

第48回 技術者交流フォーラム事業 in 釧路
釧路・根室地域における津波防災の現状と課題

氷を伴う津波による複合災害リスクとその対策

国立研究開発法人 土木研究所
寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム

研究の背景

冬期の北海道北東部沿岸域などの流水や沿岸結氷を含む氷海域において、大量の海氷をともなった津波は、通常の津波よりも被害を拡大し、国民の生命・財産に甚大な損害を与える可能性がある

過去に発生した海氷を伴う津波の被害事例

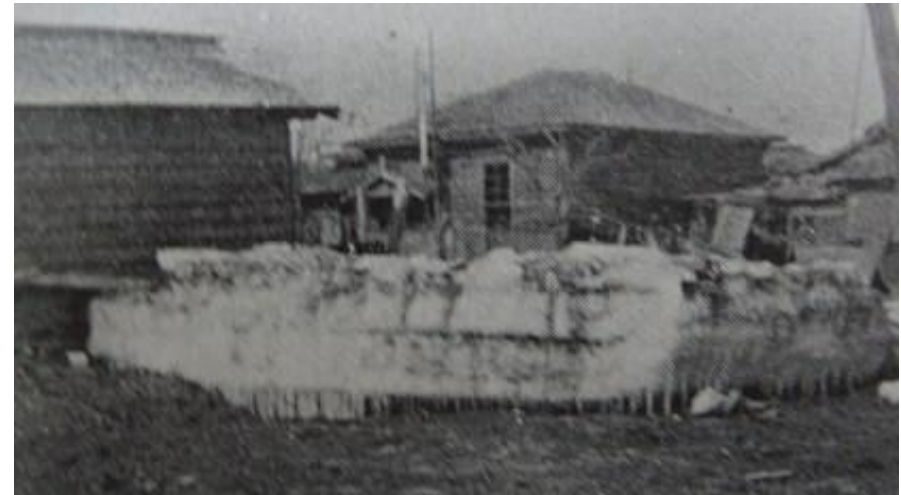
地震名	状況
1894年3月 根室沖地震	国後島で流水を伴った津波の遡上により、家屋の倒壊3棟、船の破損5隻
1923年2月 カムチャツカ地震	カムチャツカ半島で波に押し流された氷塊によって魚缶詰工場が破壊
1952年3月 十勝沖地震	浜中町霧多布で流水を伴った津波の遡上により家屋が多数全壊
2011年3月 東北地方太平洋沖地震	道内の河川で河川結氷が漂流し、鶴川ではアイスジャムが発生

Damage cases of run-up ice floes caused by Tsunami wave

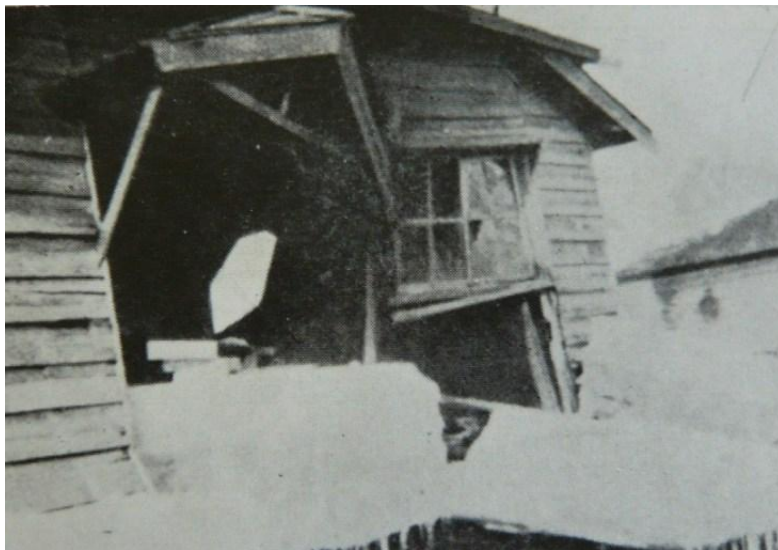
Tsunami-related ice floes originating in the sea off the coast of Tokachi caused serious damage to private houses in 1952, especially in Hamanaka Town on the eastern side of Hokkaido.



出典：十勝沖地震調査委員会，十勝沖地震調査報告書，第15図



出典：十勝沖地震調査委員会，十勝沖地震調査報告書，p285



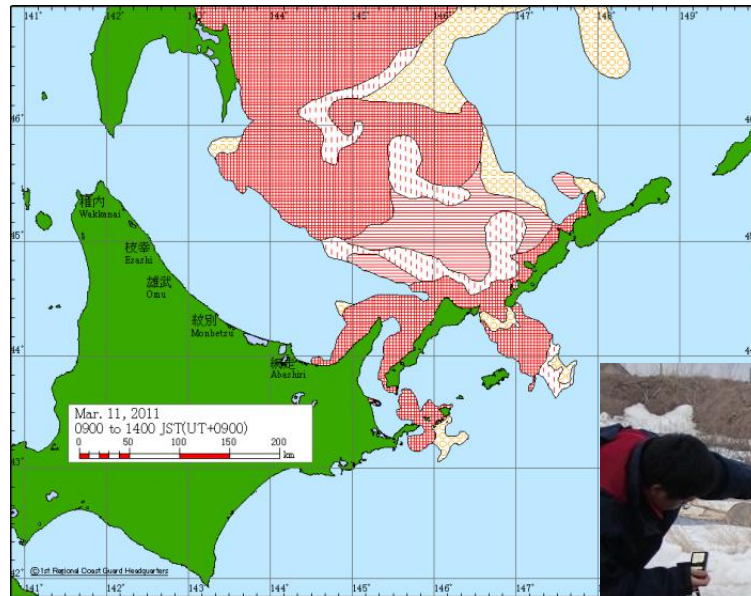
出典：十勝沖地震調査委員会，十勝沖地震調査報告書，第13図



出典：北海道，北海道十勝沖震災誌，昭和28年発効，口絵

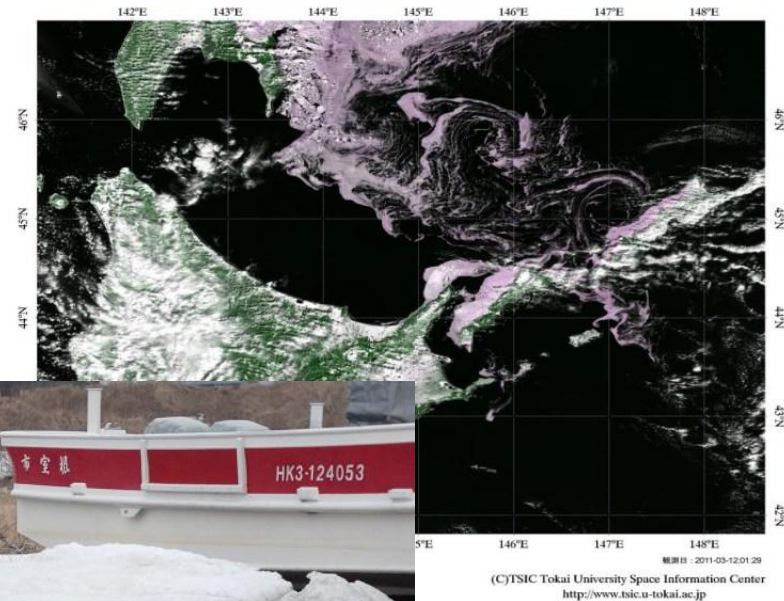
Hokkaido Coast - The 2011 Great Tohoku Tsunami

Sea ice distribution at Mar.11, 2011



Ice information center, Japan

TSIC MODIS Terra Image



Ice floes approach private houses



Run-up Ice floes to shore (Nemuro Peninsula, coast facing at Pacific Ocean)

河川での氷の挙動

氷は道東・オホーツク以外の河川にも

海氷のほか、河氷によるインパクトもある

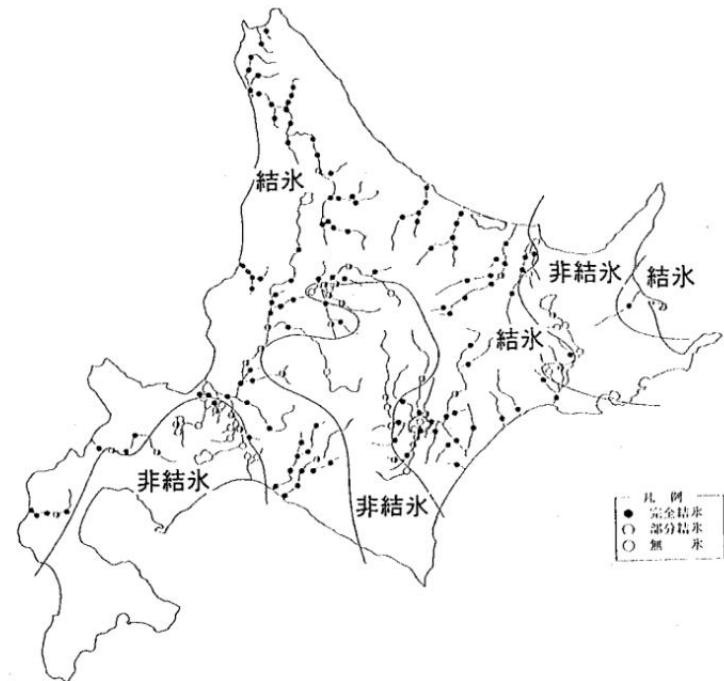
- ・北海道の河川は全道的に結氷[山下ら, 1994]
- ・1952年十勝沖地震では, 春採川(釧路市)において, 津波が結氷した春採川の河氷を破壊しながら遡上, 多数の氷板が堤防を乗り越え家屋に被害を与えた[阿部ら, 2011], チヨロベツ川の氷が陸上へ遡上, 家屋2戸破壊[小野, 1983]など
- ・3・11でも, 道内の太平洋に面した川(鵜川, 厚真川など)で津波が数10km遡上するとともに, 河氷が破壊され, アイスジャム(閉塞)や高水敷・河畔林まで氷が運ばれた[例えば, 阿部ら, 2011・2012]

春採川の氷が遡上(1952年十勝沖地震津波)



菅野純一さん撮影

北海道の河川結氷の例



山下ら, 1994

河川での氷の挙動

3・11での氷の挙動例 —厚真川・鵠川

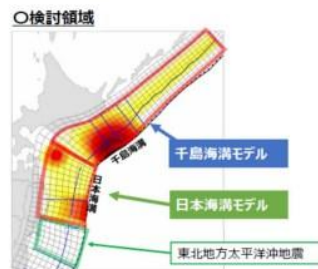
撮影：寒地河川チーム・推進室



日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震
 のよる津波浸水・被害想定公表
 (2021.7.19 / 2022.12.26)

- 想定する地震動

平成27年2月に内閣府に設置された「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会」において検討され、公開されている日本海溝モデル及び千島海溝モデルの震度を利用し、工学的基盤の速度を求め、微地形区分及びボーリングデータを用いて速度の増幅度を設定して、震度を推計した。



- 想定する津波

国の「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会」が示した考え方を基本とし、最新の地形データを用い、詳細な条件設定下で算定した結
果をワーキンググループが令和3年7月に設定・公表した津波浸水想定等の結果を用いた。

◎建物被害

全場複數 (複)

建物被害として、揺れや津波等による全壊棟数を推計した。揺れによる全壊棟数は、建物の構造及び建築年代毎の震度と全壊率の関係を求めて、対象となる建物数を乗じて推計している。

津波による全壊棟数は、建物の構造別に津波浸水深と全壊率を求め、対象となる建物数を乗じて推計している。

なお、冬季においては、積雪荷重によって、全壊率が高くなることを考慮している。

区分	千島海溝モデル			日本海溝モデル		
	夏・昼	冬・夕	冬・深夜	夏・昼	冬・夕	冬・深夜
揺 れ	約3,000	約6,200	約6,200	約40	約120	約120
液 状 化	約3,700	約3,700	約3,700	約3,600	約3,600	約3,600
津 波	約42,000	約41,000	約41,000	約130,000	約130,000	約130,000
急傾斜地崩壊	約150	約140	約140	約20	約20	約20
合計	約49,000	約51,000	約51,000	約134,000	約134,000	約134,000

◎人的被害

死者数 (人)

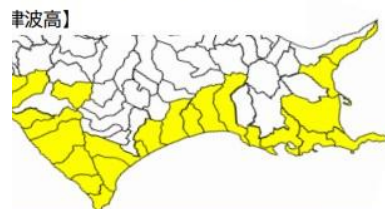
人的被害として、建物倒壊、津波等による死者数を推計した。建物倒壊による死者数は、建物の構造より被害発生の様相が異なることから、建物の構造毎に想定し、全壊棟数に死者率や時間帯別の建物内滞留率などを乗じて推計している。

津波による死者数は、浸水深30cm以上になると死者が発生すると想定した上で、避難意識のパターンによる違いも考慮している。

【早期避難率高+呼びかけ】

区分	千島海溝モデル			日本海溝モデル		
	夏・昼	冬・夕	冬・深夜	夏・昼	冬・夕	冬・深夜
建物倒壊	約40	約140	約160	—	—	—
津波	約27,000	約48,000	約50,000	約9,000	約41,000	約48,000
急傾斜地崩壊	約10	約20	約20	—	—	—
合計	約27,000	約48,000	約50,000	約9,000	約41,000	約48,000

※【早期避難率高+呼びかけ】は津波避難ビル等を考慮した場合である。



クラスの津波浸水想定を公表済
高に基づき算出

2 / 15

オホーツク海沿岸の津波浸水想定公表 (2023.2.20)

(2) 海岸線の津波水位 (市町村毎の最大津波水位(最大津波高))

(5) 選定した最大クラスの津波について

北海道オホーツク海沿岸に最大クラスの津波をもたらすと想
の地震を選定しました。

対象津波	網走沖の地震モデル 想定地震津波
マグニチュード	7.5
使用モデル	H23.3 道モデル：網走沖モデル（北見大和堆）

説明	H23.3 北海道オホーツク海沿岸の津波浸水予測国モデル ※不確実性を考慮し、断層の走向について、以下の5パターンの大きいモデルを設定。
----	---

走向パターン			
-20°	-10°	$\pm 0^{\circ}$	



電



也盤變動量分



市は、宗谷線以東の集

※養父町、佐呂間町、北見市の（）内は、サロマ湖内の集計値を示している。

※網走市の（）内は、能取湖内の集計値を示している。

No	振興局	市町村名	最大津波水位（最大津波高）			
			海岸線における津波水位の最大値（T.P.m）			
1	東谷総合	権内市	2.8	F01	～ 7.6	F02F03運動
2		猿払村	3.2	紋別沖（+20%）	～ 5.9	紋別沖（+20%）
3		浜頓別町	3.4	F02F03運動	～ 7.2	紋別沖（+10%）
4		枝幸町	3.7	紋別沖（+10%）	～ 9.2	紋別沖（+10%）
5		基武町	3.3	紋別沖（-20%）	～ 10	網走沖（-10%）
6		興部町	4.2	網走沖（-20%）	～ 9.3	網走沖（-20%）
7		紋別市	2.6	網走沖（-20%）	～ 7.9	網走沖（-20%）
8	オホーツク総合	湧別町	2.1	網走沖（-20%）	～ 5.0	網走沖（-20%）
			(1.0)	F01	～ (2.1)	網走沖（-20%）
9		佐呂間町	(0.9)	F01	～ (1.3)	網走沖（-20%）
10		北見市	1.9	網走沖（-20%）	～ 4.1	網走沖（-20%）
			(0.9)	F01	～ (1.9)	網走沖（-20%）
11		網走市	2.1	網走沖（+20%）	～ 5.4	網走沖（+10%）
			(0.9)	網走沖（+20%）	～ (2.5)	網走沖（+10%）
12		小清水町	3.1	網走沖（+20%）	～ 3.8	網走沖（+20%）
13		斜里町	2.5	網走沖（+20%）	～ 5.7	網走沖（+20%）

研究の目的（目標）

氷群による上乗せリスクを想定し，それに対する備えのあり方
特に，

- ◆ 海水作用を考慮した，石油タンク等の危険物施設や津波避難施設等の重要構造物の設計法および安全対策の提案
- ◆ 海水遡上を考慮したハザードマップ作成のための支援ツール構築
 - ➡ 重要構造物・避難施設・経路等の配置計画，避難計画等



氷を伴う津波の被害想定，津波減災・防災対策に寄与



石油タンクの例（道東）

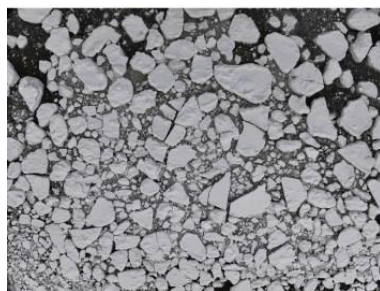


津波避難施設の例（道東）

研究の目的（目標）

研究の手法

海水の諸元調査・統計解析等



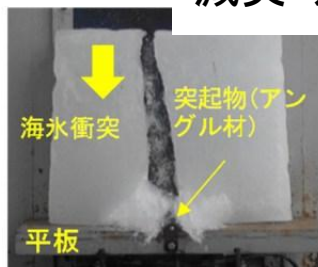
▲ドローン調査

水理模型実験



断面水路・平面水槽による氷+津波の混相流体の実験

減災・対策案等の検討



▲衝突力緩和方策

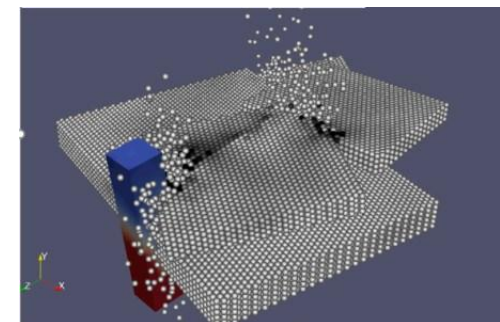
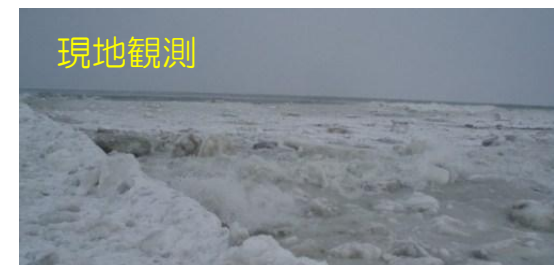


▲津波スクリーンの適用

海水衝突の中規模実験・現地観測，数値計算



▲中規模調査



個別要素法による数値解析 ▶

海水/津波の数値計算・ハザードマップ作成



目標達成・研究成果の活用・普及へ

想定される海氷による上乗せリスク

キーワード： 衝突，パイルアップ，アイスジャム



参考



パイルアップの例

(株)西村組 提供

Blizzard, severe snowstorm, ice floes were very active, they overtopped a breakwater to form large mass of ice accumulation or ice pile-ups

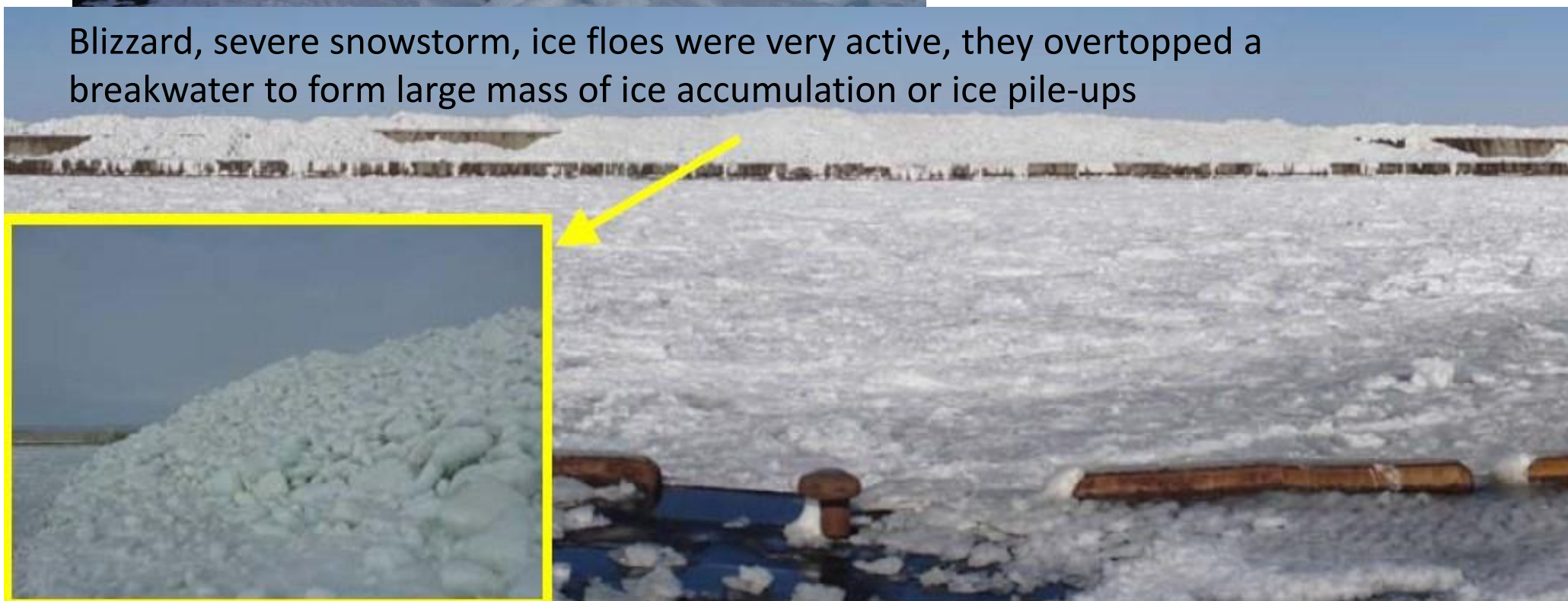


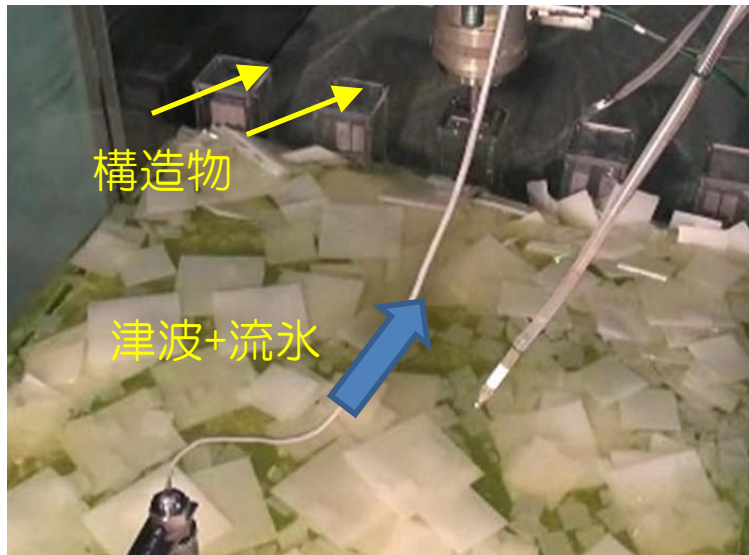
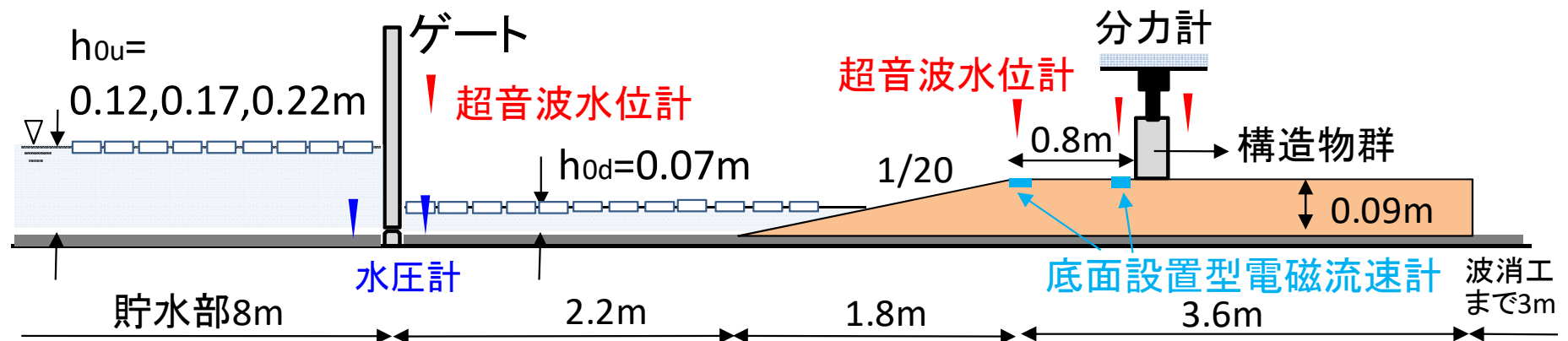
Fig.1 Ice pile up on a breakwater caused by stormy weather

海水を伴った津波の陸上遡上に関する模型実験

主にアイスジャム・パイルアップに着目

[木岡ら, 2014, 2019]

海水群が沿岸に漂着した状態を想定し、ゲート急開方式により段波を発生、一様斜面部を伝搬した後、水平な陸上部に遡上させる

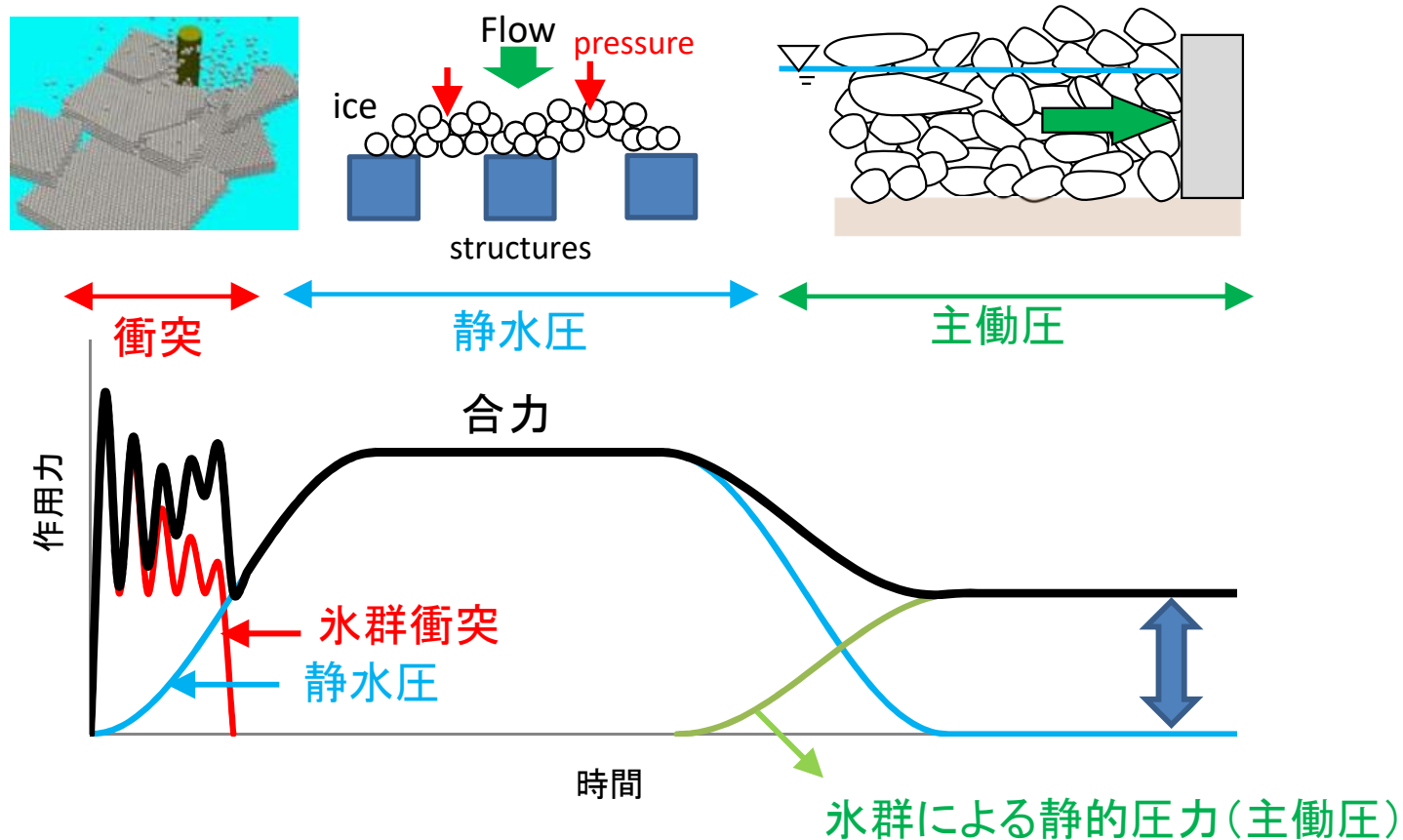


- ①まず構造物に衝突
- ②多量の流水で水流が止められ
- ③水位が上昇
- ④大きな水圧が作用

海水を伴った津波の陸上遡上に関する模型実験

[木岡ら, 2014, 2019]

Ice-jam 形成時の津波作用力のモデル



- ①初期の氷群衝突による荷重
- ②水位の上昇による静水圧の上昇と定常状態の持続
- ③静水圧と交代する形での水位低下による氷群の主働圧の発現とその定常的な(水位ゼロ状態での)荷重
- ④作用荷重は上記①～③の合力

海水を伴った津波の陸上遡上に関する模型実験

[木岡ら, 2014, 2019]

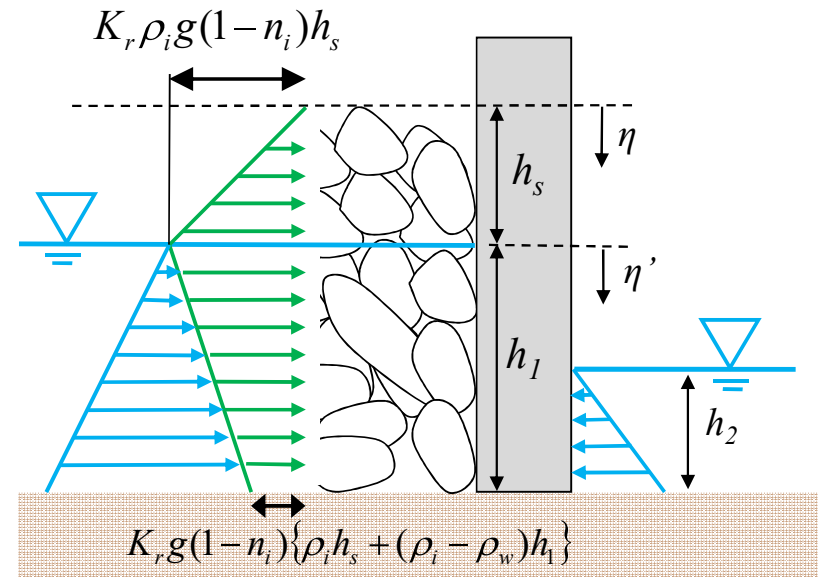
Ice-jam 形成時の津波作用力のモデル

水位低下後の氷群による主働圧のモデル [木岡ら, 2019]

水位が低下し、浮力の減少によって氷群の主働圧が発現し、残留力として持続

土圧のアナロジーから、本現象に Rankine 土圧理論を準用

□ 氷群による主働圧の合力



$$F_{ip} = \int_0^{h_s} K_r \rho_i g (1 - n_i) \eta d\eta + \int_0^{h_1} K_r g (1 - n_i) \{ \rho_i h_s + (\rho_i - \rho_w) \eta' \} d\eta'$$
$$= \frac{K_r g (1 - n_i)}{2} \{ \rho_i (h_1 + h_s)^2 - \rho_w h_1^2 \}, \quad \text{where,} \quad K_r = \tan^2(45 - \phi_i / 2)$$

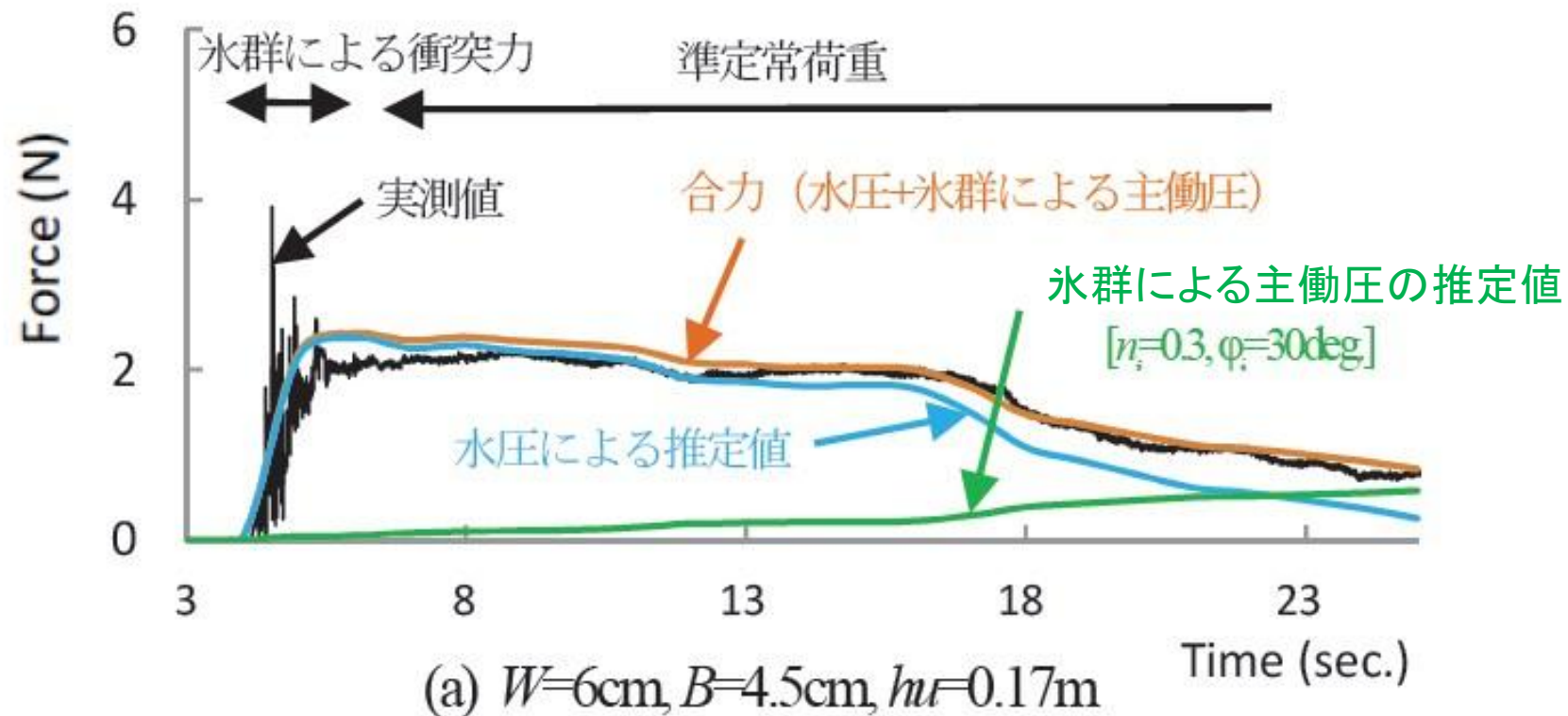
ここに、 n_i は氷群の間隙率、 h_s は水面上の氷群の高さ、 h_1 は建築物前面の水深、 K_r は土圧係数、 ϕ_i は氷群の内部摩擦角、 ρ_w 、 ρ_i はそれぞれ水と氷の密度

海水を伴った津波の陸上遡上に関する模型実験

[木岡ら, 2014, 2019]

Ice-jam 形成時の津波作用力のモデル

水位低下後の氷群による主働圧のモデル [木岡ら, 2019]



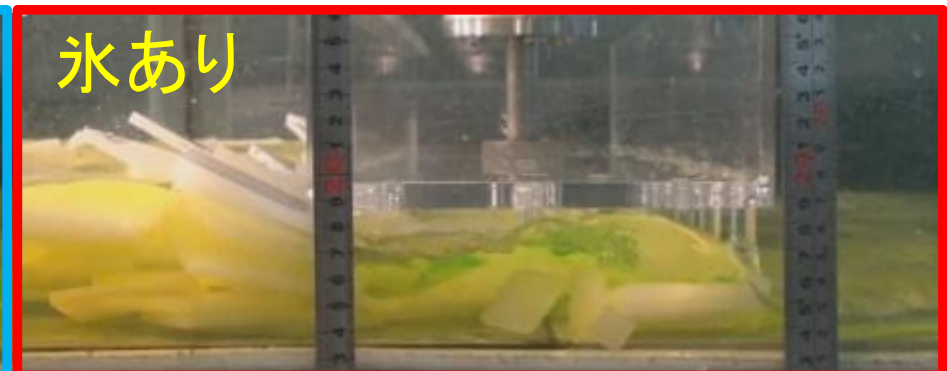
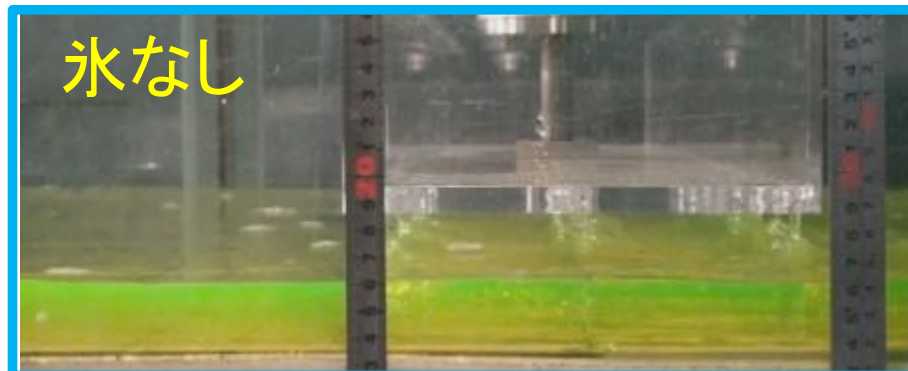
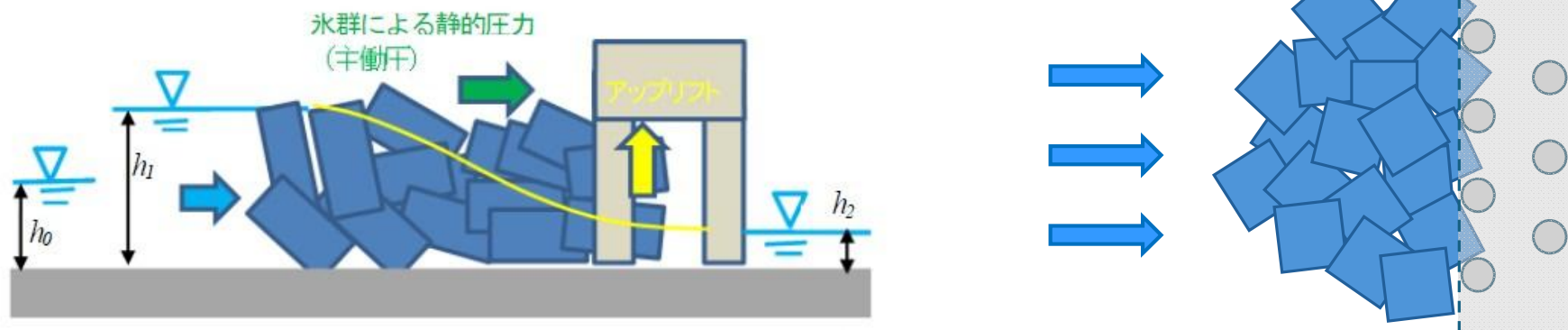
氷の衝突以外の準定常的な荷重については、建築物間のせき止め水塊を考慮した静水圧モデルと氷群の主働圧モデルで良く説明できる
氷の衝突については別途実験・数値計算を実施(後述)

海水を伴った津波の陸上遡上に関する模型実験



ピロティ構造への作用 [木岡ら, 2025]

1F部分が柱で構成されるピロティ構造は、**水流のみであれば有利**であるが、流氷や大量の漂流物により、水流がせき止められ、大きな水圧が作用する



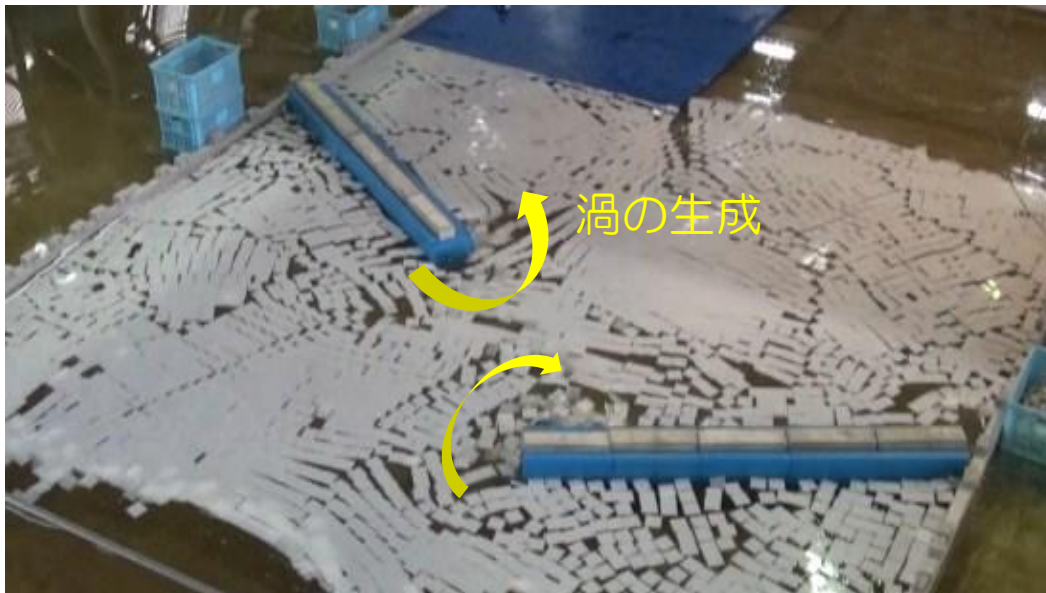
模型実験によるピロティ近傍の水位のアイスジャム形成の有無の比較

海水を伴った津波の陸上遡上に関する模型実験

大型平面水槽による実験

◆ 実験内容

6m×6mの範囲に防波堤模型、その背後に陸上部(岸壁)を配置し、ポリプロピレン製の模型氷を水面に浮かべた状態で、孤立波を作用させる。縮尺は1/50～1/100を想定している。実験は防波堤の諸元・配置、津波の条件(波高、周期、水深)などを変化させて実施



海水の衝突荷重と破壊挙動 [木岡ら, 2012, 2013, 2017]

たとえ氷が小規模であっても、津波・波浪等によって高速で運動する氷塊が、構造物（津波避難施設の脚柱や石油タンク等の重要構造物）へ衝突すれば、それらの**局部損傷や崩壊の危険性**



オホーツク海に面した導流堤



サロマ湖第二湖口橋脚部鋼管矢板

海水の衝突荷重と破壊挙動

海水の衝突実験

自由落下方式による人工海水の衝突



人工海水



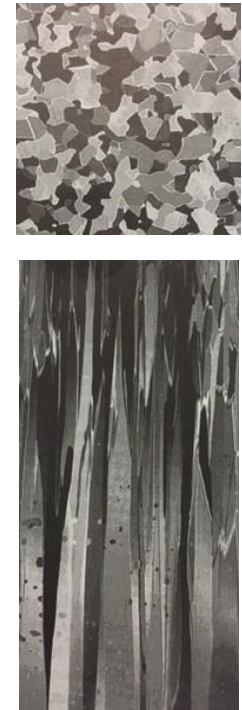
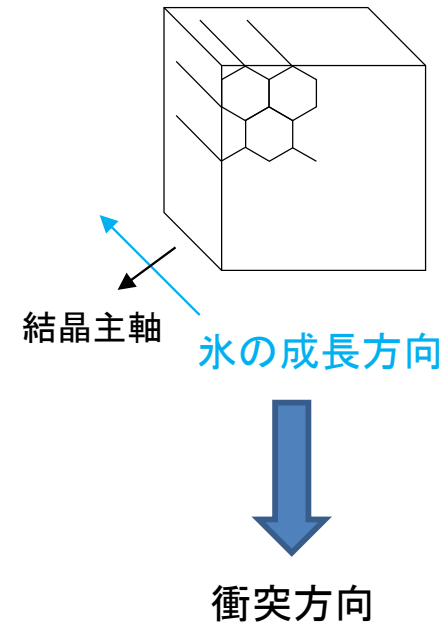
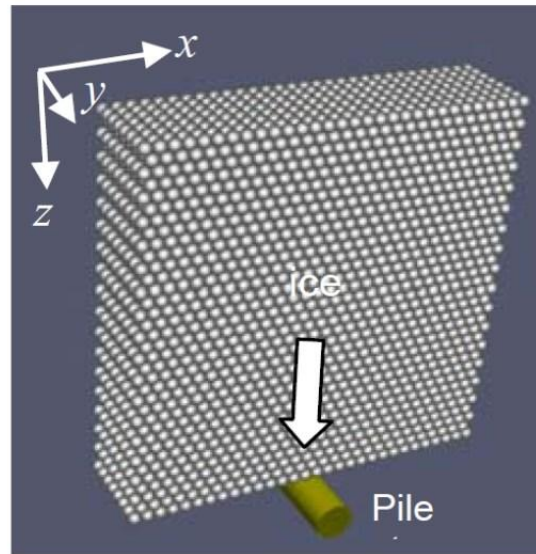
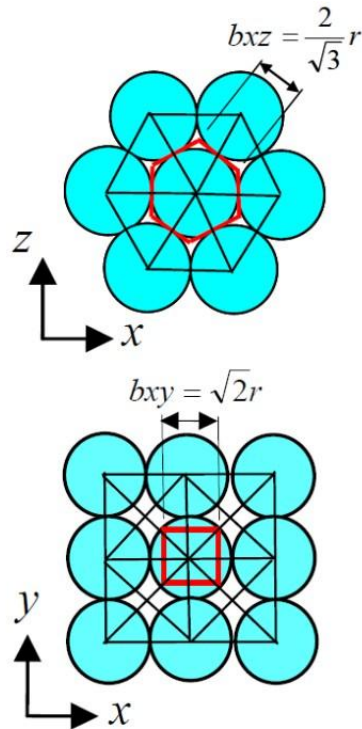
手のひら程度の面積に1トン
オーダーの衝突力

海水の衝突荷重と破壊挙動

海水の衝突破壊シミュレーションモデルの構築

3次元の個別要素法 (DEM) を応用した数値モデル

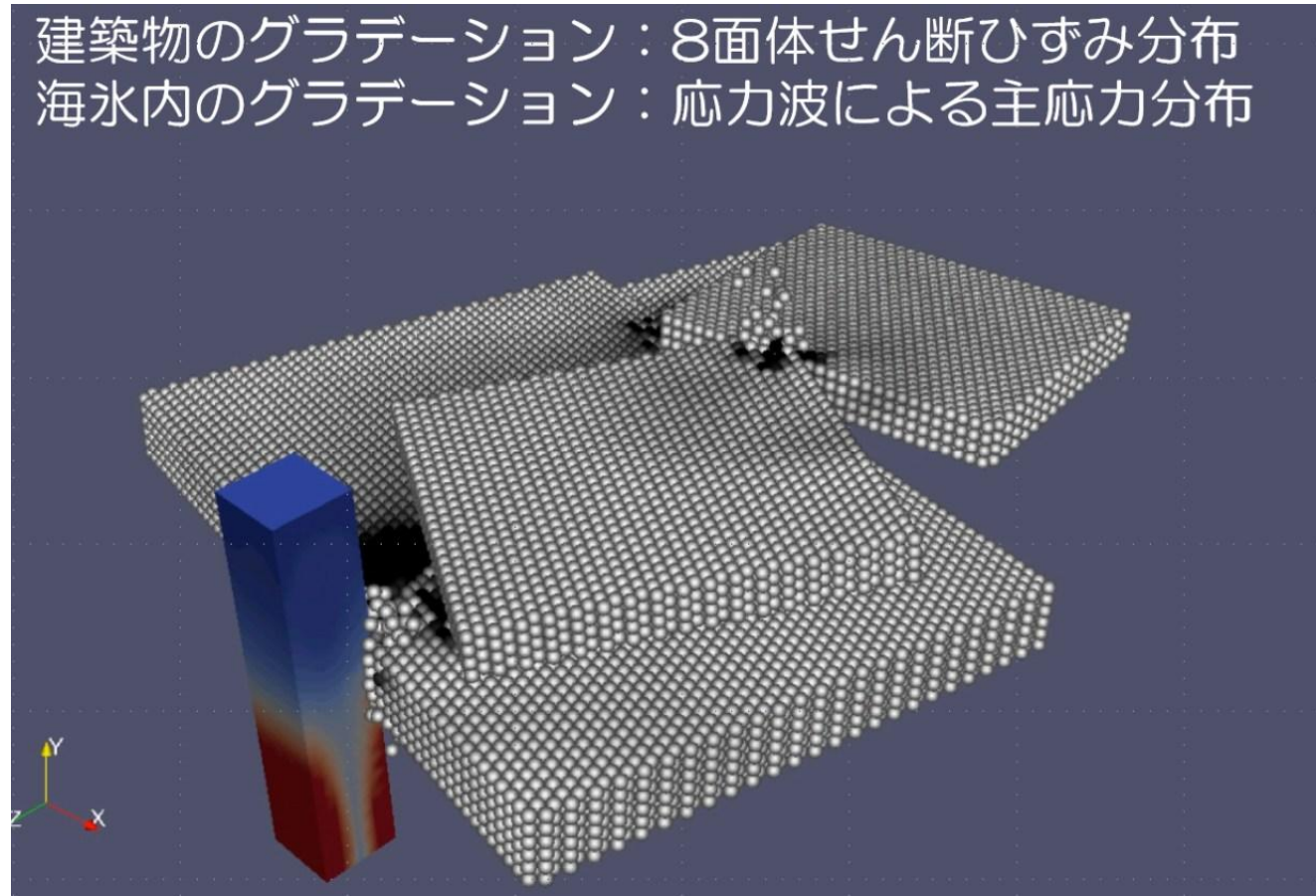
要素はすべて同じ半径をもつ剛球, 隣接する要素はバネで結合



要素をひとつの結晶粒と見立てると, 規則配列のうち本配列が最も近く, さらに, 海水の力学特性はその生成過程より, 強度異方性をもつが, 本配列がその再現性に良好な結果をもたらす(木岡ら,2012)

海水の衝突荷重と破壊挙動

海水の衝突破壊シミュレーションモデルの構築



解析モデル	建築物：	弾塑性有限要素法[FEM]
	海水：	3次元個別要素法[DEM]

海水の衝突荷重と破壊挙動

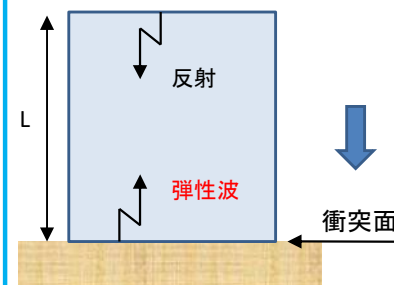
最大衝突力の簡易式の提案

- ◆ 理論
- ◆ 数値シミュレーション (DEM, FEM)
- ◆ 衝突実験

ベースとなる理論

➡ 最大衝突力の簡易式の提案

直方体弾性体の無限平面への最大衝突力の理論



- ① 衝突力波形を矩形と仮定
- ② 力積と運動量変化との関係
- ③ 衝突力の作用時間は氷塊内を伝搬する弾性波の往復時間であること
- ④ 弾性波速を氷の動弾性係数 E と密度 ρ の比の平方根と仮定 (細棒の縦波音速)

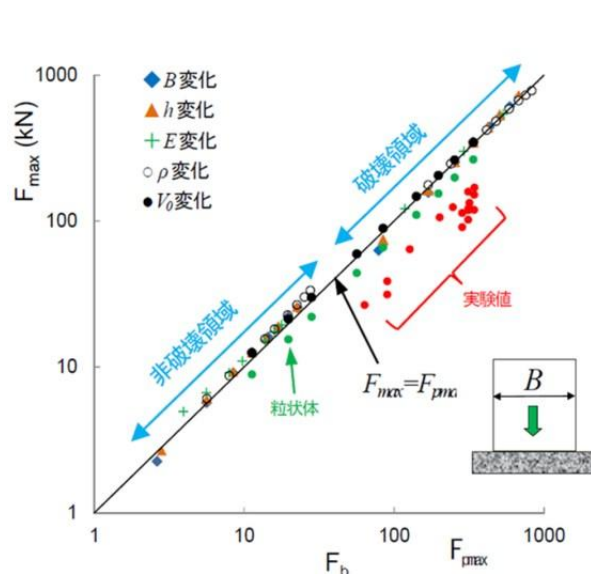
などから,

衝突速度に比例

$$F_{\max} = \frac{1+e}{2} \sqrt{\rho E B h} V_0 \cong \sqrt{\rho E B h} V_0 \quad (\because e \approx 1)$$

e は跳ね返り係数, h, B はそれぞれ氷厚, 氷の幅, そして V_0 は衝突速度

無限平面 (平板) に作用する最大衝突力

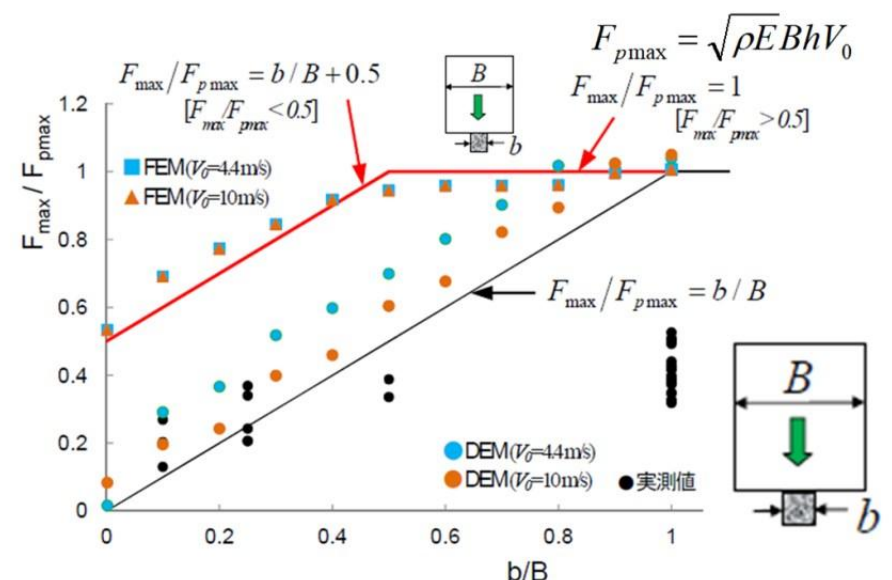


$$F_{\max} = \sqrt{\rho E B h} V_0$$

- ρ, E, V_0, B, h の変化に関わらず, ほぼその直線上に乗り, 単純な上式が成り立つ
- 実験結果も概ね簡易式の特徴は示している
- 非破壊の弾性領域および脆性破壊領域, つまり **破壊・非破壊の状態に無関係** に直線関係にあり簡易式が成り立つ
- 氷塊を構成する粒子の結合をすべて切断した場合の衝突力も, 7~8割程度に減じるもの意外にも大きい

DEMによる平板衝突の数値実験結果および簡易式との比較

角柱に作用する最大衝突力



構造物幅 (b) を考慮した最大衝突力の簡易式の検討. 実験および数値実験結果 (DEM および FEM) を考慮

海氷の陸上遡上計算法とハザードマップ作成手法

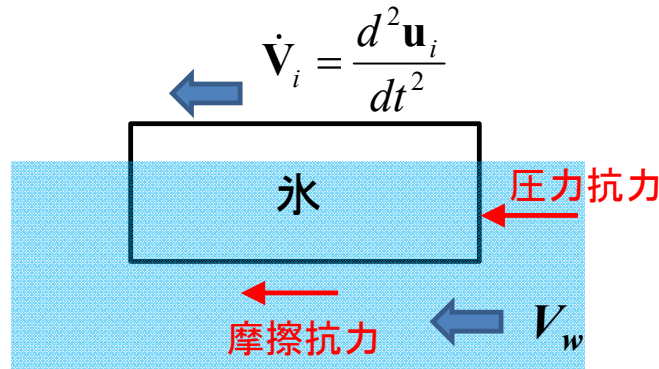
氷群の離散体性質の一つである, ice-jamやpile-up形成を考慮できる離散体の漂流や陸上遡上の計算手法の構築

2次元のDEM(木岡ら, 2009)に, 遡上やpile-up等の鉛直方向の運動を考慮した準3次元的な数値モデル [Kioka et al., 2019]

DEM要素は氷を構成する結晶レベルではなく, 流氷を巨視的に円盤と仮定

氷要素の運動方程式

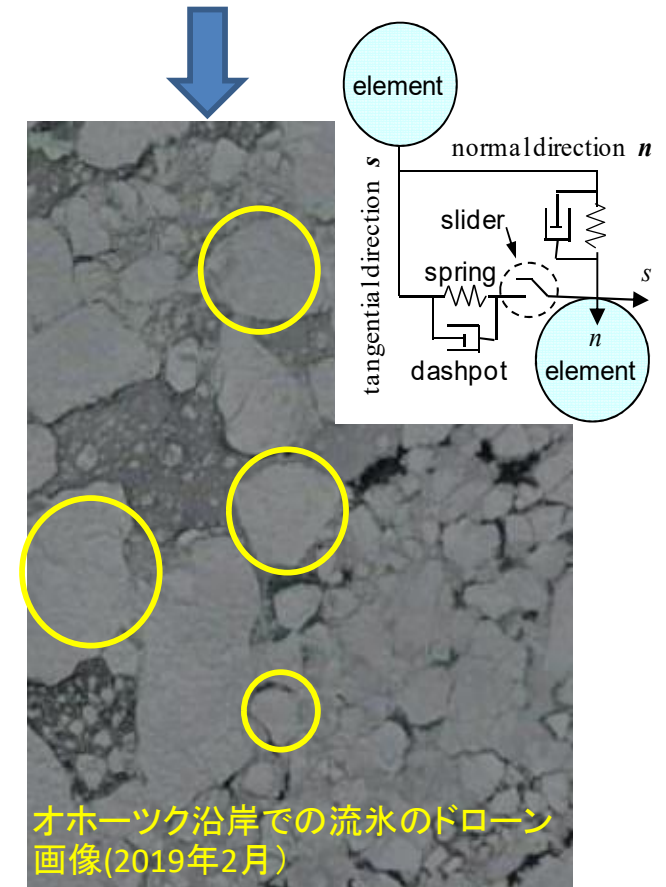
$$m_i \frac{d^2 \mathbf{u}_i}{dt^2} + \sum_j (\mathbf{f}_n^{ij} + \mathbf{f}_s^{ij}) + \mathbf{F}_i = 0$$



外力

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_i = & \frac{1}{2} \rho_w C_s A \overset{\text{摩擦抗力}}{|\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i|} (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i) + \frac{1}{2} \rho_w C_d h' \overset{\text{圧力抗力}}{|\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i|} (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i) \\ & + \rho_w A h' \overset{\text{圧力勾配}}{\dot{\mathbf{V}}_w} + \rho_w C_M A h' \overset{\text{付加質量力}}{(\dot{\mathbf{V}}_w - \dot{\mathbf{V}}_i)} \end{aligned}$$

ρ_w is water density, A and h' represent the area and the draft depth of ice, C_s and C_d are drag coefficients related to skin drag and form drag, and $\mathbf{V}_i$ and $\mathbf{V}_w$ are the velocity vectors of ice and water, C_M : added mass coefficient



オホーツク沿岸での流氷のドローン画像(2019年2月)

海水の陸上遡上計算法とハザードマップ作成手法

氷群の離散体性質の一つである, ice-jamやpile-up形成を考慮できる離散体の漂流や陸上遡上の計算手法の構築

Rafting / ice pile-up model

Shore pile up model [Kavacs and Shodhi, 1980]を準用

これに氷間の摩擦係数を考慮したものに改良

[Kioka et al., 2019]

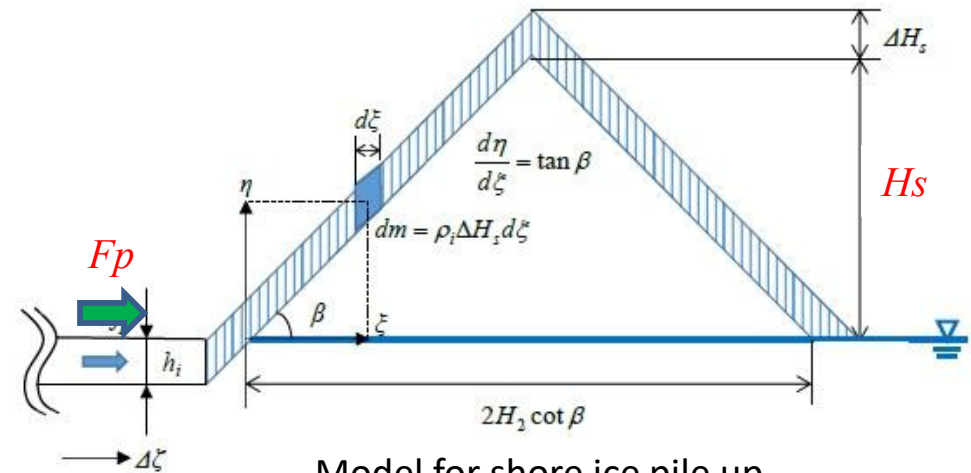


沿岸部でのパイルアップ状況例
(北海道湧別町, 西村組 提供)

the original model was modified by taking ice-ice friction into account

An external force F_p required to form a pile up with a certain height H_s

- Work and energy
- Mass conservation



Model for shore ice pile up
(Kioka et al., 2019)

μ_i friction coefficient between ice surfaces

ρ_i ice density

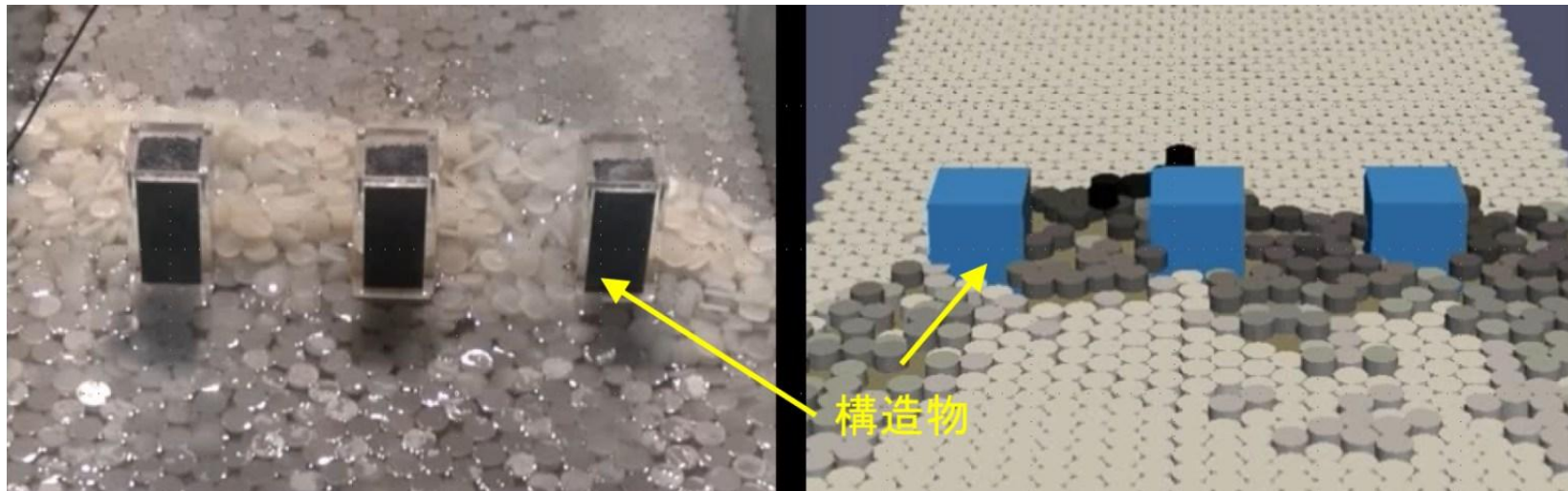
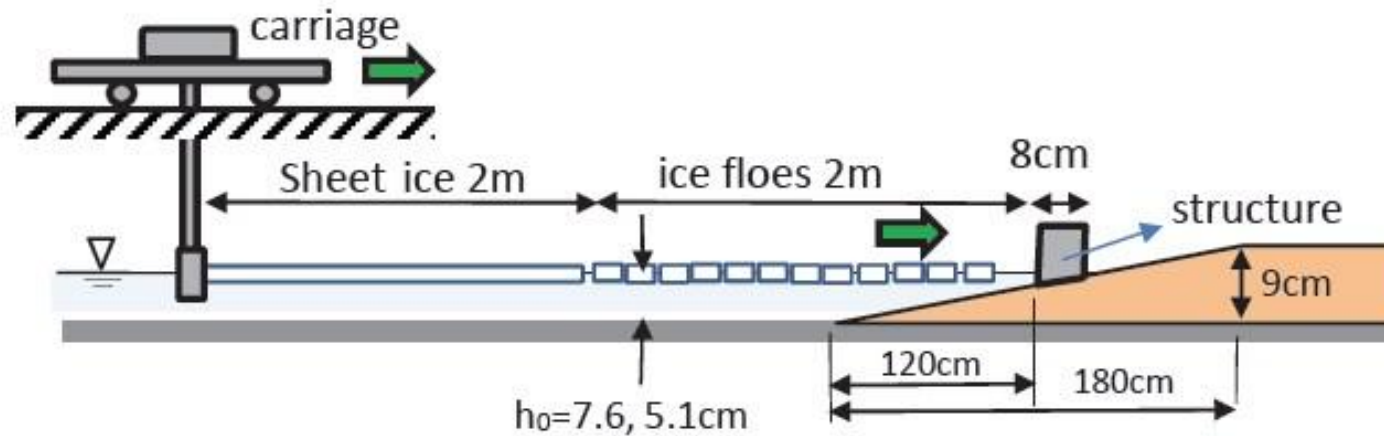
h_i ice thickness

H_s pile-up height in the pile-up model

$$f_p \cong \frac{1}{2} \rho_i g H_s h_i (1 + \mu_i \cot \beta)$$

海水の陸上遡上計算法とハザードマップ作成手法

氷群の陸上への遡上実験結果と数値計算との比較

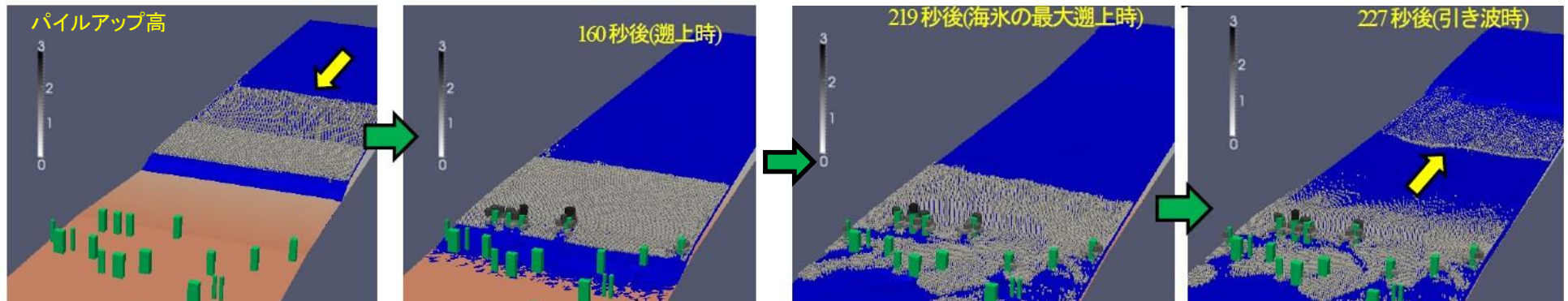


物理実験

数値計算

海水の陸上遡上計算法とハザードマップ作成手法

◆ 計算例1：一様斜面の単純地形に正弦波を作用させた場合

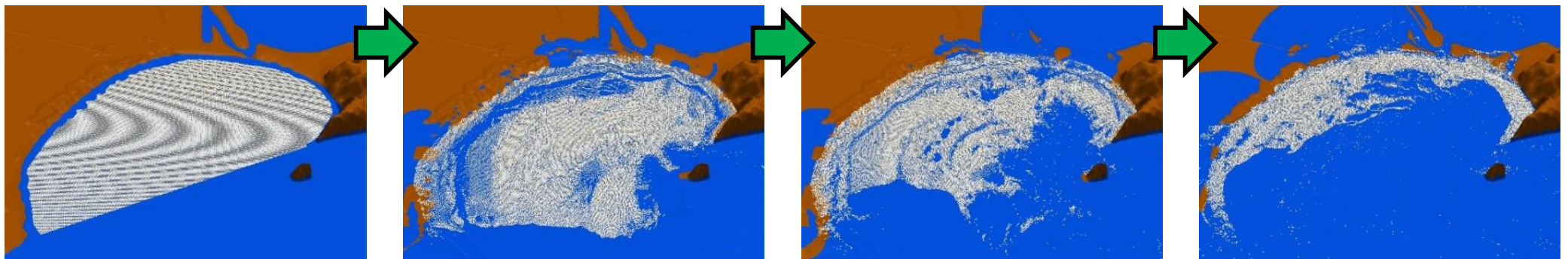


◆ 計算例2

北海道東部に津波+海水が遡上した場合

波源モデル:

1952年十勝沖地震ベース 直径5m, 厚さ0.5mの円柱の海水



ハザードマップへの適用を考えると、海水の遡上範囲のほか、パイルアップやジャムの発生リスクがある箇所が表示可能

海水の陸上遡上計算法とハザードマップ作成手法

ハザードマップへの適用例（イメージ）

◆ 建物被害状態の分布例

- ① 浸水深と建物被害状況の関係 (松富, 2009)
- ② 氷を伴う場合の等価浸水深への換算 (木岡ら, 2023) に基づく推定



0は陸域
-1は海域

ランク	被害状態
1	浸水・木造家屋の小破～中破
2	木造家屋の中破～大破
3	木造家屋の大破～コンクリートブロックの中破
4	コンクリートブロックの中破～大破
5	コンクリートブロックの大破～鉄筋コンクリートの大破
6	鉄筋コンクリートの大破

現地調査結果を踏まえた既往文献 (松富, 2009) 等をもとにやや修正)

◆ 海水の最大遡上域および海水がもたらす最大衝突圧力分布の例



0は陸域
-1は海域

レベル	圧力の範囲 (kPa)
1	0-200-
2	200- 400
3	400-600
4	600-800
5	800-1000
6	1000-1500
7	1500-2000
8	2000 -

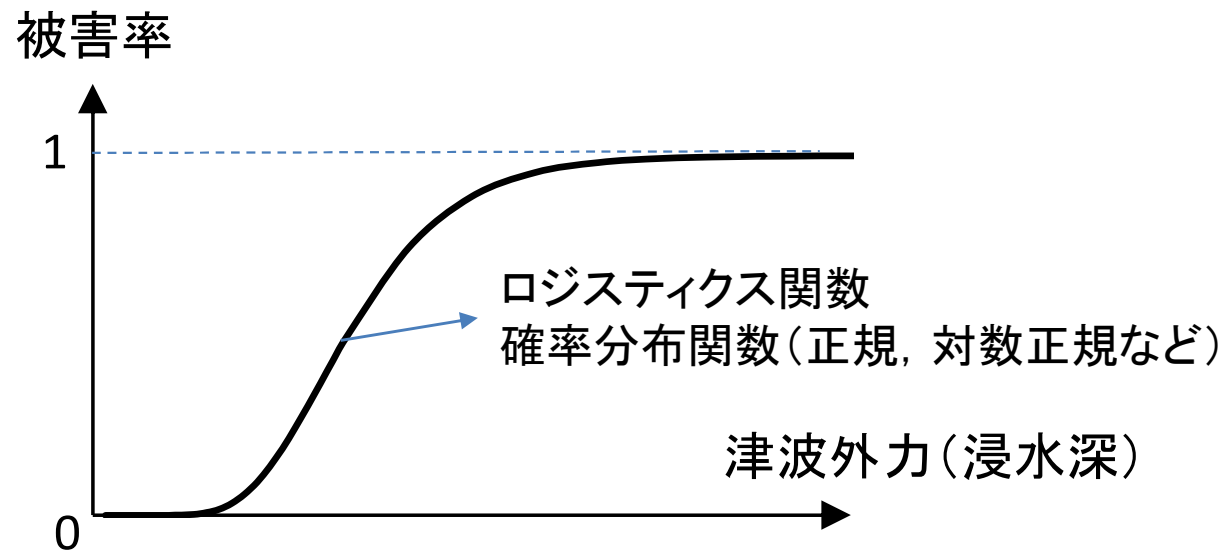
Pile-upやjam等の発生リスクがある箇所, 海水遡上範囲が理解でき, 重要構造物の設計や配置計画, 避難行動計画等を検討する上でも, 役立つ可能性

応用的な成果・防災対策・留意事項など

海水等を考慮した被害関数の簡易推定手法 [木岡ら, 2023]

被害関数

災害外力に対する人的・物的な被害規模を表す関係式 [越村ら, 2009]



既往の被害関数を海水漂流物等を考慮した関数に変換するごく簡易な方法を検討
津波被害は浸水深の関数である場合が多いため・・・

まずは、海水の有無に応じた津波力を浸水深で表す

応用的な成果・防災対策・留意事項など

海水等を考慮した被害関数の簡易推定手法 [木岡ら, 2023]

被害関数・・・災害外力に対する人的・物的な被害規模を表す, 被害想定等にご利用

- ◆ 津波漂流物となる**木材にも着目**, 自由落下による中規模程度衝突実験を実施
- ◆ 海水衝突力の**簡易予測式(前述)**が**木材にも適用可能**であることを確認
- ◆ その簡易予測式を用い, 既往の被害関数を海水等漂流物を考慮した関数に変換するごく簡易な方法を提案

算定方法の概要: 前述の**衝突予測式活用**. 津波外力(海水等漂流物の衝突力と海水の抗力)を浸水深 h の関数で表し、海水等を伴わない浸水深 h_0 に換算することにより、**海水等漂流物がない通常の津波被害関数を、漂流物を考慮した関数へ換算**する方法で算出. 本来とても複雑な現象で多くの不確定要因があるが、海水衝突力に関わる(漂流速度以外の)材料物性・諸元等の不確定要素を一つの係数に集約し、現存する流水を伴う津波被害記録(例えば1952年十勝沖地震)からそれを推定

水流のみの津波力(抗力) = 海水を伴う津波力

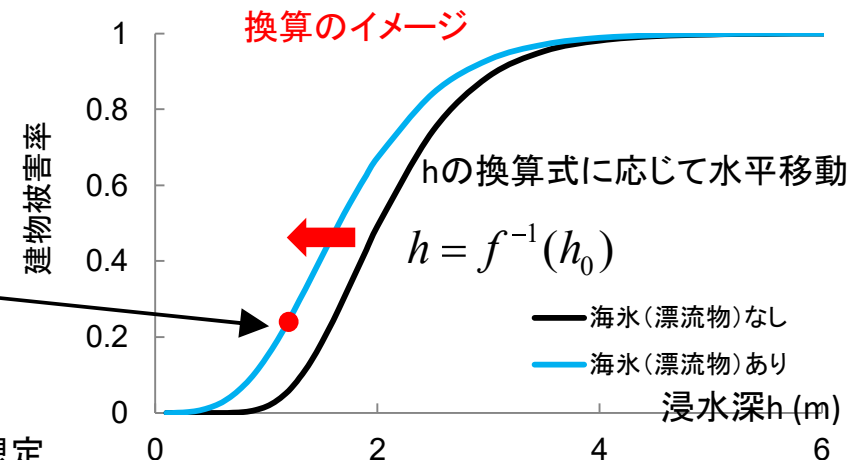
➡ **海水が伴わない浸水深 h_0 への換算式**

$$h_0 = f(h) \quad f() \text{は関数形を表す}$$

流水を伴う津波被害記録(1952年十勝沖地震など)

例えば、「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討WG, 第6回WG, 資料2」参照

注)被害関数はロジスティック関数, 対数正規分布などの使用を想定



応用的な成果・防災対策・留意事項など

河氷による被害想定（研究に着手）

北海道の河川結氷 [山下ら,1994]



3・11での氷の挙動例

◆ 河水の漂流可能範囲の簡易推定法の検討 ◆ 津波被害関数と合わせて被害想定可能

① 氷の最大移動距離の簡易推定

河口付近の最大津波高等より横断方向の最大(越流)流速を算出, 運動方程式より, 氷の最大移動距離を推定

WG提出資料
(一部抜粋)

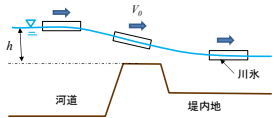
氷の運動方程式

$$\rho_{ice} A h_{ice} \frac{dV_{ice}}{dt} = \frac{1}{2} \rho_w C_s A |V_w - V_{ice}| (V_w - V_{ice}) + \frac{1}{2} \rho_w C_d b h_{ice} |V_w - V_{ice}| (V_w - V_{ice}) + \rho_w A h V_w + \rho_w C_M A h_{ice} (\dot{V}_w - \dot{V}_{ice})$$

簡略化

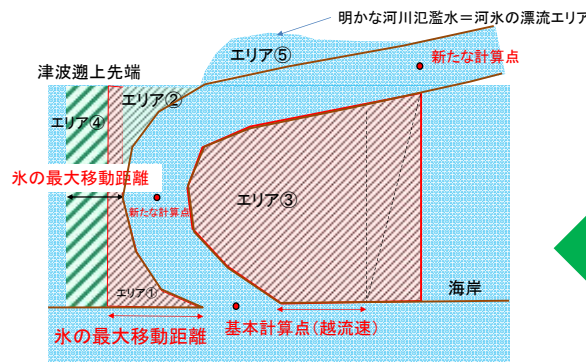
$$\rightarrow (\rho_{ice} h_{ice} + \rho_w C_M h_{ice}) A \frac{dV_{ice}}{dt} \approx -\frac{1}{2} \rho_w C_d b h_{ice} V_{ice}^2$$

ρ : 密度と速度ベクトル(添え字ice,wは氷, 水を表す), h_{ice} : 氷厚, h_{ice} : 氷の喫水深
 C_s : 氷に作用する摩擦抗力および圧力抗力係数, C_M : 付加質量係数, A : 氷の面積
 V_{ice} : 河道に直行方向の氷の漂流速度, b : 氷の幅



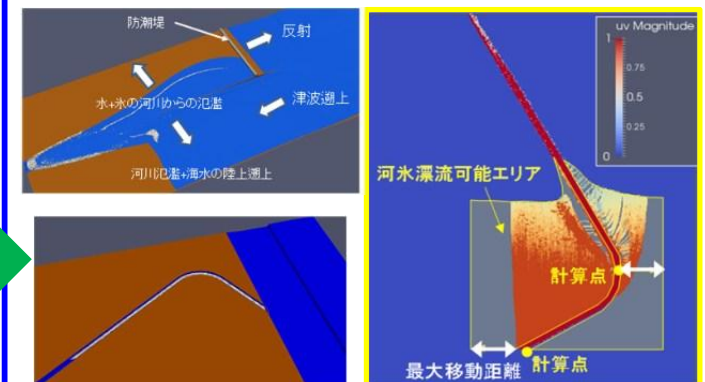
② 氷の漂流範囲の単純パターン化

例: 河道が大きく蛇行している場合



③ 数値計算法構築とそれによる検証

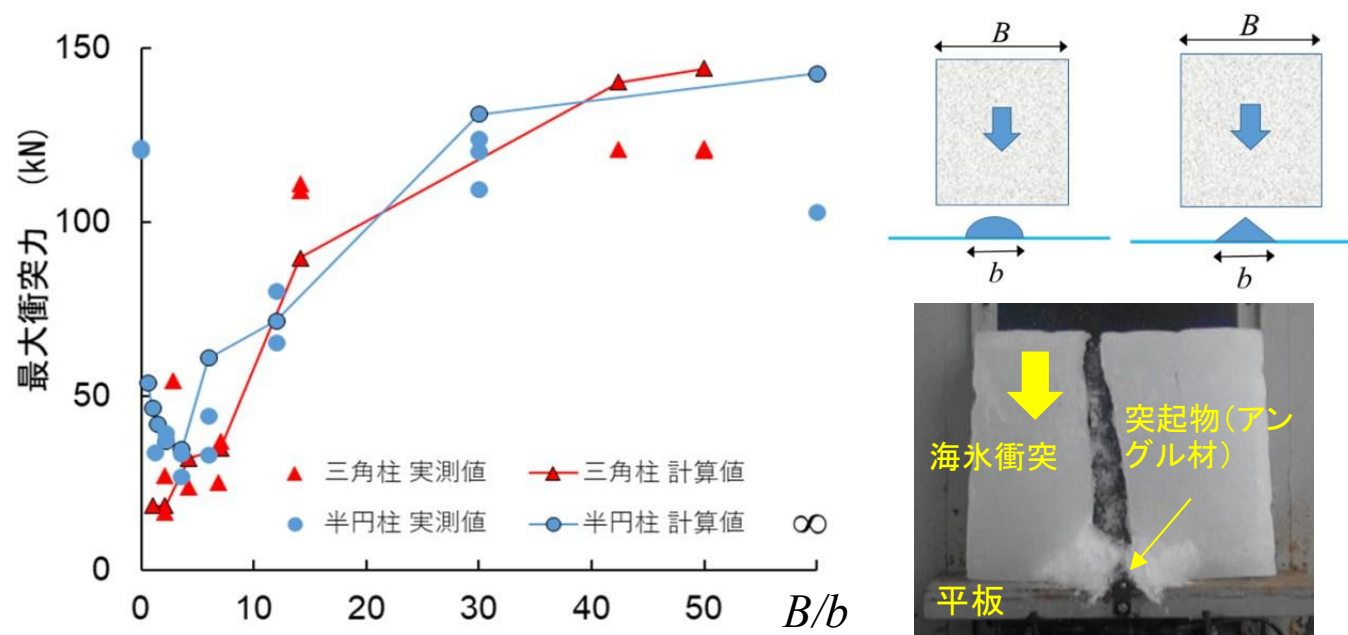
単純な地形・津波条件により, 河水の漂流範囲のパターンを把握&①②妥当性検証



応用的な成果・防災対策・留意事項など

海水衝突力の緩和方策 型鋼(アングル材等)も使用

- 平板に種々のサイズ(曲率)をもつ小型構造物(半円柱などの突起物)を装着することによる**衝突荷重の軽減効果**を調べる



▲ 荷重緩和で突起物を石油タンクに装着したイメージ

- ▲ 突起物(半円柱, 三角柱)が最大衝突力へ及ぼす影響
- 突起物として半円柱, 山形鋼含む三角柱について実施, 平板の最大衝突力に対して, **最大で1~2割まで軽減**
- 海水の衝突に対する重要構造物(石油タンク, 避難施設など)の防護など
 - ・防護工の設置
 - ・**突起物の設置**(上記との補助的・複合的な簡易対策→**多重防護のアイデア**)

応用的な成果・防災対策・留意事項など

氷を伴う津波のリスクのポイント

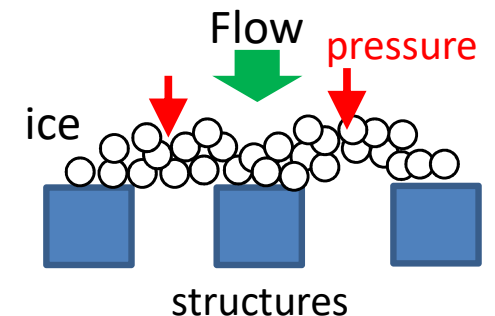
□ 海氷の衝突力

津波流れに乗って海氷が高速で建築物などへ衝突、
小規模な氷であっても、局部的に損傷を及ぼす可能性あり⇒避難施設の柱や石油
タンク等が危ない

□ アイスジャム発生

津波とともに流れてきた海氷群が隣接する建築物の間とか狭いと
ころで詰まると、氷が壁となり、水流をせき止め水位が上がる

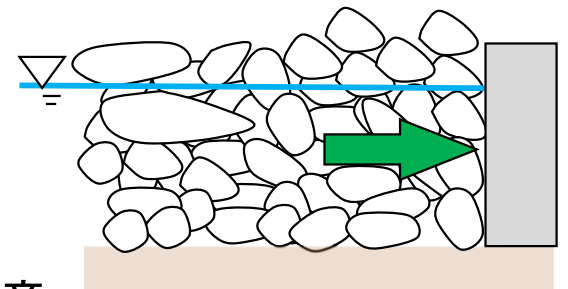
本来、水がすり抜けるはずの建築物の間にも大きな水圧が作用、
この余分な力が隣接する建築物が支えることになる



ゆえに、これら①水位の上昇、②建築物の間の水圧作用、により、初期の衝突で
建物が壊れなくとも、この力で崩壊に至る可能性がある

□ パイルアップ

アイスジャムとともに氷が高く積み上がる。水が引いても、積み上がった氷はそのまま残る可能性がある。土圧(主働圧)のような横向きの力が持続するので注意



余震や気象変化等により、氷が崩れてきたり、構造物崩壊に注意

応用的な成果・防災対策・留意事項など

防災対策

- ◆ 小中規模な津波であっても流水を伴うと大きな被害が出る可能性
⇒ **避難を軸**とした防災対策（ハードによる防護は現実的ではない）
- ◆ しかし、浸水域に津波避難施設（ビル・タワー）や2次災害を及ぼす石油タンク等の危険物など、**絶対に壊れてはいけない重要施設が存在すれば**、ハードで防護する必要がある⇒設計に際して、流水や漂流物等の作用（衝突）荷重の予測が必要



- ◆ 避難に際しては、アイスジャムによる水位上昇とパイルアップにより氷塊がより高い所まで迫ってくるため、**通常の津波に比べてより高い所へ避難することが重要**



応用的な成果・防災対策・留意事項など

防災対策

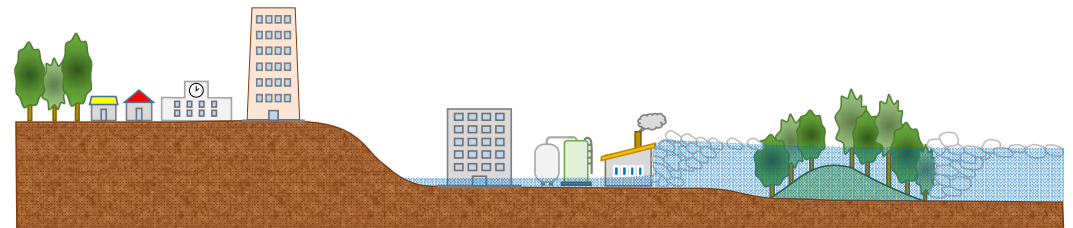
◆ pile upやjam等の発生リスクがある箇所や海水遡上範囲の把握



重要構造物配置計画, 安全な避難施設, 避難ルートの確保・設置
総合的な観点より防災に強いまちづくり

アイスジャムという特性を巧みに利用・・・

緑地(公園)・海岸林・樹林帯, 盛土構造物(道路), RC構造など頑丈・粘り強い構造物を前面に,
家屋等脆弱なものは背後に・・・



おわりに

- 流氷で覆われていても津波は減衰せずにやってくる
- 海でなくても河川を通じて津波が伝搬・・・河川氷にも注意
- アイスジャム・・・水位は上昇, パイルアップ・・・氷が高いところに迫ってくる, できるだけ高いところに避難
- 救助活動・救援物資輸送が大幅に遅れる
- 避難行動は敏速に
事前の防寒準備, 直ちに避難開始
避難経路, 避難場所の確認, 除雪
- 冬期の避難訓練, 自分の命は自分で守る