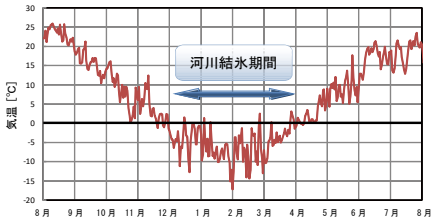
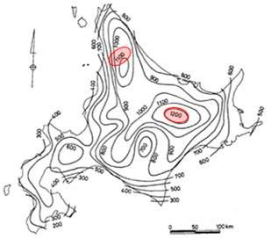
iRICへの
平面2次元河氷変動計算モデル
の組み込みに向けて

2020年12月22日（火）第4回
iRICオンラインワークショップ
北見工業大学　吉川泰弘

冬期における北海道の河川



北海道における気温の年変化の一例

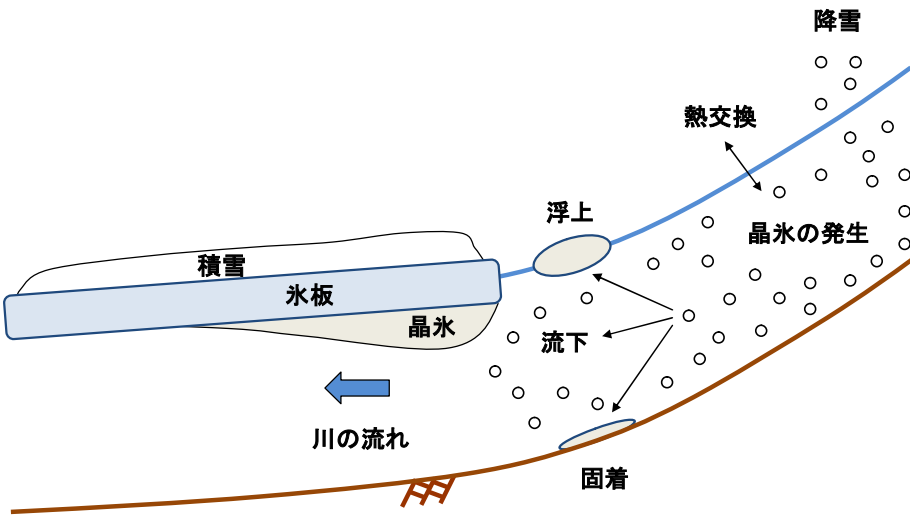


積算寒度図1974年度11月～3月（福田ら）

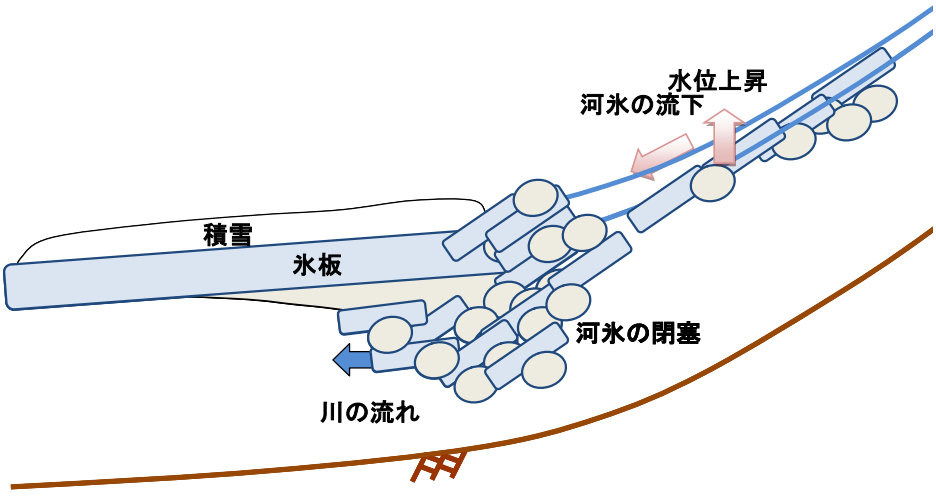
北海道における河川結氷の経時変化の一例

・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

寒冷地河川における結氷現象



アイスジャム現象



本研究の背景と目的

現場では，結氷現象特にアイスジャム現象の解明が望まれている．

アイスジャム現象の発生時期，発生場所，発生規模に関する
実務で役に立つ知見が望まれている．

これらの現象を定量的に評価する手法として，
数値計算モデルが有効．

本研究の目的は，
アイスジャム現象を含む結氷現象を解明し定式化して，
平面2次元河氷変動計算モデルとして，
IRICソフトウェアのソルバーとして組み込むこと．

アイスジャム現象を含む結氷現象の整理

①河氷の形成

気温と水温が低下し，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．

②河氷の解氷（融解，破壊）

要因として，気温上昇，流量増加，河氷厚減少が考えられる．

③河氷の流下

流水により下流へと流下，下流の河氷を破壊する．

④河氷の堆積（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する．

水位の急激な上昇を引き起こす．

⑤アイスジャムの決壊

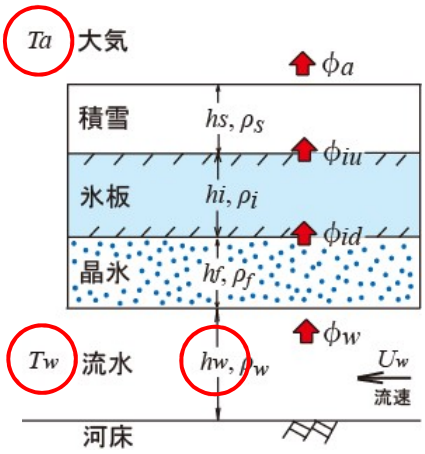
堆積したアイスジャムが，あるきっかけで破壊される．

⑥河氷の流下

流水により下流へと流下

⑦河氷の堆積（アイスジャム）

①河氷の形成 （河氷厚の計算式の導出）



$$\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} = \phi_a - \phi_{iu}$$

$$\rho_i L_i \frac{dh_i}{dt} = \phi_{iu} - \phi_{id}$$

$$\rho_f L_f \frac{dh_f}{dt} = \phi_{id} - \phi_w$$

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

①河氷の形成

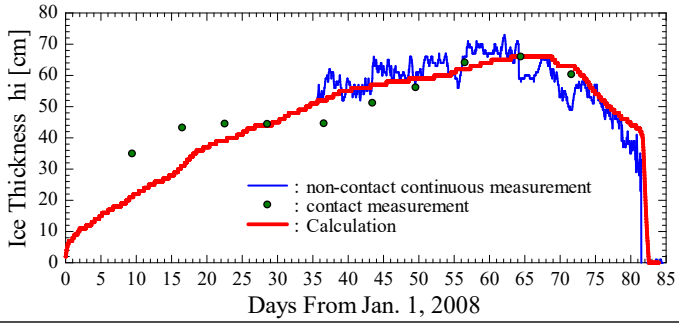
$$h_i = h_i' - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h_i'} - \left(\frac{45.8}{10^2}\right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3}$$

気温，水温，水深

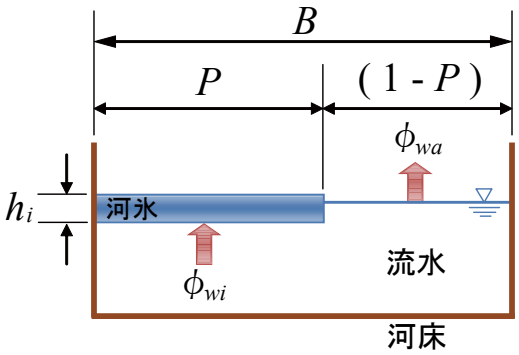
係数α，β

→

河氷厚



①河氷の形成 （1次元水温計算モデル）



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

アイスジャム現象を含む結氷現象の整理

①河氷の形成

気温と水温が低下し，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．

②河氷の解氷（融解，破壊）

要因として，気温上昇，流量増加，河氷厚減少が考えられる．

③河氷の流下

流水により下流へと流下，下流の河氷を破壊する．

④河氷の堆積（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する．

水位の急激な上昇を引き起こす．

⑤アイスジャムの決壊

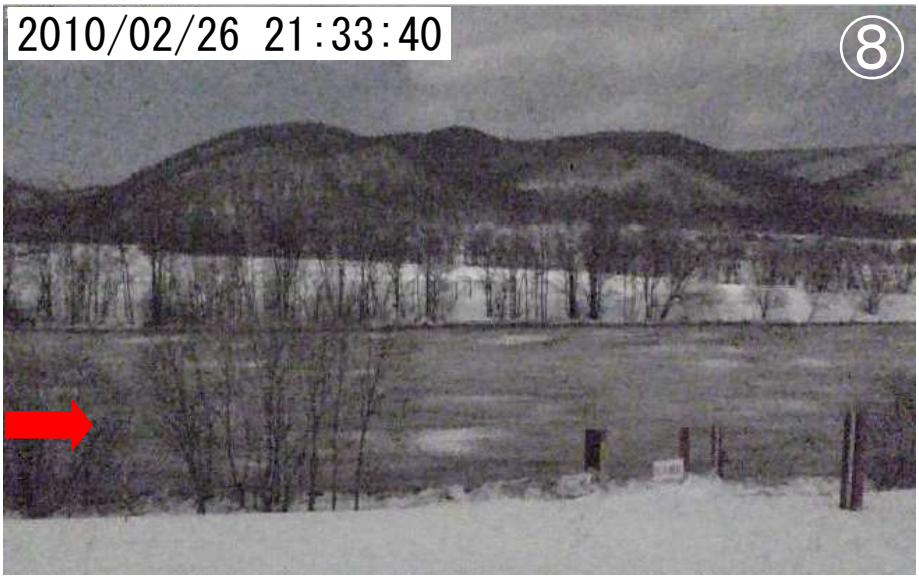
堆積したアイスジャムが，あるきっかけで破壊される．

⑥河氷の流下

流水により下流へと流下

⑦河氷の堆積（アイスジャム）

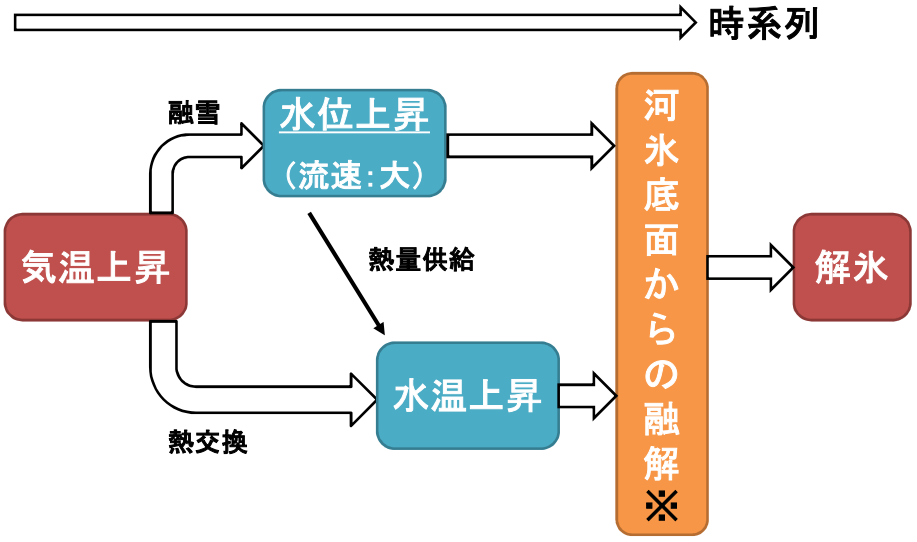
アイスジャム発生直前の流況　2010年2月渚滑川



2018年3月常呂川　河氷挙動（CCTV）

提供：北海道開発局網走開発建設部北見河川事務所(2018/3/9)

解氷現象の考察　2019年辺別川現地観測



※カメラでは河氷の流出が見られない

※氷温＝水温となる

解氷現象のモデル化　検討中

A 気温上昇から融雪量　・・・　Degree-Day法

B 融雪量と雨量から流量　・・・　準線形貯留型モデル

C 流量から水深　・・・　マニングの平均流速公式

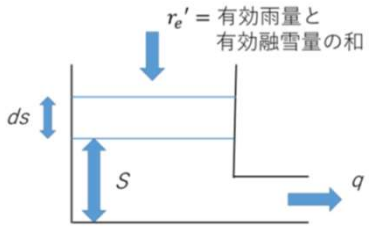
の3つの現象に分けてモデル化

$$SM = T \cdot K$$

$$SM_e = SM \cdot f$$

$$r_e = r \cdot f$$

$$r_e' = SM_e + r_e$$



$$\frac{ds}{dt} = r_e' - q$$

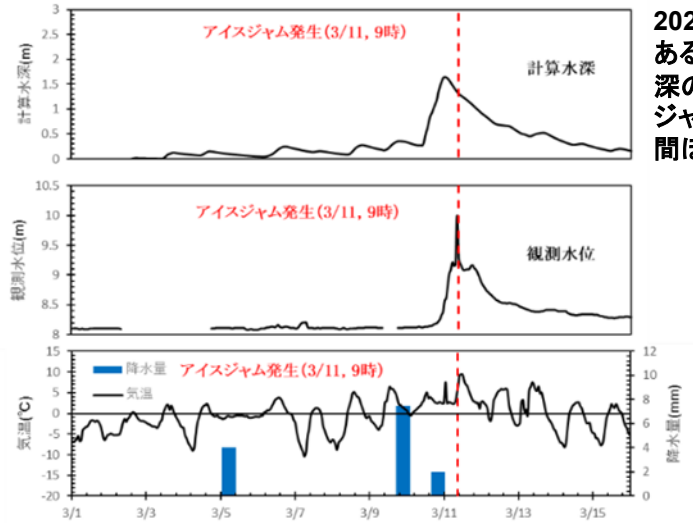
$$S = k'q$$

$$k' = \frac{t_c}{2}$$

$$t_c = CA^{0.22} r_e'^{-0.35}/60$$

$$Q = \frac{A \cdot q}{3.6} \qquad h = \left(\frac{Qn}{\sqrt{i_0}B}\right)^{\frac{3}{5}}$$

2020年3月　浦幌川の事例



浦幌川KP0.2（浦幌アメダス）

2020年3月11日9時である．2020年は計算水深のピークはアイスジャム発生時よりも9時間ほど早い．

アイスジャム現象を含む結氷現象の整理

①河氷の形成

気温と水温が低下し，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．

②河氷の解氷（融解，破壊）

要因として，気温上昇，流量増加，河氷厚減少が考えられる．

③河氷の流下

流水により下流へと流下，下流の河氷を破壊する．

④河氷の堆積（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する．

水位の急激な上昇を引き起こす．

⑤アイスジャムの決壊

堆積したアイスジャムが，あるきっかけで破壊される．

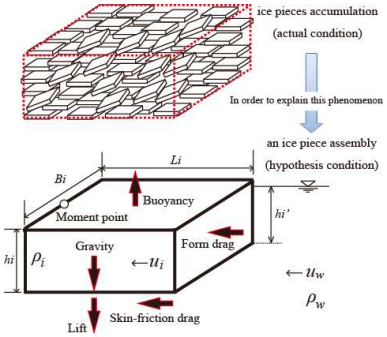
⑥河氷の流下

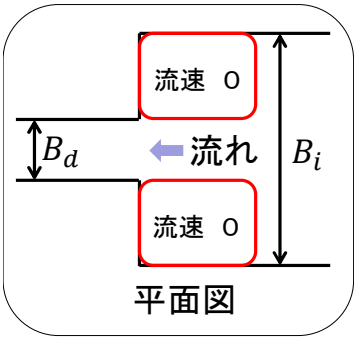
流水により下流へと流下

⑦河氷の堆積（アイスジャム）

③河氷の流下，④河氷の堆積（アイスジャム）

河氷流下堆積式を対象にして，
アイスジャム実験の再現性の確認を実施．





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

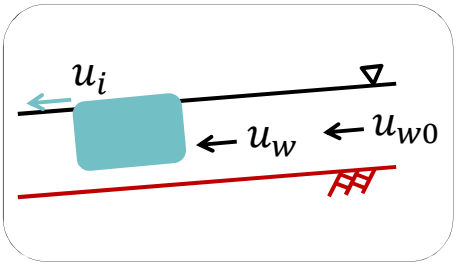
$$+\frac{1}{2}\rho_w C_f B_{\boldsymbol{d}} L_i (u_w - u_i)^2 h_i + \frac{1}{2}\rho_w C_L B_{\boldsymbol{d}} L_i (u_w - u_i)^2 \frac{L_i}{2}$$

アイスジャム時に氷塊に作用する力

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

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

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

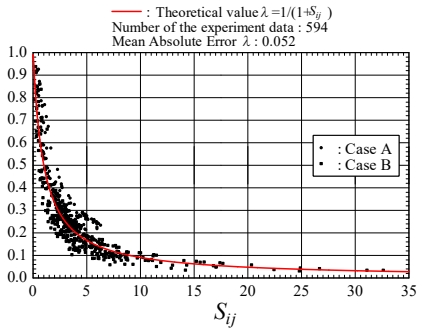


$u_w = u_{w0}$ と仮定する

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

S_{ij} とλの関係

実験



Q_w=4.2, Q_i=0.6, 8cm×8cm

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

河氷流下堆積式

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

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

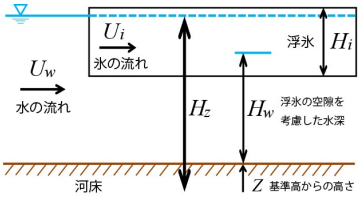
簡易的な1次元河氷変動計算モデルの構築

河川水の流れ

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

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

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



河氷の流れ

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

$$Q_i=A_iU_i$$

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

アイスジャム実験状況（平面，右が上流）

流量：1.4l/s

流水を白色入浴剤で着色（比重は1.022）

氷板投入枚数：500枚(投入時間8秒，投入速度62.5枚/s)

水温：実験前14℃，実験後14℃

低水路内堆積枚数：300枚，高水敷堆積枚数：49枚

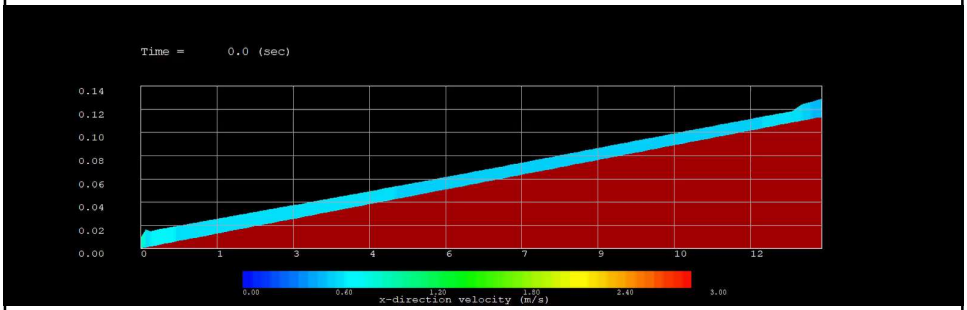
実験の水路形状，流量，氷量，氷サイズは2010年2月の渚滑川のアイスジャムを参考．

アイスジャム発生区間となる河口から11kmから20kmの区間を一般断面不等流計算結果より設定．

模型縮尺：1/100

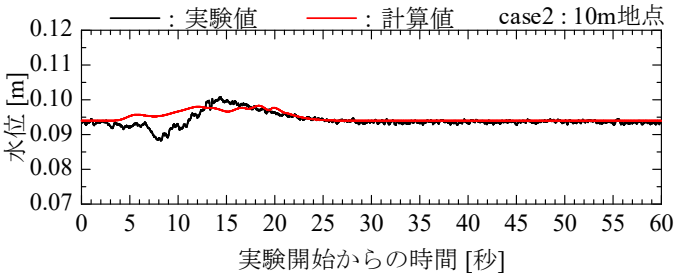
勾配：1/120

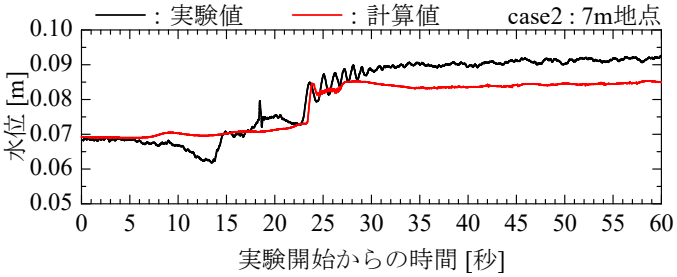
1次元河氷変動計算モデルの計算結果



- Manningの粗度係数は0.008．径深，潤辺は，氷塊の厚さが氷模型の厚さ0.6cmの2倍となった場合，完全結氷と仮定して算出した．
- クーラン数0.005，計算区間断面10cm．Bi，Liは，その断面の川幅の値を与え，橋脚の影響として橋脚設置断面の川幅を0.3倍とし，氷塊の速さが流水の速さの0.5倍以下となった場合，氷塊の速さをゼロとして計算した．

水位における実験値と計算値





アイスジャム現象を含む結氷現象の整理

①河氷の形成

気温と水温が低下し，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．

②河氷の解氷（融解，破壊）

要因として，気温上昇，流量増加，河氷厚減少が考えられる．

③河氷の流下

流水により下流へと流下，下流の河氷を破壊する．

④河氷の堆積（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する．

水位の急激な上昇を引き起こす．

⑤アイスジャムの決壊

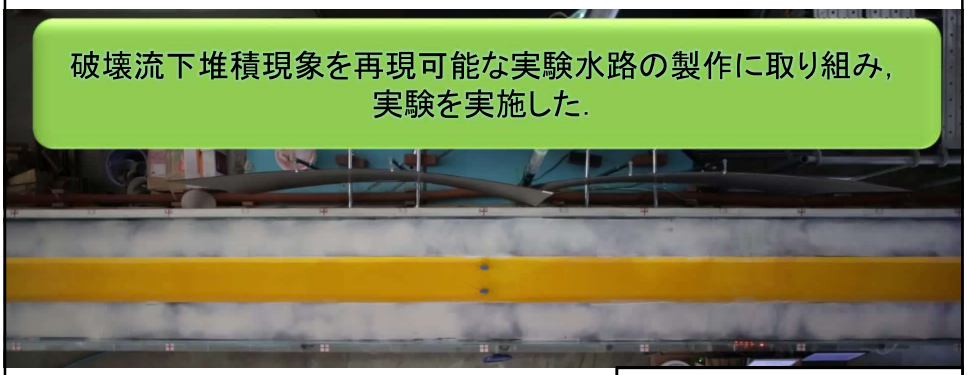
堆積したアイスジャムが，あるきっかけで破壊される．

⑥河氷の流下

流水により下流へと流下

⑦河氷の堆積（アイスジャム）

③～⑥：河氷の流下→堆積→決壊→流下



流量：0.7l/s（1.4l/sではアイスジャム発生せず）

無着色（温度管理のため）

氷板投入枚数：500枚(投入時間8秒，投入速度62.5枚/s)

水温：実験前1.3℃，実験後1.9℃

実験後の堆積枚数は融解により不明

実験の水路形状，流量，氷量，氷サイズは2010年2月の渚滑川のアイスジャムを参考．

アイスジャム発生区間となる河口から11kmから20kmの区間を一般断面不等流計算結果より設定．

模型縮尺：1/100

勾配：1/120

まとめ

本研究は，寒地土木研究所の横山さんと開発工営社の濱木さんのご協力のもと，現地観測，水理実験，数値計算を用いて研究を進めている．

昨年度は，既往ソルバーのNays2DHに，河氷厚計算式と水温計算式の計算モデルをiRICへ組み込んだ．河氷厚と水温の計算値の妥当性を時系列の観測値から確認した．

今年度は，河氷流下堆積式の組み込みに取り組んでいる．

一方で，解氷現象については，定式化が出来ていない状況であり，現在，研究を進めているところである．