



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道北部山地河川における細粒土砂の堆積がイトウの産卵環境および発眼卵生残率に及ぼす影響
Author(s)	山田, 浩之; 河口, 洋一; 江戸, 謙顕 他
Citation	Ecology and Civil Engineering, 11(1), 29-40 https://doi.org/10.3825/ece.11.29
Issue Date	2008
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/68525
Rights	© 2008 応用生態工学会
Type	journal article
File Information	029-040(Vol.11 No.1).pdf



原著論文 ORIGINAL PAPER

北海道北部山地河川における細粒土砂の堆積がイトウの産卵環境および発眼卵生残率に及ぼす影響

山田 浩之¹⁾・河口 洋一²⁾・江戸 謙顕³⁾・小宮山 英重⁴⁾

1) 北海道大学大学院農学研究院 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

2) 九州大学大学院工学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

3) 文化庁文化財部記念物課 〒100-8959 東京都千代田区丸の内2-5-1

4) 野生鮭研究所 〒099-2421 北海道網走市呼人159-119

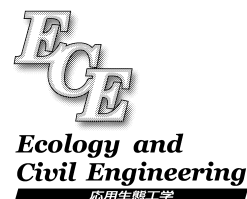
Hiroiyuki YAMADA¹⁾, Yôichi KAWAGUCHI²⁾, Kaneaki EDO³⁾, Eishige KOMIYAMA⁴⁾: Effects of fine sediment accumulation on the redd environment and the survival rate of eyed embryos of Sakhalin taimen (*Hucho perryi*) in mountain streams of northern Hokkaido. *Ecol. Civil Eng.* 11(1), 29-40, 2008.

1) Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9 Nishi 9 Kita-ku, Sapporo, 060-8589, Japan

2) Graduate School of Engineering, Kyusyu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

3) Monuments and Sites Division, Agency for Cultural Affairs, Marunouchi 2-5-1, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8959, Japan

4) Wild salmon research center, Yobito 159-119, Abashiri, Hokkaido, 099-2421, Japan



Abstract: We examined effects of fine sediment on embryo survival rate and on redd environments of an endangered species, Sakhalin taimen (*Hucho perryi*). Sediment accumulation, permeability, water quality and embryo survival were quantified at the redds in mountain streams in northern Hokkaido, Japan, and their correlations were assessed. The results indicated that the survival rate was negatively correlated with dissolved oxygen concentration. However, the direct effects of fine sediment on the embryo were not clarified because the accumulations were low in those streams. Moreover, results clarified that accumulations lower the interchange ability of redd water and conduction of heat, despite the low accumulation level. Further research must investigate the fine sediment effects associated with heat flux.

Key words: dissolved oxygen, embryo, fine sediment, heat flux, permeability

はじめに

イトウ (*Hucho perryi*) はサケ科イトウ属に属する国内で最大級の淡水魚である。イトウ属はユーラシア大陸に

広く分布しており、本種以外にもシベリアに生息するアムールイトウ (*H. taimen*)、鴨緑江上流のコウライイトウ (*H. ishikawai*)、揚子江上流の虎魚 (*H. bleekeri*)、ドナウ川のフーヘン (*Huchen*, *H. hucho*) の4種が知られている。日本国内に生息するイトウ (*H. perryi*) は、他のイトウ属の種とは異なり降海性を有する (Edo et al. 2005)。

2007年1月23日受付, 2007年10月22日受理

1) e-mail: hiroiyama@env.agr.hokudai.ac.jp

また、他の在来サケ科魚類が秋期に産卵するのに対し、イトウは春季の融雪出水終期（北海道北部では4月下旬から5月初旬頃）に産卵することと、20年近く生きて多回産卵することが特徴として挙げられる（Fukushima 1994；福島 1998；Edo et al. 2000；江戸・東 2002）。

そのような特徴を有するイトウは、国内では北海道に限られた流域にのみに分布することが知られているが（木村 1966；小宮山 1997）、近年、その生息数が激減し、環境省レッドリストでは近い将来における絶滅の危険性が高い種（絶滅危惧IB類（EN））に登録された（環境省 2003）。また、2006年には絶滅の危険が極めて高い近絶滅種（CR）種として国際自然保護連合のレッドリストに指定された（IUCN 2006）。

こうした背景から、最近では北海道の各河川流域住民等によるイトウの保護活動が行われるようになった（イトウ保護連絡協議会 2006）。さらに、イトウをアンブレラ種とした生態系や生息場の再生が検討されている（標津川技術検討委員会 2006）。こうした個体群の保護や生息場環境の再生のためには、生活史を通じて生息や繁殖に必要な環境、あるいは減少した原因を明らかにすることが求められるが、それに関する知見は十分ではない（例えば、木村 1966；Gritsenko et al. 1974；川村ほか 1983；Fukushima 1994, 2001；Edo et al. 2000, 2005；佐川ほか 2002；佐川 2006）。

これまでに他のサケ科魚類の生息や繁殖に影響する要因について調べられた例は多く、水温や流速・水深・濁度・溶存酸素濃度などの表流水の水利条件や水質、河床材料、河川構造物や倒木の有無、産卵に適した淵尻の有無、岸のえぐれや植生によるカバーの有無などの生息場の物理的構造が重要な因子となることが知られている（Bjornn & Reiser 1991）。それらの知見を踏まえた河川整備事業や自然再生事業が国外はもとより国内でも進められている（河口ほか 2005）。また、20世紀後半から欧米を中心に細粒土砂汚染の問題が認識されて以来（Waters 1995）、細粒土砂が産卵床に堆積することによって卵が死亡するといった産卵床内部環境に関する多くの報告がある（例えば、McNeil & Ahnell 1964；Wells & McNeil 1970；Tappel & Bjornn 1983；Irving & Bjornn 1984；Malcolm et al. 2004）。国内でも細粒土砂の河川生態系への影響が懸念されはじめ、それに関する報告が増えている（長坂ほか 2000；村上ほか 2001；渡辺ほか 2001；Yamada & Nakamura 2002）。しかし、細粒土砂の堆積がイトウをはじめ他の日本在来のサケ科魚類の産卵床内部環境に及ぼす影響について調べられた例は少なく（村上 1999；山田 2002）、産卵床保

全を目的とした細粒土砂汚染の対策については未検討に近い状態である（山田 2005）。

一方、Chapman（1988）とBjornn & Reiser（1991）は、先に挙げた産卵床内部環境に関する研究を総括して、細粒土砂の堆積は産室内部の水の交換性の低下およびそれによる溶存酸素濃度の低下等を介して卵や仔魚の生残や発育に悪影響を及ぼすと述べている。しかし、これまでの研究では、細粒土砂の堆積量と卵の生残の関係のみが調べられた例が多いことから、定性あるいは定量的に評価された物理化学変量と関連付けて総合的に細粒土砂の影響を議論する必要があると指摘している。しかし、そうした視点に基づいて行われた研究は限られている（例えば、Malcolm et al. 2003；Greig et al. 2005）。

以上のことから、今後の効果的なイトウの保護・保全計画を策定するためにも、イトウ生息数の減少要因のひとつにもなり得る細粒土砂堆積の影響を定性・定量的に調べることは不可欠である。そこで、本研究では、野外での産卵床内部の物理化学的評価を通じて、細粒土砂の堆積がイトウの産卵床環境および卵の生残に及ぼす影響について定性・定量的に把握し、検討することを目的とした。

研究方法

調査地概要と調査地点の設定

北海道の北部に位置するA川上流（希少種保護のため河川名の公表を控える）は、現在も多くのイトウの繁殖が確認されている河川である（Fig. 1）。その流域の地質は、白亜系を基盤として、それを覆う新第三紀中新世の宗谷炭層、鬼志別層及び増幌層とこれに貫入した火成岩（玄武岩）からなる。上流域は、そのほとんどが植林地として利用されており、近年の林道開設や森林伐採により、河川の濁り（細粒土砂流出量の増加）が確認されている。そのため、イトウを含めたサケ科魚類の産卵環境の悪化が懸念されている。

本研究では、このA川上流域を研究対象流域とし、このなかでも、多くのイトウの産卵床が確認され、なおかつ、細粒土砂の堆積量などの環境条件について傾度を得ることを条件に、H沢とN沢の2流域を対象とした（Fig. 1）。なお、2002年度の冬季にはN沢の流域の河川近傍で森林伐採が行われ（Fig. 1）、イトウの産卵床への顕著な細粒土砂の堆積と卵の死亡が確認されている（小宮山 未発表）。

イトウは他のサケ科魚類と同様に、産卵期に下流域か

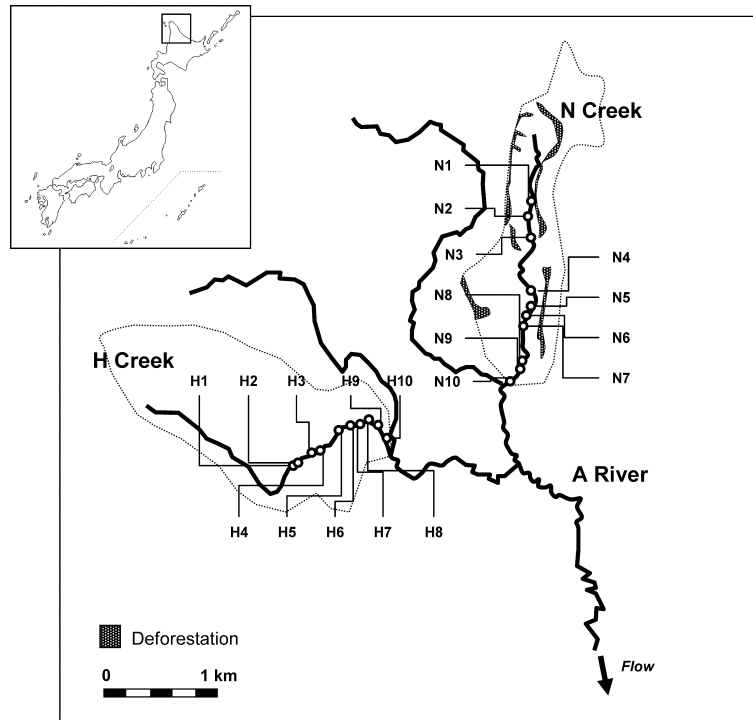


Fig. 1. Location of the A River study site. Solid circles with accompanying numbers indicate research sites.

図 1. 調査対象 A 川流域における調査地点の位置図. 白丸は調査対象地点を示す.

ら遡上し、上流部小河川の蛇行部等に出現する淵から瀬へ移行する礫床（淵尻あるいは瀬頭と呼ばれる）にて、雌が河床を掘り、その中に産卵した後（この卵群の存在する場合は産室あるいはエッグポケットと呼ばれる）、砂礫を被せて産卵床を形成する（Fukushima 1994, 2001）。産室は産卵床の V 字型の窪みの下流側に形成され、その産卵床の大きさや産室の深さが雌の体長に依存することが知られている（Edo et al. 2000）。また、種は異なるが、同じく淵尻に産卵するマスノスケ（*O. tshawytscha*）では、淵から瀬頭そして瀬の中央部という局所的な場所の違いで、卵の生残率が変わることが報告されている（Vronskii & Leman 1991）。

これらのことから、局所的な場所の違いを排除できるように、産卵床が瀬頭の流心に位置すること、淵尻の形状や大きさ、産卵床の大きさが同程度であること、さらに、産卵床の形状が明確で産室の位置が把握し易いことを条件にして、両沢の上流から下流にかけて計 20 個（H 沢：H1～10、N 沢：N1～10）の産卵床を調査対象として選択した（Fig. 1）。それらの産卵床の選択は、産卵のピークであった 2004 年 4 月 29 日～5 月 10 日までに実施した。

調査・解析方法

各産卵床の V 字型の窪みの最深部から 30 cm 下流地点（産室からおおよそ 10～20 cm 下流地点）を調査地点とし、次に述べる物理化学環境調査、卵生残状況調査、水温観測を実施した。イトウの卵は発眼までに 200℃の積算温度を要することが知られている（川村ほか 1996）。表流水の平均水温から完全に全ての卵が発眼ステージに達する時期を見積もり、なおかつ、孵化する以前と考えられた 2004 年 5 月 29 日から 6 月 5 日までを調査期間とした。このうち、物理化学環境調査は、5 月 29 日から 6 月 1 日の晴天時に各産卵床で 1 回実施し（5 月 29 日に H 沢、5 月 30 日～6 月 1 日に N 沢）、卵生残状況調査は物理化学環境調査終了後に実施した。水温観測については産卵床が形成された 2004 年 5 月 10 日から物理化学環境調査を開始する 5 月 29 日まで間に継続的に実施した。

（1）物理化学環境調査

産卵床の物理化学環境調査は、各産卵床で地形・水量調査を行い、その後、調査地点にて透水試験、水質調査、河床構成材料調査の順で調査を行った。地形・水量調査では、調査地点を含む淵尻の流路区間長（Glide length）・水面幅（Glide width）を巻尺を用いて計測し、

産卵床中央部(マウンドの頂点)にて、水深と流速(60%水深)を計測した。また、透水試験は、Yamada et al. (2005)の方法に従ってパッカー法による透水試験を実施した。イトウの産室は河床表面から15~25 cmに位置することが報告されている(Edo et al. 2000)。できるだけ産室に近い地点の透水係数を得るために、試験区間(スタンドパイプのスリット区間)の中央部が河床表面から25 cmに位置するように、スチール製のスタンドパイプ(内径: 4.6 cm, 試験区間: 5 cm)を貫入した。

透水係数は、透水試験より得られた定常状態での水位差(h) [cm], 揚水流量(Q_p) [cm^3/s]を用いて、次式により透水係数(k) [cm/s]を算出した(Hvorslev 1951; Yamada et al. 2005)。

$$k = \frac{Q_p}{2\pi hl} \sinh^{-1} \left[\frac{l}{2r_w} \right]$$

ここで、 $2r_w$ はスタンドパイプの内径 [cm], l は試験区間 [cm] である。

水質調査では、スタンドパイプよりパイプ内の水を一度排水して浸入する水を産卵床内部の水、産卵床表面上の水を表流水として採水し、溶存酸素濃度(DO [mg/L])と溶存酸素飽和度(DO (%)), 電気伝導度(EC), pH, 主要カチオン(Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})・アニオン(F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Br^-)濃度を測定・分析した。以後、産卵床内部の水と区別するため、表流水の水質項目には表流水(Surface)を付す。なお、DOおよびpH, ECは、ポータブル水質計(YSI/Nanotech Inc.; Model 556MPS)を用いて現地にて測定した。各種イオンはイオンクロマトグラフ法(DKK-TOA Co., IA-200)により、ろ過(ポアサイズ45 μm)した試料を用いて分析を行った。

また、水質指標には濃度と次の濃度差(以後、Deltaを付す。)を用いた。濃度差は、産卵床内部間隙水と表流水の水質の濃度の差とし次式によって求め、これにより産卵床内部水と表流水間の物質や水の交換性を評価した。

$$\text{Delta}(\text{water quality}) = \text{Intragravel}(\text{water quality}) - \text{Surface}(\text{water quality})$$

ここで、water qualityは各水質項目の濃度・値を示す。これは、採水深度(試験区間の中央部)の25 cmで除算すると河床表面と採水深度間の濃度勾配となる。また、この値が正側に大きいほど表流水よりも産卵床内部の濃度が高く、負側に大きいほど表流水よりも産卵床内部の濃度が低いことを示す。

河床構成材料調査は、対象とした産卵床の中央部にて河床表面から深度10 cmまでの構成材料をマクニールコア法(内径: 30 cm, 面積: 406.5 cm^2)により採取した(McNeil & Ahnell 1964)。採取した試料は実験室に持ち帰り、炉乾した後、ふるい(75 μm , 106 μm , 250 μm , 425 μm , 850 μm , 2 mm, 4.8 mm, 10 mm, 15 mm, 25 mm, 50 mm)を用いて粒度分析を行った。これより得られた粒径加積曲線から各ふるい径の通過重量百分率、10%および60%の有効粒径(それぞれ、 d_{10} : 通過重量百分率10%の粒径, d_{60} : 通過重量百分率60%の粒径)、粒度分布特性を示す均等係数($U_c = d_{60}/d_{10}$)を求めた。また、細粒土砂の堆積量の評価には2 mmより小さい粒径(砂)の各ふるい径クラスの重量百分率(例えば、850 μm と2 mmふるい間の重量百分率はWP 0.85-2.0と表す。)と各ふるい径の通過重量百分率(例えば、2 mmの通過重量百分率はCWP 2.0と表す。)を用いた。

(2) 卵生残状況調査

各産卵床にて産室の卵を潰さないように掘り返し、卵を卵バサミと網を用いて回収した後、現地にて卵径(mm), 卵重(g), 生残および死亡している発眼卵数を分類して計測した。生残していた発眼卵については元の産室に戻し、できるだけ元の産卵床の構造になるように埋設した。

本研究では、不受精や未発眼による卵の死亡要因を除くため、次式によって求めた発眼卵の生残率(以後、生残率, survival rateと略す。)を指標として用いた。ひとつの産卵床で複数の産室があった場合には、それらの平均値を各産卵床における生残率とした。

Survival rate (%)

$$= \frac{\text{Number of living eyed em bryos}}{\text{Total (dead and living eyed em bryos)}} \times 100\%$$

(3) 水温観測

細粒土砂の堆積が産卵床内部の温度環境に及ぼす影響を把握するため、調査地点選択時に目視により得られた細粒土砂堆積量の多さを傾度として、H4, H5, H10, N4, N5, N6, N8の7地点を選定し、表流水と産卵床内部の水温を観測した。測定方法としては、調査地点鉛直上の河床表面と深度25 cmの2点に自記式サーミスタ温度計(Onset Computer Co.; StowAway TidbiT TBI 32-05+37)を貫入し、サンプリング周期10分で瞬間値を記録するように設定した。この観測によって得られた10分間隔データから、30分間平均値を求めた。この値を用いて、25 cm深度と表流水の温度差(DT: Differential Tem-

perature=Intragravel (Temp.)-Surface (Temp.)) [°C], 25 cm 深度における日平均温度の観測期間 (2004 年 5 月 10 日から 5 月 29 日まで) の積算温度 (IT: Integrated Temperature) [°C] を求めた. なお, 温度差は負側に大きいほど鉛直下向きにより低水温になることを示す.

(4) データ解析

細粒土砂が産卵環境および卵の生残に及ぼす影響を検討するために, 細粒土砂に関する変量, 透水係数, 水質環境変量, 卵の生残率との間で相関分析を行なった (Spearman's ρ). なお, 統計解析には, SPSS for Windows Ver. 10.1.3 J (SPSS Inc. 2001) を用いた.

結 果

産卵床環境に影響を及ぼす要因

卵の生残状況調査時に卵の存在が確認されなかった H 8, H 10, N 5 地点のデータは以後の解析から除外した. さらに, 水質分析の結果, 20 地点のサンプルのうち, 18

地点 (90%以上のサンプル) のサンプルが検出限界以下であった F^- と NO_2^- , NH_4^+ , Br^- , Li^+ 濃度についても以後の解析から除外した.

本研究で対象とした両沢の淵尻の区間長は 1.5~9.3 m の範囲, 水面幅は 2.1~5.0 m の範囲で, 大半の淵尻で区間長と水面幅がほぼ等しかった (Table 1). また, 産卵床上の表流水の流速は 16.4~74.7 cm/sec の範囲 (両沢の平均値 43.1 cm/sec), 水深は 9.0~20.5 cm の範囲 (両沢の平均値 14.0 cm) であった. なお, これらの変量には 2 つの沢間での有意な違いは認められなかった (Table 1).

産卵床構成材料は, 両沢ともに最大で 30~50 mm の礫で構成されており, 2 mm 通過重量百分率に地点間のばらつきがみられた (Fig. 2). また, 沢間で 2 mm 通過重量百分率 (CWP 2) に有意差が認められたが, 両沢の CWP 2 は 2.3~31.7% の範囲であり (Table 1), 全重量に対する細粒土砂の重量百分率は低かった. さらに, 表流水の DO (Surface DO) に沢間の有意差が認められたものの,

Table 1. Summary of environmental variables and embryo data of each creek and results of Welch's t-test comparing the two creeks.

Creek	H Creek				N Creek				<i>t</i>	<i>P</i>
Variables	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.		
Geomorphic and hydraulic variables										
Glide length (m)	3.5	1.1	1.6	4.7	3.6	2.8	1.5	9.3	−0.079	0.939
Glide width (m)	3.3	0.9	2.1	5.0	2.9	0.7	2.1	3.9	0.969	0.351
Surface water velocity (cm/s)	38.6	21.1	16.4	74.7	47.6	10.2	32.4	61.0	−1.106	0.295
Water depth (cm)	14.6	4.0	9.0	20.5	13.4	2.3	10.0	18.0	0.696	0.501
Embryo data										
Egg pocket (n)	1.9	1.4	1.0	5.0	2.4	1.1	1.0	4.0	−0.934	0.360
No. of embryo mean (n)	630.1	310.9	304.0	1184.0	536.4	263.8	210.0	1009.0	0.665	0.510
Embryo diameter mean (mm)	6.6	0.3	6.2	7.0	6.8	0.2	6.6	7.1	−1.479	0.171
Embryo weight mean (g/Embryo)	0.17	0.02	0.14	0.20	0.19	0.01	0.17	0.21	−1.775	0.103
Survival rate mean (%)	84.4	30.0	14.0	99.4	86.8	19.8	36.4	99.7	−0.193	0.850
Environmental variables										
k (cm/sec)	0.068	0.059	0.009	0.180	0.774	1.246	0.017	3.497	−1.696	0.128
CWP 0.85 (%)	4.5	2.3	1.8	8.3	3.0	1.6	0.9	5.0	1.552	0.146
CWP 2 (%)	19.0	9.8	3.6	31.7	7.9	6.1	2.3	21.2	2.735	0.019
d10 (mm)	1.9	1.6	1.0	5.7	3.6	1.9	1.2	6.5	−2.003	0.064
d60 (mm)	19.0	5.9	13.5	29.0	24.5	7.1	14.3	36.1	−1.747	0.101
Uc	12.9	3.8	5.1	17.4	9.6	7.6	2.8	23.1	1.123	0.283
Surface DO (%)	78.7	2.5	75.9	83.2	74.5	3.0	70.4	80.2	3.114	<0.001
Surface DO (mg/L)	8.5	0.3	8.1	9.0	8.1	0.3	7.6	8.5	2.561	0.020
DO (%)	63.8	17.2	30.2	77.9	72.4	6.8	62.0	86.5	−1.335	0.215
DO (mg/L)	6.8	1.8	3.1	8.3	7.8	0.7	6.5	9.1	−1.550	0.156
pH	6.2	0.5	5.3	6.5	6.4	0.2	6.1	6.8	−1.314	0.220
EC (μS/cm)	75.9	13.3	68.0	107.0	75.9	1.8	73.0	79.0	−0.003	0.998
Na ⁺ (mg/L)	6.62	1.73	4.24	9.10	7.88	1.80	5.21	10.20	−1.465	0.164
K ⁺ (mg/L)	1.00	0.22	0.64	1.34	0.56	0.12	0.40	0.70	5.127	<0.001
Mg ²⁺ (mg/L)	0.98	0.20	0.67	1.21	0.59	0.12	0.39	0.80	4.884	<0.001
Ca ²⁺ (mg/L)	1.56	0.31	1.09	1.98	2.35	0.38	1.74	2.95	−4.758	<0.001
PO ₄ ^{3−} (mg/L)	0.23	0.17	0.06	0.58	0.17	0.10	0.08	0.40	0.719	0.487
Cl [−] (mg/L)	6.37	1.99	3.72	8.76	7.33	1.71	4.91	9.62	−1.058	0.308
NO ₃ [−] (mg/L)	0.30	0.15	0.08	0.52	0.17	0.05	0.09	0.27	2.189	0.058
SO ₄ ^{2−} (mg/L)	2.84	1.06	1.45	4.27	4.31	0.93	2.90	5.60	−3.033	<0.01

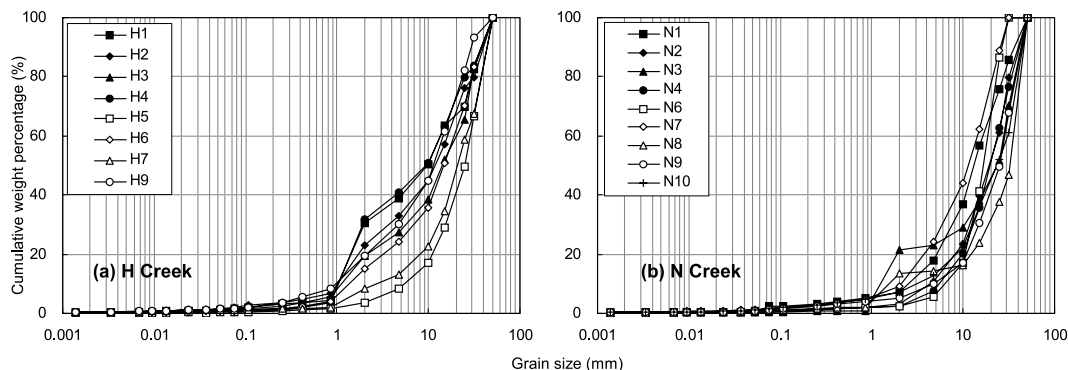


Fig. 2. Grain size distribution of redd materials in H Creek (a) and N Creek (b).

図2. 各沢における産卵床構成材の粒径加積曲線。(a)はH沢, (b)はN沢。

産卵床内部のDOについては有意差が認められなかった (Table 1). また, DOはSurface DOよりもやや低い値を示すことが特徴的であった. 産卵床内部のイオン濃度は, K^+ と Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} が沢間で有意差があったものの, 同じ沢でのばらつきが大きかった (Table 1).

相関分析により, 産卵床の透水性に対する細粒土砂堆積の影響を検討した結果, 透水係数とCWP 0.85, WP 0.425–0.85, WP 0.25–0.425との間に有意な負の相関が認められ, なかでもWP 0.425–0.85との相関が強かった (Table 2).

地点における表流水の水質の違いを除いて, 産卵床内部水質のばらつきの原因を調べるため, 水質濃度差

(Delta)と各種変量の間で相関分析を行った. その結果, 透水係数と細粒土砂変量とDelta DO間には, 有意な相関は認められなかった (Table 3). また, Delta Na^+ , Delta Ca^{2+} , Delta Cl^- とCWP 0.85とそれ以下の粒径クラスの通過重量百分率やWP 0.25–0.425, WP 0–0.075との間に負の相関が認められた (Table 3). これらのなかでも, 比較的強い相関があったCWP 0.85とDelta Ca^{2+} , Delta Cl^- の關係に着目すると, これらのイオン濃度はCWP 0.85が増加するほど表流水に対する産卵床内部の減少量が大きくなる傾向あり, CWP 0.85がおおよそ5%を超えると負の値を示す傾向があった (Fig. 3). これらは, 0.85 mm以下の比較的粒径の小さい土砂の含有量が増加するほど, 表流水と産卵床内部の濃度差が大きくなり, なおかつ, 産卵床内部の値のほうが低くなることを示している.

一方, 自記水温計を設置した地点における日平均水温と積算温度の時系列変化に着目すると, 各産卵床内部の平均水温は降雨時には低く, 晴天時には高くなるという一般的な傾向があった (Fig. 4). また, N8の地点では他の地点と比べて温度の上昇度合いが小さく, なおかつ, 温度が低かった. これに関連して, この地点では他の地点に比べ観測期間の積算温度が20~30℃低かった. 降雨時の温度低下や各地点の表流水温度の違いを除いて, 地点間の温度が異なる原因を調べるため, 温度差 (DT) の日最大値と日最小値それぞれの晴天日における各平均値を求め, それらと透水係数および細粒土砂変量との間で相関分析を行った. その結果, 温度差の日最大値平均値 (Max DT)とWP 0.425–0.85, WP 0.25–0.425との間に有意な正の相関が認められ (WP 0.425–0.85: $\rho=1$, $P<0.01$, WP 0.25–0.425: $\rho=0.9$, $P<0.05$), WP 0.425–0.85が増加するほど, 正側に値が大きくなった (Fig. 5 (a)). また, 温度差の日最小値の平均値 (Min DT)と

Table 2. Spearman's rank correlation coefficients between permeability (k) and grain size variables ($n=17$). * indicates significance levels at $P<0.05$.

Variables	k		
	σ	P	
CWP 2	-0.33	0.198	
CWP 0.85	-0.50	0.042	*
CWP 0.425	-0.48	0.051	
CWP 0.25	-0.38	0.135	
CWP 0.106	-0.38	0.133	
CWP 0.075	-0.40	0.115	
WP 0.85-2	-0.29	0.264	
WP 0.425-0.85	-0.57	0.016	*
WP 0.25-0.425	-0.49	0.046	*
WP 0.106-0.25	-0.22	0.406	
WP 0.075-0.106	-0.22	0.395	
WP 0-0.075	-0.40	0.115	
d10	0.33	0.200	
d60	0.23	0.366	
Uc	-0.12	0.639	

Table 3. Spearman's rank correlation coefficients between the Delta (water quality) and grain size variables (n=17).
* and ** indicate significance levels at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

Variables	Delta DO (%)		Delta DO (mg/L)		Delta pH		Delta EC		Delta PO_4^{3-}		Delta Cl^-	
	ρ	P	ρ	P	ρ	P	ρ	P	ρ	P	ρ	P
k	0.32	0.209	0.35	0.163	-0.18	0.483	-0.01	0.966	-0.27	0.292	0.00	0.993
CWP 2	-0.22	0.406	-0.24	0.345	-0.12	0.639	0.65	0.005**	0.26	0.318	-0.16	0.529
CWP 0.85	-0.06	0.830	-0.07	0.790	0.34	0.182	0.22	0.405	-0.19	0.471	-0.54	0.025*
CWP 0.425	-0.01	0.978	-0.02	0.940	0.32	0.212	0.25	0.333	-0.06	0.808	-0.47	0.055
CWP 0.25	0.05	0.837	0.05	0.855	0.29	0.264	0.20	0.445	-0.07	0.801	-0.47	0.058
CWP 0.106	0.01	0.963	0.01	0.981	0.20	0.430	0.26	0.314	-0.09	0.722	-0.42	0.092
CWP 0.075	-0.01	0.970	-0.01	0.959	0.21	0.408	0.23	0.375	-0.08	0.757	-0.39	0.117
WP 0.85-2	-0.25	0.343	-0.27	0.288	-0.22	0.403	0.62	0.008**	0.36	0.161	-0.09	0.722
WP 0.425-0.85	-0.18	0.492	-0.19	0.453	0.44	0.075	0.22	0.402	-0.11	0.673	-0.49	0.046*
WP 0.25-0.425	-0.04	0.881	-0.04	0.881	0.44	0.079	0.16	0.533	-0.27	0.292	-0.55	0.023*
WP 0.106-0.25	0.00	0.985	-0.02	0.948	0.33	0.191	0.17	0.514	-0.07	0.775	-0.48	0.054
WP 0.075-0.106	-0.09	0.743	-0.11	0.684	0.15	0.570	0.31	0.224	-0.05	0.848	-0.56	0.018*
WP 0-0.075	-0.01	0.970	-0.01	0.959	0.21	0.408	0.23	0.375	-0.08	0.757	-0.39	0.117
d10	0.16	0.535	0.19	0.471	0.02	0.952	-0.56	0.020*	-0.08	0.748	0.25	0.330
d60	0.06	0.830	0.07	0.779	-0.23	0.381	-0.37	0.139	0.20	0.450	0.04	0.866
Uc	-0.13	0.633	-0.14	0.583	-0.29	0.258	0.46	0.060	0.27	0.302	-0.21	0.417

Table 3. Extended.

Variables	Delta NO_3^-		Delta SO_4^{2-}		Delta Na^+		Delta K^+		Delta Mg^{2+}		Delta Ca^{2+}	
	ρ	P	ρ	P	ρ	P	ρ	P	ρ	P	ρ	P
k	-0.09	0.729	-0.03	0.911	-0.04	0.889	-0.10	0.694	-0.34	0.181	0.33	0.151
CWP 2	-0.05	0.852	-0.10	0.708	-0.05	0.852	0.17	0.504	-0.05	0.844	-0.06	0.804
CWP 0.85	-0.38	0.128	-0.46	0.064	-0.46	0.061	-0.43	0.084	0.17	0.504	-0.72	0.001**
CWP 0.425	-0.24	0.345	-0.38	0.138	-0.41	0.105	-0.37	0.146	0.26	0.305	-0.67	0.002**
CWP 0.25	-0.22	0.392	-0.37	0.144	-0.41	0.101	-0.40	0.110	0.24	0.353	-0.65	0.003**
CWP 0.106	-0.19	0.468	-0.33	0.191	-0.36	0.162	-0.36	0.161	0.19	0.468	-0.63	0.005**
CWP 0.075	-0.18	0.480	-0.34	0.184	-0.34	0.178	-0.35	0.163	0.22	0.395	-0.63	0.005**
WP 0.85-2	0.00	0.985	-0.05	0.844	0.01	0.970	0.24	0.363	-0.11	0.673	0.06	0.823
WP 0.425-0.85	-0.36	0.161	-0.42	0.094	-0.43	0.084	-0.19	0.474	0.24	0.358	-0.46	0.054
WP 0.25-0.425	-0.33	0.193	-0.44	0.080	-0.49	0.047*	-0.37	0.142	0.33	0.191	-0.60	0.009**
WP 0.106-0.25	-0.34	0.184	-0.36	0.155	-0.41	0.101	-0.36	0.152	0.27	0.300	-0.44	0.070
WP 0.075-0.106	-0.35	0.163	-0.40	0.112	-0.47	0.055	-0.37	0.147	0.08	0.765	-0.30	0.229
WP 0-0.075	-0.18	0.480	-0.34	0.184	-0.34	0.178	-0.35	0.163	0.22	0.395	-0.63	0.005**
d10	0.13	0.622	0.17	0.507	0.13	0.606	-0.02	0.929	0.11	0.680	0.32	0.203
d60	0.09	0.718	0.00	0.985	-0.03	0.911	-0.16	0.545	-0.19	0.474	0.34	0.172
Uc	-0.05	0.855	-0.14	0.580	-0.11	0.687	0.00	0.996	-0.32	0.209	-0.02	0.948

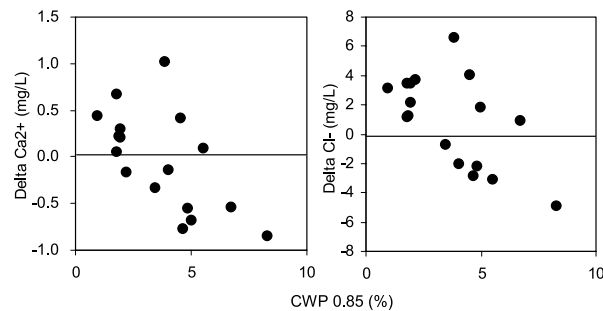


Fig. 3. Relationships between cumulative weight percentages of 0.85 mm (CWP 0.85) and differences of water quality variables in redds.

図 3. 0.85 mm 通過重量百分率 (CWP 0.85) と水質の濃度差との関係。

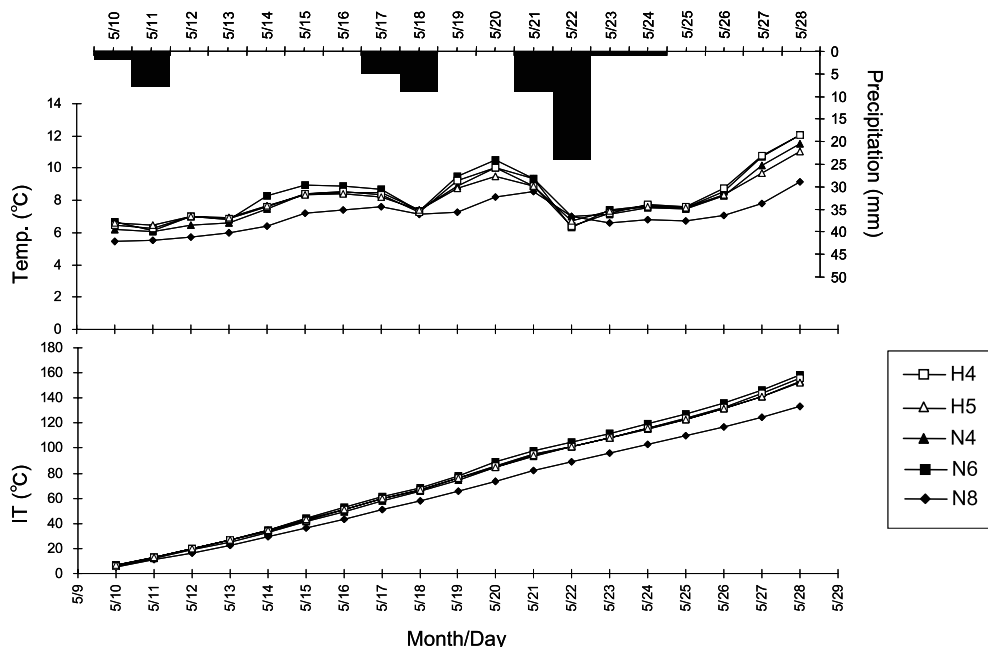


Fig. 4. Chronological changes of daily averages of intragravel water temperature and of the integrated temperature (IT).

図 4. 産卵床内部熱環境変量（日平均温度：Temp., 期間積算温度：IT）の時系列変化。

d10 の間に有意な正の相関 ($\rho=0.9$, $P<0.05$), Uc との間に有意な負の相関が認められ ($\rho=-0.9$, $P<0.05$), d10 が小さくなるほど負側に値が大きくなった (Fig. 5 (b)).

発眼卵生残率に影響を及ぼす要因

本研究で対象とした産卵床では、卵数は 210~1184 個、

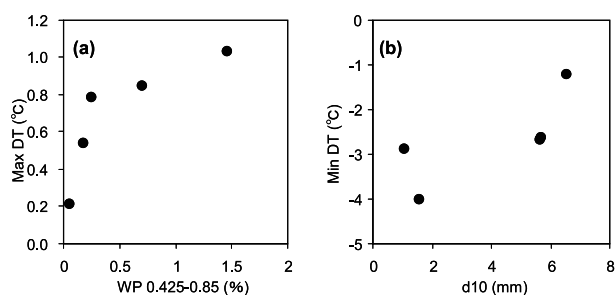


Fig. 5. Relationships (a) between the weight percentage of 0.425-0.85 mm (WP 0.425-0.85) and the maximum differential temperature (Max DT), and (b) between d10 and the minimum differential temperature (Min DT).

図 5. 粒度に関する変量と産卵床内部熱環境変量との関係。(a) 日最大温度差 (Max DT) の期間平均値と 0.425-0.85 の粒径クラスの重量百分率と (b) 日最小温度差 (Min DT) の期間平均値と d10 の関係。

卵径は 6.2~7.1 mm, 卵重は 0.14~0.21 g/egg の範囲であった (Table 1). また、生残率は 14.0~99.7% の範囲で大きくばらついたが、ほとんどの地点で 80% を超えており、それより生残率が低いのは H3 の 71.5%, H7 の 14%, N3 の 36.4% の 3 地点に限られた。

相関分析により、生残率に対する産卵床環境の影響を検討した結果、生残率と透水係数および細粒土砂変量との間には有意な相関は検出されなかったが、DO (mg/L), pH, NO_3^- , SO_4^{2-} と有意な正の相関、EC との間に有意な負の相関が認められた (Table 4). 生残率が低かった H3, H7, N3 の地点では、DO がそれぞれ 3.1, 5.4, 6.5 mg/L と、生残率が 80% を越える他の地点よりも低い値を示していた。

考 察

細粒土砂堆積がイトウの産卵床環境に及ぼす影響

細粒土砂の含有率の増加による透水性の低下は一般的な現象であり (村上ほか 2001), 本研究でも同様な傾向が得られた。また、粒径のクラスによって透水係数との相関の強さが異なり、とくに 0.425-0.85 mm クラスの重量百分率 (WP 0.425-0.85) と強い相関が認められたのは、主にその粒径クラスの土砂が河床間隙の目詰まりを

Table 4. Spearman's rank correlation coefficients between the survival rate and intragravel water quality, permeability coefficient (k), grain size variables ($n=17$). * and ** indicate significance levels at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

Variables	Survival rate	
	ρ	P
k	-0.34	0.18
CWP 2	-0.05	0.84
CWP 0.85	0.17	0.50
CWP 0.425	0.26	0.30
CWP 0.25	0.24	0.35
CWP 0.106	0.19	0.47
CWP 0.075	0.22	0.39
WP 0.85-2	-0.11	0.67
WP 0.425-0.85	0.24	0.36
WP 0.25-0.425	0.33	0.19
WP 0.106-0.25	0.27	0.30
WP 0.075-0.106	0.08	0.76
WP 0-0.075	0.22	0.39
d10	0.11	0.68
d60	-0.19	0.47
Uc	-0.32	0.21
DO (%)	0.44	0.08
DO (mg/L)	0.53	0.03 *
pH	0.53	0.03 *
EC	- 0.52	0.03 *
PO ₄ ³⁻	0.22	0.39
Cl ⁻	0.39	0.12
NO ₃ ⁻	0.64	0.01 **
SO ₄ ²⁻	0.51	0.04 *
Na ⁺	0.29	0.26
K ⁺	0.38	0.13
Mg ²⁺	0.30	0.24
Ca ²⁺	0.12	0.64

生じさせているためと考えられる。

細粒土砂の堆積により表流水と地下水の交換が妨げられるため、河床（産卵床）内部の溶存酸素濃度は低くなると考えられている（Tagart 1976, 1984; Reiser & White 1981）。しかし、本研究の DO 濃度差で示される産卵床内部の DO 濃度の低下と透水係数や細粒土砂に関する変量との関係は得られなかった。こうした結果は、Koski (1966), Vining et al. (1985), 山田 (2002) によっても報告されている。前述した表流水と地下水の交換以外にも、産卵床内部の DO 濃度は、水温、河床内部の有機物や鉱物の酸化などによる酸素消費によって低下したり（Greig et al. 2005）、表流水の水位が低いときに溶存酸素の低い地下水が湧き出す（upwelling）ことによって DO 濃度が低下する（Malcolm et al. 2003）ことも報告されている。これらのことから、産卵床内部の DO 濃度への影

響する要因は複雑であり、単純に細粒土砂堆積量の増加を介した透水性の低下が DO 濃度に影響するというわけではないと言える。

これに対し、表流水と産卵床内部との間でのイオン濃度差および温度差については、比較的粒径の小さいクラスの通過重量百分率との相関が認められ、小さい粒径の土砂の含有量が増加するほど、表流水よりも産卵床内部の Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻イオン濃度が低く、表流水との温度差が大きくなるという結果が得られた。これらは、細粒土砂の堆積量の増加により、表流水のイオンや熱が産卵床内に浸入および伝導し難いことを示している。そのため、産卵床内部のイオン濃度や水温に地点間のばらつきが現れたと思われる。

以上のことから、細粒土砂の堆積が産卵床内部環境に及ぼす影響は、溶存酸素濃度の低下よりも、むしろ物質や熱の浸透および伝達の阻害として現れ易いと考えられる。

細粒土砂堆積が卵生残率に及ぼす影響

多くの研究によってサケ科魚類の卵の生残率と細粒土砂の堆積量との関係が調べられており、実験方法、魚種や卵の成長段階等が異なるため単純には比較できないが、6.4 mm (Bjornn 1968), 4.6 mm (Platts et al. 1979), 3.3 mm (Koski 1966), 2 mm (Hausle and Coble 1976), 0.84 mm (McNeil & Ahnell 1964; Tagart 1976) 以下の粒径の重量百分率が増加すると卵の生残率や成長率が低下すると報告されている。野外で行われた実験では、ギンザケ (*O. kisutch*) の卵生残率 (Cederholm et al. 1981; Koski 1966), サクラマス の発眼卵生残率 (山田 2002) について粒度との関係が調べられており、ギンザケ卵生残率については、0.85 mm 通過重量百分率が 20% を超えると生残率が 10~45% まで低下し、サクラマス発眼卵については、2 mm 通過重量百分率が 40% を超えると生残率が 20% 以下まで低下すると報告されている。しかし、本研究で得られた 2 mm や 0.85 mm の通過重量百分率 (CWP 2.0, CWP 0.85) は、大半の調査地点でそれぞれ概ね 30%, 10% 以下であり、サケ科魚類の卵の生残に影響を及ぼすと報告されている堆積量よりも低いレベルであった（例えば、McNeil & Ahnell 1964; 山田 2002）。卵の生残に対して、細粒土砂の影響が検出されなかったのはそのためと考えられる。

細粒土砂の堆積量と同様に、ベニザケ (*O. nerka*) (Cooper 1965), ニジマス (*O. mykiss*) (Coble 1961), マスノスケ (Gangmark & Bakkala 1960), カラフトマス (*O. gorbuscha*) (Wickett 1958), ギンザケとニジマス (Phillips

& Campbell 1961), サクラマス (山田 2002) について, 透水性あるいは浸透性と卵の生残率の関係が調べられており, 透水係数や浸透流速が低下すると生残率が低下すると報告されている. これは, 透水性が低いと浸透流量が低下し, 溶存酸素の供給量 (濃度ではなく負荷) が卵の限界酸素消費量を下回るためと考えられている (Wickett 1954; 山田 2002). これに関連して, 溶存酸素濃度の低下とともに生残率が低下することは, 多くのサケ科魚類の卵で確かめられている (例えば, Coble 1961; Phillips & Campbell 1961; Sowden & Power 1985; Rubin & Glimsater 1996; 山田 2002; Malcolm et al. 2003). 本研究でも, 溶存酸素濃度の低下とともに生残率が低下することが確認されたが, 透水係数が生残率に影響する要因とはならなかった. これは, 前述の細粒土砂堆積量が低いレベルにあることと関連して, 本調査地では卵に必要な溶存酸素供給量が下回るほど, 透水係数が低下していなかったためと考えられる.

一方, 発眼や孵化過程, その後の成長段階がしばしば積算温度によって説明されるように, 産卵床内部の温度環境も孵化や仔魚の発育にとって重要な因子となる (Bjornn & Reiser 1991). 一般的に, 溶存酸素の飽和度や物質分解の程度についても温度に大きく依存する. 本研究では, 細粒土砂堆積量の増加により, 表流水と産卵床内部の温度差が大きくなることが示された. こうした温度環境の変化が卵の生残に及ぼす影響については明らかにできなかったが, 細粒土砂の堆積量の増加は, 産卵床内部の温度環境の変化を介して, その後の発育にも影響を及ぼすと思われる.

おわりに—イトウの産卵環境の保全に向けて—

本研究では, 細粒土砂の堆積がイトウ産卵床環境や卵の生残率に及ぼす影響を検討した. その結果, 細粒土砂の堆積が産卵床の透水性の低下をもたらし, 産室への熱の伝導や物質の浸透を阻害するといった産卵床内部環境に及ぼす影響が明らかになった. しかし, 本調査で対象とした河川では細粒土砂の堆積量が少なく, 卵の生残に対する細粒土砂堆積の直接的な影響は検出できなかった. そのため, 今後は細粒土砂の堆積が多い河川での調査や室内実験により, どの程度の堆積量が許容されるかについて温度環境と関連づけて再検討する必要がある.

イトウは, サイズにもよるが数千から1万数千粒の抱卵数を持つことが知られている (Gritsenko et al. 1974). また, 他のサケ科魚類とは違って, 同一の平瀬 (淵尻) を

選択して全ての卵を産卵するのではなく, 複数の淵尻に分散して産卵すると言われている (川村 1989; 福島 1998; Edo et al. 2000). 本研究からは複数の淵尻に分散したかについては明確にできないが, 産室あたりの平均卵数からも従来の記載と同様に複数回に分けて産卵していると推測される. このように多くの場所で産卵することには, 卵が全滅するリスクを回避するという点で適応的意義があると解釈されている (川村 1989). したがって, イトウの産卵環境の保全のためには, 産卵に適した淵尻が多く存在することが重要と考えられている (江戸・東 2002).

本研究により細粒土砂の堆積による産卵床内部環境の変化を通じてイトウの卵や仔魚の生育に影響を及ぼすことが懸念された. 一旦細粒土砂の流出が生じると, その下流では細粒土砂の堆積が生じ易くなるため (渡辺ほか 2001; Yamada & Nakamura 2002), 残存している淵尻の保全を行っただけでは好適な産卵場所の確保につながるとは限らない. そのような問題が生じた場合に, 迅速に対応するためにも, 前述した許容される堆積量を明らかにすることと並行して, それ以下の堆積量に留めることが可能な細粒土砂の生産源管理や河川構造への改修など, 今後の流域管理および河川整備技術の発展が望まれる.

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 笠井幹也氏, 岡本昌孝氏には, 調査地選定の際に, 有益な情報を提供していただいた. また, 独立行政法人土木研究所自然共生研究センターの萱場祐一センター長, 皆川朋子博士には, 水質計等の調査機材を提供していただいた. 三島啓雄氏, 桑原禎知氏, 羽根石晃彦氏には調査ならびにデータ整理を手伝っていただいた. さらに, 北海道大学大学院農学院地域環境学講座の院生諸氏には各種分析を手伝っていただいた. また, 本稿を作成するにあたり, 編集委員・査読者の方には, 丁寧かつ適切なコメントをいただいた. ここに記して謝意を表す. なお, 本研究の一部は, 標津川技術検討委員会調査研究費, 文部科学省科学研究費補助金 (No. 7780242) の助成により実施されたものであることを付記する.

摘 要

本研究は, 北海道北部の山地河川において, 細粒土砂の堆積がイトウの産卵床環境や卵の生残に及ぼす影響に

ついて検討した。その結果、溶存酸素濃度の低下により、発眼卵の生残率が低下する傾向が得られた。さらに、細粒土砂の堆積量の増加に伴い産卵床の透水係数や産室への物質の浸透性および熱の伝導性が低下することが示された。本研究の調査対象河川では細粒土砂の堆積量が低いレベルにあったため、卵の生残率に対する細粒土砂堆積の直接的な影響については明らかにすることはできなかった。よって、今後は細粒土砂の堆積が多い河川での調査や室内実験による検証作業によりどの程度の堆積量がイトウの卵の生残や発育に許容されるかについて検討すると同時に、細粒土砂の堆積を介した産卵床内部の温度環境の変化の影響についても明らかにする必要がある。

引用文献

- Bjornn T.C. (1968) Survival and emergence of trout and salmon fry in various gravel-sand mixtures. Logging and Salmon: Proceedings of a Forum, American Institute of Fishery Research Biologists. Alaska: 80-88.
- Bjornn T.C. & Reiser D.W. (1991) Habitat requirements of salmonids in streams. In Influence of Forest and Rangeland Management on Salmonid Fishes and Their Habitats, Meehan WR (ed.). American Fisheries Society Special Publication 19: 83-138.
- Cederholm C.J., Reid L.M. & Salo E.O. (1981) Cumulative effects of logging road sediment on salmonid populations in Clearwater River, Jefferson County, Washington. Proceedings of a conference on salmon spawning gravel: a renewable resource in the Pacific Northwest. Washington State University, Water Research Centre Report 39, Pullman: 38-74.
- Chapman D.W. (1988) Critical review of variables used to define effect of fines in redds of large salmonids. Transactions of the American Fisheries Society 117: 1-21.
- Coble D.W. (1961) Influence of water exchange and dissolved oxygen in redd on survival of steelhead trout embryos. Transactions of the American Fisheries Society 90: 469-474.
- Cooper A.C. (1965) The effect of transported stream sediments on survival of sockeye and pink salmon eggs and alevin. International Pacific Salmon Fisheries Commission Bulletin 18.
- Edo K., Kawamura H. & Higashi S. (2000) The structure and dimensions of redd and egg pockets of the endangered salmonid, Sakhalin taimen. Journal of Fish Biology 56: 890-904.
- 江戸謙顕・東正剛 (2002) 生物と環境、第4章「希少種保全のための調査研究—イトウを例として—」。三共出版、東京。
- Edo K., Kawaguchi Y., Nunokawa M., Kawamura H. & Higashi S. (2005) Morphology, stomach contents and growth of the endangered salmonid, Sakhalin taimen *Hucho perryi*, captured in the Sea of Okhotsk, northern Japan: evidence of an anadromous form. Environmental Biology of Fishes 74: 1-7.
- Fukushima M. (1994) Spawning migration and redd construction of Sakhalin taimen, *Hucho perryi* (Salmonidae) on northern Hokkaido Island, Japan. Journal of Fish Biology 44: 877-888.
- 福島路生 (1998) イトウの生態と生息環境。「魚からみた水環境—復元生態学に向けて／河川編—」(森誠一編), pp. 120-130. 信山社サイテック、東京。
- Fukushima M. (2001) Salmonid habitat — geomorphology relationships in low-gradient streams. Ecology 82: 1238-1246.
- Gangmark H.A. & Bakkala R.G. (1960) A comparative study of unstable and stable (artificial channel) spawning streams for incubating King salmon at Mill Creek. California Fish and Game 46: 151-164.
- Greig S.M., Sear D.A. & Carling P.A. (2005) The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: implications for sediment management. Science of the Total Environment 344: 241-258.
- Gritsenko O.F., Malkin E.M. & Churikov A.A. (1974) Sakhalinskii taimen '*Hucho perryi*' (Brevoort) reki Bogatoi (vostochnoe poberezh'e Sakhalin). Izv. TINRO 93: 91-100. (和訳 大屋善延 (1976) 魚と卵 143, 25-34).
- Hausle D.A. & Coble D.W. (1976) Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Transactions of the American Fisheries Society 105: 57-63.
- Hvorslev M.J. (1951) Time lag and soil permeability in groundwater observations. U.S. Corps of Eng. Waterways Exp. Sta. Vicksburg, Miss. Bull. 36: pp. 50.
- Irving J.S. & Bjornn T.C. (1984) Effects of substrate size composition on survival of kokanee salmon and cutthroat and rainbow trout embryos. University of Idaho, Cooperative Fishery Research Unit, Technical Report 84(6), Moscow.
- イトウ保護連絡協議会 (2006) イトウ保護連絡協議会ホームページ, <http://itou-net.hp.infoseek.co.jp/>.
- IUCN (2006) The IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources) Red List of Threatened Species, <http://www.iucnredlist.org/>.
- 環境省 (2003). 改定・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック— 4 汽水・淡水魚類. 財団法人自然環境研究センター、東京, pp. 230.
- 河口洋一・中村太士・萱場祐一 (2005) 標津川下流域で行った試験的な川の再蛇行化に伴う魚類と生息環境の変化. 応用生態工学 7: 187-199.
- 川村洋司・馬淵正裕・米川年三 (1983) 道東の汽水湖・厚岸湖で漁獲されるイトウ, *Hucho perryi* (Brevoort). 北海道立水産孵化場研究報告 38: 47-55.
- 川村洋司 (1989) イトウ, 山溪カラー名鑑・日本の淡水魚 (川那部浩哉・水野信彦編), pp. 93-99. 山と溪谷社.
- 川村洋司・原彰彦・寺西哲夫・松坂洋 (1996) イトウの養殖技術. (社) 新魚種開発協会.
- 木村清朗 (1966) イトウ *Hucho perryi* (BREVOORT) の生活史について. 魚類学雑誌 14: 17-25.
- 小宮山英重 (1997) イトウ. 「日本の希少淡水魚の現状と系統保存」(長田芳和・細谷和海編), pp. 22-35. 緑書房、東京.
- Koski K.V. (1966) The survival of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) from egg deposition to emergence in three Oregon coastal streams. Masters thesis. Oregon State University, Corvallis.
- Malcolm I.A., Youngson A. & Soulsby C. (2003) Survival of salmonid eggs in gravel bed streams: effects of groundwater-surface water interactions. River Research and Applications 19 (4): 303-316.

- Malcolm I. A., Soulsby C., Youngson A. F., Hannah D. M., McLaren I. S. & Thorne A. (2004) Hydrological influences on hyporheic water quality: implications for salmon egg survival. *Hydrological Processes* **18**: 1543-1560 (DOI: 10.1002/hyp.1405).
- McNeil W. J. & Ahnell W. H. (1964) Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. U. S. Fish and Wildlife Service Spatial Scientific Report Fisheries, 469.
- 村上まり恵・山田浩之・中村太士 (2001) 北海道南部の山地小河川における細粒土砂の堆積と浮き石および河床内の透水性に関する研究. *応用生態工学* **4**: 109-120.
- 村上豊 (1999) 土地利用の異なる貫気別川 2 支流に人工埋設したサクラマス卵の生残. 平成 10 年度共同研究報告書 農村地帯における河畔環境の再生に関する研究 北海道立林業試験場・北海道立水産孵化場・北海道立中央農業試験場, 28-35.
- 長坂晶子・中島美由紀・柳井清治・長坂有 (2000) 河床の砂礫構成が底生動物の生息環境に及ぼす影響—森林および畑地河川の比較—. *応用生態工学* **3**: 243-254.
- Phillips R. W. & Campbell H. J. (1961) The embryonic survival of coho salmon and steelhead trout as influenced by some environmental conditions in gravel beds. 14th annual report of the Pacific Marine Fisheries Commission. Portland, Oregon; 60-73.
- Platts W. S., Shirazi M. A. & Lewis D. H. (1979) Sediment particle sizes used by salmon for spawning with methods for evaluation. U. S. Environmental Protection Agency EPA 600/3-79-043. Corvallis, Oregon.
- Reiser D. W. & White R. G. (1981) Incubation of steelhead trout and spring Chinook salmon eggs in a moist environment. *Progressive Fish-Culturist* **43**: 131-134.
- Rubin J. F. & Glimsater C. (1996) Egg-to-fry survival of the sea trout in some streams of Gotland. *Journal of Fish Biology* **48**: 585-606.
- SPSS Inc. (2001) SPSS for Windows Ver. 10.1.3 J. SPSS Inc.: Chicago, USA.
- 佐川志朗・山下茂明・中村太士 (2002) 北海道天塩川水系一支流におけるイトウ成魚の夏季生息場所利用—イトウ生息地保全事項の提示. *日本生態学会誌* **52**: 167-176.
- 佐川志朗 (2006) イトウの生息環境保全のための基礎的研究. 北海道大学学位論文, p. 143.
- 標津川技術検討委員会 (2006) 標津川技術検討委員会付属資料, http://www.ks.hkd.mlit.go.jp/kasen/sibetucon/report/s_tec.html.
- Sowden T. K. & Power G. (1985) Prediction of rainbow trout embryo survival in relation to groundwater seepage and particle size of spawning substrates. *Transactions of the American Fisheries Society* **114**: 804-812.
- Tagart J. V. (1976) The survival from egg deposition to emergence of coho salmon in the Clearwater River, Jefferson County, Washington. Master's thesis. Univ. of Washington. Seattle.
- Tagart J. V. (1984) Coho salmon survival from egg deposition to emergence. *Proceedings of the Olympic Wild Fish Conference* (eds. J. M. Walton & D. B. Houston), pp. 173-182. Peninsula College, Fisheries Technology Program, Port Angeles, Washington.
- Tappel P. D. & Bjornn T. C. (1983) A new method of relating size of spawning gravel to salmonid embryo survival. *North American Journal of Fisheries Management* **3**: 123-135.
- Vining T. J., Blakely S. & Freeman G. M. (1985) An evaluation of the incubation life-phase of chum salmon in the middle Susitna River, Alaska. Alaska Department of Fish and Game Report 5. Anchorage.
- Vronskii B. B. & Leman V. N. (1991). Spawning stations, hydrological regime and survival of progeny in nests of Chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*, in the Kamchatka River Basin. *Journal of Ichthyology* **31**: 91-102.
- 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進 (2001) 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響. *応用生態工学* **4**: 133-146.
- Waters T. F. (1995) *Sediment in Streams — Sources, Biological Effects, and Control*. American Fisheries Society Monograph, 7, Maryland.
- Wells R. A. & McNeil W. J. (1970) Effect of quality of the spawning bed on the growth and development of pink salmon embryos and alevins. U. S. Fish and Wildlife Service Spatial Scientific Report Fisheries 616.
- Wickett W. P. (1954) The oxygen supply to salmon eggs in spawning beds. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **11**: 933-953.
- Wickett W. P. (1958) Review of certain environmental factors affecting the production of pink and chum salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **15**: 1103-1126.
- Yamada H. & Nakamura F. (2002) Effect of fine sediment deposition and channel works on periphyton biomass in the Mako-manai River, northern Japan. *River Research and Applications* **18**: 481-493.
- 山田浩之 (2002) 細粒土砂堆積による河床構造および河川生物相の変化機構に関する研究. 北海道大学博士論文; p. 136.
- Yamada H., Nakamura F., Watanabe Y., Murakami M. & Nogami T. (2005) Measuring hydraulic permeability in a streambed using the packer test. *Hydrological Processes* **19**: 2507-2524.
- 山田浩之 (2005) 細粒土砂汚染の実態とその対策. *農業土木北海道* **27**: 69-77.