

iRICによる結氷河川の 2次元水温・氷厚計算モデル

(株) 開発工営社 水工事業本部 水工第一部
濱木 道大



1

目次

2

1. はじめに
2. モデルの改良
 1. 第1段階：水温の移流拡散・氷板の形成
 2. 第2段階：河氷による流れへの影響、河氷の移流
3. 動作確認
 1. 水温移流の確認
 2. 水温拡散の確認
 3. 結氷の確認（氷板：水位上昇、形成、融解）
 4. 河氷移流の確認
 5. 実河川での再現計算
4. 今後の取組
 1. 各種境界条件の調整
 2. モデルの改良
 3. 水理模型実験（アイスジャム）の再現計算



2

はじめに

3

◆iRICと私

- ✓平成18年：RIC北海道河川財団（当時：北海道河川防災研究センター）に出向河川数値計算プリポストシステム「Nays」
- ✓平成21年～：Nays2Dの合流点对応、入出力修正など
- ✓平成23年～：Nays2DFlood関連
- ✓平成24年～：CERI1D関連
※主に入出力関連の改良、マニュアル、チュートリアル作成などを担当

◆河氷と私

- ✓北見工大吉川先生の河氷変動モデル（1次元）をiRICに移植→CERI1D
- ✓Nays2DHを基本とし、CERI1Dの河氷変動モデルを平面2次元化



3

目次

4

1. はじめに

2. モデルの改良

1. 第1段階：水温の移流拡散・氷板の形成
2. 第2段階：河氷による流れへの影響、河氷の移流

3. 動作確認

1. 水温移流の確認
2. 水温拡散の確認
3. 結氷の確認（氷板：水位上昇、形成、融解）
4. 河氷移流の確認
5. 実河川での再現計算

4. 今後の取組

1. モデルの改良
2. 各種境界条件の調整
3. 水理模型実験（アイスジャム）の再現計算



4

平面2次元河氷モデルの開発にむけて

5

Nays2DHを基本とし、河氷変動モデルはCERI1Dを参考にする。
 氷板の形成融解式、水温移流拡散方程式をNays2DHに組み込む。
 天塩川における既往の1次元河氷変動解析結果を参考に再現性の確認を行う。

第1段階

氷板の形成融解式
 ※河氷厚予測簡易
 モデル

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

$$\alpha = 0.906 - 2.770 \frac{I_b B}{H}$$

$$\beta = \frac{U_w}{H^{2/3}}$$

水温移流拡散方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho_w C_p T_w h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^{\xi} \rho_w C_p T_w h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^{\eta} \rho_w C_p T_w h}{J} \right) = D_w + \frac{-(1-N)\phi_{wa} - N\phi_w}{J}$$

$$D_w \approx \frac{\partial}{\partial \xi} \left(E_x \xi^2 \frac{\rho_w C_p T_w h}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(E_x \eta^2 \frac{\rho_w C_p T_w h}{\partial \eta} \right)$$

$$\phi_{wa} = h_{wa} (T_w' - T_a)$$

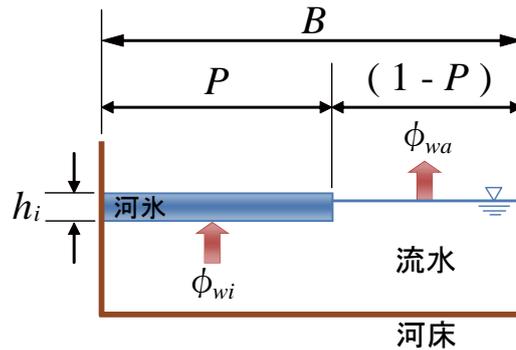
$$\phi_w = C_{wi} \frac{u_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} (T_w' - T_f)$$



5

1次元水温計算モデル

6



$$\frac{\partial (A \rho_w C_p T_w)}{\partial t} + \frac{\partial (Q \rho_w C_p T_w)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A E_x \rho_w C_p \frac{T_w}{\partial x} \right) - (1-P) B \phi_{wa} - P B \phi_{wi}$$

吉川泰弘ほか、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.



6

平面2次元河氷モデルの開発にむけて

7

河氷による流れへの影響、河氷の移流をNays2DHに組み込む。
天塩川における既往の1次元河氷変動解析結果を参考に再現性の確認を行う。
直線水路における実氷を用いた水理模型実験を参考に再現性の確認を行う。

第2段階

河氷による
流れへの影響

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = \lambda_i \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial H_i}{\partial t}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x - \frac{F_x}{\rho}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y - \frac{F_y}{\rho}$$

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

河氷の移流

$$(1 - \lambda_i) \frac{\partial H_i}{\partial t} + \frac{\partial(H_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(H_i v_i)}{\partial y} = 0$$

$$u_i = u - \frac{\frac{B_i}{B_d} \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}{\sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}}$$

$$v_i = v - \frac{\frac{B_i}{B_d} \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}{\sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}}$$

7

簡易的な1水河氷変動計算モデルの構築

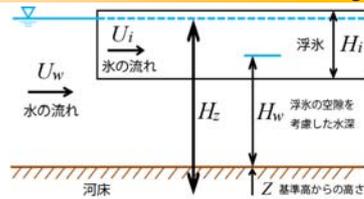
8

河川水の流れ

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

$$\frac{\partial Q_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_w^2}{A_w} \right) + g A_w \frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{g n^2 U_w^2 S}{R^{1/3}} = 0$$

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



河氷の流れ

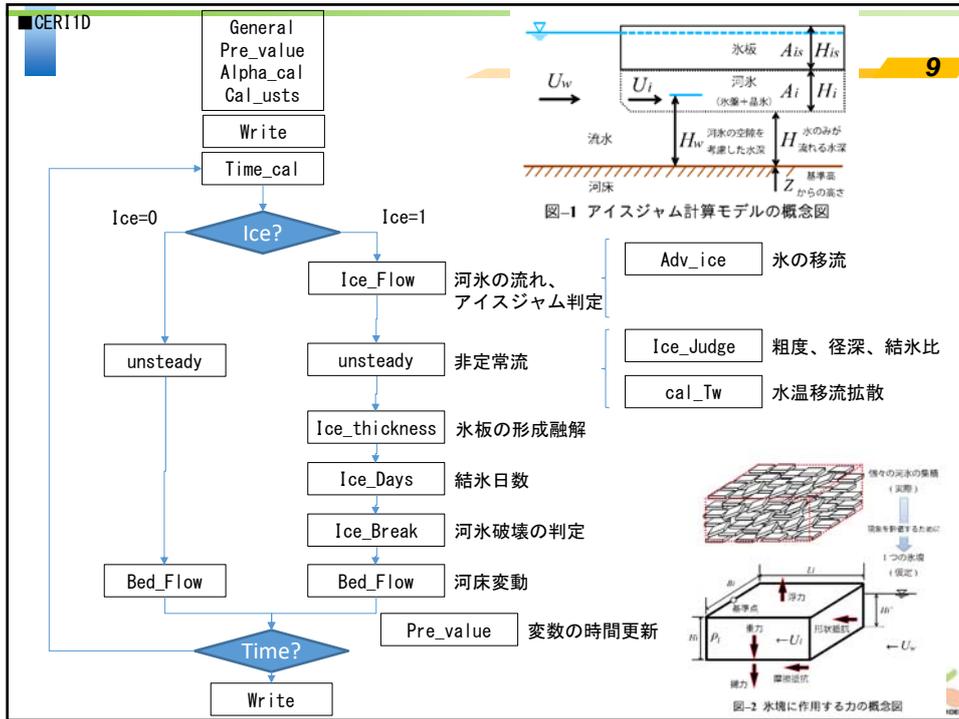
$$(1 - \lambda_i) \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = 0$$

$$Q_i = A_i U_i$$

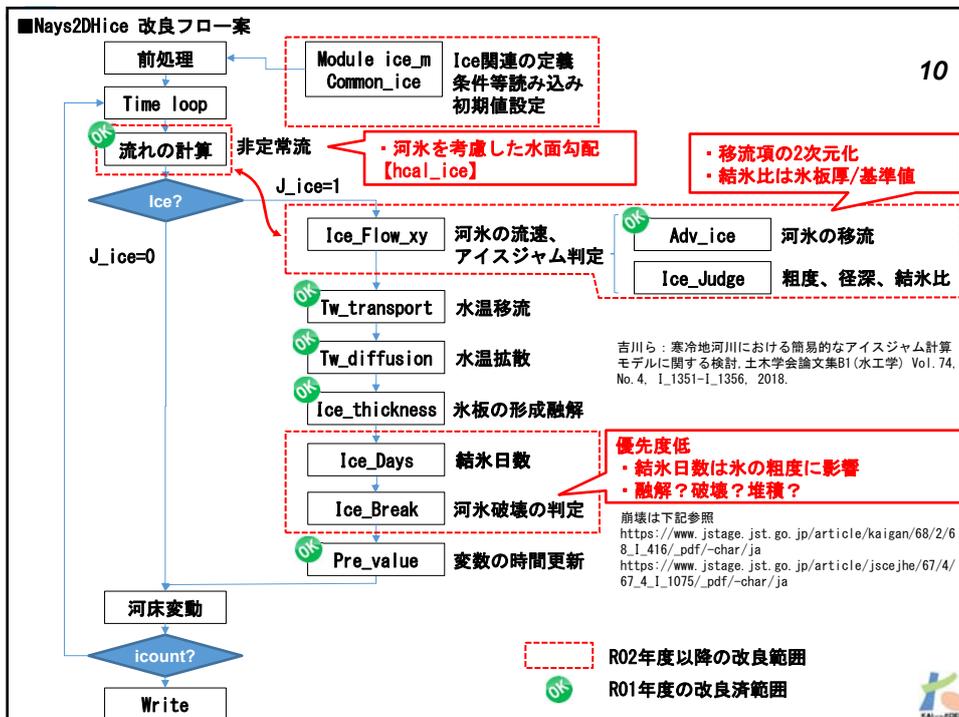
$$U_i = U_w - \frac{\frac{B_i}{B_d} \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}{\sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}}$$

吉川泰弘ほか: 寒冷地河川における簡易的なアイスジャム計算モデルに関する検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.41, 1351-1356, 2018.

8



9



10

目次

11

1. はじめに
2. モデルの改良
 1. 第1段階：水温の移流拡散・氷板の形成
 2. 第2段階：河氷による流れへの影響、河氷の移流
3. 動作確認
 1. 水温移流の確認
 2. 水温拡散の確認
 3. 結氷の確認（氷板：水位上昇、形成、融解）
 4. 河氷移流の確認
 5. 実河川での再現計算
4. 今後の取組
 1. モデルの改良
 2. 各種境界条件の調整
 3. 水理模型実験（アイスジャム）の再現計算

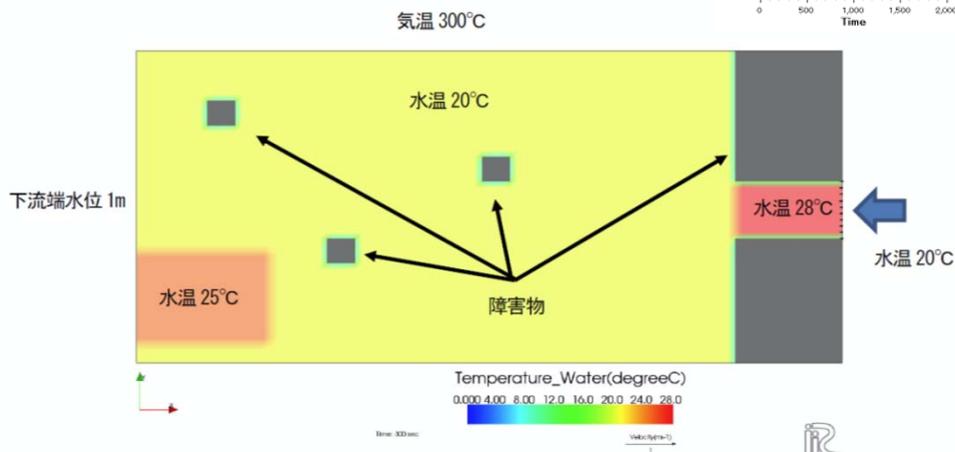
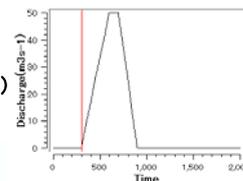


11

水温移流の確認

12

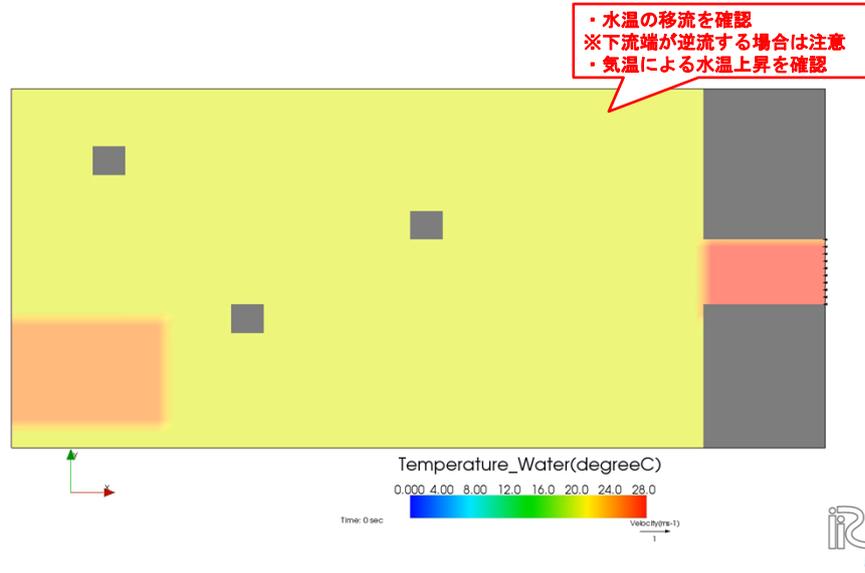
- ・上流端水路から放流、障害物により複雑に移流拡散
- ・水温は初期条件から分布を持って設定
（水流により水路内の水温28°Cの水が広範囲に移流拡散）
- ・気温による水温上昇の効果を把握するため、気温は極端に高く設定（300°C）
- ・後半の上流端量は0とし、下流端からの逆流も考慮



12

水温移流の確認

13

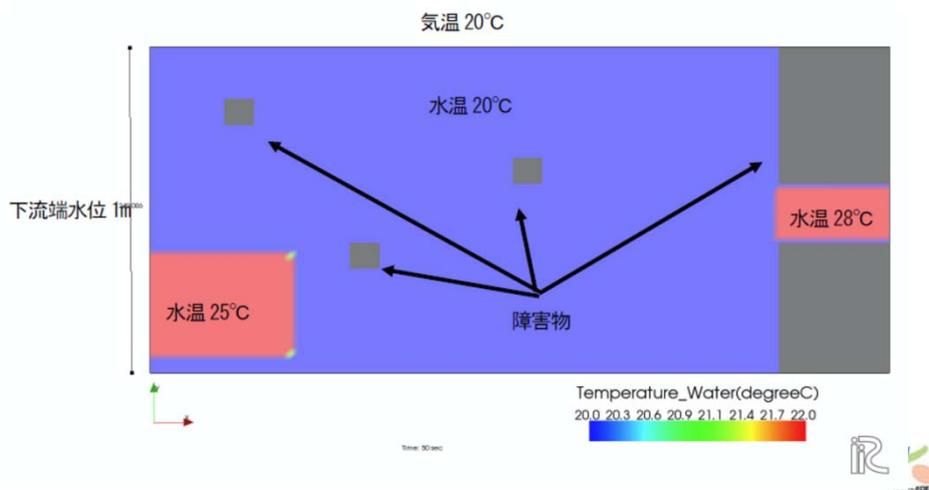


13

水温拡散の確認

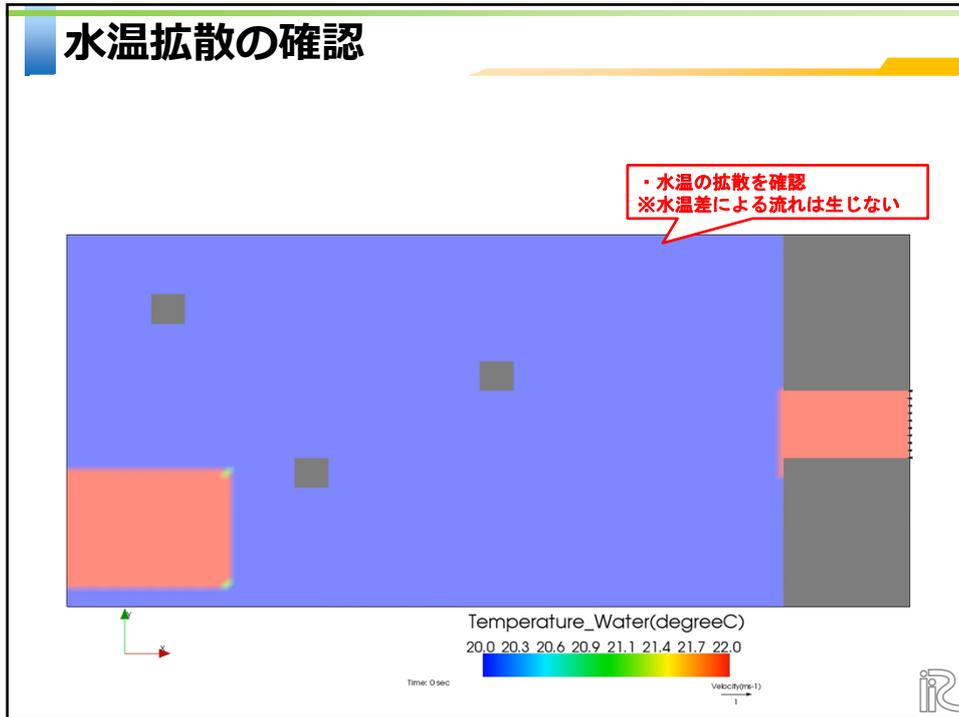
14

- 上流端水路からの流入なし(流速0)
- 水温は初期条件から分布を持って設定(高温域から低温域に水温のみ拡散)
- 気温による水温上昇の効果はほとんどなし(気温20°C)
- 拡散係数を極端に大きくしてモデルの感度分析



14

水温拡散の確認

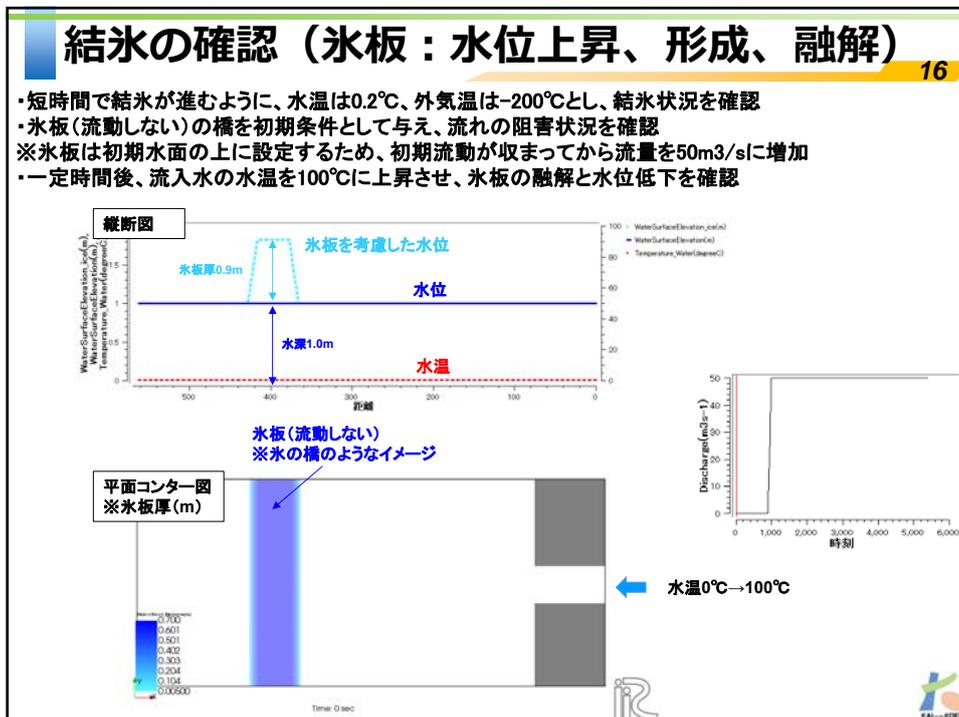


15

結氷の確認（氷板：水位上昇、形成、融解）

16

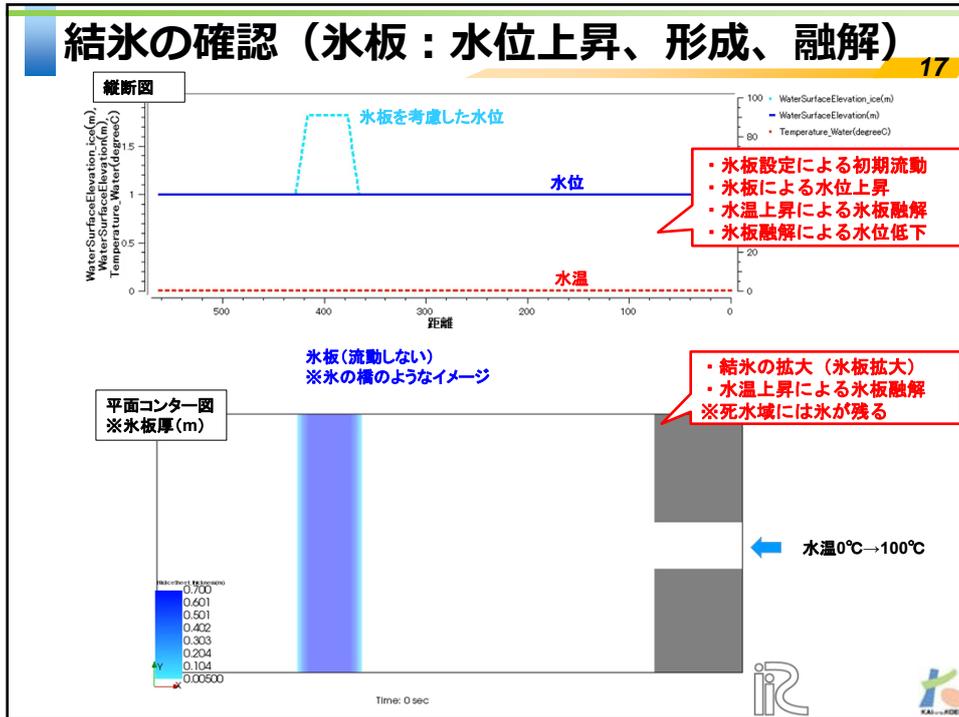
- ・短時間で結氷が進むように、水温は0.2℃、外気温は-200℃とし、結氷状況を確認
- ・氷板（流動しない）の橋を初期条件として与え、流れの阻害状況を確認
- ※氷板は初期水面の上に設定するため、初期流動が収まってから流量を50m³/sに増加
- ・一定時間後、流入水の水温を100℃に上昇させ、氷板の融解と水位低下を確認



16

結氷の確認（氷板：水位上昇、形成、融解）

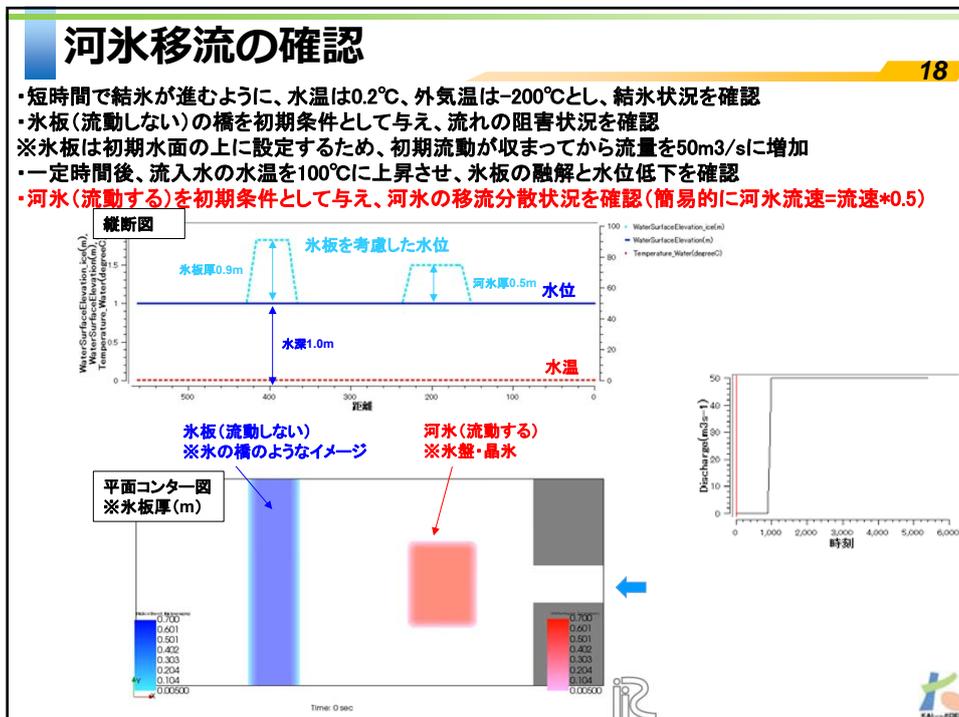
17



17

河氷移流の確認

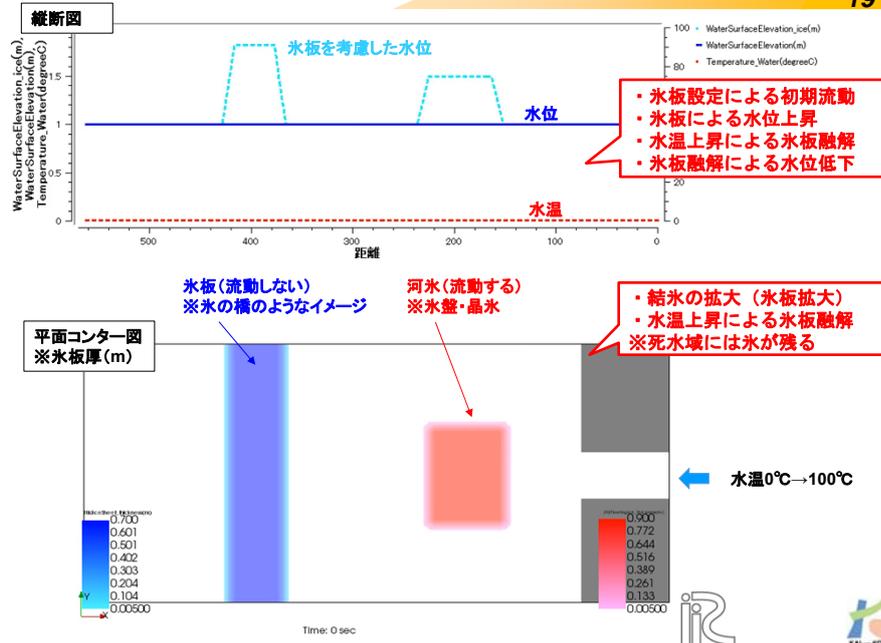
18



18

河水移流の確認

19



19

現地観測データ

20

天塩川 13.8km (KP94.2-108.0)
2008年12月25日～2009年3月20日

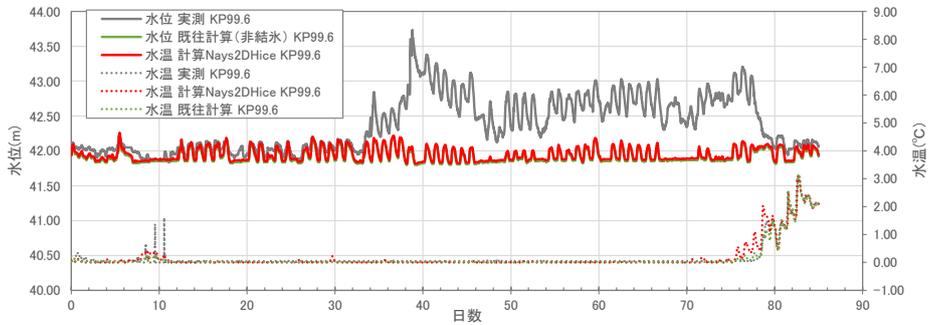


20

計算結果（結氷による水位上昇無視）

21

第1段階：水温・氷板の形成



KP99.6の計算水位(赤実線)は、既往検討における非結氷の場合の計算水位(緑実線)と変動が近い

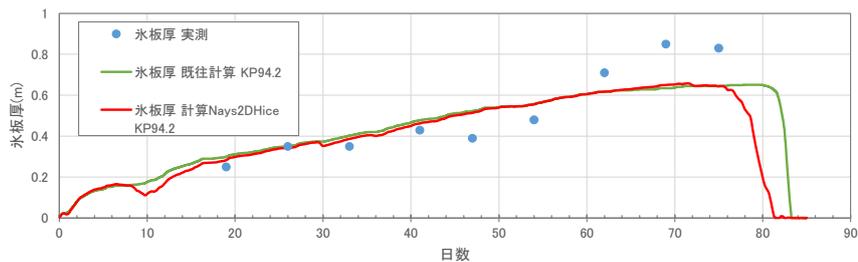
KP99.6の計算水温(赤破線)は、既往検討における計算水温(緑実線)と変動が近い



21

計算結果（結氷による水位上昇無視）

22



KP94.2地点の氷板厚(赤実線)は、既往検討における計算結果(緑実線)と変動が近い

今回改良したモデルには、氷板の流れ及び氷板形成による水位上昇効果は未実装のため、実測における30日以降の水位上昇や、80日前後の水温上昇に伴う氷板厚の変化で差が生じている。

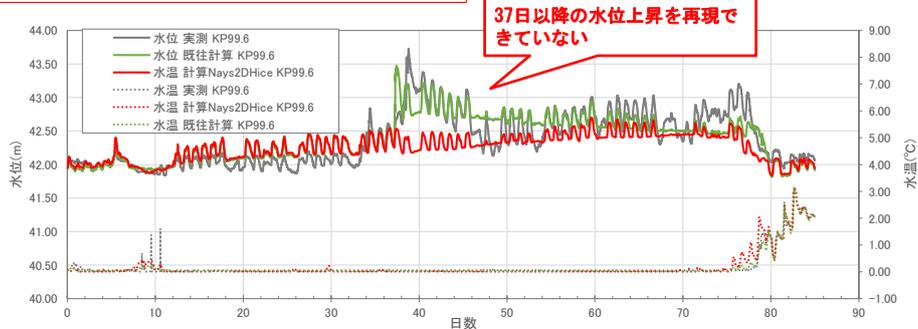


22

計算結果（結氷による水位上昇考慮）

23

第2段階：水温・氷板の形成・流れへの影響



KP99.6の計算水位(赤実線)は、既往検討における計算水位(緑実線)と37日後付近までは変動が近い

KP99.6の計算水温(赤破線)は、既往検討における計算水温(緑実線)と変動が近い

23

目次

24

1. はじめに
2. モデルの改良
 1. 第1段階：水温の移流拡散・氷板の形成
 2. 第2段階：河氷による流れへの影響、河氷の移流
3. 動作確認
 1. 水温移流の確認
 2. 水温拡散の確認
 3. 結氷の確認（氷板：水位上昇、形成、融解）
 4. 河氷移流の確認
 5. 実河川での再現計算
4. 今後の取り組み
 1. モデルの改良
 2. 各種境界条件の調整
 3. 水理模型実験（アイスジャム）の再現計算

24

今後の取り組み

25

◆モデル改良

- ✓ 結氷比の考慮
- ✓ 河氷流速の算定
- ✓ 河氷による水位上昇の見直し
- ✓ 河氷破壊のメカニズム（氷板→河氷）

◆各種境界条件の調整

- ✓ 河氷の融解
- ✓ 上流端からの河氷の流入、下流端の河氷厚の設定
- ✓ 水際境界での処理（陸地に遡上）
- ✓ 氷板（流動しない）と河氷（流動する）の関係

◆水理模型実験（アイスジャム）の再現計算

- ✓ 橋脚部におけるアイスジャム実験

25