河川技術論文集，第26巻, 2020年6月

自然産卵箇所におけるサケ卵の発眼期の生卵率と水質指標等の関連分析

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE SURVIVAL RATE OF SALMON EGGS UP TO THE EYED-EGG STAGE AND WATER QUALITY INDICATORS

谷瀬敦[1]・村山雅昭[2]
Atsushi TANISE and Masaaki MURAYAMA

[1]正会員　工修　国土交通省北海道開発局札幌開発建設部
（元（国研）土木研究所　寒地土木研究所　水環境保全チーム）
（〒060-8506 札幌市中央区北2条西19丁目）
[2]非会員　工修　国土交通省北海道開発局留萌開発建設部
（元（国研）土木研究所　寒地土木研究所　水環境保全チーム）
（〒077-8501　留萌市寿町1丁目86番地）

The importance of wild salmon have been reviewed for species diversity. The river environment in the salmon spawning area is not uniform. Water temperature, water quality, riverbed material, etc. of the riverbed differ depending on the difference of the channel, such as the main channel and the subchannel created by the formation of sandbar. In order to effectively promote conservation and regeneration measures of the spawning bed environment, it is effective to analyze the difference in survival rate to hatching of salmon eggs due to differences in river environments. In this study, as a first step to clarify the relationship between the survival rate to hatching and the environment in the spawning bed, we investigated and analyzed the relationship between the survival rate of salmon eggs up to the eyed-egg stage and the water quality. As a result, it was found that the low dissolved oxygen concentration was likely to have caused the decrease in survival rate up to the eyed-egg stage.

Key Words : *wild salmon, spawning bed, dissolved oxygen concentration, subchannel, survival rate to the eyed-egg stage*

１．はじめに

豊平川のサケ（*Oncorhynchus keta*）は水質汚濁の影響などにより1950年代に一旦絶滅したと考えられるが，水質の改善や人工孵化放流活動などにより，今では毎年1,000尾を超えるサケが遡上するまでに回復した[1)]．遡上したサケの自然産卵も多く，遡上するサケの約6割から7割が野生魚と見られている[2)]．近年，種の遺伝的多様性の確保やサケ資源量増加のため野生サケの存在意義が見直されてきている[2,3)]．そのため，野生個体群の維持増大のため，産卵環境に配慮した河川整備の必要性が指摘されている．また，豊平川においてはサケの自然産卵場所の保全・再生の取組を行う団体[4)]が出来るなど，保全活動が活発である．

札幌市豊平川さけ科学館で行っている豊平川のサケ産卵床箇所調査によると，産卵床は主流路だけではなく，中州の形成により河岸際に生じた副流路にも多数産卵していることが明らかになっている[1)]．一方，一旦形成された副流路は河床変動により閉塞したり流路が狭まったりするなどして，サケの産卵が見られなくなるところもある．そのため，サケの産卵可能エリアの増大を図るため，閉塞した副流路の上流部に導水路を掘削するなど再生の取組も開始されている[5)]．一方，年間のサケの産卵床箇所数は遡上したサケの数でほぼ決まり，毎年の遡上数の変動がわずかであれば，どこかで産卵床が増えれば，どこかで減少する．産卵床毎に河床材料や産卵床内の水質は異なり，産卵床の環境の違いにより，卵が稚魚まで成長して浮上するまでの生残率が異なると知られている．

河床材料と浸透流，生残率の関係として，Yamada and Nakamura[6)] はサクラマスの発眼卵を用いた人工産卵床実験により，河床材料に細粒分が多いと浸透流が減少し，

生残率が低下することを述べている．Greigら[7]は産卵室内の溶存酸素量と浸透流量の積から算出される溶存酸素フラックスが卵の生存に重要であると述べている．有賀ら[2]が豊平川における自然産卵による卵から稚魚までの生残率を推定した結果として7.5 %～22.2 %，平均12.6 %が得られている．野生サケの遡上数を増加するためには，生残率が高いエリアでの産卵を誘導したり，生残率が高いエリアの積極的な保全・再生の取組を行うなどにより，稚魚の浮上数増加を図ることが有効であると考えられる．そのため，河川環境の違いによるサケ卵の稚魚浮上までの生残率の違いとその要因分析を行うことは有効である．

本研究では浮上までの生残率と産卵床内の環境等との関係を明らかにするための第一段階として，サケが自然産卵した産卵床における発眼期までの生残率(以下，生卵率という)と水温・水質等の関係について調査・分析を行った．

2．方法

調査河川は，札幌市内を流れる豊平川とした．調査区間は，豊平川の河道区間の中でもサケの産卵が多く見られる石狩川本川合流点から上流約10.6 kmから16.6 km地点の間の約6 kmの区間とした（**図-1**）．調査区間下流端は豊平川扇状地の扇端付近に位置し，区間の平均河床勾配は1/420程度である．

現地調査は2018年度と2019年度の2カ年のサケ遡上期に行った．2018年度は調査範囲の中でも特にサケ産卵床が多く確認される範囲で，主流路，副流路と大きく流路を区分した際の，流路区分毎の産卵適地比較評価のために，水深，流速と河床間隙水水質，水温及び河床表面粒径の概略調査を行った．調査を行った時期は水深，流速，河床表面粒径についてはサケ産卵期の10月中旬に，水質は10月中旬，12月下旬，2月下旬の3回である．水温は自記水温計により10月中旬から3月中旬まで計測した．

2019年度の調査は調査範囲内で確認されたサケ産卵床15箇所について，産卵床毎に生卵率と水深，流速，河床間隙水水質，水温及び浸透流調査による動水勾配と透水係数の計測を行った．生卵率は10月30日から11月11日までの調査により確認された産卵床の内，本流部や副流路など流路や水深，流速など河川環境が異なる地点の産卵床15床を選定して実施した．産卵床から卵を掘り起こし，生卵と死卵の数を計数し全数に占める生卵数の割合から生卵率を求めた．計数後の生卵は今後の浮上率調査のために元の河床に埋め戻しを行っている．水深，流速は産卵床を確認した11月上旬と11月下旬，及びサケ卵の生卵率を調査した12月中旬の3回計測した．水質は11月の下旬，浸透流の計測は11月下旬と12月中旬に計測した．

流速の計測は60 %水深で河川用電磁流向流速計を使用して行った．河床の間隙水の水質，水温はサケの平均的

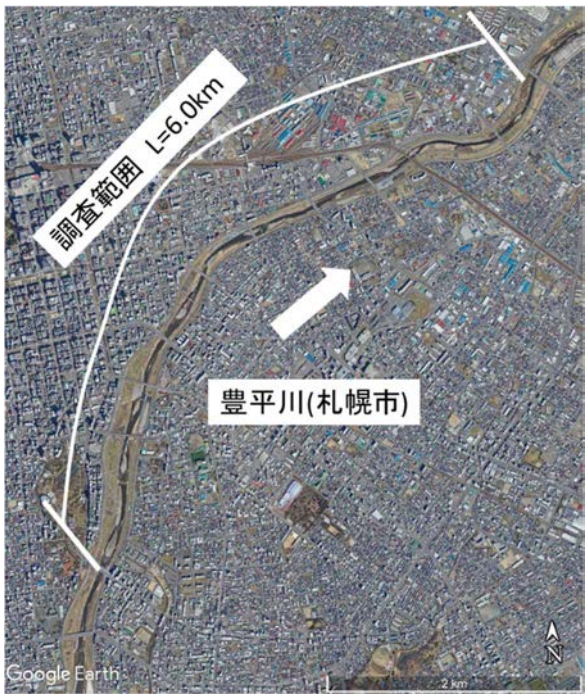

図-1　調査箇所図

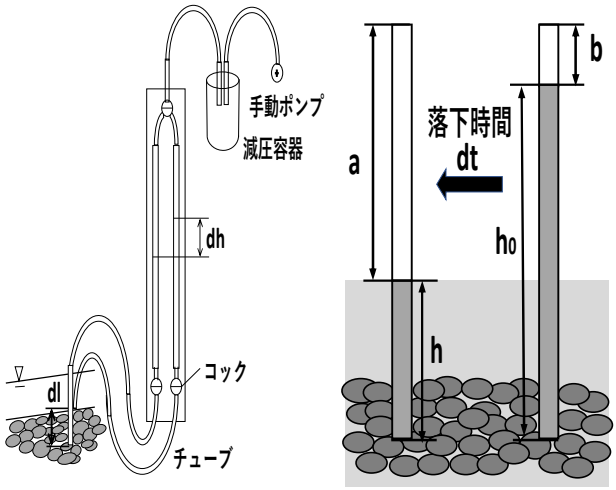

図-2　計測模式図
動水勾配計測用ピエゾメータ(左)と水頭落下試験(右)

な産室深さが約20cmと知られていること[8]から，河床から20cmの深さに採水用の管を差し，ポンプにより汲み上げて採水した．管を差しポンプにより汲み上げる方法のため，汲み上げ初期の水には濁りが多く含まれる．そのため，汲み上げ初期の水は川に戻し，一定程度経過し，濁りが収まった水を分析した．採水した水はデジタル温度計，ポータブル溶存酸素・pH計により直ちに現地機械計測したほか，室内分析も行った．動水勾配はBaxterら[9]が考案したピエゾメータを用いた浸透流調査方法により求めた．透水係数は落下透水試験を実施して求めた．ピエゾメータを用いた浸透流調査方法は**図-2**左に示す装置により，河床面から約20cm深さと河床面との水頭差を計測して，鉛直方向の動水勾配を求めるものである．

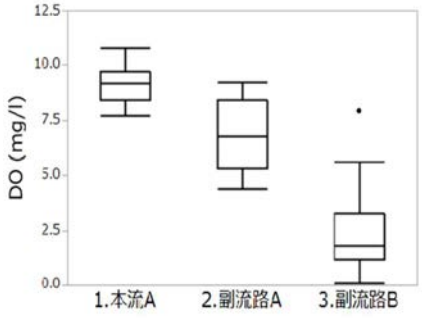

図-3 調査エリア毎の溶存酸素量

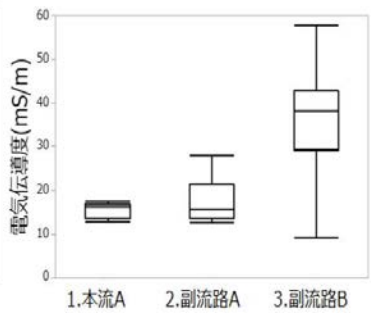

図-4 調査エリア毎の電気伝導度

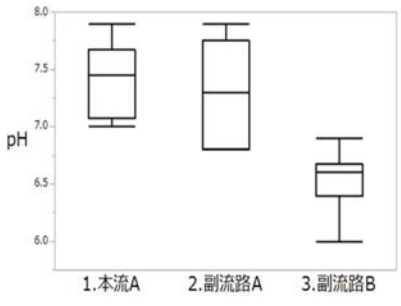

図-5 調査エリア毎のpH

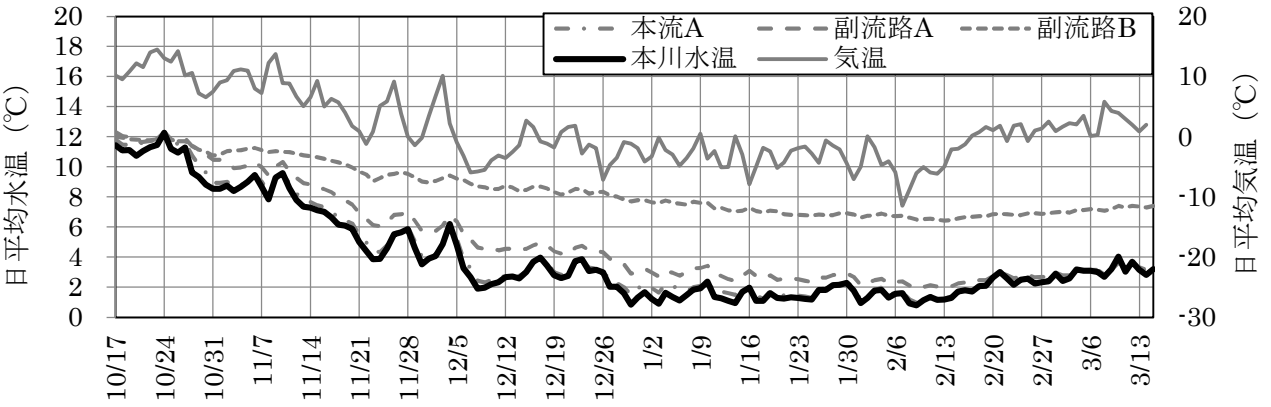

図-6 各調査エリア内の複数箇所で計測した河床間隙水温の平均の日平均値と本川水温及び気温の日平均値

透水係数は図-2右に示す器具により水管内の水面の低下速度を計測して求める．動水勾配 i は式(1)，透水係数 k は式(2)により求める[9]．

$$i = \frac{dh}{dl} \tag{1}$$

$$k = \left[\frac{(0.2501)\left(d_{piezometer}\right)}{dt}\right]\left[log_e\frac{h_0}{h}\right] \tag{2}$$

ここに，$d_{piezometer}$はピエゾメータの直径である．

サケ卵への溶存酸素の供給可能量を評価する指標としてGreigら[7]が導入した溶存酸素フラックスは式（3）により算出した．

$$O_2(flux) = C_0 v a_{egg} \tag{3}$$

$$v = ki \tag{4}$$

ここに，O_2は溶存酸素フラックス(mg/h)，C_0は溶存酸素量（mg/l），vは河床近傍の伏流または湧出の浸透流速，a_{egg}はサケ卵の平均断面積である．ここではサケ卵の半径を4 mmとした．

3．結果

(1) 2018年度調査結果

図-3,4,5に豊平川において例年サケが多数産卵する本川砂州前縁部エリア（本流A）と副流路エリア2地区（副流路Aと副流路B）で計測した水質の結果を箱ひげ図で示す．また，同じエリア内の複数地点において，河床から約20cmの深さの間隙水の水温と河川水温を連続計測した結果を図-6に示す．図-6には各エリア内の複数地点で計測した値の平均値を図示している．

本流Aの溶存酸素量（DO）は副流路と比較して高く，電気伝導度は低い．河床間隙水温の連続計測結果も河川水とほぼ同一の挙動を示している．そのため本流Aの河床の間隙水は本川から浸透した流水が多く占めていると思われる．

副流路BはDO，pHがともに低く，電気伝導度は本流A副流路Aと比較して高い．特にDOは中央値で1.83 mg/lと著しく低い．河床間隙水温も河川水温及びその外の箇所と比較して1 ℃～4 ℃程度高く推移している．副流路BはDOが低く水温が高いことから，地下水由来の湧水が多く占めていると思われる．

副流路Aには本川及び本流Aと比較すると，地点によっては本川水温と比較して4 ℃以上高い水温を継続して示し，かつ，DOが低く電気伝導度は高い箇所があり，

表-2　サケ産卵床箇所の水深，流速及び産室内の水温，水質等計測結果

	水深（cm）		流速（m/s）		産卵室内の水質（11月下旬）					産室内の水温（℃）		動水勾配		透水係数		溶存酸素flux（mg/h）
産卵床No.	11月下旬	12月中旬	11月下旬	12月中旬	pH	BOD（mg/l）	SS（mg/l）	電気伝導度（mS/m）	DO（mg/l）	11月下旬	12月中旬	11月下旬	12月中旬	11月下旬	12月中旬	11月下旬
No.1	47	69	0.26	0.29	7.0	0.5	65	27.1	7.3	4.3	9.1	−0.017	0.005	0.036	0.041	0.013
No.2	66	77	0.16	0.32	6.7	0.7	65	42.6	3.5	7.2	8.6	0.018	0.071	0.123	0.064	0.013
No.3	55	62	0.45	0.40	7.0	0.8	11	24.4	10.6	4.7	2.9	0.037	−0.032	0.194	0.138	0.134
No.4	50	64	0.31	0.56	7.1	0.2	99	15.6	11.0	5.8	3.3	−0.031	0.053	0.158	0.016	0.099
No.5	52	55	0.07	0.16	6.8	3.7	21	24.3	8.6	7.8	6.0	−0.022	0.013	0.101	0.042	0.031
No.6	57	63	0.28	0.32	7.0	0.4	48	21.5	9.2	7.2	2.8	−0.010	−0.012	0.051	0.037	0.017
No.7	52	66	0.41	0.60	7.1	0.7	5	19.4	11.5	4.0	3.3	−0.052	0.038	0.259	0.158	0.291
No.8	38	44	0.14	0.28	6.8	0.1	5	19.0	5.2	9.1	9.0	0.007	0.031	0.169	0.029	0.009
No.9	44	55	0.54	0.47	7.0	1.5	19	16.5	9.0	4.9	3.5	0.030	0.010	0.209	0.022	0.098
No.10	48	51	0.08	0.13	7.1	0.3	11	15.6	10.8	4.6	3.6	−0.084	0.018	0.207	0.054	0.332
No.11	31	41	0.45	0.38	6.9	0.2	128	16.0	9.2	6.8	3.5	−0.042	0.029	0.070	0.262	0.050
No.12	41	41	0.26	0.34	6.7	1.0	30	15.8	9.3	7.7	3.3	−0.120	0.019	0.195	0.077	0.387
No.13	42	51	0.17	0.20	6.8	0.8	55	15.5	12.6	3.2	1.9	0.038	−0.046	0.053	0.035	0.046
No.14	44	55	0.36	0.40	6.9	0.7	80	16.5	11.4	4.5	1.5	0.025	−0.040	0.182	0.040	0.103
No.15	57	65	0.22	0.42	7.0	0.4	21	16.3	13.0	3.6	2.4	0.040	−0.018	0.016	0.111	0.024

表-1　サケ産卵床の生卵率調査結果

産卵床No.	合流点からの大凡の距離（km）	生卵率調査結果			
		生卵数	死卵数	総卵数	生卵率
No.1	11.81	282	217	499	**56.5%**
No.2	12.16	89	868	957	**9.3%**
No.3	12.18	321	231	552	**58.2%**
No.4	12.44	176	90	266	**66.2%**
No.5	12.76	399	351	750	**53.2%**
No.6	12.94	251	301	552	**45.5%**
No.7	12.98	11	103	114	**9.6%**
No.8	13.18	30	51	81	**37.0%**
No.9	13.30	734	268	1002	**73.3%**
No.10	14.28	201	72	273	**73.6%**
No.11	14.34	475	226	701	**67.8%**
No.12	14.36	410	316	726	**56.5%**
No.13	14.76	575	76	651	**88.3%**
No.14	14.78	660	267	927	**71.2%**
No.15	14.86	382	580	962	**39.7%**
平均		333	268	601	**55.4%**

河川水由来ではなく地下水由来の湧水の影響を受けたと思われる水温，水質を示す地点がある．

以上，2018年度の調査により，豊平川でサケが多数産卵する区間内でも，場所により周辺の地下水の影響などで河床間隙水の水質・水温が大きく異なることが判明した．

(2) 2019年度調査結果

2019年度はサケが実際に産卵した産卵床の産室内の水質，水温，浸透流及び発眼期の生卵率を調査した．

表-1に12月17日から25日にかけ，産卵床15箇所で生卵率を調査した結果を示す．全15箇所の産卵床の生卵率調査時には，生卵は発眼していたが，卵が白濁した死卵も確認された．生卵，死卵それぞれの全数を計数して生卵率を求めた．その結果，1産卵床当たりの総卵数は81個から1002個，平均で601個であった．これは，豊平川において小宮山ら[10]が調査した結果の1産卵床当たり平均507個より約100個多く，佐野[11]が北海道内の河川で調査した結果の平均942個より341個少ない結果であった．生卵率は最小で9.3 %，最大で88.3 %，平均では55.4 %であり，同じく小宮山ら[10]が調査した結果の平均98.3 %，佐野[11]が調査した結果の平均92.3 %と比較すると40ポイント程度低い値であった．

表-2に産卵床地点の水深，流速と産室内の水温，水質，浸透流速の測定結果の一覧を示す．水質は室内分析した結果について示す．11月下旬の調査時の水深は最少が31 cmで最大が66 cmであった．12月中旬の水深は水位の上昇などにより，11月下旬の調査時と比較して10 cm程度深くなっていた．流速は11月下旬の調査時は最低が0.07 m/s最大で0.54 m/sであり，調査地点による流速差が0.4 m/s以上あった．12月中旬の調査時の流速は11月下旬時と比較して速かった．

産卵室内のpHの値は6.7から7.1の範囲の中性を示し，地点間には大きな差が見られなかった．BODはNo.5地点が3.7 mg/l，No.9地点が1.5mg/lと比較的高い値を示した以外は1.0 mg/l以下と低い値であった．電気伝導度は15.5 mS/mから42.6 mS/mと調査地点間の差が大きかった．

DOは調査地点間での差が大きく，最低では3.5 mg/lと生活環境の保全に関する環境基準（河川）の水産2級（サケ科魚類及びアユ等貧腐水性水域の水産生物用）基準値である5 mg/lを下回っていた．

SSは5 mg/lから128 mg/lの値であり，比較的高い地点も見られた．今回採用した採水方法では，ある程度，底質からのSS成分が混ざってしまうことから，BODなどの

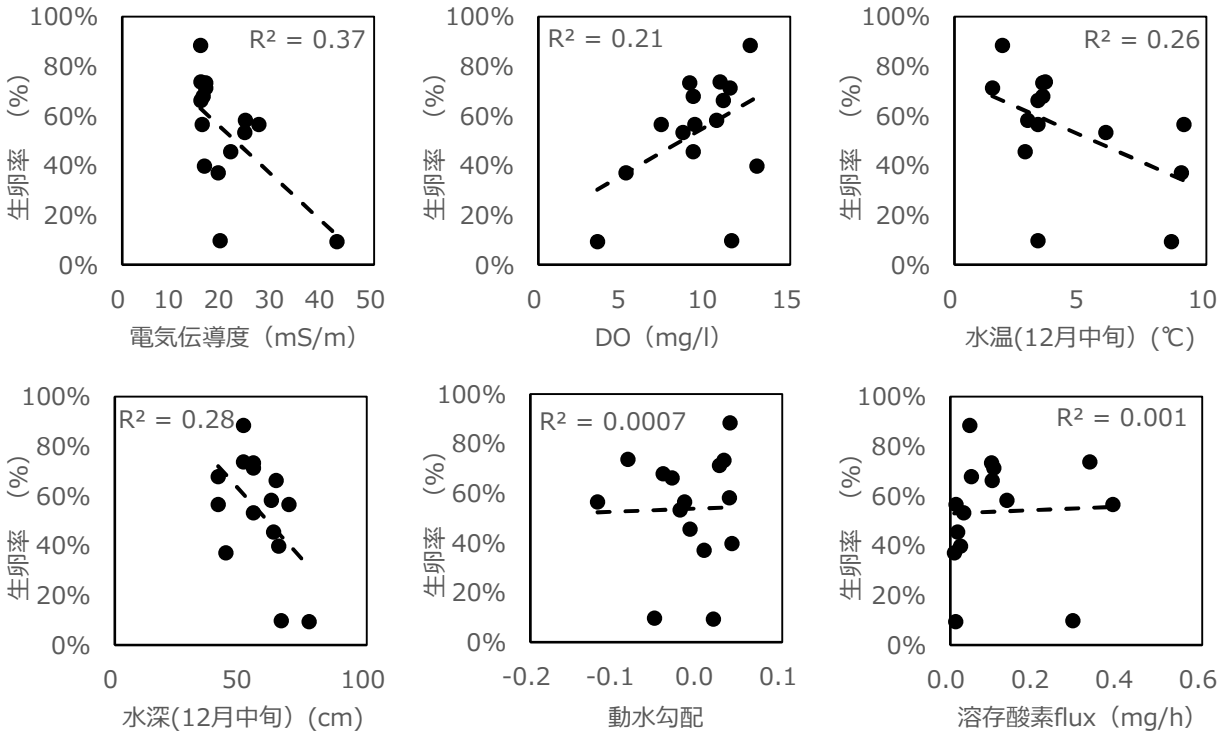

図-7　生卵率と水質，水温，水深等との散布図

水質分析結果に影響を与えることが想定されたが，SSとほかの水質項目との相関は低く影響はほとんど見られなかったと言える．産室内の水温も調査地点間での差が大きく，11月下旬の調査では最低と最高で6 ℃近い差があった．12月中旬の水温は11月下旬と比べ，殆どの地点で低かったが，一部の地点では11月下旬より高い値を示した．動水勾配と透水係数は調査時期の違いにより異なる傾向を示した地点が多くあった．動水勾配の符号が正の時は河床下から河床面への上向きの湧昇流が卓越していることを示し，負の時は下向きの浸透流が卓越していることを示すが，時期によって流れの向きが逆転するなど，浸透流の状況が変化する結果が得られた．動水勾配や透水係数などから求めた各地点の溶存酸素フラックスは**表-2**に示すとおりである．

4．考察

2019年度に調査した生卵率が最小で9.3 %，最大で88.3 %と調査地点間で差が生じた要因を明らかにするため，水質分析結果などとの関連を調べた．**図-7**に電気伝導度，溶存酸素量DO，水温，水深，動水勾配及び溶存酸素フラックスと生卵率の関係を示す．本調査で確認した死卵は，受精後に水質等の環境の影響により死卵に至ったものばかりではなく，産卵時に受精しなかった無精卵も含まれている可能性もある．また，サケの卵は発眼するまでは衝撃に弱く，一度できた産卵床を外のサケが産卵のために乱すことにより，死卵となる可能性もある．このような要因で生卵率が一定の割合で低下することもある．本研究においては無精卵と衝撃による減耗については考慮しない．

表-3　生卵率との決定係数が比較的高かった項目間の相関係数

	電気伝導度	DO	水温（12月）	水深（12月）
電気伝導度	1	−0.72	0.66	0.66
DO	−0.72	1	−0.87	−0.13
水温（12月）	0.66	−0.87	1	0.23
水深（12月）	0.66	−0.13	0.23	1

生卵率と電気伝導度との間には負の相関があり，電気伝導度の値が大きいほど生卵率は低い．溶存酸素DOとの間には正の相関があり，DOの値が大きいほど生卵率は高い．河床間隙水の水温とは負の相関があり，河床間隙水温が高いほど生卵率は低い．水深との間には負の相関があり，水深が深いほど生卵率は低い．動水勾配及び溶存酸素フラックスとの間には相関が認められなかった．Greigら[7]は産卵室内の溶存酸素量と浸透流量の積から算出される溶存酸素フラックスが卵の生存に重要であると述べているが，本研究の調査では生卵率と溶存酸素フラックスとの間に関連性は確認できなかった．今後の更なるデータの蓄積等が必要であると考えられる．

生卵率の結果に実際に影響を与えている要因は，電気伝導度，DO，水温，水深のうちのどれか，もしくは複合的な要因なのかを考察する．電気伝導度は，水中に含まれる電解質の濃度が高くなれば値は大きくなり，一般に，河川水と比較して地下水の方が大きい値を示す．

DO及び水温の値も河川水と地下水では差が生じ，一般に冬季の水温は河川水より地下水が高く，DOは地下水が低くなる．

表-3に電気伝導度とDOと水温及び水深のそれぞれの間の相関係数を示す．電気伝導度とDOと水温はそれぞれの間の相関係数が高く，電気伝導度，DO及び水温のいずれかもしくは複数が生卵率に関連していると考えられる．Greigら[7] が明らかにした溶存酸素fluxの重要性や，小林[12] により紹介されたロシアの研究によると，DOが6 mg/l以下では孵化には望ましくなく，正常な発育のためには7～9 mg/lの範囲が適していることや，鈴木[13]による河床材料の通水性が低いほどサケ稚魚の浮上率が低下するとの既往研究成果などから，一定濃度以上のDOが必要であると考えられる．産卵床内の水温については，サケの産卵から発眼，孵化，浮上までに必要なそれぞれの積算水温はほぼ決まっている．サケは冷水性魚類のため高水温（15℃以上）での卵の生育は避けることと通常言われているものの，低水温下においてサケ卵を飼育したことにより，発眼期の生卵率に異なる結果が得られることは無い．電解質濃度と生卵率との関係についての関係を明らかにした報告も調べた限り無く，影響があるのか無いのかは今のところ不明である．そのため，電気伝導度と生卵率に相関がみられたのは，DOと電気伝導度の相関が高いことが影響したのか，あるいは，電解質そのものが関係しているのかについて明らかにすることは出来なかった．水深と生卵率に負の相関が見られたことについて，水深が生卵率に物理的に影響を与えることはないと考えられる．

以上より，低濃度のDOが生卵率の低下に影響を与えた可能性が高く，電気伝導度については生卵率と関連がないとまでは言い切れない．

５．おわりに

本研究では豊平川のサケ産卵床における生卵率と水質等の関連を調べた．得られた結果を以下に示す．

・豊平川でサケが多数産卵する区間内でも，主流路や副流路など，大きく区分したエリア毎に地下水の影響などで河床間隙水の水質・水温の特徴が異なることが明らかになった．

・産室のDOが低い産卵床の生卵率は低く，DOが生卵率の低下に影響を与えた可能性が高い．

・産室の電気伝導度が高いことが生卵率の低下につながった可能性がないとは否定できない．

今後は，稚魚が孵化して浮上するまでの生残率も調査し，サケの産卵から浮上までの生残率と河川の水質や物理環境との関連を明らかにしたい．

謝辞：国土交通省北海道開発局札幌開発建設部札幌河川事務所には現地調査の協力を頂いた．ここに記して謝意を示す．

参考文献

1) 札幌市豊平川さけ科学館 HP：https://salmon-museum.jp/
2) 有賀望ら：大都市を流れる豊平川におけるさけ *Oncorhynchus keta* 野生個体群の存続可能性の評価，日本水産学会誌 80 巻 6 号，pp.934-945，2014
3) 帰山雅秀，眞山紘：野生産サケの復活をめざして，魚と卵 Tech.Rep.Hokkaido salmon Hatchery(165)，pp.41-52，1996
4) 札幌ワイルドサーモンプロジェクト HP：https://www.sapporo-wild-salmon-project.com/
5) 片岡朋子ら：産官学民との協働によるサケ産卵環境改善の取組，日本生態学会誌 69，pp.219-227，2019
6) Yamada,H.and Nakamura,F.：Effects of fine sediment accumulation on the red environment and the survival rate of masu salmon(*Oncorhynchus masou*) embryos, *Landscape and Ecological Engineering*, 5, 2009.7
7) Greig ST, Sear DA, Carling PA．：A field-based assessment of oxygen supply to incubating Atlantic salmon (*Salmo salar)* embryos, *Hydrological Processes*, Vol.21, pp.3087-3100, 2007.
8) Burner CJ.：Characteristics of spawning nests of Columbia River salmon, *U.S. Fish and wildlife Service Fishery Bulletin* 1951, 61, pp.97-110
9) Baxter C., Hauer R.F. and Woessner W.W.：Measuring groundwater-stream water exchange：newtechniques for installing minipiezometers and estimating hydraulic conductivity, *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol.132, pp.493-502, 2003
10) 小宮山英重，堀本宏，小原聡：豊平川におけるシロザケの河川回帰率とその自然環境，北海道の自然と生物，2，pp.1-6，1990
11) 佐野誠三：北日本産サケ属の生態と蕃殖について，北海道さけ・ますふ化場研究報告　第 14 号，pp.21-90，1959
12) 小林哲夫：サケとカラフトマスの産卵環境，北海道さけ・ます孵化場研究報告　第 22 号，pp. 7-13，1968
13) 鈴木俊哉：自然再生産を利用したサケ資源保全への取り組み，SALMON 情報　2008；2，pp. 3-5，2008.

（2020. 4. 2受付）