおける排砂後の溶存酸素濃度の変化を、図-2に流量 $0.026\text{m}^3/\text{s}$ 、排砂量 20m^3 の実験Iと実験IIにおけるダム下流110m付近のプールでの浮遊物質濃度の変化を示す。図-3に実験IVでの取水堰から足洗谷との合流点までの全イワナの生息分布の変化を示す。白丸が排砂前の分布を、黒丸が排砂2時間後の分布を、三角が排砂2日後の分布を表している。図-4に熊取沢で1999年に行われた排砂による溶存酸素濃度、浮遊物質濃度の変化を示す¹⁰⁾。ただし、熊取沢でのデータはダム下流200mでのものであり、このときの流量は $0.06\text{m}^3/\text{s}$ 、空隙も含めた排出土砂量は $449\text{m}^3/\text{s}$ であった。図-5に黒部川での1999年に行われた排砂による溶存酸素濃度、浮遊物質濃度の変化を示す¹¹⁾。黒部川でのデータはダム直下のものであり、排砂開始時の流量は $341.0\text{m}^3/\text{s}$ 、排出土砂量は70万 m^3 であった¹¹⁾。

(1) ヒル谷

図-1では、排砂直後はほとんど溶存酸素濃度が低下していないが、2時間後に低下している。これは観測地点の上流のプールが土砂で埋まったためと考えられる。しかし、全体的に溶存酸素濃度の低下量は小さい。これは、ヒル谷では溶存酸素濃度を下げる一因となると思われる堆積土砂中の有機物が毎年の排砂によって排出されていることが一つの原因だと考えられる。図-2では流量の多かった実験IIでは1.5時間後、実験Iでは3時間後に浮遊砂濃度が急激に上昇し、レンジオーバーしている。これは、掃流砂がプールに堆積することにより水深が浅くなり採水ビンに掃流砂の一部が混入したためである。この部分を除くと掃流砂が来る前の浮遊物質濃度はおよそ $2000\text{mg}/\ell \sim 4000\text{mg}/\ell$ 、掃流砂が通過したあとは $2000\text{mg}/\ell \sim 10000\text{mg}/\ell$ 程度である。図-3から排砂2時間後まではほとんど生息分布に影響はないが、2日後にはかなりのイワナが下流に流されている。2時間後には排出土砂のうち、掃流砂の移動堆積層の先端が取水堰付近であったことから、このときには取水堰より下流のイワナには濁水の影響しか与えられていない。したがって、濁水がイワナに与える影響は小さいと考えられる。また、2日後には掃流砂の移動堆積層はすでに足洗谷との合流点に到達していたことから、プールの埋没によるハビタットの消失がイワナの生息分布に大きな影響を与えたと言える。

(2) 熊取沢

図-4から熊取沢では排砂による溶存酸素濃度への影響が大きいことが分かる。この理由としては、ダム堆積土砂中に2価鉄が0.7%含まれており、片岡ら¹²⁾の黒部川での排砂についての調査と同様にここでも2価鉄が溶存

酸素濃度を下げる原因となっていることが分かった。浮遊物質濃度については排砂後に急激に上昇するが、最大でも $1800\text{mg}/\ell$ 程度であった。

(3) 黒部川

図-5より排砂後の溶存酸素濃度の低下は小さかったことが分かる。1994年の排砂でダム直下において溶存酸素濃度が $0.0\text{mg}/\ell$ となって¹³⁾以後は、ほぼ毎年排砂を行っていること、流量の多い時期に排砂を行うようになったこと¹⁴⁾が、溶存酸素濃度の低下を防いでいるものと考えられる。浮遊物質濃度については、排砂後に急激に上昇していることが分かる。

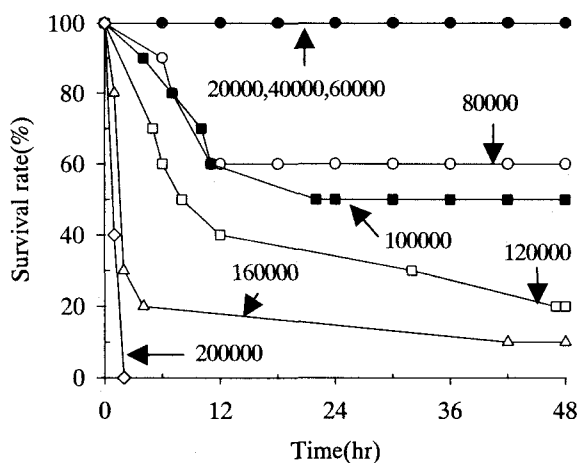
3. 濁水の影響評価法

(1) エラに付着する土砂の粒径

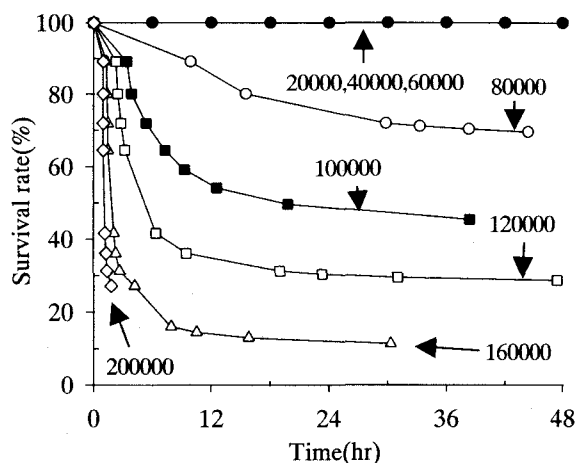
イワナのエラに付着する土砂の粒径を求めるために以下のような実験を行った。まず溪流に縦40cm、横32cm、高さ28cmのかごを沈め、5匹のイワナを放流し、 $8.3\text{g}/\text{s}$ の割合で20分間かごの中に給砂を行い、給砂後にエラの解剖を行い、土砂が付着しているエラの面積割合を調査した。この条件では土砂濃度は $10000\text{mg}/\ell$ 程度となり、Newcombe and Macdonaldの研究⁹⁾によるとイワナには生理的ストレスが生じる程度の影響がある。給砂に用いた砂はパルクレー、DLクレー、8号砂、7号砂、5号砂で平均粒径はそれぞれ $0.009, 0.029, 0.149, 0.283, 0.488\text{mm}$ である。結果は、パルクレーで5.0%、DLクレーで2.0%、8号砂で1.0%の面積の土砂の付着が見られたが、7号砂、5号砂は共に0%であった。このことから、イワナについてはおよそ 0.150mm 以下の粒径の土砂がエラに詰まること、また粒径が細かければ細かいほどエラに付着しやすいことが分かった。

(2) 影響評価の手法

イワナは浮遊物質濃度が大きくなると、エラへの土砂の付着によってエラでの酸素摂取量が減少する。この考えに基づいて、浮遊物質濃度の増加の影響を酸素摂取量の低減と結びつけたモデルを次のような仮定のもとに作った。まず、呼吸水中の浮遊物質の体積増加とエラへの土砂の付着面積の増加によって呼吸水の見かけの溶存酸素濃度が低下すると仮定した。次に、Shepard¹⁾、尾崎²⁾の研究から見かけの溶存酸素濃度が $1.7\text{mg}/\ell$ になるとイワナは窒息症状を起こし、 $0.5\text{mg}/\ell$ になると死に至ると仮定した。最後に洗浄運動によって浮遊物質濃度が C_0 までであるならば魚はエラに付着した土砂を排除できると仮定し、 C_0 には個体差があり C_0 の小さい個体から死んでいくものとする。これらの仮定において、まず、見かけの溶存酸素濃度を式(1)のように定義する。



図中の数値の単位は mg/l
図-6 水槽実験の結果



図中の数値の単位は mg/l
図-8 水槽実験の再現計算

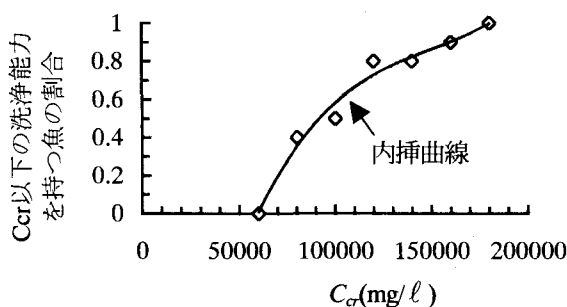


図-7 C_α の個体分布

$$C_{ox} = r_t(t) \cdot r_g(t) C_{oxo} \quad (1)$$

ここに、 C_{α} :見かけの溶存酸素濃度、 r_t :浮遊物質の体積増加による見かけの溶存酸素濃度の低減率、 r_g :エラへの土砂付着面積の増加による見かけの溶存酸素濃度の低減率、 C_{oxo} :水中の溶存酸素濃度である。窒息条件、即死条件は式(2),(3)のように表される。

$$\text{窒息条件: } 0.5\text{mg/l} < C_{\alpha} < 1.7\text{mg/l} \quad (2)$$

$$\text{即死条件: } C_{\alpha} < 0.5\text{mg/l} \quad (3)$$

また、清水の場合は、 $r_t=r_g=1$ となり $C_{\alpha}=C_{oxo}$ となるから濁水の影響がなく、溶存酸素濃度の影響のみの場合についても式(2),(3)によって影響評価を行うことができる。

次に式(1)の $r_t(t)$ は C_{SV} を呼吸水の浮遊物質の体積濃度とすると式(4)のように表される。

$$r_t(t) = 1 - C_{SV} \quad (4)$$

式(1)の $r_g(t)$ について、酸素摂取はエラの土砂が付着していない部分で行われると仮定し、次の式(5)で表す。

$$r_g(t) = \frac{S}{S_0} \quad (5)$$

ここに S :土砂が付着していないエラの面積、 S_0 :エラの全表面積である。

式(5)の S については土砂の付着はエラ全体で均等に起こると仮定し、次の式(6)で表す。

$$\frac{dS}{dt} = -pS \quad (6)$$

ここに、 p :単位時間単位エラ面積あたりに土砂が付着

する面積割合である。

p は呼吸水中の浮遊物質濃度と魚がエラから排出できる浮遊物質濃度の差に比例すると仮定し、式(7)によって表す。

$$p = p_0(C_S - C_\sigma) \quad (7)$$

ここに、 p_0 :比例定数、 C_S :浮遊物質濃度である。

本モデルを排砂によるイワナへの影響評価に用いるためにはイワナについて式(7)の係数 p_0 および C_σ の個体分布を求める必要がある。そこで養殖のイワナを用いた水槽実験を行った。異なる土砂濃度に設定された水槽に養殖のイワナを 10 匹ずつ入れ、48 時間致死したイワナの数調査した。土砂濃度は 20000~200000mg/l を 20000mg/l きざみで設定した。実験中の溶存酸素濃度は 4.60~11.92mg/l、水温は 4.1~9.1℃もしくは 14.2~21.1℃であった。溶存酸素濃度、水温の変化は共に厳密的には魚類生理学の観点から問題があるかもしれないが、共に生息条件の範囲内であるのでここでは問題ないものとする。図-6 に水槽実験の結果を示す。実験に使用した土砂は平均粒径 0.009mm のパルクレーであり、また実験中はエアープンプを使って十分に酸素を供給している。

図-6 の水槽実験の結果において 48 時間生存したイワナは設定浮遊物質濃度以上の C_σ を持つと仮定し、設定浮遊物質濃度と 48 時間後の生存率から C_σ の個体分布を求めると図-7 のようになる。この図では C_σ の値からその C_σ 以下の洗浄能力を持つ魚の割合が分かる。さらに、式(1)~(7)および図-6, 7 から p_0 を求めるとその平均値は $p_0 = 1.97 \times 10^{-5} (\text{l/mg/hr})$ となり、この値をイワナについての p_0 の値とする。ただし標準偏差 $\sigma = 1.45 \times 10^{-5} (\text{l/mg/hr})$ であった。

p_0 の値、式(1)~(7)、図-7、水槽内の溶存酸素濃度の時間変化から水槽実験の再現計算を行い、その結果を図-8 に示す。図-6 と図-8 を比較するとこのモデルによっておよそ水槽実験の結果を再現できることが分かる。

図-9 に溶存酸素濃度が 5.0mg/l、浮遊物質濃度が 120000mg/l で共に一定の場合に本モデルを用いて計算

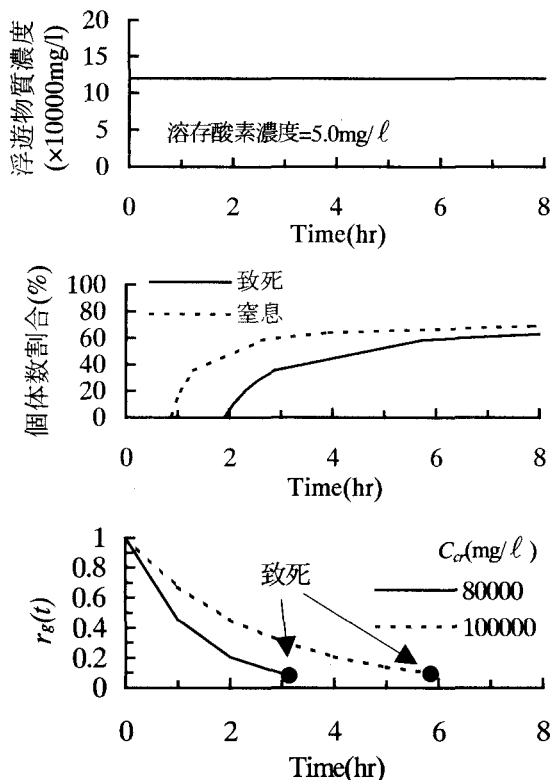


図-9 一定の浮遊物質濃度における致死、窒息率およびエラの閉塞度の変化

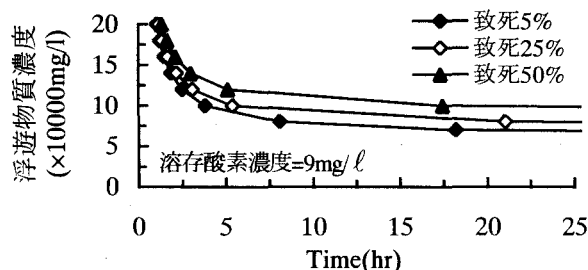


図-10 致死率をパラメーターにしたときの排砂時間と浮遊物質濃度の関係

した致死および窒息した魚の個体数割合の時間変化と C_s が 80000 mg/l , 100000 mg/l の個体についての $r_g(t)$ の時間変化を示す。この図から分かるように本モデルにより致死率の変化だけでなく死に至る魚がいない排砂時間も求めることができる。また $r_g(t)$ のグラフから死に至る魚はエラの面積のほぼ90%に土砂が付着していることになるが、水槽実験中に致死したイワナのエラを解剖するとエラのほとんどに土砂が付着しており、本モデルによってエラへの土砂の付着面積についても評価できると思われる。また、致死率をパラメーターにし、排砂時間と浮遊物質濃度の関係を図示すると図-10 のようになり、この図から影響が少なくなるような排砂時間を知ることができる。

図-11 に浮遊物質濃度が図のように変化する場合に溶存酸素濃度が 10 mg/l , 5 mg/l の2ケースについて致死および窒息した個体数割合の時間変化と C_s が 80000 mg/l , 100000 mg/l の個体について $r_g(t)$ の時間変化

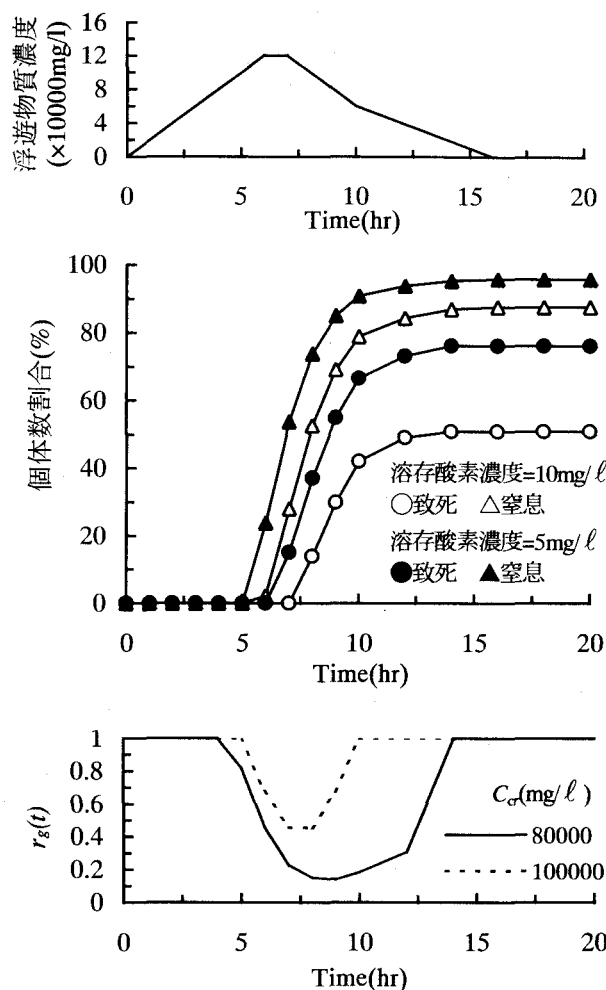


図-11 浮遊物質濃度が変化する場合の致死、窒息率およびエラの閉塞度の変化

を示す。この図から、本モデルによれば、溶存酸素濃度が低下するとそれだけ浮遊物質濃度の増加による窒息および死に至る個体数割合が増加し、短時間で多くの個体が死ぬようになること、 $r_g(t)$ の変化から洗浄運動によるエラに付着した土砂の回復についても計算できることが分かる。

4. 各流域への計算値の適用

本モデルを図-1, 2, 5 のヒル谷、黒部川での排砂に適用し、その精度について検証し、魚類への影響を考察する。ただし、式(4)の C_{sp} については浮遊物質は粒径に関係なくイワナの口に呼吸水と一緒に入ってくるものと考え浮遊物質濃度をそのまま適用し、式(7)の C_s については3(1)の実験結果から 0.150 mm 以下の浮遊物質がイワナのエラに付着するものとし、浮遊物質の粒度分布から 0.150 mm 以上の成分を除いた浮遊物質濃度を適用する。

(1) ヒル谷

図-2 で掃流砂がデータに含まれないときの C_s は

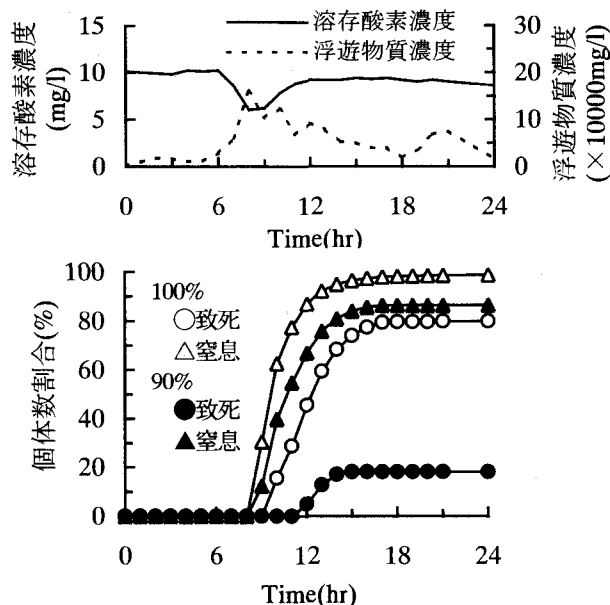


図-12 モデルの黒部川への適用

2000mg/l ~10000mg/l であり、図-7 の C_{σ} の分布から $r_g(t)$ は 1 である。 $r_f(t)$ については排砂後の最低値は 0.96 であった。図-1 からヒル谷では溶存酸素濃度の低下が低いことと $r_g(t)$ 、 $r_f(t)$ の値から排砂による水質への影響は低いといえる。このことは 2(1) で述べたように濁水によるイワナへの影響が少なかったという事実と合致している。

(2) 黒部川

黒部川での '99 年の排砂については浮遊物質の粒度分布のデータがないので 0.150mm 以下の成分の割合が 100%、90% の場合について致死率及び窒息率の時間変化を求め、その結果を図-12 に示す。この図より、溶存酸素濃度の低下と浮遊物質濃度の増加によって急激に致死および窒息するイワナの個体数割合が増加していることが分かる。参考までに 0.150mm 以下の成分の割合が 80% 以下の場合には死に至る魚の割合は 0% であった。また、エラに付着すると考えられる 0.150mm 以下の成分の割合によって、致死率が大きく変わるので、排砂時にはこの点の調査を行う必要がある。

5. おわりに

本研究は排砂によるイワナへの影響を浮遊物質濃度の増加の点から考え、濁水がイワナに与える影響を評価できるモデルを提案した。本研究をまとめると以下の通りになる。

(1) 本研究では浮遊物質濃度の増加によるエラへの土砂の付着によって魚の酸素摂取量が減少すると考え、新しいモデルを作った。このモデルを用いれば、排砂による溶存酸素濃度の低下および浮遊物質濃度の上昇による魚類への影響を評価できる。

(2) 本モデルの特徴として、浮遊物質濃度と溶存酸素濃度の変化が分かれば魚の致死および窒息率の時間変化が求められること、影響のない排砂時間が求められること、エラへの土砂の付着面積の時間変化が求められること、溶存酸素濃度が低下すると同じ浮遊物質濃度でも窒息および死に至る個体数割合が増加しその時間も早くなることなどが挙げられる。

(3) 本研究では、式(7)の p_0C_{σ} について、養殖イワナを用いた水槽実験によって決定されているので実際の排砂への影響評価に精度よく使えるかどうかについては分からない。これについては今後さらに検証する必要がある。

参考文献

- 1) Shepard M.P.: Resistance and tolerance of young speckled trout to oxygen lack, with special reference to low oxygen acclimation, J.FISH.RES.BD.CANADA 12, p.387-433, 1955.
- 2) 尾崎久雄: 魚類生理学講座 第2巻 III呼吸の生理, 緑書房, p.254-268, 1970
- 3) 村岡敬子, 角哲也: 高濃度の濁りがアユに与える影響について, 第25回土木学会関東支部技術研究発表会, VII-13, p.1048-1049, 1998.
- 4) Newcombe.C.P and Macdonald.D.D: Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems, North American Journal of Fisheries Management 11, p.72-82, 1991.
- 5) 木下篤彦, 水山高久, 藤田正治, 澤田豊明, 吉清守: ヒル谷における人為的排砂のイワナへのインパクト, 河川技術論文集, Vol.7, p.363-368, 2001.
- 6) Garric J., Migeon B., and Vindimian E.: Lethal effects of draining on brown trout, Wat. Res. Vol.24, No.1, p.59-65, 1990.
- 7) 角哲也: ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理, ダム技術, No.127, p.30-38, 1997.
- 8) 角哲也: ダム貯水池土砂管理の将来, 貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集, p.117-126, 2000.
- 9) Servizi J. and Martens D.: Effects of temperature, season, and fish size on acute lethality of suspended sediments to Coho Salmon, Can.J.Fish.Aquat.Sci., Vol.48, p.483-497, 1991.
- 10) 青柳泰夫, 堂ノ脇将光, 平松晋也, 大野宏之, 伊藤義和, 白井正巳, 佐藤俊英, 城宝公: 砂防ダムのゲート排砂に伴う下流部への影響について(その2), 平成12年度砂防学会研究発表会概要集, p.208-209, 2000.
- 11) 小久保鉄也: 出し平ダムの排砂実績と黒部川の土砂流送に与える影響, 貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集, p.99-115, 2000.
- 12) 片岡幸毅, 加藤雅広, 南修平, 森涼子, 劉炳義: ダム排砂に伴う DO 変化に関する数値モデル, 水工論文集, 第45巻, p.1195-1200, 2001.
- 13) 小久保鉄也, 板倉正和, 原田稔: 貯水池の排砂実績と予測手法, 大ダム, NO.162, p.43-54, 1998.

(2002. 9. 30受付)