

簡易的なアイスジャム計算モデル に関する検討

第3回 流砂・河床変動に関する若手勉強会@札幌

2018年7月24日(火)

北見工業大学 吉川泰弘

発表の流れ

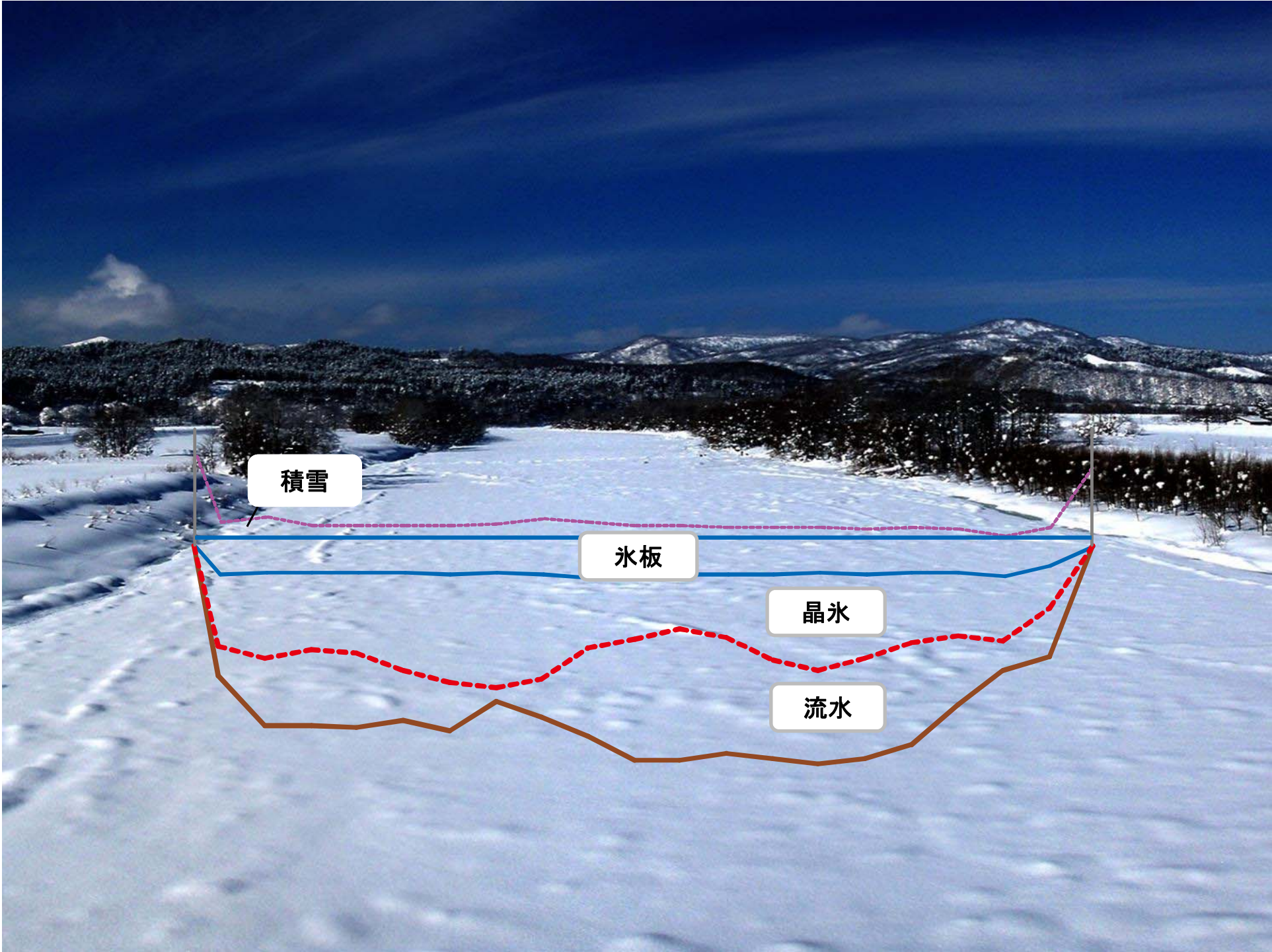
1. 結氷河川の概要

2. 2011年3月11日河川津波によるアイスジャム

3. 河氷変動計算モデル(単一粒径)

4. 河氷変動計算モデル(混合粒径)

5. 簡易的なアイスジャム計算モデル



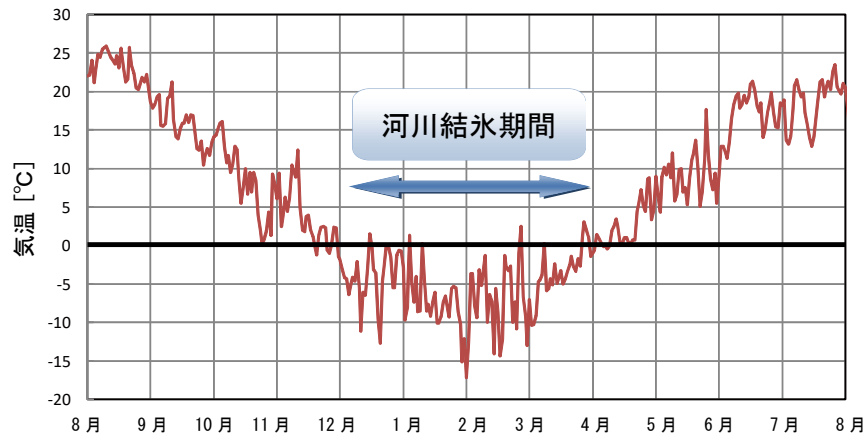
積雪

氷板

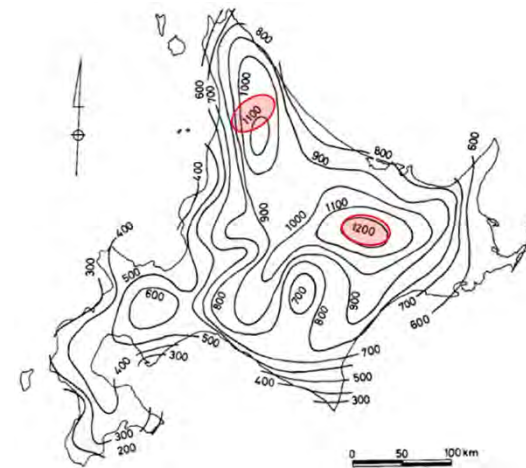
晶氷

流水

北海道の結氷河川



北海道における気温の年変化の一例



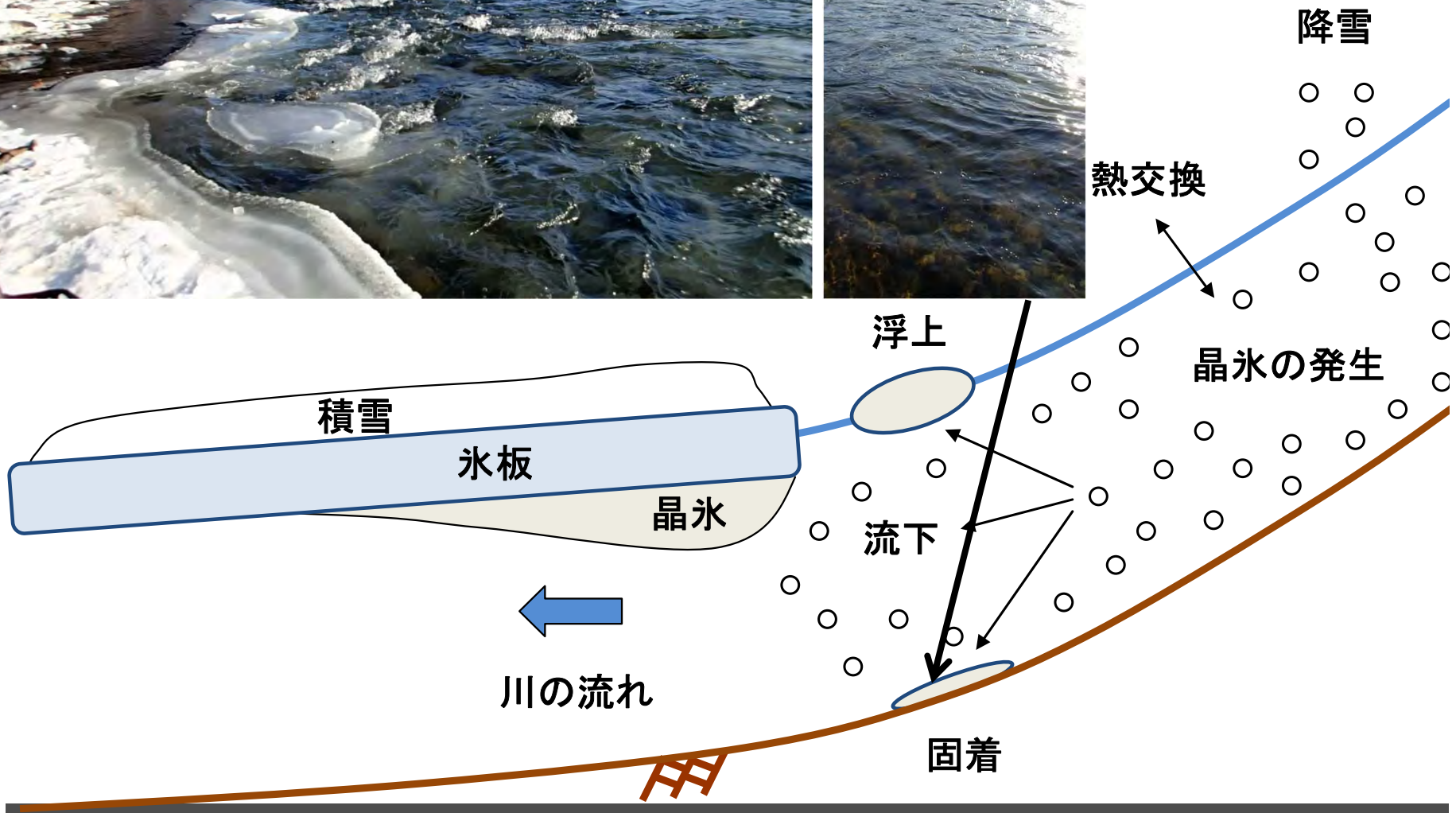
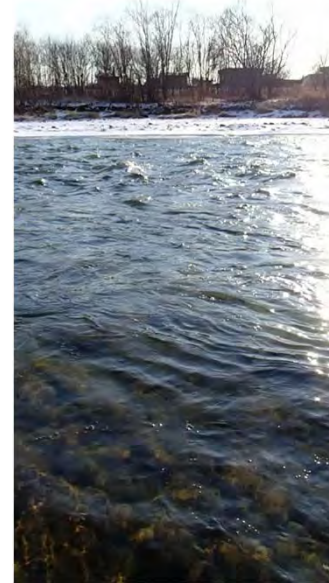
積算寒度図1974年度11月～3月(福田ら)



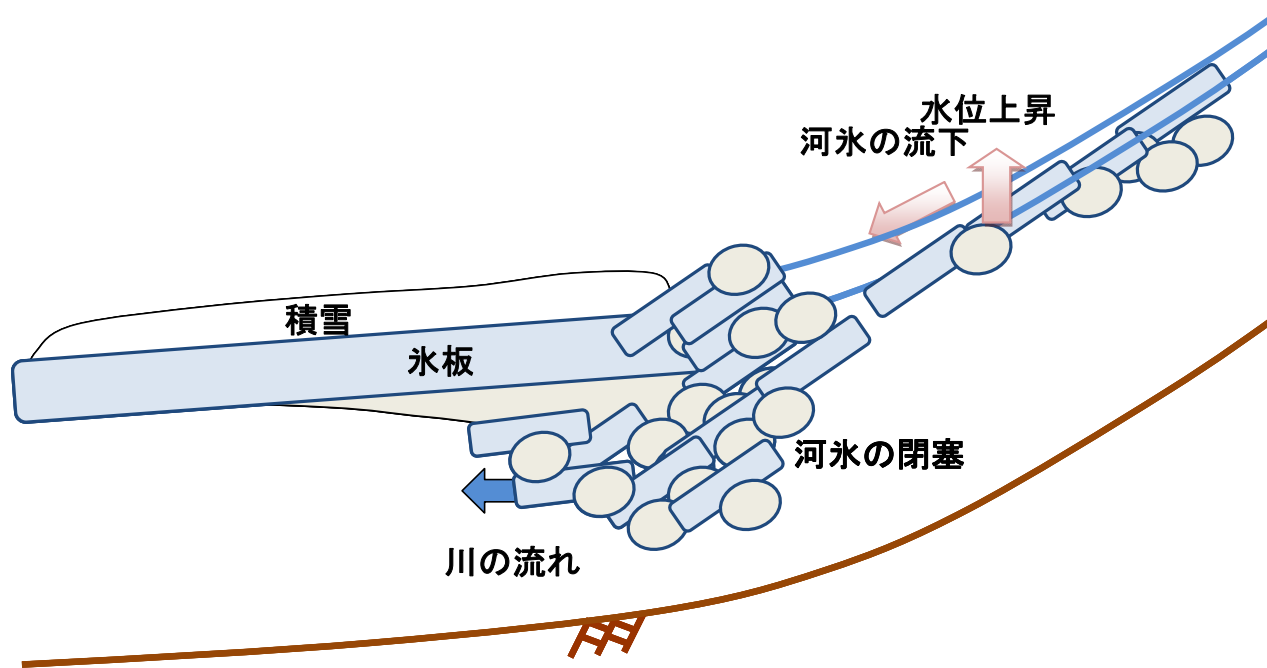
北海道における河川結氷の経時変化の一例

- ・気温がマイナスとなる期間は、年間の約100日間
- ・結氷河川は、北海道全域に存在

結氷河川における結氷現象



アイスジャム 河川結氷時の災害



アイスジャム実験(上空から撮影, 寒地土木研究所にて実施)



2つの橋脚

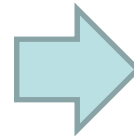
← 流れ方向

北海道のアイスジャム

- ・ 北海道内では多くの河川が冬期に結氷する（年間100日程度）
- ・ 結氷により，河川の維持管理，防災で様々な問題が発生



2013.4.7 11:00



4 hours



2013.4.7 15:00

特に，河道内の割れた氷が河道内詰まるアイスジャム現象は，突然の河川水位上昇や河川，ダムでの取水障害等，多くの問題を引き起こしている。

発表の流れ

1. 結氷河川の概要

2. 2011年3月11日河川津波によるアイスジャム

3. 河水変動計算モデル(単一粒径)

4. 河水変動計算モデル(混合粒径)

5. 簡易的なアイスジャム計算モデル

北海道における河川津波(2018.3.11)の現地調査

十勝川KP3.3大津市街樋門(吐き口)



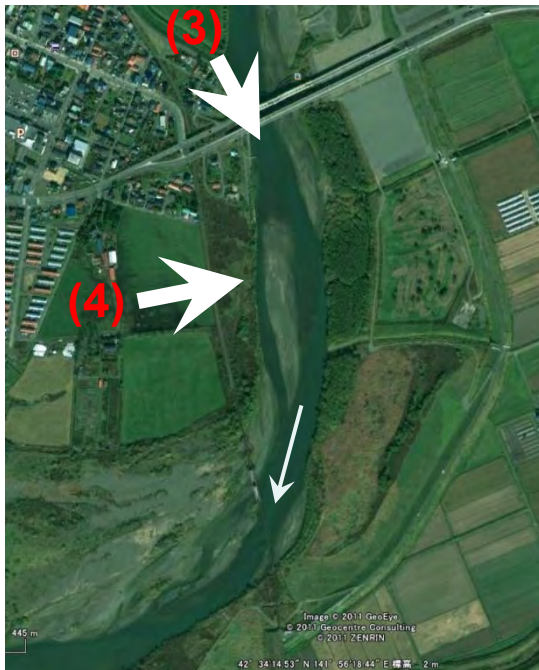
北海道における河川津波(2018.3.11)の現地調査

鵜川河口左岸樋門(KP0.9)



- 樋門吐き口水路へ、多数の河氷が侵入・堆積
- 周辺の高水敷にも河氷が多数堆積

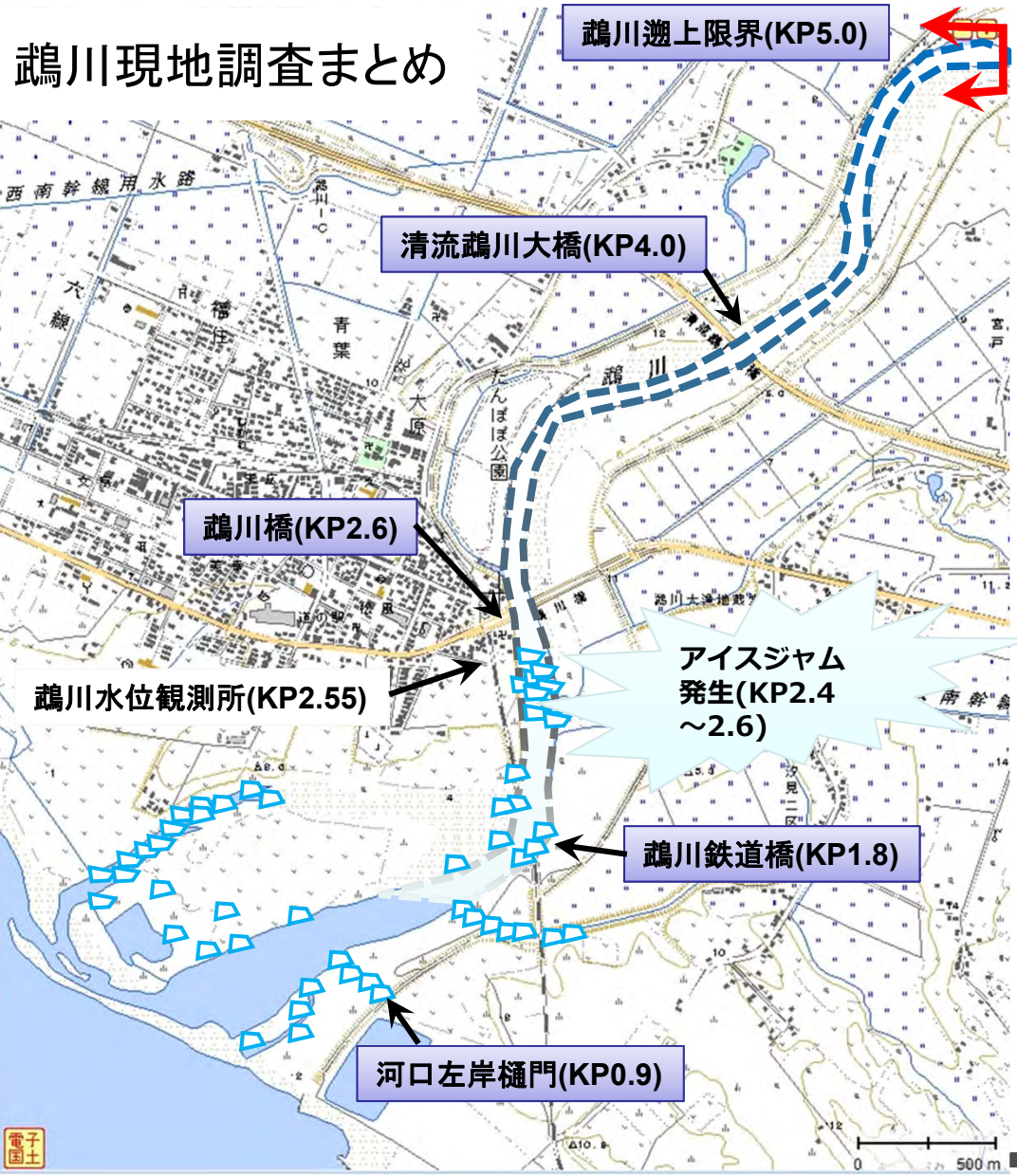
北海道河川における津波の河川遡上



- 鷓川橋より下流では、無数の河氷が堆積し、堰のようになっていた
- 河氷が河道内に堆積したことと考えられる水位の上昇が確認



北海道鷓川における河川津波による現象



津波の河川遡上

河水の破壊

河水の遡上・流下

樋門・吐き口
水路への河
氷の侵入と
堆積

アイスジャム
発生

水位上昇

樋門への河氷の侵入

河川結氷時における樋
門の正常動作の確保

河氷の堆積

アイスジャム発生メカニズ
ムの解明および対策

発表の流れ

1. 結氷河川の概要

2. 2011年3月11日河川津波によるアイスジャム

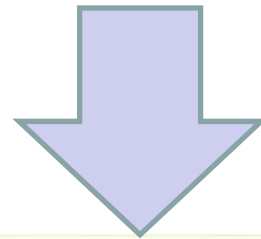
3. 河氷変動計算モデル(単一粒径)

4. 河氷変動計算モデル(混合粒径)

5. 簡易的なアイスジャム計算モデル

研究の目的と手法

河川結氷時の津波対策を立案することを最終的な目的として、本研究では、北海道鷗川で発生したアイスジャムの現象の解明を試みた



1. 河水変動計算モデルの構築
 2. アイスジャムの水理実験
 3. 北海道鷗川のアイスジャム再現計算
-

1. 河氷変動計算モデル

河川水の流れ

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_{is}}{\partial t} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_w^2}{A_w} \right) + g A_w \frac{\partial}{\partial x} \left(z + h_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} (h_{is} + h_{if}) \right) \\ + \frac{g n_b^2 u_w^2 S_w}{R_w^{1/3}} + \frac{\rho_i g n_i^2 u_i^2 S_i}{\rho_w R_i^{1/3}} + g A_w I_r = 0 \end{aligned}$$

氷板の流れ

$$\frac{\partial A_{if}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{if}}{\partial x} - \frac{\partial A_{is}}{\partial t} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{if}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{if}^2}{A_{if}} \right) + g A_{if} \frac{\partial}{\partial x} (z + h_w + h_{is} + h_{if}) \\ - \frac{g n_i^2 u_i^2 S_i}{R_i^{1/3}} = 0 \end{aligned}$$

氷板厚の形成融解

$$h_{is} = h'_{is} - \left(\frac{65.2}{10^5} \right) \alpha \frac{T_a}{h'_{is}} - \left(\frac{45.8}{10^2} \right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3}$$

Ta: 気温
Tw: 水温
hw: 有効水深

hi: 氷板厚

1. 河氷変動計算モデル

氷板の破壊

破壊条件

応力 $\sigma_{max} >$ 許容曲げ応力 σ_a

流水による破壊(片持梁)

$$\sigma_{max} = 3\rho_w \left(\frac{L u_w \sin \theta}{h_i} \right)^2$$

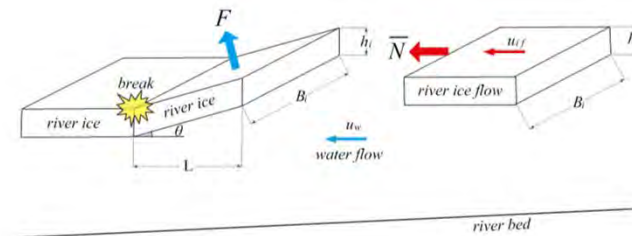
アイスジャム発生条件

発生:

氷板厚に対して川幅が狭い場合

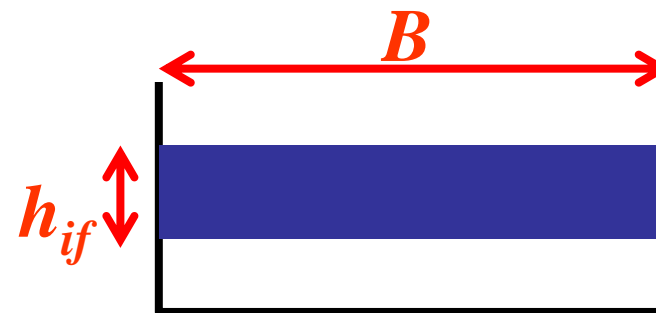
非発生:

氷板厚に対して川幅が広い場合



流水と氷板による破壊(片持梁)

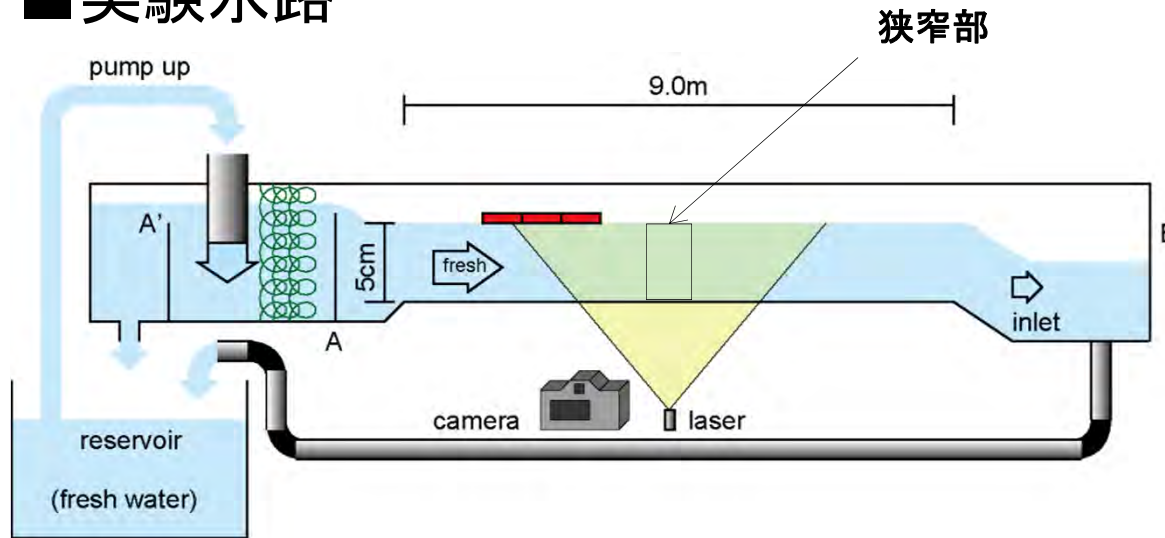
$$\sigma_{max} = 6\rho_w \left(\frac{u_w \sin \theta}{h_i k} \right)^2 \left| kL \frac{\sin kL}{\cos kL} + \frac{1}{\sin kL} - 1 \right|$$



$$IJ \geq \frac{B}{h_{if}} \Rightarrow u'_i = \lambda u_i$$

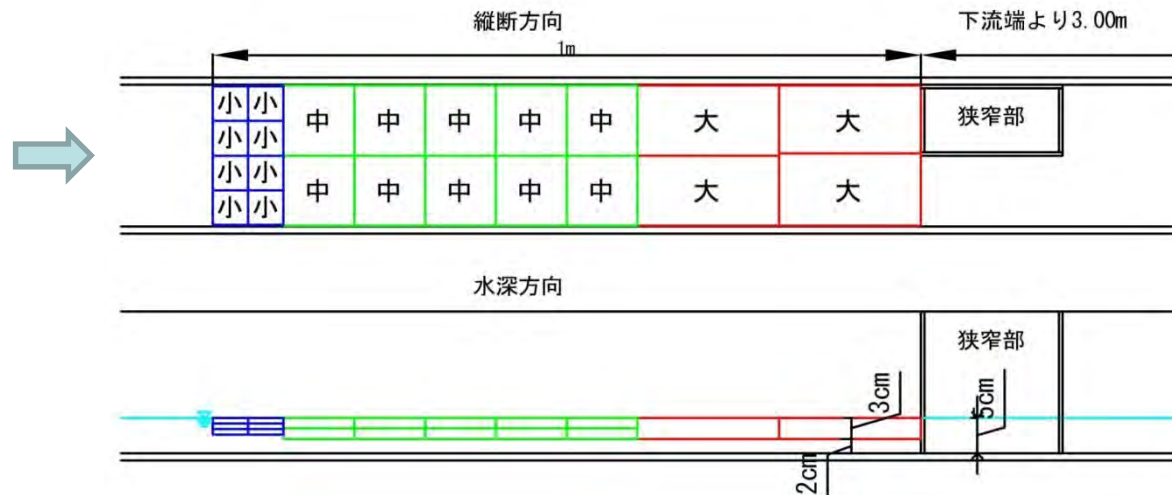
2. アイスジャムの水理実験

■ 実験水路



- ・氷は、本物の氷
- ・水路延長 9m
- ・水路幅 0.2m
- ・勾配 1/500
- ・鉛直縮尺 1/20
- ・水位計 3箇所
(下流から2m, 3.05m, 4mの位置)

■ 狭窄部(川幅が狭い箇所)



2. アイスジャムの水理実験

川幅が狭い箇所

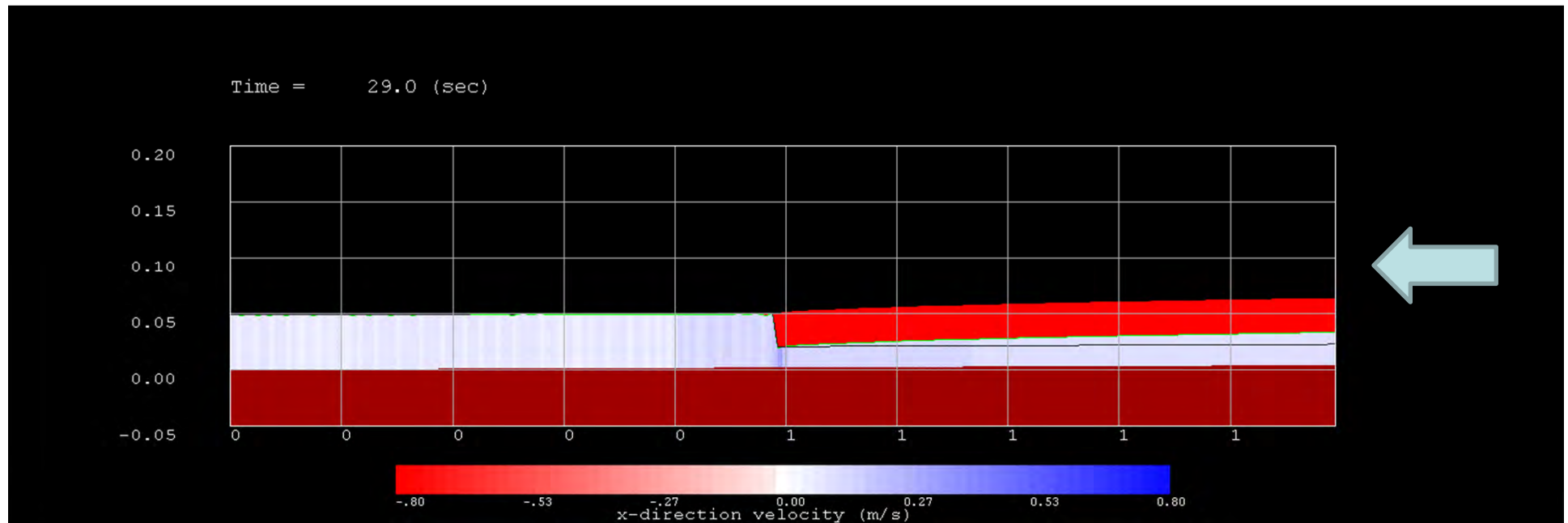


上流

下流

水位が急激に上昇すると、流水が河氷を乗り越えて、河氷が不安定になり、一気に流下しアイスジャムが発生

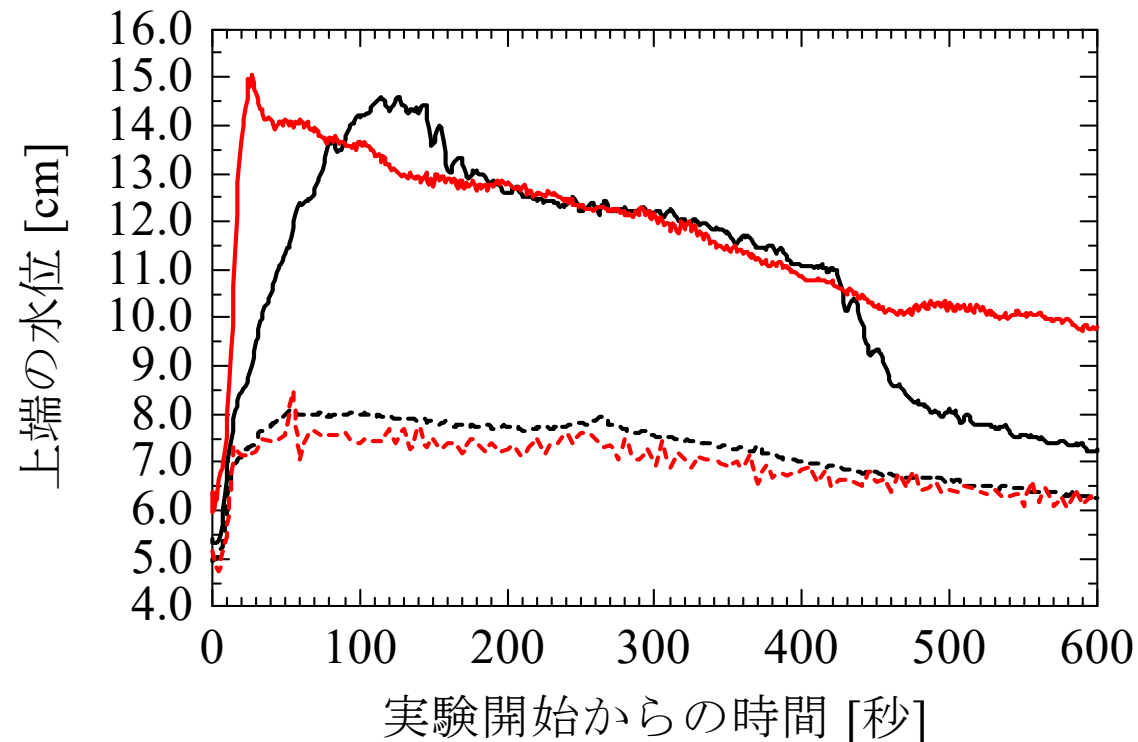
2. アイスジャムの水理実験の再現計算



本計算モデルは、アイスジャム実験を定性的に再現

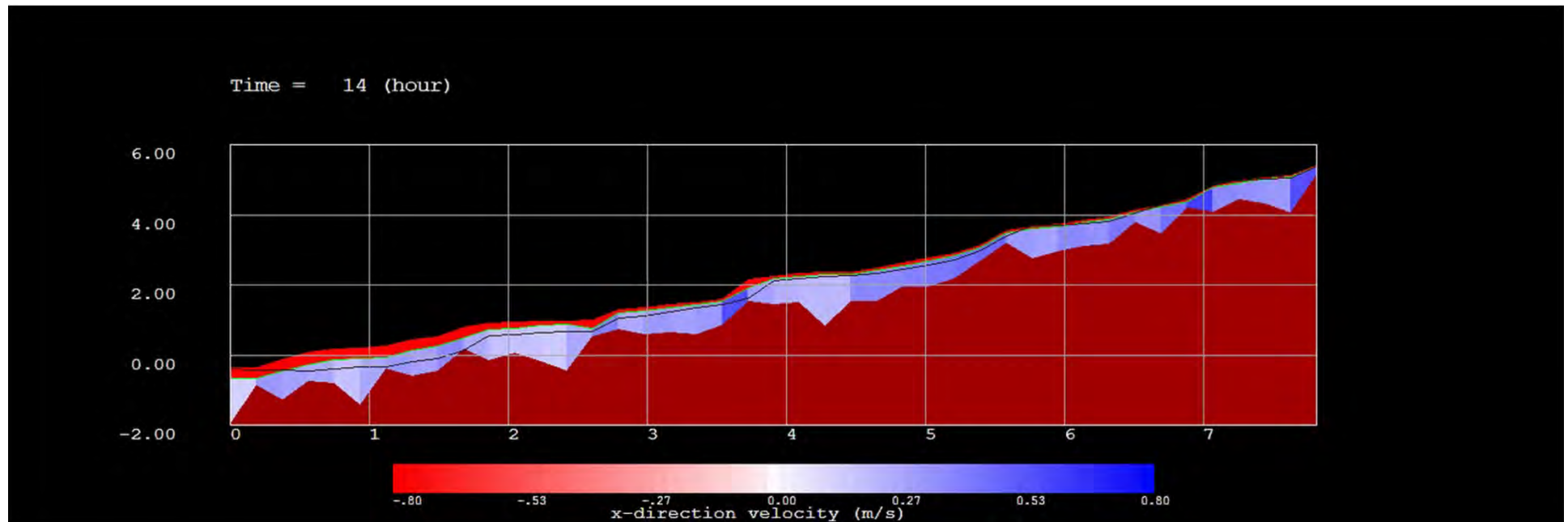
2. アイスジャムの実験値と計算値の比較

— : 実験値 (氷あり) , - - - : 実験値 (氷なし)
— : 計算値 (氷あり) , - - - : 計算値 (氷なし)



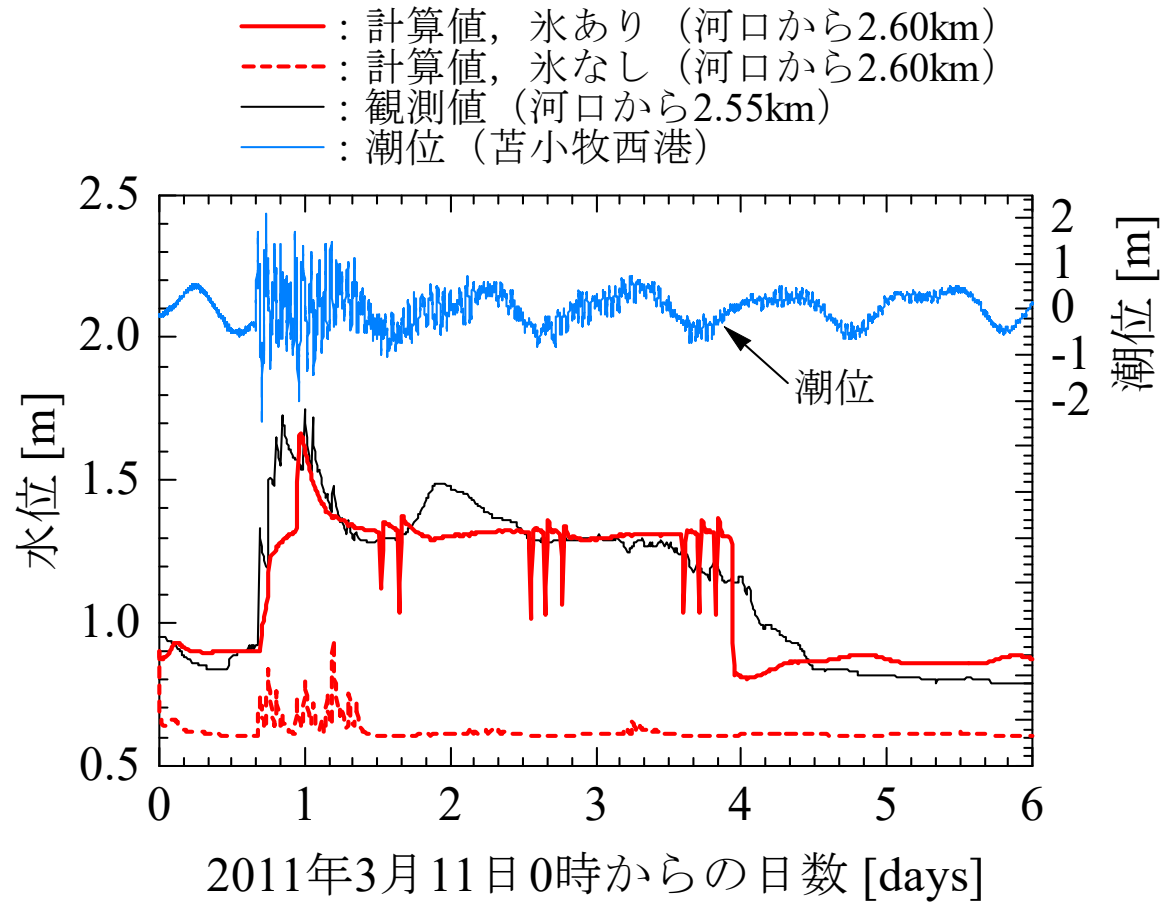
アイスジャム発生による水位上昇とその後の水位の減少について、
計算水位は、実験水位を良く再現している

3. 北海道鷓川のアイスジャム再現計算条件



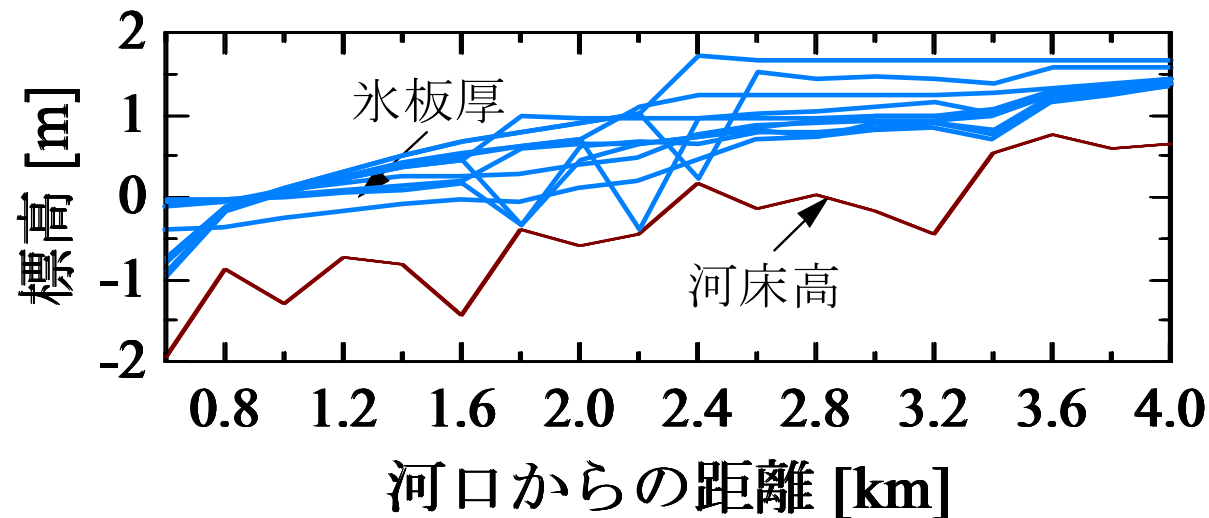
本計算モデルにより河川津波による氷板の破壊および堆積を再現

3. 北海道鷓川のアイスジャム再現計算条件



アイスジャム発生による水位上昇とその後の水位の減少について、
計算値は、観測値を良く再現している

3. 北海道鷓川のアイスジャム再現計算



- ・津波が河川を遡上する押し波時に、氷板は破壊されながら上流へと輸送
- ・氷板が下流へと流下する引き波時に、氷板は川幅が狭い河道に堆積
- ・河積が狭められアイスジャムが発生し、流れが止められ水位が上昇
- ・アイスジャム発生地点は、一箇所に留まらず、津波が河川を遡上するタイミングで下流から上流へと移動
- ・その後、氷板は流速および水温の影響により融解され下流へと移動

まとめ

- ・河氷変動計算モデルを構築し、実験値および観測値との比較から計算値の妥当性を確認した.
 - ・本計算モデルは、アイスジャム発生条件、氷板の許容応力を適切に与えることが重要であるとわかった.
 - ・河川津波に伴い発生した北海道鷗川のアイスジャムの水位変動の再現計算を行い、アイスジャムの発生箇所およびその挙動を明らかにした.
-

発表の流れ

1. 結氷河川の概要

2. 2011年3月11日河川津波によるアイスジャム

3. 河氷変動計算モデル(単一粒径)

4. 河氷変動計算モデル(混合粒径)

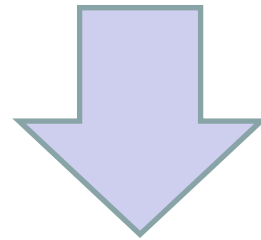
5. 簡易的なアイスジャム計算モデル

北海道河川における津波の河川遡上



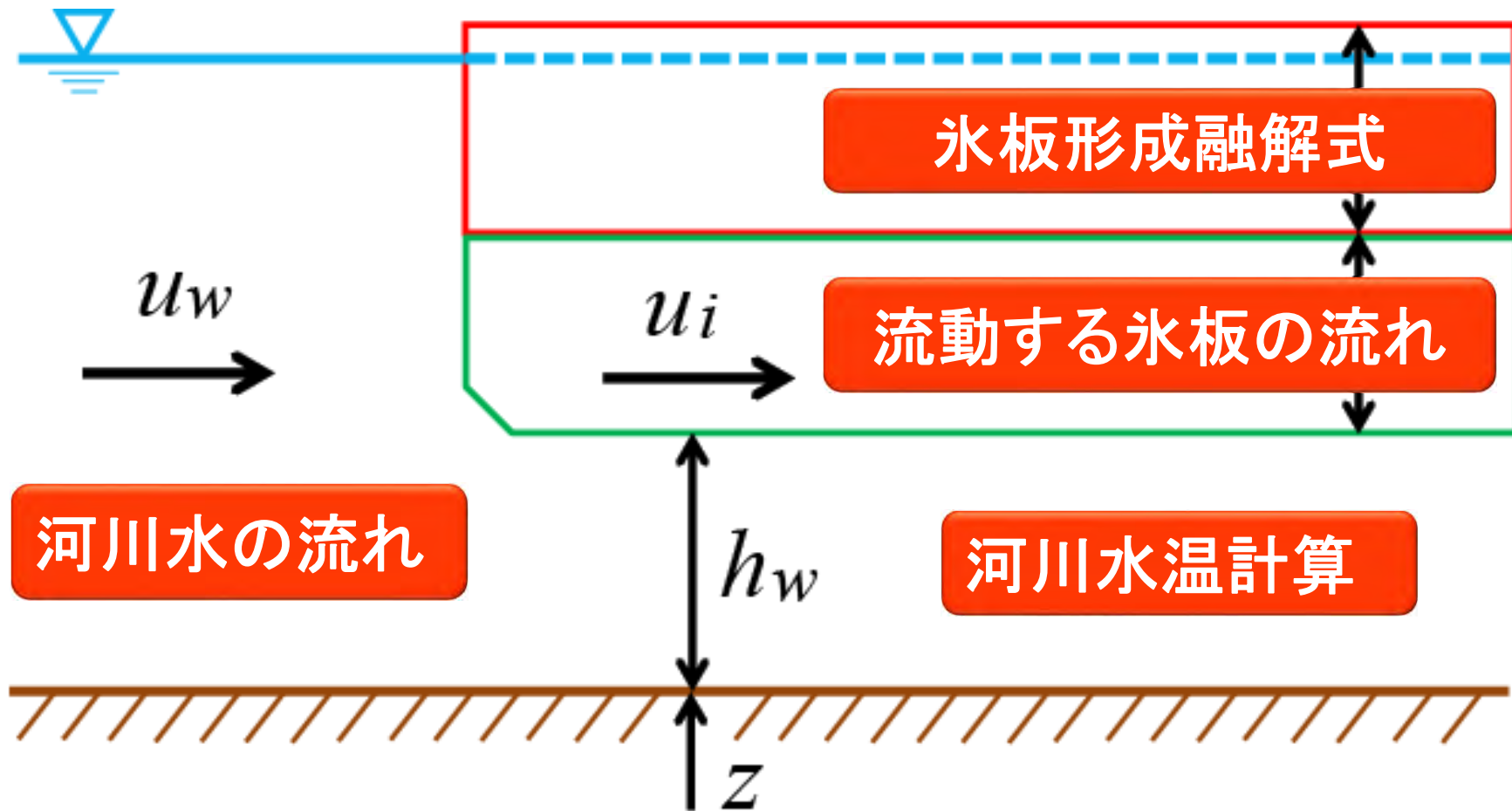
研究の目的と手法

様々なサイズの河氷が存在する状況下において、
川幅が狭窄部となる地点を対象とした
アイスジャム計算モデルの開発



1. 1次元河氷変動計算モデルの構築
 2. アイスジャムの水理実験
 3. 実験値と計算値の比較
-

1次元河氷変動計算モデル



1次元河氷変動計算モデル

河川水の流れ

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_{is}}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_{if}}{\partial t} = 0$$

固定した氷板に関する値

流動する氷板に関する値

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_w^2}{A_w} \right) + g A_w \frac{\partial}{\partial x} \left(z + h_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} (h_{is} + h_{if}) \right) \\ + \frac{g n_b^2 u_w |u_w| S_w}{R_w^{1/3}} + \frac{\rho_i g n_i^2 (u_w - u_i) |u_w - u_i| S_i}{R_i^{1/3}} \\ + g A_w I_{rw} = 0 \end{aligned}$$

I_{rw} : 氷板の形状抵抗項

流動する氷板の流れ

$$\frac{\partial A_{if}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{if}}{\partial x} - \frac{\partial A_{is}}{\partial t} - \frac{\partial A_{if}}{\partial t} = 0$$

固定した氷板に関する値

流動する氷板に関する値

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{if}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{if}^2}{A_{if}} \right) + g A_{if} \frac{\partial}{\partial x} (z + h_w + h_{is} + h_{if}) \\ - \frac{g n_i^2 (u_w - u_i) |u_w - u_i| S_i}{R_i^{1/3}} - g A_{if} I_{ri} + g A_{if} I_s = 0 \end{aligned}$$

I_{ri} : 河川水の形状抵抗項

I_s : 河床または固定した氷板との境界における抵抗項

1次元河氷変動計算モデル

氷板形成融解式

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2}\right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3}$$

T_a : 気温

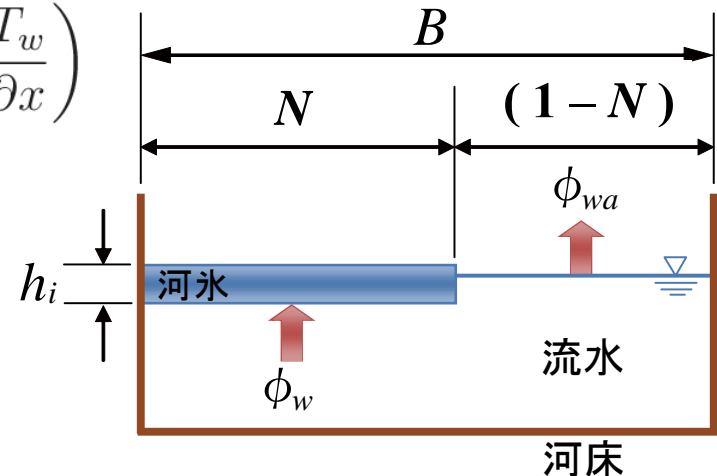
T_w : 水温

h_w : 有効水深

h_i : 氷板厚

河川水温計算

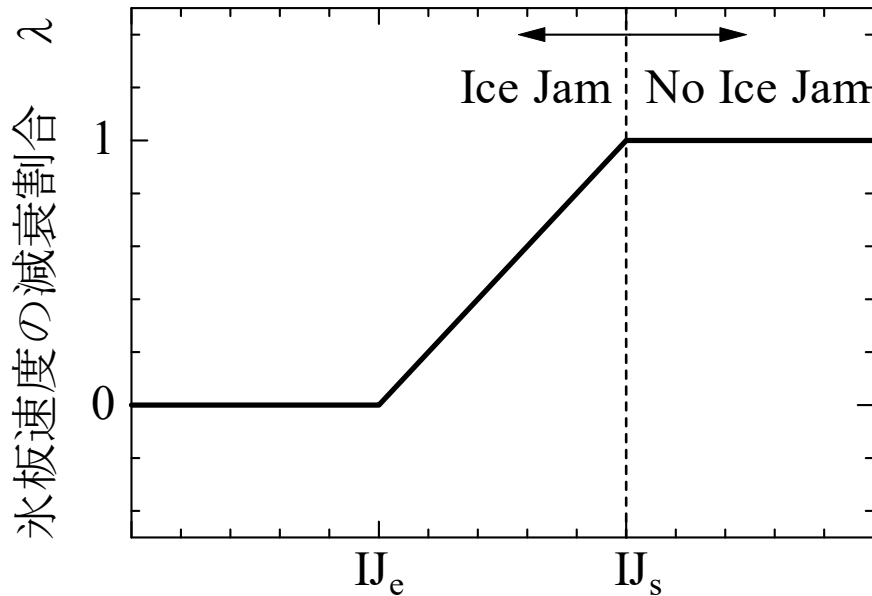
$$\frac{\partial (A_w \rho_w C_p T_w)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_w \rho_w C_p T_w)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_w E_x \rho_w C_p \frac{T_w}{\partial x} \right) - (1 - N) B \phi_{wa} - NB \phi_w$$



1次元河氷変動計算モデル

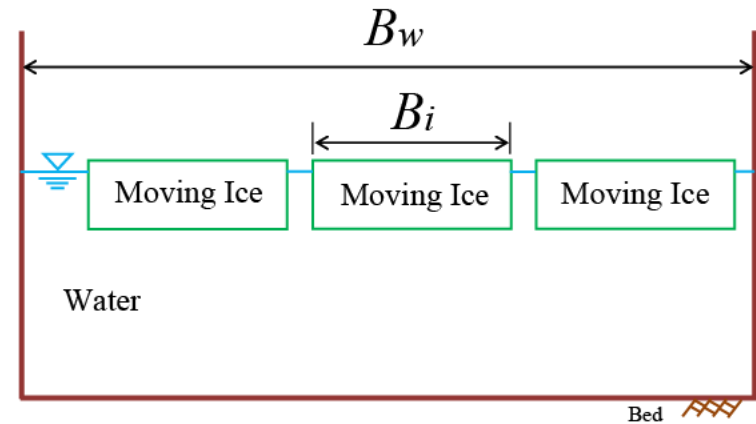
アイスジャム発生条件

$$\check{u}_i = \lambda u_i$$



川幅氷径比 $IJ = B_w / B_i$
(横断面に存在する代表氷板の個数)

$$\lambda = \frac{IJ - IJ_e}{IJ_s - IJ_e}$$



B_i: 断面内を代表する氷板の径

$$IJ = \frac{B_w}{B_i}$$

IJ: 代表氷板の個数

1次元河氷変動計算モデル

B_i : 断面内を代表する氷板の径

$$B_i = \sum_{k=1}^{n_k} B_k p_k \quad \sum_{k=1}^{n_k} p_k = 1$$

k : 氷板区分, B_k : 氷板区分 k の氷径 B_k

p_k : 氷板区分 k の面積が全氷板面積に占める割合

p_k は、流動する氷板が流出流入する場合と、

固定氷板が流動する場合を考慮して、次式より算出

$$\frac{\partial(A_{if} p_k)}{\partial t} = p_k^* \frac{\partial A_{if}}{\partial t}$$

p_k^* : 氷板区分 k の面積が流出流入した氷板面積に占める割合

アイスジャム発生時の実験値と計算値の比較

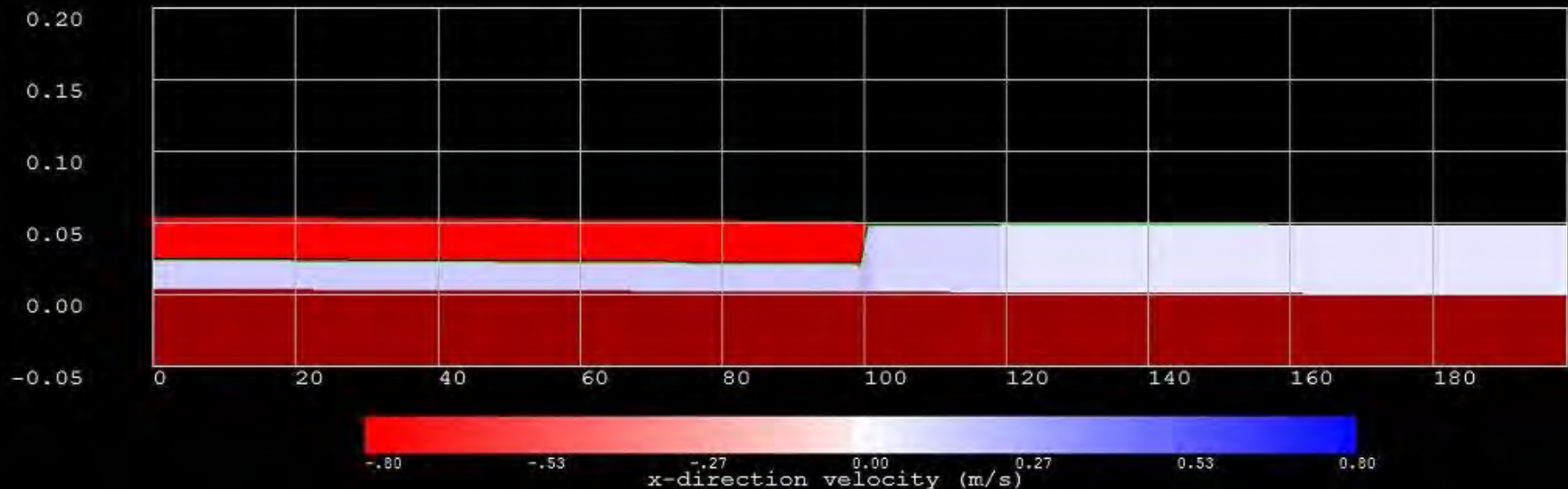
上流

狭窄部

下流

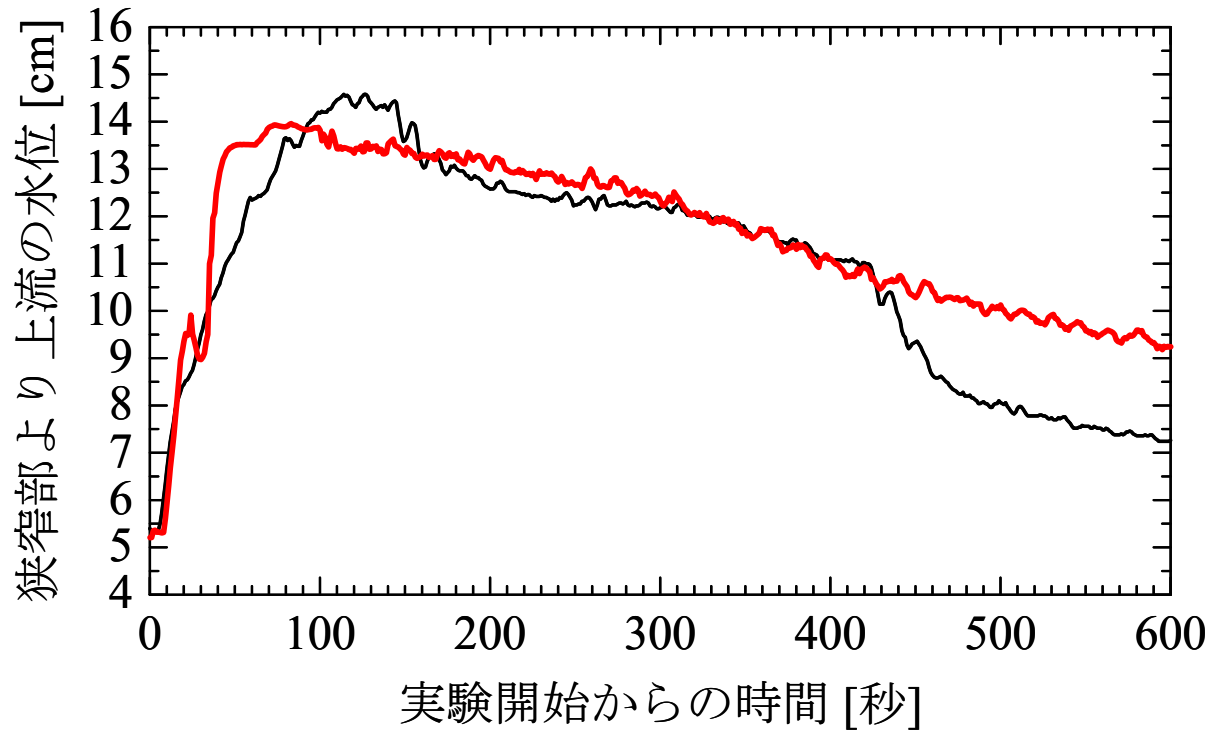


Time = 60.0 (sec)



アイスジャム発生時の実験値と計算値

— : 実験値 (氷あり), — : 計算値 (氷あり)



1次元混合氷径河氷変動計算モデルは、
アイスジャム発生による水位上昇とその後の水位の減少について、
計算水位は、実験水位を良く再現

まとめ

- ・様々な大きさの氷板が存在する状況下において、これらの氷板が狭窄部で堆積することによるアイスジャム現象を対象とした1次元混合氷径河氷変動計算モデルを開発した。
- ・実験と計算の水位の比較から、本計算モデルの計算結果の妥当性を確認。

課題

- ・他のアイスジャム現象（勾配が緩い地点、水深が氷板厚に対して浅い地点、下流に固定した氷板が存在する地点など）については、検討を進める必要がある。
 - ・河氷破壊時の河氷のサイズ分布について、研究を進める必要がある。
-

発表の流れ

1. 結氷河川の概要

2. 2011年3月11日河川津波によるアイスジャム

3. 河水変動計算モデル(単一粒径)

4. 河水変動計算モデル(混合粒径)

5. 簡易的なアイスジャム計算モデル

研究目的

研究背景

- ・気候変動の影響を評価可能な地球規模の数値計算モデルにおいて、アイスジャム現象は考慮されていないという課題がある。
- ・地球規模の計算モデルに組み込み易くするためには、現象を再現する範囲で基礎式を簡易にすることが望ましいが、現在、そのような簡易的なアイスジャム計算モデルは構築されていない。

研究目的

- ・地球規模の計算モデルに取り込み可能な計算負荷の小さい簡易的なアイスジャム計算モデルの構築
 - ・現地観測データに基づいて実河川で発生したアイスジャム現象の再現を試みることにより、本計算モデルの評価と課題を明らかにする
-

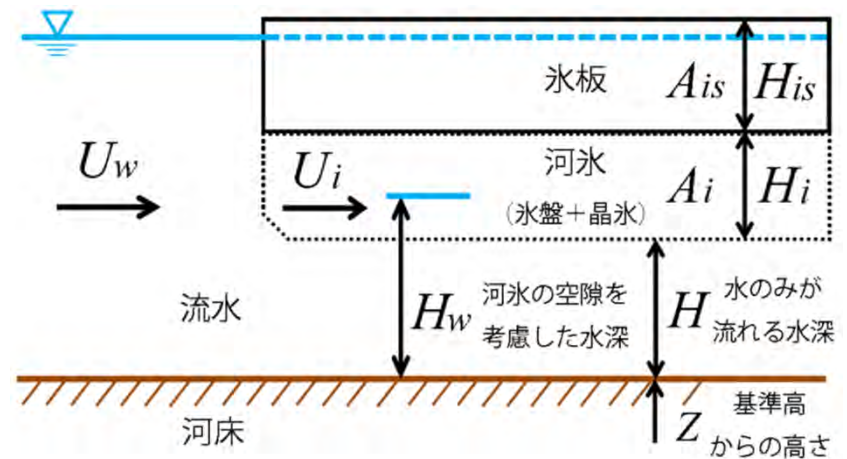
簡易的なアイスジャム計算モデルの構築

河川水の流れ

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} = \lambda_i \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_i}{\partial t}$$

$$Q_w = A_w U_w \quad U_w = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

$$H_z = Z + H_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} ((1 - \lambda_i) H_i + H_{is})$$



河氷の流れ

$$(1 - \lambda_i) \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = 0$$

$$Q_i = A_i U_i \quad U_i = U_w - \sqrt{\frac{\frac{B_i}{B_d} \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}}$$

簡易的なアイスジャム計算モデルの構築

氷板厚の形成融解

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2}\right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3}$$

Ta: 気温

Tw: 水温

hw: 有効水深

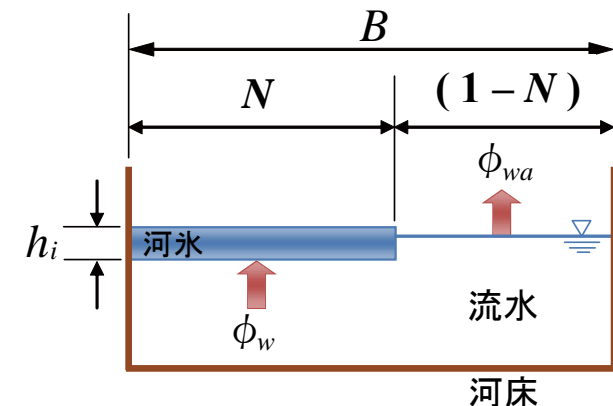
hi: 氷板厚

河川水温

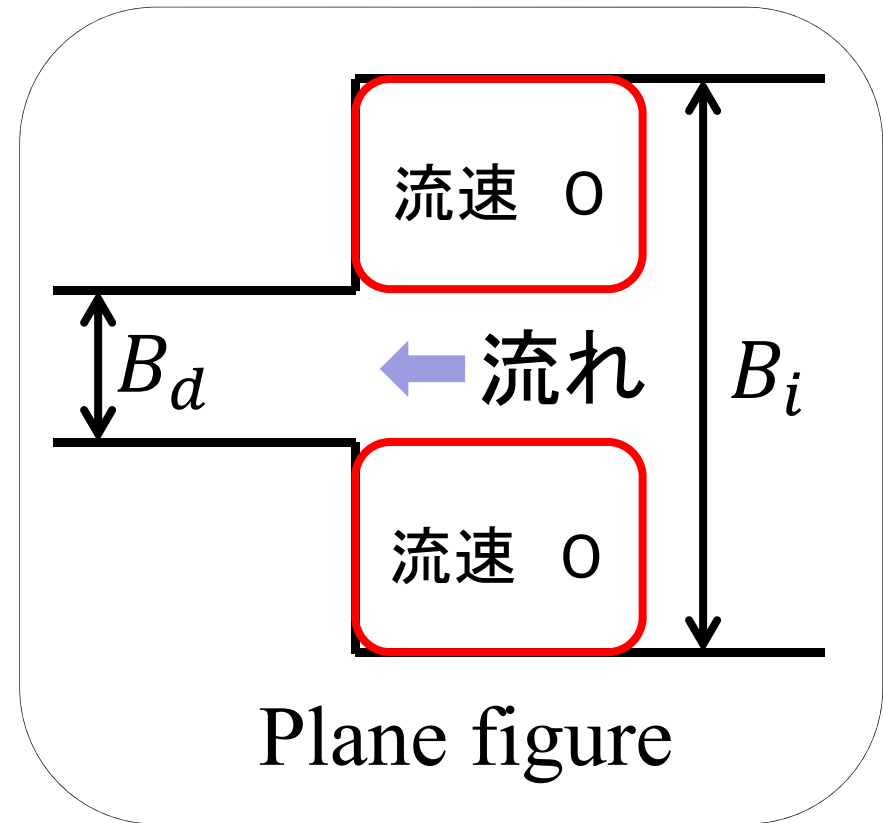
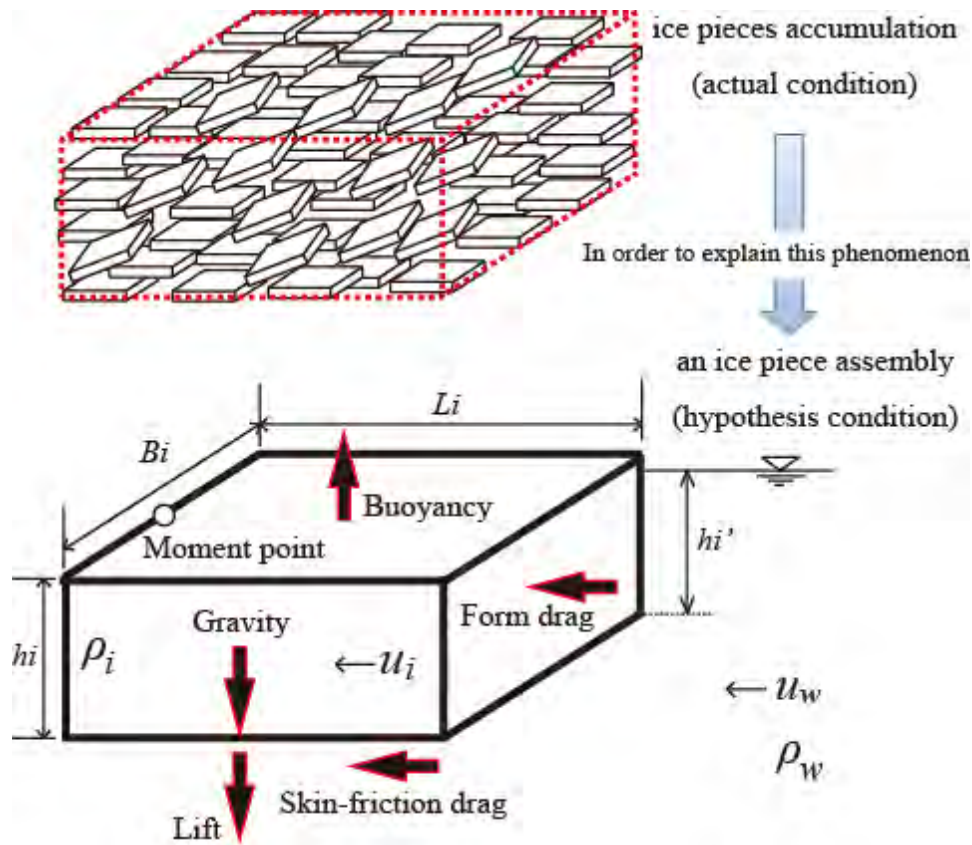
$$\rho_w C_p \frac{\partial (A_w T_w)}{\partial t} + \rho_w C_p \frac{\partial (Q_w T_w)}{\partial x} = -(1 - N) B \phi_{wa} - N B \phi_w$$

$$\phi_{wa} = h_{wa} (\hat{T}_w - T_a)$$

$$\phi_w = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{H^{0.2}} (\hat{T}_w - T_f)$$



アイスジャム時に氷塊に作用する力



$$0 = \rho_i g B_i L_i h_i \frac{L_i}{2} - \rho_w g B_i L_i h_i' \frac{L_i}{2} + \frac{1}{2} \rho_w C_D B_d h_i' (u_w - u_i)^2 \left(h_i - \frac{h_i'}{2} \right)$$

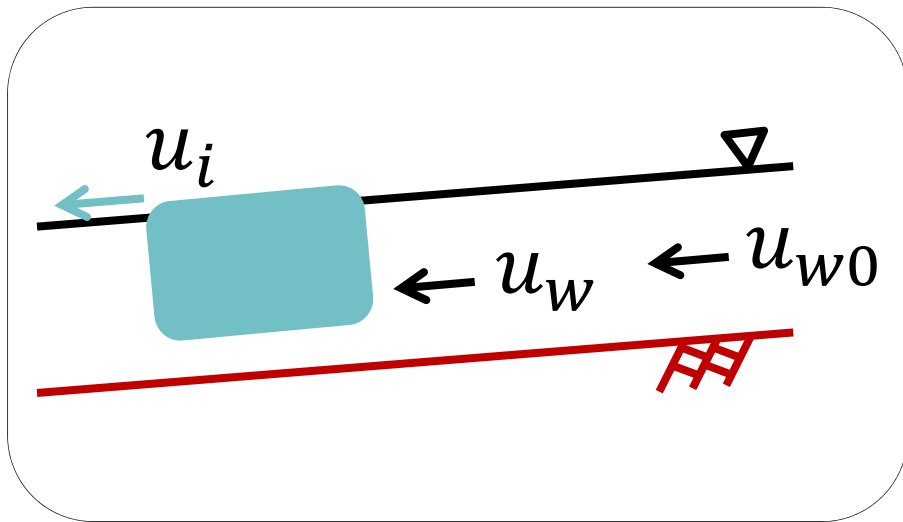
$$+ \frac{1}{2} \rho_w C_f B_d L_i (u_w - u_i)^2 h_i + \frac{1}{2} \rho_w C_L B_d L_i (u_w - u_i)^2 \frac{L_i}{2}$$

アイスジャム時に氷塊に作用する力

$$\frac{u_i}{u_w} = \frac{1}{1 + S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{F_{ri} \sqrt{\frac{B_d}{B_i} \sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{h_i}{L_i}\right)^2 + C_f \left(\frac{h_i}{L_i}\right) + \frac{C_L}{2}}}}$$

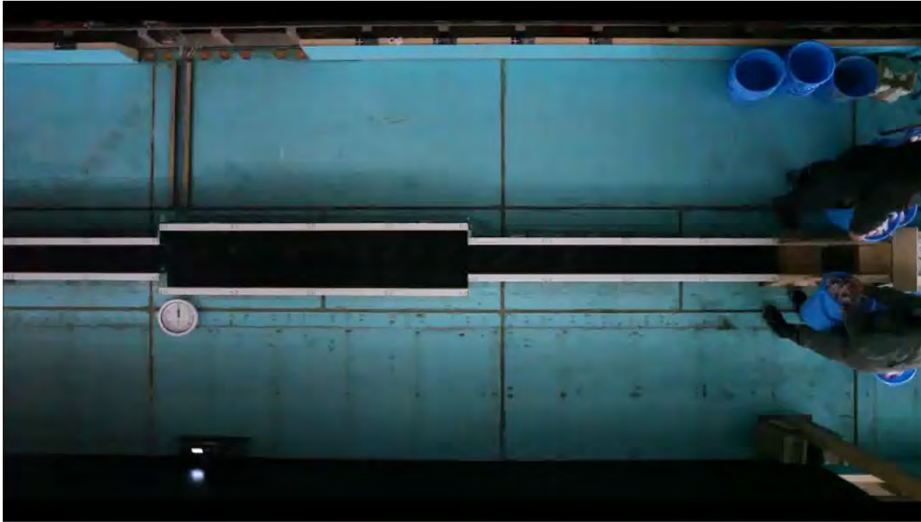
$$F_{ri} = \frac{u_i}{\sqrt{\Delta \epsilon g h_i}}$$



$u_w = u_{w0}$ と仮定する

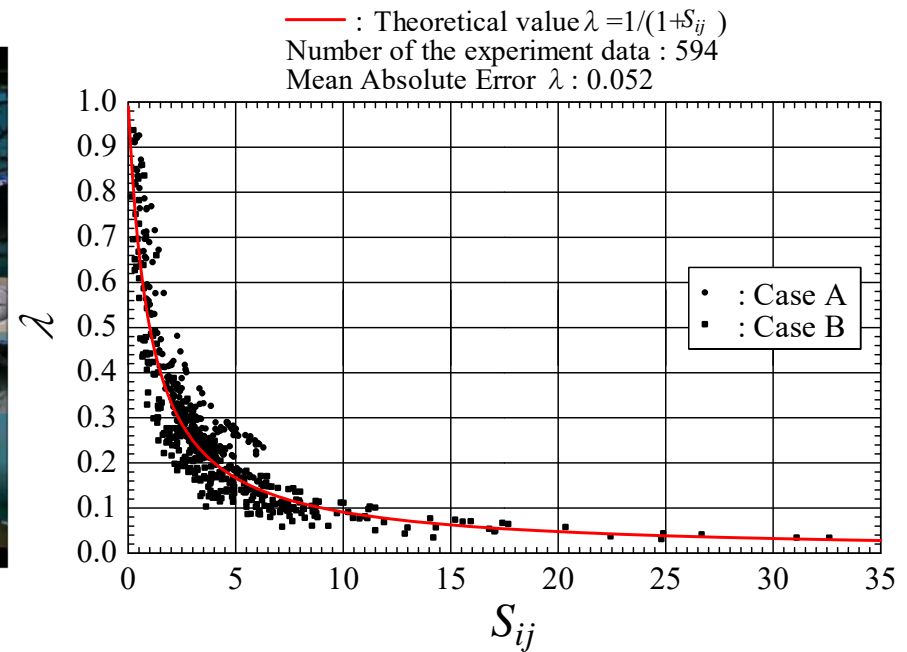
$$\frac{u_i}{u_w} = \frac{u_i}{u_{w0}} = \lambda = \frac{1}{1 + S_{ij}}$$

S_{ij} と λ の関係



実験

$Q_w=4.2$, $Q_i=0.6$, $8\text{cm} \times 8\text{cm}$



アイスジャムの発生規模を表す λ は、
アイスジャムスケール S_{ij} で表現できる

アイスジャム時の河氷の速度

$$\frac{u_i}{u_w} = \frac{1}{1 + S_{ij}}$$

この式を展開すると

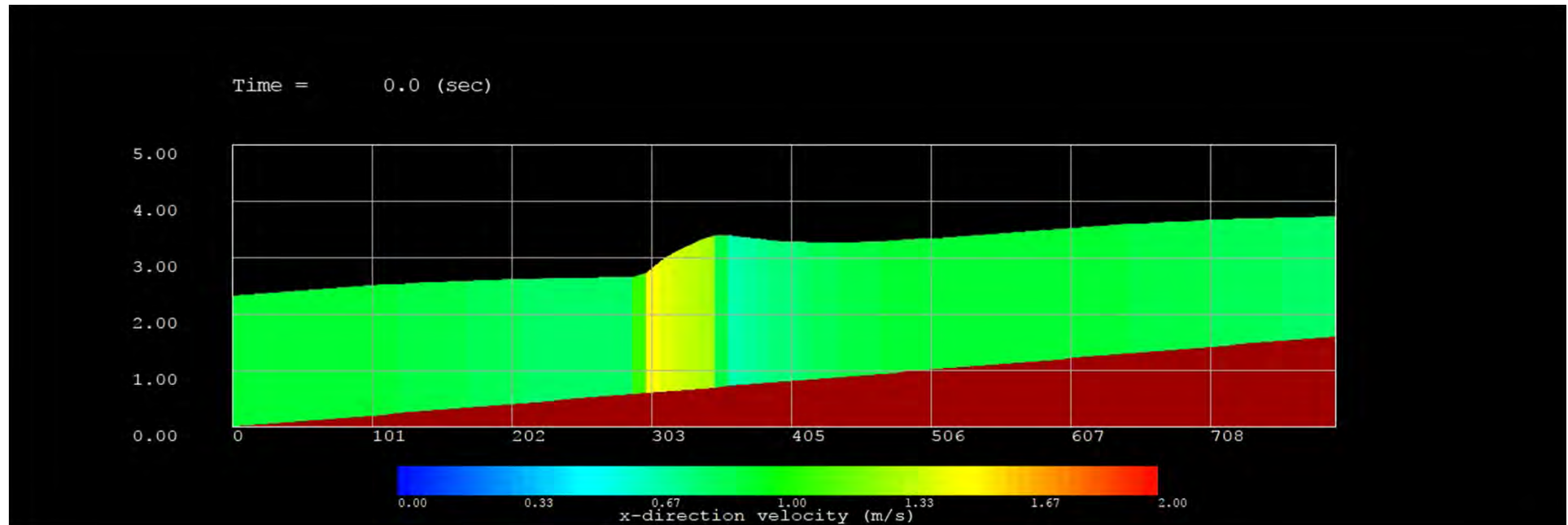
$$u_i = u_w - \sqrt{\frac{\frac{B_i}{B_d} \Delta \epsilon g h_i}{\frac{C_D}{2} \left(\frac{h_i}{L_i}\right)^2 + C_f \left(\frac{h_i}{L_i}\right) + \frac{C_L}{2}}}$$

河氷の速度は、流速と氷のサイズから計算できる

u_i の平均絶対誤差は、6 cm/s

この式から、アイスジャム発生条件は、遅い流速、狭い川幅、大きい河氷が条件であることが分かる

簡易的なアイスジャム計算モデルの数値実験



数値実験

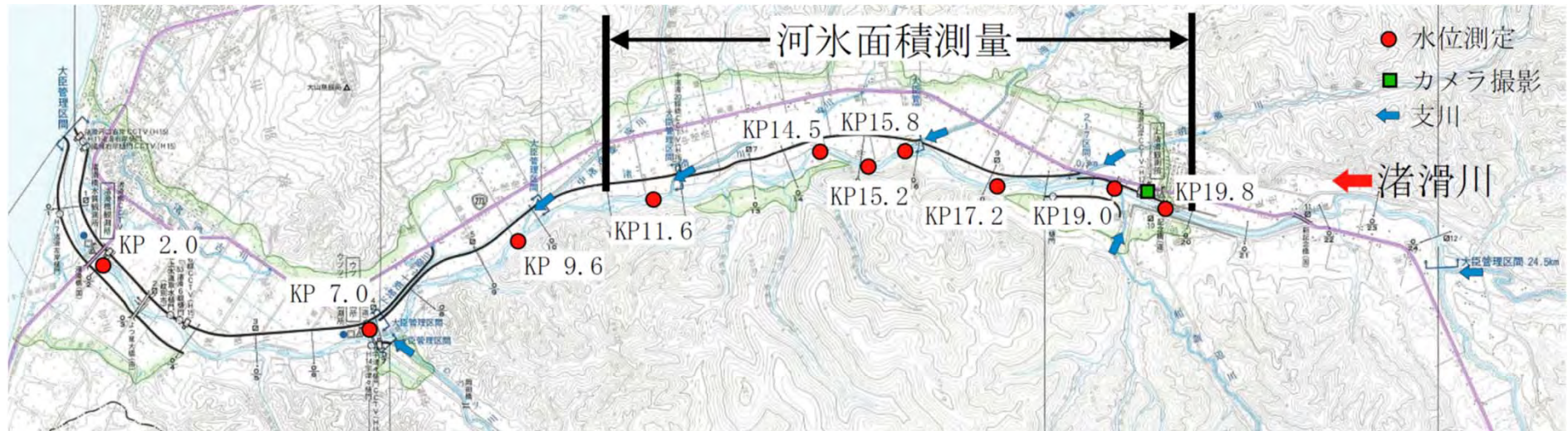
$L=800\text{m}$, $B=180\text{m}$, $I_b=1/500$, $n=0.03$, $B_n=90\text{m}$, $H=0.4673\text{m}$

$Q_w=60\text{m}^3/\text{s}$, $H_i=0.2\text{m}$, 450sec



2010年2月,
北海道東部の渚滑川での観測

- ・水位測定
- ・カメラ撮影
- ・河水面積測量

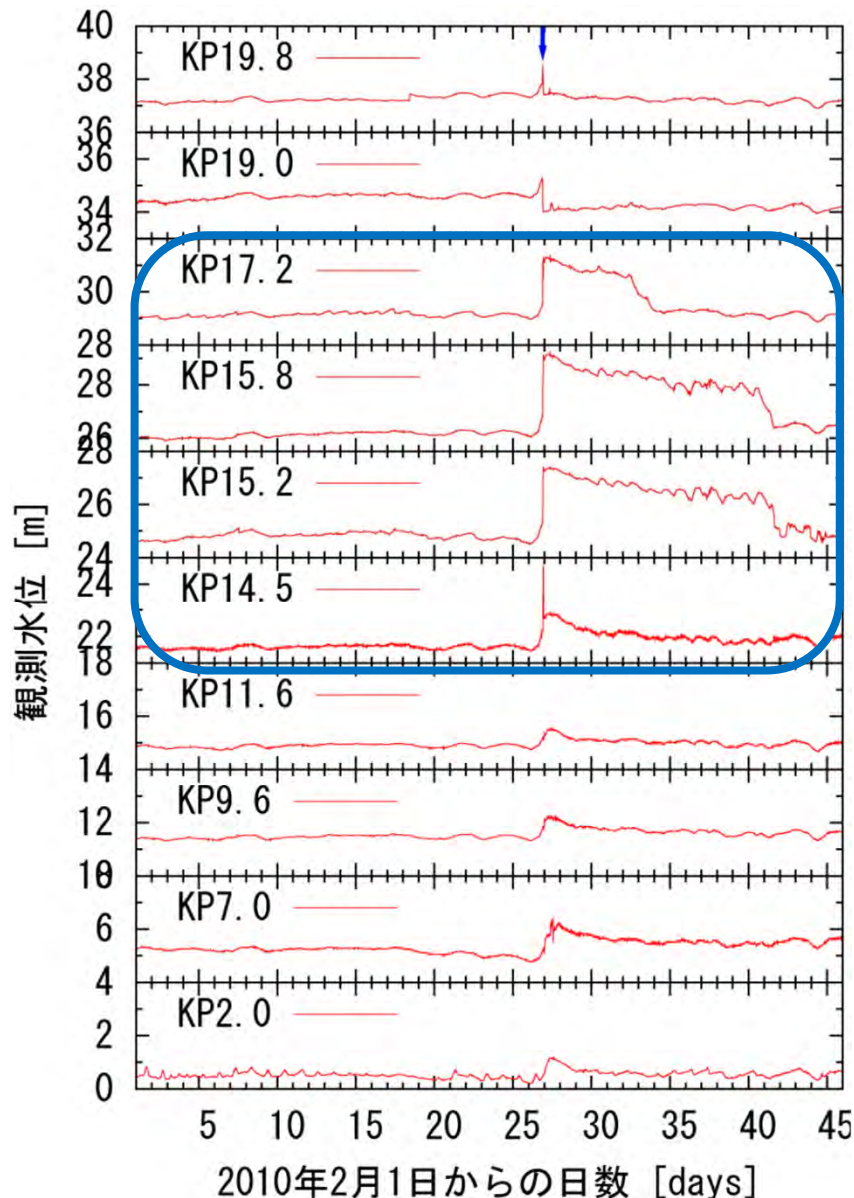




河水推定高
3m

樹木の損傷

アイスジャム発生前後の河川縦断水位



KP19.8: 水位が急激に上昇し、その後、下降

KP19.0: 水位が急激に上昇し、その後、下降

KP17.2: 水位は約2.4M, 急激に上昇

KP15.8: 水位は約3.1M, 急激に上昇

KP15.2: 水位は約2.9M, 急激に上昇

KP14.5: 水位は約3.2M, 急激に上昇

その後、直ぐに水位が下降

KP11.6, KP9.6, KP7.0, KP2.0:

水位は上昇するが、上流の地点ほど

水位は急激に上昇しない

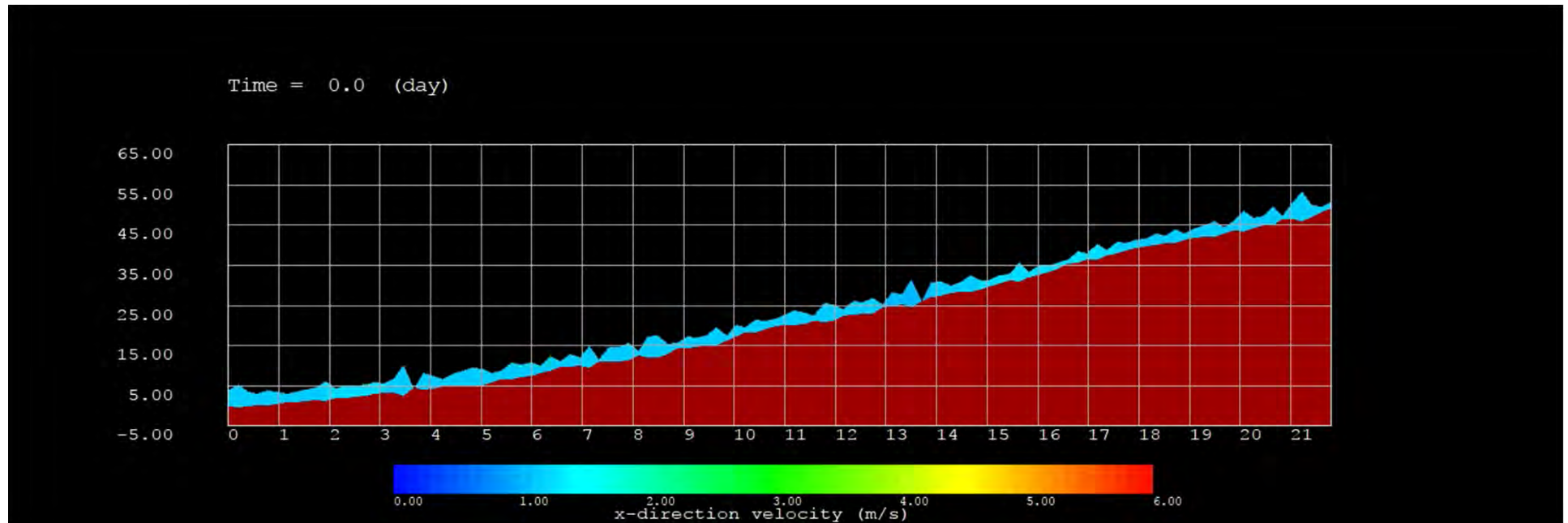
→

現地観測によって、

アイスジャム発生前後の河川縦断水位の

時間的、場所的な挙動を明らかにした

簡易的なアイスジャム計算モデルの計算結果



計算区間: 河口より2km地点から24.6km地点の22.6km

水深を5倍にして表示

期間期間: 2009年12月1日13:00から2010年3月21日13:00の110日間

断面間隔: $\Delta x=200\text{m}$, 時間間隔 Δt : クーラン数0.1

河道条件は河床高と川幅を与えた。

2007年11月の測量データを用いて不等流計算を行い, 川幅と流積を求め, この流積を川幅で割った平均水深と水位から平均河床高を算出. 流量は濁水流量を与えた. 初期条件として, 不等流計算により算出した水深を与えた.

境界条件として, 上流端で流量と河氷厚を与え, 下流端で水位を与えた. 流量と水位は観測値を与えた.

河氷厚は, 解氷時のカメラ撮影の結果から得られた上流からの河氷の流下期間において,

アイスジャム発生後の河氷厚の現地観測の平均的な値である30cmを与えた.

水温は, 上流端および支川流入後の観測データを与えた. 気温は, 河口から19.8km地点の観測データを与えた.

簡易的なアイスジャム計算モデルの計算結果

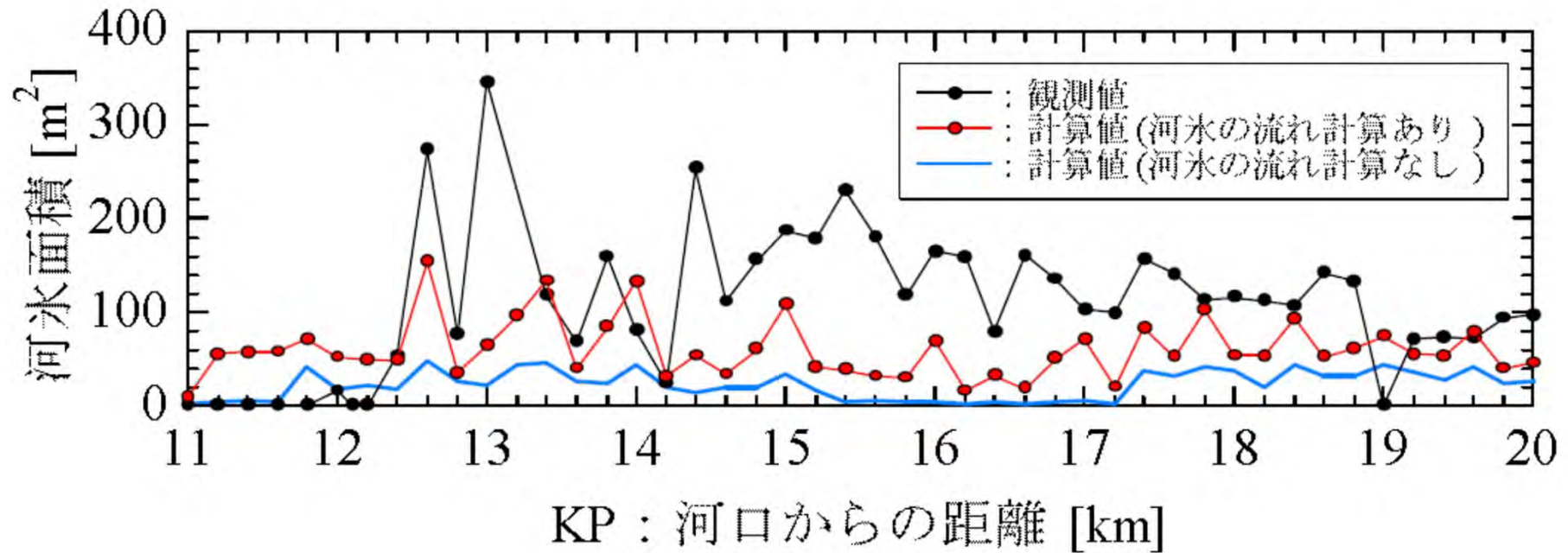


図-9 アイスジャム発生区間の河氷面積の観測値と計算値

簡易的なアイスジャム計算モデルの計算結果

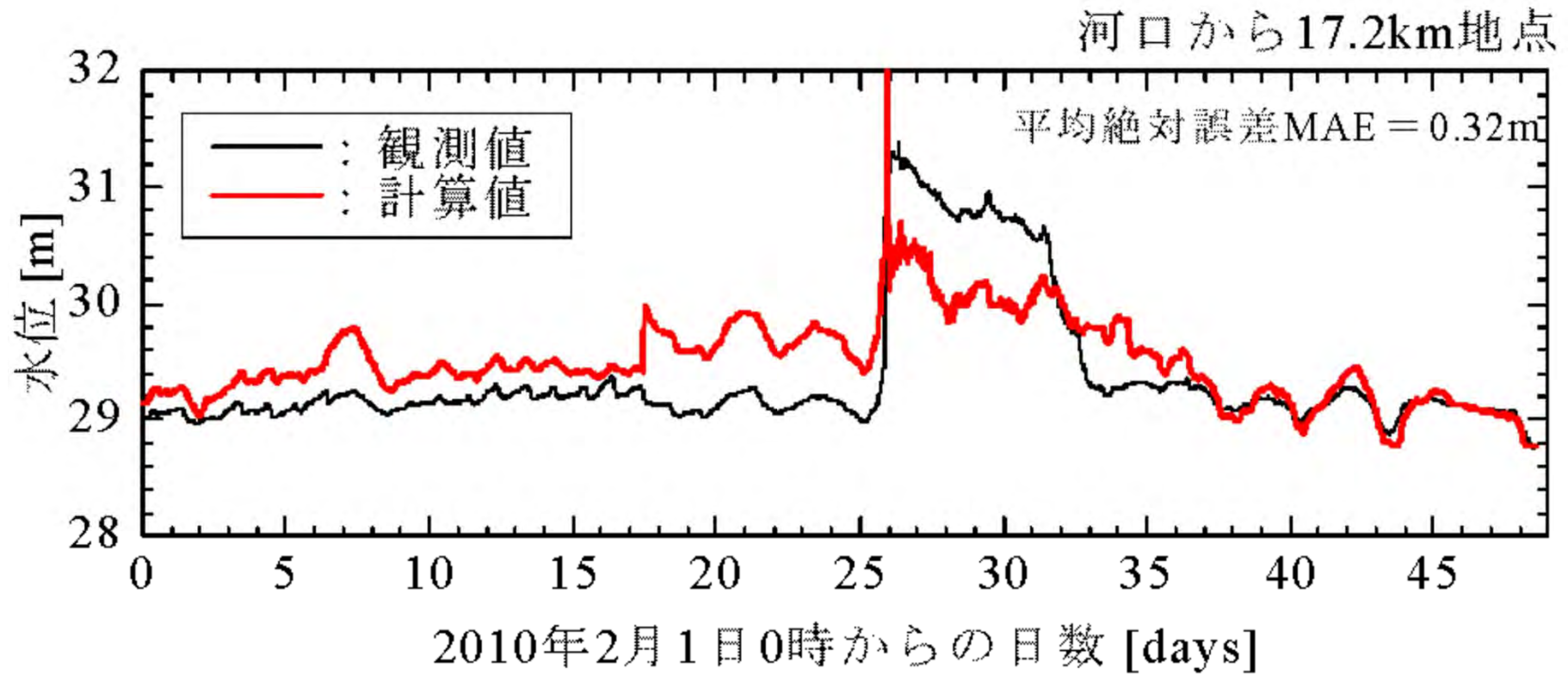


図-10 水位の観測値と計算値 (KP17.2)

簡易的なアイスジャム計算モデルの計算結果

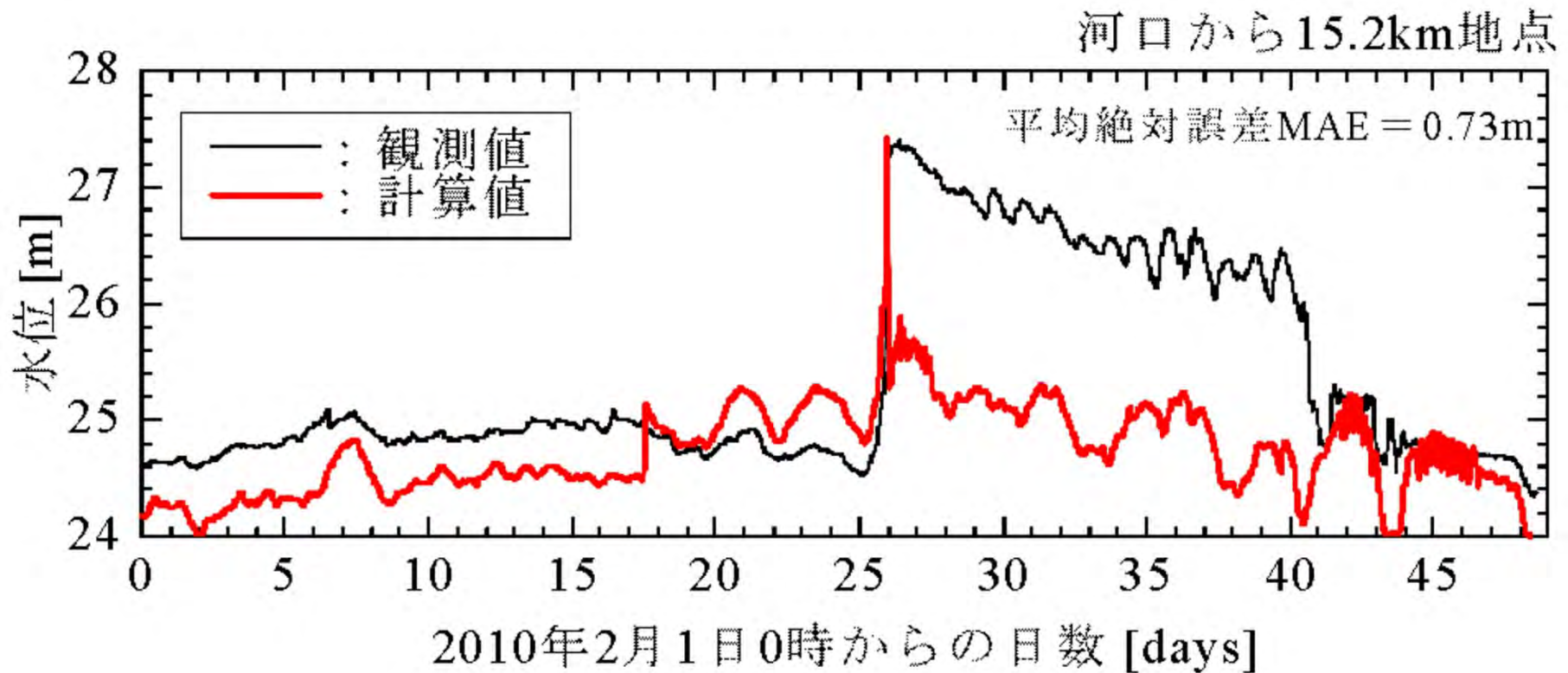


図-11 水位の観測値と計算値 (KP15.2)

簡易的なアイスジャム計算モデルの計算結果

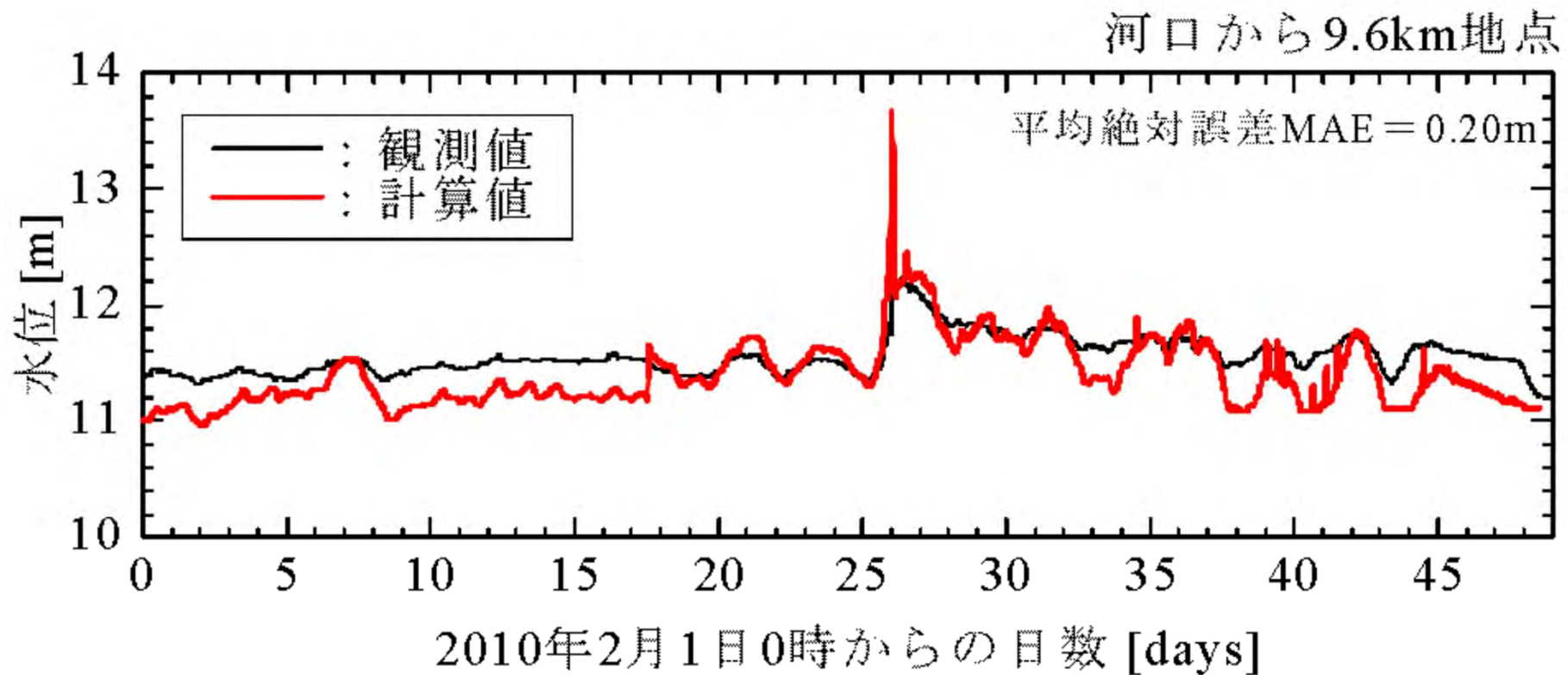


図-12 水位の観測値と計算値 (KP9.6)

まとめ

本計算モデルは、簡易な基礎式を基にしているが河氷の流下堆積現象を表現可能である。

河氷面積が実際よりも小さく計算される地点においては水位の再現性が低い。河氷面積が小さく計算される原因として河氷の破壊を考慮していないことが考えられる。

本計算モデルにおける重要なパラメーターとして、 L_i , B_i が考えられる。

本研究では、河氷の集合体を1つの氷塊として扱うことにより基礎式の簡易化を図っている。

言い換えれば、対象物を河氷だけに限定しておらず、河川水面を漂流する物体を計算対象として捉えれば、本計算モデルを他の河川内の漂流物に適用できる可能性がある。

結氷河川における河氷変動現象の整理

形成: 気温低下, 水温低下, 流速の遅い地点から凍る. 降雪等により河道内に氷を供給.

破壊・融解: 流量増加, 気温上昇, 河氷厚減少

流下・破壊: 流水により下流へと流下, 下流の河氷を破壊

堆積(アイスジャム): 狭窄部, 橋脚部, 蛇行部, 緩勾配地点, 下流結氷地点等で堆積, 水位の急激な上昇

破壊: 堆積したアイスジャムが, 水位差が大きくなることにより破壊

流下: 流水により下流へと流下
