

## 積雪寒冷地河川の物質輸送に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、黒田保孝、阿部孝章、  
佐藤嘉昭、田中忠彦、鳥谷部寿人

### 【要旨】

河川流水中の物質の輸送機構を解明することは河川環境を考える上で重要であり、河川環境に影響を与える物質として栄養塩類、浮遊砂、油がある。油に関しては、河川結氷時の油流出事故が頻繁に報告されているが、河氷の存在により、どの場所に油が滞留しているかの推測が困難となっている。このため、利水及び河川環境上のリスクとなっている。河川結氷時の物質輸送に関する現地観測は、困難を伴うことから事例に乏しく、現象が未解明である。本研究は、結氷河川における物質の輸送機構を解明し、結氷河川における油流出時の汚染状況の推測技術の開発等を提案するものである。

キーワード：結氷河川、塩水遡上、油流出、水理模型実験、数値解析、アンカーアイス、現地観測、藻類、物質循環

### 1. はじめに

本研究では、河川結氷時の物質輸送の現地観測及び水理実験の実施、物質輸送に関する数値計算モデルの開発、結氷河川における物質の輸送機構の解明、結氷河川における油流出時の汚染状況の推測技術の開発について、以下に示した3つの項目に区分して段階的に研究を進めた。

河川結氷時の物質輸送に関する数値計算モデルの開発：河川結氷時の塩水遡上の基礎的現象を解明するため、水面に氷板模型を設置した塩水遡上実験を実施するとともに1次元2層流不定流計算を構築して、河川結氷時の塩水遡上現象の解明を試みた。

結氷河川における油流出時の汚染状況の推測技術の開発：水域への油流出事故は、生態系や河川環境に甚大な悪影響を及ぼすことから迅速な処理が求められる。積雪寒冷地域では灯油などの流出事故が冬期間に頻発し、また水面が河氷で覆われている河川結氷時に油が流出する場合は、油は河氷下を流下するため、目視することができない。そのため、氷板模型下に灯油を流下させる水理実験を実施し、さらに水と油の2層流計算モデルを構築し、油流下速度の予測手法の開発を試みた。

結氷河川における物質の輸送機構の解明：アンカーアイスは河床にフラジールアイスが付着する現象であり、河川水が0℃以下の過冷却状態となり、急勾配で水深が浅い箇所形成される。しかし、アンカ

ーアイスの発生と結氷河川の物質輸送に及ぼす影響については、不明な点が多い。また、アンカーアイスが下流へと流下する際に、取水口に流入し、取水障害を発生させる課題があり、アンカーアイスの発生メカニズムに関する知見が利水面からも求められている。そのため、アンカーアイスの発生メカニズムの解明およびアンカーアイスが結氷河川の物質循環に与える影響を明らかにするために、現地観測を実施し、定式化された計算モデルおよび観測データを用いて検討を行った。

### 2. 河川結氷時の物質輸送に関する数値計算モデルの開発

#### 2.1. 河川結氷時の塩水遡上

河川河口域は、人口が集中する地域が多く、河川内では潮汐の影響により栄養塩類を含んだ塩水が河川を遡上して淡水と混じり合うため、豊かな河川環境が形成されている。一方で、上水道の取水口に塩水が流入する取水障害<sup>1)</sup>や、汽水湖に塩水が滞留するために起こる青潮などの問題<sup>2)</sup>があり、主に河川開水時の塩水遡上現象に関して研究が進められている。積雪寒冷地に位置する河川では、気温の低下および流速の減少によって、河川水面に河氷が形成され、主に流水はこの河氷の下を流れる。このような期間は、北海道において12月下旬頃から4月上旬頃の年間の約3割の期間である。河川結氷時の流況

は、河床粗度の影響に加えて河氷の粗度の影響を受けるため、開水時の流況とは異なる。河川結氷時の塩水遡上の流況については、既往研究<sup>3)</sup>により、1横断面における現地観測結果から、塩水遡上時の淡水流速は、河氷の摩擦抵抗の影響を受けることが示唆されている。Morse ら<sup>4)</sup>は、縦断的な観測結果から、河川結氷時は塩水遡上速度が遅くなることを示し、河氷粗度の影響を Manning の粗度係数で考慮し、塩水遡上現象は無視した1次元数値計算を行い、河川結氷時は開水時に比べて水位が上昇するという計算結果を得ている。

河川結氷時の塩水遡上の主な影響因子は、流速、水温、塩分濃度、密度、河床粗度、河氷粗度、潮位であり、これらは相互に影響を及ぼすことが考えられる。風の影響については、水面は河氷で覆われているため無視できると考えられる。河川結氷時の塩水遡上に関する基礎的な知見を得るためには、これらの影響因子を測定可能な水理実験が有益である。

本研究は、水面に氷板模型を設置した塩水遡上実験を実施し、実験値を解析するとともに、河氷粗度および塩水遡上を考慮した1次元2層不定流計算を構築して、河川結氷時の塩水遡上の現象の解明を試みた。

## 2.2. 塩水遡上実験

実験水路<sup>5)</sup>の概略を図-1に示す。実験水路の水路床および水路側面は透明なアクリル板で構成され、水路長  $L=9.0\text{m}$ 、水路幅  $B=0.2\text{m}$ 、水路床勾配  $i_b=0$  であり、水路左側を上流とした。淡水は上流左側貯水槽からポンプにより水路へと供給され、堰Aを越流して水路内を流れる。下流端に到達すると取水部Cを越流し循環パイプを経由して再び貯水槽へと流れる。塩水は下流右側貯水槽からポンプにより供給され、堰Bを越流して取水部Cの下を経由して水路内を流れる。淡水と塩水の流量管理として、ポンプ

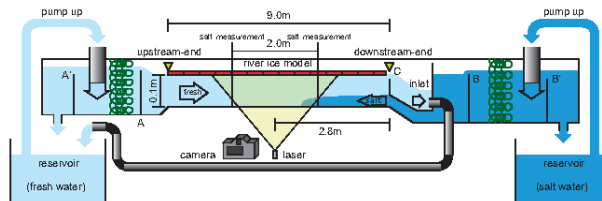


図-1 実験水路の概略図

により供給される流量を各実験前に5回の検定を行った。また、ポンプの電圧が一定となるように交流電圧安定化装置(omron 製、RE100FW)にポンプを接続した。

### (1) 実験条件

実験条件を表-1に示す。実験は水理条件を3つ設定して、同条件で氷板模型ありなしを設定し計6ケースの実験を行った。表-1の内部 Froude 数  $Fr_1$  は式(1)、Reynolds 数  $Re_1$  は式(2)より算出した。

$$Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{\varepsilon gh}} \quad (1)$$

$$Re_1 = \frac{Ru_1}{\nu} \quad (2)$$

$u$ [m/s]: 平均流速、 $\varepsilon$ [無次元]: 下層に対する密度差 ( $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ )、 $g$ [m/s<sup>2</sup>]: 重力加速度で9.8、 $h$ [m]: 水深、 $R$ [m]: 上層における径深(潤辺は水路底面、側面、氷板面、界面を流況に応じて考慮)、 $\nu$ [m<sup>2</sup>/s]: 動粘性係数で実験時の淡水温度から  $1.3273 \times 10^{-6}$  とした。

氷板模型の素材は、実河川の氷板と同等の比重をもつポリプロピレン(19.8cm × 19.8cm × 0.5cm)を用いた。実河川の氷板底面は粗度があるため、本研究では実験的に、直径0.6cmの球状の発砲スチロールをポリプロピレンの下面の全面に両面テープで貼り付けた。発砲スチロールを貼り付けたことにより比重は軽くなるため、比重調整としてポリプロピ

表-1 実験条件

実験条件	氷板模型	$q_1$ [m <sup>2</sup> /s]	$q_2$ [m <sup>2</sup> /s]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	S[psu]	$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Fr_1'$	$Re_1'$
case 1	なし	0.00200	0.00185	9.50	8.90	25.6	999.786	1019.783	0.018	682
case 2	なし	0.00300	0.00185	8.70	8.00	25.6	999.847	1019.903	0.026	996
case 3	なし	0.00400	0.00185	8.00	7.80	25.6	999.893	1019.928	0.035	1363
case 4	あり	0.00200	0.00185	9.50	9.50	25.6	999.786	1019.698	0.020	477
case 5	あり	0.00300	0.00185	8.20	8.20	25.6	999.880	1019.877	0.028	666
case 6	あり	0.00400	0.00185	8.30	8.90	25.6	999.874	1019.783	0.039	922

※ $q$ : 単位幅流量、 $T$ : 温度、 $S$ : 塩水の塩分濃度、 $\rho$ : 密度で温度、塩分濃度、圧力(1bars)を用いて海水の状態方程式<sup>6)</sup>から算出、添え字は、1は淡水(上層)、2は塩水(下層)、 $Fr_1'$ : 塩水遡上前の淡水の内部 Froude 数、 $Re_1'$ : 塩水遡上前の淡水の Reynolds 数

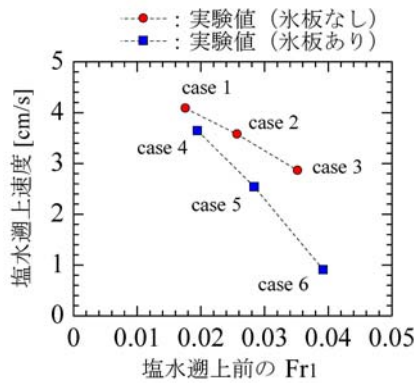


図-2 塩水遡上前の  $Fr_1$  と塩水遡上速度(実験値)

レンの上面にナットを接着した。製作した複数個の氷板模型の比重を測定したところ、平均的な比重は0.83であった。氷板ありの実験は、これらの氷板模型を水路下流端より0.05mから上流端の9.0mの範囲の水面に浮かべて実験を行った。鉛直流速分布を測定するために、淡水と塩水に粒子(ダイヤイオンHP20、比重1.01、粒径0.25mm程度)を投入し、水路下流端から2.8m上流の地点において、可視化光源(日本レーザー社製、PGL-8W)を水路床に向けて2.0Wで水路右側面から0.05mの位置に照射し、高速カメラ(Photron製FastcamSA3)で60fps/s、F5.6、1024×768pixelの設定で撮影した。流れに対する粒子の追従性については、Stokes数が1より小さく追従性があることを確認している。塩水遡上距離を測定するために、水路下流端から1.8mと3.8mの2地点において、塩分濃度計(KENEK製、NK-403MSA、MKT-15-04L)を水路床から0.01mの位置に設置して測定した。水路下流端において、数値計算の境界条件となる淡水と塩水の水深を測定するためにビデオカメラを設置した。

(2) 塩水遡上速度

塩水遡上前の  $Fr_1$  と塩水遡上速度を図-2に示す。 $Fr_1$ は、下流端から2.85mの鉛直流速分布を用いて算出した。塩水遡上速度は、塩分濃度2psuで塩水遡上と判断し2mの間隔で設置した塩分濃度計の値から算出した。図-2より、水理条件が同じcase1とcase4、case2とcase5、case3とcase6でみると、氷板ありの方が塩水遡上速度が遅く、 $Fr_1$ 大きいほど氷板ありなしの塩水遡上流速の流速差は大きい。氷板ありの $Fr_1$ は同じ水理条件の氷板なしの $Fr_1$ に比べて大きい。この理由は、氷板模型の喫水深だけ水深は浅くなり、流量は保存されるため平均流速は速くなるためである。

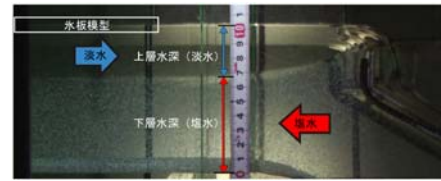


図-3 水路下流端の流況

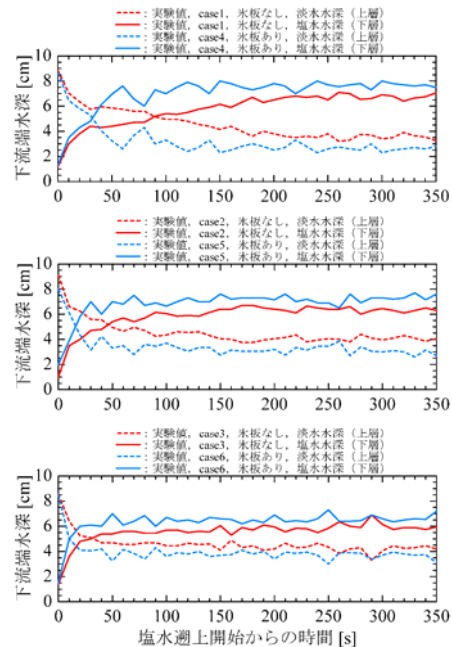


図-4 水路下流端の上層水深と下層水深

水路下流端の流況を図-3に示し、ビデオカメラから10秒毎に目測した水深を図-4に示す。図-3より、淡水と塩水の界面は明瞭に判読が可能であることが分かる。図-4より、水理条件が同じcase1とcase4、case2とcase5、case3とcase6でみると、氷板ありの塩水水深は氷板なしの塩水水深に比べて値が大きい。ビデオカメラの映像から、氷板ありの実験では塩水が下流へと押し戻されていることが確認された。氷板ありの下流端塩水水深が大きい理由として、氷板ありの塩水遡上速度は氷板なしに比べて遅く、氷板ありの実験では下流端で供給される塩水が上流へと遡上できないため、下流端で塩水が滞留および流下し塩水水深を上昇させたと推察される。

(3) 鉛直流速分布

高速カメラの画像と市販のソフトウェア(Ditect製Dipp-Flow)を用いてPIV解析を行った。画像解析結果の一例を図-5に示す。解析格子サイズは15×15pixelとし、x軸は1pixel=0.181mm、z軸は1pixel=0.175mmで補正した。

得られた鉛直流速分布の一例として、氷板なしcase3と氷板ありcase6を図-6に示す。図-6は、

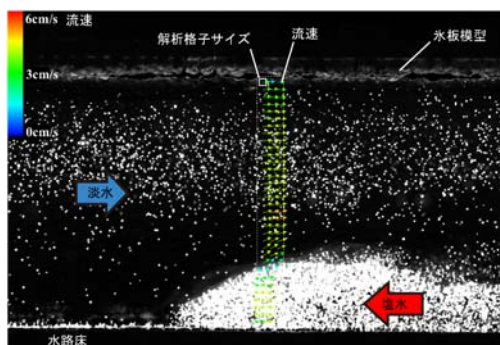


図-5 画像解析結果の一例 (case 4)

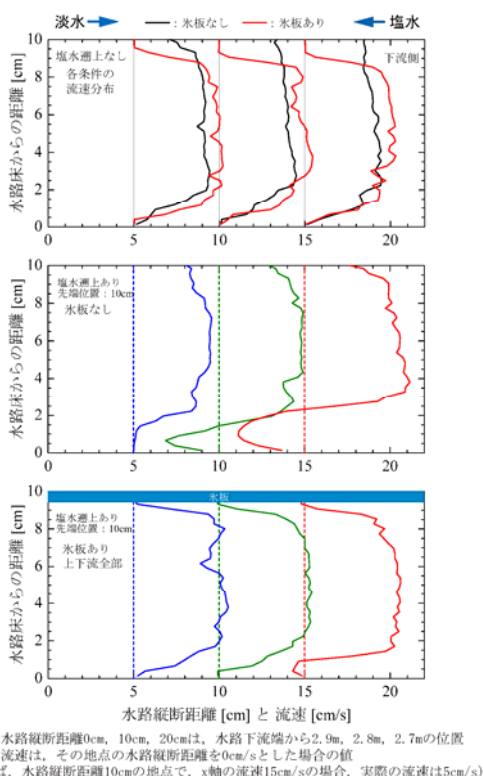


図-6 実験から得られた鉛直流速分布 (case3, case6)

高速カメラ位置(図の x 軸 10cm) とその上下流 5cm の計 3 地点の 0.5 秒平均の鉛直流速分布であり、上図は塩水遡上前の淡水の鉛直流速分布、これより下の図は塩水のフロントが水路縦断距離 10cm に到達した瞬間の鉛直流速分布である。塩水遡上前の淡水の鉛直流速分布において、氷板ありは氷板なしに比べて、氷板の粗度の影響により氷板近傍の流速が遅く鉛直中央の流速が速い。塩水遡上時の鉛直流速分布の水路床近傍の塩水流速において、氷板ありの場合は氷板なしに比べて塩水流速は遅い。本研究の実験手法で得られた実験値は、既往研究で得られた河川結氷時<sup>7)</sup> および塩水遡上時<sup>8)</sup> の鉛直流速分布から妥当であると判断し検討を進めた。

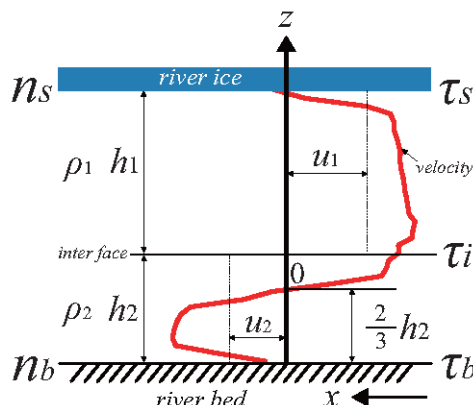


図-7 河川結氷時の塩水遡上の流速分布の概念図

(4) せん断応力

塩水遡上時の経時的な流況を明らかにするために、下流端から 2.8m 上流の地点において、淡水と塩水の流速、水路床のせん断応力  $\tau_b$ 、淡水と塩水の界面のせん断応力  $\tau_i$ 、氷板模型のせん断応力  $\tau_s$  の経時変化を実験値から算出した。既往研究<sup>9)</sup> において塩水遡上現象を 2 層流モデルとして扱うことにより塩水遡上距離を再現できていることから、塩水遡上距離を問題としている本研究では現象を 2 層流モデルとして扱った。図-7 は、本研究における河川結氷時の塩水遡上の流速分布の概念図を示している。淡水と塩水の界面は密度分布の変曲点で定義される密度界面として扱った。密度界面における塩水水深  $h_2$  について、流れを定常的な二次元流と考え運動方程式の非線形項を省略した式を用いた解析<sup>10)</sup> が行われており、この解析結果から塩水水深は水路床から流速分布のゼロの地点までの距離の 1.5 倍となることを示している。本研究ではこれを塩水水深  $h_2$  として検討を進めた。1 次元 2 層不定流の基礎方程式は式(3)~(6) とした。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial(h_1 u_1)}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial(h_2 u_2)}{\partial x} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \left( \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\tau_1}{\rho_1 h_1} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\tau_2}{\rho_2 h_2} = 0 \tag{6}$$

$i_0$ [無次元]: 水路勾配、 $\tau$  [N/m<sup>2</sup>]: せん断応力、 $x$ [m]: 下流端からの縦断距離、 $t$ [s]: 時間。せん断応力  $\tau_1$ 、

$\tau_2$  は流況の違いにより下記に示した値とした。

- a) 遡上なし氷板なし :  $\tau_1 = \tau_{b1}, \tau_2 = 0$
- b) 遡上なし氷板あり :  $\tau_1 = \tau_{b1} + \tau_s, \tau_2 = 0$
- c) 遡上あり氷板なし :  $\tau_1 = \tau_i, \tau_2 = \tau_{b2} - \tau_i$
- d) 遡上あり氷板あり :  $\tau_1 = \tau_i + \tau_s, \tau_2 = \tau_{b2} - \tau_i$

$$\tau_{b1} = \rho_1 g \frac{u_1 |u_1| n_b^2}{R_{1b}^{1/3}} \quad (7)$$

$$\tau_{b2} = \rho_2 g \frac{u_2 |u_2| n_b^2}{R_2^{1/3}} \quad (8)$$

$$\tau_s = \rho_s g \frac{u_1 |u_1| n_s^2}{R_{1s}^{1/3}} \quad (9)$$

$R_{1b}$ [m] : 淡水の径深で氷板ありの場合の水深は水路床から最大流速地点までの距離。氷板なしの場合は水路床から水面までの距離。 $R_2$ [m] : 塩水の径深で水深は水路床から最大流速地点までの距離。 $R_{1s}$ [m] : 淡水の径深で水深は氷板底面から最大流速地点までの距離。 $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] : 氷板模型の密度で実験値 830 を与えた。

$n_b$  と  $n_s$  の算出について述べる。表- 1 より本実験条件は層流であるため、層流における Reynolds 数と摩擦損失係数の関係式<sup>11)</sup> および摩擦損失係数と Manning の粗度係数の関係式<sup>11)</sup> を用いて、式(10) から横断面の合成粗度係数  $n_0$  を算出した。水路床および氷板模型において Manning 式を立てて、これらのエネルギー勾配  $i_e$  は横断面のそれと等しいと仮定した式(11) および式(12)を用いて  $n_b$  と  $n_s$  を算出した。算出結果を表- 2 に示す。

$$n_0 = \sqrt{\frac{64 R^{1/3}}{Re'_i 8g}} \quad (10)$$

$$n_b = n_0 \frac{u_0}{u_b} \left( \frac{R_{1b}}{R} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$n_s = n_0 \frac{u_0}{u_s} \left( \frac{R_{1s}}{R} \right)^{2/3} \quad (12)$$

$\tau_i$  は式(5) と式(6) の左辺第二項の移流項に式(3) と式(4) を代入し、式(5) から式(6) を引くことにより算出した。 $\tau_b$  は式(7)、(8) から、 $\tau_s$  は式(9) から算出した。本論文では、淡水流速が遅い実験(case1 と case4)、淡水流速が速い実験(case3 と case6) の実験結果を示す。図- 8 は case1 と case4、図- 9 は

case3 と case6 における実験値の解析から得られた各流速と各せん断応力の経時変化を示している。上流方向、塩水遡上方向はプラスである。図- 8、9 の塩水流速をみると、氷板ありの方が氷板なしに比べて遅い。図- 8、9 の  $\tau_b$  をみると、淡水に影響を与えていたマイナスのせん断応力は、塩水遡上後にプラスのせん断応力に転じて塩水に影響を与えていることが分かる。図- 8 の  $\tau_s$  をみると、塩水遡上後は値が大きくなる一方、図- 9 の  $\tau_s$  をみると、塩水遡上前後でその値は変化しない。この理由は、図- 8 の case4 の淡水流速は塩水遡上後に速くなるのに対して図- 9 の case6 の淡水流速は遡上後も変化がないため、式(9) より  $\tau_s$  の値が変わらないことによる。図- 9 の case6 の淡水流速が遡上前後で変わらない理由として、case4 の塩水水深は約 3cm であるのに対して case6 は約 1cm であり case6 の淡水水深は case4 に比べて塩水遡上後も変わらないことによる。図- 8、9 の  $\tau_i$  をみると、どの実験条件でも塩水へ影響を与えるプラスのせん断応力と淡水へ影響を与えるマイナスのせん断応力が、振幅をもって淡水と塩水の両者に影響を与えている。なお、プラスのせん断応力は塩水遡上の抵抗となる。 $\tau_i$  は平均値でみると  $\tau_b$  に対して 150~400 倍の大きさである。本研究の実験条件において、氷板が存在しない場合のみならず氷板が存在する場合においても、界面のせん断応力  $\tau_i$  は塩水遡上現象に対して支配的な影響因子であることが推察された。

### 2.3. 1次元2層不定流計算

河川水面に存在する氷板の影響をせん断応力  $\tau_s$  で評価した1次元2層不定流計算を構築し、本実験の再現を試みた。基礎方程式は式(3)~(6)を用いた。

#### (1) 界面抵抗係数

塩水遡上現象に対して支配的な影響因子と推察された界面のせん断応力  $\tau_i$  は式(13) で表される。

$$\tau_i = \rho_i \frac{f_i}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (13)$$

$f_i$  [無次元] : 界面抵抗係数で、岩崎ら<sup>12)</sup> は式(14) で表されることを提案している。

表-2 氷板模型と水路床の Manning の粗度係数

Manning の粗度係数	case 4	case 5	case 6
水路床 : $n_b$	0.021	0.020	0.016
氷板模型 : $n_s$	0.026	0.020	0.018



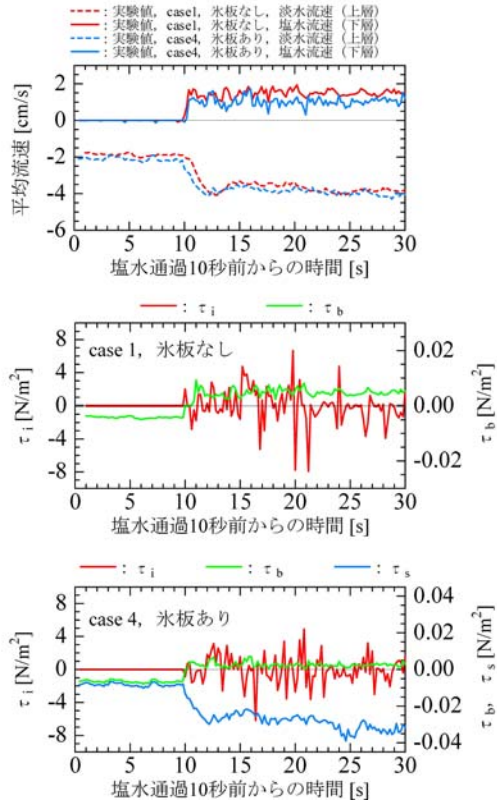


図-8 上層流速、下層流速、せん断応力の経時変化 (case1, case4)

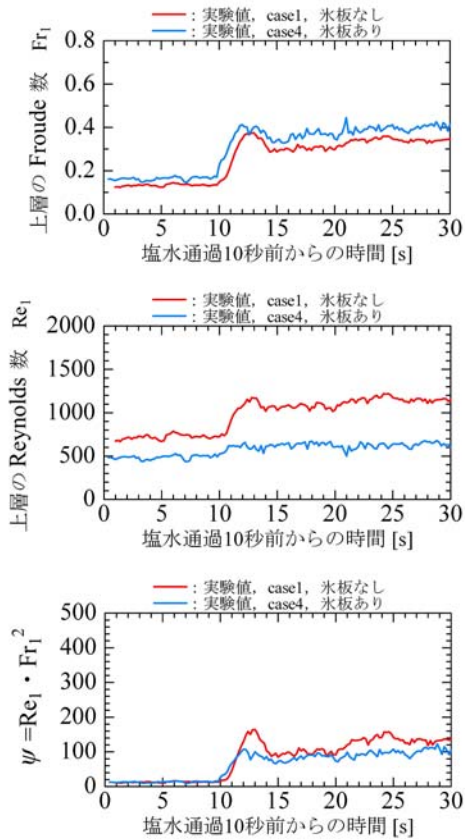


図-9 上層流速、下層流速、せん断応力の経時変化 (case3, case6)

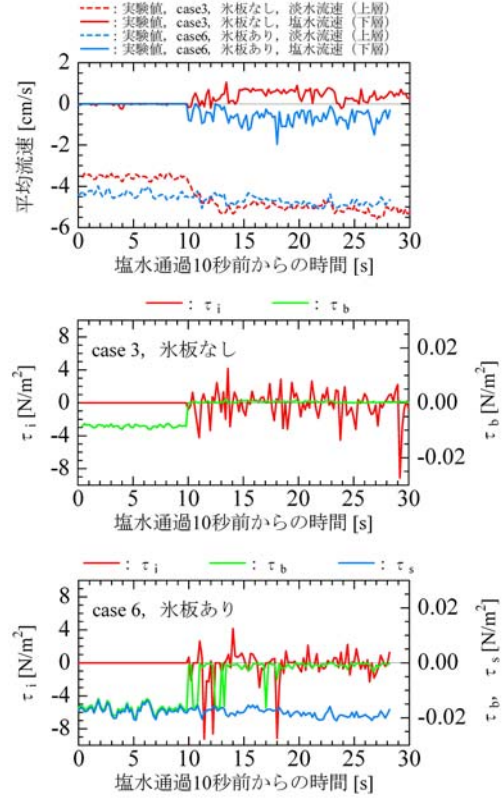


図-10 Fr1、Re1、 $\psi$  の経時変化 (case1, case4)

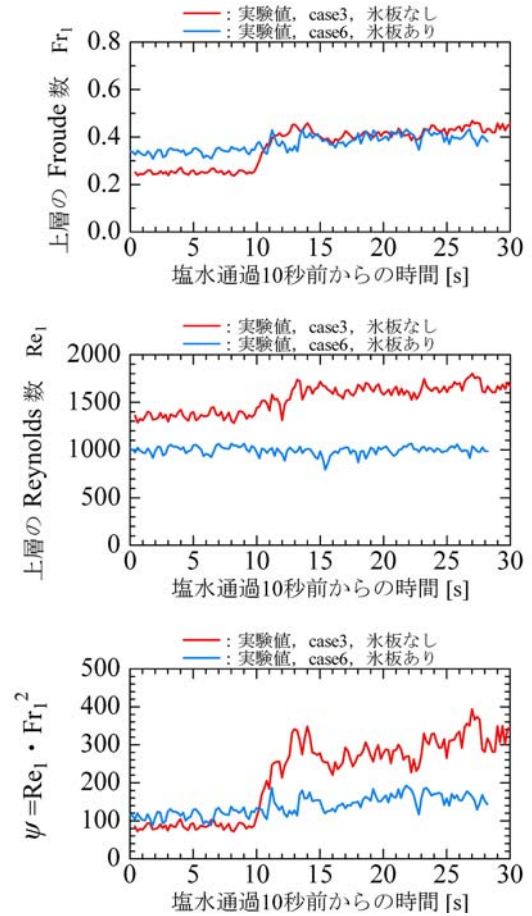


図-11 Fr1、Re1、 $\psi$  の経時変化 (case3, case6)

$$f_i = \alpha\psi^{-n} \quad (14)$$

$$\psi = Re_1 Fr_1^2 \quad (15)$$

図- 10 は case1 と case4、図- 11 は case3 と case6 の  $Fr_1$ 、 $Re_1$ 、 $\psi$  の実験値の解析から得られた経時変化を示している。図- 10 の case4 の  $Fr_1$  は塩水遡上後に値が大きくなるのに対して図- 11 の case6 の  $Fr_1$  は遡上後も変化が小さい。この理由は図- 9 の case6 の淡水流速が遡上後も変化しないことによる。図- 10、11 の  $Re_1$  をみると、塩水遡上後に氷板なしの実験(case1 と case3) は値が上昇するのに対し、氷板ありの実験(case4 と case6)は遡上後の値の上昇は小さい。この理由は、氷板ありの場合は潤辺が氷板面だけ長くなり、この影響は径深  $R$ (流積÷潤辺) の分母に表れる。塩水遡上後に淡水流速が速くとも  $Re_1$  は淡水流速と  $R$  との乗算であるため、氷板ありの  $Re_1$  は氷板なしに比べて大きくならないことによる。

図- 10、11 の  $\psi$  をみると、氷板なしの実験(case1 と case3) は塩水遡上後に値が上昇するのに対し氷板ありの実験(case4 と case6) は遡上後の値の上昇は小さい。 $Re_1$  の違いにより氷板ありの  $\psi$  は氷板なしに比べて値が小さいため、氷板ありの実験では式(14) より  $f_i$  が大きくなり塩水遡上速度が遅くなると推察できる。

(2) 実験値と計算値の比較

計算の初期条件は、縦断距離  $L=0.9\text{m}$ 、 $B=0.2\text{m}$ 、 $\Delta x=0.01\text{m}$ 、 $\Delta t$  は Courant 数 0.3、水路粗度  $n_b$ 、氷板粗度  $n_s$ 、淡水密度  $\rho_1$ 、塩水密度  $\rho_2$  は一定値を与えた。境界条件は上流端で淡水単位幅流量  $q_1$ 、塩水単位幅流量  $q_2=0$ 、下流端で淡水水深  $h_1$ 、塩水水深  $h_2$  を与えた。具体的数値は表- 1、表- 2 および図- 4 に全て示している。界面抵抗係数  $f_i$  は式(14) を用いて、金子の研究成果および須賀・高橋の研究成果で共通して得られている  $n$  の値  $0.50^{13)}$  を固定し、 $a$  の値を試行錯誤した。図- 12 は目測で得た塩水遡上先端位置とその時間を実験値として計算値との比較を示している。図- 12 より、計算値は実験値である塩水遡上速度の経時変化を再現している。一方で、 $a=0.10$ 、 $n=0.50$  と固定した場合の計算結果では、いずれも氷板ありの塩水遡上速度は氷板なしに比べて遅くなる計算結果であった。

2.4. 本章のまとめ

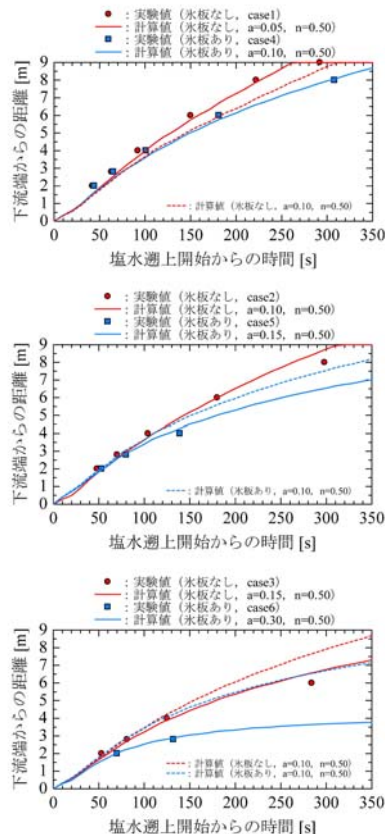


図-12 塩水遡上位置の実験値と計算値

水面に氷板模型を設置した塩水遡上実験を実施した結果、氷板模型が存在する実験では、レイノルズ数が大きくなり、氷板模型は塩水遡上を抑制していることが明らかとなった。実験結果から鉛直流速分布を明らかにし、1次元2層不等流計算を行った結果、せん断応力の経時変化を明らかにした。水面に氷板がある場合とない場合では界面せん断応力は塩分遡上における支配的な影響因子であり、本研究では1次元2層流不定流計算モデルが塩水遡上実験を再現できることを示した。

3. 河川結氷時の物質輸送（油流下時）の水理実験と汚染状況の推定技術の開発

3.1. 油流下速度の予測手法の開発

積雪寒冷地の冬期において、貯油タンクの破損等による河川への油流出事故が問題となっている。流出する油種は暖房用に使用する灯油が最も多い。河川への油流出事故は、河川生態系、取水による水利用及び漁業等への影響が大きく、発生時には迅速な処理が求められる。開水面に流出した油の処理は、流下状況の目視、河川の水理条件を踏まえて、油の到達位置を把握し、人力や機械により主にオイルブ

ェンスを用いて拡散防止処理が実施されている<sup>14)</sup>。一方で、水面が河水で覆われている河川結氷時に油が流出する場合は、油は河水下を流下するため、目視することが出来ず、油到達位置を把握することは困難である。現場では、河川結氷時の油流下現象の解明が求められている<sup>14)</sup>。

水圏における油流出に関する既往研究において、河川域では開水時に連続流出する油の拡がりに関する研究<sup>15)</sup>があり、油層の平均厚、拡がり幅および平均流速を推定する手法を提案している。海域では氷板下での油の挙動に関する実験的研究<sup>16)</sup>が行われており、流出した油は氷板があることにより油層の厚さが厚くなり、油が拡散する範囲が小さくなることが明らかにされている。さらに既往研究<sup>17)18)</sup>では、氷板下の凹凸や海流等を考慮した実験を基に、氷板下での油層の変形や移動に関する数値計算モデルを開発している。これらの既往研究により、有益な知見が得られているが、河水で覆われていない開水時の河川や海域を対象としたものであり、河川結氷時における油流出現象に関する研究は、著者らの知る限り十分には解明されていない。

本研究では、河川結氷時の油流出現象の解明および油の到達位置の予測手法の開発を目的として、一定流量が流れる水路内に氷板模型を浮かべ結氷河川を再現し、氷板模型下に灯油を流下させる水理実験を実施した。さらに本実験を再現可能な水と油の2層流計算モデルを構築し、油流下速度の予測手法の開発を試みた。

### 3.2. 灯油流下実験

#### 3.2.1. 実験条件

実験概要図を図-13に示す。実験水路の底面と側面は透明アクリル板で構成されており、水路長： $L=9.0\text{m}$ 、水路幅： $B=0.2\text{m}$ である。実験水は所定の流量を安定して供給するため、電圧が一定となるよ

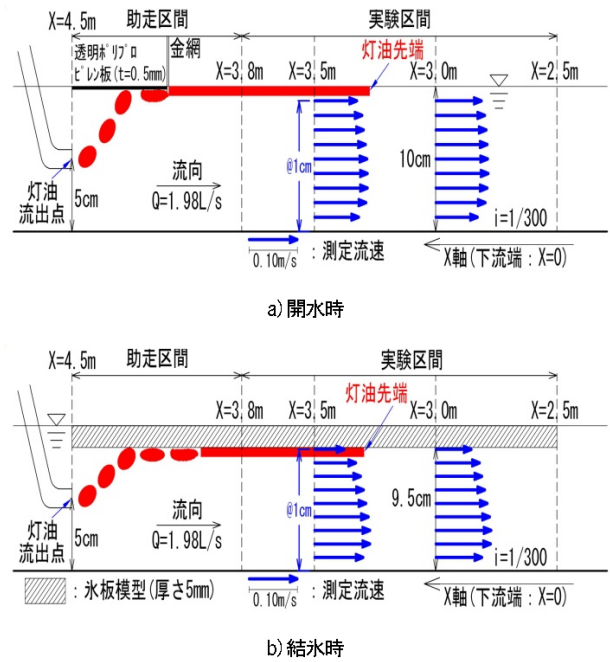


図-13 開水時と結氷時の実験概要図

うに交流電圧安定化装置 (omron 製、RE100FW) に接続したポンプにより水路内に給水及び循環される。完全結氷した河川の Froude 数が  $0.4$  以下<sup>19)</sup>との既往知見と実験施設の条件を踏まえて淡水の流量を  $1.98\text{L/s}$ 、水路勾配を  $1/300$  と設定した。基準地点は下流端から  $3.0\text{m}$  地点 (以後、 $X=3.0\text{m}$  と表記) とし、 $X=3.0\text{m}$  の水深が開水時で  $0.10\text{m}$  になるように下流端の水深をアクリル板を用いて堰上げを行い  $0.11\text{m}$  とした。これらの条件下で  $X=3.0\text{m}$  の Froude 数は、開水時で  $0.100$ 、結氷時で  $0.108$  であった。水温は  $3.0^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$  とし、流量はポンプから実験水路に接続してある導水パイプに設置したバルブにて調整を行った。次に実験条件一覧を表-3に示す。表-3より、連続流出させる灯油流量3ケースで、氷板模型有無の合計6ケースの実験を行った。氷板模型には、河水の比重と同等である比重( $0.92$ )の平坦なポリ

表-3 実験条件

実験条件	氷板模型	$q_1[\text{m}^2/\text{s}]$	$Q_1[\text{L}/\text{s}]$	$q_2[\text{m}^2/\text{s}]$	$Q_2[\text{L}/\text{s}]$	$T_1[^{\circ}\text{C}]$	$T_2[^{\circ}\text{C}]$	$Fr_2'$	$Re_2'$
case1	無し (開水時)	$3.40 \times 10^{-5}$	0.0068	$9.90 \times 10^{-3}$	1.98	16.0	3.2	0.103	3084
case2	無し (開水時)	$1.88 \times 10^{-4}$	0.0375	$9.90 \times 10^{-3}$	1.98	15.5	3.4		
case3	無し (開水時)	$3.75 \times 10^{-4}$	0.0750	$9.90 \times 10^{-3}$	1.98	16.0	3.0		
case4	有り	$3.40 \times 10^{-5}$	0.0068	$9.90 \times 10^{-3}$	1.98	14.0	2.4	0.111	2085
case5	有り	$1.88 \times 10^{-4}$	0.0375	$9.90 \times 10^{-3}$	1.98	15.2	3.2		
case6	有り	$3.75 \times 10^{-4}$	0.0750	$9.90 \times 10^{-3}$	1.98	14.8	3.1		

※  $q$  : 単位幅流量,  $Q$  : 実流量,  $T$  : 温度, 添え字は, 1 は灯油 (上層), 2 は水 (下層),  $Fr_2'$  : 灯油流出前の下流端から  $2.5\text{m} \sim 4.5\text{m}$  区間の平均 Froude 数,  $Re_2'$  : 灯油流出前の下流端から  $2.5\text{m} \sim 4.5\text{m}$  区間の平均 Reynolds 数



プロピレン板（厚さ 0.5cm、幅 19.7cm、長さ 1.0m）を 2 枚使用した。設置区間は、 $X=2.5\text{m}\sim 4.5\text{m}$  の区間とし、通水時の水面に氷板模型を浮かべ設置した。設置し水面が安定した後に、氷板模型と水路側壁および氷板模型同士の継目にある隙間に筆を用いて透明な液体ゴムを充填し、乾燥させて水路側壁に氷板模型を固定して全面結氷した河川を再現した。なお、氷板模型設置による氷板模型設置区間の水位上昇は、0.5mm 以下で水深に対し 0.53%以下であった。流下する灯油を判別するために、赤色のアルコール系インキ（マジスター専用 補充インキ）を灯油 1L に対し 25ml の割合で投入し着色した。着色した灯油はろ紙にて不純物をろ過して油流出地点の水路上部に設置した容器に入れた。実験水路への灯油の流出は、容器よりステンレス製のフレキシブルホース（内径 13mm）に接続し、水路中央部にて  $X=4.5\text{m}$  で水路床から 5cm の位置に流出点を設け、容器に設置したコックの開閉により流出させた。流出させる灯油流量は、実験前に灯油流量とバルブ開度の関係を求め、バルブにより制御した。実験時の灯油の温度は、冷却装置がなかったため室温と同じ常温とした。なお、実験水路に一樣に灯油が流下した状態を実験対象としているため、 $X=3.8\text{m}\sim 4.5\text{m}$  の区間を助走区間とした。また、開水時の実験では、灯油が水面に出現する時に水面が泡立つ現象が見られた。この現象を抑えるために、助走区間に厚さ：0.5mm の透明なポリプロピレン板を水面に浮かべて水面を安定させた。さらに、泡が流下しないように、鉛直方向に太さ 0.5mm で 5mm 間隔の格子状の金網を直立させ、透明なポリプロピレン板の直下流の水面へ 2mm 差込み、設置した。開水時の灯油流出状況を図-14 に示す。

### 3.2.2. 測定項目

灯油流出前の開水時と結氷時の流況を把握するために  $X=3.0\text{m}$  と  $3.5\text{m}$  の地点で横断方向に 5 点（水路中心と中心より左右岸へ 2.5cm 間隔に 2 点）、水深方向に 9 点（水路床から 1cm 間隔）の計 90 点の流速を電磁流速計（KENEK 製 VP2000、精度：49.1cm/s 以下の場合、 $\pm 1\text{cm/s}$ ）を用いて計測を実施した。結氷時では、測定箇所の水板模型に穴を開け、この穴に電磁流速計を差し込み測定を行った。

灯油の流下速度は流下状況を動画撮影し、動画から  $X=2.7\text{m}\sim 3.8\text{m}$  の範囲において流下する灯油の先端位置（以下、灯油フロントと呼称）を判読し、流下距離 10cm を流れるのに要した時間を求め、各



図-14 開水時の灯油流出状況（側面より撮影，case3）

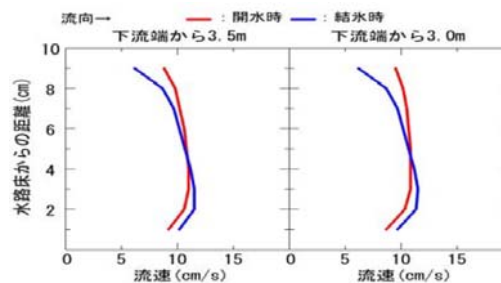


図-15 各計測地点の鉛直流速分布

区間の速度を求め、これらを平均したものを流下速度とした。動画撮影にはデジカメ（Canon EOS 5D Mark II）と高速カメラ（Photron 製 FastcamSA3）をそれぞれ 2 台を使用し、カメラ位置を  $X=3.0\text{m}$  と  $3.5\text{m}$  地点とした。デジカメの撮影方向は、開水時は水路の真上から真下方向に、結氷時は水路の真下から真上方向に撮影するように設置し、焦点をそれぞれ水面に合わせた。高速カメラの水平位置は、水路の右側壁面より水路床から 5cm の高さに設置し、右側壁面より 5cm の位置にレーザーを照射させ、この面に焦点を合わせて撮影を実施した。

### 3.2.3. 灯油流出前の鉛直流速分布

同一水深地点での横断方向別の流速において、最大値と最小値の差は概ね 0.5cm/s であり、最大で 1.2cm/s と使用した流速計の精度範囲であった。これにより、横断方向別の流下方向への流速差は小さいと判断し、横断方向別の流速を平均し求めた鉛直流速分布を図-15 に示す。図-15 より、結氷時は開水時に比べ、氷板模型の粗度の影響により氷板模型近傍の流速が遅くなっていることが確認出来た。なお、全平均流速は開水時、結氷時共に 0.10m/s であった。

### 3.2.4. 灯油の流下速度

上下より撮影した灯油の流下状況を図-16 に、水路側面より撮影した灯油の流下状況を図-17 にそれぞれ示す。開水時は図-16a) より、流出した灯油は油紋状に水路全体に広がり流下した。また、開水時の灯油フロントの厚さは、側面から撮影した映像では確認出来ない程に薄く、灯油フロントが通過した 1～5 秒後に図-17a) にあるようによく目視出来る厚さの灯油層が流下した。

結氷時は図-17b) より、氷板模型を這うように流下

する状況が明確に確認され、灯油フロントの厚さは目視で確認出来る厚さが存在し、灯油フロントの形はくさび形となっていることが分かった。灯油層の厚さは5mm~7mmであり、case4<case5<case6と流出させた灯油流量が多いほど灯油層は厚くなった。また、図-16b)より case4 のみ水路全体に灯油は広がらず、滯筋状に流下した。

灯油の流下速度の測定は、全ケース同じ区間  $X=2.7\text{m}\sim 3.8\text{m}$  の区間で算出した。case4 において、氷板模型を2枚接続して設置した継目 ( $X=3.5\text{m}$  地点) に僅かな段差があり、この地点で灯油フロントの流下が停止し、停止地点より上流に灯油が実験水路全体に広がった。流下停止後の37秒後に上流から

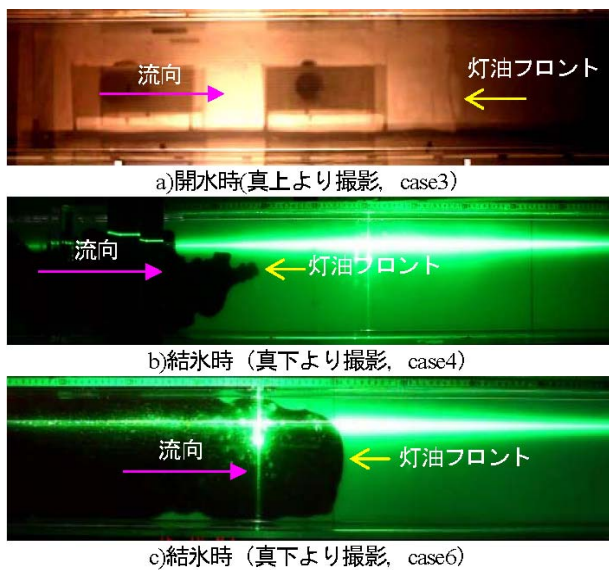


図-16 灯油の流下状況(上下より)

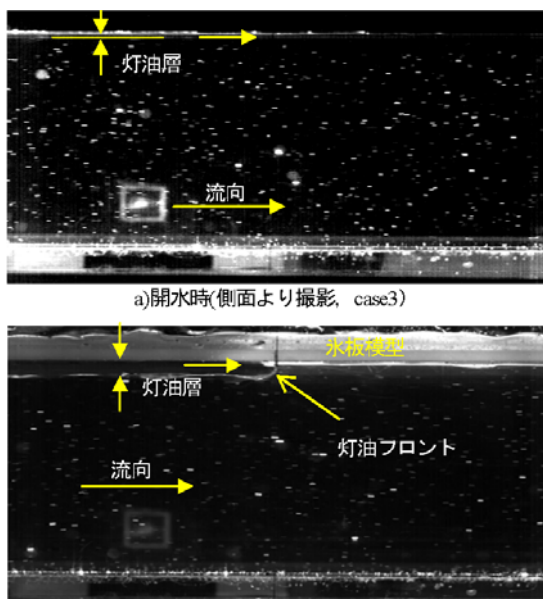


図-17 灯油の流下状況(側面より)

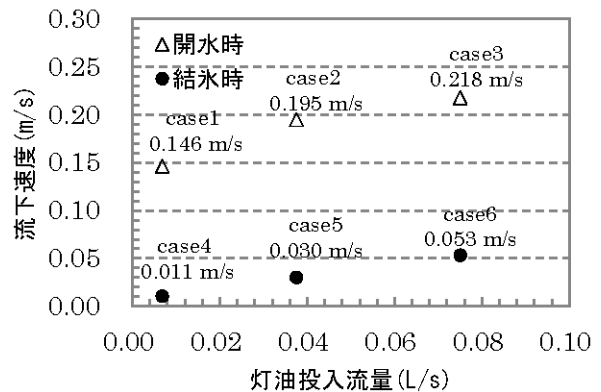


図-18 実験条件別の灯油流下速度

流下する灯油に押し出される形で流下が再開した。このため、case4 の灯油の流下速度は、流下停止前までの速度(0.010m/s)と流下が再開してからの速度(0.012m/s)の2つに分け判読し求め、平均したものを流下速度とした。

実験条件別の灯油の流下速度を図-18 に示す。図-18 より開水時の case1~case3 では、流下速度が流水の全平均流速 0.10m/s より速くなり、結氷時の case4~case6 では遅くなった。また、開水時と結氷時ともに、流出させた灯油流量が多いほど流下速度は速くなった。同じ灯油の流出流量下で比較すると、結氷時 case4 は、開水時 case1 の約 1/13、結氷時 case5 は、開水時 case2 の約 1/7、結氷時 case6 は、開水時 case3 の約 1/4 の流下速度である。結氷時の灯油流下速度は、開水時に比べて遅くなることが明らかとなった。既往研究<sup>16)</sup>により、氷によって油膜層が厚くなり油の拡散を小さくする実験結果が得られており、図-15 の鉛直流速分布において、灯油が流下する地点の氷板模型近傍の流速が遅くなっており、灯油を流下させる力が弱いことが想定されることから、本実験で得られた結果は妥当な結果であると言える。

### 3.3. 1次元2層不定流計算

#### 3.3.1. 2層流モデルの構築

既往研究<sup>20)</sup>において、河川水面に存在する氷板および塩水の影響をせん断応力で評価し、2層流モデルとして取り扱うことで、河川結氷時の淡水と塩水の2層流を再現出来ることが示されている。本研究では、この既往研究<sup>20)</sup>にあるモデルを参考に、淡水と灯油の2層流モデルを構築して本実験の再現を試みた。

1次元2層不定流計算の基礎方程式は式(16)~(19)とし、図-19 に河川結氷時の灯油と淡水の流速分布の概略図を示す。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial(h_1 u_1)}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial(h_2 u_2)}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \left( \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\tau_1}{\rho_1 h_1} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\tau_2}{\rho_2 h_2} = 0 \quad (19)$$

$i_0$  [無次元]: 水路勾配、 $\tau$  [N/m<sup>2</sup>]: せん断応力、 $x$  [m]: 灯油流出地点からの縦断距離、 $t$  [s]: 時間、 $u$  [m/s]: 速度、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: 密度。 $\rho_1$  [kg/m<sup>3</sup>]には灯油の密度 800、 $\rho_2$  [kg/m<sup>3</sup>]には淡水の密度 1000 を与え、せん断応力  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  は流況の違いにより下記に示した条件ごとに式(20)~(22)より算出する。

- (a) 灯油なし氷板なし:  $\tau_1 = 0$  ,  $\tau_2 = \tau_{b2}$   
 (b) 灯油なし氷板あり:  $\tau_1 = 0$  ,  $\tau_2 = \tau_{b2} + \tau_{s2}$   
 (c) 灯油あり氷板なし:  $\tau_1 = \tau_i$  ,  $\tau_2 = \tau_{b2} - \tau_i$   
 (d) 灯油あり氷板あり:  $\tau_1 = \tau_i + \tau_{s1}$  ,  $\tau_2 = \tau_{b2} - \tau_i$

$$\tau_{b2} = \rho_2 g \frac{u_2 |u_2| n_b^2}{R_{2b}^{1/3}} = 0 \quad (20)$$

$$\tau_{s1} = \rho_1 g \frac{u_1 |u_1| n_s^2}{R_{1s}^{1/3}} = 0 \quad (21)$$

$$\tau_{s2} = \rho_2 g \frac{u_2 |u_2| n_s^2}{R_{2s}^{1/3}} = 0 \quad (22)$$

$R_{2b}$  [m]: 淡水の径深で、水面に灯油や氷板がない場合は、水深は水路床から水面までの距離。水面に灯油または氷板がある場合は、水深は水路床から鉛直方向での最大流速地点までの距離。 $R_{1s}$  [m]: 氷板の下に灯油がある場合の灯油の径深で、水深は氷板底面から鉛直方向での最大流速地点までの距離。 $R_{2s}$  [m]: 氷板の下に淡水がある場合の径深で、水深は水路床から鉛直方向での最大流速地点までの距離。 $n_b$ : 水路床の Manning の粗度係数。 $n_s$ : 氷板模型の Manning の粗度係数。

Manning の粗度係数である  $n_b$  と  $n_s$  は実験対象区間 (下流端から 2.5m~4.5m 区間) で算出し与えた。表-3 より開水時は層流から乱流への遷移状態である。同様に結氷時では層流状態が維持される限界 Reynolds 数である 2320<sup>21)</sup>より Reynolds 数が小さい。そこで本研究では結氷時の実験条件を層流と仮

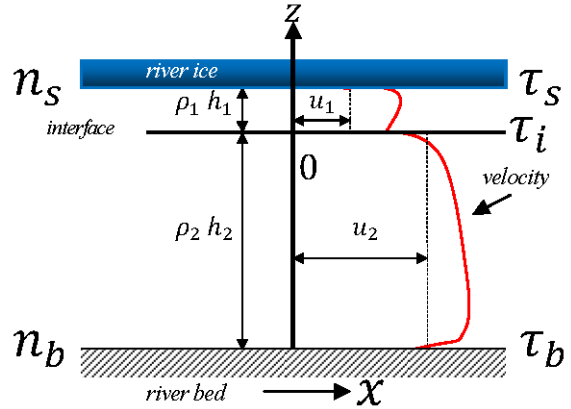


図-19 河川結氷時の灯油と河川の流速分布の概略図

表-4 実験対象区間の氷板模型と水路床の Manning の粗度係数

Manningの粗度係数	case4~case6 (結氷時)
水路床: $n_b$	0.020
氷板模型: $n_s$	0.027

定した。そして結氷時において、層流における Reynolds 数と摩擦損失係数の関係式<sup>22)</sup>および摩擦損失係数と Manning の粗度係数の関係式<sup>22)</sup>を用いて、式(23)から横断面の合成粗度係数  $n_b$  を算出した。水路床と氷板模型において Manning 式を立ててこれらのエネルギー勾配  $i_e$  は横断面のそれと等しいと仮定した式(24)と式(25)を用いて  $n_b$  と  $n_s$  を算出した。その結果を表-4 に示す。

$$n_0 = \sqrt{\frac{64}{Re'_i}} \frac{R^{1/3}}{8g} \quad (23)$$

$$n_b = n_0 \frac{u_0}{u_b} \left( \frac{R_{2b}}{R} \right)^{2/3} \quad (24)$$

$$n_s = n_0 \frac{u_0}{u_s} \left( \frac{R_{2s}}{R} \right)^{2/3} \quad (25)$$

### 3.3.2. 界面のせん断応力 $\tau_i$

既往研究<sup>20)</sup>では2層流現象に対して、界面のせん断応力  $\tau_i$  が支配的な影響因子としており、それを表している式(26)から算出する。

$$\tau_i = \rho_1 \frac{f_i}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (26)$$

$f_i$  [無次元]: 界面抵抗係数で、岩崎ら<sup>23)</sup>は淡水と塩水において式(27)、(28)で表わされることを提案している。



$$f_i = \alpha \psi^{-n} \quad (27)$$

$$\psi = Re_2 Fr_2^2 \quad (28)$$

本研究の対象は淡水と灯油の2層流であり、淡水と塩水の界面抵抗係数をこれらに適用することは、議論の余地がある。しかし、今回は同様の液液二相流であることおよび実験結果から結氷時の灯油フロントの形が、塩水遡上時と同じくさび形であったため、界面抵抗係数は式(27)、(28)を用いて算出を試みた。

### 3.3.3. 計算値と実験値の比較

計算の初期条件は、実験水路の下流端から灯油流出地点までの距離を縦断距離： $L=4.5\text{m}$ 、水路幅： $B=0.2\text{m}$ 、 $\Delta x=0.01\text{m}$ 、 $\Delta x$ はCourant数0.3とし、Manningの粗度係数 $n$ は表-4より水路床粗度： $n_b=0.020$ 、氷板模型粗度： $n_s=0.027$ 、密度 $\rho$ は灯油密度： $\rho_1=800\text{kg/m}^3$ 、淡水密度： $\rho_2=1000\text{kg/m}^3$ を与えた。境界条件は上流端では表-3より、実験条件別に流出させる灯油の単位幅流量： $q_1$ 、淡水の単位幅流量： $q_2$ を与え、灯油層厚： $h_1$ は、実験では流出方法より確認出来ないため、上流端境界条件の灯油層厚： $h_{1(0)}$ として、灯油流量と実験結果で得られた灯油の流下速度と式(29)から算出したものを与えた。下流端では灯油層厚： $h_1=0\text{m}$ 、淡水水深： $h_2=0.11\text{m}$ を一定値として与えた。

$$h_{1(0)} = \frac{Q_1}{Bu_1} \quad (29)$$

界面抵抗係数： $f_i$ は式(27)を用いて、吉川らが塩水遡上現象で得られた $\alpha$ の値 $0.10^{20}$ と金子の研究成果および須賀・高橋の研究成果で共通して得られている $n$ の値 $0.50^{24}$ として算出したものを与えた。図-20は以上の条件での計算値と実験値の灯油の流下速度を示している。図-20より、計算値の灯油の流下速度は実験値と同様に開水時と結氷時ともに、流出させた灯油流量が多いほど流下速度は速くなるという傾向は再現出来たが、計算値と実験値との差が大きい結果となった。そのため界面抵抗係数に起因する $\alpha$ の値に着目し検討を行った。 $\alpha=0.05$ とした時に実験結果に最も灯油の流下速度が近似した。これにより、本モデルでも既往研究<sup>20)</sup>にある界面のせん断応力 $\tau_i$ が影響因子の1つであるということがわかった。

次に $\alpha$ の値を0.05と固定し、上流端の境界条件である灯油層厚： $h_{1(0)}$ について試行錯誤を行った。開

表-5 灯油層厚： $h_{1(0)}$ と最適計算時の灯油層厚： $h_{1(0)}$

実験条件	$h_{1(0)}$ (m)	最適計算値の $h_{1(0)}$ (m)	割合
case1	0.00023	0.00016	0.67
case2	0.00096	0.00064	0.67
case3	0.00172	0.00115	0.67
case4	0.00309	0.00309	1.00
case5	0.00625	0.00781	1.25
case6	0.00708	0.00708	1.00

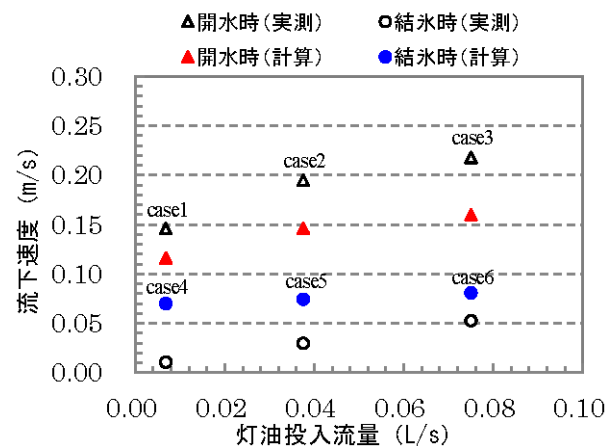


図-20  $h_{1(0)} = \frac{Q_1}{Bu_1}$ ,  $\alpha = 0.10$  時の計算値と実験値の

灯油流下速度

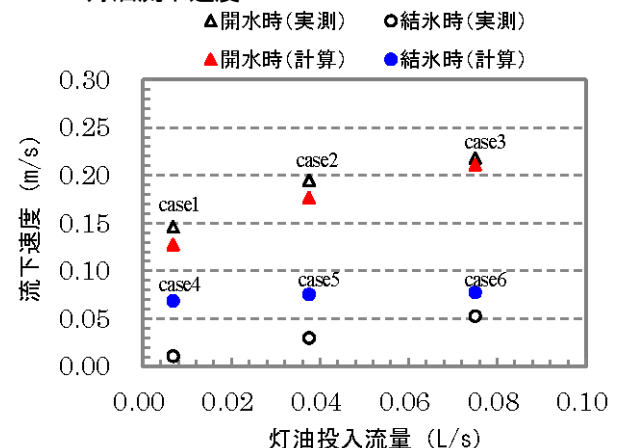


図-21  $h_{1(0)} = \text{最適}$ ,  $\alpha = 0.05$  時の計算値と実験値の  
灯油流下速度

水時については、全 case において $h_{1(0)}$ を0.67倍した時に最も計算値が実験値に近くなった。結氷時については、case4とcase6は $h_{1(0)}$ が等倍時、case5は1.25倍時に計算値が実験値に近くなった。表-5に最適計算値の灯油層厚： $h_{1(0)}$ についての値、図-21にこの時の計算値と実験値の灯油の流下速度を示す。図-21より、開水時と結氷時ともに、灯油流量が多くなるほど計算値は実験値に近づいていることがわかる。開水時について、計算値はほぼ実験値を再



現出来た結果となったが、結氷時の計算値は実験値に case6 のみ近くなったが、case4、case5 は大きく乖離した結果となり再現出来たとは言いがたい。原因として case4 を代表に、実験では灯油が滲筋状に流下していったのに対し、本モデルでは灯油は水路幅全体に一様に流下している条件での計算であることが考えられる。開水時の全 case の実験では、灯油流出直後に灯油は水面に浮き上がり水路全体に広がり、本モデルと同条件で流下したため再現性の高い結果になったと考えられる。

### 3.4. 本章のまとめ

積雪寒冷地特有の問題である河川結氷時の油流出現象の解明および油流下速度の予測手法の開発を目的として、水理実験の実施および数値計算モデルの構築を行い、以下の知見が得られた。

これまで検討例が非常に少なかった河川流に伴う結氷下の油流下に関する実験手法を確立し、油のフロント流下形状や厚さ、開水時と結氷時の流下現象の違いを定量的に示すことに成功した。特に、本実験の条件において河川結氷時の油流下速度は、開水時に比べて 1/13~1/4 程度に小さくなることを示した。また、淡水中の流速分布の計測結果より、油流下の駆動力となる流速が氷板模型近傍で小さくなるため、油流下速度も小さくなることを示唆された。淡水と塩水の界面抵抗係数を求める既往研究<sup>23)</sup>の式を淡水と油の界面に適用し、1次元2層不定流計算モデルにより、油の流下速度における実測値と計算値の比較から、係数を適切に与えることで実験を再現することが可能であることが分かった。また、上流端の境界条件を適切に与えることで、開水時の油流下速度を再現できることを示した。

また、今後の課題は以下の通りである。

- ・開水時および結氷時において、上流端における境界条件についての改良。
- ・現地にて灯油流量を算出する方法の開発。
- ・河川結氷時での氷板の凹凸によって灯油がトラップされる現象の検証。
- ・灯油の横断方向に対する広がりを考慮したモデル構築

## 4. 結氷河川における物質の輸送機構の解明

### 4.1. アンカーアイスについて

積雪寒冷地の河川は、12月中旬から4月中旬までの約100日間、気温の低下により河川内が結氷する。

河川水面が結氷しない急勾配の箇所においては、河川水が0°C以下となる過冷却状態となり、晶氷(Frazil ice)が流水中に発生する。また、水深の浅い箇所においては、河床に氷が付着・集積する現象がみられる。この氷はアンカーアイス(anchor ice)と呼ばれ、気温の昇降や流量の増減によって消長を繰り返す。橋場ら<sup>25)</sup>の既往研究では、アンカーアイスは、河床から剥離する際に、藻類や河床材料を取り込みながら流下し、結氷河川特有の物質輸送が存在することを現地観測により示唆している。しかし、この既往研究は1地点のみの観測結果であり、アンカーアイスの発生メカニズムおよび結氷河川の物質輸送については、十分には研究が実施されていない。

また、アンカーアイスが下流へと流下する際に、取水口に流入し、取水障害を発生させる課題があり、アンカーアイスの発生メカニズムに関する知見が利水面からも求められている。アンカーアイスの発生条件について、平山ら<sup>26)</sup>の既往研究によると、流速と水深の条件が大きなパラメータであり、水深は0.3mから0.4mが発生限界、流速は0.6m/secから0.8m/secが限界流速であることを明らかにしている。また、笹本ら<sup>27)</sup>の既往研究によると、アンカーアイスの発生がみられるフルード数は、0.2から1.2の範囲であることを明らかにしている。しかし、実河川において、アンカーアイスの発生メカニズムを定式的に検討した研究は、十分には実施されていない。結氷していない開水時の河川の藻類について、戸田ら<sup>28)</sup>の既往研究では、フルード数0.4前後で底面付近の乱流が大きいほど藻類の一次生産力は高まることを指摘している。一方で、フルード数0.4前後という数値は、アンカーアイスの発生条件と同等であり、開水時に繁茂した藻類が初期に発生するアンカーアイスに取り込まれて流下する物質輸送が推測される。

本研究では、アンカーアイスの発生メカニズムの解明およびアンカーアイスが結氷河川の物質循環に与える影響を明らかにするために、現地観測を実施し、定式化された計算モデルおよび観測データを用いて検討を行った。

### 4.2. アンカーアイスの現地調査

現地観測は、図-25に示す北海道東部に位置する湧別川(流路延長87km、流域面積1,480km<sup>2</sup>)において、既往研究<sup>26)</sup>を参考にアンカーアイスの発生条件と一致するKp26.7で実施した。観測機器は、自記水



図-25 調査箇所図

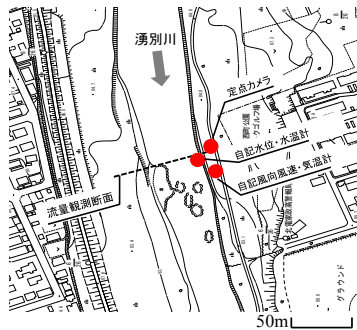


図-26 機器配置図

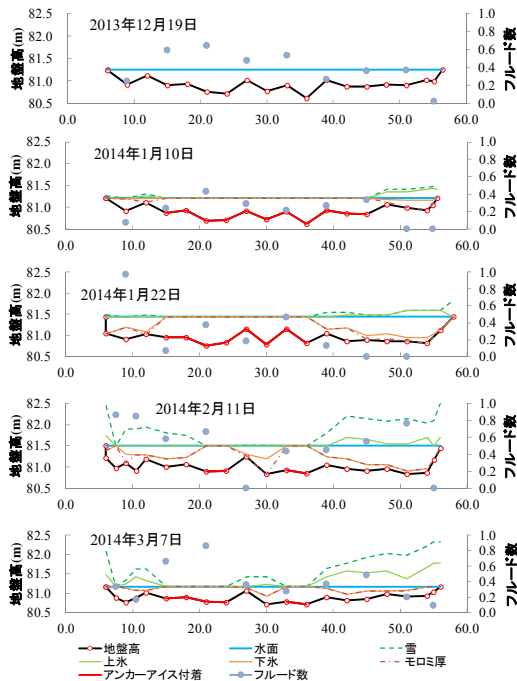


図-27 フルード数分布

位計 (応用地質製 S&DLmini 圧力センサ精度 0.1% F.S)、自記水温計 (アレック電子製 MDS-Mk V/T 精度±0.05℃)、自記気温計 ((株)MCS 製 JISA 級 ±0.15℃以下)、アンカーアイスの発生状況を捉えるために定点カメラを用いた。観測機器の設置図を図-26 に示す。観測機器の測定間隔は、全て 10 分間隔とした。

(1) フルード数

流量観測時の水深に対する 2 割と 8 割の平均点流速と測深データを基に、式(29)から測線毎にフルード数を算出した。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (29)$$

$V$ : 流速、 $g$ : 重力加速度、 $D$ : 水深である。2013 年 12 月 19 日から 3 月 7 日までの期間で観測したアンカーアイスの発生個所と河水横断形状、各測線毎のフルード数を図-27 に示す。本観測では、笹本ら<sup>27)</sup>がアンカーアイスの発生条件とするフルード数 0.2 以上の河川中央部で発生する傾向がみられた。また、アンカーアイスはフルード数が 0.2 以上でも河水が発達する左右岸付近では発生せず、河水が無い箇所でも発生がみられた。

(2) アンカーアイスの発生条件

定点カメラにより、2013 年 12 月 23 日にアンカーアイスの発生が確認され、2013 年 12 月 25 日に現地確認した状況を図-28 に示す。図より河床にアンカーアイスが広範囲に発生している状況が分かる。また、直上流のいわみ橋より kp26.7 周辺を撮影した状況を図-29 に示す。kp26.7 周辺は、冬期間も全面結氷とはならず、開水状態のため、気温低下に伴い河



図-28 アンカーアイス発生状況



2013年12月25日

2014年1月10日



2014年2月11日

2014年2月19日

図-29 Kp26.7 周辺の結氷状況

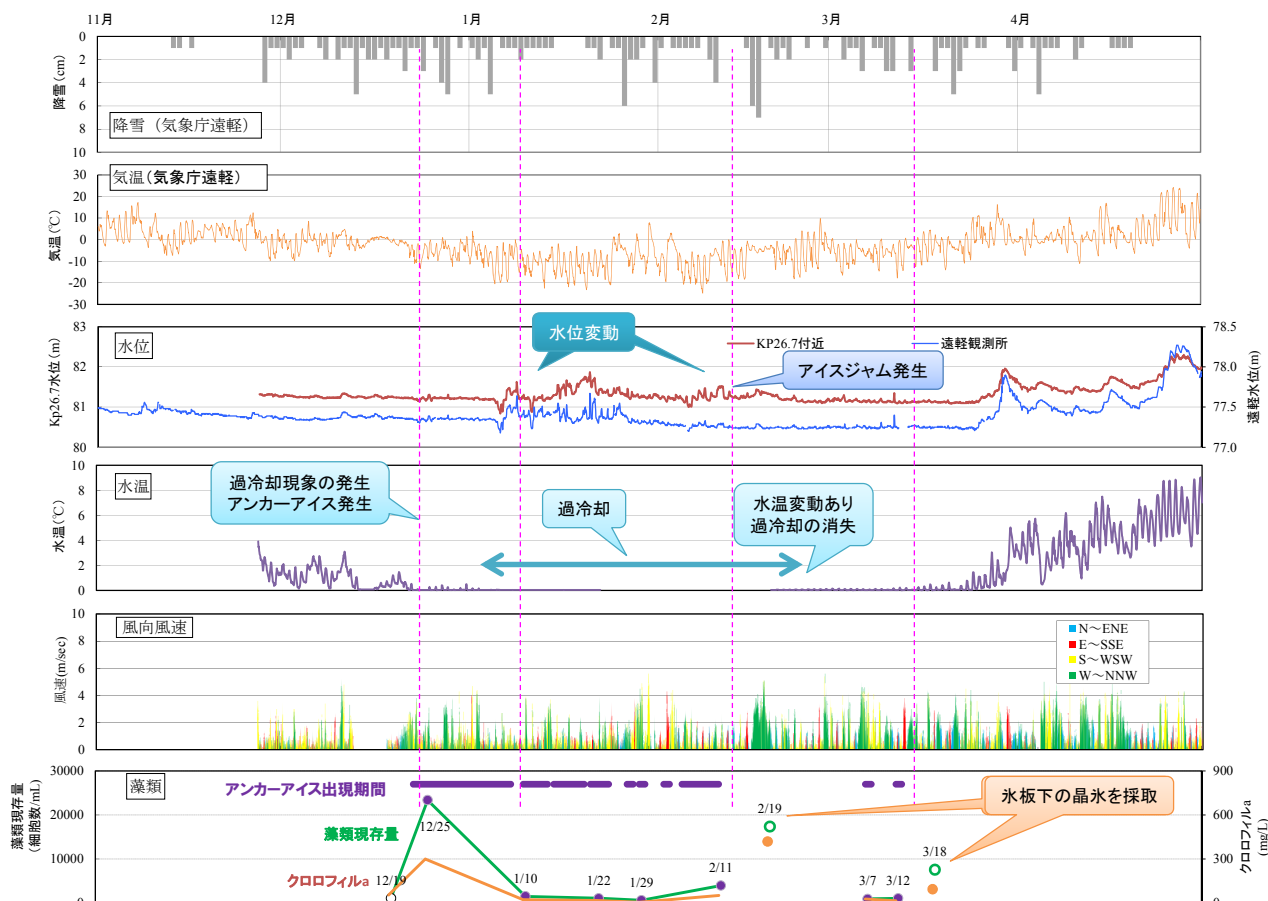


図-30 アンカーアイス発生サイクルと含有物質

川水は過冷却状態となり、アンカーアイスを形成する晶氷 (Frazil ice) が発生しやすい条件であると推察される。

アンカーアイスの発生サイクルと含有物質について、観測結果を図-30 に示す。アンカーアイスが発生した2013年12月23日において、積雪量は20cm程度、気温は-7°C付近、水温は0°C程度である。アンカーアイス発生後の水温は、0°C付近で安定し、変動がみられなかった。過冷却状態では熱交換が一瞬で行われるため、0°C以下の水温が継続しないと推察されることから、過冷却状態であったと推察される。本観測結果から、アンカーアイス発生 の要因として水温の低下が考えられる。

2013年12月23日から3月上旬の期間、気温は-20°C程度まで低下し、最高気温は0°C以下となる状況が続き、水温は0°Cとなっており過冷却現象が継続したと推察される。一方で、この期間のアンカーアイスは消長を繰り返している。この期間内の1月上旬から下旬にかけて、水位が変動していることから、水位の影響が推察される。

2014年1月5日24時には、それまで安定してい

た水位が0.3m低下し、その後0.6m程度上昇し、1m程度の変動を繰り返している。水位低下は、上流での河水の詰まりなどで一時的に発生したもので、その後、晶氷などの流下により水位が変動するが、下流でこれらが詰まることで水位が上昇するものと推察される。時期は異なるが、2014年2月11日に本観測地点で、図-31 に示すように、下流で河水が集積して水位上昇を引き起こすアイスジャムの発生が確認されている。アンカーアイスがアイスジャムの直接的な原因になっているかどうかは不明であるが、Tremblay<sup>29)</sup>らの研究より、かつてアンカーアイスだった晶氷が表面の氷と癒合してブロックを形成し、アイスジャムの要因になることを指摘している。2014年2月11日に発生したアイスジャムは、2月初旬の気温上昇による河水の流下が原因と推察され、同時期にアンカーアイスも消失している。その後、3月上旬までは、不定期にアンカーアイスが短期間で発生している。この期間は、気温が最高気温でも0°C以下の条件下であった。アンカーアイスの消失の要因の一つとしては、水位の変動が考えられる。3月上旬以降は、水温が上昇するため、アンカーアイス



図-31 アイスジャム発生箇所

は発生しなかったと考えられる。

### (3) アンカーアイスに含有される藻類残存量

アンカーアイスに含まれている藻類現存量については、図-30 より、最初にアンカーアイスが発生した直後の2013年12月25日が最も多く、総細胞数が23,374cells/mL、クロロフィルaが300 $\mu$ g/Lであった。水位上昇によってアンカーアイスが一時消失した後に、再びアンカーアイスが発生した2014年1月10日では、総細胞数が1,537cells/mL、クロロフィルaは23 $\mu$ g/Lと、初期に比べて1/13に減少していた。水位上昇時のアンカーアイス消失の際に、河床の礫に付着していた藻類が、アンカーアイスとともにフラッシュされたと推察される。

2014年2月19日と3月18日に藻類現存量が増加している。この期間は、アンカーアイスが発生していなかったため、氷板下に堆積している晶氷を採取して観測した結果である。今回の観測結果から、本観測地点より上流において、河床から剥離したアンカーアイスが流下し、本観測地点の氷板下に堆積した可能性が示唆される。

### 4.3. アンカーアイスの発生メカニズム

本現地観測結果から、アンカーアイスの発生には気温、水温の気象条件と、水位、流速などの水理条件が重要であることが分かった。

アンカーアイスの発生メカニズムについて、式(30)のShenら<sup>30)</sup>による計算式を用いて検討を行った。

$$\frac{dh_a}{dt} = \frac{1}{1 - \lambda_a} \left( \bar{r}C_v + \frac{\phi_{wi}}{\rho_i L_i} \right) \quad (30)$$

$$\phi_{wi} = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} (T_i - T_w) \quad (31)$$

$\gamma$  : アンカーアイスの増加係数(m/s)、 $C_v$  : 流水中の晶氷濃度(無次元)、 $C_{wi}$  : 1622(W $\cdot$ s<sup>0.8</sup>)/( $^{\circ}$ C $\cdot$ m<sup>2.6</sup>)、 $U_w$  : 平均流速、 $h_w$  : 水深、 $L_i$  : 氷の潜熱、 $\lambda_a$  : 晶氷の空隙率、 $T_i$  : 氷の表面温度で0 $^{\circ}$ Cを与えた。 $T_w$  : 水温であるが、本計算式では水温が0 $^{\circ}$ C以下にならないとアンカーアイスが発生しない。観測値では0 $^{\circ}$ Cに近くなるものの、0 $^{\circ}$ Cを下回る値は測定できなかった。これは、過冷却下では熱交換が一瞬で行われるためと推察される。そこで本研究では、吉川ら<sup>31)</sup>による水温の簡易計算式(32)を用いて、現地の気温データから時系列の水温を算出した。

$$T_w = \frac{T_a}{1 + \gamma} + \frac{\gamma T'_w}{1 + \gamma} \quad (32)$$

$$\gamma = \frac{h_w \rho_w C_p}{h_{wa} \Delta t} \quad (33)$$

$T_a$  [ $^{\circ}$ C]: 気温、 $T_w$  [ $^{\circ}$ C]:  $\Delta t$  前の水温、 $\Delta t$  [sec]: 計算の時間ステップ、本研究では10分を与えた。 $h_w$  [m]: 水深、 $\rho_w$  [kgm<sup>3</sup>]: 水の密度で1000.0を与え、 $C_p$  [Jkg $\cdot$  $^{\circ}$ C]: 水の比熱で4200.0を与えた。 $h_{wa}$  [Wm $^{\circ}$ C]: 大気と水との熱交換係数で20.0を与えた。図-32に示す計算水温と実測水温の絶対誤差の平均値は-0.09 $^{\circ}$ Cであり、整合性が高い。

式(31)の平均流速 $U_w$ の算出については、まず式(34)に示す吉川ら<sup>32)</sup>による結氷期流量算出手法を用いて、期間内の10分毎の計算流量 $Q$ を図-33に示した。

$$Q = CB_w^{\frac{1}{4}} A_0^{\frac{5}{4}} \quad (34)$$

$C$  : 河氷底面粗度を表す値、 $B_w$  [m]: 川幅、 $A_0$  [m<sup>2</sup>]: 流積。次に、図-34に示す流量と平均流速の相関式から10分毎の平均流速を算出した。式(31)と式(33)の水深 $h_w$ については、流量観測断面の横断データから径深を算出し、径深 $\approx$ 水深と仮定し、水位と径深の相関式から、10分毎の水位を用いて算出した。

計算によるアンカーアイス厚の時系列変化と現地設置カメラによるアンカーアイスの出現期間を図-35に示す。計算結果はアンカーアイスの出現期間と概ね一致している。特に、1月下旬から2月上旬の一時的なアンカーアイスの消失を再現している。しかし、2月中旬から3月にかけては再現できていない。この原因のひとつは、アンカーアイスの出現は定点カメラ画像で確認しているため、薄く発生したアンカーアイス把握できなかった可能性がある。



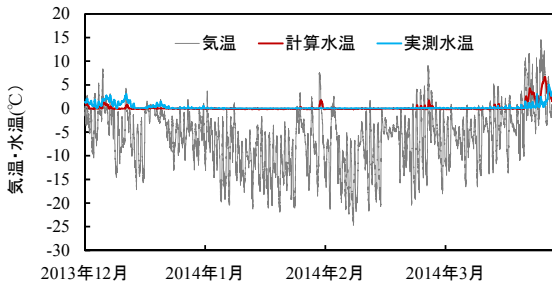


図-32 気温と水温の計算値と実測値

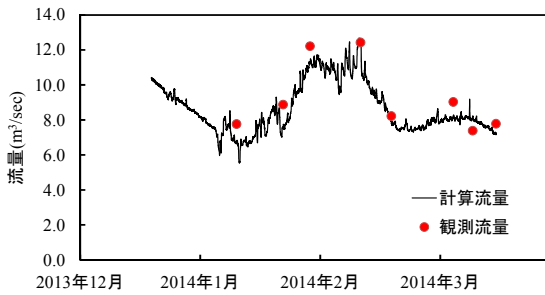


図-33 計算流量

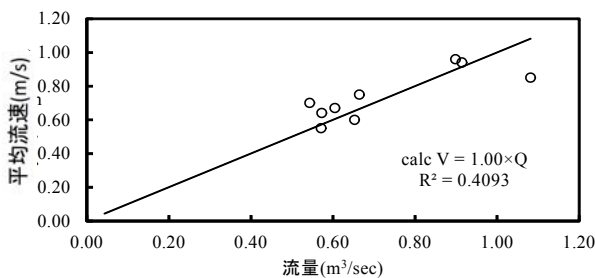


図-34 流量と平均流速の関係 (観測値)

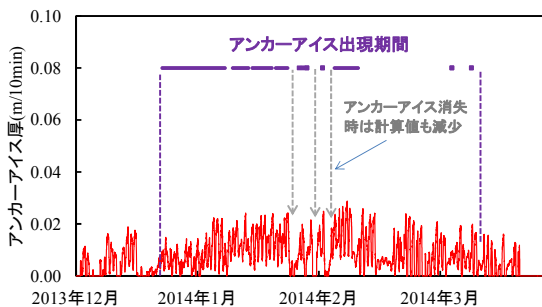


図-35 アンカーアイス厚の計算値

ことと、本計算式では、式(31)の  $T_i$  を  $0^\circ\text{C}$  として与えているが、この条件は、河床材料が十分に冷却されていることを前提としている。実現象として、日射や地熱などによって河床材料は温められていることが考えられるが、本研究では、この現象を考慮していないため、アンカーアイス厚を適切に計算できなかったと推察できる。

#### 4.4. アンカーアイスが物質循環に与える影響

##### (1) アンカーアイスに含有される藻類

本観測期間中におけるアンカーアイスに含有される藻類は、珪藻 46 種、緑藻 5 種、黄色鞭毛藻 3 種、藍藻 4 種の計 58 種であった。河水内の藻類残存量を図-36 に示す。なお、2014 年 2 月 19 日と 3 月 18 日はアンカーアイスが消失していたため、氷板下の晶氷を採取した。藻類現存量は、アンカーアイス発生直後の 2013 年 12 月 25 日が最も多く、優占種の上位は羽状目珪藻であった。この時の顕微鏡での状況を図-37 に示す。珪藻では、*Hannaea arcus* (クノジケイソウ)、*Cymbella minuta* (クチビルケイソウ)、*Gomphoneis okunoi* (ゴンフォネイス) *Nitzschia spp.* (ニッチア) が、黄色鞭毛藻では、*Hydrurus foetidus* (ミズオ) が優占種の上位になり、これらで全体の 80% 程度を占めた。一方、2014 年 1 月 5 日の水位変動によって最初のアンカーアイスが消失し、再びアンカーアイスが発生した 2014 年 1 月 10 日は、図-38 に示すように藻類は少なく、最初のアンカーアイス流失でフラッシュされて、藻類の生産が追い付いていないものと推察できる。2014 年 2 月 19 日は氷板下の晶氷に含まれる藻類現存量が多くなっているが、優占種は同様で、アンカーアイスよりも黄色鞭毛藻ミズオの含有量が多くなる傾向がみられた。

##### (2) アンカーアイスに含有される有機物と栄養塩

図-39 に示す有機物と栄養塩の期間毎の特徴を以下に記す。

- ① アンカーアイス発生直後は、BOD (有機物) 濃度が高く、SS、窒素、リンともに高濃度である。河床の石にアンカーアイスが付着したため、石表面に付着していた藻類がアンカーアイスに取り込まれたものと推察できる。
- ② 最初のアンカーアイスの流失によって、石表面の付着物がフラッシュされるため、再び発生したアンカーアイス内の BOD や SS は低い濃度になった。
- ③ アンカーアイスの SS 濃度は、BOD などに比べて高い。藻類の生産ではなく、一時的な土砂の掃流

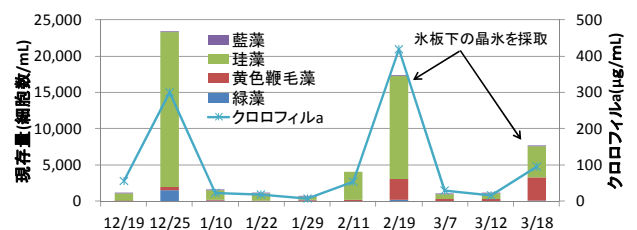


図-36 河水の藻類現存量

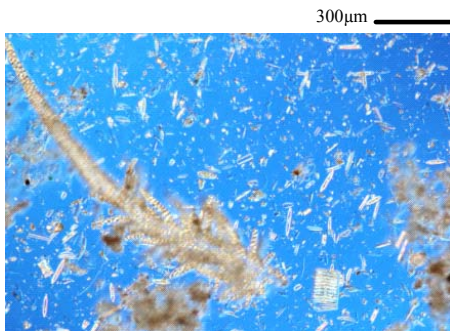


図-37 アンカーアイス発生時(2013. 12. 25)

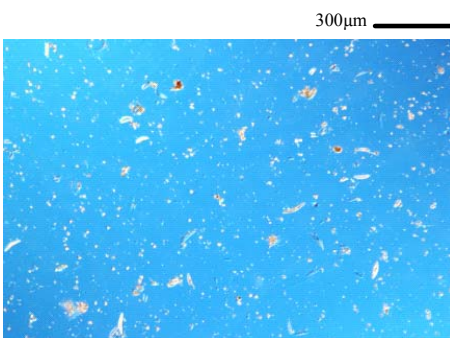


図-38 フラッシュ後のアンカーアイス(2014. 1. 10)

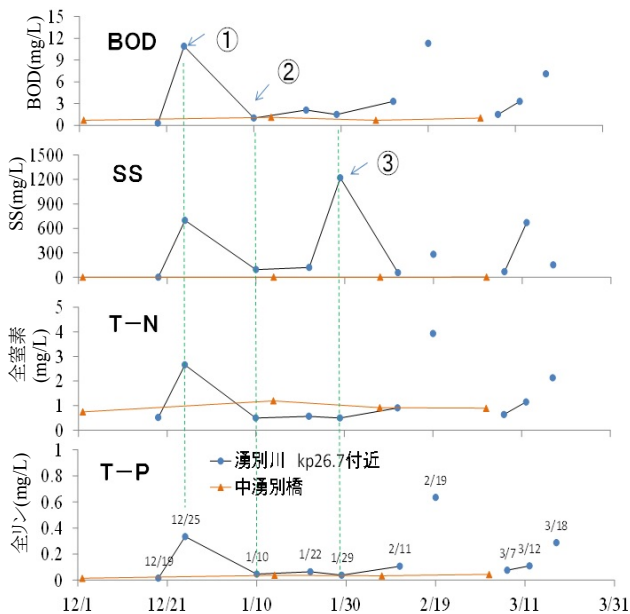


図-39 水質濃度変化

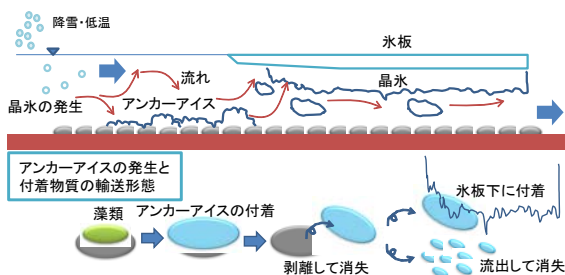


図-40 アンカーアイスの発生と付着物質の輸送形態

で、土粒子がアンカーアイスに付着したと推察できる。

なお、観測地点下流の中湧別橋の水質とアンカーアイスの濃度変動は連動していない。アンカーアイスの発生量および発生範囲が限定されるため、下流水質への直接的な影響は少ないと推察できる。

本観測で得られたアンカーアイスの発生と付着物質の輸送形態を整理すると図-40 となる。アンカーアイスは水と河床との温度差、または晶氷が流れによって河床に運ばれて発生し、その後、河床から剥離し、下流に流下する。その一部は氷板下の晶氷に取り込まれる。

(3) アンカーアイスの消長が河川水質に与える影響  
アンカーアイスの水質分析結果をもとに、アンカーアイスからの流出負荷量を算出する。

アンカーアイスの発生体積（縦方向×横方向×厚さ）を現地状況の目視から 100m×50m×0.1m とした。アンカーアイスは、気温が低い早朝に発生し。日射が多くなる昼間には融解する日周期がみられることから、1 サイクル/日と仮定して流出量を算出する。 $100 \times 50 \times 0.1 \div (24 \times 60 \times 60) = 0.006 \text{ m}^3/\text{sec}$  となる。12 月から 3 月までの 7 回分のアンカーアイスに含有する単位体積当たりの BOD の平均値は 3.4mg/L、SS 平均値 418mg/L、全窒素平均値は 1.0mg/L、全リン 0.1mg/L、クロロフィル a 63.3  $\mu\text{g/L}$  に流出量 0.006 $\text{m}^3/\text{sec}$  を乗じた負荷量を算出した。アンカーアイスが発生していない 2013 年 12 月 19 日と 2014 年 3 月 18 日の河川水内の平均値（BOD 3.7mg/L、SS 76.5mg/L、全窒素 1.3mg/L、全リン 0.2mg/L、クロロフィル a 75.5  $\mu\text{g/L}$ ）に平均河川流量（中湧別流量 17.02  $\text{m}^3/\text{sec}$ ）を乗じた負荷量を算出した。本観測結果から、アンカーアイスに含有している物質が河川を流下する物質に占める割合は、BOD は河川負荷量の 0.2%、SS は 8.5%、全窒素は 0.05%、全リンは 0.14%、クロロフィル a は 0.03% であった。

#### 4.5. 本章のまとめ

本現地観測結果から、アンカーアイスの発生には、気温、水温の気象条件と、水位、流速などの水理条件が重要であることが分かった。アンカーアイス発生 の計算式は、アンカーアイスの発生・消長を概ね再現しているが、計算精度を高めるためには、日射、地熱による河床材料の温度を適切に見積もることが重要であることが分かった。アンカーアイスが発生する本観測地点のフルード数は 0.3 から 0.6 程度であ

り、開水時（非結氷時）の河川における藻類の一次生産力が高まると言われているフルード数 0.4 前後の値と同等であった。アンカーアイスに含まれている藻類現存量については、最初に発生したアンカーアイスが観測期間中、最多であった。本観測結果より、開水時に繁茂した藻類が初期に発生するアンカーアイスに取り込まれて下流へと流下するフラッシュ現象による物質輸送が推測された。また、氷板下に堆積している晶氷を採取した結果、本観測地点より上流において、河床から剥離したアンカーアイスが流下し、本観測地点の氷板下に堆積した可能性が示唆された。

## 5. 結論

本研究は、積雪寒冷地河川の栄養塩類及び浮遊砂、油に代表される物質の輸送機構を解明するために、現地観測、水理実験の成果を基に数値計算モデルを開発し、塩水遡上及び油類の流出事故対策の反映や藻類や浮遊砂を取り込んだ氷（アンカーアイス）の流下に着目した栄養塩類の輸送機構の解明を目標に検討した。得られた主な知見は以下の 5 点である。

河川結氷時を想定し、氷板の有無における塩水遡上流速の違いを確認するため、水面に氷板模型を設置した塩水遡上実験を実施した結果、塩水遡上時の鉛直流速分布の水路床近傍の塩水流速において、氷板ありの場合は氷板なしに比べて塩水遡上速度が遅くなることを確認した。

塩水遡上速度の経時変化について実験で得た塩水遡上先端位置とその時間を計算値と比較し、氷板を有する場合において 1 次元 2 層不定流計算で塩水遡上速度を計算できることを示した。

氷板の有無における油の流下速度の違いを確認するため、河川結氷時の油流下実験を実施した結果、氷板有りでは、氷板の底面に働く摩擦力の影響により灯油の油膜層が厚くなり灯油の拡散を小さくすることで流下速度が流水より遅くなることがわかった。氷板無しでは灯油の流下速度は移流・拡散の影響を受けて流速が早くなることがわかった。また、油流下実験に基づき、氷板の有無における油流出条件において河川と油の流量と流速の関係を整理した。

淡水と塩水の界面抵抗係数を求める式を淡水と油の界面に適用した結果、油の流下速度における実験値に基づき係数を適切に与えることで、1 次元 2 層不定流計算モデルにより再現可能であることを示し

た。

冬期の結氷河川において、河床に固着した藻類や浮遊砂の剥離要因であるアンカーアイスに着目し、平成 25 年度より 3 ヶ年道東の湧別川において現地調査を実施した結果、気温、水温、水深、流速などによりアンカーアイスが発生し、含有物質とともに流下していることを解明した。

## 参考文献

- 1) 松宮弘信、米山望、田中尚、鮫島竜一、佐藤広章：河川遡上津波発生時の淀川大堰上流部における塩水挙動解析、自然災害科学、28(2)、pp.125-135、2009.
- 2) 湖沼技術研究会：湖沼における水理・水質管理の技術、国土交通省、水管理・国土保全局、2007.
- 3) 吉川泰弘、渡邊康玄：結氷時の塩水遡上に関する現地観測、土木学会、河川技術論文集、第 12 巻、pp.157 - 162、2006.
- 4) Brian Morse, Benoit Ringo, Danielle Messier, Tung Thanh-Quach, Ed Stander : Hydrodynamics of Mesotidal Estuary in Winter, J.COLD REG ENGRG, Vol.20, No.3, pp.95- 115, 2006.
- 5) 赤堀良介、吉川泰弘、安田浩保：スルースゲートを用いた弾力的な塩水遡上の制御手法に関する基礎的研究、土木学会、水工学論文集、第 55 巻、pp.S1585- S1590、2011.
- 6) UNESCO : Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater 1980, UNESCO Technical papers in marine science, No.38, pp.7- 8, 1981.
- 7) 山下彰司、井出康郎、堺茂樹：寒冷地河川の氷板下の流速分布の推定、土木学会、水工学論文集、第 40 巻、pp.65- 70、1996.
- 8) 日野幹男：密度流の流速分布および界面抵抗について、土木学会、水理講演会論文集、第 23 回、pp.347- 353、1979.
- 9) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの数値計算法、土木研究所、土木技術資料、23(11)、pp.593- 598、1981.
- 10) 嶋祐之、椎貝博美、玉井信行：河床勾配のある場合の塩水楔について、土木学会、年次学術講演会講演概要集、第 19 回、2-71、p.2、1964.
- 11) 日野幹男：明解水理学、丸善株式会社、p.90、176、1983.
- 12) 岩崎敏夫、岸田州生、富岡亮一：二成層流における密度混合について、年次学術講演会講演集、第 17 回、2-3、pp.5- 6、1978.
- 13) 水理委員会密度流研究小委員会：成層密度流の界面現象(1)、土木学会論文報告集、第 242 号、pp.82- 90、

- 1975.
- 14) 東北地方整備局 東北技術事務所：河川管理の現場担当者に向けた『油流出事故対策』、2009.
- 15) 埜口英昭、羽田野袈裟義、平野宗夫：流れの場に連続流出する油層の拡がりの解析、土木学会、水工学論文集、第34巻、pp.223-228、1990.
- 16) 大塚夏彦、荻原浩二、金編康平、高橋伸次郎、佐伯浩：氷盤群の下に流出した油の拡散特性に関する実験的研究、土木学会、海洋開発論文集、第18巻、pp.767-772、2002.
- 17) 泉山耕、金野祥久、松本健司、堺茂樹：氷盤下における流出油の拡散—氷盤下面の凹凸の影響—、土木学会、海岸工学論文集、第49巻、pp.1341-1345、2002.
- 18) 松崎義孝、小笠原敏記、堺茂樹：氷盤下に拡がった油の流れによる変形及び移動に関する数値計算、土木学会、海岸工学論文集、第53巻、pp.396-400、2006.
- 19) 山下彰司、小林正隆、宮明彦、平山健一：北海道の河川結氷について、土木学会、北海道支部論文報告集、第50巻、pp.550-555、1994.
- 20) 吉川泰弘、赤堀良介、安田浩保、平井康幸：河川結氷時の塩水遡上に関する基礎的研究、土木学会、水工学論文集、第56巻、pp.1321-1326、2012.
- 21) 椿東一郎、荒木正夫：水理学演習上巻、森北出版株式会社、p.102、1995.
- 22) 日野幹男：明解水理学、丸善株式会社、pp.90、176、1983.
- 23) 岩崎敏夫、岸田州生、富岡亮一：二成層流における密度混合について、年次学術講演会講演集、第17回、pp.2-3、pp.5-6、1978.
- 24) 水理委員会密度流研究小委員会：成層密度流の界面現象(1)、土木学会論文報告集、第242号、pp.82-90、1975.
- 25) 橋場雅弘、吉川泰弘、伊藤丹、黒田保孝：アンカーアイスの平面分布と含有物質に関する現地観測、水工学論文集、第58巻、pp.1279-1284、2014.
- 26) 平山健一、佐藤志貴、寺田浩一郎、笹本誠、堺茂樹、滝口大樹：アンカーアイスの発生に関する現地観測、第12回寒地技術シンポジウム、pp.499-504、1996.
- 27) 笹本誠、牛渡久雄、平山健一、劉曉東、寺田浩一郎、斉藤智彦：流水中でのアンカーアイスの付着状況に関する研究、第16回寒地技術シンポジウム、pp.74-80、2000.
- 28) 戸田祐嗣、赤松良久、池田駿介：水理特性が付着藻類の一次生産に与える影響に関する研究、土木学会論文集、No705、pp.161-174、2002.
- 29) Tremnlay P., Leconte R., Lacey R.W.J., Bergeron N.: Anchor ice cycles :observations from field study on the Stoke River,CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 17th Workshop on River Ice,pp.47-54,2013.
- 30) Shen H.T. ,Wang D.S. ,WasanthaLal A.M. :Numerical Simulation of River Ice Processes, Journal of Cold Regions Engineering ,ASCE9(3),pp.107-118. 1995.
- 31) 吉川泰弘、渡邊康玄、早川博、平井康幸：結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.68、No.1、pp.21-34、2012.
- 32) 吉川泰弘、渡邊康玄、早川博、平井康幸：河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法、水工学論文集、第54巻、pp.1075-1080、2010.



## STUDY ON THE MATERIAL TRANSPORTATION OF THE RIVER IN SNOW COLD REGION

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Research Period** : 2011-2015

**Research Team** : River Engineering Research Team

**Author** : FUNAKI Jyungo

KURODA Yasutaka

ABE Takaaki

SATO Yoshiaki

TANAKA Tadahiko

TOYABE Toshihito

**Abstract** : Expeditious processing is required for oil spill accidents in water area since they can cause enormous damage to the local habitat and environment. In cold snowy regions, there are frequent heating oil spill incidents in winter. In addition, oil spill under river-ice cover and its process can hardly be observed. In this study, a series of hydraulic experiments using ice model is performed to investigate oil spill and salinity intrusion phenomena under ice cover. As the result, it is clarified that spilling speeds become slower and the oil layer becomes thicker compared with the cases with open channel. Moreover, simulation by one dimensional two-layer unsteady flow model is performed and consequently it is revealed that oil spill and salinity intrusion speed is reproducible with appropriate shear stress at the interface and upstream end conditions.

**Key words** : Ice covered river, Salinity Intrusion, Oil spill, Hydraulic model experiment, Numerical simulation, Anchor ice, Fielded observation, Algae, Material cycle