

## 5. 2 海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒冷沿岸域チーム、寒地技術推進室

研究担当者：木岡信治、菅原健司、大井啓司

### 【要旨】

極めて過酷でユニークな環境を構成している氷海域における多種多様な環境外力や氷象を明らかにするとともに、その過酷な環境に晒される海洋・沿岸構造物の合理的な耐氷設計法を提案した。個別的には、まず、オホーツク沿岸において、IPS や ADCP を用いた海氷観測を実施し、流氷移動や喫水深分布、そして凹凸特性等を定量的に明らかにするとともに、オホーツク海に常設されている波向・波高計測用の超音波式波高計（海象計）を活用した安価で恒常的な海氷観測システムを提案した。また、流氷制御施設（アイスブーム）への氷群の作用形態や準静的な荷重特性等を明らかにし、実用的な作用力（設計荷重）推定プロセスを提案した。さらに津波来襲時の氷塊の構造物への衝突等を想定した動的荷重推定法の構築を目的として、人工海氷を用いた中規模程度の衝突実験を実施するとともに、氷塊の3次元の衝突破壊シミュレーション手法を開発した。これらの実験および数値実験結果より、氷塊の衝突破壊メカニズムを明らかにするとともに、平板に作用する氷塊の衝突荷重の簡易推定式を提案した。最後に、流氷の接触・摩擦にともなう鋼構造物の基本的な損耗機構を明らかにし、主な機構を流氷の接触摩擦による腐食生成物の繰り返し剥離に起因する腐食促進とした場合の簡易な損耗推定式を提案した。

キーワード：海氷、流氷、津波、オホーツク海、アイスブーム、衝突、摩擦、腐食、DEM、海象計、超音波

### 1. はじめに

オホーツク海は、我が国において、唯一の氷海域である。ユニークで過酷な自然環境を構成する氷海域においても、社会的ニーズに対応した海岸・港湾施設の高度化・多様化、建設および維持管理のコスト削減を可能とする技術の確立が急務となっている。本研究では、このような要請に応えるべく、特に暴浪や津波時等の一層過酷な条件も想定した氷海域における海洋・沿岸構造物の崩壊や変形・損傷をもたらす海氷群の静的・動的な氷荷重推定法の提案ならびに氷群の接触・摩擦によって確実に進行する構造材料損耗・劣化機構の解明とその推定法を明らかにする。また流氷観測を継続的に実施し、それらの推定に必要な、流氷の挙動や大きさに関する統計量や統計分布等の入力条件を整備するとともに、低コストかつ恒常的な流氷観測システムも提案するものである。過酷で複雑な氷海域システムにおける多種多様な環境外力と構造物の変形・劣化等の応答特性の解明とその推定手法等を統一したかつ一体的に取り組んだ研究例は国内外になく、本研究成果は国内に対してのみならず、鉱物資源や石油天然ガス開発等で今後活性化される北極海への適用も期待できる。

本研究での個別テーマ毎について紹介すると、まず第2章では、北海道オホーツク沿岸において、IPS や ADCP

を用いた海氷観測結果と、流氷移動や喫水深分布、そして凹凸特性等の定量分析結果について述べ、本成果の有用性と実務への適用例について述べた。

他方、北海道開発局が、紋別沖に波高・波向、流速の計測を目的として超音波式波高計（海象計；カジョーソニック製）を常設しており（図-1.1 参照）、そのデータを流氷観測にも利用できれば、観測に伴うコストを大幅に軽減でき、恒常的な流氷観測も期待できる。そこで、その海象計の流氷観測への適用性を検証することを目的とした研究を実施した。第3章では、その海象計の流氷観測への適用性を検討し、その有用性を示すとともに、安価で恒常的な海氷観測システムを提案した。

第4章では、アイスブーム型海氷制御施設的设计法に関する研究について述べた。アイスブームは、図-1.1 に示すように、木材、鋼製のフロート、ネット、それらを連結するロープやワイヤなどで構成されており、移動する氷を制御する機構となっている。サロマ湖では、過去に多発していた湖内への流氷流入によるホタテなどの養殖施設の被害を防止するために湖口部に防氷施設（アイスブーム）が設置され、2009年には、能取湖口での設置も完了した。今後多目的でアイスブームが活用される可能性もあり、より合理的な設計方法が望まれる。ま

た、一般の沿岸施設の流氷群との接触による劣化損傷評価の観点からも、流氷群挙動や接触荷重・圧力などを推定する手法の確立が必要である。過去に水理模型実験が精力的に行われ<sup>1)2)3)</sup>、サロマ湖の防氷施設の設計に大きく貢献した。しかし、非連続体である流氷群との構造物との干渉が非常に複雑であり、特に、湖口部の形状・地形、氷群下面凹凸等に大きく依存し、未だ多くの課題が残されている。そこで、本研究では、過去の実験を拡張した水理模型実験や、特に氷下での流れによる抗力や境界層厚に関する理論的研究、DEM による数値計算の多角的な研究アプローチにより、複雑な流氷群のアイスブームへの作用形態や準静的な伝達荷重等を明らかにし、実用的な作用力（設計荷重）推定プロセスの提案をした。

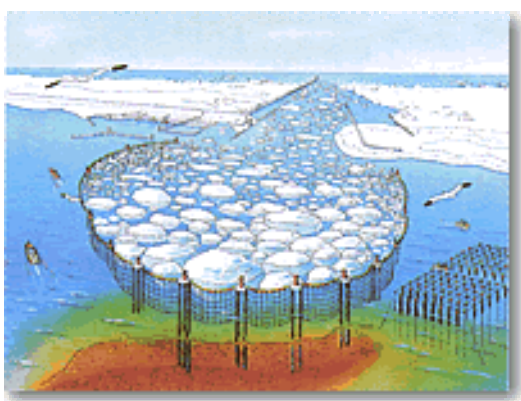


図-1.1 アイスブームのイメージ（サロマ湖口）

第5章では、津波来襲時の氷塊の構造物への衝突等を想定した氷塊の衝突破壊や衝突・動的荷重について検討した。冬期の北海道北東部沿岸域などの流氷域に津波が発生すれば、大きな被害を及ぼす可能性がある。事実、1952年3月、十勝沖地震で発生した津波により流氷が遡上し、図-1.2に示すように、家屋が損壊した例も報告されている。また、近年の流氷量あるいは密接度の減少に伴い、個々の流氷が波浪によって活発に運動しやすい状態となり、高速で構造物に衝突する頻度が増加することも考えられる。実際様々な被害も報告されている。ゆえに、港湾・海岸付近の重要構造物、その防護構造物などの設計には流氷による衝突も考慮する必要があるがその研究例は少ない。本研究では、水理模型実験より津波とともに護岸を超える海水の基礎的な挙動を調べた。また、人工海水を用いた中規模程度の衝突実験を実施するとともに、氷塊の3次元の衝突破壊シミュレーション手法を開発した。これらの実験および数値実験結果より、氷塊の衝突破壊メカニズムを明らかにするとともに、平板に作用する氷塊の衝突荷重の簡易推定式を提案した。



図-1.2 流氷を伴った津波による被害例

最後に、第6章では、海水による沿岸鋼構造物の損耗現象について検討した。北海道オホーツク海沿岸部等における港湾・海岸構造物（鋼）表面は、通常の腐食に加えて、冬期に来襲する流氷による接触・摩擦を起因とする摩耗や腐食促進といった損耗が生じており、他の海域に比較して早期に材料の劣化が生じることが報告されている。とくに昨今の気候変動による海氷減少は、海氷運動の活発化や漂流速度の高速化を招き、氷塊の衝突や、海水の接触や摩擦による構造物の腐食や摩耗の促進などといった構造物の損傷・劣化がより加速する（図-1.3）。本研究では、構造物への海水接触圧に関する数値計算、劣化状況の現地調査、摩耗および腐食に関する人工海水と鋼材との要素実験より、基本的な損耗機構を明らかにした。また、主な損耗機構を流氷の接触摩擦にともなう腐食生成物の繰り返し剥離に起因する腐食促進とした場合の簡易的な損耗推定式を提案した。他方、損耗が著しい沿岸部での注意深い現地調査から、新たな重要な要因があることも突き止めた。



図-1.3 オホーツク海に面した鋼矢板の流氷による劣化例

## 2. 流氷観測

### 2.1 観測方法

観測は、図-2.1 に示すようにドップラー式多層流速計 (ADCP, RD Instrument 社製 WH-ADCP) および氷厚計 (IPS, カナダ ASL 社製 IPS-4) を、図-2.2 に示す、沖合 8.2km, 水深 52m (紋別海象計付近) (P3) に各一基ずつ海底に設置し、流氷の移動方向・速度、喫水深、海 (潮) 流の方向・速度を連続観測した。なお、参考としてこの

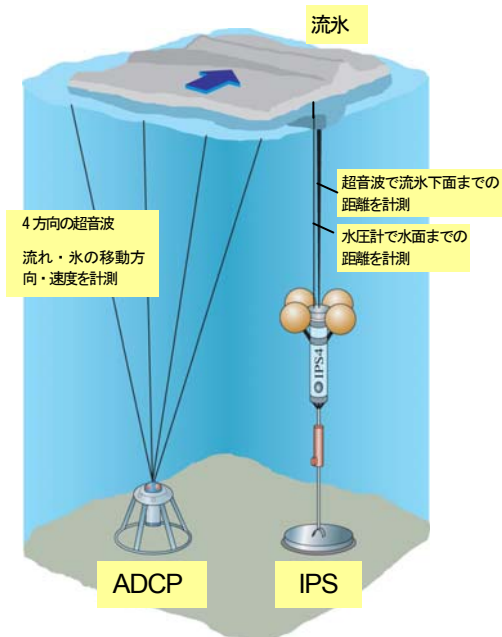


図-2.1 ADCP と IPS による流氷観測のイメージ

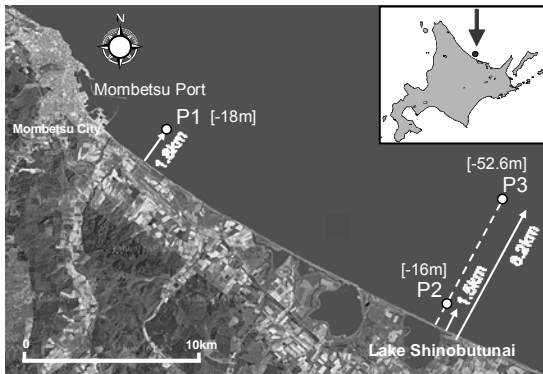


図-2.2 観測地点

表-2.1 分析に用いた調査データ

	調査年	分析期間	調査地点
①	2001年	2/8-2/19	P1
②	2004年	2/26-2/27	P2
③	2007年	2/10-2/21	P3
④	2008年[1]	1/28-2/11	P3
⑤	2008年[2]	2/27-3/7	P3
⑥	2009年	2/21-2/25	P3
⑦	2009年	2/5-2/19	P3

5 年以前からも実施していた観測結果も合わせて報告する (地点 P1, 地点 P2)。

### 2.2 観測結果

本報では、これまで取得したデータの定量分析を行い、特に、流氷下面凹凸の時空間的類似性について考察するとともに、直感的な凹凸の大きさを表す簡易手法を提案した。流氷の下面凹凸データは、IPS による流氷喫水深の時系列データを、ADCP による流氷の移動速度のデータを用いて、空間データに変換したものについて分析した。表-2.1 には、比較のための分析対象データを示した。第一区海上保安本部の海水速報もしくは宇宙航空研究開発機構地球観測研究センターの衛星画像の解析を参照して、観測機器上に流氷がないと判断された期間は除外した。データ①, ②, ③~⑥との比較は地点・年の違いによる凹凸特性について比較検討できるし、データ③~⑥の比較は、同一地点での年変動性、データ④と⑤の比較は、同一地点・同一年における時間発展的な違いについて考察できる。結果を下記に要約する。

- 風変動と流氷の漂流速度の変動とは非常に高い相関があり、その相互相関が 0.6 であった。また海流の表層部 6m では流氷の影響を受けてほぼ流氷の漂流に追従し、流氷下の境界層内であることが確認された。より深い層では、追従性 (相関性) は落ちるが、剪断応力は伝達されていた。開水面においても、ごく表層は風の剪断力を直接受け、流氷期と比較して早い流れであること、境界層厚あるいは剪断の影響を受ける層厚は、流氷期の方が大きい事が推察された。また、密接度が低いほど、風と流氷の動きの相関性が高いと考えられた。流氷の動きは、その変動性については風の影響を受け、平均的な動きについては風と海流 (宗谷暖流など) の両方の作用を受けることが推察された。

(図 2.3, 2.4 参照)

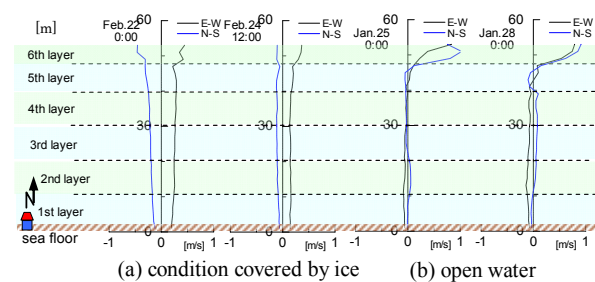


図-2.3 氷下および開水面での流れの鉛直プロファイル例 (Jan.-Feb., 2009)

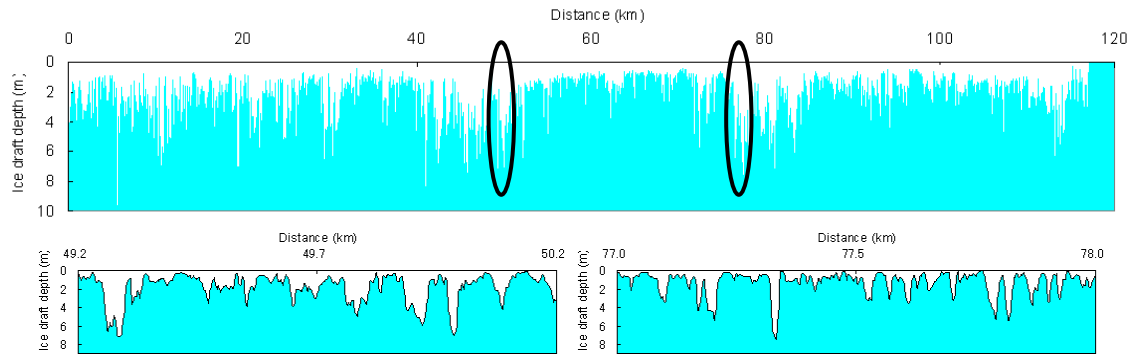


図-2.5 (a) 流水下面形状の一部拡大例 (Jan. 28 - Feb. 11, 2008)

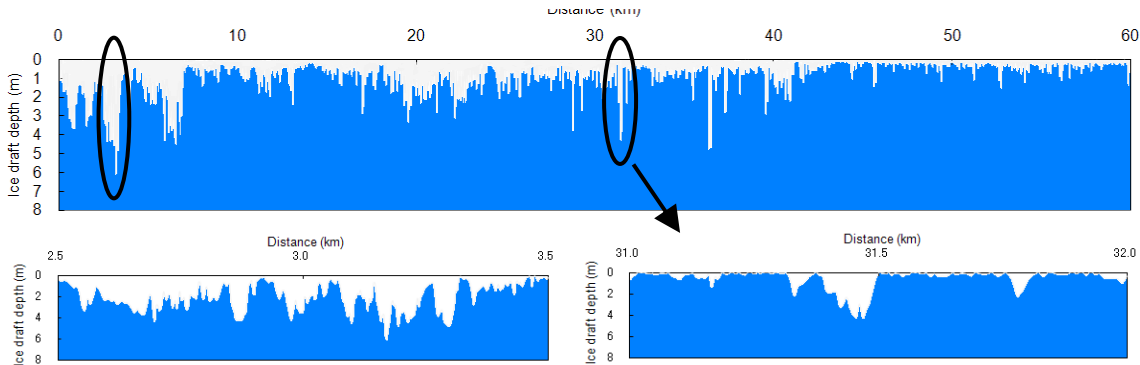


図-2.5 (b) 流水下面形状の一部拡大例 (Feb. 5 and 19, 2010)

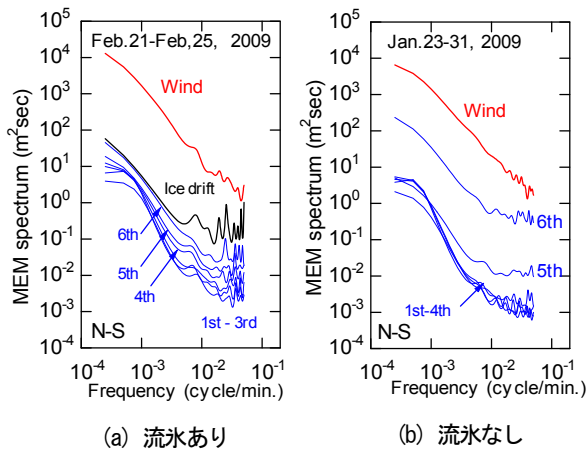


図-2.4 風速、流氷の移動速度および各層における流速の変動スペクトル例 [N-S成分] (Jan.-Feb., 2009)

- 流氷下面は平坦ではなく、数mの凹凸をもつ変形氷であることが推察され、過去の傾向と同様であることを確認した(図-2.5).
- 流氷喫水深の確率分布は指数分布に近いものであった(図-2.6).
- 各年の代表正規化スペクトルの比較を行った。実用的には概ね過去のスペクトルと同一と見なすことができた。つまり、過去の流氷観測地点の相違も考慮にいれると、時間的にも空間的にも代表される正規化スペクトルは共通のものであることが

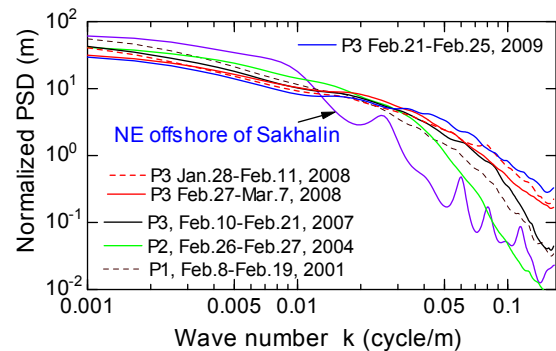


図-2.7 既往の調査で得られた代表正規化スペクトルの比較

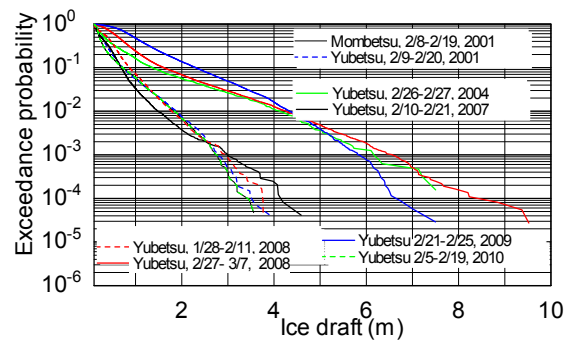


図-2.6 流氷喫水深の超過確率分布

仮定できるほか、代表正規化スペクトル特性（凹凸特性）は、年変動が少なく年によらず共通であ



るという重要な結論が得られた (図-2.7).

- 非ガウス過程, 非定常性を有する複雑な海氷断面の凹凸は, その「共通で代表的な正規化スペクトル」, 及びその非定常性を間接的に表現する「海氷喫水深の分散 (標準偏差)」に集約され, この 2 つのパラメータのみを用いて氷下面の凹凸をシミュレーションする手法を提案した(図-2.8).
- 標準偏差を用いて, 直感的・視覚的な流氷下面の凹凸の大きさの指標を開発することを目的として, 海の波にならって有義振幅について検討した. 有義波高は, それが直感的かつ自然に感じられる波の高さを与えるといわれている. 標準偏差と, ゼロアップクロス法による有義振幅との関係は直線であり, 標準偏差に 3.3 を乗じると有義振幅 (海

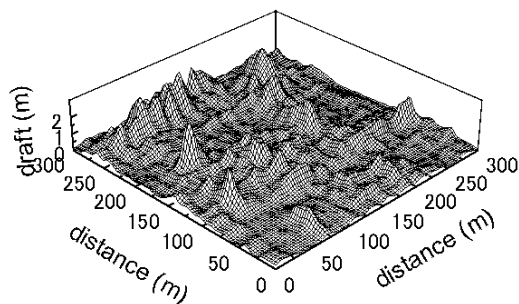


図-2.8 流氷下面凹凸のシミュレーション例

[all spectra of sea ice draft profiles horizontal to the x-direction and those to the y-direction are equal]

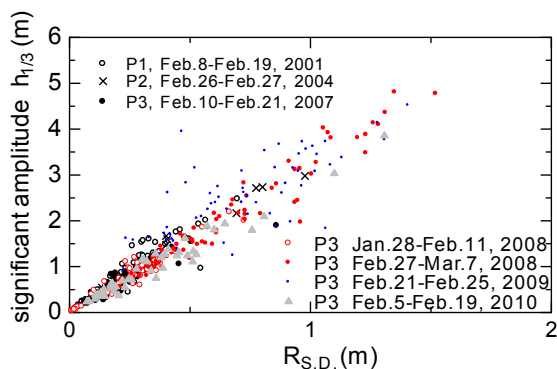


図-2.9 各局所定常区間における流氷喫水の標準偏差  $R_{S.D.}$  と有義振幅  $h_{1/3}$  との関係

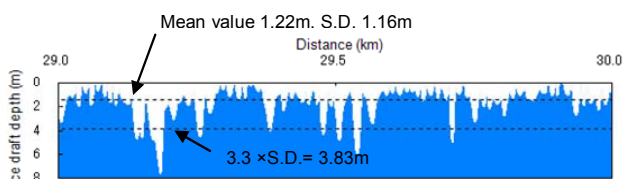


図-2.10 局所定常区間における流氷下面 (凹凸) 形状例と, 凹凸の代表高さの表し方 (平均値および有義振幅)

の波の場合は理論的に 4) となることが分かった (図-2.9). 実際, 定常区間における流氷下面形状において, その標準偏差に 3.3 を乗じた有義振幅は, その区間の流氷下面の凹凸の高さを直感的・視覚的に表現し得るものであった(図-2.10).

## 2.3 本研究結果の実用的な活用と課題

本観測結果と分析結果の活用方法については種々考えられるが, 海氷と構造物の干渉時の挙動や氷荷重推定等の入力条件や境界条件としての役割がある. この場合, 挙動や荷重の時刻暦のシミュレーション, 同時に 1 次元または 2 次元の海氷の喫水深や下面凹凸のシミュレーションを実施する必要がある. 本分析結果が活用される. これはまた構造物の信頼設計にも容易に対応できるものである. また, 流れによる氷群抗力 (例えば後述のアイスブームへの氷群伝達荷重) に含まれる抗力係数を推定する際の (本来ランダムな) 凹凸特性を代表する単純な指標として参照可能であり, 単純な凹凸模型氷による模型実験との関連づけ等が可能である. 例えば, 実海域において主な凹凸特性を備えた単純な凹凸による模型実験によって抗力係数を推定することが可能となる. また, 近年サハリン北東部で石油・天然ガス開発が活発となっているが, 北海道近海で油流出事故が起こる可能性が高くなってきている. 万一の事故に備えた氷下での油の拡がり予測や油の回収計画には, この海氷下面凹凸の推定が重要であり, 境界条件として用いられる. 上述のように, 観測結果や分析結果を用いた海氷喫水深や下面凹凸のシミュレーションの実用的な手法を開発している (図-2.8, 図-2.11 参照).

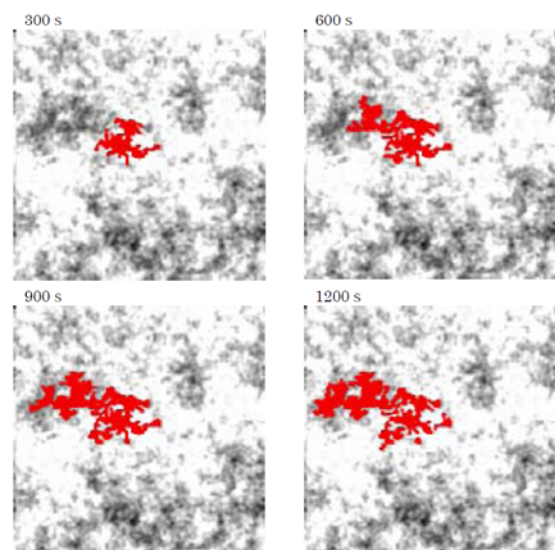


図-2.11 凹凸氷板下の油の広がりの計算例

### 3. 流氷観測への海象計の適用性に関する基礎的研究

#### 3.1 研究方法

まず、人工海氷を用いた小規模な水槽実験により、海象計(USW) (図3.1) の流氷観測への適用に有望性があることを確認した。また、現地海象計の超音波信号の取得ならびに現地データ収録装置による生データの収集を行った。そこで、その超音波信号の分析ならびに音速補正の必要性の有無について調べ、海象計現地データ収録装置で得られたデータと、その付近に設置した前述の IPS によるデータとの類似性について定量的な比較を行った。さらに、USW のドップラー成分も分析し、USW 付近に IPS とともに設置している ADCP のボトムトラッキングモードによるデータと比較し、海氷挙動 (移動方向・速度) についても、USW が適用できるかどうかについても検討し、総じて流氷観測への海象計の適用性について検討した。

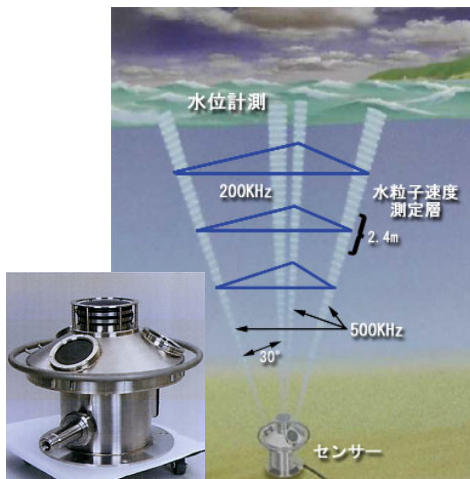


図-3.1 海象計(USW)による計測イメージ

#### 3.2 人工海氷を用いた小規模水槽実験による検討

##### 3.2.1 実験の概要

寒地土木研究所内のほぼ満水状態の大型造波水路 (長さ 85m×幅 1.6m×高さ 3m) に予め製作した模擬氷 (試験体) を型枠内に浮かべ、水路底部から鉛直上向に海象計と同じ 200kHz・半減全角 3°の超音波を発信させた (図-3.2)。その模擬氷からの超音波受波信号 (音圧変化) を PC にデータ収録した。一方、模型氷の厚さ変化等は、スケールを含めて水槽側面からビデオ撮影した。模擬氷 (試験体) は、同研究所内の低温観測室 (-10℃程度に設定) を利用して、水道水を凍らせた淡水氷、および 30%の塩を水道水に溶かした塩水を凍らせた塩水氷を作成した。形状は以下の通り

① 板状氷：40×40×30cm (厚さ) の立方体

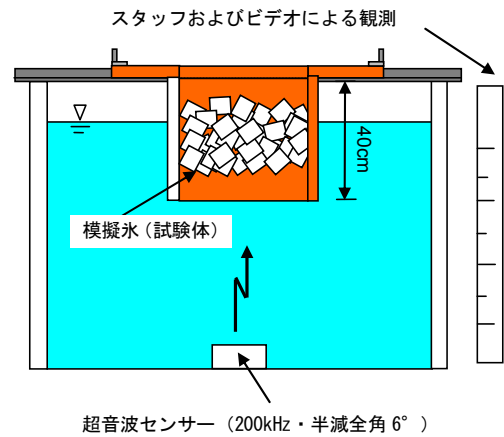


図-3.2 室内実験の概観



ラブル状氷の概観



ラブル状氷の設置状況

図-3.3 模擬氷 (試験体) の概観と設置状況の例

② ラブル状氷：一辺が 8cm 程度の氷片の集合体で、集合体のサイズは、板状氷と同じ 40×40×30cm (厚さ) とした。従って、①と②の形状の氷を、淡水と塩水の氷 2 通り、合計 4 種類の氷を作成した (図-3.2 参照)。

##### 3.2.2 主な結論

■ 板状、ラブル状、また淡水か塩水かにより、やや異なる結果が得られた。一連の結果から、気泡を含む不純物を多く含んでいる塩水氷の方が十分な反射音圧を捕らえることができた。また、凹凸が著しく、複雑な配列をもつラブル状の場合、センサに一番近

いところからの反射を捕らえることが分かった。別途、実施した板上氷を斜めに固定した場合の実験結果からも、このことを確認できた。以上より、実海域で対象としている喫水の大きな流氷は、このような塩水氷でラブル状から構成される複雑な変形氷 (Ice ridge) がほとんどであるが、このような複雑な氷群を計測できる根拠が得られた。

- 距離減衰を考慮し、50m 深の海象計センサからの超音波を使用して流氷の底面までの距離測定は十分に可能であることが推論された。

### 3.3 現地海象計の波形分析

#### 3.3.1 概要

紋別観測局舎において流氷下面からのエコー(主に超音波信号を電氣的信号に AP-100 海象計本体より波高計測に使用している 200kHz 超音波の反射信号)を測定し、反射信号を分析した。また、海象計現地データ収録装置で得られたデータと、予め海象計付近に設置した前述の IPS によるデータ (海水喫水深) との比較を行い、海象計 (USW) による流氷喫水深の推定が可能であるかについて概略的に検討した。さらに、USW のドップラー成分も分析し、USW 付近に IPS とともに設置している ADCP のボトムトラッキングモードによるデータと比較し、海水挙動 (移動方向・速度) についても、USW が適用できるかどうかについても検討し、総じて流氷観測への海象計の適用性について検討した。

#### 3.3.2 主要な結論

##### (1) オシロスコープの波形分析より

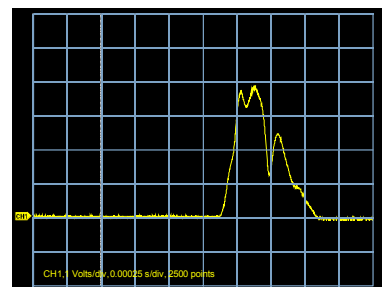
- オシロスコープの波形形状より、流氷がある場合の波形は鏡面反射とならないために、レベルが下がってピークが複数出来ていた。反射強度については、流氷があるときの反射波の強度は海面の反射の-6B であることがわかった。これは、オシロスコープで計測した波形に、ピークが複数出来ていたことから、反射面が海面のように滑らかでないため、鏡面反射ではなく、乱反射していることが考えられた(図-3.4)。

##### (2) 海水喫水深計測の USW の適用性について

- USW による喫水深 (特に凸部の大きさ) の方が、IPS に比べ小さい傾向にあった(図-3.5, 3.6)。これは、信号処理アルゴリズムの相違のほか、両者のビーム幅や周波数の相違などに起因する。USW のビーム幅は IPS より大きいため、凹凸が平均化され、特に凸部の大きさがやや過小評価されること、USW の

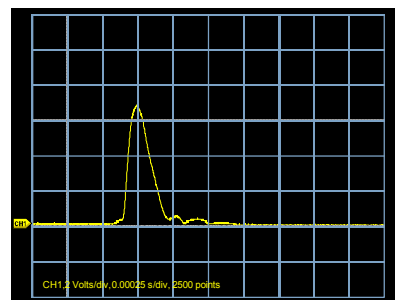
周波数は IPS より低く、その感度がやや劣る事などが挙げられる。

- しかし、USW と IPS は約 100m 離れており、流氷下面の凹凸のスケールを考えると、両者は一致することは期待できないものの、両者の波形パターンは類似している、つまり、波形の形状 (0 を最小値にもつ非対称・非ガウスの波形) が類似していること、時刻歴にみる流氷の喫水深の出現頻度が概ね同程度であり、同様な統計的性質があることが分かった(図-3.5, 3.6, 3.7)。
- 特に実用上、重要となる流氷下面の凸部の大きさ (keel 長) は、USW データ (喫水深) を、水温に応じて音速補正し、それをハイパスフィルタに通したものを 1.33 倍して、その他の誤差などを考慮することにより概略推定できることを提案した(図-3.8)。
- 水温に応じた音速補正については、水温を 0°C と仮定して補正すればよいことを示した。
- 以上より、既設の海象計を活用した流氷喫水深の概略推定が可能であること確認した。



TDS 2002 - 11:35:03 2007/02/22

(a) 流氷あり



TDS 2002 - 10:48:33 2007/02/23

(b) 流氷なし

図-3.4 超音波受波波形の例 (波高)

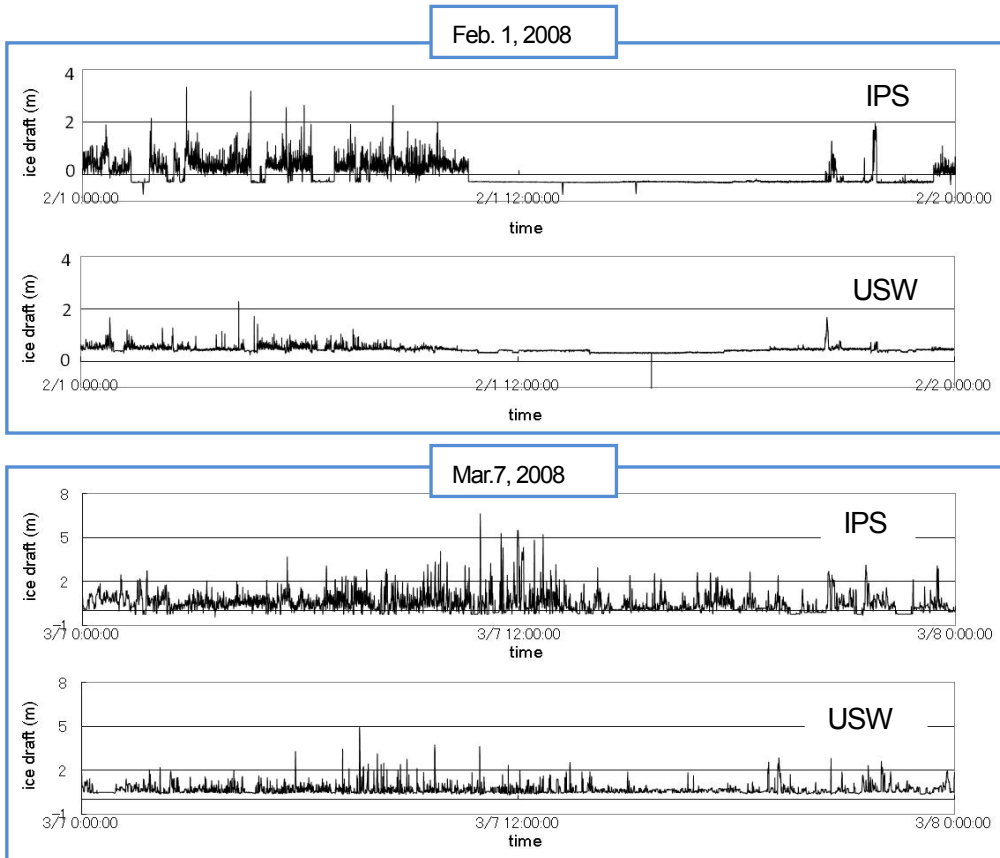


図-3.5 海象計および IPS によって得られた流氷喫水深の比較例(2008 年)

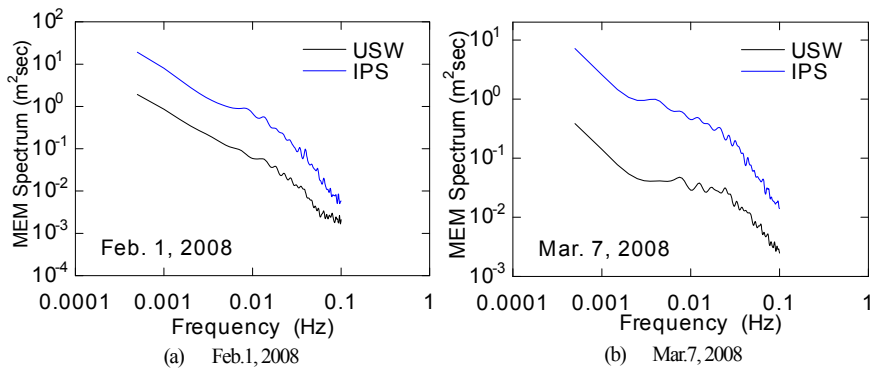


図-3.6 USW と IPS による流氷下面凸部の経時変化(図-3.5 に対応)の周波数スペクトルの比較例

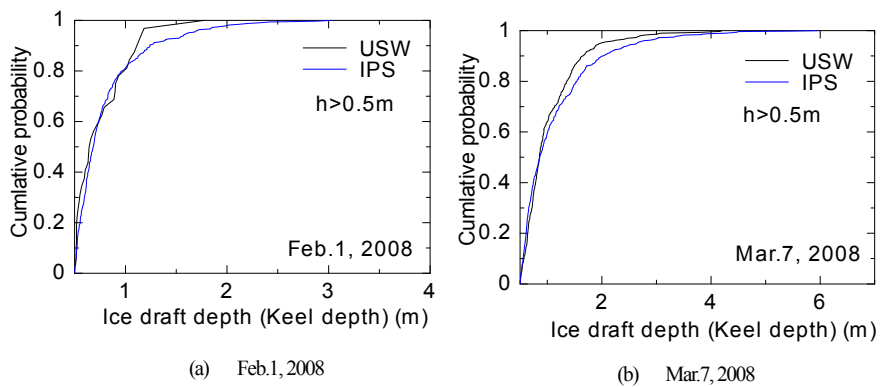


図-3.7 USW と IPS による海氷下面凸部の累積度数分布の比較例 (0.5m 以上)



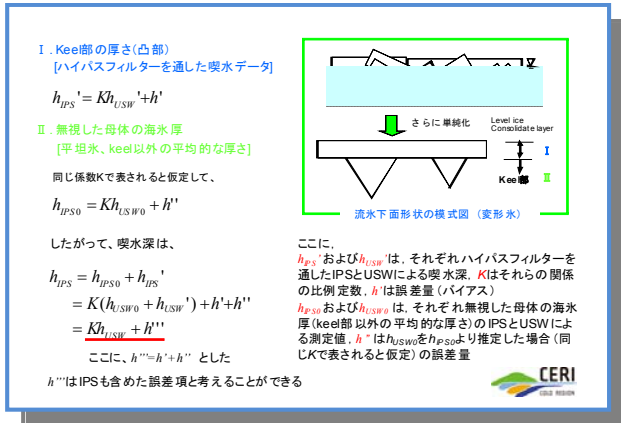


図-3.8 USW データによる喫水深さの推定法

(3) 海水挙動(移動方向・速度)計測のUSWの適用性について

海水挙動(移動方向・速度)についても、USWが適用できるかどうかについても検討した。USWには、上述のように、鉛直上向に超音波を発し水位(波高)を計測するセンサ(200kHz, ビーム幅3°)と、それから各測定層の流向、流速を測定するドップラー式の超音波センサ(500kHz)も装備している。両者とも計測原理は、前章で説明したIPSやADCPと同じで、1台の水中センサで波高・波向・流況等の多項目同時観測ができ、いわばIPSとADCPを1台のセンサとして組み込んだ装置である。しかしながら、USWは、ADCPのボトムトラッキングモードに相当する機能がなく、流氷の動きを直接計測できるわけでない。しかし、流氷下数mの範囲に境界層が発達していれば、その層の流れを計測することにより、間接的に流氷の動きを観測できる可能性はあることに着目した。主要な結論を以下に示す。

■まず、ADCPによるボトムトラッキングモードによる流氷挙動と、同じADCPによる上層10m(USWの上層の測定層厚に相当)の平均流速・流向データのデータと比較した。その結果、USWの上層測定層に相当する水塊は流氷下の境界層内に含まれていることが確認されるとともに、密接度が低く、流氷の移動速度が極めて速い状態ではない場合には、ある程度、上層10m流速は流氷の移動速度を表すことを確認した(図-3.9, 3.10)。

■次に、USWの上層10mの流速データと、流氷の動きを表すADCPによるボトムトラッキングデータとを直接比較した。USWによる流速の絶対値あるいは変動振幅は、ADCPによる流氷移動速度よりもやや小さい感があったが、その変動特性などの傾向はよく捕らえていた。ADCPによる流速値の絶対値あるいは変動振幅の方がやや大きい理由は、とくに流氷の密接度が低い場合や薄い流氷で覆われた場合に、ADCPは実際の流氷の漂流速度よりも早い開水面の表面流を捕らえたり、あるいは精度が悪くなったりする要因もあるためと考えられる(図

-3.11)。

- 以上の理由により、USWによる流氷挙動の計測の可能性について、境界層内の水塊の流れで近似することによる若干の鈍感性を除けば、ADCPも常に真値を与えているとは限らない事を勘案して、ADCPによるボトムトラッキングデータを参照する場合と信頼性は大きく変わらないものと思われる。
- 以上から、USWによって、流氷の喫水深や漂流方向・速度を概略推定できるものと結論できる。

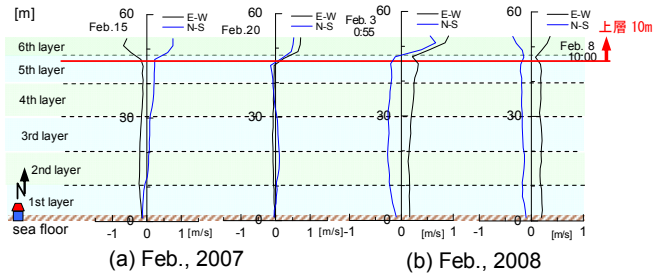


図-3.9 氷下での流れの鉛直分布の例

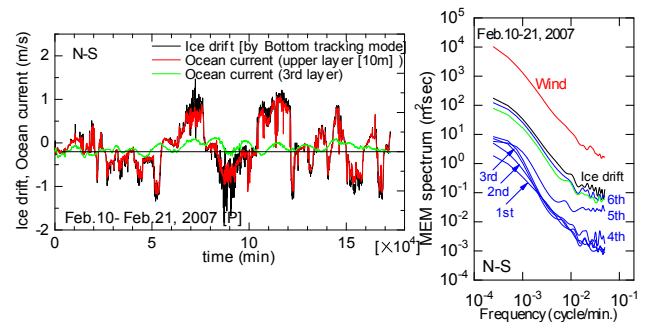


図-3.10 ADCPによる流氷の移動速度(ボトムトラッキングデータ)と各層(上層10m, 中層10m)流速との経時変化の比較例とスペクトルの比較例(N-S方向)

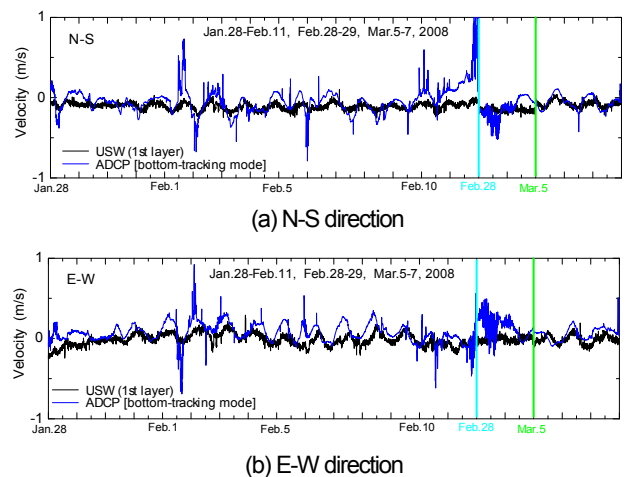


図-3.11 USWの上層10mの流速データと、流氷の動きを表すADCPによるボトムトラッキングデータとを直接比較

### 3.4 実務への適用 (案)

図-3.12 には、USW による鉛直方向の超音波（波高）データを用いて推定される流氷喫水深の時系列データを、USW のドップラー成分によって推定される流氷の漂流速度から空間データに変換した、いわゆる流氷の下面形状を示した

また海象計によって、流氷の喫水深や漂流方向・速度を概略推定できることを明らかにした。現在、海象計データの転送・収集を行っている紋別（南）観測所に、流氷観測系のデータを抽出・分析する機器を追加することで、流氷の喫水深や動きをモニタリング出来るシステムを構築することが可能である（図-3.13）。

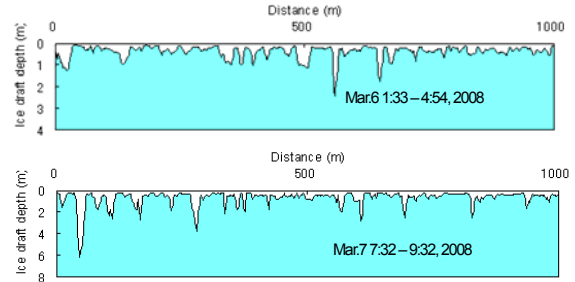


図-3.12 海象計データを用いて推定された流氷下面形状の例

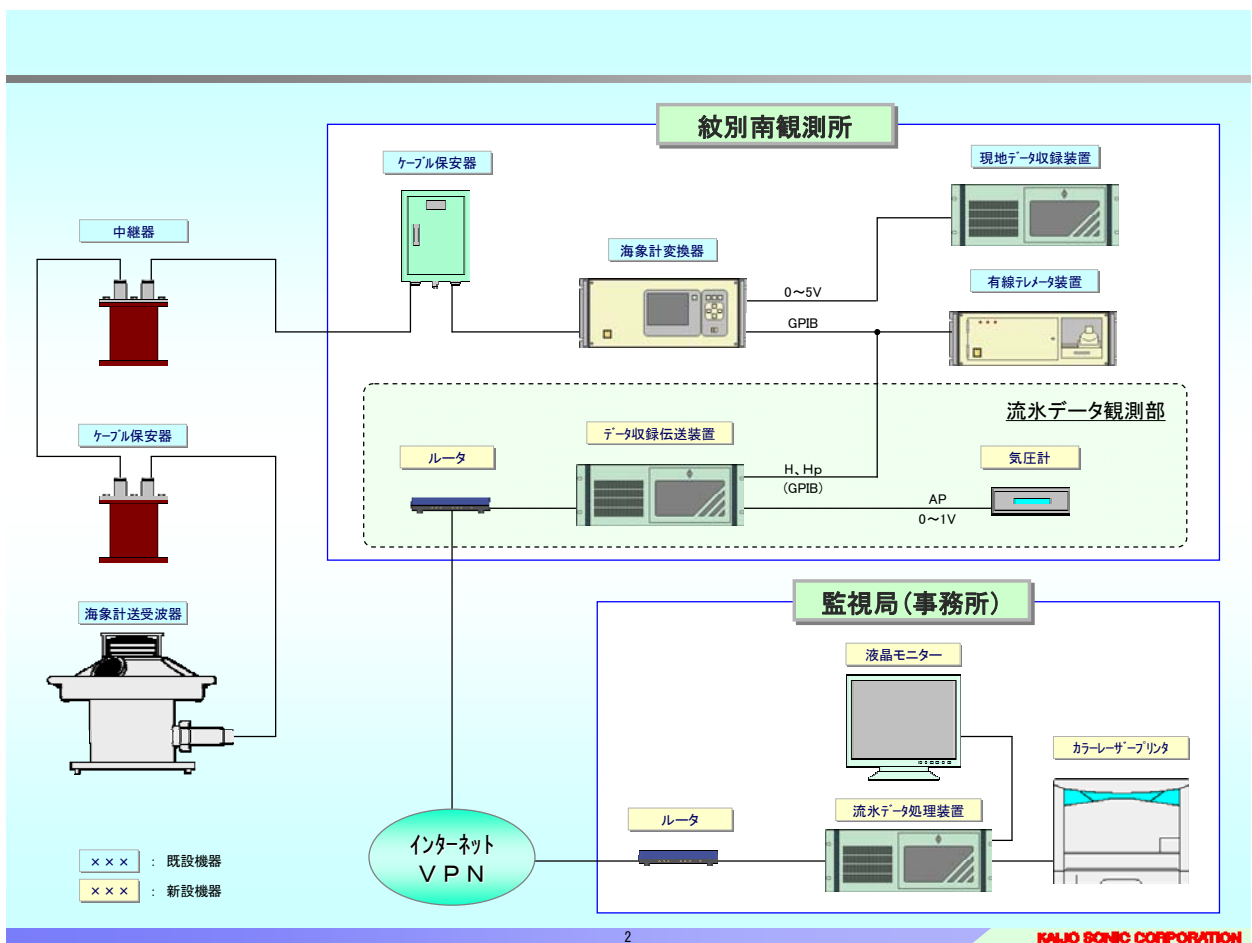


図-3.13 流氷観測システムの構築 (案)

## 4. アイスブーム型海水氷制御施設の設計法に関する研究

### 4.1 研究経緯と研究目的

H18年度では、おもに氷群の集積状況や、種々の環境・境界条件などが、アイスブームに作用する氷力へ及ぼす影響などを明らかにした。

H19年度では、アイスブームの係留杭近傍でのアイスアーチ形成に関する水理模型実験を実施し、アイスアーチの形成条件を明らかにした。これは上流側からの氷群の伝達荷重を減ずる骨格形成が生じ、アイスブームへの荷重が軽減する場合がある事に着目したものである。

H20年度では、氷群の下面形状が凹凸であることを考慮した氷群抗力について、氷下の境界層の発達や壁面剪断力の概念を用いた理論的考察を行い、氷荷重推定に必要な抗力係数の実用的推定法等を提案した。さらに、氷群下の凹凸を考慮した水理模型実験を行い、凹凸に応じた抗力係数を推定した。これらの研究成果を踏まえ、実海域における抗力係数の推定を試みた。さらに、個別要素法を適用した数値シミュレーション手法の開発を行い、実際にサロマ第一湖口で計測された氷群の伝達荷重と比較し、その手法の妥当性を示すとともに、かねて実施してきた水理模型実験の妥当性についても間接的に示した。

H20年度までの水理模型実験では、おもに氷群が流下する水路を直線とした単純な境界条件の場合のアイスブームへの氷群挙動やその伝達力などを調べてきた。しかし現実には、直線的な水路ではなく、障害物や断面変化を有している場合が多い。この場合、氷群はさらに複雑な骨格形成により、直線的な水路とは異なった挙動や氷荷重を呈する場合が考えられる。そこで、H21年度では、上流側の平面地形（水路形状）がアイスブーム型海水氷制御構造物への伝達氷荷重に及ぼす影響等を把握するため水理模型実験を行い、設計上の留意点について検討した。

最終年度であるH22年度においては、他の研究者らによる氷群下の粗度等を調べ、H20年度において提案した境界層厚を考慮した平均抗力係数に換算し、伝達荷重を推定するのに必要な抗力係数を評価した。また過年度に妥当性が示されたDEMによる数値計算手法を用いて、能取湖口のアイスブームを対象とした数値実験を実施し、複雑な境界条件を持つ場合の氷群の集積状況や下流側への伝達荷重の軽減特性などを検討し、設計への留意事項としてまとめた。

最後に、これまで実施してきた数値計算、水理模型実験および理論解析的アプローチによる研究成果をとりまとめ、アイスブーム型海水氷制御構造物への作用力推定法を提案し、フローチャート形式にまとめた。

## 4.2 水理模型実験によるアプローチ

### 4.2.1 氷群の集積状況や、種々の環境・境界条件などが、アイスブームに作用する氷力へ及ぼす影響

#### (1) 概要

本項では、過去の実験を拡張した水理模型実験<sup>例えば1)2)3)</sup>を行い、種々の条件の違いによるアイスブームへの荷重伝達特性や氷群の挙動などについて述べた。また、氷群の壁面による拘束を考慮した下流への伝達荷重の理論解の導出を試み、実験値と比較した。

#### (2) 実験方法および実験条件の概要

図4.1に示すように、幅2m×有効長10mの木製水路（水深約11cm）を設置、水位差（上流側で水を連続供給）を利用して流れを発生し、図4.2に示すように、密度と摩擦係数が実物の氷と近い模擬氷（ポリプロピレン）を流下させて模型アイスブームでトラップさせた。実験縮尺は、能取湖口に設置が計画されるアイスブームと航路の規模、および実験室の規模を勘案し、1/100～1/150とした。なお模型アイスブームはサロマ湖での下部ネット付特殊型とし、ネット、フロート（発砲スチロール性のひも）、ネットとフロートを取り付ける釣糸、それから錘から構成される。これを水路中央に1スパン、その両側に半スパンのブームを設置した。模型氷（氷群）の投入地点はアイスブーム設置位置から上流側に約6.5m地点とし、所定の密接度となるよう、できるだけ均一に氷を水面に供給した。氷群供給方法は、できるだけ水面の動揺や波が発生することのないよう、水面付近から静かに人手により供給した。氷の供給量は、密接度（または被覆率；ある水面に氷の占める面積の割合）で10%程度を目標としたが、成果は6～24%（平均13%）であった。また個々の実験では、最大被覆長（2m および 4m）を設定し、それを各被覆段階に分けた（2m までは 50cm 間隔、それ以降で 1m 間隔）。各被覆段階での長さ達したら氷群の流下をストップし、そのまま 10 分間静止させ、所定の最大被覆長までこれを繰り返した。計測項目は小型ロードセルによる各アイスブームの張力、分力計による支柱に作用する荷重、それに水位や流速である。実験条件は、図4.3に示すように、流速（目標 0.05m/s～0.15m/s）、壁面のタイプ（フラット、凹凸）、氷盤タイプ（標準的なサイズは 3cm、；円形、正方形、混合）を変化させて行った。実験結果を単純な氷力の理論値と比較した上、実験結果を正規化（単純化）し、実験条件の違いが及ぼす氷力の依存性、および被覆長にともなう氷力の履歴などについて考察した。また壁面による拘束を考慮した氷群被覆長による荷重の推移を表す解析解を導出し、実験値と比較した。

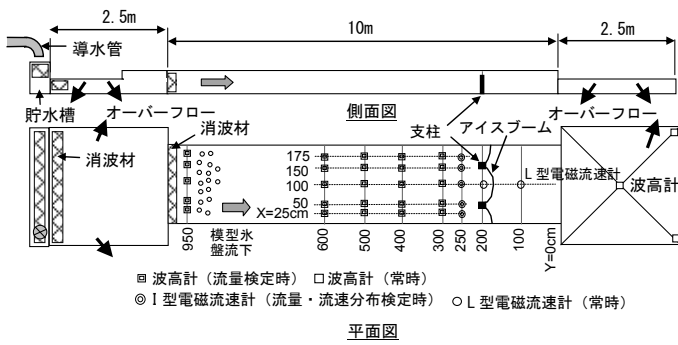


図-4.1 アイスブームの実験装置の概要図

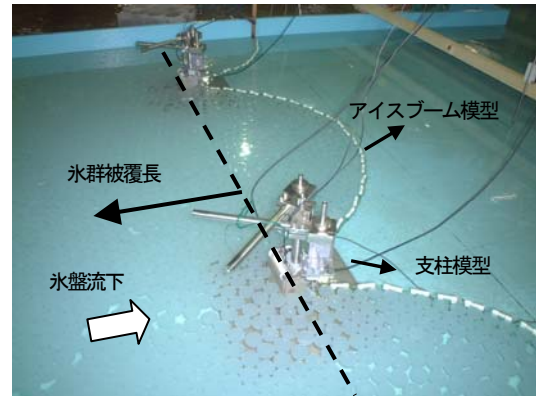


図-4.2 実験風景

**模型氷**

- 密度と摩擦係数が実物の氷に近いポリプロピレン製
- 標準的なサイズとして3cm
- 國松ら(1992)の北海道オホーツク海沿岸部における現地調査により、海水盤の大きさが2~4mの割合が多いと報告されており、模型縮尺からそのように設定

**水路壁面のタイプ**

フラット: 木製の水路に何も加工しない場合  
凹凸: 直径3cmの半円柱を水路壁面に取り付けた状態

壁面に凹凸を設けた場合

	水路壁面	氷盤タイプ	支柱間隔	目標
			(中央部)	流速
			m	m/sec
CASE_1	フラット	円盤	1	0.05
CASE_2_1	フラット	円盤	1	0.1
CASE_2_2	フラット	円盤	1	0.1
CASE_3	フラット	円盤	1	0.15
CASE_4	フラット	円盤	0.5	0.1
CASE_5	フラット	正方形混合	0.5	0.1
CASE_6	フラット	正方形	0.5	0.1
CASE_7	フラット	正方形混合	1	0.1
CASE_8	フラット	正方形	1	0.1
CASE_R1	凹凸	円盤	1	0.05
CASE_R2	凹凸	円盤	1	0.1
CASE_R3	凹凸	円盤	1	0.15
CASE_R4	凹凸	円盤	0.5	0.1
CASE_R7	凹凸	正方形混合	1	0.1
CASE_R8	凹凸	正方形	1	0.1

図-4.3 主な実験条件

(3) 主要な結論

- アイスブームに作用する静的荷重は、氷群被覆長とともに増大すること、圧力抗力と摩擦抗力から成ること、また荷重は速度の2乗に概ね比例することが示され、平板を台車で曳航することにより実施した上田等(1992)<sup>3)</sup>の実験と同じ傾向となった。単純な境界条件の場合には、その物体抗力の概念や実験的傾向から導出された水力推算式<sup>3)</sup>は本実験値の傾向を概ね表し、その妥当性を確認した。また荷重は、それを受け持つアイスブームの幅に比例することが確認された(図-4.4)。
- アイスブームに作用する荷重は、同一条件でのバラツキも考えると、本実験の範囲内において、氷盤タイプや水路壁面(側壁)の状態による明確な違いはなかった(図-4.5)。
- 氷群被覆長と支柱間隔との比が最大で4、および支柱間隔と氷盤の大きさの比が最大で3/50において、壁面状態、氷盤の形状(円盤、正方形およびそ

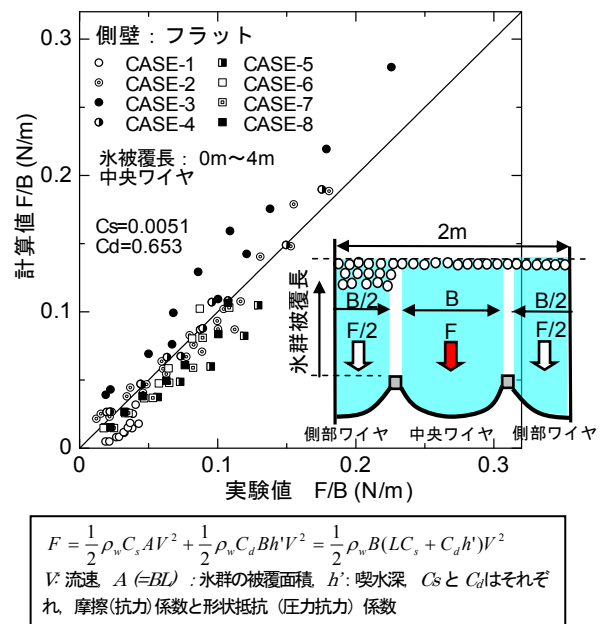


図-4.4 アイスブームに作用する荷重(流下方向)の計算値と実測値の比較(中央アイスブーム)(被覆長0~4m)



の大小混合)にかかわらず、すべてのケースで荷重は増大傾向であり、本実験の範囲内において、支柱間にアーチあるいは荷重を軽減するような骨格形成(支柱や側壁への負担増大)が確認できなかった。

- 壁面あるいは氷盤相互の影響・拘束を考慮した場合の、氷群被覆長に応じた流下方向の氷群の荷重伝達を表す解析解を導出した。解析解によれば、氷群被覆長に応じて荷重は正比例せず、荷重増加率は減少し、無限の氷群被覆長では一定値に収束する。本解析解によって、実験値の傾向を概ね説明することができた(図4.6, 4.7)。

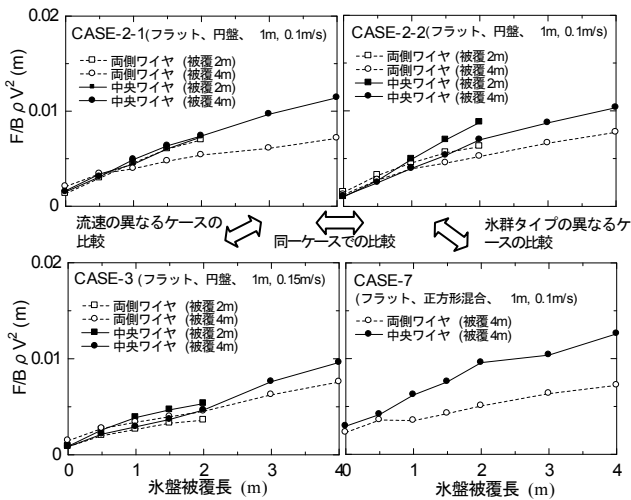


図-4.5 各アイスブームに作用する流下方向荷重の各ケース間の比較例(側壁がフラットの場合、荷重は、流速(V)の2乗、径間(B)、流体密度(ρ)で除して基準化したもの、また側部アイスブームの荷重については両側の2つのアイスブームに作用する流下方向荷重の合力

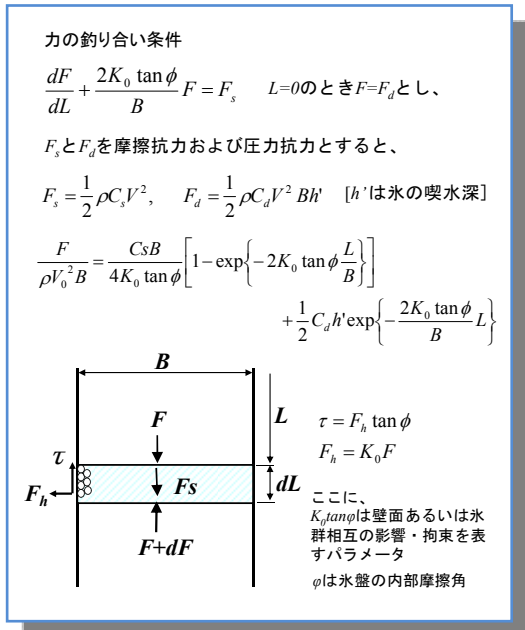


図-4.6 側壁の影響を考慮した場合の力学モデル

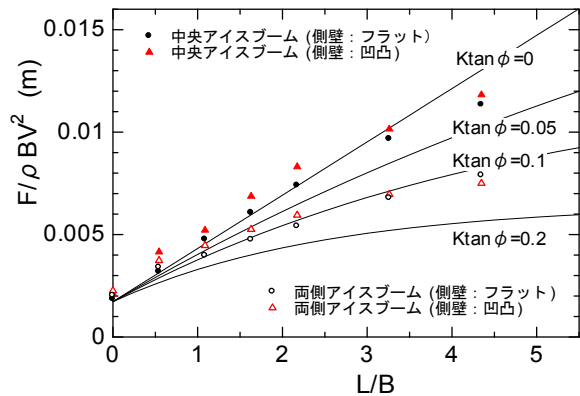


図-4.7 壁面の影響/氷群相互の拘束を考慮した伝達荷重モデル(流下方向)と実験値との比較

#### 4.2.2 アイスアーチ形成に関する水理模型実験

##### (1) 概要

アイスブームを係留する支柱間近傍のアーチの発生を考慮したアイスブームへの氷群の集積、荷重伝達特性について実験的に検討した。これは、上流側の平面地形や施設配置、流れの状態、氷の形状や大きさ等によっては、アイスブームへの伝達荷重を減ずるような氷群の骨格形成が生じる場合がある事に着目したものである。

##### (2) 実験方法および実験条件の概要

基本的な実験条件は前項と同様である。実験条件を表4.1 および図4.8, 4.9 に示す。表面流速(0.05~0.15m/s)、氷群の形状(円形、矩形、および混合タイプ)、氷群の大きさ(代表長  $a=3\sim 10\text{cm}$ )、そして支柱間隔( $b=12\sim 92\text{cm}$ )、を様々変えて実施し、アイスアーチ形成条件を概略的に

表 4.1 主な実験条件

氷群タイプ	a	b'	目標流速
	cm	cm	
(a) 円形タイプ			
○3cm	3	12, 42	0.05-0.15
○6cm	6	12, 30, 42, 92	0.05-0.15
○10cm	10	12, 30, 42, 92	0.05-0.15
(b) 矩形タイプ			
□2.7cm	3	12, 30, 92	0.05-0.15
□10cm	11.2	42	0.05-0.15
(c) 混合タイプ			
○3cm(75%)	3	12	0.10
□2.7cm(25%)			
○3cm(50%)	3	12	0.10
□3cm(50%)			
○3cm(25%)	3	12	0.10
□3cm(75%)			
○3cm(50%)	6.5	12	0.10
○10cm(50%)			
○3cm(85%)	4.05	12	0.10
○10cm(15%)			

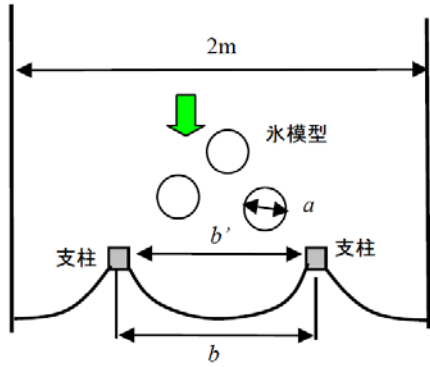


図-4.8 寸法の定義

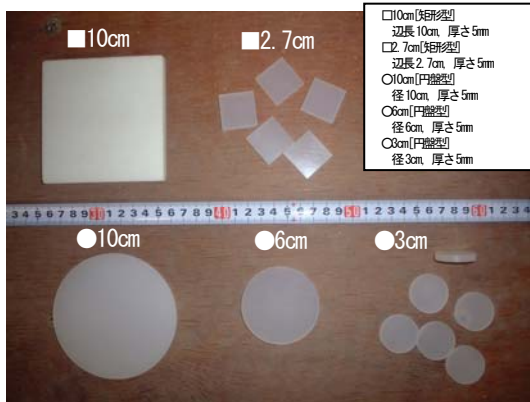


図-4.9 用いた氷群模型

検討した。なお、表中の混合タイプの配合率については、重量比に基づいており、その代表径として、各径にその配合率を乗じた重み付き平均として定義した。また矩形タイプの代表径は、円換算した場合の直径と定義した。

### (3) 主要な結論

- アイスアーチング形成を表現する指標として、その形成に必要な氷群被覆距離（1m と仮定）以降の被覆距離にともなう荷重増加率、つまり、正規化された荷重 ( $\rho BV^2$  で除す、 $V$ ；流速、 $B$ ；荷重作用幅) — 氷群被覆長曲線の勾配 ( $C_{arch}$ ) を提案した。

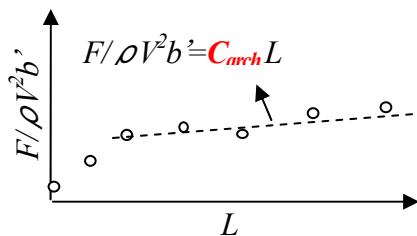


図-4.10 アーチ形成の指標の定義

- バラツキは大きいのが概して、ある  $ab'$  までは  $C_{arch}$  が一定であるが、それ以降では、 $a/b'$  とともに  $C_{arch}$  が減少傾向にあり、アーチ形成に推移すること、また、

明らかに○型よりは□型氷群の方がアーチが形成しやすいことが分かった。○型氷群では、およそ  $a/b'$  が 0.3~0.4 より大きくなると  $C_{arch}$  が減少傾向にあり、0.6~0.8 の間で完全にアーチ形成が生じる。一方、□型氷群では、およそ  $a/b'=0.2$  程度でアーチ形成が生じることが推察された。また流速の大小（あるいはフルード数）による明確な違いは見られないが、 $ab'$  が大きくなると、流速の大きい方が  $C_{arch}$  が減少傾向にあり、アーチが形成しやすい感があった(図-4.10)。

- さらに○型と□型の混合タイプについて同様な実験をおこなったところ、□型氷の配合率 25%とその割合が少なくても  $C_{arch}$  は大きく減少し、その形成が生じやすくなるものと推察された(図-4.11)。
- 現実の氷野では、角張った形状の氷が多いことから、実用的には、 $ab'=0.2$  程度でアーチ形成が生じると考えることができる。ただし、後方からより大きな氷が衝撃的に作用した場合や潮汐による転流などにより一時的にアーチが崩壊する可能性もあるので別途検討が必要である。

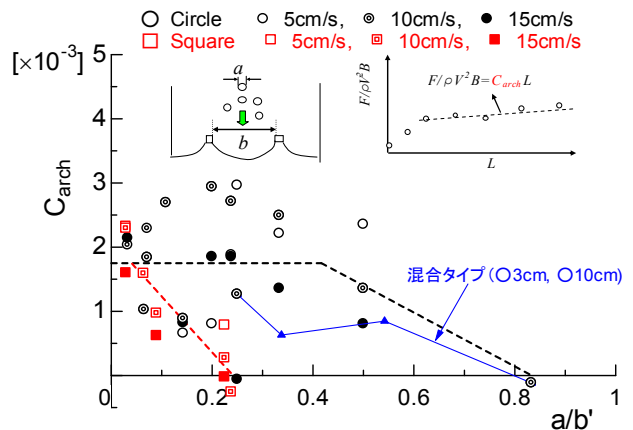


図-4.10  $a/b'$  をパラメータとした場合のアイスアーチング形成状態（複数の同一実験についてはそれらの平均値）[黒は○型氷群、赤は□型氷群を表す]

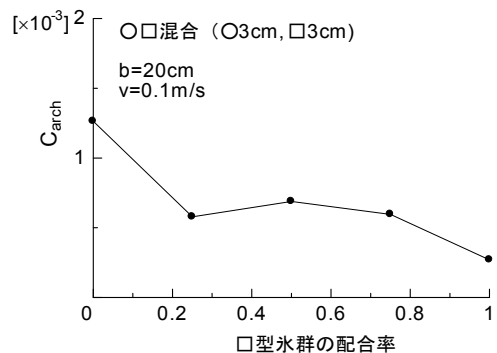


図-4.11 ○型および□型氷群の混合タイプの場合のアーチ形成状態 (○3cm, □2.7cm)

#### 4.2.3 上流側の平面地形（水路形状）がアイスブームへの伝達氷荷重に及ぼす影響などの検討

##### (1) 概要

前項までは、水路を直線とした単純な境界条件の場合のアイスブームへの氷群挙動やその伝達力などを調べてきた。しかし現実には、直線的な水路ではなく、障害物や断面変化を有している場合が多い。この場合、氷群はさらに複雑な骨格形成により、直線的な水路とは異なった挙動や氷荷重を呈する場合が考えられる。本項では、上流側の平面地形（水路形状）がアイスブーム型海水制御構造物への伝達氷荷重に及ぼす影響等を把握するため水理模型実験を行い、設計上の留意点について検討した。

##### (2) 実験方法および実験条件の概要

基本的な実験条件は前項と同様である。図-4.12, 4.13

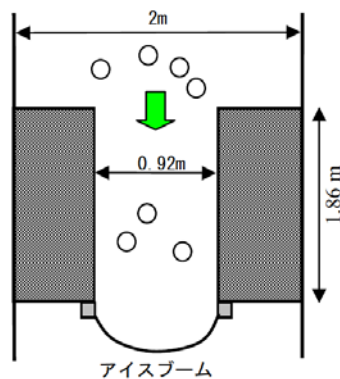


図-4.12 急縮水路実験の概要図

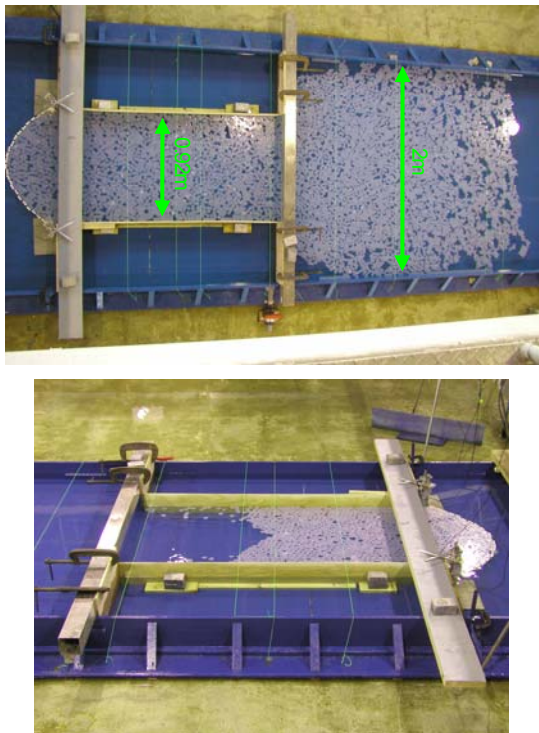


図-4.13 急縮水路実験での様子

に示すように急縮水路（水路幅2m→0.92m）に氷群が移動する場合の挙動や氷荷重の変化について検討した。実験条件については、 $\text{O}3\text{cm}$  および $\text{□}3\text{cm}$  についてそれぞれ実施し、目標流速（表面流速）は、幅広部で0.7m/s、縮小部で0.14m/s で実施した。その実験の様子を図-4.13に示す。

##### (3) 主要な結論

- 断面縮小部水路内での氷群の堆積において、荷重は被覆長とともにほぼ直線的に増加し、幅広部では流速が約半分程度に減少するため、その増加率（直線勾配）は小さくなるが同様に直線的に増加する傾向にあった（図-4.14）。
- $\text{O}$ 型と $\text{□}$ 型を比較すると、断面縮小部内では、ほぼ同程度であるが、幅広部以降は $\text{□}$ 型氷の方がやや小さく、増加率もやや小さいことが見受けられた。アーチング・ジャミング形成実験で、 $\text{□}$ 型氷群の方がそれが生じやすい結果が得られたことから、急縮部境界における両側の壁面への荷重分担が $\text{□}$ 型氷群の方がやや大きくなるような骨格形成が生じていることが推察される（図-4.15）。
- 縮小部より上流側（幅広部）における氷群被覆長の増加にともなう単位幅あたりの荷重の推移を、縮小部における実測値の傾向と流速変化分（減少）から推測した。急縮部より少し上流側では予測値よりも実測値の方が大きく、被覆長が増加すればその大きさが逆転、つまり増加率は実測値の方が小さくなる傾向にあった。
- これは、図-4.16 に示すような簡単な力学モデルを用いて説明した。急縮部近傍では複雑な流れの変化の影響を受け、その流れに沿って、仮想的に延長した縮小断面幅(B)領域よりも外側の氷群の荷重も縮小水路内へ伝達される。つまり、この段階では、急縮部の両側壁面への荷重伝達が小さく、全体荷重としてアイスブームには水路幅 B 以上の荷重伝達を受けることになる。他方、氷群被覆長が増加してくると、相対的に急縮部近傍では複雑な流れの変化の影響を受けず、逆に、仮想的に延長した縮小断面幅(B)よりも内部の氷群の荷重が外側へ伝達され、急縮部の両側壁面の荷重分担が大きくなる。結局、全体荷重としてアイスブームには水路幅 B 以下の荷重伝達となり減少する。さらに物理的に考えると、被覆長が大きくなれば、氷群に作用する流体力は大きくなるので、むしろ急縮部の両側壁面に荷重が十分伝達すること、複雑な破壊線を形成して、中央部



縮小水路内部への荷重伝達を減少させる（その分側壁面への分担率増大）ような骨格形成となっていくこと、などによるものと思われる。これはアイスアーチング形成に準じる物理機構であると思われる、水路幅や氷の大きさ、形状にも依存する。

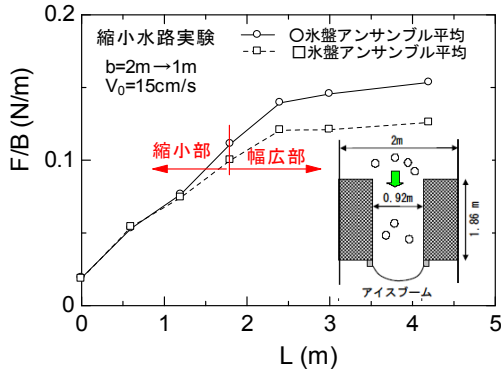


図-4.14 氷群被覆長にともなうアイスブームに作用する荷重（単位幅あたり）の推移  
[○型 3cm 氷, □型 3cm の各アンサンブル平均]  
（各被覆長における平均値）

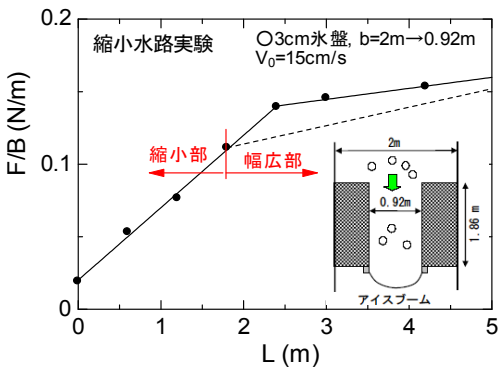
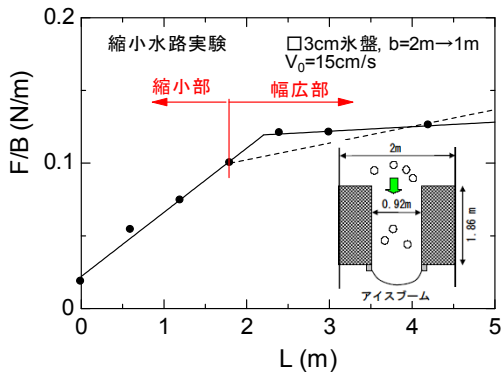


図-4.15 縮小部より上流側における氷群被覆長の増加にともなう実測値と縮小部における実測値の傾向と流速変化分（減少）から推測した予測値との比較  
上図：○3cm 氷, 下図：□3cm 氷

したがって、設計的観点から、横断方向（氷群の流入方向に直角）に突き出ているような自然地形や既設構造物の下流側にアイスブーム設置が設置されるとすれば、その荷重減少分を考慮すべきである。これには、後述する、数値シミュレーションによる検討や、アイスアーチング形成実験等の研究成果を準用した検討が可能である。

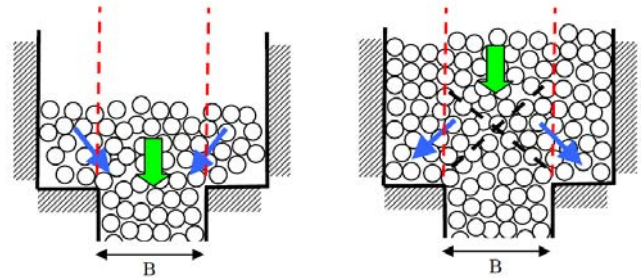


図-4.16 断面変化部より上流側に氷群が堆積した場合の壁面への荷重伝達のモデル

左図：被覆長が短いとき 急縮部の流れの影響を受け、縮小断面幅  $B$  よりも外側の氷群の荷重も伝達される（急縮部の両側壁面への荷重伝達小さい）

右図：被覆長が長いとき 縮小断面幅  $B$  よりも内部の氷群の荷重が外側へ伝達され（急縮部の両側壁面の荷重分担が大きくなる）

#### 4.2.4 氷群下面の凹凸を考慮したアイスブームへの伝達荷重に関する検討およびオホーツク海における流氷群の抗力係数を概略推定

##### (1) 概要

前項までは、特に氷の下面が平坦な流氷群の場合について実施してきた。しかし、現実の氷野では下面は凹凸である場合が多いため、これを考慮した基礎的な水理実験を試みた。そこで、凹凸の状態が氷群伝達荷重へ与える影響を調べるとともに、前項で示した氷群抗力の解析解より、各凹凸状態に応じた抗力係数を推定する一方、凹凸の幾何学的形状から、凹凸特性を表す、パワースペクトル、混入率や波数、平均パワー（分散）などの関係を理論的に導出、整理した。また、それらの量と抗力係数とを関連づけた。さらに、それらの関係を利用し、オホーツク海での流氷群下面凹凸の観測結果から、その抗力係数の概略的な推定を試みた。

##### (2) 実験方法および実験条件の概要

基本的な実験条件は前項と同様である。模型縮尺は 1/100 程度を想定し、表面流速を 0.05~0.15m/s(目標値)の範囲で実施した。また、氷群の凹凸を、直径  $a=3\text{cm}$  の円柱で、厚さの異なる 2 種類の模擬氷盤[5mm および 20mm]により表現した(図-4.17)。この場合、その凹凸差



である振幅  $\Delta h$  を一定に保ち、その配合率を変えて様々な凹凸状態を創出した。 $\Delta h$  は模型水の比重(0.9)を考慮して、 $0.9 \times (0.02 - 0.005) = 0.0135\text{m}$  となる。なお、これらの氷群はランダムに流下させた。表4.2 には、その配合率として 20mm 厚の氷盤 (以下 20mm 氷という) の混入率  $\xi$  と平均的な波数を示した (直線上に均等に配列した場合で、前述のように実際には、2 種類の混合はランダムに行う)。



図-4.17 実験に用いた氷群模型

表-4.2 凹凸氷群の実験条件

	20mm 厚擬氷盤 の混入率 $\xi$ (%)	波数 $kp$ (cycle/m)
ケース 1	25	8.33
ケース 2	11.1	3.7
ケース 3	4	1.33

### (3) 主要な結論

- 平坦な氷群の場合と同様、アイスブームへの伝達荷重は流速の二乗に比例した。伝達荷重と氷群被覆長との関係は、平坦な氷群の場合にはほぼ直線であったが、凹凸の場合には、曲線的 (増加率が減少) であった。また、流下方向の伝達荷重の理論モデルは、この実験値の傾向を良く表すことを確認し、このモデルより、各凹凸状態の氷群の抗力係数を推定した (図4.18)。
- 高さ (振幅) 一定で異なる (20mm 厚氷盤の) 混入率  $\xi$  に対応する各凹凸状態を表す波数や分散などの単純な指標を算定し、それらと抗力係数との関係を推定した (図4.19)。
- 上田等の実験<sup>3)</sup>も考慮して、抗力係数は、 $10^{-2}$  のオーダーであること、凹凸の周期と振幅の比 ( $T/\Delta h$ ) が 1 のオーダーで  $C_s$  が最大となることが推察された (図4.20)。
- 本実験結果から、オホーツク海における流氷群の摩擦抗力係数の概略推定を試みた。現地観測結果の有義振幅と標準偏差との関係から、およそ 0.03~0.04 と推定された (図4.21)。これは、事項でも示すように、他の観測結果<sup>2)</sup>で、氷下の流速プロファイルを計測することによって推定されたラフな氷の場合の抗力とだいたい同程度である。

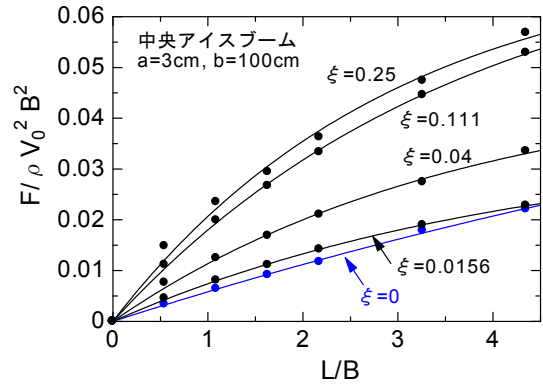


図-4.18 氷群被覆距離 ( $L/B$ ) と氷群伝達荷重との関係及び理論モデル (解析解) の当てはめ (荷重は流速とアイスブームの支柱間隔 ( $B$ ) で正規化)

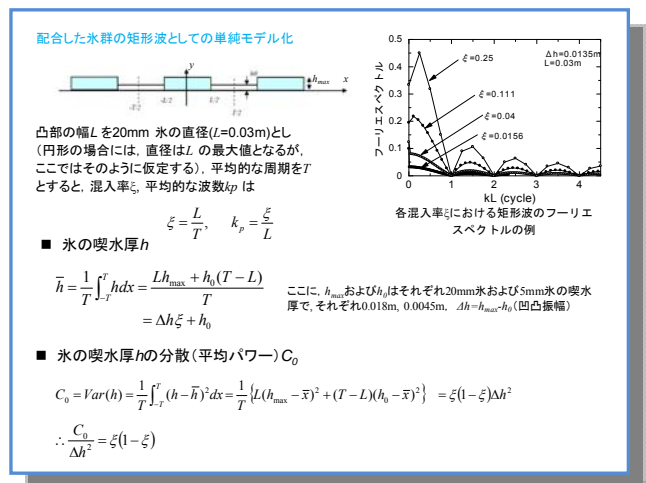


図-4.19 混入率  $\xi$  と波数  $kp$ ・スペクトル・平均パワー (分散) との関係

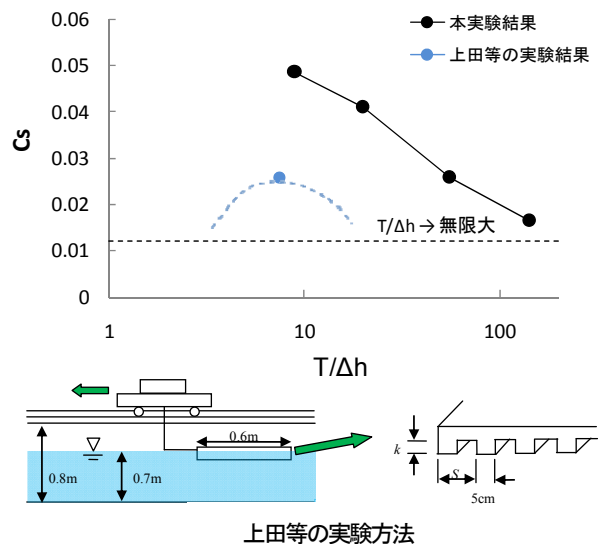


図-4.20 凸部の間隔と凹凸振幅との比 ( $T/\Delta h$ ) と抗力係数との関係および上田等の実験結果との比較

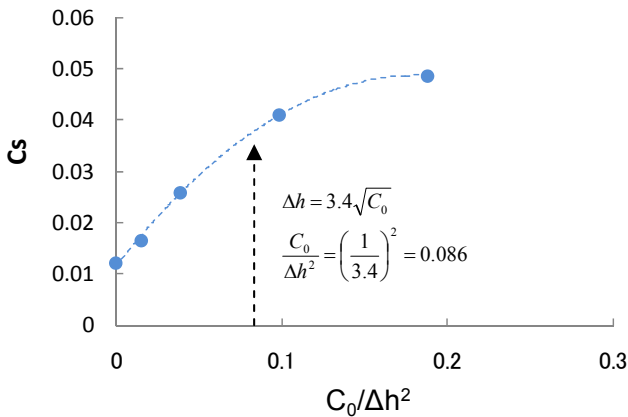


図-4.21 摩擦抗力係数  $C_s$  と  $C_0/\Delta h^2$  との関係

### 4.3 理論解析および文献調査によるアプローチ

#### 4.3.1 氷群下面に作用する抗力に関する理論的考察

##### (1) 概要

河川および海域の場合であればサロマ湖口（第2）や能取湖口のように航路部分が比較的長く水路と見なされるところにアイスブームが設置される場合を想定する。まず、図4.22に示すように、開水路に断面平均流速  $V_0$  で水が流れており、あるところから水面が氷群に覆われている領域が存在する場合の流れを考える。この場合、氷群の影響により流下方向に境界層が発達し、いずれ海底の影響による境界層に接し、一定の境界層厚に達するものと思われる。また同図に示すように、流速分布を対数分布則と仮定したとき、運動方程式および連続の式から、境界層厚の常微分方程式が得られる[(7)式]。これをもとに、抗力係数や粗度係数の表現を試みた。一般に抗力係数は粗度と位置の関数となるが、本報では実用的に、断面平均流速を用いた平均抗力係数の算定法を提案した。さらに、境界層厚を介し、粗度と粗度係数との対応関係、海底粗度を考慮した合成粗度係数を導いた。また様々な条件において境界層厚や抗力係数・粗度係数、氷力（抗力）等を試算し、それらの性質を調べた。

##### (2) 主要な結論

- 境界層内流速を対数分布則に従うと仮定し、氷群下の境界層厚を理論的に導出するとともに、境界層厚の概念から、断面平均流速を用いた平均抗力係数や粗度係数（海底粗度を考慮した合成粗度係数を含む）などの実用的な算定法を提案した。また、境界層厚、断面平均流速を介して、抗力係数、粗度、粗度係数の対応関係が理論的に明確になった。
- 氷群の粗度係数( $n_i$ )が大きくなれば、境界層は海底側へ

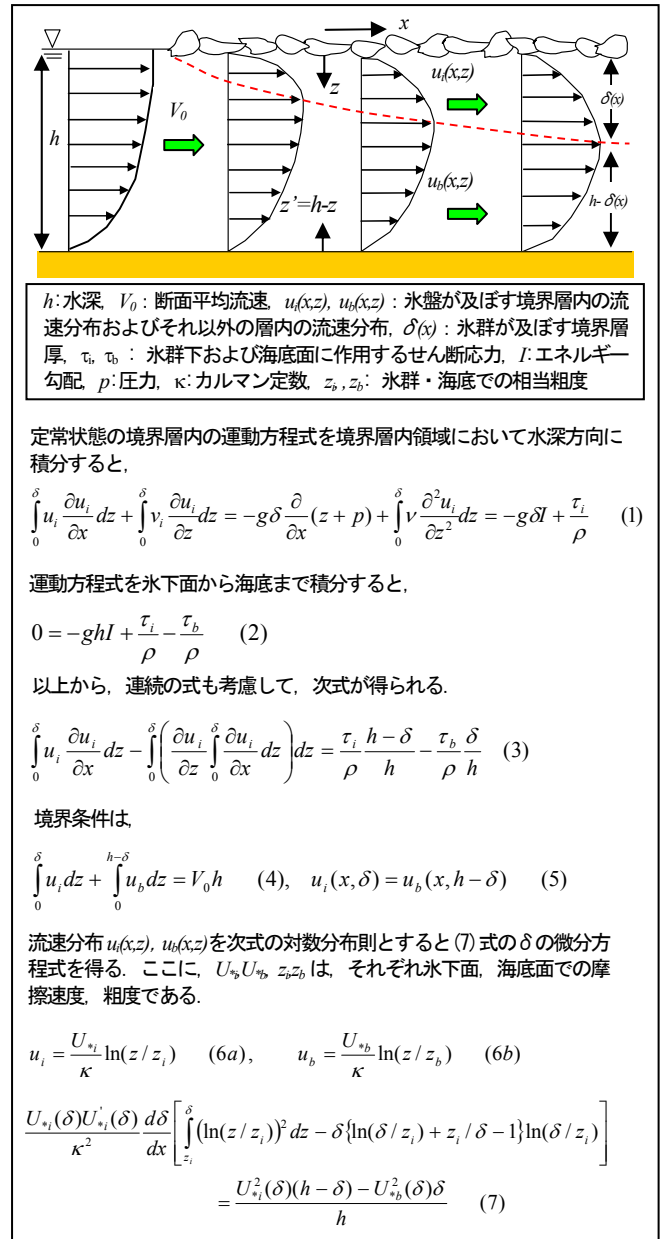


図-4.22 氷群の存在による境界層のモデル

近づき、境界層厚が一定となる氷群端部からの距離が短くなる傾向があった。また、水深 10m、海底粗度係数( $n_b$ )が 0.03 程度のとき、氷群端部からの距離がおおよそ 50m 以上であれば、境界層厚が一定となり、実用上は境界層を一定と仮定できた（図4.23）。

- 境界層厚が一定となる場合には、本研究で提案した合成粗度係数( $n_0$ )と境界層厚の変化を考慮しない単純な Sabaneev の式<sup>4)</sup>による値とはほぼ一致した（図4.24）。
- $z_i/\delta$  が大きい場合を除いて、粗度係数は大きく変化しないものと推察され、これが、実用的に粗度係数は一定と見なされる理由であるとともに、粗度係数は水深の影響を大きく受けけないとする大森ら(2005)<sup>5)</sup>の結果を裏

付けているものと解釈された。

- 境界層厚の増加とともに氷群に作用する抗力（摩擦応力）が減少し、境界層厚と同様に一定値に漸近する。特に、理論上は、氷端部での抗力が $\infty$ となって急減する。境界層厚が一定となる被覆長（距離）までは、距離との関係は直線ではなく、境界層厚が一定となる距離以降では、両者の関係は直線となる。
- 一般に、粗度係数（抗力係数）は海氷の凹凸などに大きく依存するため、広い海域で典型的な値を提案するのは難しいが、オホーツク海南部の氷群下面が凹凸に富む変形氷野におけるアイスブーム等に作用する氷力（環境力）を設計的観点（安全側）から推定する場合に用いる粗度係数（抗力係数）の概算を試みた。大森ら(2005)<sup>9)</sup>による、氷板の下面形状が粗度係数に与える影響についての模型実験結果を、現地スケールを勘案して、本手法を用いて抗力係数へ換算すると、平均抗力係数は0.0314を得た(図4.25 参照)。さらにこれは、前項の結論において、水理模型実験とオホーツク海における観測結果から推定される抗力係数にだいたい等しい。

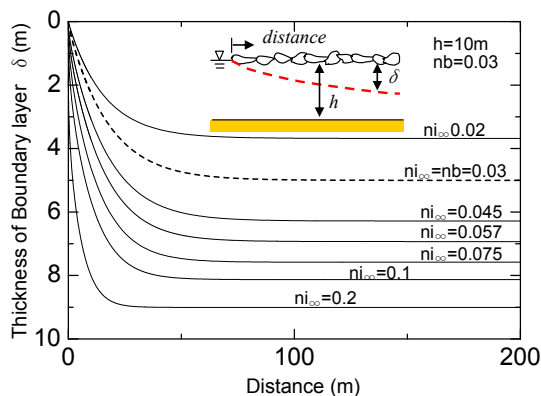


図-4.23 各粗度係数に応じた氷群下の境界層の発達

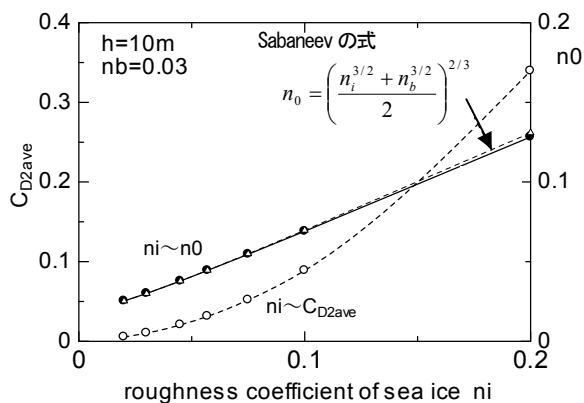


図-4.24 氷群の粗度係数と合成粗度係数との関係、および断面平均流速を用いた平均抗力係数との関係

氷群下面の粗度係数（境界層厚が一定となった場合）の推定

—大森ら(2005)の実験—

氷盤下の下面形状が粗度係数に与える影響についての模型実験

凹凸氷盤（厚さが1cm～5cmのブロックの混合体、水深50cm）の粗度係数 $n_i$ を、乱流時の速度分布を対数分布としたMajewski(1988)の手法を用いて推定

→  $n_i=0.027\sim 0.035$ 程度を得る

**粗度係数の現地スケールへの換算**

- フルードの相似則より、縮尺比 $\lambda$ の1/6乗 ( $n_p = n_m \lambda^{1/6}$ )

$n_p=0.031$ 、 $\lambda=40$ （厚さが40cm～2mの水が混在している凹凸氷盤と想定）とすると、

**粗度係数の現地換算値は0.057程度**

- さらに、 $n_b=0.03$ 、水深を10mとすると、

**一定となる境界層厚は6.93m**

**全断面平均流速を用いた平均抵抗係数は $CD_2=0.0314$ 程度**

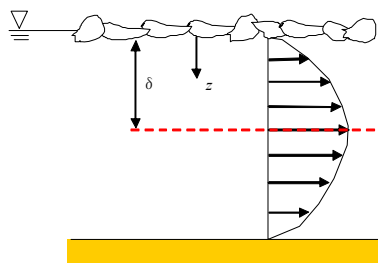
図-4.25 氷群下面の抗力係数の推定の試み

#### 4.3.2 他の研究者らによって得られた氷群下面の粗度係数の平均抗力係数への換算およびその評価

前項では、氷群下の境界層や断面平均流速を用いた平均抗力係数の推定法を提案した。また水理模型実験結果やオホーツク海における氷群下面凹凸の観測結果から、伝達荷重推定時に必要となる抗力係数の概略値を $C_s=0.03$ と提案した。この値を客観的に評価するため、他の研究者らによって得られた粗度および抗力係数などを表-1に示す。海水下の境界層内と考えられる地点の流速データから、対数法や渦相関法などにより、摩擦速度や粗度(roughness parameter)あるいは抗力係数(water drag coefficient)などが推定されている他、海氷の漂流から抗力係数を逆算的に推定される場合もある。海洋での海水下の境界層厚は様々な見解があり、Kolesnikov et al.(1965)は2.5～10mと述べているし、Hunkinsは2mあるいは1mよりも小さいと述べている。また、粗度や抗力係数は通常氷下1～2m地点で計測された値が採用される場合が多い。表4.3には、観測によって得られた粗度や抗力係数を各文献で記述されている数値のまま紹介するとともに、前項で提案した平均抗力係数の推定式により、海水下1mおよび2mにおける値に換算した抗力係数も記述した(係数に1/2がつく場合は $CD_2$ であることに注意)。抗力係数は、粗度(roughness parameter)と位置の関数となっており、ある水深 $z$ における抗力係数をもちいれば、その深さ $z$ の流速を用いて、剪断応力を推定する必要がある。しかし、前項にも議論したように、抗力係数は、断面平均流速を用いた平均的な値で表す方が実用上都合が良いことなどからこの平均抗力係数も記述した。表より、抗力係数は $10^{-3}\sim 10^{-2}$ のオーダーであることが分かる。本検討で提案した抗力係数と表中の抗力係数とは単純に比較することはできないが、 $C_s(=CD_2)=0.03$ という値は、

表-4.3 他の研究者らによって得られた粗度および抗力係数の比較

Reference	Site	Ice type	Estimation method	z0(cm)	C <sub>D</sub> (original)	C <sub>D</sub>		C <sub>D2</sub> =2 C <sub>D</sub>		C <sub>D2</sub> の平均 境界層厚 2mの場合	Remark		
						-1m	-2m	-1m	-2m				
M.Johannessen(1970) <sup>6)</sup>	Gulf of St.Lawrence	first-year ice, 10-15m の ice floe	対数法	Quite rough	3.275	0.02057	氷下 0.5m	0.01369	0.00946	0.02738	0.01893	0.03270	
				Very rough	9.400	0.04708	氷下 0.5m	0.02862	0.01711	0.05724	0.03423		0.07224
				Rough	3.000	0.01940	氷下 0.5m	0.01301	0.00907	0.02602	0.01814		0.03096
				Smooth	0.650	0.00843	氷下 0.5m	0.00631	0.00487	0.01262	0.00975		0.01429
M.Reynolds(1985) <sup>7)</sup>	Southern Bering Sea	Smooth floe		2.158	0.00780	氷下 2m	0.01087	0.00780	0.02175	0.01560	0.02554	Quoted by Wadhams (2000)	
M.P.Langleben (1982) <sup>8)</sup>	Barrow Strait	first-year floe of fast ice	対数法	0.002	0.00132	氷下 1m	0.00132	0.00117	0.00264	0.00234	0.00279		
Langleben(1980) <sup>9)</sup>	Beaufort Sea(AIDJEX)	Multi-year			0.00414				0.00828			Quoted by Langleben (1980)	
McPhee and Smith (1976) <sup>10)</sup>	Beaufort Sea(AIDJEX)	Multi-year			0.00220				0.00440			Quoted by Langleben (1980)	
N.Untersteiner(1965) <sup>11)</sup>	Island Arlis2 in the Greenland Sea	Multi-year	対数法	2.000				0.01045	0.00754	0.01045	0.00754	0.02448	
Campbell[1965] <sup>12)</sup>	Arctic Sea		氷の漂流計算より推定	2.600				0.01201	0.00848	0.02402	0.01697	0.02842	Quoted by Untersteiner (1965)
Ling et al.(1965) <sup>13)</sup>				1.255				0.00835	0.00622	0.01670	0.01244	0.01925	Untersteiner et.al.(1965)の結果から推定
K.Shirasawa et al. (1976) <sup>14)</sup>	Robeson Channnel, Ellesmere Island	first-year, smooth ice	渦相関法	0.000	0.00105	氷下 1m	0.00105	0.00094	0.00210	0.00188	0.00221		
Smith (1975) <sup>15)</sup>	Beaufort Sea(AIDJEX)	old pack ice	渦相関法		0.015	0.00176	氷下 2m	0.00205	0.00176	0.00410	0.00352	0.00440	Quoted by Shirasawa et al. (1976)
					0.035	0.00214	氷下 2m	0.00253	0.00214	0.00507	0.00429	0.00548	
P.Wadhams(2000) <sup>16)</sup>					0.00400					0.00800			典型的な値と述べている
McPhee(1979) <sup>17)</sup>	Central Arctic pack	Multi-year		5.911	0.02000	氷下 1m	0.02000	0.01290	0.04000	0.02580	0.04917		Quoted by Wadhams (2000)
Pease et al.(1983) <sup>18)</sup>	Bering Sea MIZ	10-20m ice floe	対数法, スラブ法	対数法	8.408	0.02420	氷下 1.1m	0.02610	0.01593	0.05220	0.03186	0.06545	
				スラブ法/下限	5.718	0.01830	氷下 1.1m	0.01954	0.01266	0.03908	0.02532	0.04795	
				スラブ法/上限	7.416	0.02200	氷下 1.1m	0.02364	0.01474	0.04728	0.02948	0.05886	
C.Wamser et al.(1983) <sup>19)</sup>	南極		氷の漂流計算より推定					0.00130		0.00260			



$$\tau_0 = \rho U_*^2 = \rho C_D U^2 = \frac{1}{2} \rho C_{D2} U^2$$

$$(C_{D2} = 2C_D)$$

流速は対数分布則を用いて

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

抗力係数は、

$$C_{D,z} = \left( \frac{U_*}{U} \right)^2 = \left\{ \frac{\kappa}{\ln(z/z_0)} \right\}^2$$

$$U(z) = \frac{U_*}{\sqrt{C_{D,z}}}$$

よって抗力係数は、粗度と位置の関数

境界層内の平均流速を

$$\bar{U} = \frac{1}{\delta} \int_{z_0}^{\delta} U dz = \frac{1}{\delta} \int_{z_0}^{\delta} \frac{U_* dz}{\sqrt{C_{D,z}}} = \frac{U_*}{\delta} \int_{z_0}^{\delta} \frac{dz}{\sqrt{C_{D,z}}}$$

とすれば、層内の平均的な抗力係数は、

$$\frac{1}{\sqrt{C_D}} = \frac{1}{\delta} \int_{z_0}^{\delta} \frac{dz}{\sqrt{C_{D,z}}} \quad \therefore \bar{C}_D = \frac{\kappa^2}{[\ln(\delta/z_0) - (1 - z_0/\delta)]^2}$$



比較的ラフな氷の場合におけるオーダーとなっており、実用的観点からは妥当な数値であるように思われる。事実、Wadhams(2000)<sup>16)</sup>は典型的な係数は0.008であると述べているし、Johannessen(1970)<sup>6)</sup>の rough な海氷についての結果からも0.03程度であることが推察される。

#### 4.4 数値解析的アプローチ

##### 4.4.1 DEM による数値計算法の適用および実測値（水理模型実験および現地観測結果）との比較

###### (1) 概要

氷群は非連続体と見なし得るため、粒状体などの非連続体のシミュレーションに適している個別要素法 (D. E. M) の適用を試みた。この手法は粒子のもつ物性値を間接的に考慮でき、あるいは複雑な粒子の移動・衝突に合うようチューニングすることにより、様々な状況に応じた挙動を推定できるという柔軟性を有している。ここでは、その計算結果を水理模型実験および現地観測結果（サロマ第一湖口アイスブームの張力）と比較することにより、本シミュレーション手法の妥当性を示す。

###### (2) DEM の概要と計算条件

要素の集合体において、個々の要素毎に独立した運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域でステップ・バイ・ステップで前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析しようとするものである。

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\mathbf{u}} + C_i \dot{\mathbf{u}} + F_i &= 0 \\ I_i \ddot{\phi} + D_i \dot{\phi} + M_i &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $m_i$ :要素(i)の質量、 $F_i$ :要素に働く合力、 $M_i$ :要素に働く合モーメント、 $I_i$ :要素の慣性モーメント、 $C_i$ 、 $D_i$ :減衰定数、 $\mathbf{u}$ :要素の変位ベクトル、 $\phi$ :要素の回転変位、である。

先の運動方程式で考慮する氷（粒子）に作用する力  $F_{ice}$  は、流れによる抗力として圧力抗力と摩擦抗力とし、次式で定義した<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned} F_{ice} &= \frac{1}{2} \rho_w C_s A |V_w - V_i| (V_w - V_i) \\ &+ \frac{1}{2} \rho_w C_d h |V_w - V_i| (V_w - V_i) \end{aligned} \quad (2)$$

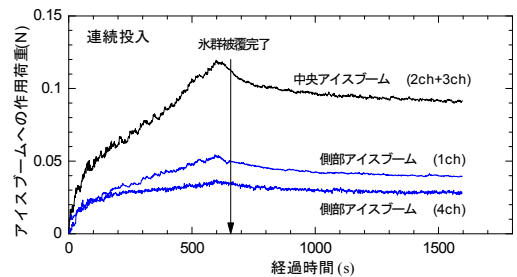
表-4.4 主な計算条件

	模型実験	現地観測
時間ステップ(s)	0.002	0.00005
氷の半径(m)	4 - 6	0.015
氷厚(m)	0.5	0.005
流れの速度(m/s)	実測値	0.1
氷と水との摩擦抗力係数	0.007-0.03	$0.9 \times 10^3$
氷と水との圧力抗力係数	0.65	0.007
氷の stiffness(MN/m)	50-100	0.65
氷/氷の摩擦係数	0.4	160
氷の慣性力係数	0.5	0.4

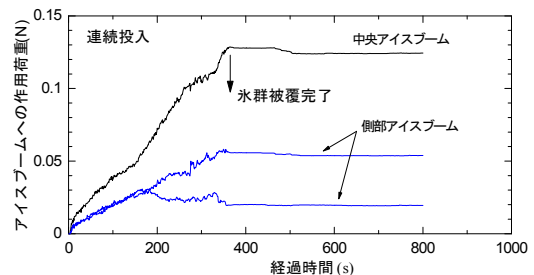
ここに、 $A$  は氷の面積、 $h$  は喫水深、 $C_s$  と  $C_d$  はそれぞれ、摩擦(抗力)係数と形状（圧力抗力）係数である。また氷は、水理模型実験結果と比較するため、円盤とし、2次元として扱った。その他の計算条件を表-4.4 に示す。

#### (3) 主要な結論

■ 水理模型実験との比較において、シミュレーションでは、氷群模型の水路への投入にもなう波の影響を考慮していないので、荷重減少の傾向は実験値ほど顕著ではないが、わずかに再現されており、粒子配列の変化による荷重減少が説明できた。また、荷重の増加傾向、荷重の大きさ、側部および中央アイスブームの荷重のオーダーは実験値と良い一致を呈した。実験とシミュレーションとの土俵の違い（計算では実験特性である波の発生およびアイスブームのフレキシブル性も考慮していない）があるものの、概ねシミュレーション結果は実験値の傾向を再現していると言える（図-4.26）。



(a) 実験値(連続流下)



(b) シミュレーション結果

図-4.26 アイスブームに作用する伝達氷荷重のシミュレーションと実験との比較例

■ 現地観測結果との比較も行った。対象データは1997年2月9日に得られた、施工途中のサロマ第一湖口アイスブームへの伝達氷荷重の現地測定結果（係留固定杭No7に係留されているワイヤロープの張力）<sup>20)</sup>である。シミュレーション結果は、氷群挙動と伝達荷重の傾向を良く再現されており、本手法の妥当性が示された（図-4.27）。

■ 以上より、模型実験結果を再現し得るDEMによつ

て、実現象における氷群挙動も再現できたため、ひいては本模型実験が妥当であることを間接的に示すことができた。

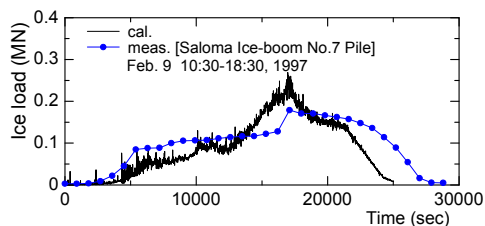
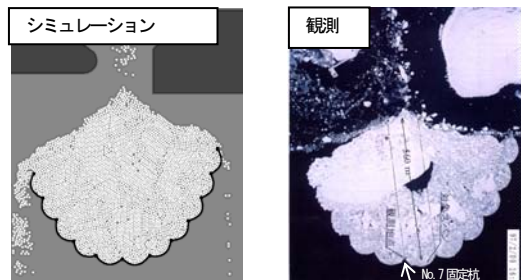


図-4.27 アイスブームに作用する氷荷重の実測値と計算値との比較 [No.7固定杭に係留されているワイヤロープの張力で評価] [1997年2月9日 10:30-18:30]<sup>20)</sup>

#### 4.4.2 能取湖口のアイスブームを対象とした数値実験

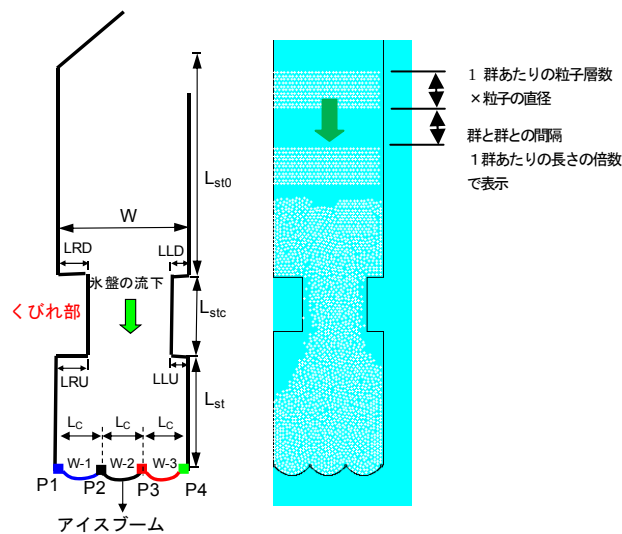
##### (1) 概要

前項で妥当性が示された DEM による数値計算手法を用いて、能取湖口のアイスブームを対象とした数値実験を実施し、複雑な境界条件を持つ場合の氷群の集積状況や下流側への伝達荷重の軽減特性などを検討し、設計への留意事項としてまとめた。

##### (2) 主な計算条件

図-4.28 に本計算条件を示す。能取湖口アイスブームは、図のように3スパン(W-1~3)のアイスブームとそれを係留する4本の杭式の固定構造物(P1~P4)からなる。なお計算では、湖口、航路、アイスブームおよび支柱などの配置・形状などは単純化している。簡単のためアイスブームは可動性(移動・伸縮)とはせず、弾性率を低くするとともに、減衰係数を大きく設定するにとどめた。また数層に千鳥配列した氷塊を1つの氷群とし、これを数群流下させて、アイスブームにトラップさせた。計算の試行ケースは大きく分類して5ケースあり、基本ケースは表中の赤枠 T1 であり、氷盤を円形とし、その半径を6m、標準の湖口形状を用いた場合である。詳細な計算条件は過年度に本計算の妥当性を示すために設定したサラマアイスブームでの条件と同じである。同図の Tr は T1 のケースにおいて流下させる氷群の配列を若干変化させ

た場合(千鳥配列を左右逆転)である。さらに T2 は基本ケースと比べて半径が異なり、3mとした場合である。T1\_0 は航路形状が異なり、標準タイプと比べてくびれ(断面変化部)をなくした場合、同じく、T1\_2 も航路形状が異なり、くびれ部分が左右対称でくびれ部の最も狭い航路幅は中央のアイスブームのスパン長と一致させたものである。後の2ケースはいかに断面変化部が及ぼす各部への伝達荷重への影響度合いが大きいかを検討するために設定している。各ケースの検討内容はさらに細分化される(表-4.5)。



試行ケース	T1	T1r	T2	T1_0	T1_2
氷盤半径 (m)	6	6	3	6	6
水流下配列	A	B	A	A	A
湖口寸法					
Lst			460	460	460
Lc			124	124	124
LLU			101	0	132
LRU			55	0	132
Lstc			188	188	188
LLD			101	0	132
LRD			55	0	132
Lst0			800	800	800
W			380	380	380

図-4.28 検討に用いたアイスブームと計算条件の概要

各ケースの検討ケースについて、”Initial”は航路のくび

れ上面まで氷群を流下するケース、"CASE0"は所定の距離（防波堤先端付近）まで氷群を流下させた場合、"CASE1-3"は計算済の"Initial"状態（くびれ上面まで氷群で埋め尽くされ、安定した状態）を初期値として、計算を開始し、所定の距離（防波堤先端付近）まで氷群を連続流下させた場合、である。なお、CASE1-3の違いは群と群の間隔が異なる。それらの計算には同じ"Initial"状態を初期値とした。

表-4.5 ケース T1 の計算条件の詳細  
(他のケースも網掛け部以外同様)

	Initial	CASE0	CASE1	CASE2	CASE3
時間ステップ(s)	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
氷盤半径(m)	6	6	6	6	6
氷厚(m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1群あたりの粒子層数	11	11	11	11	11
群の数	5	14	9	10	10

### (3) 主要な結果

■ 航路断面変化部（くびれ部）の荷重伝達特性の影響度は大きく、それより上流側の氷荷重の半分以上（6~7割）を分担する（図-4.29）。また、くびれ上面からの被覆距離にその上面でのべ長さを乗じた仮の被覆エリアに作用する抗力を推定し、実際に作用する荷重との比をとると、この比は1.8にも達し、単純に上面の

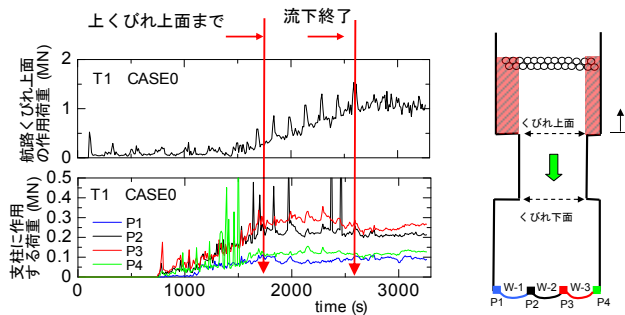


図-4.29 連続流下(CASE0)の際における航路くびれ上面部の作用荷重と各支柱の作用氷荷重推移の比較例 (T1(r=6m))

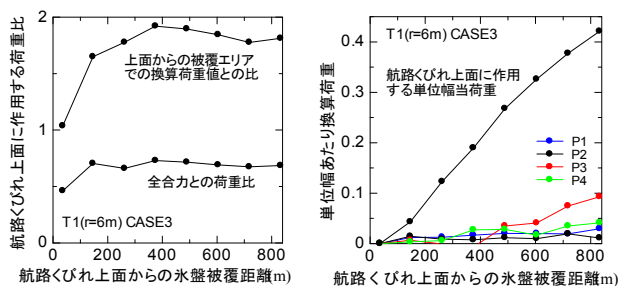


図-4.30 (a) 航路くびれに上面に作用する荷重分担（検討ケース T1(r=6m) CASE3)

図-4.30 (b) 各部へ作用する単位幅当氷荷重の推移例（検討ケース T1(r=6m) CASE3)

上流側への延長上のエリア内部に存在する氷群の抗力よりも広いエリアの氷群の抗力を受け持っている事が推察された（図-4.30）。さらに、ケース T1\_2（最もくびれ部が狭い場合）では、くびれ上面部より上流側の荷重はくびれ上面部でその荷重をほぼすべて受け持つ、つまりアーチに近い骨格が形成されている可能性が示唆され、断面変化部の存在の影響は大きい事が分かった。

- 個別要素シミュレーションでは、航路くびれ部でアーチが形成するという仮定は成り立たないものの、くびれ部上面より上流側で氷群が堆積しても、アイスブームや支柱に作用する分担荷重の増加率は大きく減少、あるいは一定値となる（図-4.31）。
- 各部へ作用する荷重は、わずかな氷盤配列、流下間隔、氷盤の大きさ等の違いによって、大きく異なり、各部へ作用する荷重のオーダーが異なるほか、中央のアイスブームが最も大きな力を示すとは限らない。
- 氷盤の大きさの違いが及ぼす各部への作用荷重への明確な影響は、わずかな粒子配列の違いや流下方法の違いに比べて、少ないと考えられた。
- 航路くびれ部による荷重の減少率から推察して、さらに防波堤先端部の影響を考えると、防波堤先端部より上流側の氷群の影響はないと考え、影響被覆長として防波堤先端部まで考慮すれば十分であると考えた
- このように、複雑な境界条件（地形）となると、各部に作用する伝達荷重も複雑であり、直線水路における伝達荷重より低減することが分かった。そこで、本研究で開発したDEMを用いて、実際の地形でのアイスブームへの伝達荷重、および、同じ条件での単純な直線水路（幅Bはアイスブームスパン）における伝達荷重を計算し、その両者の比（ $\eta$ :低減率）を推定して、次式で計算することを提案した。

$$F = \eta BF_i$$

$$F_i = \int_0^{L_i} \tau_i dx \cong \frac{1}{2} \rho C_{D2} V_0^2 L_i$$

$V_0$ : 断面平均流速、 $C_{D2}$ : 平均抗力係数、 $L_i$ : 氷群被覆長、 $B$ : 構造物幅

- 以上の考えのもと、能取湖口アイスブームの設計荷重の推算に応用した。3つのアイスブームは設計論的に等しい荷重が作用すると考え、設計荷重は各部への荷重伝達基本エリアに作用する荷重の0.9倍(低減率)であることを提案し、また、支柱については、中央のP2&P3は最大で0.8、両端部の支柱P1&4は原理的に

はその最大値の半分である0.4とすれば十分であることを提案した(図-4.32).

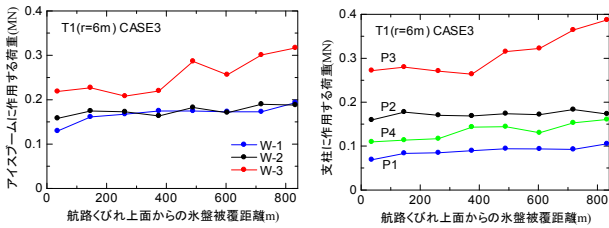
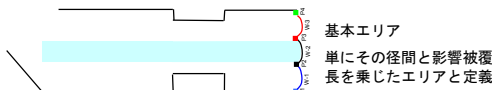


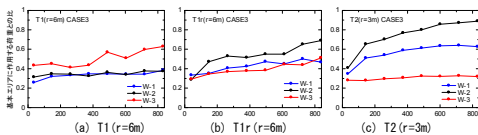
図-4.31 航路くびれ上面からの氷盤被覆長に応じた各部へ作用する氷荷重の推移例 [T1(r=6m)]

アイスブームの分担荷重

- 3つのアイスブームは設計論的に等しい荷重が作用すると考える
- 基本エリア内に作用する基本氷力との比は最大で0.9



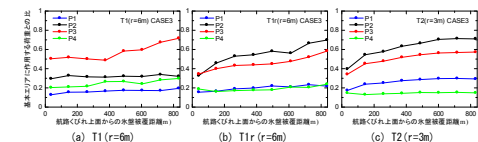
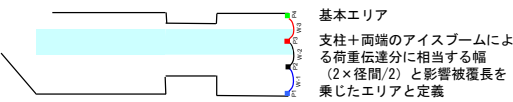
個別要素シミュレーションによれば、わずかな粒子配列や、流下間隔、粒子径などにより、W-1,2,3でオーダーが異なり、中央W-2が一番大きいとは限らないこと、航路くびれ部の開きの大きなW-3がW-1に比べて大きいとは限らない



アイスブームに作用する荷重と荷重伝達基本エリアに作用する荷重との比の例

支柱の分担荷重

- 中央のP2&P3は、基本エリア内基本氷力との比を0.8と考えれば十分
- 両端部の支柱P1&4は原理的にはその最大値の半分である0.4とすれば十分



各支柱に作用する荷重と荷重伝達基本エリアに作用する荷重との比の例  
注意) アイスブームの0.9と比べ、0.8と小さな数値になるのは矛盾に感じるが、組み合わせの問題で、例えば中央のアイスブームW-2が大きければその両端部は小さくなる傾向があり、平均化すれば、これより小さくなる

図-4.32 能取湖口アイスブームの設計荷重の推算への応用例

4.5 これまでの研究成果のとりまとめ、およびアイスブーム型海水制御構造物への作用力推定法の提案

最後に、これまで実施してきた数値計算、水理模型実験および理論解析的アプローチによる研究成果をとりまとめ、アイスブーム型海水制御構造物への作用力推定法を提案し、フローチャート形式にまとめた(図-4.33).

また本研究成果は、能取湖アイスブームの設計外力の推定に活用された。

本章における参考文献

- 1) 榎国夫, 國松靖, 大平正治, 村木義男, 佐伯浩: 新型 Ice Boom の開発, 第 7 回寒地技術シンポジウム論文集, pp.638-643, 1991.
- 2) 榎国夫, 石井千万太郎, 國松靖, 佐伯浩: Ice Boom による氷盤移動制御, 海洋開発論文集, Vol.8, pp.153-158, 1992
- 3) 上田俊也, 佐伯浩, 山下俊彦, 村木義男, 榎国夫: 浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol.8, pp.135-140, 1992.
- 4) Beltaos, S.(1983). "RIVER ICE JAM: THEORY, CASE STUDIES, AND APPLICATIONS," *J.Hydraulic Engineering*, Vol.109, No.10, pp.1338-1359.
- 5) 大森英治, 小笠原勝, 松田純一, 竹内貴弘, 佐々木幹夫(2005), 氷板の下面形状が粗度係数に与える影響についての室内実験, 寒地技術論文集, Vol.21, pp.450-454.
- 6) Johannessen, O.M.(1790). "Note on Some Vertical Profiles Below Ice Floes in the Gulf of St.Lawrence and near the North Pole," *J.Geophys.Res.*, Vol.75, No.15, pp.2857-2861.
- 7) Reynolds, M., C.H.Pease and J.E. Overland (1985). "Ice drift and regional meteorology in the southern Bering Sea," results from MIZEX West. *J. Geophys. Res.*, 90 (C6), 11967-11981.
- 8) Langleben, M.P. (1982). "Water Drag Coefficient of First-Year Sea Ice," *J. Geophys. Res.*, Vol.87, No.C1, pp.573-578.
- 9) Langleben, M.P. (1980). "Water Drag Coefficient in AIDJEX", Station Caribou, in *Sea Ice Processes and Models*, edited by R.S. Pritchard, pp.464-471, University of Washington, Seattle, 1980.
- 10) McPhee, S.D. and J.D.Smith (1976). "Measurement of the turbulent boundary under pack ice," *J. Phys. Oceanogr.* No. 6, pp.696-711.
- 11) Untersteiner, N. and F.I. Badgley (1965). "The Roughness Parameters of Sea Ice," *J. Geophys. Res.*, 70(18), 4573-4577.
- 12) Campbell, W.J.(1965). "The wind-driven circulation of ice and water in a polar ocean," *J.Geophys.Res.*, 70(14), 3279-3301.
- 13)
- 14) Shirasawa, K. and Langleben, M.P.(1976). "Water Drag on Arctic Sea Ice," *J.Geophys.Res.*, 81(36), 6451-64.
- 15) Smith, S.D. (1974). "Program A to D for analog-to-digital conversion and processing of time series data," *Compt. Note Ser. B1-C74-1*, Bedford Inst.of Oceanogr.,



Dartmouth, Nova Scotia, Canada.

16)Wadhams, P.(2000). “ ICE IN THE OCEAN” published by GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS.  
 17)McPhee, M.G.(1979). “The effect of the oceanic boundary layer on the mean drift of pack ice,” application of a simple model. *J. Phys. Oceanogr.* 9(2), 388-400.  
 18)Peace, C.H., Salo, S.A. and J.E. Overland (1983). “ Drag Measurement for First- Year Sea Ice Over a Shallow

Sea,” *J. Geophys. Res.*, 88(C5), 2853-2862.

19)Wamser, C. and D.G Martinson (1993). “ Drag Coefficients for Winter Antarctic Pack Ice,” *J. Geophys. Res.*, 98(C7), 12431-12437.  
 20)関口浩二・遠山哲次郎・荒田崇・清水敏晶(1997)：サロマ湖湖口部に作用する氷力に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 853-858.

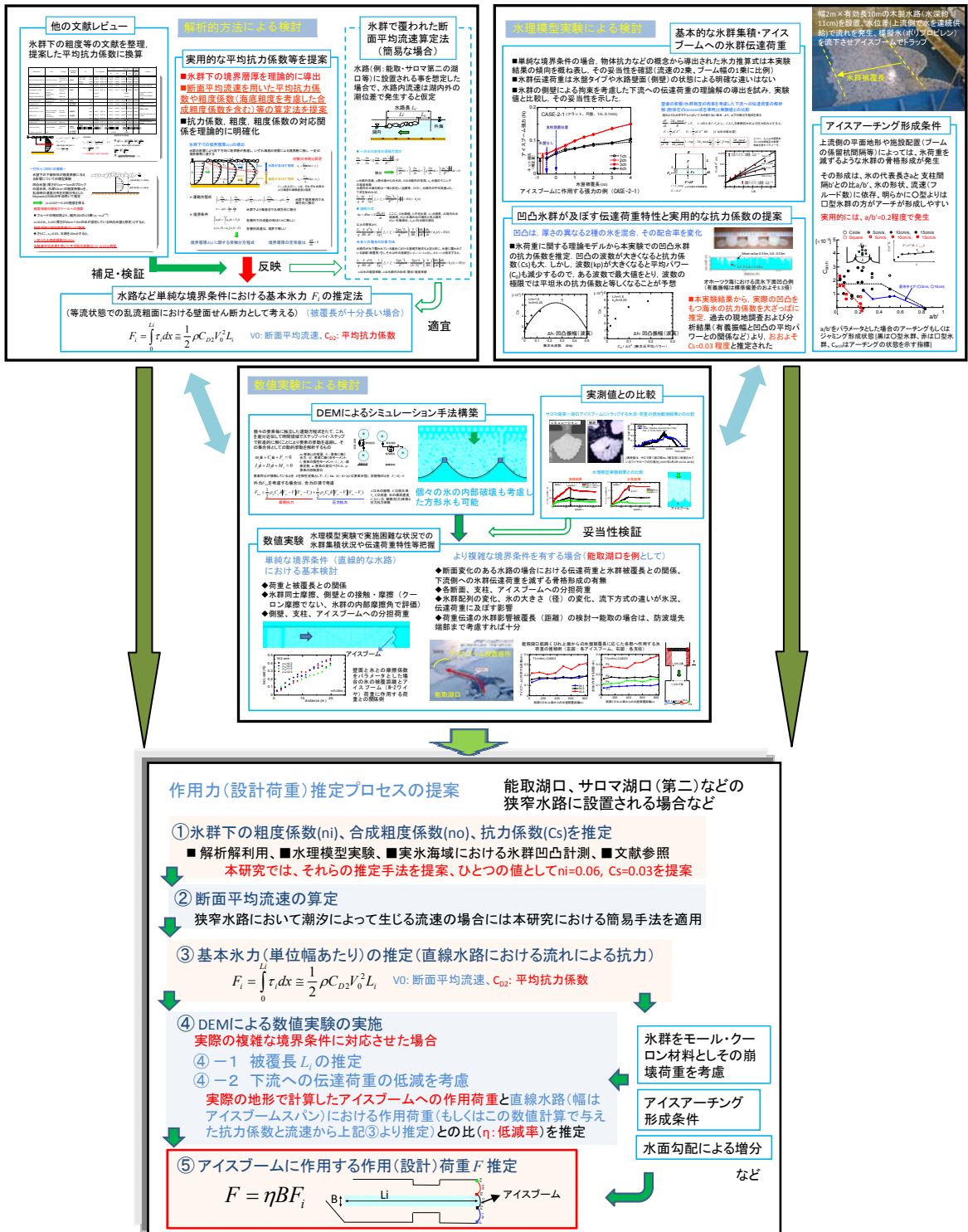


図-4.33 これまでの研究成果のとりまとめ、およびアイスブーム型海水制御構造物への作用力推定法の提案

## 5. 津波来襲時の作用水力に関する研究

### 5.1 研究概要

本研究では、①水理模型実験による津波による氷群の基本的な挙動や衝突力推定のために必要な漂流（衝突）速度特性等を把握すること、②中規模程度の構造物への海水の衝突実験を実施し、海水の衝撃荷重特性や破壊機構を明らかにするとともに、衝撃破壊を再現する基礎的な数値計算手法を開発こと、③これにより、構造物へ作用する衝撃的冰荷重の推定法の構築に資する基礎的ツールを獲得ないしは、複雑な衝突現象の理解、実験データの補完、実験困難な条件での推定などの数値実験用ツールを獲得すること、④そして実験および数値実験結果より簡易推定式を構築することにある（本研究では平板に作用する氷塊衝突力に限定）。

### 5.2 氷盤の漂流挙動に関する水理模型実験

#### 5.2.1 実験方法と実験条件の概要

現地の 1/100 程度の縮尺を想定した水理模型実験を実施して氷盤の遡上状況のビデオ撮影を行って漂流挙動を把握した。実験には小型造波水路（長さ 24.0m, 幅 0.8m, 深さ 1.0m）を用い、1/30 の海底勾配から続く水平床面上に図-5.1 に示すようなモルタル製の直立護岸模型を設置した。ここで、直立護岸前面の水深は 10cm, 天端高さは 3.0cm で一定としている。実験に用いた模型氷盤は厚さが 0.5cm の円形とし、直径を 3.0cm（質量 3.5g）および 6cm（質量 14.1g）の 2 種類に変化させた。材質はポリプロピレン製であり、比重は実際の氷盤とほぼ同じ 0.91 である。模型氷盤は図-16 に示すように護岸前面から 3.0m の範囲に浮かべており、カバー率（水域面積に対する氷盤占有面積の割合）を 0, 20, 40, 60, 80% の 5 種類に変化させてその影響を確認している。

遡上する氷盤の挙動の測定にはデジタルビデオカメラを用いており、護岸前面から 70cm の範囲を撮影した映像から画像解析によって氷盤の重心位置を読み取った。ここでは、漂流速度が最も早い氷盤を解析の対象としている。また、沖側および護岸前面において容量式波高計を用いて水位を測定するとともに、護岸天端上においてプロペラ流速計を用いた流速測定を実施した。なお、天端上のピーク流速は測定地点によらずほぼ同じ値であったため、その平均値を取りまとめに用いた。入射波には津波モデルとして一山型の正弦波を造波して実施している。ここでは、入射波を長波領域の波に相当する  $H=2.5\sim 3.0\text{cm}$ ,  $T=6.0\sim 9.0\text{s}$  に変化させて実施した。

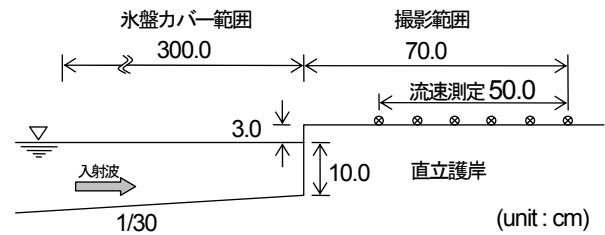


図-5.1 実験断面図

#### 5.2.2 主な結論

図-5.2 は入射波高  $H=3.5\text{cm}$ , 周期  $T=6.5\text{s}$ , カバー率 20% の条件における氷盤の漂流速度の時系列変化の一例を示している。高橋ら<sup>1)</sup> は漂流挙動について波の作用により加速する加速域、速度がほぼ一定の値で移動する安定域、底面との摩擦により速度が低下する減速域の 3 つの領域に分類している。今回の実験においても護岸を乗り越えた後に加速し、その後はおおむね等速度で漂流している。ただし、今回の検討では水平な護岸天端上を対象としており、安定域の距離が非常に長いため、減速域については撮影していない。直径が 3.0cm の条件では氷盤の質量が軽いので波が作用してすぐに加速するのに対して、6.0cm の条件では 3.0cm と比較して緩やかに加速している。ただし、安定域においては両者ともに同程度の漂流速度となっている。

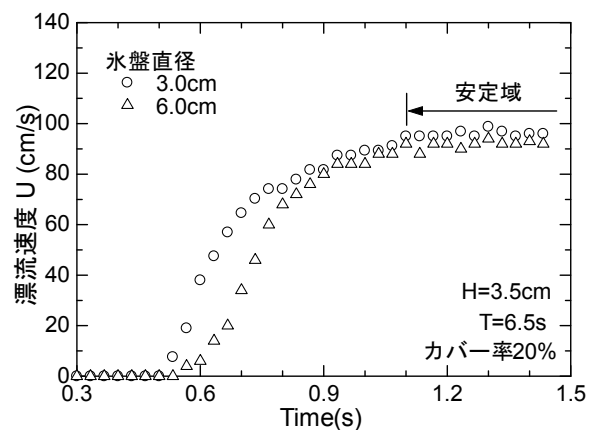


図-5.2 漂流速度の時系列変化

図-5.3 はカバー率の影響を確認するため、カバー率 0% の漂流速度に対する各カバー率の漂流速度の比  $U_{\text{mean}}/U_{\text{mean},0\%}$  とカバー率の関係で実験結果を整理したものである。ここで、カバー率 0% とは単氷盤の条件を意味している。カバー率が増すにつれて漂流速度はわずかに遅くなる傾向を示している。これは、カバー率が増大することで護岸前面に氷盤が密集して越流流速が低下するためと考えられる。ここでは、氷盤の直径を変化させ

ているが、3.0cm および 6.0cm とともにほぼ同様の傾向であった。図-5.4 は漂流速度が最も速い値を示したカバー率0% (単氷盤) の条件に着目して氷盤の漂流速度  $U_{mean}$  と護岸天端上流速の関係を示したものである。その結果、3.0cm および 6.0cm とともに漂流速度と天端上流速はおおむね同程度の値を示す結果となった。漂流物による衝突力の推定にあたっては漂流速度が重要となるが、単氷盤を対象とした場合にはおおむね流速と同程度の値を用いる必要がある。

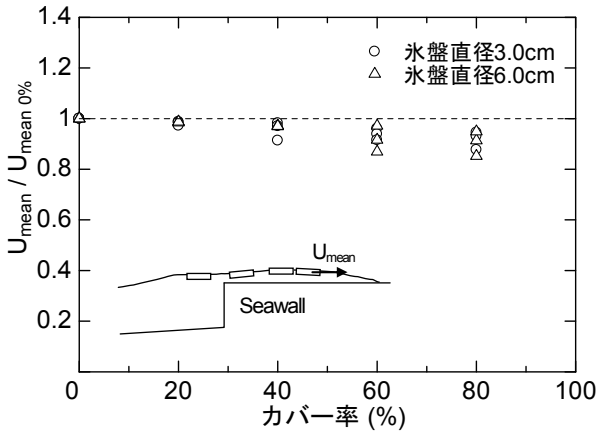


図-5.3 カバー率と漂流速度の関係

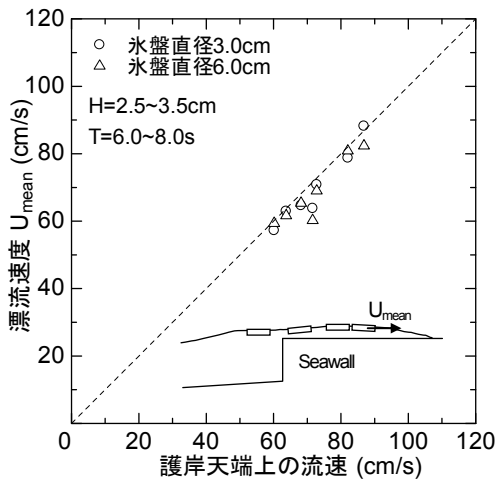


図-5.4 天端上流速と漂流速度の関係

### 5.3 中規模程度の氷塊衝突実験

#### 5.3.1 実験概要

##### (1) 実験方法

図-5.5 に示すように、衝突実験は自由落下方式により、人工海氷を、様々な構造物 (杭 or 平板) へ衝突させることにより行った。海氷 (供試体) は人工海氷を用い、様々な寸法の直方体に整形した (厚さ  $t$  は約 0.16m と一定)。

破壊強度に敏感な氷温を制御するため人工海氷は低温室にて作成した。衝突を受ける構造物のひとつに杭を採用した理由は、防護柵などを想定したためである。杭構造物の場合、両端単純支持で、その支間長を 0.6m、0.3m とした固有周期  $T$  の異なる 2 種類の SS 材の丸棒 (直径  $d$ :60mm, 固有周期  $T$ : それぞれ  $3 \times 10^{-3}$ sec.,  $5 \times 10^{-4}$ sec.) で、両支点部にロードセル (定格容量:20kN), 杭の下側に歪ゲージを配置し、衝突時の支点反力やひずみをサンプリング間隔 5kHz で計測した。破壊モードは高速ビデオカメラなどで観察するとともに、個々の供試体の氷温, 密度, 塩分量, 人工海氷の結晶粒径 (偏光装置による撮影写真より推定) などを計測した。

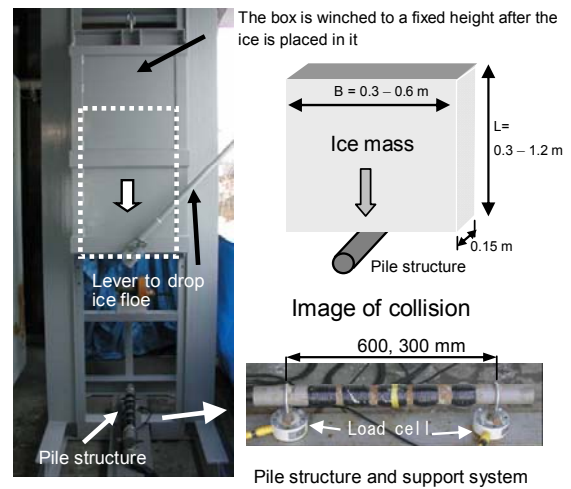


図-5.5 海氷の衝突実験装置

##### (2) 実験条件

実験条件は、表 5-1 に示すように、氷温, 人工海氷のブライン量 (塩分), サイズ, 形状, 衝突速度, 構造物形状 (杭, 平板), 構造物の規模 (杭の直径変化) などを変化させ、様々な条件下において実施した。

また、海氷以外の他の津波漂流物を意図した他材料にも着目 (材木, 鋼材) し、海氷の衝突力特性と比較した。

表 5-1 主な実験条件

氷温 (°C)	-15 ~ -5 (基本的に -10°C)	
ブライン量 (%)	0 - 7	
サイズ (m)	B	0.3 - 0.6
	L	0.3 - 1.2
	t	0.16
形状	直方体, 台形状 (氷の衝突面を水平より 15-30deg に傾斜)	
衝突速度 (m/s)	0.14 ~ 5.4	
構造物形状とサイズ (m)	杭 (0.06 ~ 0.3) 平面	

### 5.3.2 主な実験結果

#### (1) 杭構造物について

- 氷塊は脆性的に破壊し、複数の氷塊に分割されて側方へ飛散すること(図-5.6), 最大衝突力は、主に衝突時の杭近傍の圧壊・貫入(クラッシング)でほぼ決まり、それは僅かな破壊粒子の移動あるいは僅かな杭への貫入でも衝突力の緩和が発生し、その後の連続的なクラックの伝搬機構はあまり影響を及ぼさないことが推察された。
- 破壊時の最大衝突力の衝突速度依存性は破壊が生じない場合のそれに比べてかなり小さいこと、衝突方向の氷塊の長さは衝突力にあまり影響を及ぼさないことが推察された(後述の図参照)。
- 衝突力は氷温の低下にともなって直線的に増加、運動エネルギーの変化よりも氷温依存性の方が大きいことも推察された(図-5.7)。
- 氷の塩分濃度が衝突力に与える影響を調べた結果、塩分濃度の減少とともに衝突力は増加傾向にあったが、2‰以下ではほぼ一定となる事が推察された(図-5.8)。
- 氷の衝突面が傾斜した場合の衝突特性について調べた結果、水平からの氷の衝突面の傾斜角が大きくなるとともに減少傾向にあった。またその傾斜角による衝突力への影響の程度は、「斜め衝突」のアナロジーにより説明できた(同図の波線)。また立ち上がり時間は短くなる傾向にあった。破壊特性として、特に傾斜角が30deg.の時、杭の周りで複数のクラックが入り、それが端部に伝搬して分離するといった破壊状態であった(図-5.9)。

#### (2) 他材料(海氷以外の漂流物を想定)の衝突破壊特性と海氷との比較について(杭構造物を使用)

- 工海氷の質量や寸法・形状を同一となるよう調整した木材(無垢のカラマツ)や鋼製材料の衝突実験を実施した。海氷と異なり、脆性破壊を生じない(破壊後の飛散が伴わない)鋼材や木材の場合、衝突力は海氷と比べて、およそ1オーダー大きくなること、速度および質量に応じてほぼ比例して増大することが明らかとなった。
- 木材の衝突力は木の繊維の方向に大きく依存し、衝突方向が木の繊維に平行となる場合の衝突力は、垂直とした場合より、およそ2倍程度大きくなることが分かった(図-5.10)。
- エネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理

論を適用した簡易モデルによる推定値は、材料の塑性変形を考慮していない分過大評価する傾向にはあったが、実測の衝突力の傾向をよく説明できた(図-7)

- 松富らによる流木の衝突力推定式(松富理論)<sup>2)</sup>と本実験結果を比較した結果、松富理論も本実験結果の傾向を概ね表す事がわかった。特に、木材の繊維が衝突方向と平行の場合、降伏応力 $\sigma_f=300-800\text{MPa}$ 、そして垂直の場合その15%くらいと仮定すると、衝突力が概ね一致することが分かった(図-5.11)。

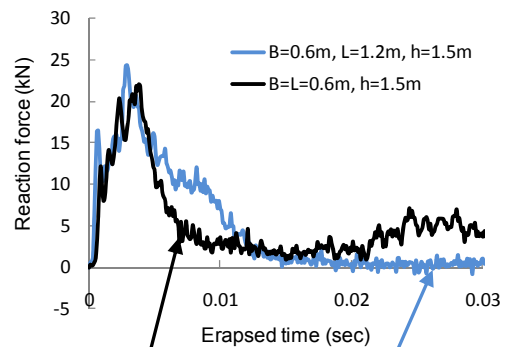


図-5.6 支点反力波形及び破壊モード

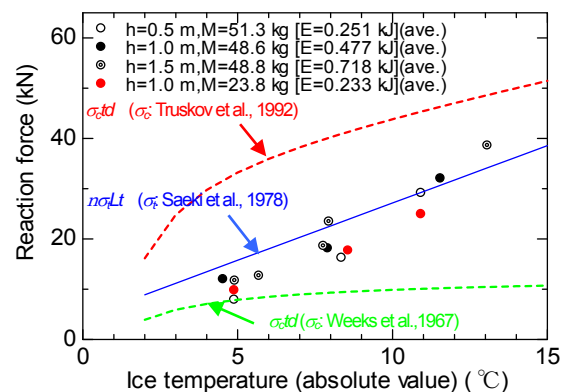


図-5.7 氷温(絶対値)と衝突力(最大値)との関係 (Pile:  $T=3 \times 10^{-3}\text{sec}$ )

The dotted lines show the values of estimated compressive strength converted to a force, which was multiplied by the diameter of the pile ( $d$ ) and the ice thickness ( $t$ ). The curves in the figure were estimated from the equations given by Truskov et al. (1992)<sup>3)</sup> and Weeks (1967)<sup>4)</sup>. The formula by Weeks (1967) excludes the effects of loading and the strain rate to form a compressive strength index. The blue line shows the force to the tensile strength, multiplied by the length ( $L$ ) of the ice and the ice thickness, was converted. The values were multiplied by 0.5.



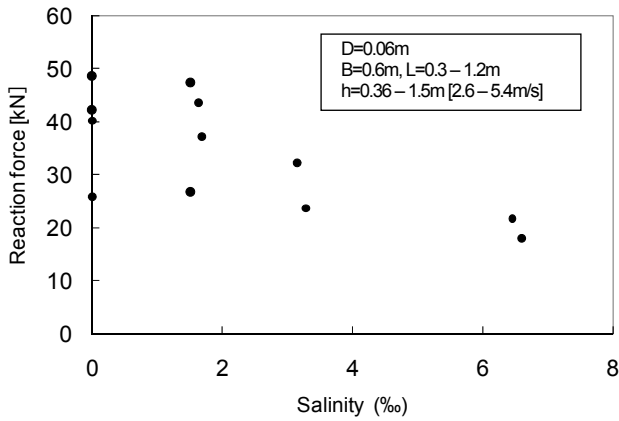


図-5.8 氷の塩分濃度が衝突力に与える影響

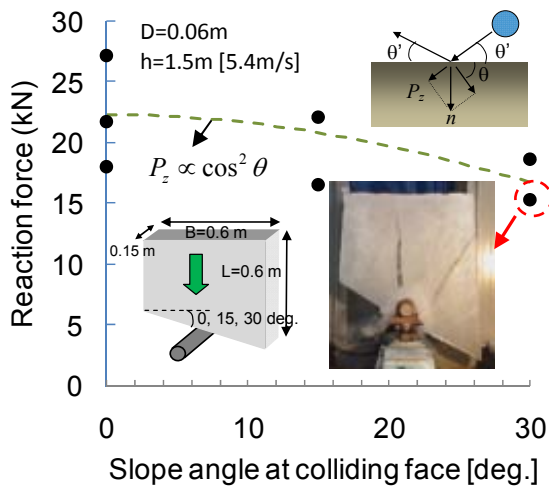


図-5.9 氷の衝突面が衝突方向に対して傾斜した場合の衝突力特性

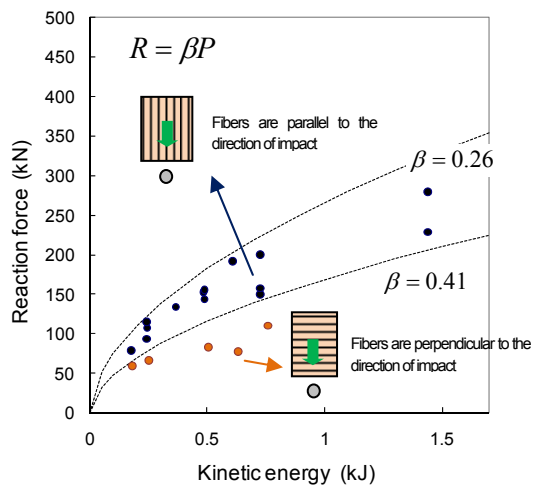


図-5.11 海氷以外(木材; カラムツ)の衝突力特性 (波線はエネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる予測値。βは補正係数) (D=0.06m, B=0.6m, L=0.3-1.2m, h=0.36-1.5m) (T=5×10<sup>4</sup>sec)

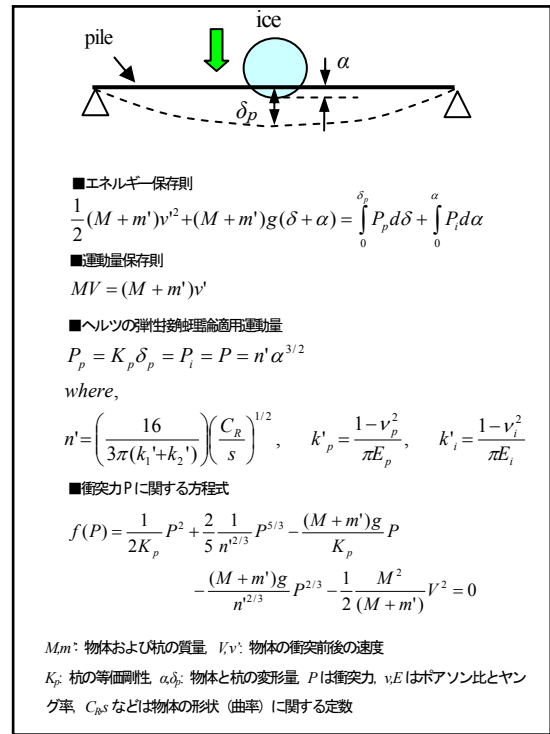
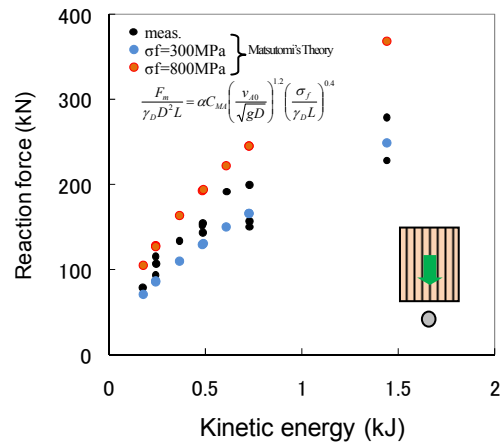
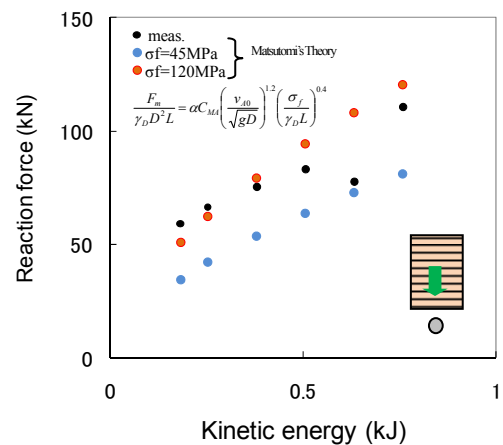


図-5.10 杭への衝突の簡易モデル



(b) 落下方向が繊維と平行

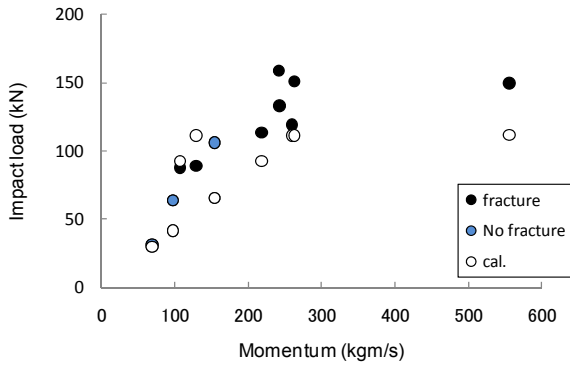


(a) 落下方向が繊維と垂直

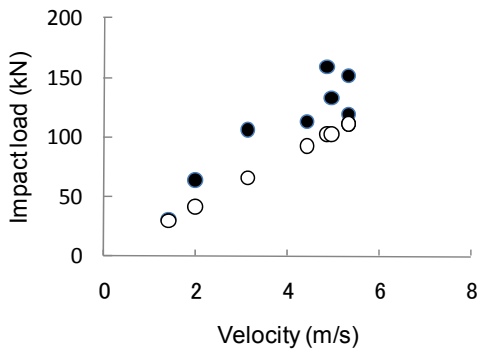
図-5.12 木材の衝突力の実験結果と松富理論<sup>2)</sup>との比較 (T=5×10<sup>4</sup>sec)

(1) 平面構造物について

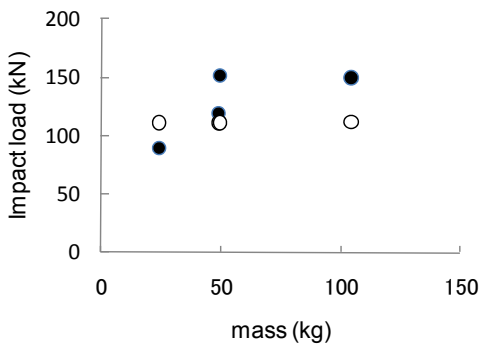
- 鉛直方向においては、杭のように複数の氷塊に分割されて飛散することがないため、数値実験結果も含め、破壊の有無にかかわらず、衝突力は運動量に比例して増大する。杭の場合と同様、氷塊の長さは衝突力に影響を及ぼさないことが分かった。



運動量と最大衝突力との関係



衝突速度と最大衝突力との関係



質量と最大衝突力との関係

図-5.13 運動量、衝突速度、質量と最大衝突力との関係

5.4 氷塊の衝突破壊シミュレーション手法の検討

5.4.1 シミュレーション手法の概要

氷塊には、それを構成する要素（粒子）間に引張抵抗を与えた 3 次元個別要素モデル(DEM)を適用し、構造物の解析には FEM を適用した。DEM は、岩石や RC 構造物などの衝撃破壊解析への適用例も多い<sup>(例えば5)</sup>。本研究で用いた計算コードは自作であるが、基本的には、文献(6)7)等による概念に基づいている。DEM では、要素（粒子）の集合体において、次式に示すように、個々の要素毎に独立した運動方程式（並進・回転）をたて、これを差分近似して時間領域で前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析しようとするものである。なお、本研究では氷を構成する個々の要素をすべて同じ半径( $r$ )をもつ球体とした。

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

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} + \sum_j (\mathbf{r} \hat{\mathbf{i}}^{ij} \times \mathbf{f}_s^{ij}) + \mathbf{G}_i = 0$$

ここに、 $m_i$ : 要素  $i$  の質量、 $\mathbf{u}_i$ : 要素  $i$  の変位ベクトル、 $\mathbf{f}^{ij}$ : 要素  $j$  が要素  $i$  に与える力のベクトルで添字  $n, s$  は要素間の法線および接線方向を示す、 $\mathbf{F}_i$ : 要素  $i$  に作用する外力ベクトル、 $\mathbf{G}_i$ : 要素  $i$  に作用する外力モーメント、 $I_i$ : 要素の慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}_i$ : 要素  $i$  の各速度ベクトル、 $\hat{\mathbf{i}}^{ij}$ : 要素  $i$  から  $j$  の中心間の直方向の単位ベクトル、である。要素間の接触には、図-3 に示すようにスプリングとダッシュポットから成る Voigt model を適用して、 $\mathbf{f}^{ij}$  を計算した。

要素間の破壊（分離あるいは結合の破断）の条件のうち、接線方向については Mohr-Coulumb の破壊基準を適用し、接線方向の力が次式のせん断抵抗 ( $FS_{CRT}$ ) を上回った場合にその粒子間結合を破断させた。

$$FS_{CRT} = C + f_n \tan \phi_c$$

$$= b_{xy} b_{xy} c + f_n \tan \phi_c$$

ここに、 $\phi_c$  は氷の内部摩擦角、 $c$  は粘着応力、 $f_n$  は要素間の法線方向接触力、図-5.14 に示すように、 $b_x, b_y$  はそれぞれ  $x-z$  平面および  $x-y$  平面に配列した要素間の接触幅であり、それぞれの配列において要素に外接および内接する正多角形の 1 辺と仮定した。その粒子配列は、 $x, y, z$  軸をそれぞれ幅、厚さ、および長さ方向（衝突方向）とすると、 $x-z$  平面において、等径要素六角形配置（最密格子）、 $y-z$  平面において 4 角形配置とした。なお、粒子間結合は直に接していない第 2 近接の粒子間へも適用した。

さらに法線方向の破壊基準は、要素間に引張力が作用した場合で、次式のように、時刻  $t$  での要素間ひずみがある閾値を超えた場合に破断するものとする

$[D_{ij}]_t$  は、要素  $i$  と  $j$  の中心間距離、 $L_{ij}$  は時刻ゼロにおける要素  $i$  と  $j$  の中心間距離、 $\beta$  は閾値であり、引張限界ひずみに相当するものである。

$$[D_{ij}]_t \geq \beta L_{ij} = \beta(r_i + r_j)$$

$[D_{ij}]_t$  は、要素  $i$  と  $j$  の中心間距離、 $L_{ij}$  は時刻ゼロにおける要素  $i$  と  $j$  の中心間距離、 $\beta$  は閾値であり、引張限界ひずみに相当するものである。

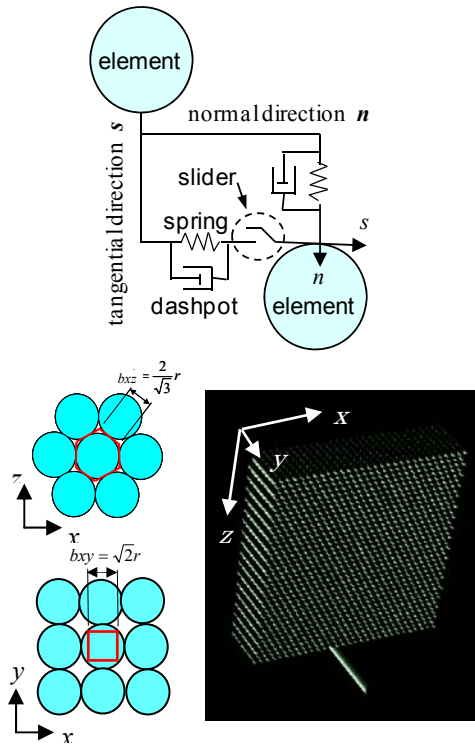
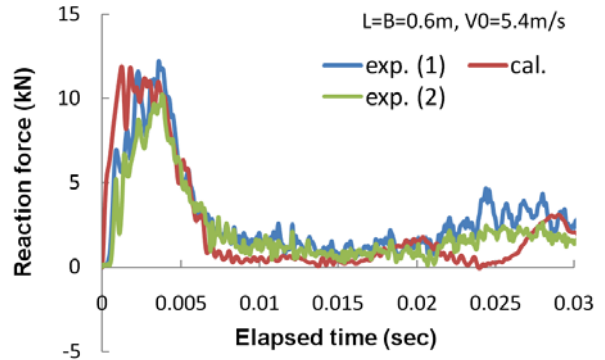


図-5.14 個々の剛体粒子の接触と粒子配列

#### 5.4.2 主な結果

- DEM を用いたシミュレーション結果は、実験の衝突力波形や破壊モードを良好に再現するとともに (図-5.9), 衝突力 (最大値) や rise time (立ち上がり時間) の条件変化による推移・傾向特性を良好に再現した (図-5.15-5.17).
- 例として図-5.15 に示した計算結果に対応する要素間の最大引張力分布と破壊亀裂数の分布の経時変化の計算結果 (図-5.18 参照) から推察されることは、応力波が伝搬した後、やや遅れて亀裂が生成し、結局、引張破断に起因するクラックが進展して破断に至る。一方、杭近傍では、せん断による亀裂も発

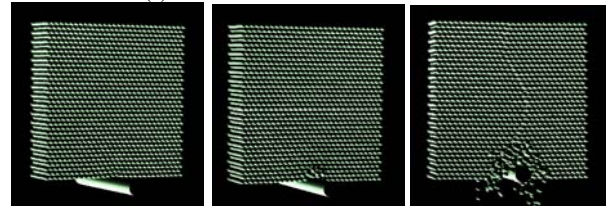
生し、複合的な破壊が生じている。また図は省略したが、引張力より 1 オーダー大きい圧縮力が作用するが、それは杭近傍に限られることが推察された。したがって、破壊機構は杭近傍の破壊 (圧壊, 貫入) とその周辺のクラック伝搬という 2 つのプロセスから成り立つと考えることができた。



(a) 衝突力 (支点反力) の経時変化



(b) 主な破壊のスナップショット (実験結果)



(c) 主な破壊のスナップショット (計算結果)

図-5.15 代表的ケース ( $B=L=0.6, V_0=5.4\text{m/s}$ ) の衝突力 (支点反力) および破壊性状の経時変化

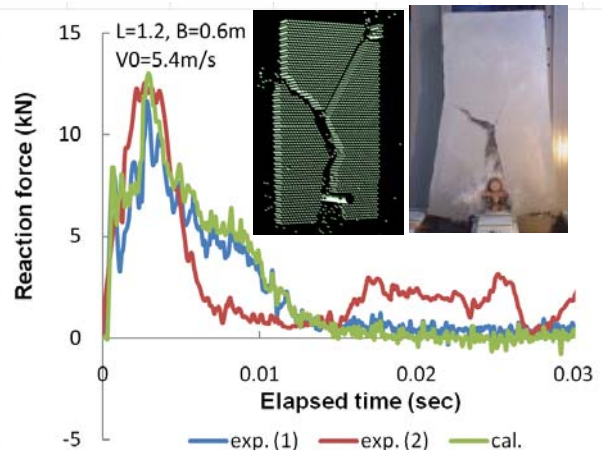


図-5.16 衝突方向に長い氷塊 ( $B=0.6, L=1.2, V_0=5.4\text{m/s}$ ) の衝突力 (支点反力) および破壊性状の経時変化

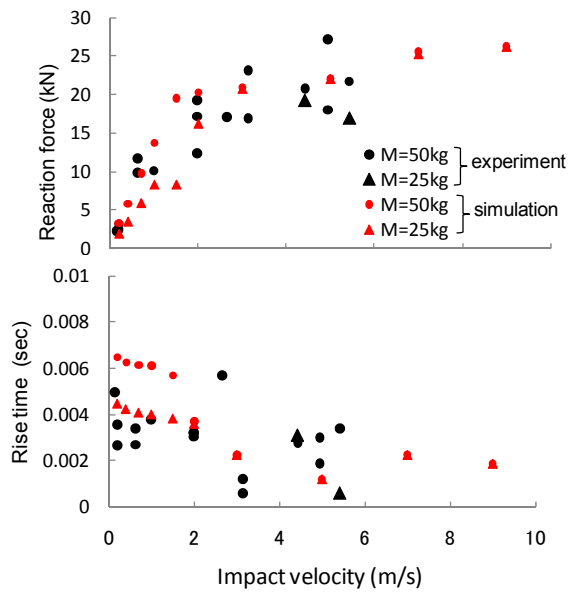


図-5.17(a) 衝突速度にともなう最大衝突力（上図）と rise time（下図）の推移および計算値との比較（ケース1）

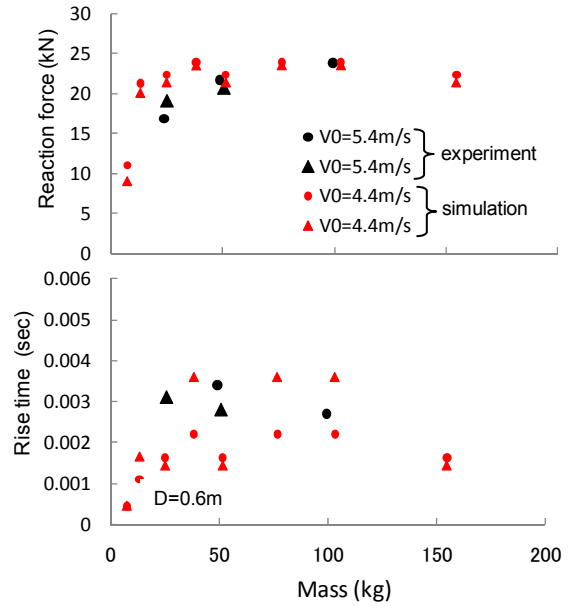


図-5.17(b) 質量変化にともなう最大衝突力（上図）と rise time（下図）の推移および計算値との比較（ケース2）

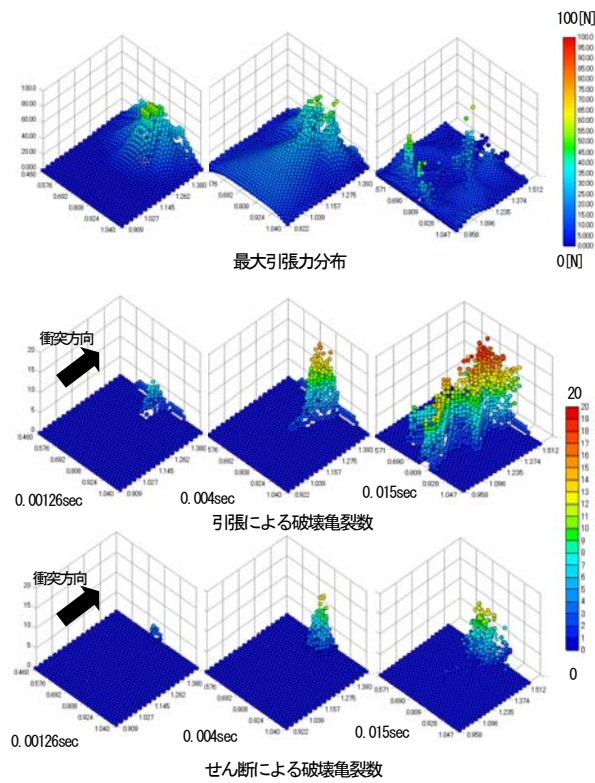


図-5.18 最大引張力分布と破壊亀裂数の分布の計算例  
(図-5.15の計算結果に対応)

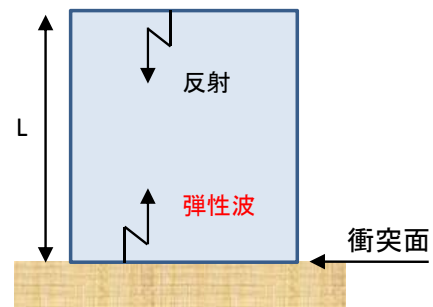
最大引張力は1つの粒子に作用する最大値を示すが、煩雑さをさけるためこれを平面的(x-z面)に見ることとする。つまり、y方向に重ねて見ているため、その方向の最大値を代表して表示していることとなる。破壊亀裂数とは、一要素あたりの結合の破断数を示すが、同様にy方向に重ねてみている。

### 5.5 氷塊が平板に作用する衝突力の簡易式の提案

本研究では、未だ限定的であるが直方体の氷塊が平板へ及ぼす最大衝突力( $F_{max}$ )の簡易式を提案した。まず、氷を弾性体と仮定すると、運動量と力積の関係より、

$$P = \int_0^{t_0} F(t) dt = t_0 F_{max} = (1+e)mV_0$$

$$\begin{aligned} F_{max} &= \frac{(1+e)mV_0}{t_0} \\ &= \frac{(1+e)}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} mV_0 \\ &= \frac{1+e}{2} \sqrt{\rho E} BhV_0 = \sqrt{\rho E} BhV_0 (\because e=1) \end{aligned}$$



ここに、 $t_0$ : 作用時間で弾性波の往復時間、 $m$ : 質量、 $V_0$ : 衝突速度、 $e$ : 跳ね返り係数、 $E$ : 動弾性係数、 $\rho$ : 密度、 $B$ : 氷の幅、 $h$ : 氷の厚さ、 $L$ : 氷の長さ



このように、衝突力は氷塊の長さ方向  $L$  に無関係となる。

実験および数値実験結果から、横軸を前式の右辺を横軸に、平板に作用する最大破壊衝突力 ( $F_{max}$ ) を縦軸としてプロットすると (図-5.18)、破壊・非破壊・速度・幅・厚さ・ヤング率・密度の変化に関わらず、ほぼ一つの線に乗る、極めて興味深い結果を得た。つまり結果的ではあるが、氷塊を弾性体と仮定した最大弾性力に等価であり、簡易式の妥当性が示された。

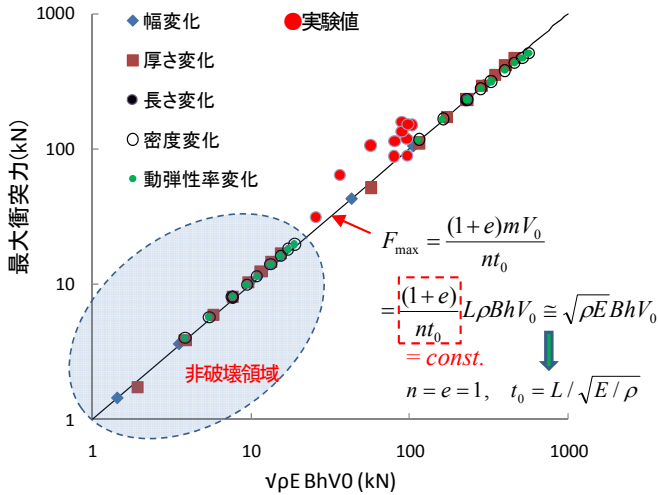


図-5.18 実験結果および数値実験結果による簡易式の妥当性の検討

しかし、これは、矩形の氷が平板に完全かつ均等に全面接触するという仮定において成り立つもので、現実にはほとんどない。そこで、数値実験で、氷を傾けて (2 軸回りに回転) 平板に衝突させ、その衝突力の低減率について検討 (氷内部の強度の空間的なバラつきについては考慮しない) した (図-5.19)。まず数値実験により 2 軸回りの合成回転による衝突力の低減率  $\eta$  (回転なしを基準) に関する簡易式をつくり、図-5.19 の x 軸回りの回転角を正規分布、y 軸回りの回転角を一様分布と仮定し、モンテカルロシミュレーションにより、低減率の統計分布や統計量を獲得した (表 5-2)。1%超過で評価すると、X 軸周りの回転角の標準偏差が 2deg. のとき、0.805 最大で 0.906 (x 周りの回転角がゼロ) となる。本来は実現象の調査から回転角の統計分布や標準偏差をすべきであるが、実務においては  $\eta=0.8\sim 0.9$  と考えて良いと思われる。

結局、本研究で得た、氷塊が平板に作用する衝突力の簡易式は、

$$F_{max} = \eta \sqrt{\rho E B h V_0} [\eta = 0.8 - 0.9]$$

ここで、本研究で得た簡易式の推定のプロセスを図-5.20 にまとめた。

さらに、その式を無次元化すると ( $\eta=1$ )、

$$\varepsilon^* = \frac{F_{max}}{EBh} = \sqrt{\frac{\rho V_0^2}{E}} = \sqrt{\Pi_C}$$

となり、つまり、最大衝突力によって生じる仮想的な弾性歪  $[\varepsilon^*]$  は Cauchy 数の平方根となる。換言すれば、最大衝突力=最大弾性力と仮定できることは興味深い。

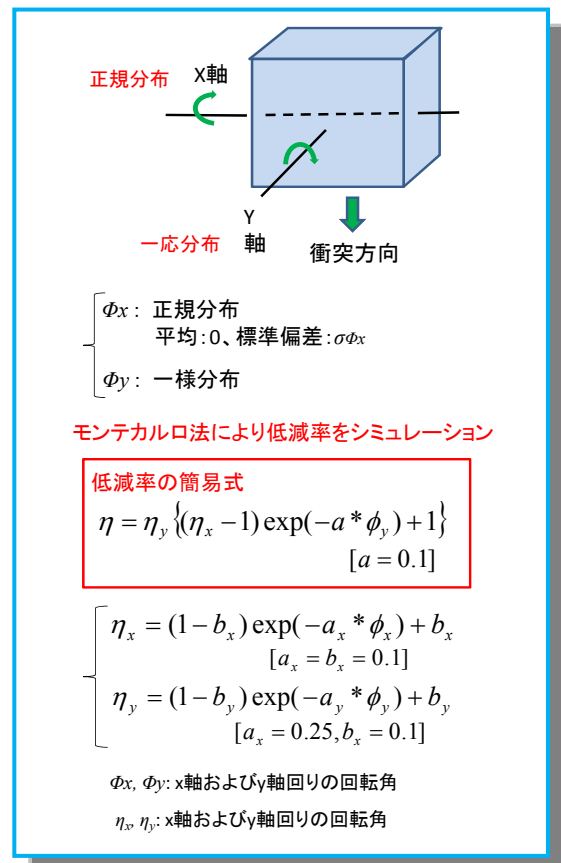


図 5.19 低減率の統計分布の推定法

表-5.2 モンテカルロシミュレーションによって得た低減率の統計量

$\Phi_x$ のS.D.	0 deg.	1 deg.	2 deg.	5 deg.	10 deg.
平均	0.181	0.175	0.171	0.159	0.147
メジアン	0.103	0.102	0.102	0.101	0.100
モード	0.100	0.100	0.100	0.099	0.099
標準偏差	0.173	0.161	0.152	0.131	0.109
1%超過	0.906	0.846	0.805	0.724	0.642

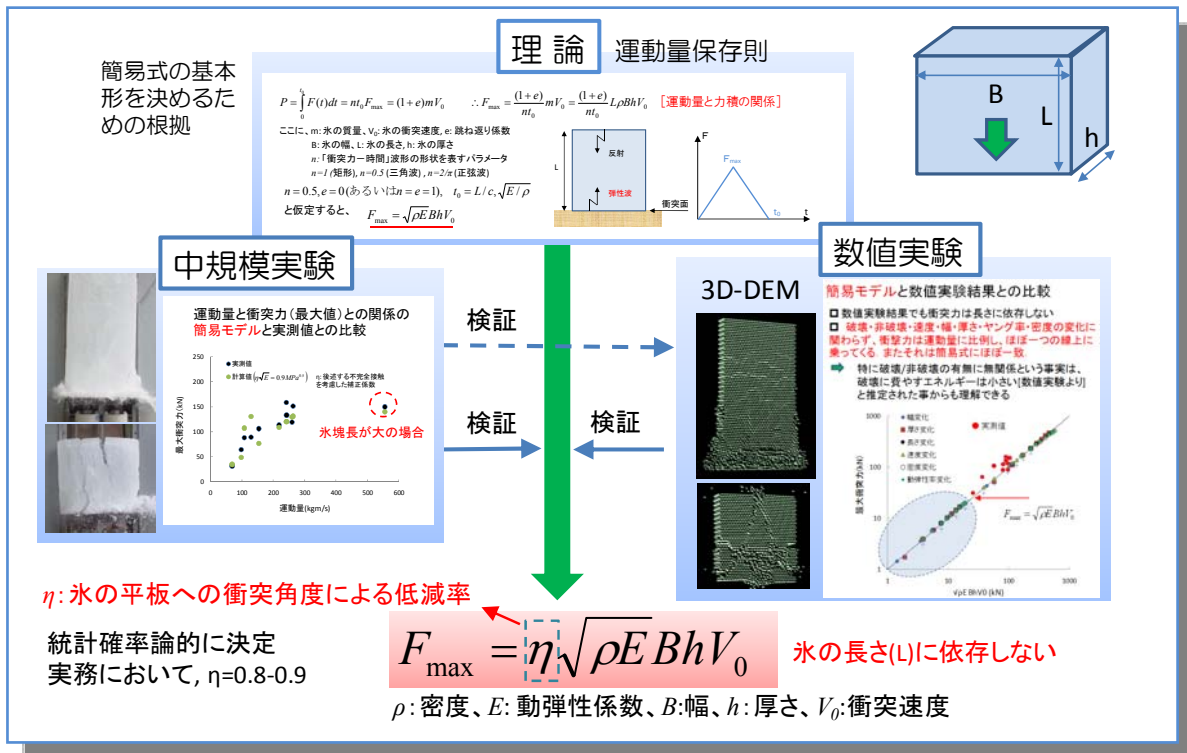


図-5.20 簡易式導出までのプロセス

本章での参考文献

- 1) 高橋良正・片山晃・花田真州・佐伯浩・山下俊彦 (1995) : 氷盤群の津波による陸上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集第42巻, pp.1236-1240.
- 2) 松富英夫 (1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集 Vol. 621, II-47, pp.111-127.
- 3) Truskov, P.A., Astafiev, V. N. and G. A. Surkov (1992) : Problems of Choice of Sea Ice Cover Parameters Design Criteria, The 7th International Symposium on OKHOTSK SEA & SEA ICE ABSTRACTS, pp.21-26.
- 4) Weeks, W. F. (1976) : Sea Ice Properties and Geometry, AIDJEX Bulletin, No.34, pp.137-172.
- 5) 鈴木真次・石川隆信・古川浩平・水山高久・石川芳治(1997) : 個別要素法による鉄筋で補強した砂防ダム袖部の衝撃破壊解析, 構造工学論文, Vol.43A, pp. 1555-1566.
- 6) 伯野元彦 : 破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997.
- 7) 粉体工学会編 : 粉体シミュレーション入門, 産業図書, 1998.

## 6. 海水による沿岸構造物の摩耗に関する研究

### 6.1 研究概要

まず海外文献などをレビューすることにより、本研究テーマの明確な位置付けを確認し、それを有意義に遂行するための基礎資料を得た。

また、材料損耗は、流水による接触が主な要因であると考え、構造物近傍での流水挙動や接触圧力およびその作用形態等の推定が重要となる。そこで、流水群の挙動や接触圧力を個別要素法による計算によって推定する手法を検討した。サロマ第2湖口の矢板護岸に設置された計測器による接触荷重の実測結果(河合ら, 2010)<sup>11)</sup>との比較から、その計算法の妥当性を検証し、汎用的な流水群の挙動解析ツールとしての可能性について検討した。

さらに、現地調査やすべり摩耗試験装置を用いた金属材料の摩耗試験、さらには水槽での腐食試験等を実施し、その基本的な損耗メカニズムを明らかにするとともに、損耗推定の簡易手法を提案した。

### 6.2 海外文献レビュー

表-6.1 に調査した主な文献の要約の一覧<sup>2)-12)</sup>を示す。まず特筆すべきは、表にも紹介した著者の一人(Abdelnour et al., 2006)<sup>12)</sup>も述べているように、コンクリートの摩耗研究は比較的多くなされているが、金属材料についてはほとんど行われていない。我々が知る限り、その著者の1編のみである。まずコンクリートの摩耗に関する研究からレビューしてみる。図-6.1には実際に使用された氷/材料の摩耗試験機の例を示す。材料を回転させたり、スライド(往復)させたりするタイプが多い。これは、一般の摩耗試験機を応用したものと思われる。しかし、Saeki et al. (1986)<sup>13)</sup>も指摘しているように、

- ① 氷の動きは間欠的であり、厳しい試験法として、動摩擦と静止摩擦を作用させるのが望ましい
- ② 既存の種々の材料の摩耗試験は主に回転方式である

が、氷粉が接触面に残ること、摩擦熱の発生が予測されること、動摩擦しか作用しないことが難点である

③ 供試体と接触している部分以外は大気に接しているため摩擦熱も放熱できる

等の、事項を踏まえ、試験方法として往復(滑動)タイプ(ブロックオンプレート)が適切であるとされている。

次に試験結果についてレビューしてみる。試験方法・実験条件や着眼点などの違いにより、多種多様な結果や場合によっては異なった結果が得られている場合があるが、幾つかのおおよその共通の見解が見受けられる。

- ① コンクリートは氷によって摩耗する
- ② 接触圧が大きい程、氷温が低下する程、摩耗量も増大
- ③ アイスクラッシングよりもスライディングの方が(氷の移動方向が、構造物表面に対して垂直よりも平行の方が)摩耗しやすいこと
- ④ 材料強度が大きいほど摩耗量は減少する
- ⑤ シリカフューム、高炉スラグの添加により耐摩耗性が向上する

また、貴重な現地調査として、ボスニア湾のコンクリート製の海中燈台の摩耗量に関する調査結果がある(Janson, 1988)<sup>8)</sup>。それによれば、図-6.2に示すように、その摩耗率は、同じ海域でも氷象条件(氷厚・海水の作用状況など)によりバラツキがあり、0.2-7mm/year、最大では、20年間に140mm摩耗したという結果が報告されている。このように海水の作用によるコンクリートの劣化は明らかであり、深刻な技術課題であることが分かる。しかし、コンクリートに関する研究は比較的進んでおり、実用的なコンクリートの摩耗の推定式が提案されており、また経験的に、その対策工も施されている。例えば、図-6.3に例示するよう、構造物表面に鋼や石材チタンなどで被覆する方法があり、ある程度の効果を発揮している。

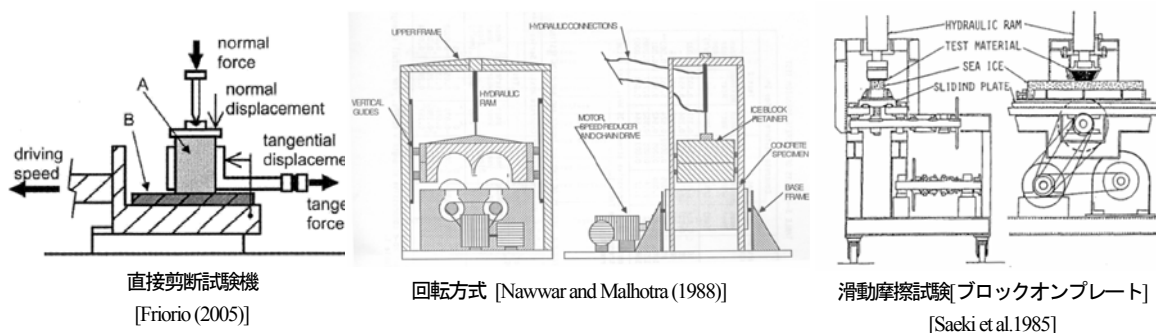


図-6.1 各種の摩耗試験機の例

表-6.1 摩耗試験または摩耗現地調査に関する主な文献調査結果の要約

論文著者	主な研究(実験・観測)方法	主要な結論
Hoff (1988) <sup>2)</sup> 室内実験	<p>[ABAM-II] 試験方法: ディスク型            試験体: 中空 LWAC, NWC コンクリート(D300/190mm, H100mm), 氷: 円柱型塩水氷 (D400mm, H120mm)            接触圧力: 0.5-1MPa, 回転速度: 60rpm(0.77m/s), 全摩耗距離: 180km            材料間が凍着しないようにエタノールを使用</p> <p>[ABAM-III] 試験方法: すべり摩擦試験[ブロックオンプレート]            試験体: N.C., L.W.C, L.L.W.C. コンクリート, 氷: 海水 [W80mm, H50-100mm, L700mm]            接触圧力: 1MPa, 速度: 50mm/s, 温度: -20°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特に摩耗距離が大きくなると氷の接触圧の影響は大</li> <li>摩耗量は, 最大でおよそ 0.003mm/km</li> <li>摩耗量は結晶方向の違いに大きく依存性しない</li> <li>初期摩耗(比較的大きな摩耗率)と定常摩耗が存在</li> <li>摩耗率は接触圧力に正比例</li> <li>-10°C以上では, 摩耗率は, 材料間(骨材の違い)に大きな違いがなく, その値も一定, -10°C以下では, 大きく異なってくる</li> <li>平均摩耗 0.05mm/km</li> </ul>
Nawwar and Malhotra (1988) <sup>3)</sup> 室内実験	<p>試験方法: 回転方式(ブロックオンリング: 円柱コンクリートを回転, アイスブロックを押しつける)            試験体: 円柱型コンクリート (D300mm, H500mm), 氷: 塩水氷(3-5ppt) [W350mm, H300mm, L800mm]            接触圧力: 6MPa, 速度 1-2.5m/s, 温度: -10°C            コンクリート表面の氷の成長を防ぐため, 30pptの塩水に浸している</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドライ条件ではコンクリート表面に氷層が発達, これが摩耗の保護層となる</li> <li>ウェット条件では, 摩耗率は, 接触圧力・表面粗さ・コンクリート強度に依存</li> <li>初期摩耗(大きな摩耗率)と定常摩耗が存在, 表面粗さは初期摩耗に影響</li> <li>摩耗率は, 0.004mm/km(Non-textured surface), 0.003mm/km(textured surface)</li> </ul>
Itoh et al. (1988&94) <sup>4)5)</sup> 室内実験	<p>試験方法: すべり摩擦試験[ブロックオンプレート]            試験体: N.C., L.W.C, L.L.W.C. コンクリート, 氷: 海水(3-5ppt) [W80mm, H50-100mm, L700mm]            接触圧力: 1MPa, 速度: 50mm/s, 温度: -20°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>摩耗率は, コンクリート強度や骨材の違いに違いはない</li> <li>平均摩耗率は 0.05mm/km</li> <li>摩耗率 <math>S_r</math> [mm/km]は, 主に氷温 <math>T</math> [°C]と接触圧力 <math>p</math> [kgf/cm<sup>2</sup>]によって決まる  <math display="block">S_r = p(9.708T^2 + 1295.7)10^{-6}</math></li> <li>上式の推定値(接触圧力は圧縮強度の 4.5 倍と仮定)は燈台の摩耗の実測値と合う</li> </ul>
Hanada et al. (1996) <sup>6)</sup> 室内実験	<p>試験方法: すべり摩擦試験[ブロックオンプレート]            試験体: 岩石(凝灰岩, 花崗岩, 安山岩, 砂岩), 氷: 海水(3-5ppt) [W80mm, H50-100mm, L700mm]            接触圧力: 1MPa, 速度: 50mm/s, 温度: -10°C            定常摩耗から始められるように, 試験体の表層 1cm を取り除いた</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安山岩の摩耗率は摩耗距離に比例する。</li> <li>安山岩や砂岩の摩耗率はコンクリートよりも小さい(砂岩はコンクリートの 1/3)</li> <li>岩石の強度増加とともに摩耗率は減少</li> <li>グレインサイズが小さいほど, 摩耗率も小さい</li> <li>摩耗量の推定式は <math>S_r</math> を摩耗率, <math>\sigma_v</math> を接触圧力, <math>L</math> を摩耗距離として:  <math display="block">S = S_r \sigma_v L</math>           摩耗率 <math>S_r</math> (mm/km): 0.0178 (コンクリート), 0.0049(砂岩), 0.0251(凝灰岩), 0.0084(輝石安山岩), 0.0065(石英安山岩 A), 0.0177(石英安山岩 B), 0.0216(花崗岩)</li> </ul>
Friorio (2005) <sup>7)</sup> 室内実験	<p>試験方法: 直接剪断試験機            試験体: コンクリート版(15*150*175mm), 氷: S2 columnar 淡水氷 (Dg=8mm) 円柱(D60mm, H90mm)            接触圧: 0.25-0.80MPa, 表面ラフネスが 0.28mm, 0.11mm のものを使用</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>摩耗は 2 つのステージに分けられる。初期のステージは, セメントペーストの表層で生じ, 表面のラフネスに依存する, 定常状態では, 低い摩耗率で表面ラフネスに依存しない</li> <li>平均摩耗率は 2mm/km</li> </ul>
Janson (1988) <sup>8)</sup> 現地計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>バルト海沿岸部における 30 以上の燈台の摩耗量の現地計測</li> <li>氷の塩分量は比較的 low, 北極海の海水よりは強度が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>摩耗量: 0-140mm [0.2-7.0mm/year]</li> <li>氷厚 0.3m 以下では摩耗が生じてない, 摩耗量は北の燈台ほど(氷象が厳しい)大きい</li> <li>摩耗は, 凍結融解, 凍着, 温度勾配, 化学作用も考えられるがこれらの影響は小さい</li> <li>摩耗量 <math>S</math> の推定式は <math>v</math> を移動速度(knot), <math>s</math> を氷厚(mm), <math>t</math> を時間(日)として,  <math display="block">S = \int 0.0015vsdt \quad [mm/year]</math></li> </ul>
Janson (1989) <sup>9)</sup> 現地計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>バルト海において, 24 の RC パネルを暴露</li> <li>設置位置は, Janson(1988)の調査結果より, 最も摩耗量が多い燈台付近</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>摩耗量: 0.3-11.6mm/year</li> <li>摩耗はコンクリートの材質よりも氷象条件に大きく影響を受ける</li> <li>コンクリートパネルに平行な氷の移動方向の場合の方が摩耗量が多い, →スライディングの方が, その方向に垂直に生じるアイスクラッシングよりも, 摩耗量が多い</li> </ul>
Houvinen (1990) <sup>10)</sup> 現地計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>砕氷船の船首部にコンクリート供試体を取り付け, バルト海を航行</li> <li>ボスニア湾において, 4 つの円形断面の燈台(1963-65年に建設)を摩耗調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>40kmの航行で平均摩耗量は 2-15km (0.05-0.375km/km), 最大は 7-30mm (0.175-0.75mm/km)</li> <li>平均摩耗量は, 22-24年で 22-39mm, 最大で 56mm</li> <li>水面でのコンクリートの圧縮強度は凍結融解作用により低下</li> <li>摩耗は圧縮強度に依存, 耐摩耗性には 70MPa 以上, w/c は 0.3-0.35 以下, 最大骨材は大がよい</li> </ul>
Malhotra et al. (1996) <sup>11)</sup>	カナダバフィン島 Nanisivik において 12 のコンクリートパネルが暴露	7年経過後, 明らかな摩耗は見られない
Abdelnour et al. (2006) <sup>12)</sup>	<p>試験方法: すべり摩擦試験[ブロックオンプレート]            試験体: コーティング炭素鋼, SUS クラッド鋼, SUS, 氷: 淡水氷            接触圧力: 0.7-1 MPa, 速度: 0.07m/s</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>初期摩耗と定常摩耗から成る</li> <li>摩耗率 <math>S_r</math> は, 炭素鋼の場合, 0.0014mm/km, ステンレスの場合, 0mm/km</li> <li>摩耗量 <math>S</math> の推定は, <math>H</math> は硬さ, <math>\sigma_v</math> を接触圧力, <math>L</math> を摩耗距離として,  <math display="block">S = S_r \sigma_v L / L</math></li> </ul>



その他の対策としては、上述のような添加剤によって耐摩耗性を向上させたり、かぶり厚を厚くする方策などが考えられている。

以上のような観点から、改めて、本研究の範囲・位置

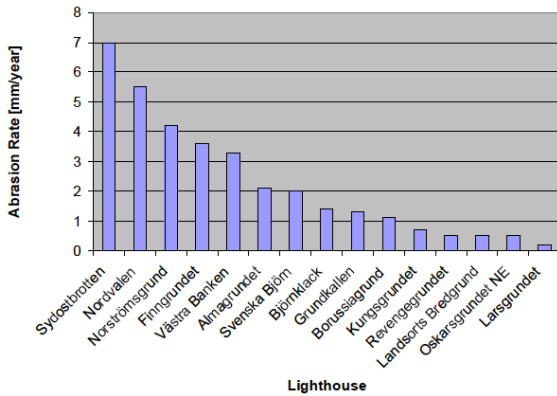


図-6.2 Annual abrasion rates, lighthouses [Janson(1989)]

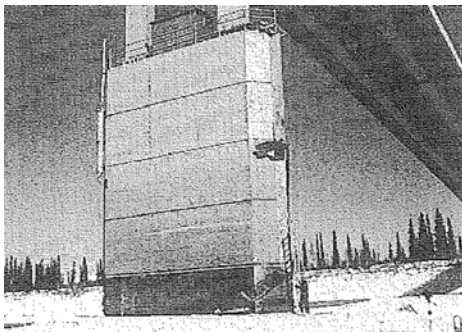


図-6.3(a) 鋼板が取り付けられた橋脚 (ユーコン川)



図-6.3(b) 鋼板が取り付けられた橋脚 (天塩川)



図-6.3(c) 水面付近のコンクリート表面をチタンクラッド鋼で保護 (オホーツクタワー)

づけを再確認してみる。上述のように、比較的コンクリートの研究は進んでいるが、鋼材などの金属材料についての摩耗現象についての研究例は極めて少ないこと、コンクリートの摩耗対策として金属材料による被覆が考えられること、等から、本研究では、冒頭に述べたように、主に鋼材(金属材料)の損耗について調査研究を進める。この場合、腐食による損耗も考慮に入れる必要がある。

## 6.3 流水による構造物への接触圧力の検討

### 6.3.1 研究方法

材料損耗は、流水による接触が主な要因であると考えられると、構造物近傍での流水挙動や接触圧力およびその作用形態等の推定が重要となる。本項では、それらの計算手法を提案し、サロマ湖第二湖口(図-6.4)での現象を例にその妥当性を検証した。計算手法としては、粒状体などの非連続体のシミュレーションに適している個別要素法(DEM)の適用を試みた。主な計算条件を図-6.5に示す。2次元のDEMで、流氷を半径1.5mの円盤とした。同図には、本計算対象であるサロマ湖第二湖口を単純化した境界条件を示した。5つのアイスブーム群を巨視的に一つの放物線と近似し、橋脚部鋼管矢板(アバット部)は、水路内に張り出している半径4mの半円とした。計算負荷が大きくなる外海領域の計算については、計算条件を簡略化し、湖口近傍に仮想物体を設置した。これにより、下げ潮時に、湖外の流氷の存在によって自由な流出が制限される状態等を擬似的に表現し、湖内・口付近の氷の流出状態を制御した。上げ潮時にもこれに準じる条件を付加した。また、水路流速については、潮位や地形条件から、竹内ら(2005)<sup>14)</sup>の方法を用いて推定した。他方、河合ら(2010)<sup>11)</sup>は、橋脚部から湖内側20m地点の鋼矢板凹部に受圧板(縦0.5m×横0.3m)を取り付け、ロードセル



図-6.4 冬のサロマ湖第二湖口

第二湖口は、水質環境と航路としての利用も考慮して、昭和53年に建設された。水路幅は50m、水路延長は260mで、外海側に2本の道流堤、水路には橋梁が建設されている。

(200kN)で流氷群による側壁への接触荷重を計測した。そこで、その実測結果と本計算結果との比較を行い、本計算法の妥当性を検証した。また、その結果から、壁面を移動する流氷の挙動、壁面へ及ぼす荷重特性やその時の作用形態についても考察を加えた。

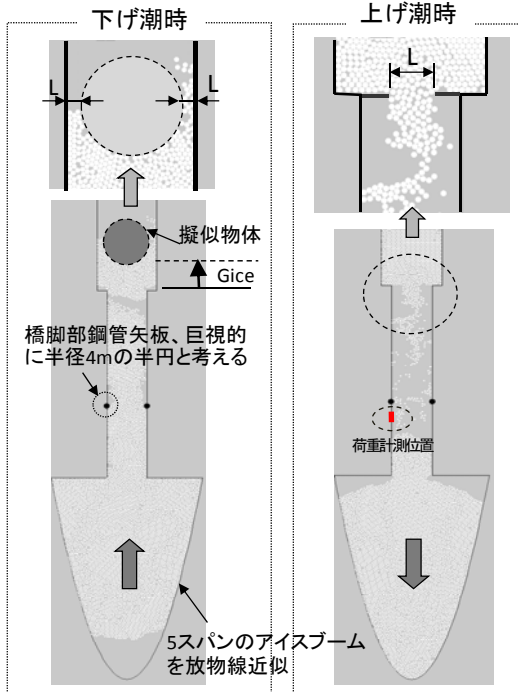


図-6.5 計算のためのサロマ第2湖口～アイスブームのモデル化と氷群の流入出の方法

表-6.2 主な計算条件

時間ステップ (s)	4×10
氷厚 $h_i$ (m)	1
氷の半径 $r$ (m)	1.5
氷の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	0.9×10 <sup>3</sup>
氷と水との摩擦抗力係数 ( $C_{dws}$ )	0.005~0.03
氷と水との形状係数 ( $C_d$ )	0.65
氷のバネ定数 ( $k_n$ ) (MN/m)	10~100
摩擦係数 (氷-氷)	0.4
Gice (m) (下げ潮時)	20~100
開口率 $L/2r$	下げ潮時 1~2.5
開口率 $L/2r$	上げ潮時 7.5

### 6.3.1 主な結論

- DEMによる側壁への接触荷重の計算結果は、氷群の静止および移動状態における実測値の大きさならびにその荷重変動(波形)特性を良好に再現した(図-6.6, 6.7)。
- その実測波形の特性、つまり、氷群に覆われているのに荷重がゼロに近い、一見、氷群が静止状態だが荷重値が変動(振動)する、氷群に覆われかつ静止

状態にも関わらず急に荷重が作用しなくなる、氷群移動時にはあまり荷重が作用せず(ゼロに近いもしくは継続的でなく間欠的)、静止してから作用するケースが多い、事などを本計算結果から説明することができ、壁面近傍での氷群挙動や作用形態を推察できた(一部は図-6.6参照)。

- 荷重は正負に振動するケースが見られたが、反力計測系の剛性を考慮した場合この説明が可能である。
- 本計算で特に重要と思われるパラメータのうち、バネ定数( $k$ )は50~100MN/m、氷と水との摩擦抗力係数( $C_{dws}$ )が $10^{-2}$ のオーダー(特に0.01~0.03)の場合、実測値をよく表す結果となった。
- 前節で、本計算方法を用いて、サロマ第一湖口に設置されているアイスブームに作用する氷群伝達力を

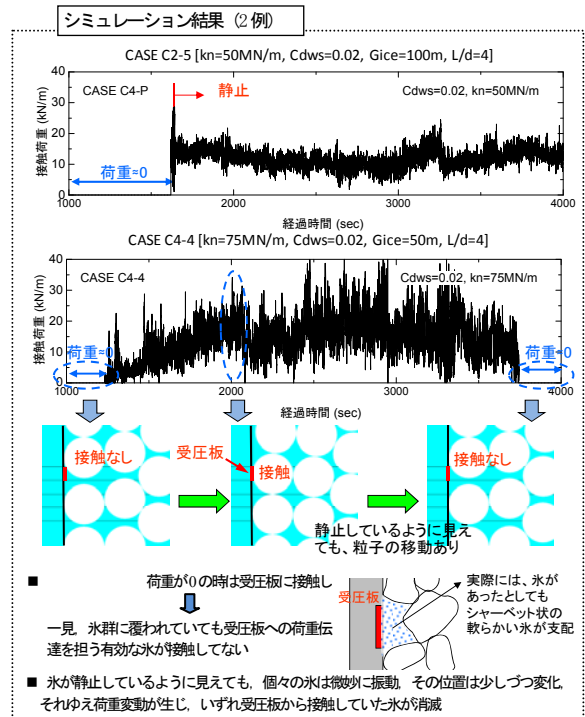
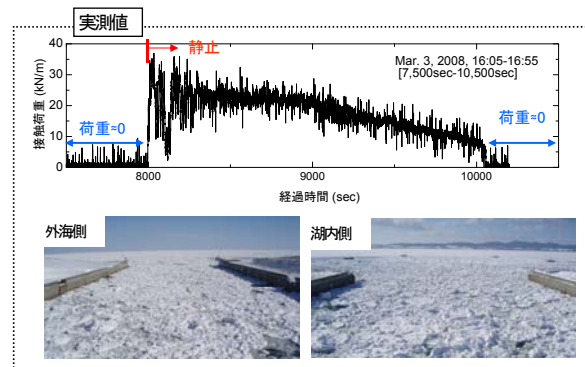


図-6.6 接触荷重の実測値と計算値(2例)との比較

2008年3/3 16:05-16:55 下げ潮時(氷群は移動→静止状態、この状態より荷重増大)、湖口平均流速は推定1m/s

推定した結果, その力の経時変化ならびに氷群挙動の観測結果 (関口ら, 1997)<sup>15)</sup>を良好に再現したことから, 計算法は汎用的な流氷群の挙動解析ツールの一つとして有効である事が示された。

以上のように, 本計算手法は, いくつかの課題が残るものの, 実測の静的・動的荷重特性をおよそ再現するだけでなく, そこに内在する氷群の作用形態や挙動などの解釈や推定も可能と考えられ, 汎用的な流氷群の挙動解析ツールの一つとして有効である事が示された

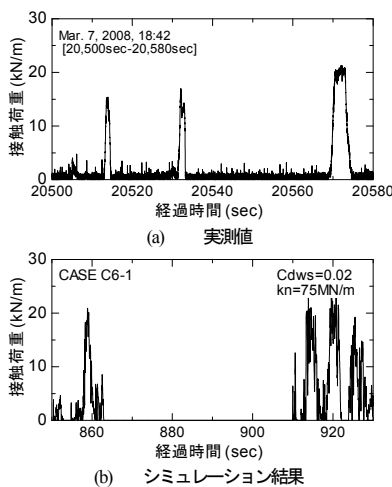


図-6.7 比較的短い時間 (氷群移動状態) での接触荷重の実測値と計算値との比較例

2008年3/7 18:42~80sec. 下げ潮時 (氷群はごく遅いが移動状態), 湖口平均流速は推定 1.13m/s

## 6.4 すべり摩擦試験装置を用いた鋼材 (SS) の摩擦・腐食試験

### 6.4.1 実験方法

#### (1) 実験装置

試験装置は, 佐伯等<sup>(例えば 13)</sup>にならい, 滑動式の摩擦試験機を新たに製作し用いた。これは, 図-6.8 に示すように, ケースに収納された柱状の人工海氷に, 構造物を意図した試験体 (鋼材) を, 適当な圧力で氷に押しつけ, その氷が格納されたケース (鋼製箱) を往復させる事により, 長距離すべり摩擦させる機構となっている。動作の基本原理は, AC サーボモーターでボールネジを回転させることで鋼製箱 (架台) を動かしている。既出の図-6.9 に示すように摩擦試験方法には様々な形式が知られているが, 以下に示す主な事情から<sup>13)</sup>, 佐伯等と同様に, 滑動式 (ブロック・オン・プレート) を採用した。

① 氷の動きは間欠的, 厳しい試験法として, 動摩擦と

静止摩擦が作用

② 種々の材料の摩擦試験は主に回転方式であるが, 氷粉が接触面に残ること, 摩擦熱の発生が予測されること, 動摩擦しか作用しないこと

#### (2) 試験方法

すべての試験は温度制御できる低温室で実施した。本装置により, 直方体の人工海氷 (幅 8cm, 高さ 5~10cm, 長さ 70cm) を固定した鋼製容器を一定速度で往復運動 (最大のストローク 50cm) させる。このとき, 電動ポンプで駆動する油圧ジャッキで, 構造物 (試験体) を意図した試験体を氷に接触させ, 鉛直下向きに圧力をかけた状態で往復運動させることにより摩擦させる。また, 適

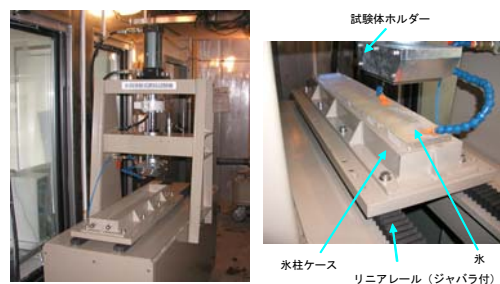
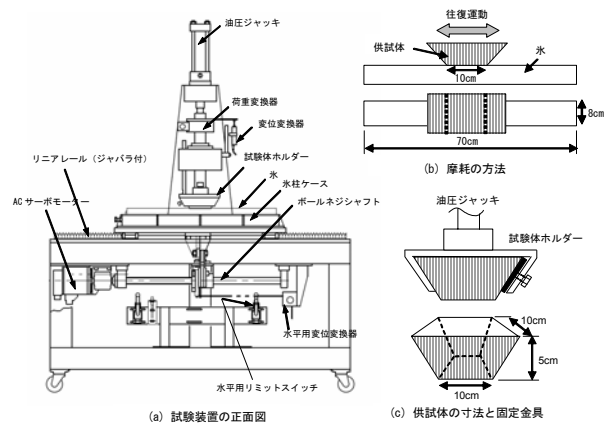


図-6.8 滑動式摩擦試験機の概要図

点接触	四球	ボール・オン・ディスク	ボール・オン・プレート
線接触	ブロック・オン・リング	二円筒	Vブロック対・オン・ピン
面接触	ピン・オン・ディスク	ピン・オン・ディスク	ブロック・オン・プレート

図-6.9 種々の摩擦試験方法



当な摩擦距離の後、速やかに電子天秤（精度 1mg, A&D(株), 分離型上皿天びん AD4212A-1000）を用いて、質量変化を計測することにより、損耗（損耗）量を推定した。

人工海氷は、低温室にて 25%の塩水を凍らせ、前述の寸法をもつ直方体に整形した。塩水を満たす容器は、実際の海氷の成長過程を再現するため、成長方向をおもに鉛直方向に限定し、側部・底部を 50mm 厚のスタイロフォームで断熱した容器を用いた。また海氷の機械強度を大きく決定づける因子である塩分量（ブライン量）は、First-year ice（生成して 1 年目の氷）の場合、通常 3~7% の範囲(Cammaert ら,1988)<sup>16)</sup>であること、また、密度が 0.86-0.92 kg/cm<sup>3</sup>（淡水の場合には 0.917kg/cm<sup>3</sup>）の範囲(Cammaert ら,1988)<sup>16)</sup>であること、さらに、結晶粒径が 5mm~20mm の柱状の結晶構造であったことから、概ね実物の海氷構造を再現できた。

#### 6.4.2 実験条件

主な実験条件を表-6.3 に示す。本実験で用いた主な試験体の材質は普通炭素鋼(SS)であり、限定した実験条件では、ステンレス鋼 (SUS304) およびチタン (Ti) も用いた。また、佐伯等の実験結果から、コンクリートの摩耗量は接触圧力に大きく依存することが知られている事に鑑み、本実験においても、0.6MPa の圧力を標準的な条件とし、0.1~1.6MPa（目標値）の範囲で実施した。実際の接触圧力（氷群の移動方向に垂直な圧力）が計測された例は多くないが、サロマ第二湖口水路側壁で計測された結果によれば、その時、大きくても本実験条件で設定した標準的な条件（0.6MPa）以下と推定され、実用上十分な接触圧力の範囲で実施していると言える。また損耗量のうち、腐食による寄与を間接的に調べるため、淡水氷を用いた摩擦試験も行った。また最大摩擦距離はおおよそ 50km としたが、1 ケースのみ 125km 実施した。ただし、圧力が最も大きなケースでは人工海氷自信の損耗が大きく、26km 程度にとどめた。また時間の都合上、実験の繰り返し数は 1 としたが、標準的な試験条件では 2 回実

施した。

#### 6.4.3 主な結論

- すべての条件において、損耗量は摩擦距離にはほぼ直線的に比例して増大する傾向にあった（図-6.10）。
- 摩耗（損耗）量—摩擦距離の直線勾配である摩耗率（mm/km）は、接触圧力とともに増大するが、0.5MPa 前後以降では、大きな増加は見られなかった（図-6.11）。
- SUS の損耗率は、SS に比べおおよそ 2 オーダー小さな値であり、Ti のそれはほぼゼロと見なせた（材料間のブリネル硬さに大きな差はない）。また、同じ SS の場合でも、淡水氷(FW)を使用した場合も、その損耗率は大幅に減少し、SUS の場合のオーダーと同等であった（表-6.4）。
- 摩擦試験中に SS が腐食し、その錆が氷に付着するケースが多いのに対し、構造体が SUS, Ti の場合には、そのような現象はみられなかった。
- 以上のことから、（0.5MPa 前後以降で）損耗率の接触圧力の依存性が見られないことも考えると、材料損耗は、摩耗（凝着あるいはアブレイブ）よりも、

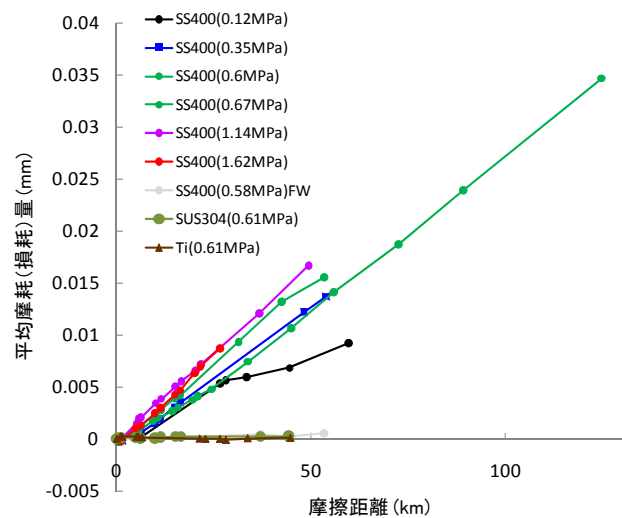


図-6.10 摩擦距離と平均摩耗（損耗）量との関係

表-6.3 主な実験条件

ケース	SS1	SS2	SS3-1	SS3-2	SS4	SS5	SS3-F	SUS	TI	SS-F/C
試験体の材質	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SUS304	TI	SS
氷温 (°C)	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
接触圧力(MPa)	0.12	0.35	0.60	0.67	1.14	1.62	0.58	0.61	0.61	0.60
移動速度(m/s)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
振幅距離(m)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
最大摩耗距離(km)	59.7	53.8	53.4	124.6	49.4	26.7	53.6	44.2	44.7	30.9



表-6.4 各実験ケースの摩耗率(mm/km)

ケース	試験体の材質	接触圧力 (MPa)	摩耗率 (mm/km)
SS1	SS400	0.12	$1.59 \times 10^{-4}$
SS2	SS400	0.35	$2.75 \times 10^{-4}$
SS3-1	SS400	0.60	$2.81 \times 10^{-4}$
SS3-2	SS400	0.6	$3.09 \times 10^{-4}$
SS4	SS400	1.14	$3.38 \times 10^{-4}$
SS5	SS400	1.62	$3.51 \times 10^{-4}$
SS3-F	SS400	0.58	$9.41 \times 10^{-6}$

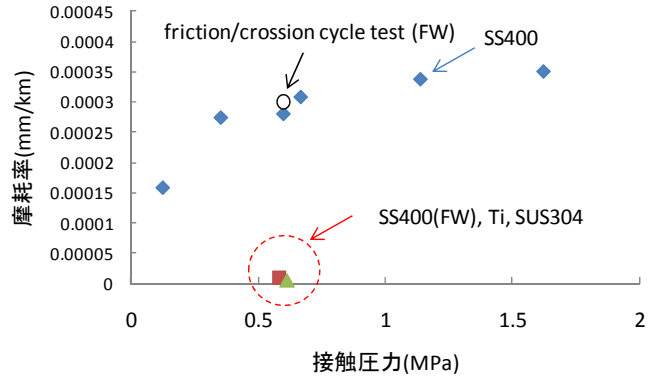


図-6.11 摩耗率と接触圧力との関係

腐食によるものが支配的である可能性が考えられる。上述のように、摩擦によって、腐食生成物である錆層が除去・剥離され、あらたな表面を露出させてより腐食を促進させるという機構が考えられる。ある程度まで接触圧力増大とともに、摩耗率が増大するのは、せん断力の増大にともなう、錆層あるいは錆領域を除去する割合が増加し、新たな表面を露出させ易いと考えられる。しかし、ある程度以上（本実験では 0.5MPa）の大きな接触圧力では、試験体表面が雰囲気暴露されにくくなる、つまり試験体表面と氷との間の空気分子との接触割合が減少し（金属材料などの摩耗摩擦という  $pv$  値の増大に相当）、腐食が進行しにくい、または錆層の系外へ脱落量が定常値へ達してくるなどの、要因が考えられる。さらにやかましく言えば、金属材料間の摩擦・摩耗において、相互溶解しない場合には、凝着摩耗自体が生じず、その摩耗の要因は、アブレシブに限られる。もしくは、摩擦熱により、酸化が促進され、その酸化物同士が溶け合う事による。それから推察すれば、そもそも、氷と本実験で用いた材料とは「相互溶解」しないと考えられるため、その損耗は、アブレシブか、酸化によるものと推察される。

## 6.5 オホーツクタワーチタンクラッド鋼板劣化調査

### 6.5.1 調査概要

図-6.12 に示すように、紋別市オホーツクタワーは海中に独立して設置されており、冬期には流氷の直接の作用を受けるため、水面付近のコンクリートはチタンクラッド鋼で保護されている。昨年の3月にチタンクラッド鋼の肉厚調査や外観調査といった劣化調査を実施した。調査概要を以下に示す。

### (1) 水上目視調査

M.L.W.L.+0.4~+5.5m（チタンクラッド鋼板天端）の範囲を対象として、チタンクラッド鋼板の劣化・損傷状況を調査船上から目視観察した。

### (2) 水中目視調査

M.L.W.L.+0.4~-1.5m（チタンクラッド鋼板下端）の範囲を対象として、チタンクラッド鋼板の劣化・損傷状況を潜水士により目視観察した

### (3) 肉厚測定

電磁式膜厚計を用いて肉厚測定を行った。測定深度は、a（飛沫帯：+2.0m）、b（H.W.L.付近：+1.3m）、c（L.W.L.付近：±0.0m）、d（集中腐食下限：-1.0m）および e（チタンクラッド鋼板下端：-1.5m）の5水深とすることを基本とした（図-6.13）。



図-6.12 紋別市のオホーツクタワー

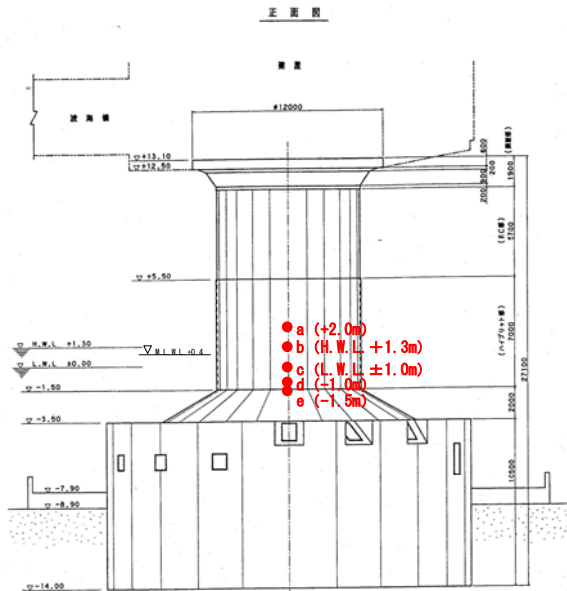


図-6.13 深度方向測定箇所



図-6.14 チタンクラッド鋼の外観

## 6.5.2 主要な結論

建設後 15 年経過しているが、肉厚調査の結果、損耗量はほぼゼロであることが明らかとなり、また、上部鋼材に由来すると推察される錆汁の付着が確認されるが、水上、水中部ともに腐食の発生は、認められず、極めて健全な外観状況を呈していた (図-6.14)。

したがって、チタンの材料強度が比較的高い事他に、腐食しないことが損耗量をほぼゼロに維持できた可能性がある。上述のように、実海域における鋼材の損耗は、氷による接触・摩擦によって、腐食生成物である錆層が除去・剥離され、あらたな表面を露出させてより腐食を促進させるという機構「腐食摩耗」によるものである可能性がこの結果からも推察される(後述の図-6.19 参照)。

## 6.6 水槽による腐食生成物除去実験

### 6.6.1 概要

前項までの議論から、鋼材の損耗は、氷による接触・

摩擦によって、繰り返し錆層が除去・剥離され、腐食を促進させるという機構「腐食摩耗」によるものである可能性が推察されたが、図-6.15 に示すように、損耗が著しい現場でこのような流水による錆剥離が確認されている。

本項では、水槽に半分浸漬した鋼材の表面に生成する腐食生成物の繰り返し除去 (流水接触を想定) による腐食速度の変化を調べた。さらに、主な損耗機構を流水の接触摩擦にともなう腐食生成物の繰り返し剥離に起因する腐食促進とした場合の簡易的な損耗推定式を提案した。

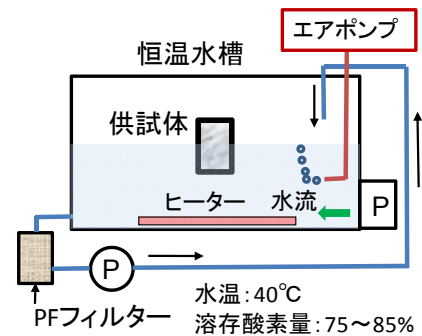


図-6.15 水槽による腐食生成物除去実験のためのセットアップ

## 6.6.2 実験方法

### (1) 実験概要

恒温水槽[内寸法 500mm×400mm×350mm]内に、一面以外を絶縁した長方形板の試験体(SS)を、水面近傍のマクロセル腐食を想定して、半没水させ、定期的に、水面下の試験体の錆を除去する。水槽内の水は、ポンプで循環させ、PF フィルターにて処理し、腐食進行による水質悪化を抑制した。また、エアバブルや水流を発生させ、水槽内温度や水質をできるだけ均一・一定に制御し (溶存酸素量:75~85%)。水温は、腐食を促進するため高めの 40°C (PID 制御) に維持した。錆除去後は、試験体表面の凹凸を計測し、錆の除去周期をいくつか変化させた場合の損耗 (腐食) 量の違いを調べた。

### (2) 実験条件

実験は大きく分けて以下の 2 ケース実施した。

#### 短期間スパンでの繰り返し剥離

22 時間を基準とし、22~142 時間のスパンで、同じ試験体の錆を繰り返し除去し、累計 1440 時間までこれを行う

#### 長期間スパンでの剥離

異なる新しい試験体を用い、それぞれ 5 日後、20 日後、60 日後、120 日後に 1 度だけ錆を除去する

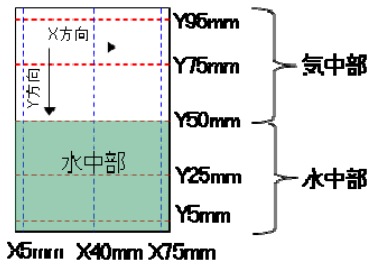
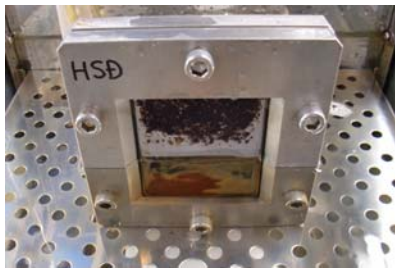
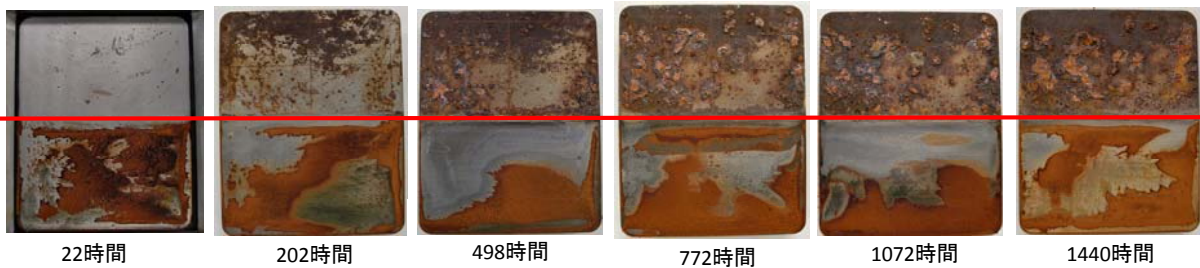
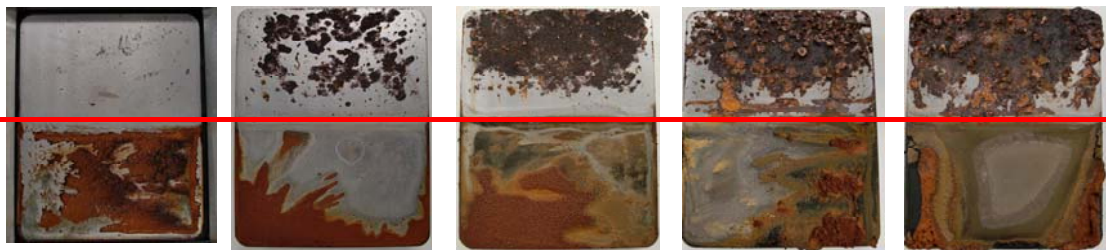


図-6.16 試験体と凹凸の計測箇所

試験体は、図-6.16に示すように、幅80mm、高さ100mm、厚さ10mmの長方形鋼板（SS400製）とした。腐食面を一面のみに固定し、且つ周囲と絶縁する目的で、ゴム製の型枠に鋼板をはめ込み、さらにステンレス製の型枠でそれを抑えて水密した。錆剥離は、母体に傷をつけないよう、軟ブラシで除去後、アルコール欲させ、速やかに計測した。損耗（腐食）量の測定については、図-6.16に示すように、縦、横それぞれ3測線に沿って、変位センサ（KEYENCE製汎用接触式デジタルセンサGT、オフセットタイプOP-77683）を用いて、試験体表面の凹凸を測定することにより推定した



短期間スパンでの繰り返し剥離



長期間スパンでの剥離

図-6.17 試験体表面の腐食状況例（錆除去の直前）

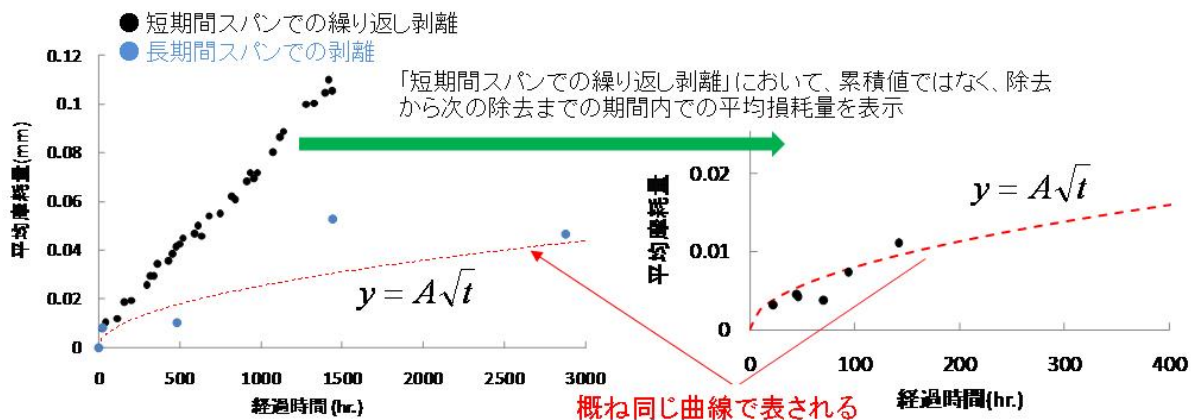


図-6.18 腐食量の経時変化



### 6.6.3 主な結論

- 各スパンにおいて、平面的に均等に腐食する全面腐食ではなく、局部腐食が見られるが、しかしそれは固定化せず、各スパン毎において（アノード/カソード領域）が異なってくるようである（図-6.17）
- 「短期間スパンでの繰り返し剥離」実験の累積損耗量は時間経過に伴って直線的に増加する一方、「長期間スパンでの剥離」実験では損耗量の増加率は小さくなっていく。また前者の損耗量が多く、錆の剥離の頻度が大きい程、損耗が進む（図-6.18）。
- 「短期間スパンでの繰り返し剥離」実験において、累積値ではなく、除去から次の除去までの期間内での平均損耗量で整理した結果、本実験条件では、損耗量  $y$  は、

$$y = A\sqrt{t}$$

$$A = 0.0008\text{mm/hr}^{0.5} (= 0.0744\text{mm/yr}^{0.5})$$

で表され、さらにこの式は「長期間スパンでの剥離」実験での損耗量の経時変化も表すことが分かった（図-6.18）。

- 以上から、錆の除去から次の除去までの期間（錆の放置期間）が同じであれば、過去の試験体の腐食歴（錆剥離の頻度）に無関係に、その期間内にできる腐食量に大きな差はないと言える（新しい試験体であろうが、過去に何回も錆が除去されていても、錆の放置期間が同じであれば、その期間内に生成する腐食量に大差はない）ゆえに、事項に示すように単純なモデル化が可能である。

### 6.7 海水の接触・摩擦による繰り返し錆除去にともなう損耗（腐食）モデル

前節までの現地観測および実験結果から、実海域における鋼材の損耗は、氷による接触・摩擦によって、腐食生成物である錆層が除去・剥離され、あらたな表面を露出させてより腐食を促進させるという機構が支配的であ



図-6.19 錆が付着した流氷（損耗が著しいオホーツク海に面した矢板近傍）

ると推察された。これは、図-6.19に示すように、実海域においても氷塊が錆を削り、その錆が付着した氷塊が漂流していることがしばしば見受けられる。この写真は損耗が激しいオホーツク海に面した矢板近傍でのものである。

本節では、前節での結果を踏まえ、主な損耗機構を流氷の接触摩擦にともなう腐食生成物の繰り返し剥離を起因とする腐食促進とした場合の損耗推定式を提案した。まず、図-6.20のモデルを考え、腐食の期間経過  $t$  と腐食量  $y$  との関係を、

$$y = f(t)$$

とすると、「錆の繰り返し剥離あり」と「なし」（通常状態）との損耗（腐食）量の比  $\lambda$  は、

$$\lambda = \frac{f(\Delta T_1) + f(\Delta T_2) + \dots + f(\Delta T_n)}{f(T)}$$

$$T = \sum_i \Delta T_i$$

で表される。ここに、

$\Delta T_i (i=1,2,\dots)$ : 次の剥離が起こるまでの経過時間

$T$ : ある注目する経過時間（あるいは耐用年数）

$$f''(t) < 0, (t > 0)$$

であれば、 $\lambda > 1$  となり、繰り返し剥離する場合の法が損耗量は大きくなり、前節の場合がこれに相当する。

今、流氷来襲率  $p$  を考慮し、前節の場合の  $f(t)$  の形を考慮すると、損耗比は次式で与えられる。ただし、 $\xi$  は 1 年あたりの流氷来襲期間の割合、 $N$  は経過年数、 $T_1$  は 1 年あたりの日数である。図-6.21 には、いくつかの経過年数に応じた損耗比の計算例を示した ( $\xi=0.25$  と仮定)。

$$p > 0.5$$

$$\lambda = \frac{A(2p-1)N\sqrt{(1-\xi)T_1} + A(1-p)N\sqrt{(2-\xi)T_1}}{A\sqrt{NT_1}}$$

$$p < 0.5$$

$$\lambda = pN\sqrt{\frac{(1-p)NT_1}{pN} + (1-\xi)T_1}$$

$$= \sqrt{pN(1-p)NT_1 + (1-\xi)T_1}$$

$$pN \leq 1 \Rightarrow pN = 1$$



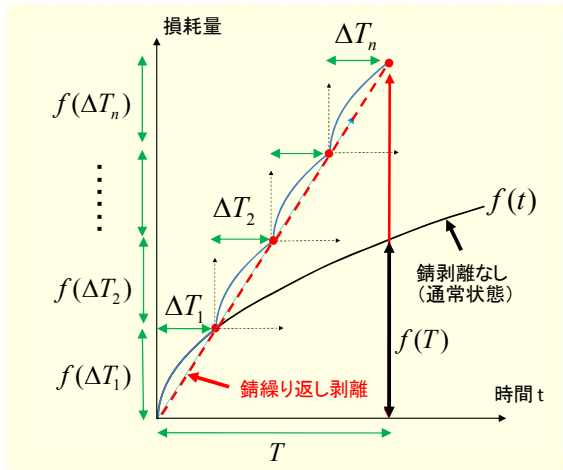


図-6.20 繰り返し錆除去にともなう損耗（腐食）モデル

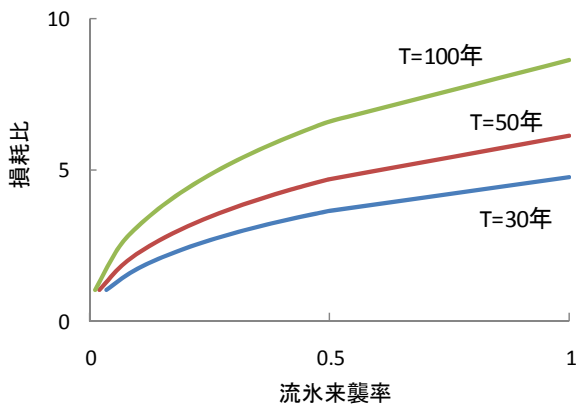


図-6.21 繰り返し錆除去にともなう損耗増加の計算例

図より、繰り返しの錆剥離がある場合の損耗量は、錆剥離がない場合と比べ、数倍程度大きくなるのがわかる。

以上より、流水の接触摩擦にともなう腐食生成物の繰り返し剥離を起因とする腐食促進とした場合の損耗推定式を提案し、計算例を示すことができた。

しかし、物理的・機械的な錆除去のみならず、流氷固有の物性を考慮した流氷の材料への接触そのものによる腐食促進効果を考慮していない。また、次節に示すように、流氷表面あるいは内部に砂が含まれている場合もあるため、これによるアブレシブ（研磨作用）摩耗、温度差腐食、濃度差腐食など様々な損耗、腐食促進要因もあるため今後の継続的な研究が望まれる。

### 6.8 その他の要因と今後の課題

図-22に示すように、損耗が著しい現場での調査から、流氷の中に砂が混入している場合があり、その研磨作用（アブレシブ摩耗：材料表面の突起あるいは材料に介在

する砥粒による切削である摩耗形態）による摩耗が想定される。また注目されるのは、砂は流氷の表面に付着しているのみならず、内部まで浸透している事である。流氷に砂が含有するメカニズムはよく分かってないが、飛砂によるものや、砂浜に打ち上がって砂を取り込んだ状態で再び海に戻る事等によると思われる、またその過程で、日射によって融解することにより表面の砂が内部に浸透し、再凍結した可能性等もある。



図-6.22 砂を含んだ流氷

そこで、すべり摩耗において、試験体（腐食しないSUS）と氷との間に砂を介在させた予備実験を行った。その結果、「SSの腐食」と同等以上の高い摩耗率となり、無視できない要因と考えられた。今後はこれらの要素実験を詳細に行うとともに、氷に砂が混入するメカニズムや混入率などを明らかにしていく必要がある。

また前述のように、物理的・機械的な錆除去のみなら

ず、流氷固有の物性を考慮した流氷の材料への接触そのものによる腐食促進効果の有無を考慮する必要がある。つまり、流氷内部には濃縮された塩類があるためその直接接触による材料の腐食促進効果があると考えられる一方、ある圧力で接触している場合、貧酸素状態が考えられて逆に腐食速度が減少する事などが考えられる。

さらには、流氷による接触・摩擦といった流氷が直接的な要因となる場合以外にも、寒冷海域特有の腐食しやすい環境要因にも着目する必要がある。一つには、寒冷海域は、比較的溶存酸素量が大きいと考えられるために、この部分のみ着目すると腐食が促進しやすい環境であること、また大気と海域での温度差に起因する温度差腐食も考慮する必要がある。

このように、通常の海域と寒冷海域では腐食環境が異なり、特に氷海域では流氷の作用も加わるためその損耗メカニズムは一層複雑となる。本研究ではその一部を明らかにし、新たな重要な損耗要因を見いだした。引き続き勢力的に研究していく予定である。

## 本章で用いた参考文献

- 1) 河合孝治・牧田佳巳・木岡信治・寺島貴志・竹内貴弘：流氷が作用する水域における鋼矢板護岸に作用する接触圧力の現地計測，海洋開発論文集，Vol. 26, pp.909-914, 2010.
- 2) Hoff, G. C. Resistance of Concrete to Ice Abrasion – A Review, American Concrete Institute SP 109, p. 427-455, 1988.
- 3) Nawwar, A.M., Malhotra V.M., Development of a Test Method to Determine the Resistance of Concrete to Ice Abrasion and/or Impact American Concrete Institute SP 109, 401-426, 1988.
- 4) Itoh, Y., Yoshida, A., Tsuchiya, M., Katoh, K., Sasaki, K., and Saeki, H. An Experimental Study on Abrasion of Concrete Due to Sea Ice. Presented at the 20th Annual Offshore Technology Conference in Houston, Texas, May 2-5, (OTC 5687), pp. 61-68, 1988.
- 5) Itoh, Y., Tanaka, Y., and Saeki, H. Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement. Proc. of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10-15, Vol. II, pp. 545-552, 1994.
- 6) Hanada, M., Ujihira, M., Hara, F. and Saeki, H. Abrasion Rate of Various Materials Due to the Movement of Ice Sheets. Proc. of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, USA May 26-31, 1996.
- 7) Fiorio, B. Wear characterization and degradation mechanisms of a concrete surface under ice friction, Construction and Building Materials, Vol. 19, 5, p. 366-375, 2005.
- 8) Janson, J. E. Long Term Resistance of Concrete Offshore Structures in Ice Environment, 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Houston, American Society of Mechanical Engineers. Vol. III, pp. 225-231, 1988.
- 9) Janson, J. E. Report No. 3, Results from the winter season 1988 - 1989, Conclusion after the three winters 1986 - 1989. Joint Industry Study; Field Investigation of Ice Impact on Lightweight Aggregate Concrete, VBB, 1989.
- 10) Huovinen, S. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structures, VTT Publications 62, (Doctoral thesis), Espoo, 110 p, app. 31 p, 1990.
- 11) Malhotra, V.M., Zhang, M.H., and Sarkar, S.L. Manufacture of Concrete Panels, and Their Performance in the Arctic Marine Environment. Odd E. Gjorv Symposium on Concrete for Marine Structures, an integral part of the Third CANMET/ACI International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, St. Andrews-By-The-Sea, New Brunswick, Canada, August 4-9, pp. 55-81, 1996.
- 12) Abdelnour, R., Comfort, G., Malik, L. and Sumner, K. Ice Abrasion Tests of Metal Based Coatings, Proc. of the 18th IAHR Ice symposium, Vol.3., 2006.
- 13) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M. and S. Tanaka. The coefficient of friction between sea ice and various materials used in offshore structures, J. of Energy Resources Tech. ASEM, Vol.108, pp.65-71, 1986
- 14) 竹内貴弘・木岡信治・寺島貴志：感潮狭水路に設置された構造物表面の海水移動による摩耗量の推定について，海洋開発論文集，Vol.23, pp. 697-702, 2007.
- 15) 関口浩二・遠山哲次郎・荒田崇・清水敏晶：サロマ湖湖口部に作用する氷力に関する研究，海洋開発論文集，Vol. 13, pp. 853-858, 1997.
- 16) Cammaert, A. B. and D. B. Muggeridge : Ice Interaction with Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold., pp.76-111, 1988.

## 7. まとめ

### 7.1 IPS や ADCP を用いた北海道オホーツク沿岸における海氷観測より

北海道オホーツク沿岸において、IPS や ADCP を用いた海氷観測を実施し、流氷移動や喫水深分布、そして凹凸特性等を定量的に明らかにした。特に、非定常性、非ガウス性をもつ流氷下面の凹凸特性を解析、時間的にも空間的にも代表される正規化スペクトルは同一と仮定でき、その極めて複雑な海氷断面の凹凸は、その「共通で代表的な正規化スペクトル」、及びその非定常性を間接的に表現する「海氷喫水深の分散(標準偏差)」に集約され、この2つのパラメータのみを用いてシミュレーションする手法を示した。また、標準偏差 $[R_{SD}]$ を用いて、直感的・視覚的な流氷下面の凹凸の大きさ(有義振幅： $h_{1/3}$ )を表す指標を提案した。

流氷の漂流特性についても調べた結果、風速変動と流氷の漂流速度の変動とはよい相関があり、相互相関が0.6であった。また海流の表層部6mでは流氷の影響をうけてほぼ流氷の漂流に追従し、流氷下の境界層内であることが確認された。流氷の動きは、その変動性については風の影響をうけ、平均的な動きについては風と海流(宗谷暖流など)の両方の作用をうけることが推察された。

以上の成果は、確率論に基づく構造物の性能設計にも対応できることを示した。

### 7.2 オホーツク海に常設されている海象計(USW)の流氷観測への適用性の基礎的な検討より

人工海氷を用いた小規模水槽実験による検討や、流氷来襲時における現地海象計の反射信号の分析等から、まず流氷観測の可能性を確認した。さらに海象計付近に設置したIPSによる流氷喫水深(真値を与えると仮定)との比較分析より、特に実用上、重要となる流氷下面の凸部の大きさ(keel長)は、USWデータ(喫水深)を、水温に応じて音速補正し、それをハイパスフィルタに通したものを1.33倍して、その他の誤差などを考慮することにより概略推定できること示したほか、流氷の漂流(移動方向および速度)については、海象計付近に設置したADCPによるボトムトラッキングデータ(真値を与えると仮定)との比較分析より、上層10mの水塊は流氷下の境界層内に含まれること、しがたって、USWの上層10mのデータを利用することにより、概略推定が可能であることも示した。以上の結果を踏まえ、波高・波向を観測することを目的として紋別沖に設置されている海象計を

利用し、安価で恒常的な海氷観測システムを提案した。

### 7.3 アイスブーム型海氷制御施設の設計法に関する研究より

水理模型実験、理論的研究、数値計算の多角的な研究アプローチにより、複雑な流氷群のアイスブームへの作用形態や伝達荷重等を明らかにした。

まず、理論的研究より、氷群下の境界層内流速を対数分布則に従うと仮定し、境界層厚を理論的に導出するとともに、境界層厚の概念から、アイスブームへの伝達荷重推定に必要な、断面平均流速を用いた平均抗力係数や粗度係数(海底粗度を考慮した合成粗度係数を含む)などの実用的な算定法を提案した。また、境界層厚、断面平均流速を介して、抗力係数、粗度、粗度係数の対応関係が理論的に明確になった。

水理模型実験からは、基本的な氷群集積・アイスブームへの氷群伝達荷重特性を明らかにし、その理論モデルを提案した。さらに、凹凸氷群を用いた実験も行い、その理論モデルから推定される摩擦抗力係数と、各凹凸状態を表す波数や分散などの単純な指標との対応関係を明らかにした。その結果を利用して、オホーツク海での凹凸海氷の抗力係数を概略推定した結果、0.03~0.04が得られた。また、アイスアーチ形成条件に関する実験を実施した結果、氷の代表長さ $a$ とアイスブームを係留する支柱間隔 $b'$ との比 $a/b'$ がおおよそ0.2以上となると、アイスアーチが形成し、下流への氷群伝達荷重を減ずるような氷群の骨格形成が発生する事を示し、設計に留意すべき事項として提案した。

アイスブームと氷群との干渉のシミュレーション手法として個別要素法(DEM)を適用した。計算結果は、現地観測結果(サロマ湖口第1湖口に設置されている当時建設途中のアイスブームに作用する伝達荷重や氷群のトラップ状況)の傾向を良く再現されており、本手法の妥当性が示された。この実現現象を再現し得るDEMによって、水理模型実験における氷群挙動も再現できたため、ひいては本模型実験が妥当であることを間接的に示すことができた。また様々な条件においてDEMによる数値実験を実施し、水理模型実験で実施困難な状況での氷群集積状況や伝達荷重特性等把握した。

最後に、これまで実施してきた数値計算、水理模型実験および理論解析的アプローチによる研究成果をとりまとめ、アイスブーム型海氷制御構造物への作用力推定法を提案し、フローチャート形式にまとめた。

なお、本研究成果の一部は、能取湖口に設置されてい

るアイスブームの設計に活用された (図-7.1).

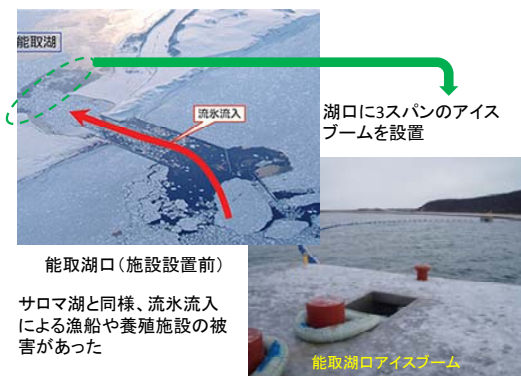


図-7.1 能取湖口アイスブーム

#### 7.4 津波来襲時の作用氷力に関する研究より

水理模型実験より津波とともに護岸を超える海水の基礎的な挙動を調べ、実用上、衝突力推定に必要な流氷衝突速度=水の遡上速度と考えてよい事が推察された。

人工海氷を用いた中規模程度の衝突実験(自由落下方式)を様々な条件で実施し、氷塊の衝突破壊メカニズムを明らかにした。杭構造物の場合には、氷塊は脆性的に破壊し、複数の氷塊に分割されて側方へ飛散すること、最大衝突力は、主に衝突時の杭近傍の圧壊・貫入(クラッシング)でほぼ決まり、それは僅かな破壊粒子の移動あるいは僅かな杭への貫入でも衝突力の緩和が発生し、その後の連続的なクラックの伝搬機構はあまり影響を及ぼさないこと、破壊時の最大衝突力の衝突速度依存性は破壊が生じない場合のそれに比べてかなり小さいこと、衝突方向の氷塊の長さは衝突力にあまり影響を及ぼさないこと、衝突力は氷温の低下にもなって直線的に増加すること、運動エネルギーの変化よりも氷温依存性の方が大きいこと等が推察された。また、平板の場合には、鉛直方向においては、杭のように複数の氷塊に分割されて飛散することがないため、数値実験結果も含め、破壊の有無にかかわらず、衝突力は運動量に比例して増大する、杭の場合と同様、氷塊の長さは衝突力に影響を及ぼさないこと、などが分かった。また海氷以外の他材料として、木材(無垢のカラマツ)や鋼製材料の衝突実験も実施した。脆性破壊を生じない鋼材や木材の場合、衝突力は海氷と比べて、およそ1オーダー大きくなること、速度および質量に応じてほぼ比例して増大することが明らかとなった。木材の衝突力は木の繊維の方向に大きく依存し、衝突方向が木の繊維に平行となる場合の衝突力は、垂直とした場合より、およそ2倍程度大きくなることが分かった。

DEMを用いた氷塊の3次元の衝突破壊シミュレーション手法を開発した。氷塊の破壊挙動や衝突力を良く再現できることを確認し、複雑な衝突現象の理解、実験データの補完、実験困難な条件での推定など、数値実験用ツールとして整備できた。

最後に、本実験結果や数値実験結果を用いて、平板に作用する氷塊衝突荷重の実用的な簡易推定式を提案した。

#### 7.5 海水による沿岸構造物の摩耗に関する研究より

海外文献などをレビューし、主に鋼材(金属材料)の損耗について調査研究を進める等、本研究テーマの明確な位置付けを確認し、それを有意義に遂行するための基礎資料を得た。

材料損耗は、流氷による接触が主要因であると考え、構造物近傍での流氷挙動や接触圧力およびその作用形態等の推定が重要であるため、流氷群の挙動や接触圧力を個別要素法による計算によって推定する手法を検討した。サロマ第2湖口の矢板護岸に設置された計測器による接触荷重の実測結果との比較から、その計算法の妥当性を検証し、汎用的な流氷群の挙動解析ツールとして有用であることを示した。

紋別のオホーツクタワー(流氷が作用する水面付近におけるチタンクラッド鋼部)における現地調査やすべり摩耗試験装置を用いた金属材料(SS, SUS, Ti)の摩耗試験結果より、正味の材料の塑性変形にもなう接触・分離を起因とする凝着摩耗による可能性は低いことが推察され、腐食摩耗(流氷による繰り返しの腐食生成物の除去にもなう腐食速度の増加)が主要因であると考えられた。そこで、水槽による腐食生成物除去実験を行い、主な損耗機構を流氷の接触摩擦にもなう腐食生成物の繰り返し剥離に起因する腐食促進とした場合の簡易的な損耗推定式を提案した。

他方、損耗が著しい沿岸部での注意深い現地調査から、流氷の中に砂が混入している場合があり、その研磨作用(アブレシブ摩耗:材料表面の突起あるいは材料に介在する砥粒による切削である摩耗形態)による摩耗などの新たな要因があり得ることも突き止め、今後の継続研究に必要な課題を整理した。