

濁水が魚に与える影響 ～高濃度の濁りの場合～

村岡敬子* 天野邦彦** 三輪準二***

1. はじめに

河川における濁りは、出水にともなう河床の巻き上げや河岸崩壊といった自然現象、河床の浚渫やダムからの排砂といった河川における人間活動など、さまざまな要因で発生する。これら濁りの多くは一時的なものではあるが、その濃度や継続時間によっては、魚の成長速度の低下・鰓(エラ)表面の上皮の損傷・鰓の閉塞や病気に対する抵抗力の低下といった直接的影響、河床環境の変化・餌資源の劣化を通じた間接的な影響を与える^{1), 2)}。人間活動にともない発生する濁水により下流の生物が影響を受けることが予想される場合には、その影響レベルや範囲を予測し、あらかじめ必要な対策を講じることが必要である。しかしながら、これまでさまざまな生物を対象に多くの研究がなされてきたものの、懸濁物質の違いや魚種の違いによって影響のレベルが異なるため、影響を的確に評価することが困難であった。そこで本研究では、わが国の重要な水産対象魚種のひとつであるアユを対象に、個体の鰓に付着した懸濁物質の質量と粒度組成の違いに着目し、これらを指標として影響評価を行う方法を開発した。

2. 実験方法

実験は「懸濁物質の濃度、種類と生存率の関係を調査した実験I」、「鰓への懸濁物質の付着状況を精査するための実験II」の2回に分けて実施した(表-1)。実験装置は塩化ビニール製の不透明水槽(B 61×D 41×H 31.5 cm)および水槽底部に固定された3台の小型水中ポンプ(吐出量8 L/min)で構成され、投入された懸濁物質が水中ポンプ3台により攪拌される構造となっている。暴露実験の間は、全水槽にエアポンプによる曝気を行った。

実験I 供試魚の全長は194.8±11.8 mm(平均±標準偏差、以下同様)(n=89)であった。また、対照として懸濁物質を投入しない条件の実験を同時に実施した。本実験では産地の異なる7種の陶土(懸濁物

質A, B, C, E, F, G, H)、および珪藻土(Diato)を暴露実験の懸濁物質として使用した。なお、これら懸濁物質は、懸濁物質の投入後に実験水のpHが著しく変化しないこと、実験Iの範囲では生存率を左右させるような懸濁物質からの有害物質の溶出がないことをあらかじめ確認している。観察は12時間連続して行い、12時間経過時に残存個体があった場合には、さらに12時間の曝露後の生存個体数を確認した。

実験II 供試魚の全長は139.6±12.1 mm(n=217)であった。実験では、対照群(懸濁物質の投入を行わない水槽)は設定しなかった。懸濁物質には、実験Iにおいて生存時間が短かった懸濁物質Aと生存

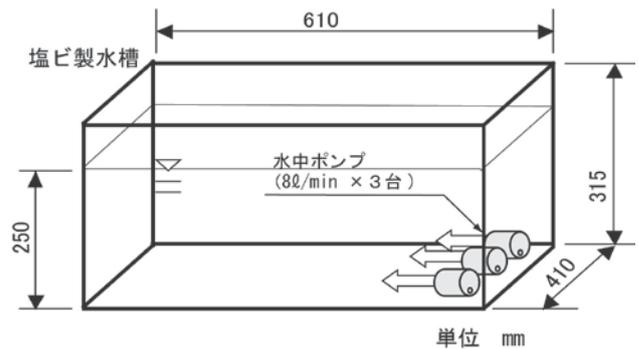


図-1 実験装置

表-1 曝露実験条件

実験	懸濁物質	懸濁物質濃度 (実測値) mg/L
実験 I	A	1,500 1,924 9,155 9,532 13,047 15,161
	B	5,152 7,534 11,071 14,006 14,186
	C	9,039
	E	7,843 15,401
	F	5,196 11,830
	G	7,943 15,940
	H	6,646 13,461
	Diato	2,807* 3,175* 9,157*
実験 II	A	4,212 4,438 4,825 6,903 7,541 8,136 9,291
	A'	562 1,436 1,767 2,910
	G	11,325 13,530 15,822 18,552 20,751

* 参考値

Effect of suspended solid concentrations and particle size on survival of fish.

時間が長かった懸濁物質G、および懸濁物質Aのうち粗い粒子を除去したA'の3種を用いた。本実験では死亡個体だけでなく、30分間隔もしくは60分間隔で曝露水槽内の生存個体を無作為に順次1個体引き上げた。実験終了後、実験に供した全個体の鰓を摘出し、1 mol/L KOHおよび11.6 mol/L H₂O₂による溶解処理を繰り返し、鰓組織を溶解して鰓への付着物を回収した。

実験Ⅰ、Ⅱ共に、懸濁物質の投入時からの時間を曝露時間とし、1回あたり10個体を曝露した。死亡した個体は速やかに水槽から取り出し、死亡確認時刻を記録すると共に、実験室内にて鰓蓋を取りのぞき鰓表面の懸濁物質の付着状況を実体顕微鏡により確認した。また、実験終了後に実験水槽の中層部の濁水を採水し、懸濁物質濃度と濁水の粒度分布をレーザー回折式粒度分布測定装置を用いて分析した。

鰓の構造を観察するために、実験Ⅱで摘出したアユ1個体(全長186.3 mm)の鰓から連続横断切片を作成し、光学顕微鏡で撮影した写真より鰓表面の細かいヒダにあたる二次鰓弁の間隔を計測した。同様に、アユの幼魚、同未成魚、カジカ、ニジマス、イワナ各5個体についても二次鰓弁の間隔を計測した。

3. 高濃度の濁水による影響の概況

3.1 曝露時間と生存率の関係 (実験Ⅰ)

高濃度の濁水に曝されたアユの暴露時間と生存率の関係は、シグモイド曲線を描き、同じ懸濁物質の場合、懸濁物質濃度が高いほど生存時間は短くなった(図-2)。また、同程度の懸濁物質濃度・生存率のケース内では、生存率が高いほうが低いケースに比べ再現性が高いことから、本研究では、90%生存時間(生存率90%を示す経過時間)を、懸濁物質の影響を比較する指標のひとつとした。

3.2 鰓への懸濁物質の付着 (実験Ⅰ・Ⅱ)

実体顕微鏡による観察の結果、死亡個体の鰓表面には広範囲に懸濁物質の粒子が付着していた(図-3)。一方、生存個体では懸濁物質の付着は鰓の一部に限られるとともに、清水に戻すと付着物が短時間で排泄されるのが観察された。また、懸濁物質のうち珪藻土は、他の懸濁物質と比較して鰓表面により厚く盛り上がるように付着した(実験Ⅰ)。

付着した懸濁物質の質量は、死亡個体では曝露時間が長くなるほど大きくなるが、生存個体では曝露時間によらず概ね一定の値を示し、生存個体にお

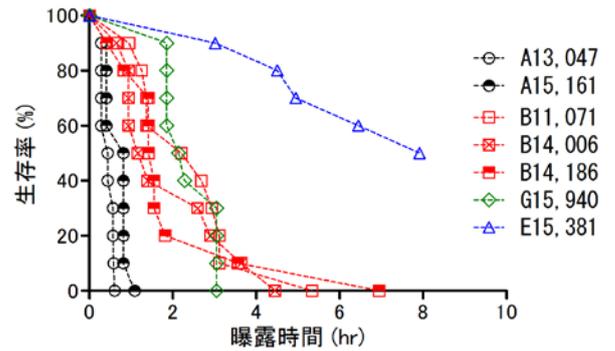


図-2 濁水曝露時の生存状況の一例(実験Ⅰ)
凡例；懸濁物質の種類-懸濁物質濃度(mg/L)



図-3 死亡個体の鰓の表面(実験Ⅰ)
実験Ⅰ 懸濁物質A、懸濁物質濃度9155(mg/L)、曝露時間0.9時間

る鰓への懸濁物質の付着は一時的なものであるとともに、死亡個体の鰓への付着は個体が死亡する直前の極めて短時間で付着するものと考えられた³⁾(実験Ⅱ)。

4. 影響を与えやすい懸濁物質の粒子径

4.1 懸濁物質とアユの90%生存率 (実験Ⅰ)

90%生存時間と懸濁物質濃度(実測値)の関係を図4に示す。珪藻土をのぞく懸濁物質では、懸濁物質濃度と生存時間の間には負の関係がある(図-4)。同じ懸濁物質では、生存時間のばらつきは懸濁物質濃度が小さいほど大きく、懸濁物質濃度が高くなるにつれ生存時間のばらつきおよび勾配が小さくなった。異なる懸濁物質の間では、生存率はA<B<H<G、Eの順となる傾向を示し、この関係は懸濁物質のD_{50%}の関係とほぼ逆の順であった。これらの傾向は、珪藻土においては観察されず、また鰓表面の付着状況も異なることから、珪藻土は鰓への付着に関する性状が他の懸濁物質とは異なると考えられ、以降の解析から除外した。

4.2 アユの鰓に付着した懸濁物質の特性 (実験Ⅱ)

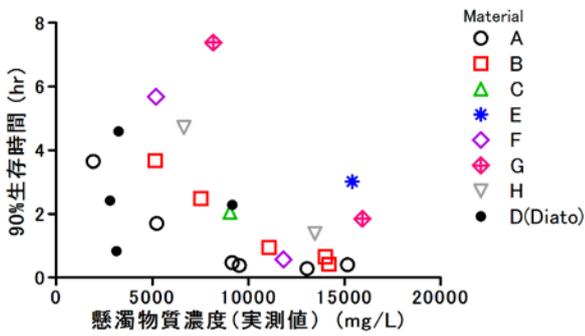


図-4 懸濁物質濃度(実測値)と90%生存時間³⁾

本研究では、懸濁物質の粒度組成と鰓付着物の粒度組成を比較するために、式(1)により $IPG(D_i)$ を求め、粒径別の鰓への付着のしやすさの指標として用いた。本指標は、ある範囲(D_i から $D_{(i-1)}$)の粒径をもつ粒子が全濁水中に占める質量の割合と全鰓付着物中に占める割合の質量比を示す。

$$IPG(D_i) = P_{Gill(D_i)} / P_{SS(D_i)} - 1 \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、

$IPG(D_i)$: D_i から $D_{(i-1)}$ の粒径をもつ懸濁物質の鰓への付着しやすさを表す指標。

D_i : JIS1204により区分される粒径。” D_i から $D_{(i-1)}$ の粒子”は大きさ D_i のふるい目を通過し $D_{(i-1)}$ のふるい目を通過しない粒径を示す。

$P_{Gill(D_i)}$: D_i から $D_{(i-1)}$ の粒径をもつ鰓付着物が鰓付着物総量に占める質量割合(%)。

$P_{SS(D_i)}$: D_i から $D_{(i-1)}$ の粒径をもつ粒子が懸濁物質総量に占める質量割合(%)

IPG と D の関係は、懸濁物質の種類や濃度、個体の生死によらず同様の傾向を示すと共に(図-5)、その変曲点となる P_1 、 P_2 はそれぞれ $D_{P1} = 20.06 \pm 3.09 \mu m$ 、 $D_{P2} = 45.72 \pm 2.28 \mu m$ と概ね一致した。さらに、アユの二次鰓弁を観察した結果から、 D_{P1} は隣り合う二次鰓弁の平均間隔

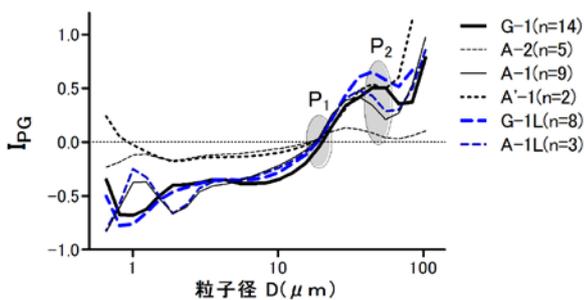


図-5 粒径とIPGの関係³⁾を改変

凡例；「懸濁物質」-「同程度の濃度をもつグループ、添字Lは生存個体」(n=「サンプル数」)

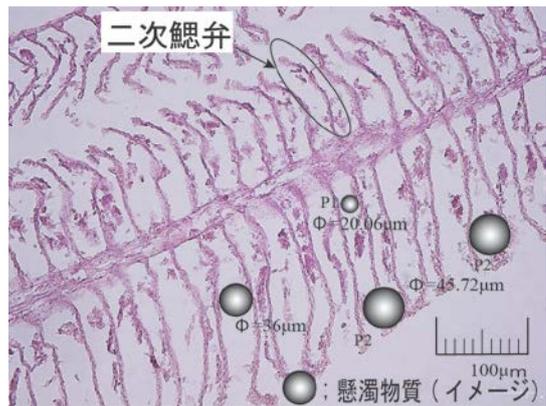


図-6 鰓の構造と懸濁物質の粒子の大きさ³⁾

($23.6 \pm 4.8 mm$)に、 D_{P2} は二次鰓弁2~3本分の幅に相当した(図-6)。これらの結果は、個体の生死や懸濁物質の種類に関わらず、二次鰓弁に付着しやすい粒子の粒径があり、その大きさは二次鰓弁の間隔と関連があることを示唆する。

4.3 懸濁物質濃度の補正(実験I)

上記の結果に基づき、実験Iにおける90%生存時間の関係(図-4)を、懸濁物質中における D_{P1} から D_{P2} の範囲の粒径をもつ粒子が占める部分の濃度を用いて補正した懸濁物質濃度(以下懸濁物質濃度補正值)を用いて表した(図-7)。ここに、懸濁物質濃度補正值は本研究で得られた $D_{P1} = 20.06 \pm 3.09 \mu m$ 、 $D_{P2} = 45.72 \pm 2.28 \mu m$ を元に、これを包括する粒度分布測定時の測定間隔 $19.124 - 54.826 \mu m$ (以下 $19 - 54 \mu m$)の測定値より求めた。

補正の結果、懸濁物質濃度の実測値を用いた90%生存時間は懸濁物質によってばらつきが大きかったのに対し、懸濁物質濃度補正值を用いた90%個体生存時間は懸濁物質によらず、高い精度で一致した。

これらのことより、濁水中の粒子のうち、鰓の二

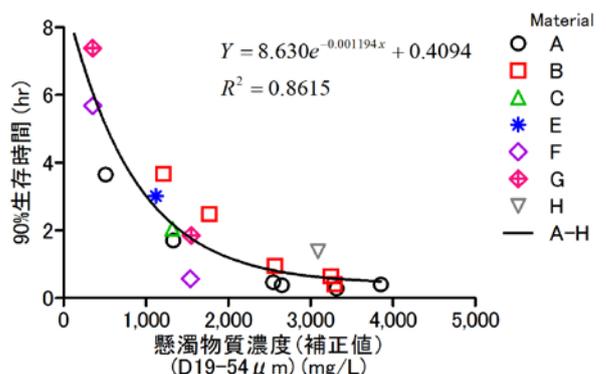


図-7 懸濁物質濃度(補正值)と90%生存時間³⁾

次鰓弁の間隔相当の粒径をもつ懸濁物質が多いほどアユはより大きな影響を受けるものと考えられた。このような現象は、二次鰓弁の間隔と同程度の粒子は鰓の間を通過するために時間を要し、そのため一次的に鰓に捕捉される状況となること、これらの粒子の間に、さらに小さな粒子が二次的に捕捉され、鰓の閉塞に結びつくものと考えられた³⁾ (図-8)。

4.4 魚種の違いと鰓の構造 (実験Ⅱ)

高濃度の濁水下における生存時間は、魚種や成長段階によっても異なるといわれている。筆者らが過去に行った実験では⁴⁾、アユ>ヤマメ≧カジカの順に濁水の影響を受けやすい結果が得られている。また、サケ科の淡水魚であるヤマメの生存状況は、Newcombeらがサケ科の魚種を中心としたデータのレビューに基づき提案した影響予測式⁵⁾の結果と概ね一致した⁴⁾。鰓切片から計測された二次鰓弁の間隔は、アユの幼魚と未成魚ではほとんど差が見られなかった。また同様に、イワナ・ニジマス・カジカでは、異なる種間で差がほとんどみられないとともに、アユよりも大きい値を示した。イワナ・ニジマス・カジカの二次鰓弁の間隔から懸濁物質濃度補正値を算出すると、本研究における実験範囲においては、補正後の懸濁物質濃度はアユの1/4となった。前述の実験において、アユがヤマメ・カジカよりも濁水の影響を強く受けたという結果は、同じ濁水に曝露された場合でも、魚種の違いにより鰓に閉塞しやすい粒子径の範囲が異なり、アユは他の魚種に比べより強い影響を受けたものと考えられる。

5. まとめ

高濃度の濁りに曝された魚は、ある特定範囲の大きさの粒子の影響をより強く受け、その範囲は鰓の構造により推定できることが明らかとなった。これまで、魚に対する濁りの影響は懸濁物質濃度と継続時間で評価されてきたが、河川で発生する濁水の濃

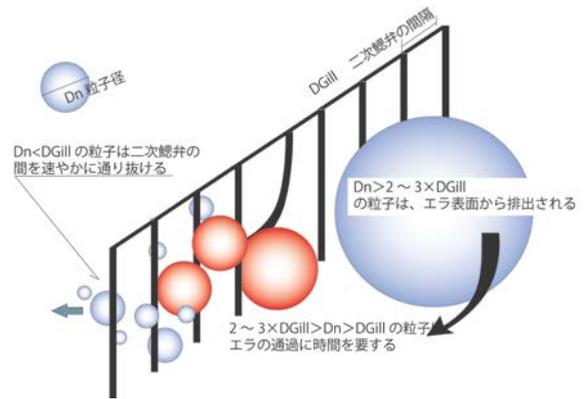


図-8 懸濁物質の粒子径と二次鰓弁間隔の関係

度と粒度分布を用いることにより、実河川で魚が受ける影響をより高い精度で予測することが可能となった。一方で、低濃度の濁水に長期間曝露される場合や二次鰓弁よりも小さい粒子が多い場合などには、粒子径以外の要素が影響を与える場合も考えられ、引き続き多角的な視点から要因を探る必要がある。

参考文献

- 1) Merle, G.: Some environmental aspects of flushing. International workshop and symposium on reservoir sedimentation management, 195-202, 2000
- 2) 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: 363~368、2001
- 3) 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 巻 2 号、pp.141~151、2011
- 4) Muraoka K, Ozawa T: Effects of Suspended Sediments on Japanese Fish, International Symposium on Fishway and Tropical River Ecohydraulics, 225-262, Sep.4-5,2001
- 5) Newcombe, C. P. and D. D. MacDonald: Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. N. Am. J. Fish. Manage., 11: 72-82. 1991

村岡敬子*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
河川生態チーム 主任研究員
Keiko MURAOKA

天野邦彦**



国土交通省国土技術政策総合
研究所環境研究部河川環境研
究室長(工博)
Dr.Kunihiko AMANO

三輪準二***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
河川生態チーム 上席研究員
Junji MIWA