

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（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒冷沿岸域チーム

研究担当者：木岡信治，森昌也

【要旨】

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するとともに、昨年度得られたデータの定量分析を実施した。また、オホーツク海に常設されている超音波式波高計（海象計）の流氷観測への適用性を検証し、その有用性を確認した。さらに、流氷制御施設に関する水理模型実験を実施し、氷群下の凹凸が伝達荷重に及ぼす影響を、実験的・理論的に明らかにし、実用的な抗力係数の推定法等を提案した。さらに、アイスブームと氷群との干渉に関する数値計算法を構築し、現地観測結果と比較することによりその妥当性を示した。また流氷による構造物表面の損耗に関する研究に着手した。海外文献のレビュー／分析を行うとともに、力学的観点から、幾つかの構造上の改善案を提案した。最後に、津波来襲時の海氷作用力推定法に関する研究として、自由落下による海氷衝突実験を実施し、その力学特性を明らかにするとともに、基礎的な数値計算法の構築を行い、その有用性を示した。

キーワード：海氷，流氷，津波，超音波，オホーツク海，アイスブーム，衝突，摩耗，腐食

1. はじめに

氷海域における構造物の耐氷設計や防氷技術，あるいは流氷の有効利用・活用には，重要な入力情報・判断資料となる流氷の移動特性，喫水深，断面形状などの氷象条件を予め把握しておく必要がある。本年度では，昨年度に引き続き，北海道オホーツク沿岸において，IPS や ADCP を用いた海氷（流氷）の移動方向・速度，喫水深のデータ取得を目的とした観測を実施するとともに，昨年度得られた海氷データの定量分析を実施した。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，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ている。本年度では，現地海象計の超音波信号の取得を行うとともに，昨年度得られた超音波信号の分析ならびに，上述した海象計付近に設置した IPS によるデータ（海氷喫水深）との比較を行い，その有用性を検証した。また海象計を用いた流氷観測システムについても提案した。

また，海氷と構造物との力学的相互作用に関する研究の一環として，昨年度に続き，流氷制御施設（アイスブーム）と流氷群との干渉に関する実験と検討を行った。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（トラップ）する機構となっている。我が国では，オホーツク海と通じている塩水湖であるサロマ湖において，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設置されている。今後も沿岸部でのアイスブームの設置が計画されている。しかしアイスブームの建造にはコストがかかり，その経済的な設計と機能評価を可能とするためには，上述したような氷象条件のほか，作用氷力を精度良く推定されることが求められる。本年度では，海氷群の下面形状が凹凸であることを想定し，まず氷群下の抗力について，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

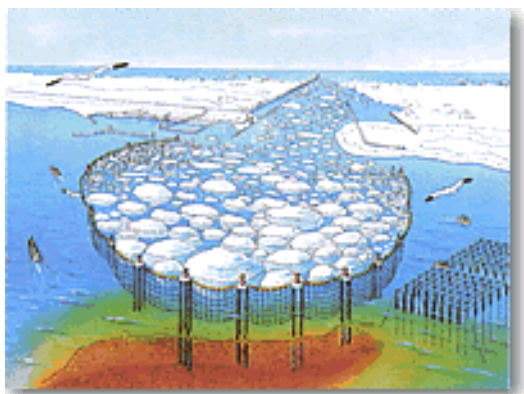


図-1.1 アイスブームのイメージ（サロマ湖口）

案した。さらに、厚さの異なる模型氷群を用いることによって、簡略的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。また、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。また、昨年度に続き、個別要素法を適用した数値シミュレーション手法の基礎開発を行い、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す。

また今年度より、海水による沿岸構造物の摩耗に関する研究に着手した。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・コンクリート）表面は、腐食に加えて、冬期に來襲する流氷によって、剥離・摩耗などの損耗が生じており、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。本研究は、後述する理由から主に鋼構造物（金属材料）を対象とし、腐食や流氷の作用による材料の損耗・劣化メカニズムとその対策について研究することを目的とする。本年度では、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る。さらに、鋼構造物の流氷の作用による劣化の事例として、サロマ湖第2湖口の鋼矢板を取り上げ、別途妥当性を確認した個別要素シミュレーションを用いて、力学的観点からそのいくつかの改善案を示した。

最後に、津波來襲時の作用氷力に関する研究について述べる。本年度では、昨年度実施した海水の衝突実験の解析、ならびに個別要素法を用いた衝突時の海水の破壊挙動の数値計算手法についても検討した。また、海氷以外にも、木材や鋼材の他材料についても同様な衝突実験を実施した（実施のみ、解析は来年度）

2. 流氷観測

2.1 観測方法

観測は、過年度と同様、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に示す地点（P3；紋別海象計付近をターゲットとし、沖合 8.2km、水深 52m）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。

2.2 観測結果

IPS と ADCP は、平成 20 年 12 月 10 日に無事に設置

し、平成 21 年 3 月 17 日に無事に回収することができた。本年度得られたデータは来年度解析して報告する。

本報では、昨年度取得したデータの定量分析を行い、特に、過年度の結果も含めた、流水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。昨年度の IPS と ADCP は、海象条件の都合上、平成 20 年 12 月 12 日に設置し、翌年 3 月 16 日に撤去が完了した。したがってその間の流氷データを回収・整理解析した。昨年度（2008 年）の流氷勢力は比較的強く、大きな流氷の頻度が多く、また接岸の期間も長かった。このことより、流水分析期間を大きく

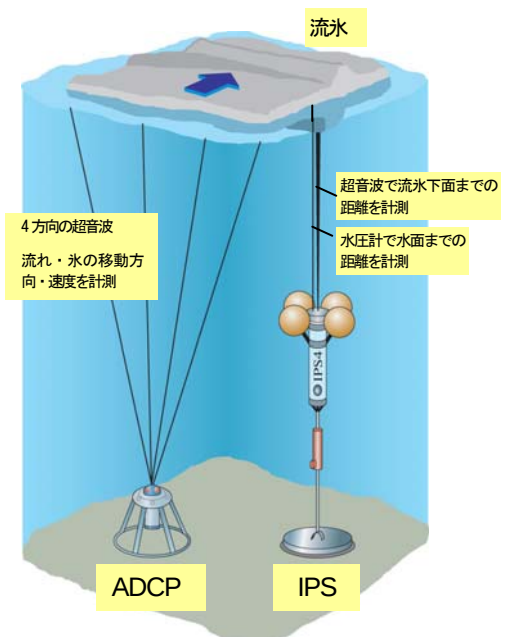


図-2.1 ADCP と IPS による流氷観測のイメージ

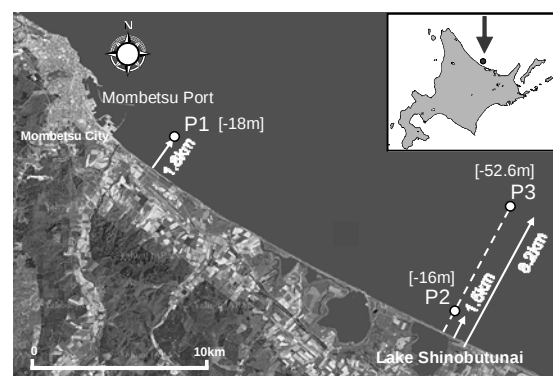


図-2.2 過年度も含めた観測地点（2008 年は P3）

表-2.1 分析に用いた調査データ

	調査年	調査期間	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

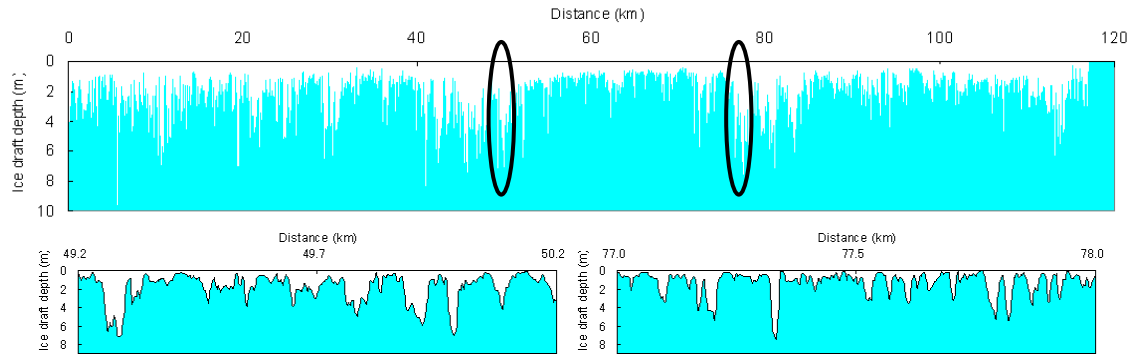


図-2.3 流水下面形状の一部拡大例 (Jan. 28 — Feb. 11, 2008)

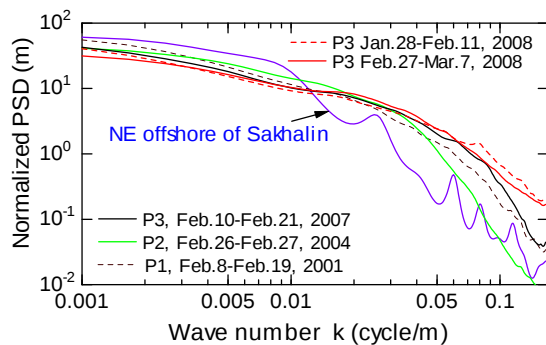


図-2.4 3つの地点 P1, P2, P3 で得られた代表正規化スペクトルの比較

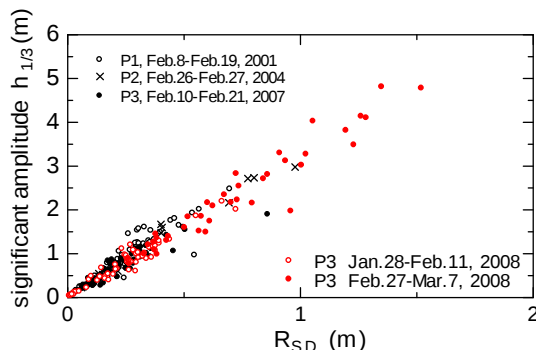
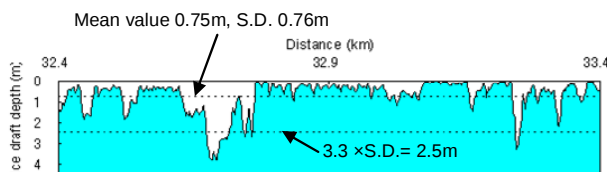


図-2.5 各局所定常区間における流水喫水の標準偏差 R_{SD} と有義振幅 $h_{1/3}$ との関係



第1期間 (Jan. 28 — Feb. 11, 2008)

図-2.6 局所定常区間における流水下面(凹凸)形状例と、その直感的な凹凸の代表高さの表し方(平均値および有義振幅)

2つに分け、時間(発展)的類似性についても検討した。

表-2.1には、比較のための過年度調査分を含む、分析対象データを示した。このように、データ①, ②, ③~⑤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, ④~⑤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。

まず例年のように IPS による流水喫水深の時系列データを、ADCP による流水の移動速度に関するデータを用いて、空間データに変換したものを用いた。得られた解析結果を下記に要約する。

- 流水下面は平坦ではなく、数mの凹凸をもつ変形氷であり、過去の傾向と同様であった(図-2.3)
- 流水喫水深の確率分布は指数分布に近く、過去のデータと同様な傾向であった。
- 過去も含めた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。過去の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-2.4)。

標準偏差を用いて、直感的・視覚的な流水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(海の波の場合は理論的に4)となることが分かった。実際、定常区間における流水下面形状において、その標準偏差に3.3を乗じた有義振幅は、その区間の流水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-2.5, 2.6)。

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

平成 18 年度では、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。平成 19 年度では、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うとともに、その前年度に得られた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た。さらに、その前年度に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。これらの分析の結果、海象計データから流氷喫水深を概略的に推定できる可能性があることが確認された。本年度においても H19 年度と同様な分析を行い(分析対象データは 19 年度に得られたものを使用)、海象計データから流氷喫水深を概略的に推定できる方法について検討した。さらに、本年度では 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た。

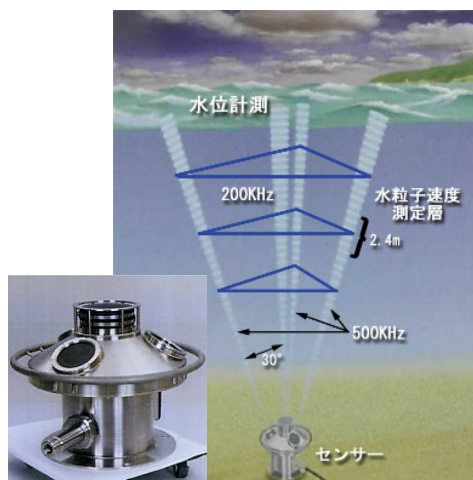


図-3.1 海象計(USW)による計測イメージ

3.2 主要な検討結果

USW と付近に設置した IPS の海氷喫水深の時系列データの比較を定量的に行った。主要な結果を以下に示す。

- 両者は約 100m 程度離れた地点のデータなので、海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が、両者の波形のパターンは比較的類似している(図-3.2)、つまり、時刻歴にみる海氷の喫水深の大きさ、およびその出現頻度が概ね同程度であること、同じ統計的性質があることを明らかにした
- 一方で、IPS による海氷喫水深の平均パワーが大きい、

つまり、凸部の大きさが大きいことが分かった(図-3.3)。これは、信号処理アルゴリズムの相違のほか、両者の半減半角や周波数の相違等によるものと推察された。

- これらの相違を踏まえたうえで、水温による USW の音速補正の方法も含め、USW による実用的な流氷喫水深の概略推定法を提案した(方法論的には IPS データへの換算方法)。概して、USW によるデータをおよそ 1.33 倍すれば良いことを提案した(図-3.4)。

次に、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た。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。

- まずは、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-3.5, 3.6)。
- 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が覆われた場合に、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たりする要因もあるためと考えられる(図-3.7)。
- 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。

3.3 実務への適用(案)

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-3.8)。

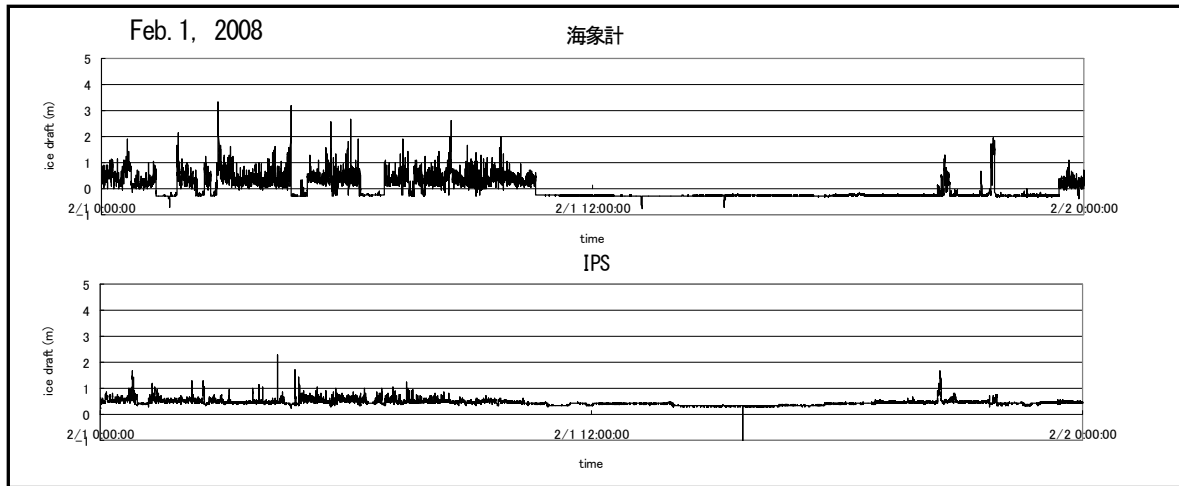


図-3.2 海象計(USW)およびIPSによって得られた流氷喫水深の比較例

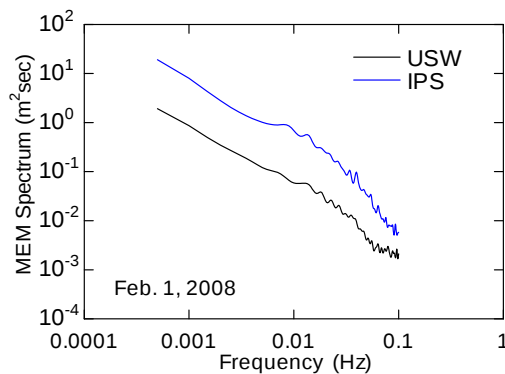


図-3.3 海象計(USW)とIPSによる流氷下面凸部の経時変化(図-2に対応)の周波数スペクトルの比較例

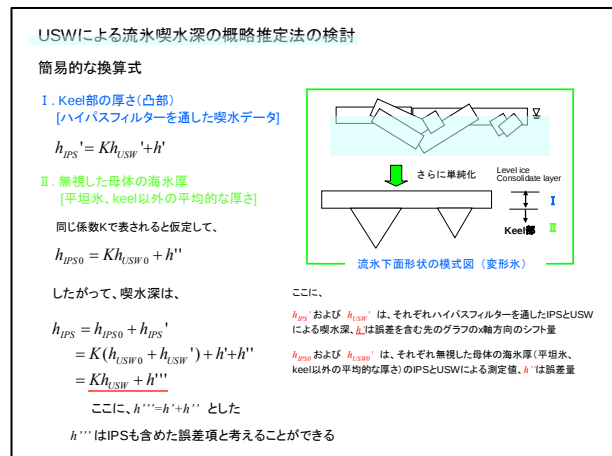


図-3.4 USWによる流氷喫水深の簡易的な換算式の考え方

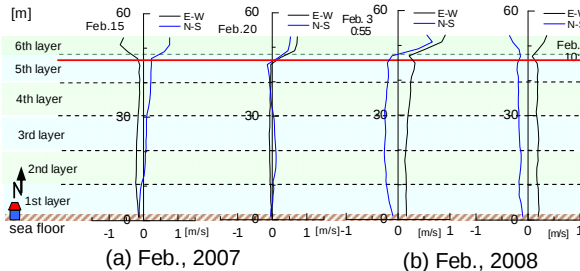


図-3.5 氷下での流れの鉛直分布の例

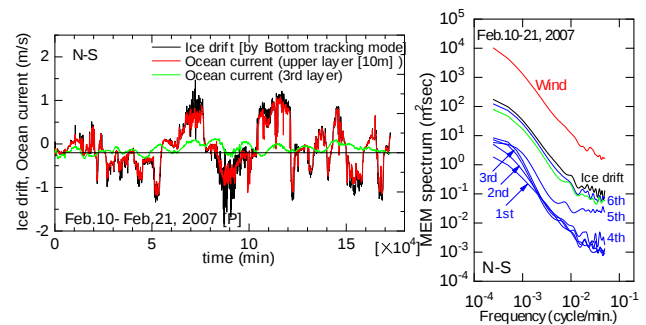


図-3.6 ADCPによる流氷の移動速度(ボトムトラッキングデータ)と各層(上層10m, 中層10m)流速との経時変化の比較例とスペクトルの比較例(N-S方向)

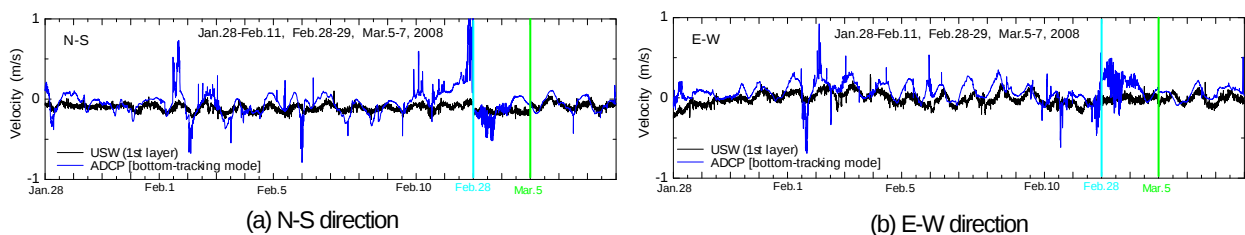


図-3.7 USWの上層10mの流速データと、流氷の動きを表すADCPによるボトムトラッキングデータとを直接比較

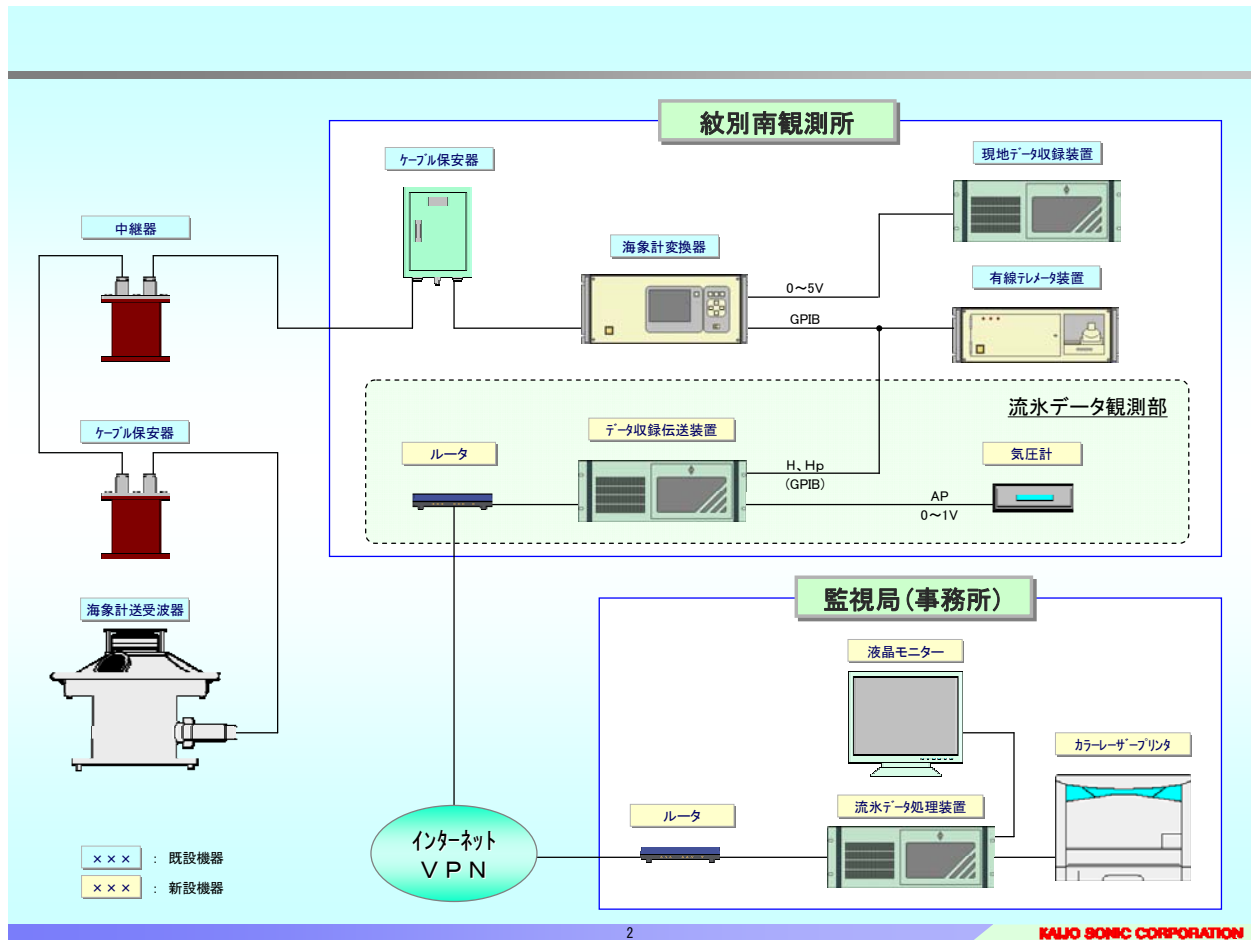


図-3.8 流水観測システムの構築（案）

4. アイスブーム型海氷制御施設の設計法に関する研究 —海氷群底面の凹凸の影響がアイスブーム型海氷 制御構造物への作用力に及ぼす影響などの検討—

4. 1 概説

海氷と構造物との力学的相互作用に関する研究の一環として、流氷制御施設（アイスブーム）と流氷群との干渉に関する実験と検討を行った。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。上流側からの氷群の伝達荷重を減ずるような骨格形成が生じ、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。このように、昨年度までは、主に水理模型実験に基づいた考察であるが、その時、用いた個々の氷盤は円盤で、互いのラフティング等がほとんどない状態であったので、結局はその集合体である氷群の下面形状はフラットであると見なせた。実海氷では、これまでの現地観測からも明らかのように海氷の下面は凹凸である場合が多い。

本年度では、海氷群の下面形状が凹凸であることを想定し、まず氷群下の抗力について、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、厚さの異なる模型氷群を用いることによって、簡略的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。また、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。また、昨年度に続き、個別要素法を適用した数値シミュレーション手法の基礎開発を行い、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す。

4. 1 氷群下面に作用する抗力に関する理論的と実用的な抗力係数の推定法の提案

4. 1.1 研究方法

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-1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

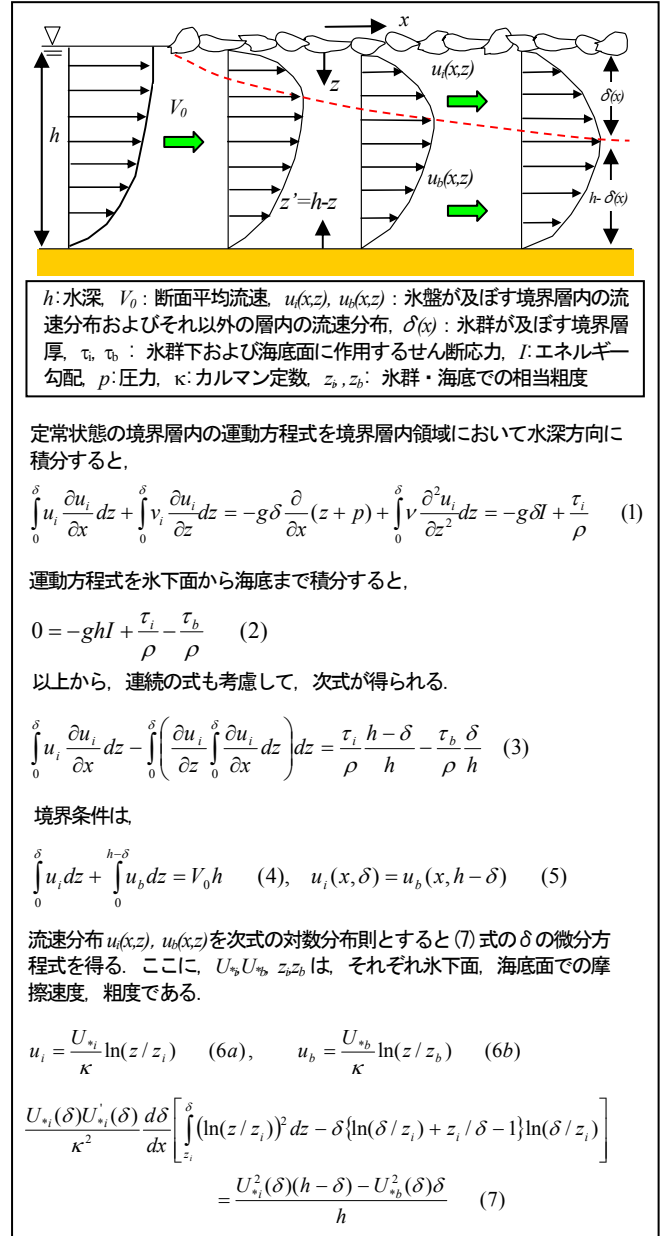


図-4.1 氷群の存在による境界層のモデル

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。

4.2 本検討で得られた主要な結果

- 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 程度るとき、氷群端部からの距離がおよそ 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-4.2）。
- 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¹⁾による値とはほぼ一致した（図-4.3）。
- z/δ 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ないとする大森ら(2005)²⁾の結果を裏付けているものと解釈された。

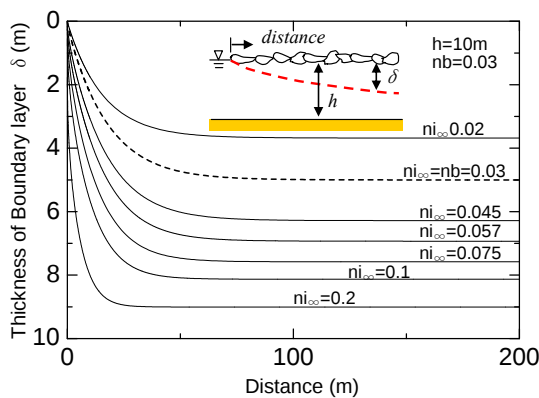


図-4.2 各粗度係数に応じた氷群下の境界層の発達

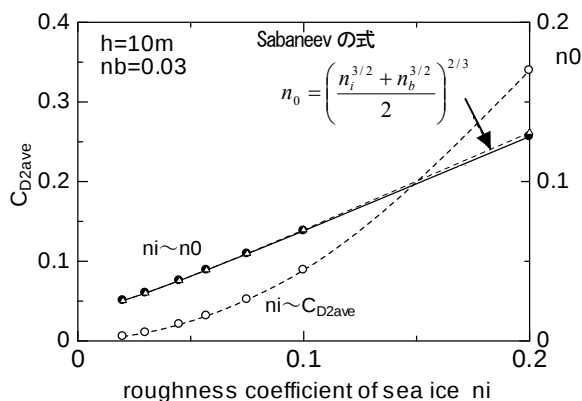


図-4.3 氷群の粗度係数と合成粗度係数との関係、および断面平均流速を用いた平均抗力係数との関係

- 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 ∞ 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）は海水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プ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)²⁾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-4.4 参照）。

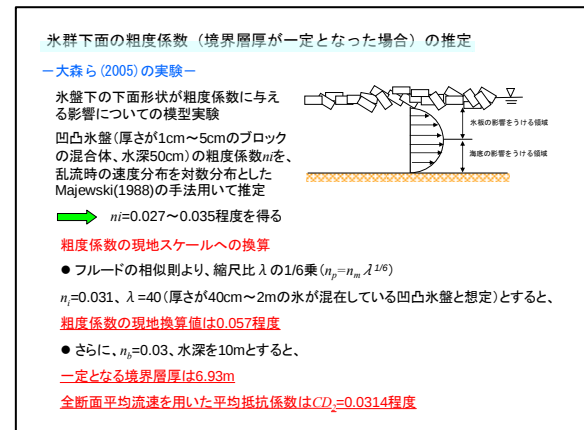


図-4.4 氷群下面の抗力係数の推定の試み

4.2 凹凸氷群が及ぼす伝達荷重に関する水理模型実験

4.2.1 実験方法および条件

基本的な実験方法は従来と同様であるが、今一度概説する。図-4.5 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、模擬氷（ポリプロピレン）を流下させて模型アイスプームでトラップさせた（模型縮尺は 1/100～1/150）。模型氷の投入地点はアイスプ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（目標 10%）となるよう、できるだけ均一に氷盤を水面に供給した。また個々の実験では、各被覆段階に分け（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（4m）までこれを繰り返した。

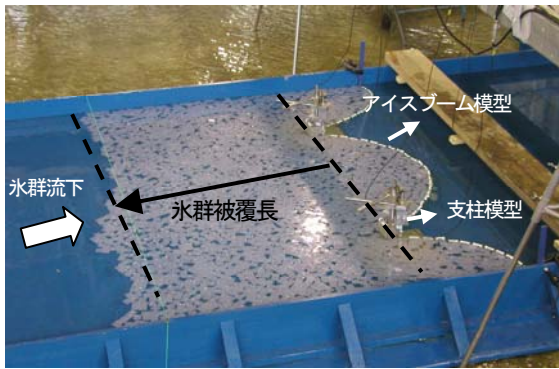


図-4.5 アイスブームの実験風景

表-1 に主な実験条件を示す。氷群の凹凸は、厚さの異なる2種類の氷 [O3cm (厚さ5mm) および O3cm_T (厚さ20mm)] (図-4.6) の混合より、その配合率を変えることにより表現した。表中には、その配合率として O3cm_T の混入率を示しており、また2種類の混合はランダムに行うが、直線上に理想的に均等に配列できたと仮定したときの平均的な波数を示した。

表-4.1 凹凸氷群の実験条件

氷群 タイプ	20mm 厚氷 混入率 (%)	波数 (cycle/m)	目標流速 (m/s)
O3cm, O3cm_T	25	16.67	0.05~0.15
O3cm O3cm_T	11.1	3.07	0.05~0.15
O3cm O3cm_T	4	1.33	0.05~0.15
O3cm O3cm_T	1.56	0.52	0.05~0.15



図-4.6 用いた氷模型

4.2 本検討で得られた主要な結果

- アイスブームに作用する氷群伝達荷重と氷群被覆長の関係は、底面が平坦な氷群の場合、ほぼ直線近似可能であったが、凹凸であると、曲線的（増加率が減少）であった。そこで実験値に、壁面あるいは氷盤相互の影響・拘束を考慮した流下方向の氷荷重に関する理論モデル（図-4.7）を当てはめた結果、理論モデルは実験値の傾向を良く表した（図-4.8）。このモデルから凹凸氷群の抗力係数を推定した（図-4.9）。
- 一般的に波数の増大とともに凹凸の大きさの指標の1つである平均パワー（分散）も増大することに対応す

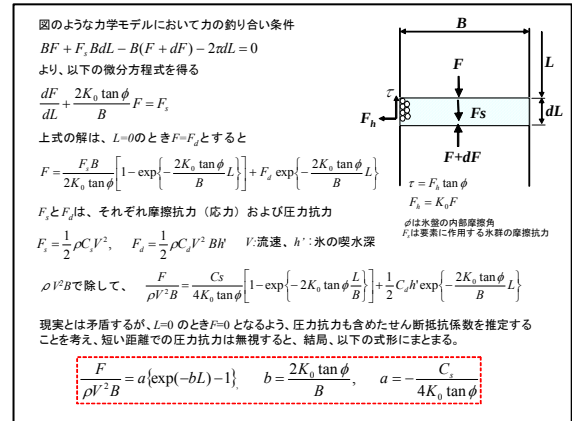


図-4.7 伝達荷重の氷群被覆長との関係の理論的検討

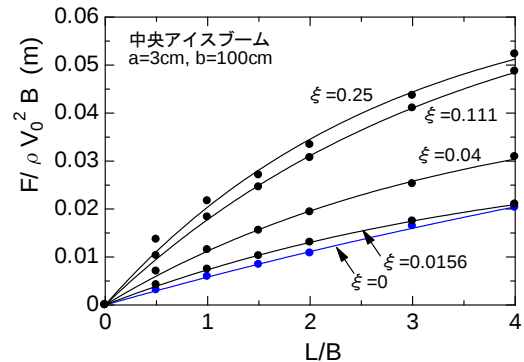


図-4.8 氷群被覆長とアイスブーム（中央部）に作用する荷重との関係例（アンサンブル平均）および理論モデル式の当てはめ

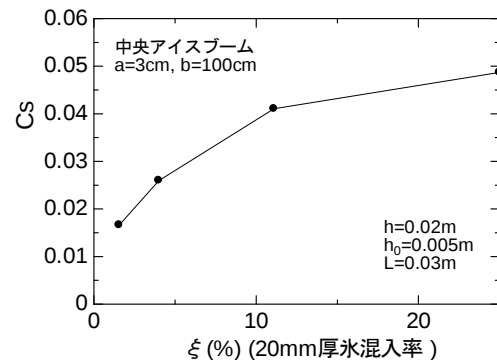


図-4.9 20mm 厚氷混入率と図-4.7 および図-4.8 の方法により推定された抗力係数 C_s との関係

るため、氷群凹凸の波数が大きくなるにつれて抗力係数も大きくなった。しかし、さらに波数が大きくなると平均パワーも減少するので、ある波数で最大値を取り、波数の極限では平坦氷の抗力係数と等しくなることが予想される（図-4.11～4.13）。

- 本実験結果から、オホーツク海での実際の凹凸をもつ海水の抗力係数を大ざっぱに推定した。過去の現地調査および分析結果（有義振幅と凹凸の平均パワーとの関係など）より、おおよそ $C_s=0.03$ 程度と推定された。

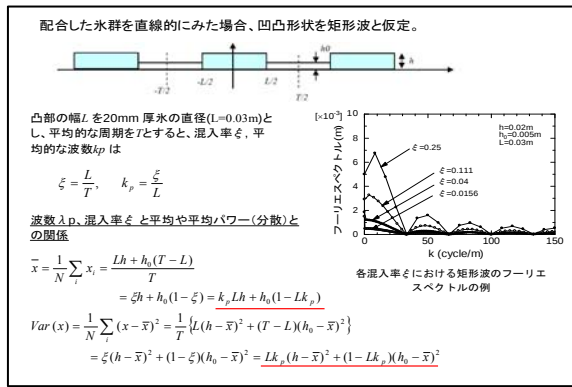


図-4.10 混入率 ξ と波数 k_p ・スペクトル・平均パワー(分散)との関係

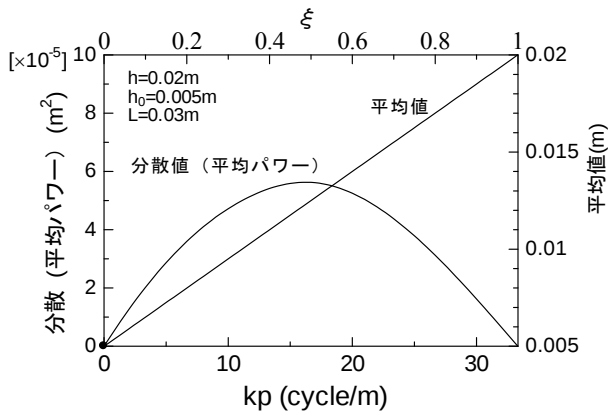


図-4.11 波数 k_p ・混入率 ξ と平均値・平均パワー(分散)との関係

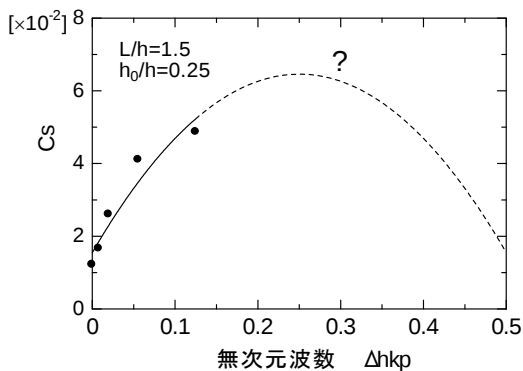


図-4.12 無次元波数と抗力係数 C_s との関係

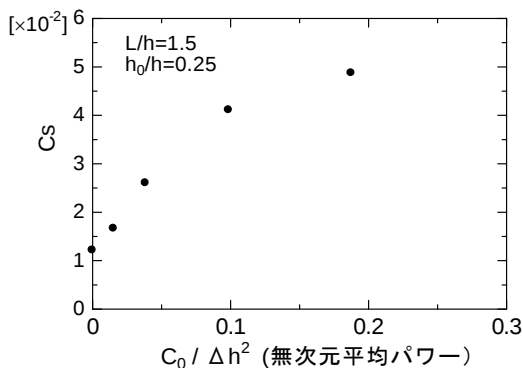


図-4.13 無次元平均パワーと抗力係数 C_s との関係

4.3 DEM を適用した数値シミュレーションによる氷群挙動解析と現地観測結果との比較

4.3.1 計算条件および比較対象データ

昨年度に引き続き、氷群挙動の数値シミュレーションに個別要素法(DEM)を適用し、その有用性を検証した。昨年度においては、室内模型実験結果との整合性が良く、模型実験にとって替わることでできる数値実験手法であることが示された。本年度は、現地観測結果との比較を行った。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)³⁾とした。表-4.1に主な計算条件を示す。

表-4.1 主な計算条件

時間ステップ(s)	0.002
氷の半径(m)	4 - 6
氷厚(m)	0.5
流れの速度(m/s)	実測値
氷と水との摩擦抗力係数	0.007-0.03
氷と水との圧力抗力係数	0.65
氷の stiffness(MN/m)	50-100
氷/氷の摩擦係数	0.4
氷の慣性力係数	0.5

4.3.2 検討結果

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-4.14)。模型実験結果を再現し得るDEMによって、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。

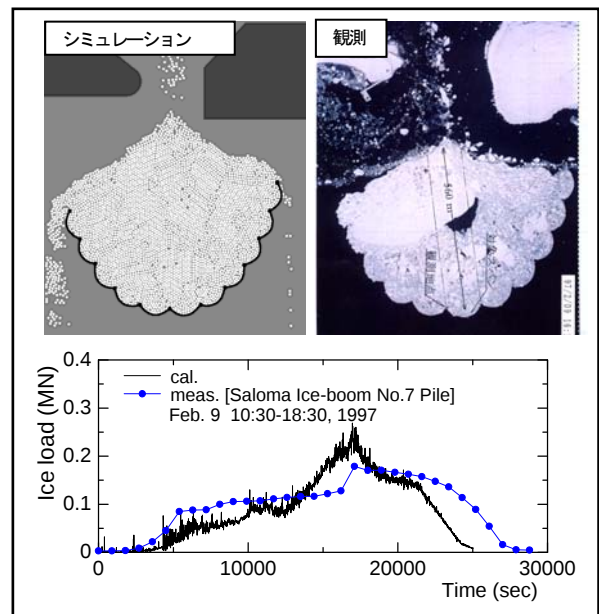


図-4.14 アイスブームに作用する氷荷重の実測値と計算値との比較 [実測値は、No.7固定杭に係留されているワイヤロープの引張力によって評価] [1997年2月9日 10:30-18:30]

5. 海水による沿岸構造物の摩耗に関する研究

5.1 概説

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・コンクリート）表面は、腐食に加えて、冬期に來襲する流水によって、剥離・摩耗などの損耗が生じており（図-5.1）、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。本研究は、後述する理由から主に鋼構造物（金属材料）を対象とし、腐食や流水の作用による材料の損耗・劣化メカニズムとその対策について研究することを目的とする。

本年度では、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る。さらに、鋼構造物の流水の作用による劣化の事例として、サロマ湖第2湖口の鋼矢板を取り上げ、別途妥当性を確認した個別要素シミュレーションを用いて、力学的観点からそのいくつかの改善案を示した。



図-5.1 流水の作用によるコンクリート構造物の劣化の例

5.2 海外文献調査

表-5.1 に調査した主な文献の要約の一覧^{4)~14)}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）¹⁴⁾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-5.2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)¹⁵⁾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气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）¹⁰⁾。それによれば、図-5.3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-5.4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。

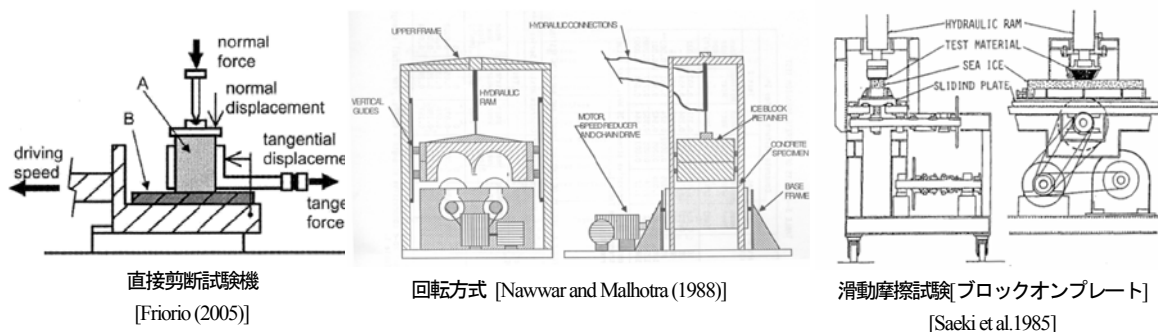


図-5.2 各種の摩耗試験機の例

5.2 海水の出現特性と構造物等への作用に関する研究

表-5.1 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) ⁴⁾ 室内実験	[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, 回転スピード：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	- 特に摩耗距離が大きくなると氷の接触圧の影響は大 - 摩耗量は、最大でおよそ 0.003mm/km
	[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℃	- 摩耗量は結晶方向の違いに大きく依存性しない - 初期摩耗（比較的大きな摩耗率）と定常摩耗が存在 - 摩耗率は接触圧力に正比例 -10℃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℃以下では、大きく異なってくる - 平均摩耗 0.05mm/km
Nawwar and Malhotra (1988) ⁵⁾ 室内実験	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℃ 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	- 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 - 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 - 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 - 摩耗率は、0.004mm/km(Non-textured surface), 0.003mm/km(textured surface)
Ittoh et al. (1988&94) ⁶⁾⁷⁾ 室内実験	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℃	- 摩耗率は、コンクリート強度や骨材の違いに違いはない - 平均摩耗率は 0.05mm/km - 摩耗率 S_r [mm/km] は、主に氷温 T [℃] と接触圧力 p [kgf/cm²] によって決まる $S_r = p(9.708T^2 + 1295.7)10^{-6}$ - 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
Hanada et al. (1996) ⁸⁾ 室内実験	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℃ 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	- 安山岩の摩耗率は摩耗距離に比例する。 - 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） - 岩石の強度増加とともに摩耗率は減少 - グレインサイズが小さいほど、摩耗率も小さい - 摩耗量の推定式は S_r を摩耗率、σ_v を接触圧力、L を摩耗距離として： $S = S_r \sigma_v L$ - 摩耗率 S_r (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)
Friorio (2005) ⁹⁾ 室内実験	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	- 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 - 平均摩耗率は 2mm/km
Janson (1988) ¹⁰⁾ 現地計測	- 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 - 氷の塩分量は比較的低く、北極海の海水よりは強度が高い	- 摩耗量：0-140mm [0.2-7.0mm/year] - 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 - 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 - 摩耗量 S の推定式は v を移動速度(knot), s を氷厚(mm), t を時間(日)として、 $S = \int 0.0015 v s d t \quad [mm / year]$
Janson (1989) ¹¹⁾ 現地計測	- バルト海において、24 の RC パネルを暴露 - 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	- 摩耗量：0.3-11.6mm/year - 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 - 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
Houvinen (1990) ¹²⁾ 現地計測	砕氷船 - 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 現地計測 - 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	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) - 平均摩耗量は、22-24 年で 22-39mm, 最大で 56mm - 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 - 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
Malhotra et al. (1996) ¹³⁾	カナダバフフィン島 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) ¹⁴⁾	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	- 初期摩耗と定常摩耗から成る - 摩耗率 S_r は、炭素鋼の場合、0.0014mm/km, ステンレスの場合、0mm/km - 摩耗量 S の推定は、H は硬さ、σ_v を接触圧力、L を摩耗距離として、 $S = S_r \sigma_v L / L$

N.C. 高強度コンクリート, L.W.C. 軽量の粗骨材と通常の細骨材を用いた高強度コンクリート,

L.L.W.C. 粗骨材・細骨材とともに軽量骨材を用いた高強度コンクリート

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・位置づけを再確認してみる。上述のように、比較的コンクリ

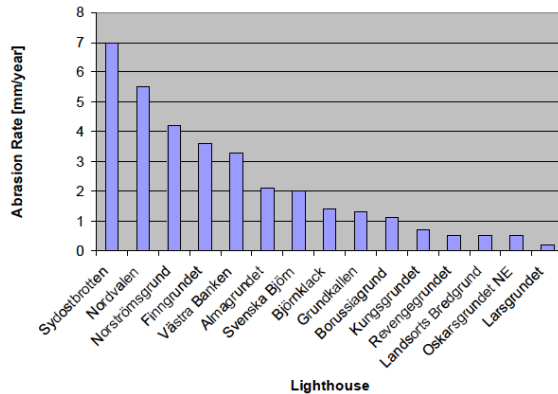


図-5.3 Annual abrasion rates, lighthouses [Janson(1989)]

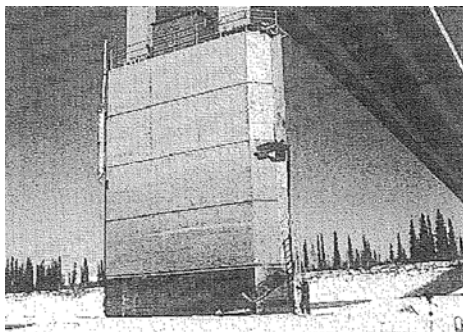


図-5.4(a) 鋼板が取り付けられた橋脚 (ユーコン川)



図-5.4(b) 鋼板が取り付けられた橋脚 (天塩川)



図-5.4(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)

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。

5.3 サロマ湖第2湖口の鋼製護岸の劣化の実態とその改善策の個別要素シミュレーションを用いた力学的検討

オホーツク海に面しているサロマ湖では、過去に多発していた湖内への流水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第1・第2湖口部に防水施設(アイスブーム)が設置されている(図-5.5)。このうち第2湖口の水路の側壁に用いられている鋼矢板およびその水路に建設されている橋梁の橋脚部の鋼管矢板などの劣化が確認されている(図-5.6)。第2湖口では潮位変動に伴い順流・逆流が交互に発生し、非常に早い潮流が発生する。特に湖内が結氷していない状態では流水の移動が非常に活発となる。図-5.6に示すように流水の衝突によるものと思われる変形・へこみや、腐食、摩耗などが確認されている。特に後者について、寺島ら¹⁰⁾の調査結果によれば、鋼矢板の凸部と凹部との腐食・摩耗量の差から、凸部は明らかに摩耗されていて、流水に起因するものであると結論づけられている。さらに、貫通孔や開孔腐食が認められているが、これは腐食によって劣化した材料に流水が作用した結果とも考えられるし、また流水の作用が腐食を促進したとも考えられる。特に後者については、腐食の抑制あるいは保護膜とも見なせる腐食生成物を流水が剥ぎ取り、材料表面を活性化させ、腐食を促進させる。いずれにしても流水の関与は確実と考えられ、何らかの対策が望まれている。



図-5.5 冬期のサロマ湖第2湖口

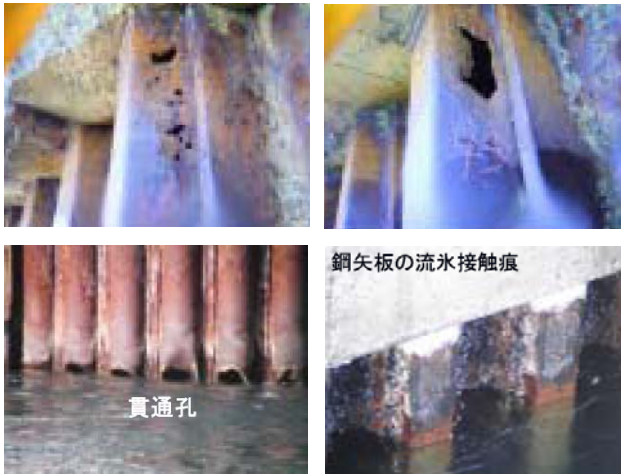


図-5.6 サロマ湖第2湖口鋼製護岸の劣化状況の例

変形・へこみ、摩耗、腐食（の促進）など、構造物の劣化は、流水による作用力（静的・動的）、接触圧に依存するものと考えられる。接触圧力は構造物の形状により大きく異なるものと考えられる。摩耗対策としては、腐食増加や樹脂系などによる塗装のほか、構造物形状を工夫することにより氷の接触力・圧力を軽減させ、結果として摩耗量・へこみ・剥離などを大幅に減少させる、あるいは弱点を把握し、集中的に対策工を施す目安とする、などが考えられる。本検討では、「アイスブーム型海水制御施設の設計法に関する研究」の項目で妥当性が示された個別要素シミュレーションを用いて、橋脚部鋼管矢板および護岸鋼矢板の形状（構造形式）が海水による壁面接触力・接触圧力に及ぼす影響の簡易的評価を行うとともに、構造上の弱点を概略的に把握する事を試みた。計算条件を図-7に示す。基本的な計算方法は、「アイ

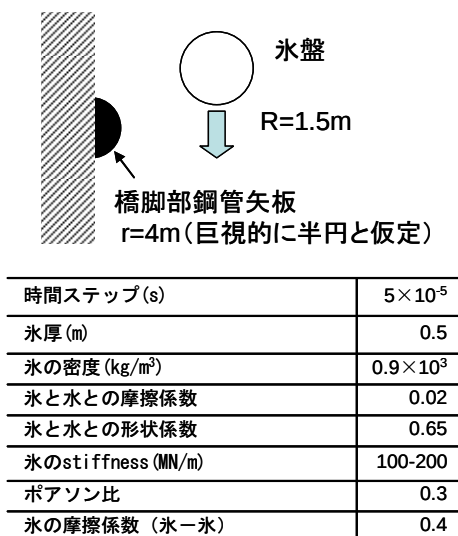


図-5.7 主な計算条件

スブーム型海水制御施設の設計法に関する研究」の項目で示したものと同様である。二次元のDEMで、流水を半径1.5mの円盤とした。なお、橋脚部鋼管矢板は、図-5.7に示すように、巨視的に水路に張り出している半径4mの半円とした。また図-5.8には、第二湖口を単純化した境界条件とシミュレーションの状況例を示した。

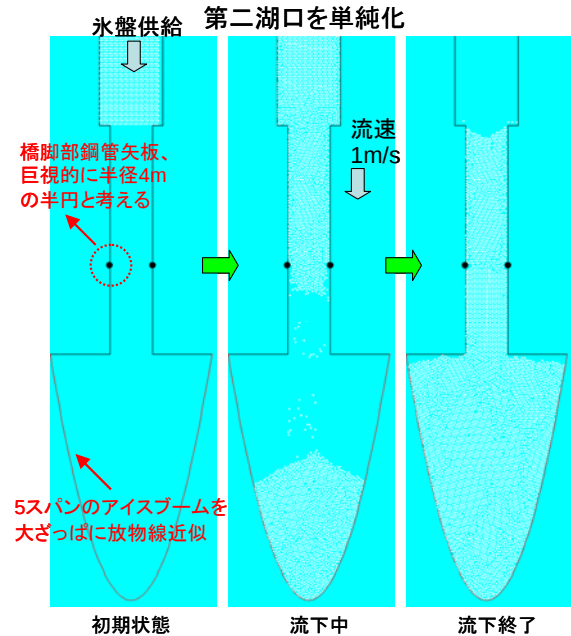


図-5.8 境界条件の設定とシミュレーション状況の例

具体的な検討項目に対する、おもな結論を以下に示す。

- 橋脚部が水路幅方向に凸に張り出している場合、それが在る場合とない場合での接触力を比較について
 - 壁面には氷盤による衝撃力を含めた動的な力が作用する（図-5.9）
 - 橋脚張出部に作用する接触力は、それがない状態でのフラットな壁面での力に比べて数倍大（図-5.9、表-5.2）
 - 静的状態においても同様、橋脚張出部に作用する接触力は、数倍～数10倍大（表-5.2）
- 護岸矢板の形状（凹凸）が氷の接触力・圧力に及ぼす影響
 - 下流側隅角部に作用する接触圧力の方が大きい
 - 矢板隅角部・矢板部凸面および矢板なしフラット壁面に作用する力には明確な違いは見られないが、接触圧力で比較すれば、矢板隅角部には、数10倍大きな圧力が作用すると予想される（図-5.10）→ フラット壁面に比べて、隅角部は、摩耗のし易さのほか、へこみ・剥離などの損傷の可能性はるかに高いと推察（氷自信の破壊も）

5.2 海水の出現特性と構造物等への作用に関する研究

■H18 年度のアイスブームに関する水理模型実験により、仮に壁面を凹凸からフラットにした場合へのアイスブームに作用する力に影響はないと考えられる

以上より、「橋脚部の出っ張り」や「壁面の矢板」方式は、局部接触圧力の増大をもたらすため、摩耗対策として、腐食代増大や樹脂によるコーティングのほか、氷盤の移動方向に対しての凸部の減少を講じる等の構造上の改良も望ましい。あるいは、それを弱点とし、そこに集中的に対策工を施すのが良いと思われる。

当チームは、以上の知見を、「サロマ湖漁港摩耗対策技術検討委員会」で報告し、橋脚部を水路内へ張り出さないこと、壁面凹凸をなくすことの根拠資料として採用された。

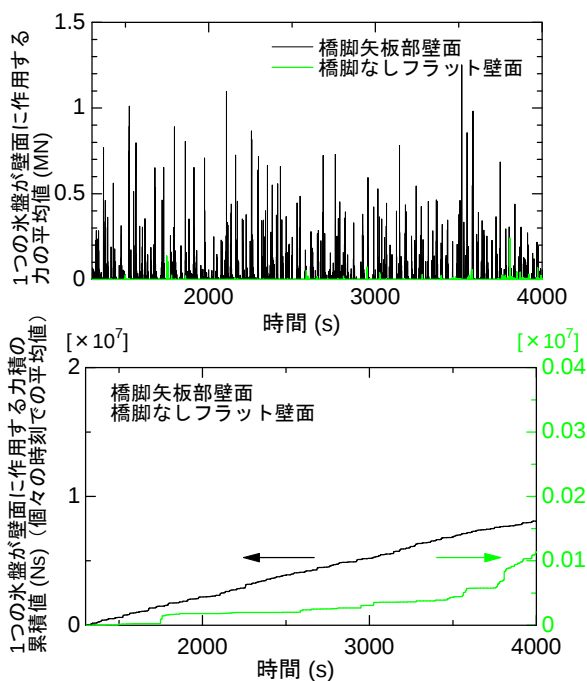


図-5.9 橋脚部鋼管矢板の形状が氷の接触力・圧力に及ぼす影響の検討 —「橋脚張り出部」と「フラット壁面（橋脚なし）」に作用する氷盤接触力の比較例（氷盤1つが及ぼす接触力および力積の積算値の平均値と最大値で評価）—

表-5.2 橋脚部が在る場合における橋脚部と橋脚部がない状態における橋脚位置相当フラット壁面に作用する接触力の比（氷盤1つが及ぼす接触力の平均値と最大値で評価）

静的状態		動的状態			
最大値	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値
18.1	21.7	時間最大値	時間平均値	時間最大値	時間平均値
		5.2	65.5	6.5	70.9
力積の累積値の橋脚・橋脚なしフラット壁面の比（時間平均）					
		最大値	平均値		
		167.2	179.2		

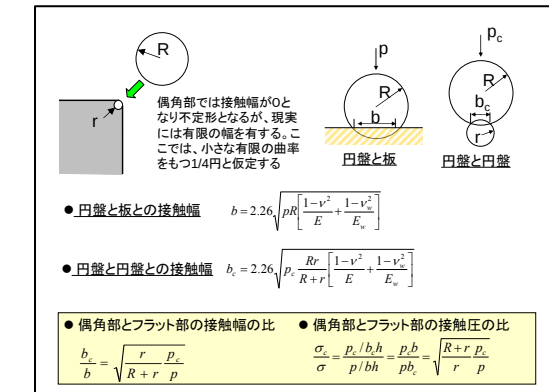
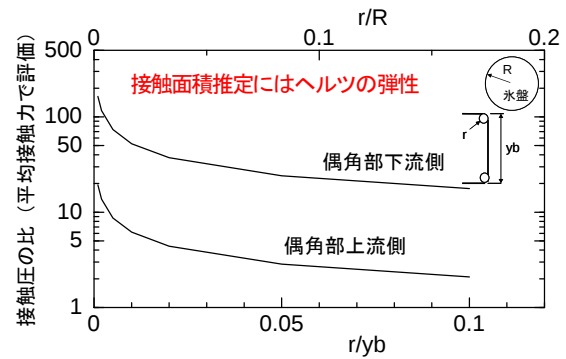


図-5.10 偶角部と凹凸なしフラット壁面の接触圧力の比（平均接触力で評価した場合）

5.4 今後の研究内容

本研究においても、海水と金属材料の摩耗試験を実施する。試験機は、上述したように、摩耗試験に適している滑動式（ブロックオンプレート）を採用し、Saeki et

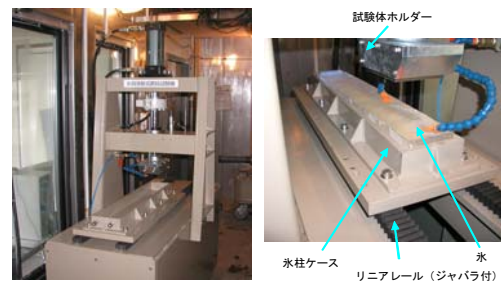
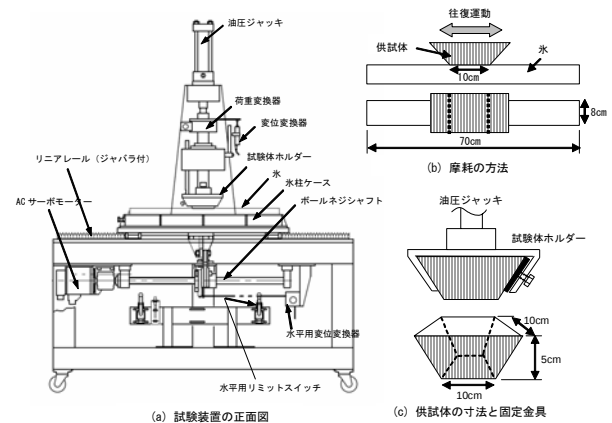


図-5.11 滑動式摩耗試験機の概要図

al.(1986)¹⁵⁾らの試験装置を改良したものを開発した(図-11)。本年度においていくつかの予備実験を実施し、試験体や海水の作成方法について幾つかの不具合が見られたが、すべて解決し、来年度以降の試験に備えて万全の準備をすることができた。

6. 津波来襲時の作用氷力に関する研究

6.1 概説

昨年度は、津波により遡上する氷盤に関する基礎的な水理模型実験を行った。氷盤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、模型実験の結果、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ことが分かった。また、自由落方式による海水の衝撃実験を実施した(実施のみ、解析は今年度)。

本年度では、昨年度実施した衝突実験の解析ならびに個別要素法を用いた衝突時の海水の破壊挙動の数値計算手法についても検討した。また、海水以外にも、木材や鋼材の他材料についても同様な衝突実験を実施した(実施のみ、解析は来年度)。

6.2 研究方法の概要

実験は自由落方式により、人工海水を落下高を変えて($h=0.5\text{m}\sim 1.5\text{m}$)、円断面杭構造物(梁)へ衝突させることにより行った(図-6.1 参照)。人工海水は低温室にて25‰の塩水を凍らせ、約25kg～100kgの質量(M)となるよう直方体に整形した(厚さ t を約0.15mと一定)。また破壊強度に敏感な氷温を目標値 $-15\sim -5^{\circ}\text{C}$ の範囲で制御した。杭は両端支持のSS材の丸棒(直径 $d:60\text{mm}$ 、固有振動数:338Hz)で、両支点部にロードセル、杭の下側に歪ゲージを配置し、衝突時の支点反力や曲げ応力などを計測した(サンプリング間隔は5kHz)。ま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、結晶粒径などを計測した。

表-6.1 主な実験条件と氷の特性

	T_{ice0} ($^{\circ}\text{C}$)	Sample size (m)	T_{ice} ($^{\circ}\text{C}$)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	S (‰)	ρ_i (g/cm^3)
CASE 1	-10	B: 0.3-0.6 L: 0.3-1.2	-9.3- -8	-2.1- +3	6.38	0.913
CASE 2	-15	B: 0.6 L: 0.3-0.6	-13- -11	-4.8- -2.4	5.93	0.917
CASE 3	-5	B: 0.6 L: 0.3-0.6	-5.7- -4.5	-1.2- +0.2	5.22	0.914
CASE 0 (freshwater ice)	-10	B: 0.6 L: 0.3-0.6	-8.5- -8	+0.7- +2	-	0.916

Drop height for each case: 0.5-1.5 m (equivalent to collision speeds of 3.1-5.4 m/s), thickness of ice sample (rectangular solid): 0.16 m
Grain size of ice sample: 5-20 mm
 T_{ice0} : target ice temperature (atmospheric temperature in cold chamber), T_{ice} : ice temperature, T_a : outside air temperature, S : salinity, ρ_i : density

表-1には主な実験条件と用いた海水の特性をまとめた。

主に海水の運動エネルギーと衝突力(反力)との関係や、氷温が衝突力に与える影響について考察した。また粒子間に引張抵抗を与えた個別要素法による衝突現象の数値計算手法への適用を試みた。構成粒子は円柱の等径要素6角形配置とし、パラメータ設定については、初期値に海水の機械強度を参照し、破壊モードや衝突力を実現象と合うように適時調整した。また杭構造物は、はり要素のFEMで解析し、動的解析のための時間積分はニューマークの β 法を用いた。

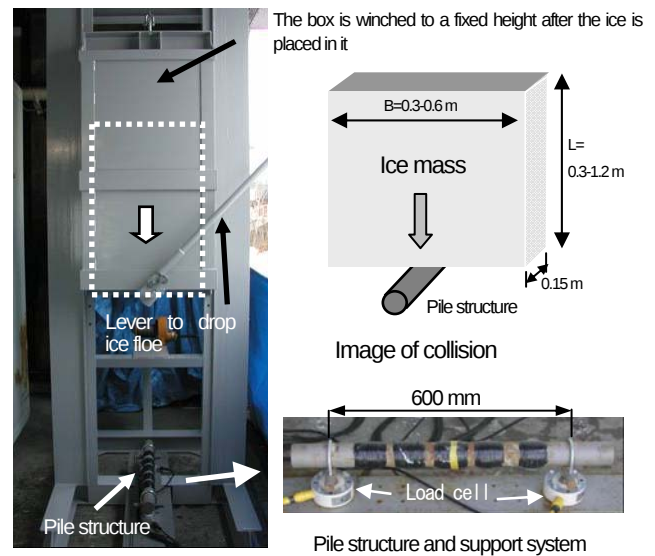


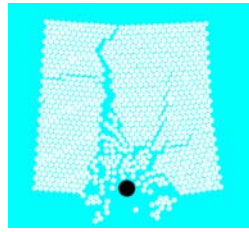
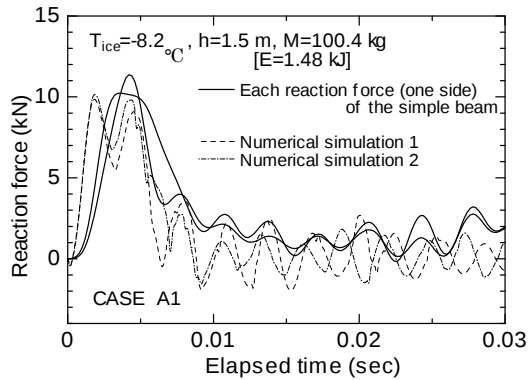
図-6.1 自由落方式による海水の衝撃実験装置

6.3 主要な結論

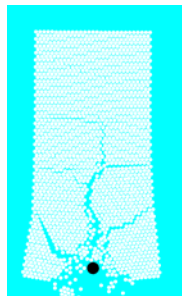
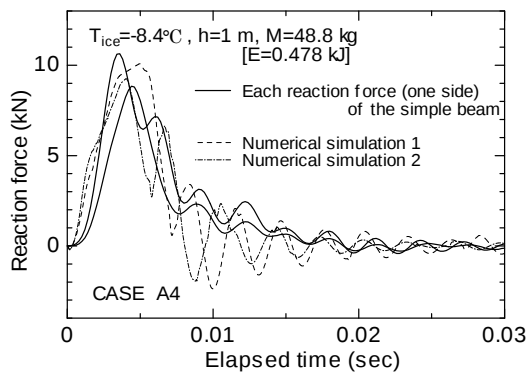
- 衝突後 $3\times 10^{-3}\text{s}$ 程度で荷重がピークを迎えたのち、構造物の減衰振動が生じた。またその時の破壊モードは、比較的海氷の寸法、特に衝突方向の寸法が小さい場合には、引張によるスプリット破壊が卓越し、海水上端部までクラックが及んで海水が二つに破壊・分離した(図-6.2(a))。一方、海氷の寸法が大きい場合は、クラッシング(貫入)が卓越して、その後クラックが生じる破壊モードであった。しかし、海水上端部まで及ばず、途中で分岐して側部に到達した(図-6.2(b))。
- 海水の運動エネルギー E と合支点反力との関係は、破壊を考慮しない(運動エネルギーはすべて杭の弾性歪みエネルギーに変換)質点とはりによる簡易モデルによりその傾向を説明できた。しかし、破壊強度を支配する氷温に応じて異なるが、ある程度運動エネルギーが増大すると、反力は一定となること、破壊しない簡易モデルによる値と比べておよそ1オーダー小さな値となるこ

とが推察された(図-6.3, 図-6.5 参照).

- 合支点反力のピーク値発生時刻は運動エネルギーの増加とともに急激に減少して、一定値となることが分かった. この場合、衝撃作用時間と梁の固有周期 T との比は 2~3 と推定され、正味の衝撃力よりもその応答値(反力)の方がやや大きな値であることが推察された.



(a) B=0.6 m, L=0.6 m, h=1 m ($T_{ice} = -8.4^{\circ}\text{C}$)



(b) B=0.6 m, L=1.2 m, h=1.5 m ($T_{ice} = -8.2^{\circ}\text{C}$)

図-6.2 支点反力波形及び破壊モードの実測とシミュレーションとの比較例(支点反力は片側ずつ表示)

- 反力は氷温の低下にともなって直線的に増加し、準静的に得られる一軸圧縮強度¹⁷⁾¹⁸⁾の氷温依存性よりも大きく、温度の低下に比例するとした引張に基づく力³⁾の氷温依存性と同等程度であった(図-6.4). これより、比較的小規模な氷塊については、引張による破壊が卓越し、Saeki et al.(1978)¹⁹⁾に基づく引張応力に関連つけた衝撃力の概略推定が可能である. また、衝突力は、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. これは、ある程度氷塊が大きくなる

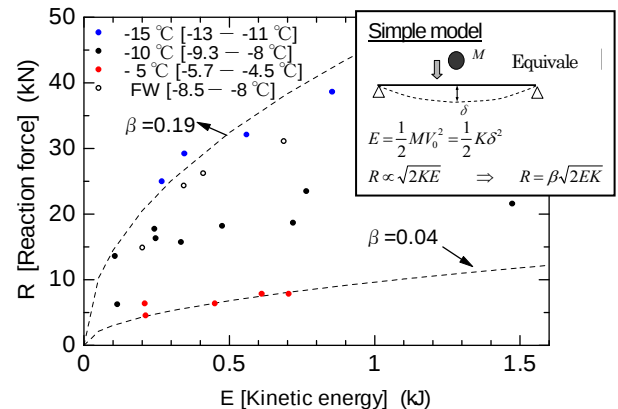


図-6.3 合支点反力(最大値)と海水の運動エネルギーとの関係 (FW は淡水を意味する)

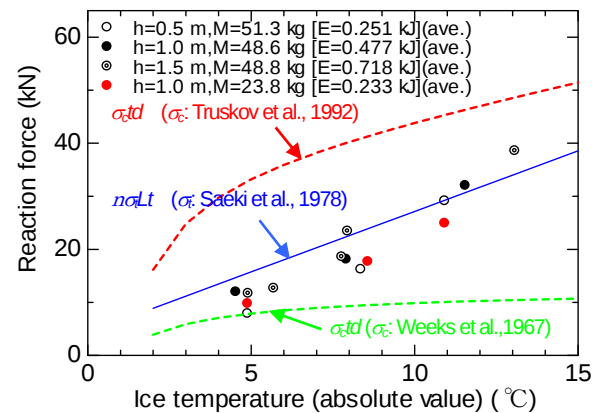


図-6.4 氷温と合支点反力との関係(図中の点線は氷温の影響を考慮した1軸圧縮強度(σ_c), 引張強度(σ_t)の推算値に杭径(d)と氷厚(h)を乗じて力として表したものの)

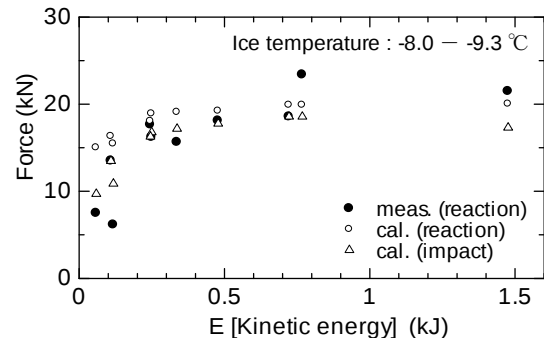


図-6.5 合支点反力(最大値)と運動エネルギーとの関係の実測値と計算値との比較例(目標氷温: -10°C)

と、その寸法に依存しないような有限の（引張）クラック長さ、構造物規模で定まる（圧縮）破壊領域に支配されている事を示唆しているとも考えられる。

- 適切なパラメータ設定が実現できれば、個別要素法により、海氷の破壊挙動とその構造物応答などが良好に再現できることが分かった（図-6.2 参照）。また、海氷の運動エネルギーと支点反力との関係も概ね表現でき、運動エネルギーが大きくなると反力が一定となることも再現された（図-6.5 参照）。

6.4 新たな実験の実施（実施のみ）（本年度分）

本年度では、人工海氷以外にも、木材や鋼材といった他材料についても同様な衝突実験を実施した。この試みは、流氷以外の、材木やコンテナ、船舶、車両などの他の津波漂流物による衝突力と比較検討することを目的としている。木材や鋼材は、人工海氷の質量や寸法・形状を一致させるよう設計した。木材については、無垢のカラマツを使用し、質量は両端部にウエイトを取り付けることにより調整した。衝突体の長手方向（落下方向）を木の繊維に平行となる方向に一致させたもの（木材の強度は一般に繊維に平行の圧縮強さが基準）、および繊維に垂直としたものを使用した。また鋼材については、炭素

鋼(SS)を用い、板厚は2.2mmおよび6mmとし、質量は側壁の板厚により調整した。図-6.6にはその衝突体の例を示す。

本年度において、この実験は実施のみであり、詳細な解析結果と考察については次年度報告する。

6. まとめ

IPS と ADCP を用いた流氷観測結果から、流氷下面の凹凸特性を解析した結果、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仮定できた。また、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を表す指標を開発した。

紋別沖に常設されている海象計(USW)の流氷観測への適用性を検討した。水温によるUSWの音速補正の方法も含め、USWによる実用的な流氷喫水深の概略推定法を提案した(方法論的にはIPSデータへの換算方法)。概して、USWによるデータをおよそ1.33倍すれば良いことを提案した。また、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た結果、USWの上層測定層10mが流氷下の境界層に含まれており、そのデータを用いて、推定可能であることが示された。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づけられた。またUSWを用いた流氷観測システムについても提案した。

流氷制御施設(アイスブーム)に関する研究において、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氷荷重推定に必要な、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。また、凹凸氷群が及ぼす伝達荷重に関する水理模型実験を行い、オホーツク海での実際の凹凸をもつ海氷の抗力係数を大ざっぱに推定した。過去の現地調査および分析結果(有義振幅と凹凸の平均パワーとの関係など)より、およそ $C_s=0.03$ 程度と推定された。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を適用した。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

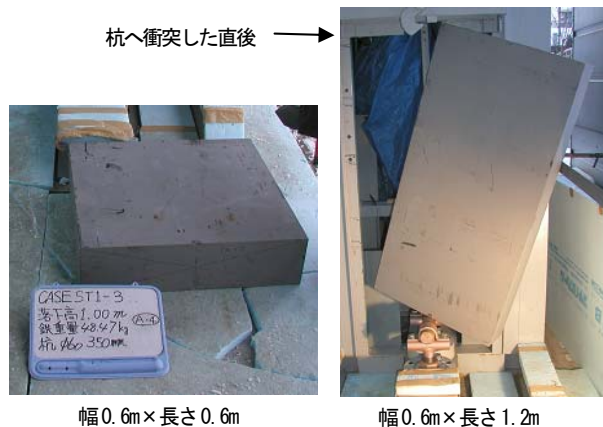


図-6.6 (a) 鋼製衝突体の例（炭素鋼SS）

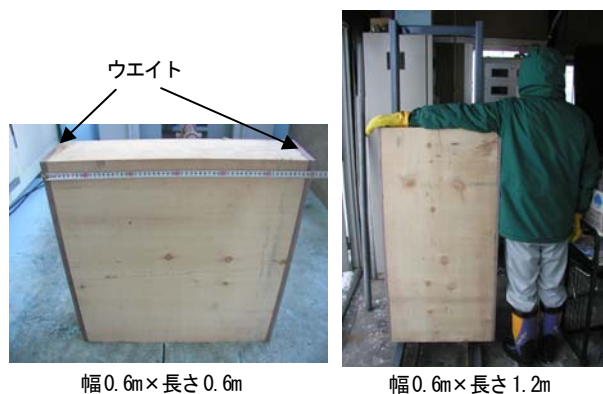


図-6.6 (b) 木製衝突体の例（カラマツ・無垢材）

が示された。模型実験結果を再現し得る DEM によって、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。

今年度より、海氷による沿岸構造物の摩耗に関する研究に着手した。まず、海外文献などをレビューし、本研究テーマの明確な位置付けを確認した。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、主に鋼材（金属材料）の損耗について調査研究を進めることとした。さらに、鋼構造物の流氷の作用による劣化の事例として、サロマ湖第2湖口の鋼矢板を取り上げ、別途妥当性を確認した個別要素シミュレーションを用いて、力学的観点からそのいくつかの改善案を示した。それによる知見を、「サロマ湖漁港摩耗対策技術検討委員会」で報告し、橋脚部を水路内へ張り出さないこと、壁面凹凸をなくすことの根拠資料として採用された。

最後に、津波来襲時の海氷作用力推定法に関する研究として、自由落下による海氷衝突実験を実施した。海氷の衝突力は、運動エネルギーとともに増加するが、ある程度運動エネルギーが大きくなると一定値になること、また運動エネルギーは、主に海氷の破壊・側方への飛散などに消費される割合が大きいことが推察された。衝突力は氷温の低下にともなって直線的に増加し、準静的に得られる一軸圧縮強度の氷温依存性よりも大きく、温度の低下に比例するとした引張に基づく力の氷温依存性と同等程度であった。これより、比較的小規模な氷塊については、引張による破壊が卓越し、Saeki et al. (1978) ³⁾に基づく引張応力に関連つけた衝撃力の概略推定が可能であることが分かった。また、衝突力は、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。これは、ある程度氷塊が大きくなると、その寸法に依存しないような有限の（引張）クラック長さ、構造物規模で止まる（圧縮）破壊領域に支配されている事を示唆しているとも考えられる。また、適切なパラメータ設定が実現できれば、個別要素法により、海氷の破壊挙動とその構造物応答などが良好に再現できることが分かった。

参考文献

- 1) Beltaos, S. IVER ICE JAM: THEORY, CASE STUDIES, AND APPLICATIONS, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.109, No.10, pp.1338-1359, 1983.
- 2) 大森英治, 小笠原勝, 松田純一, 竹内貴弘, 佐々木幹夫: 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, 2005.
- 3) 関口浩二, 遠山哲次郎, 荒田崇, 清水敏晶: サロマ湖湖口部アイスブーム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.
- 4) Hoff, G. C. Resistance of Concrete to Ice Abrasion – A Review, *American Concrete Institute SP 109*, p. 427-455, 1988.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Huovinen, S. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structures, *VTT Publications* 62, (Doctoral thesis), Espoo, 110 p, app. 31 p, 1990.
- 13) Malhotra, V.M., Zhang, M.H., and Sarkar, S.L. Manufacture of Concrete Panels, and Their Performance in the Arctic Marine

5.2 海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究

- 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.
- 14) 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.
- 15) 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
- 16) 寺島貴志, 今泉章, 佐藤光一, 中田克哉, 花田真州, 佐伯浩: 氷盤移動による鋼矢板の摩耗とその推定法
- 17) Truskov, P.A., Astafiev, V. N. and G. A. Surkov. Problems of Choice of Sea Ice Cover Parameters Design Criteria, *The 7th International Symposium on OKHOTSK SEA & SEA ICE ABSTRACTS*, pp.21-26, 1992.
- 18) Weeks, W. F. Sea Ice Properties and Geometry, *AIDJEX Bulletin*, No.34, pp.137-172, 1976.
- 19) Saeki, H., Nomura, T., and A. Ozaki. Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, *Proc. of IAHR Ice Symp.*, pp.135-149, 1978.

SEA ICE OBSERVATION AND INTERACTION BETWEEN SEA ICE AND STRUCTURES

Abstract : As results of the sea ice bottom observation using *IPS* and *ADCP* in Okhotsk sea, the normalized spectrum of ice bottom topography might be common regardless of spatial and temporal component.

In order to investigate the application of the wave gauge, which established permanently at Okhotsk Sea of Hokkaido, to sea ice observation, we compared the sea ice drafts of the gauge with those of the *IPS*. Their statistical characteristics were very close to each other. We confirmed the wave gauge could be useful for the constant observation of sea ice in the future.

We made the experiments on interaction between sea ice floes and ice booms, which were especially focused on the effect of the roughness under ice floe on the ice loads acting on the ice booms. We proposed a practical estimation method of drag coefficient for the roughness under ice floe.

We also examined problems on the abrasion of coastal structures by sea ice. While we reviewed some foreign literatures to confirm our aim and contents on the problems, we evaluated these problems from a mechanical viewpoint, including structural design and its arrangement, by using the numerical simulation.

Finally, while we performed a medium-scale model test regarding the impact of ice on a structure by the free-fall of an ice floe under various conditions, we developed its numerical simulation method using the discrete element method [DEM]

Key words : Sea ice, Ice force, echo, Okhotsk sea, Ice boom, Tsunami, impact load, abrasion