

結氷河川の油流出時における油流下速度の 予測手法に関する研究

RESEARCH ON THE PREDICTION METHOD OF OIL FLOW SPEED
AT THE TIME OF OIL SPILL IN ICE COVERED RIVERS

河田 拓視¹・加藤 一夫²・吉川 泰弘³・阿部 孝章⁴・伊藤 丹⁵
Takumi KAWATA, Kazuo KATO, Yasuhiro YOSHIKAWA, Takaaki ABE, Akashi ITO

¹正会員 株式会社 水工リサーチ (〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目)

²正会員 株式会社 水工リサーチ (〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目)

³正会員 博(工) 北見工業大学助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁴正会員 研究員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁵正会員 上席研究員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目)

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 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 speed is reproducible with appropriate shear stress at the interface and upstream end conditions.

Key Words : ice covered river, oil spill, hydraulic model experiment, numerical simulation

1. はじめに

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フェンスを用いて拡散防止処理が実施されている¹⁾。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¹⁾。

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²⁾

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³⁾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⁴⁾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。

表-1 実験条件

実験条件	氷板模型	q_1 [m ² /s]	Q_1 [L/s]	q_2 [m ² /s]	Q_2 [L/s]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	Fr_2'	Re_2'
case1	無し (開水時)	3.40×10^{-5}	0.0068	9.90×10^{-3}	1.98	16.0	3.2	0.103	3084
case2	無し (開水時)	1.88×10^{-4}	0.0375	9.90×10^{-3}	1.98	15.5	3.4		
case3	無し (開水時)	3.75×10^{-4}	0.0750	9.90×10^{-3}	1.98	16.0	3.0		
case4	有り	3.40×10^{-5}	0.0068	9.90×10^{-3}	1.98	14.0	2.4	0.111	2085
case5	有り	1.88×10^{-4}	0.0375	9.90×10^{-3}	1.98	15.2	3.2		
case6	有り	3.75×10^{-4}	0.0750	9.90×10^{-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2.5m~4.5m区間の平均Froude数, Re_2' : 灯油流出前の下流端から2.5m~4.5m区間の平均Reynolds数

2. 灯油流下実験

(1) 実験条件

実験概要図を図-1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: $L = 9.0m$, 水路幅: $B = 0.2m$ 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⁶⁾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1.98L/s, 水路勾配を1/300と設定した. 基準地点は下流端から3.0m地点 (以後, $X = 3.0m$ と表記) とし, $X = 3.0m$ の水深が開水時で0.10m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0.11mとした. これらの条件下で $X = 3.0m$ のFroude数は, 開水時で0.100, 結氷時で0.108であった. 水温は $3.0^{\circ}C \pm 1.0^{\circ}C$ 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-1に示す. 表-1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, $X = 2.5m \sim 4.5m$ 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 $X = 4.5m$ 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

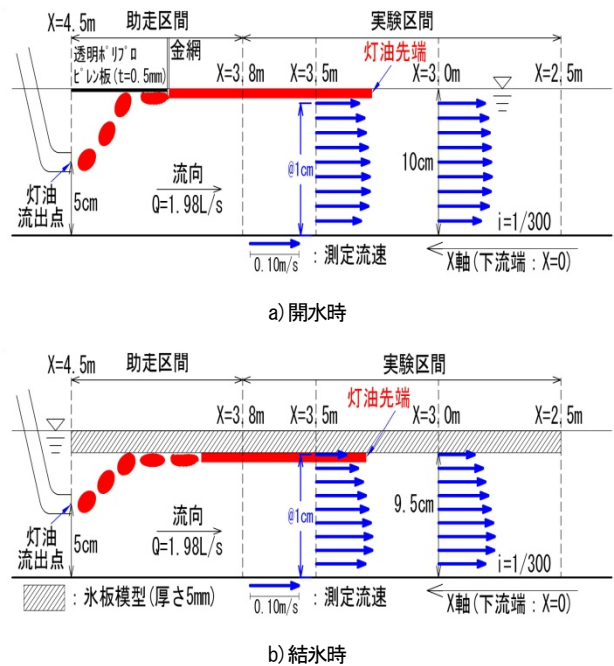


図-1 開水時と結氷時の実験概略図

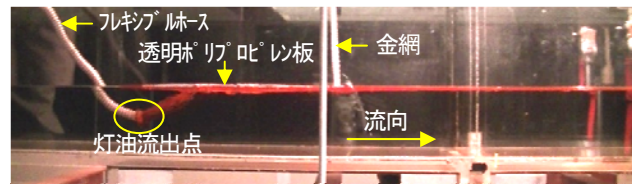


図-2 開水時の灯油流出状況 (側面より撮影, case3)

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, $X = 3.8m \sim 4.5m$ 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-2に示す.

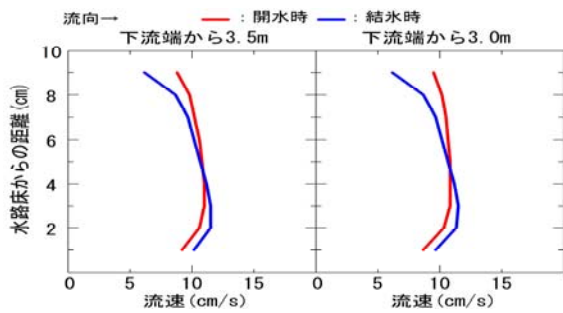
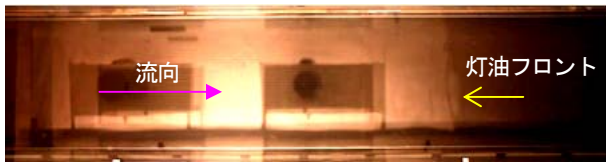


図-3 各計測地点の鉛直流速分布



a)開水時(真上より撮影, case3)



b)結氷時(真下より撮影, case4)



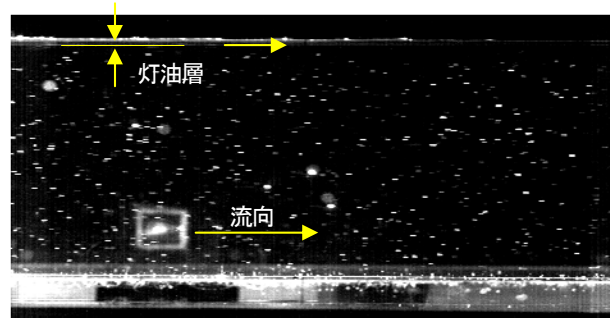
c)結氷時(真下より撮影, case6)

図-4 灯油の流下状況(上下より)

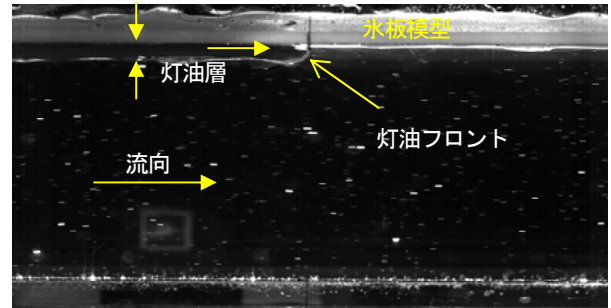
(2) 測定項目

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 3.5m 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 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 3.5m 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。



a)開水時(側面より撮影, case3)



b)結氷時(側面より撮影, case6)

図-5 灯油の流下状況(側面より)

(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-3に示す。

図-3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。

(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-4に, 水路側面より撮影した灯油の流下状況を図-5にそれぞれ示す。

開水時は図-4 a)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-5 a)にあるようにようやく目視出来る厚さの灯油層が流下した。

結氷時は図-5 b)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 $5\text{mm} \sim 7\text{mm}$ であり, $\text{case4} < \text{case5} < \text{case6}$ 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-4 b)よりcase4のみ水路全体に灯油は広がらず, 滲筋状に流下した。

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

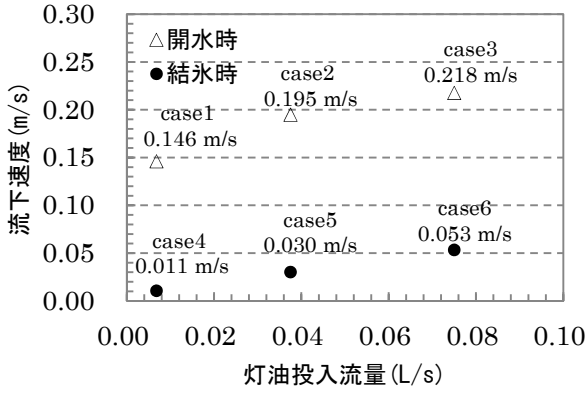


図-6 実験条件別の灯油流下速度

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-6に示す。図-6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のが明らかとなった。既往研究³⁾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-3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. 1次元2層不定流計算

(1) 2層流モデルの構築

既往研究⁷⁾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⁷⁾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(1)～(4)として図-7に河川結氷時の灯油と淡水の流速分布の概略図を示す。計算方法は、従属変数を空間的に千鳥状(staggered)に配置して、時間的に蛙飛び(leap-frog)に進める陽的な差分式で行った。従属変数である水深と速度は、半ステップずらして離散化した。移流項の差分法は、時間毎

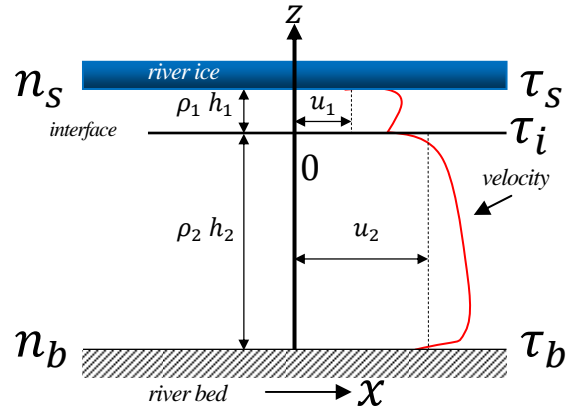


図-7 河川結氷時の灯油と河川の流速分布の概略図

に流れ方向を考慮した風上差分とした。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial(h_1 u_1)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial(h_2 u_2)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\tau_1}{\rho_1 h_1} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\tau_2}{\rho_2 h_2} = 0 \quad (4)$$

i_0 [無次元]: 水路勾配, τ [N/m²]: 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, ρ [kg/m³]: 密度. ρ_1 [kg/m³]には灯油の密度800, ρ_2 [kg/m³]には淡水の密度1000を与え、せん断応力 τ_1 , τ_2 は流況の違いにより下記に示した条件ごとに式(5)～(7)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: $\tau_1 = \tau_i + \tau_{s1}$, $\tau_2 = \tau_{b2} - \tau_i$

$$\tau_{b2} = \rho_2 g \frac{u_2 |u_2| n_b^2}{R_{2b}^{1/3}} \quad (5)$$

$$\tau_{s1} = \rho_1 g \frac{u_1 |u_1| n_s^2}{R_{1s}^{1/3}} \quad (6)$$

$$\tau_{s2} = \rho_2 g \frac{u_2 |u_2| n_s^2}{R_{2s}^{1/3}} \quad (7)$$

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-1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2320⁸⁾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⁹⁾および摩擦損失係数とManningの粗度係数の関係式⁹⁾を用いて、式(8)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(9)と式(10)を用いて n_b と n_s を算出した。その結果を表-2に示す。

$$n_0 = \sqrt{\frac{64 R^{1/3}}{Re'_1 8g}} \quad (8)$$

$$n_b = n_0 \frac{u_0}{u_b} \left(\frac{R_{2b}}{R}\right)^{2/3} \quad (9)$$

$$n_s = n_0 \frac{u_0}{u_s} \left(\frac{R_{2s}}{R}\right)^{2/3} \quad (10)$$

(2) 界面のせん断応力 τ_i

既往研究⁷⁾では2層流現象に対して、界面のせん断応力 τ_i が支配的な影響因子としており、それを表している式(11)から算出する。

$$\tau_i = \rho_1 \frac{f_i}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (11)$$

f_i [無次元] : 界面抵抗係数で、岩崎ら¹⁰⁾は淡水と塩水において式(12), (13)で表わされることを提案している。

$$f_i = \alpha \psi^{-n} \quad (12)$$

$$\psi = Re_2 Fr_2^2 \quad (13)$$

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(12), (13)を用いて算出を試みた。

(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 : $B = 0.2\text{m}$, $\Delta x = 0.01\text{m}$, Δx はCourant数0.3とし、Manningの粗度係数 n は表-2より水路床粗度 : $n_b = 0.020$, 氷板模型粗度 : $n_s = 0.027$, 密度 ρ 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-1より、実験条件別に流出させる灯油の単位幅流量 : q_1 ,

表-2 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

表-3 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

※ $h_{1(0)}$ は式(14)より算出

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(14)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。

$$h_{1(0)} = \frac{Q_1}{Bu_1} \quad (14)$$

界面抵抗係数 : f_i は式(12)を用いて、吉川らが塩水遡上現象で得られた α の値0.10⁷⁾ 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0.50¹¹⁾ として算出したものを与えた。図-8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-8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 α 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⁷⁾にある界面のせん断応力 τ_i が影響因子の1つであるということがわかった。

次に α 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。開水時には、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-3に最適計算値の灯油層厚 : $h_{1(0)}$ についての値、図-9にこの時の計算値と実験値の灯油の流下速度を示す。図-9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、結氷時は計算値は実験値に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、実験では灯油が滯筋状に流下していったのに

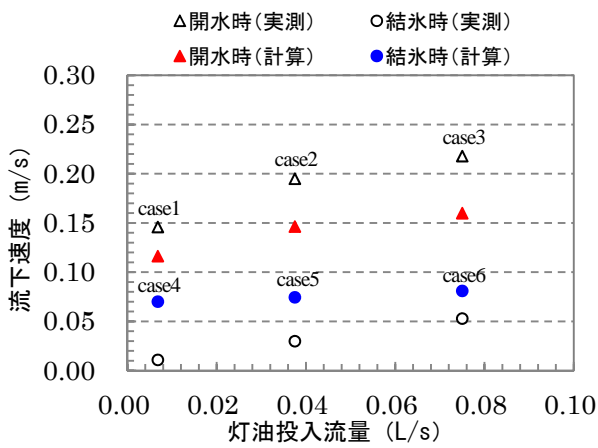


図-8 $h_{1(0)} = \frac{Q_1}{Bu_1}, \alpha = 0.10$ 時の計算値と実験値の灯油流下速度

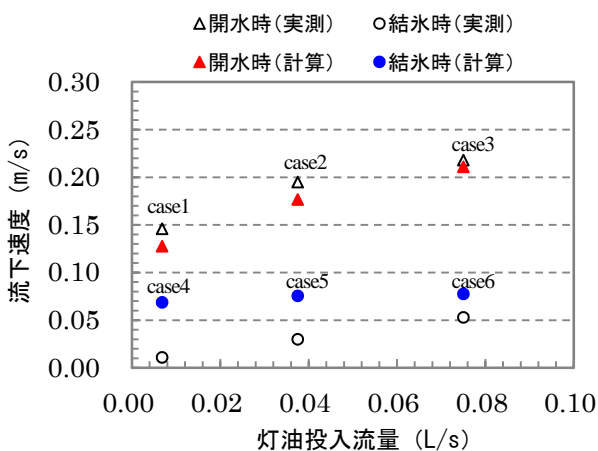


図-9 $h_{1(0)} = \text{最適}, \alpha = 0.05$ 時の計算値と実験値の灯油流下速度

対し、本モデルでは灯油は水路幅全体に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。

4. まとめ

(1) 本研究の成果

本研究では、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が示唆された。

淡水と塩水の界面抵抗係数を求める既往研究¹⁰⁾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で再現することが可能か試みた。油の流下速度における実験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。

(2) 今後の課題

本研究の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。

参考文献

- 1) 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』，平成21年3月
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 椿東一郎，荒木正夫：水理学演習上巻，森北出版株式会社，pp.102，1995。
- 9) 日野幹男：明解水理学，丸善株式会社，pp.90，176，1983。
- 10) 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。
- 11) 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