

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，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】

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、流氷制御施設に関する水理模型実験を実施し、上流側の境界条件（水路形状）が下流への伝達氷荷重に及ぼす影響等について調べ、設計上の留意点について検討した。また、流氷による構造物の損耗のメカニズムにとって重要なファクターである流氷挙動や接触圧力の数値計算法を構築するとともに、材料損耗・劣化に関する現地計測や室内要素試験を実施した。最後に、津波来襲時の海氷作用力（衝突力）推定法に関する研究として、衝突実験を実施し、氷の物性や氷の形状の変化が衝突力に及ぼす影響、氷の破壊・飛散を考慮した衝突特性などを明らかにした。一般的な津波漂流物である木材や船舶などを想定した他材料の衝突実験も実施し、海氷の衝突特性を踏まえつつそれらの衝突特性を明らかにした。また海氷の衝突破壊の数値計算法の構築を行い、その有用性を示すとともに、実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築するための環境を整備した。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，摩耗，腐食，DEM

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。

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、

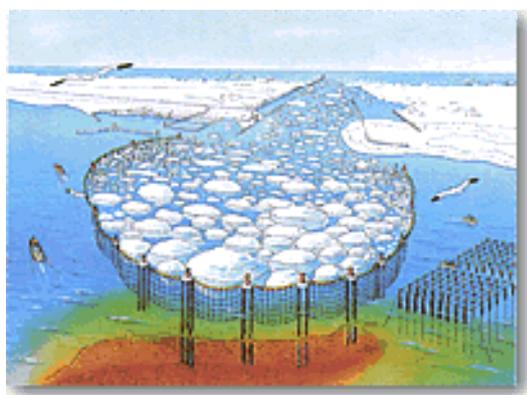


図-1.1 アイスブームのイメージ(サロマ湖口)

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、作用力を精度良く推定されることが求められる。本年度では、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。

また昨年度より着手した、海氷による沿岸構造物の摩耗に関する研究を実施した。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、冬期に来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、昨年度の研究で得られた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している。材料損耗は、流氷によ

5.2 海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究

る接触が主な要因であると考え、まず、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。本年度では、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（河合ら、2010）¹⁾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の可能性について検討を加えた。また、現地調査として、流氷の作用を強く受けるためにチタンクラッド鋼で保護されている紋別のオホーツクタワー（コンクリート製）の肉厚調査や外観調査といった劣化調査を実施した。さらに、昨年度開発したすべり摩耗試験装置を用いた鋼材（SS）の摩耗・腐食試験を実施した。

最後に、津波来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、昨年度実施した海氷の衝突実験の解析（海氷以外にも、木材や鋼材の他材料などを含む）、および、種々の形状・物性の人工海氷を用いた海氷衝撃力に関する中規模実験を実施した（実施のみ、一部の解析は来年度）。昨年度開発した個別要素法（2次元）により、衝突速度等種々の条件での海氷の衝突シミュレーションを実施し、津波来襲時の被害予測あるいは重要構造物の防御および設計に資する実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築するための条件を整備した。

2. 流水観測

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 21 年 12 月 17 日に無事に設置し、平成 22 年 3 月 19 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。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水データを回収・整理解析した。昨年度（2009 年）の流水勢力は比較的弱く、接岸も例年よりも大幅に遅れ、接岸の期間も短かった。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, ③～⑥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

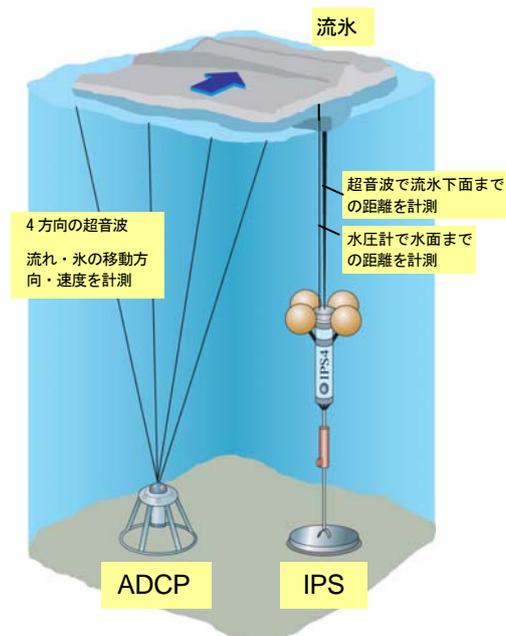


図-2.1 ADCP と IPS による流水観測のイメージ

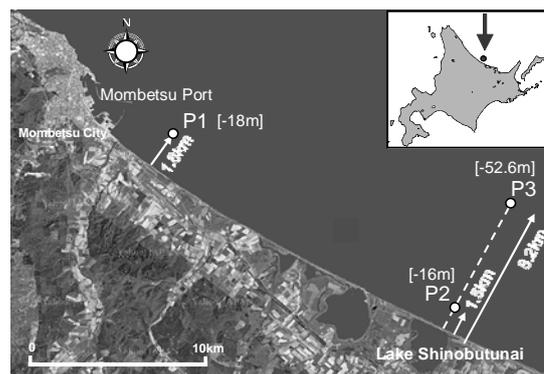


図-2.2 過年度も含めた観測地点（2009 年は P3）

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
⑥	2009 年	2/21-2/25	P3

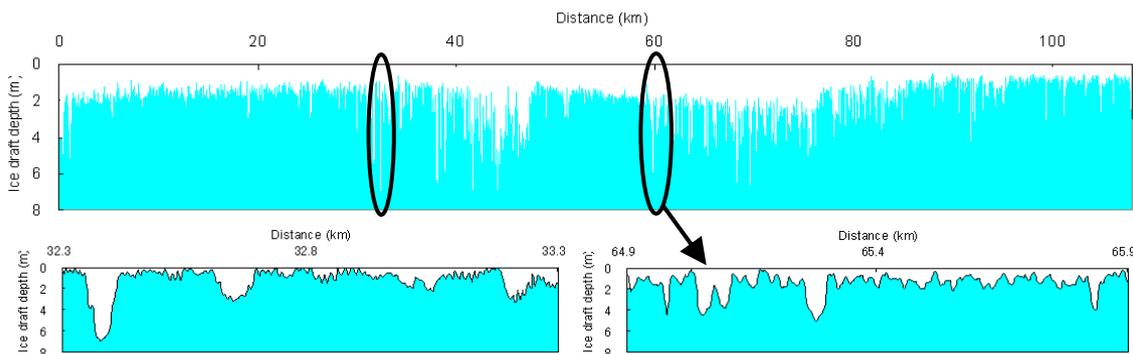


図-2.3 流水下面形状の一部拡大例 (Feb. 21 and 25, 2009)

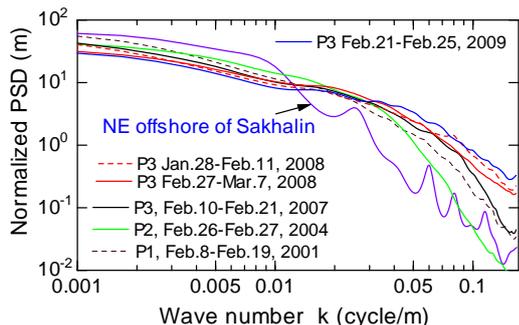


図-2.4 3つの地点P1, P2, P3で得られた代表正規化スペクトルの比較

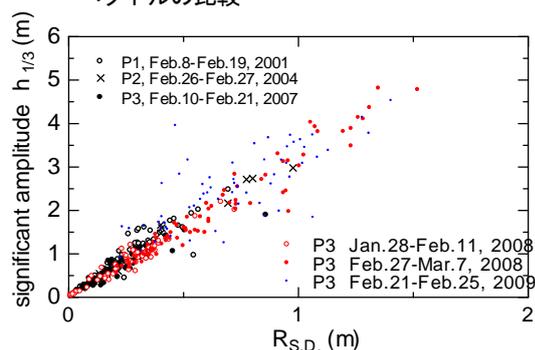


図-2.5 各局所定常区間における流水喫水の標準偏差 $R_{s,D}$ と有義振幅 $h_{1/3}$ との関係

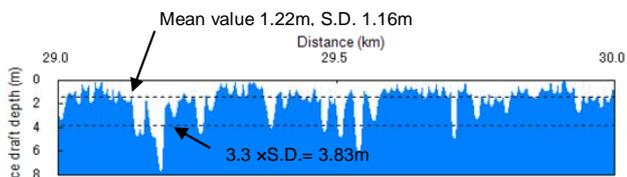


図-2.6 局所定常区間における流水下面(凹凸)形状例と、凹凸の代表高さの表し方(平均値および有義振幅)

る時間発展的な違いについて考察できる。さらに、昨年度に続き、直感的な凹凸の大きさを表す簡易手法について検討した。

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のデータを用いて、空間データに変換したものをを用いた。結果を下記に要約する。

■ 風変動と流水の漂流速度の変動とは非常によい相

関があり、その相互相関が0.7であった。また海流の表層部6mでは流水の影響を受けてほぼ流水の漂流に追従し、流水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うけ、流水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、流水期の方が大きい事が推察された。また、密接度が低いほど、風と流水の動きの相関性が高いと考えられた。流水の動きは、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。これらの傾向は過去の調査結果と同様であった。

- 流水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-2.3)。
- 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。つまり、過去の流水観測地点の相違も考慮に入れると、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(図

5.2 海水の出現特性と構造物等への作用に関する研究

-2.5). 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-2.6).

3. アイスブーム型海氷制御施設の設計法に関する研究—上流側の平面地形(水路形状)がアイスブーム型海氷制御構造物への伝達氷荷重に及ぼす影響などの検討—

3.1 これまでの研究経緯および本年度の研究目的

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可能性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。

昨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。本年度では、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。

3.2 実験方法および条件の概要

基本的な実験方法については、昨年度と同様であり、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ブームでトラップさせた(模型縮尺は1/100~1/150)。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。図-3.1,3.2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、φ3cmおよびφ3cm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-3.2に示す。

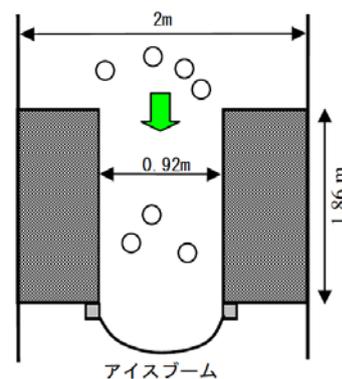


図-3.1 急縮水路実験の概要図

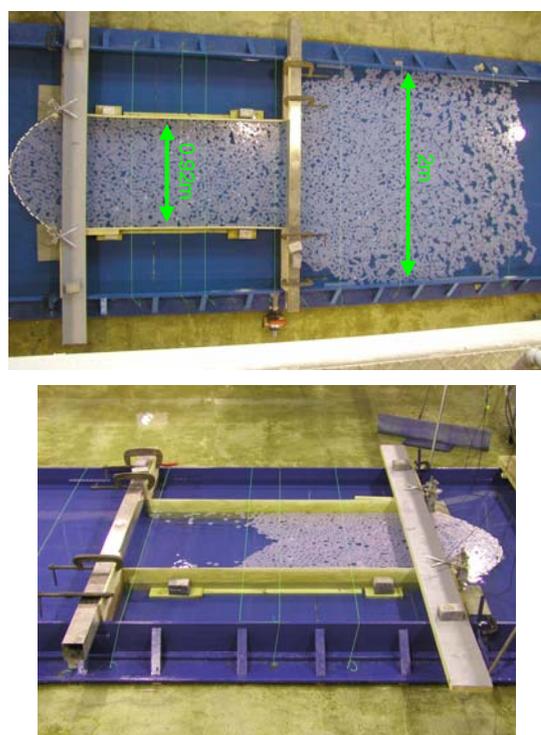


図-3.2 急縮水路実験での様子

3.3 主な実験結果

- 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-3.3）。

- ○型と□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□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、□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

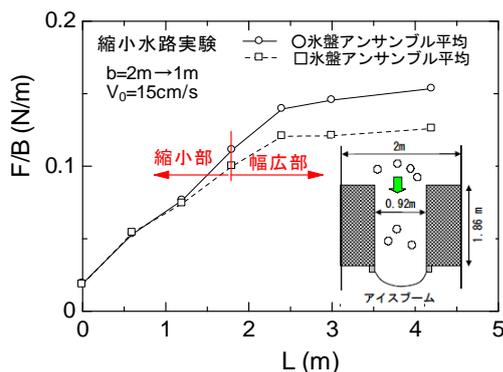


図-3.3 氷群被覆長にともなうアイスブームに作用する荷重（単位幅あたり）の推移 [○型 3cm 氷、□型 3cm の各アンサンブル平均]（各被覆長における平均値）

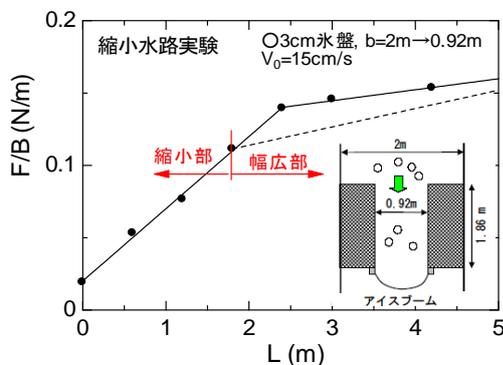
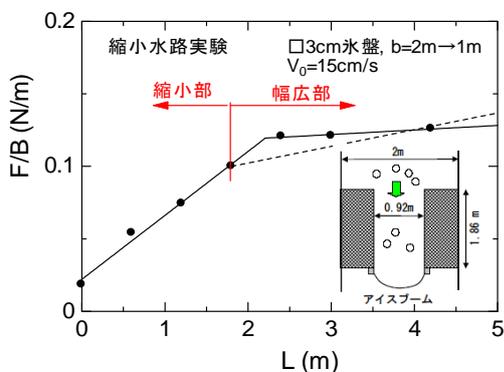


図-3.4 縮小部より上流側における氷群被覆長の増加にともなう実測値と縮小部における実測値の傾向と流速変化分（減少）から推測した予測値との比較
上図：○3cm 氷、下図：□3cm 氷

担が○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-3.4）。

- 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-3.5 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（その分両側壁面への分担率増大）ような骨格形成となっていること、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

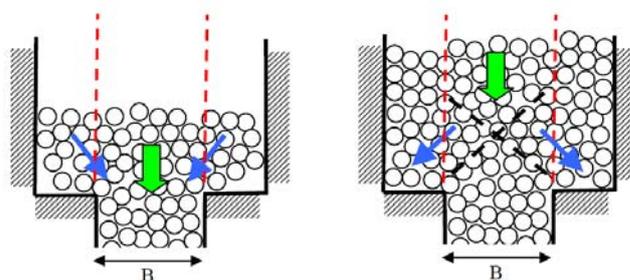


図-3.5 断面変化部より上流側に氷群が堆積した場合の壁面への荷重伝達のモデル

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）

さ、形状にも依存する。

- 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、過年度の研究成果である、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。

4. 海氷による沿岸構造物の摩耗に関する研究

4.1 これまでの研究経緯および本年度の研究目的

本研究は昨年度から着手した。昨年度では、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。

本年度では、昨年度の研究で得られた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とした。材料損耗は、流氷による接触が主な要因であると考え、まず、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となる。本年度では、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。サロマ湖第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）¹⁾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の可能性について検討した。また、現地調査として、流氷の作用を強く受けるためにチタンクラッド鋼で保護されている紋別のオホーツクタワー（コンクリート製）の肉厚調査や外観調査といった劣化調査を実施した。さらに、昨年度開発したすべり摩耗試験装置を用いた鋼材（SS）の摩耗・腐食試験を実施した。

4.2 流氷による構造物への接触圧力の検討

4.2.1 研究方法

構造物と氷群との干渉のシミュレーションに、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4.1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)²⁾の方法を用いて推定した。他方、河合ら(2010)¹⁾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(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。

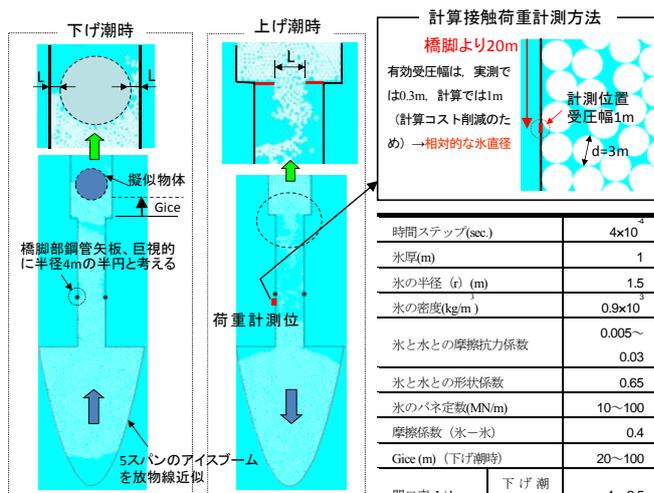


図-4.1 主な計算条件と境界条件の設定

4.2.2 主要な結論

- 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4.2,4.3）。
- 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

用する機会が多い、事などを本計算結果から説明

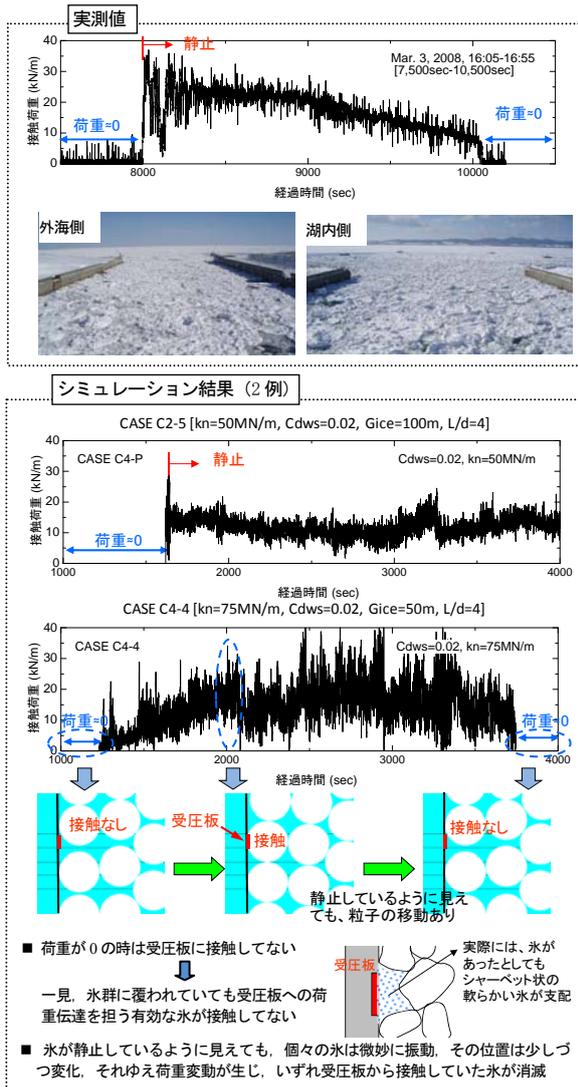


図-4.2 接触荷重の実測値と計算値(2例)との比較例

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

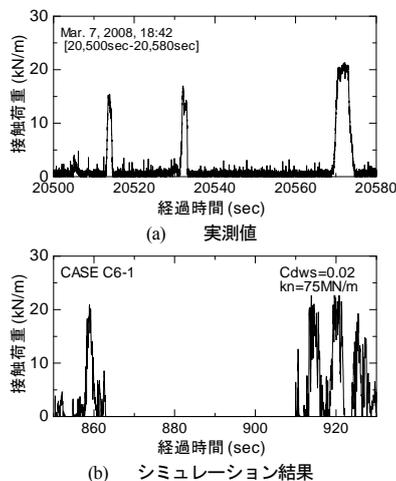


図-4.3 比較的短い時間(氷群移動状態)での接触荷重の実測値と計算値との比較例

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

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-4.2 参照)。

- 荷重は正負に振動する場合が見られたが、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($Cdws$)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。
- 昨年度の研究においても、本計算方法により、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)³⁾も良好に再現した。これらの結果も考慮すると、本計算方法は、構造物劣化を推定するために重要な流氷群の挙動と接触圧力の解析ツールの一つとして有効であることが明らかにされた。

4.3 すべり摩耗試験装置を用いた鋼材(SS)の摩耗・腐食試験

4.3.1 実験方法

用いた試験装置は、昨年度の検討で本研究目的に最も適していると判断された滑動式(ブロックオンプレート)を採用した(図-4.4)。具体的には、すでに実績がある Saeki et al.(1986)⁴⁾の試験装置を改良したものである。

すべての試験は温度制御できる低温室で実施した。

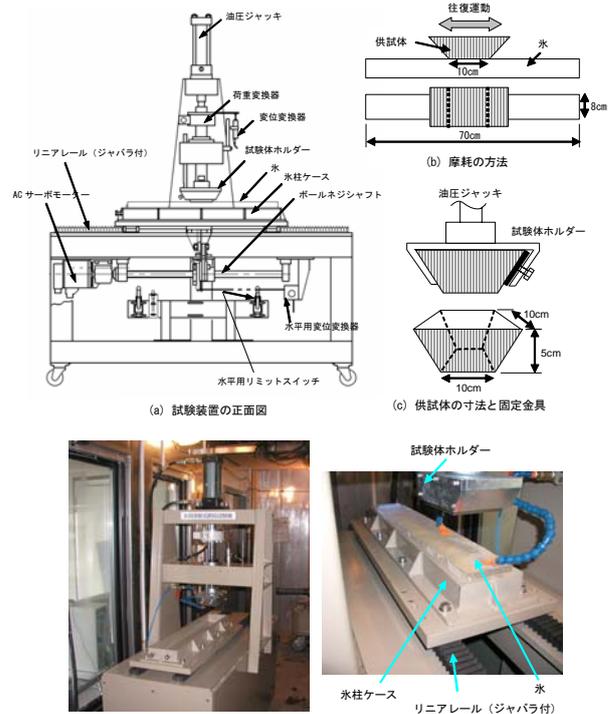


図-4.4 滑動式摩耗試験機の概要図

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（ストローク 30cm）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。用いた海氷は、過年度の研究でも使用実績があり、実物の海氷構造を概ね再現できる人工海氷を用いた。

主な実験条件を表-4.1 に示す。時間の制約上、多くの実験は実施できないため、まず氷温（雰囲気温度）を-10℃に、移動速度を 0.06m/s と固定して行った。前者の理由は、氷盤移動の活発な融解期の氷温を採用するのが合理的と考え、ボスニア湾、北極海、オホーツク海北部では、平均氷温-10℃、北海道オホーツク海沿岸では-4～-5℃となるが、氷温が小さいほど氷の強度は上昇するために摩耗量が多くなると考え、危険側に-10℃とした。後者の理由は、佐伯等⁴⁾の一連の実験から、①相対速度がおおよそ 0.05m/s 以上では単位摩擦距離あたりの摩耗量が相対速度に依存しないこと、②氷の移動速度が小さい場合には移動量も小さい、事を踏まえ、相対速度は 0.05m/s 程度で行うのが最も合理的であるとされていることから、それよりやや大きい 0.06m/s で実施した。本実験で用いた試験体の材質は普通炭素鋼(SS)である。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¹⁾によれば、大きくても本実験条件で設定した標準的条件（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。最大摩擦距離はおおよそ 50km としたが、

表-4.1 主な実験条件

ケース	SS1	SS2	SS3-1	SS3-2	SS4	SS5
試験体の材質	SS	SS	SS	SS	SS	SS
氷温 (°C)	-10	-10	-10	-10	-10	-10
接触圧力(MPa)	0.12	0.35	0.60	0.67	1.14	1.62
移動速度(m/s)	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
最大摩耗距離(km)	59.7	53.8	53.4	124.6	49.4	26.7

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。

4.3.2 主要な結論

- すべての条件において、損耗量は摩擦距離にほぼ直線的に比例して増大する傾向にあった（図-4.5）。金属材料同士の摩擦のアナロジーからは、極めてシビア・マイルド摩耗遷移が生じやすいことを意味しており、本実験における材料損耗が摩擦・摩耗によるものが支配的とした場合には、その遷移し易い条件である「pv 値（見かけ接触圧力と摩擦速度の積）が小さく、摩擦する 2 固体のうち少なくとも一方が遷移金属を含む」場合に対応している。
- 摩耗（損耗）量－摩擦距離の直線勾配である摩耗（損耗）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-4.6）。多くの金属材料間の摩耗で従うとされている「損耗量が圧力に正比例する」という Holm の式は、ある圧力以下の範囲内で成り立ち、ある圧力以上では、一定となる事が推察された。

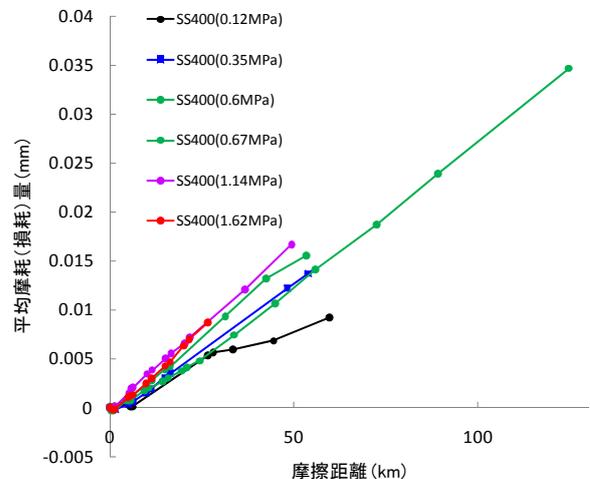


図-4.5 摩擦距離と平均摩耗（損耗）量との関係

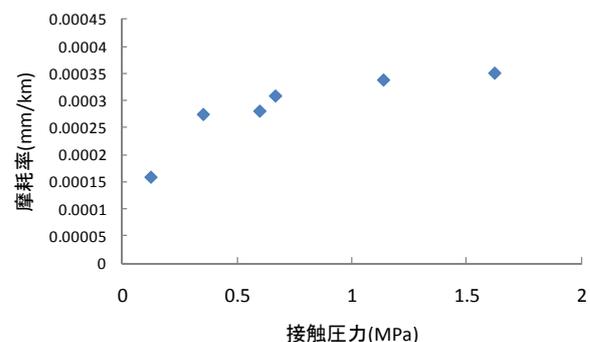


図-4.6 摩耗率と接触圧力との関係

- しかし、摩擦試験中に鋼材が腐食し、その錆が氷に付着する場合が見られ、氷が正味鋼材を摩耗（凝着）させるより、腐食による損耗や、錆粒子の介在によるアブレシブ摩耗によるものの方が大きい可能性がある事が推察された。
- したがって、実海域において、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あるため、今後、これを明らかにする実験を行う必要がある。

4.4 オホーツクタワーチタンクラッド鋼板劣化調査

4.4.1 調査概要

図-4.7 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うけるため、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。



図-4.7 紋別市のオホーツクタワー

(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-4.8）。

4.4.2 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-4.9）。

したがって、チタンの材料強度が比較的高い事の他に、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。

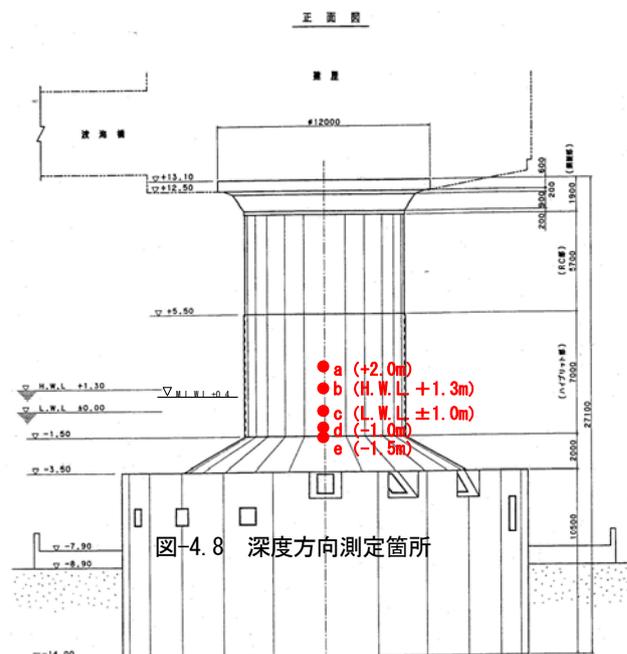


図-4.9 チタンクラッド鋼の外観

5. 津波来襲時の作用氷力に関する研究

5.1 これまでの研究経緯および本年度の研究目的

H19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、自由落下式による海氷の衝撃実験を実施した。

H20年度では、H19年度実施した衝突実験の解析を実施した。この実験では主に氷温が及ぼす衝撃力への影響について調べることを目的として実施した。主な結果としては、構造物規模に対して氷塊が相対的に大きい場合、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、主に海水の破壊・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。また、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)⁵⁾に基づく引張応力に関連づ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。また、引き続き、衝撃実験を実施し、人工海氷以外についても、木材や鋼材といった他材料に着目した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。さらに、個別要素法を用いた衝突時の海氷の破壊挙動の数値計算法についても検討し、その妥当性を示した。

本年度においては、まず昨年度実施した衝突実験を解析するとともに、引き続き新たな条件で衝撃実験を実施した。今回は、比較的剛な杭構造物への氷の衝突力特性（既往の研究では比較的フレキシブルな構造物を用いてその応答特性も考慮していた）、氷の塩分濃度や氷の形状が衝突力に与える影響やその衝突力特性などに着目した。また昨年度開発した個別要素法による衝突シミュレーション手法の妥当性を再度検証するとともに、実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築するための条件を整備することを目的に、衝突速度等種々の条件での海氷の衝突シミュレーションを実施した。

5.2 実験方法

基本的な実験方法は既往と同じであるが、再度概説しておく。実験は自由落下方式により、人工海氷を、落下高を変えて ($h=0.001\text{m}\sim 1.5\text{m}$)、円断面杭構造物（梁）へ衝突させることにより行った（図-5.1 参照）。

人工海氷は低温室にて 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（氷の寸法： $B=0.3\text{-}0.6\text{m}$, $L=0.3\text{-}1.2\text{m}$ ）厚さ t を約 0.15m と一定）。また氷温を目標値 -10°C とした。杭は両端支持の SS 材の丸棒（直径 d : 60mm, 長さ: 0.3m, 固有周期: $5\times 10^{-4}\text{sec}$ ）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）。なお、上述のように使用した杭は、昨年度より幾分剛なものとした。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。

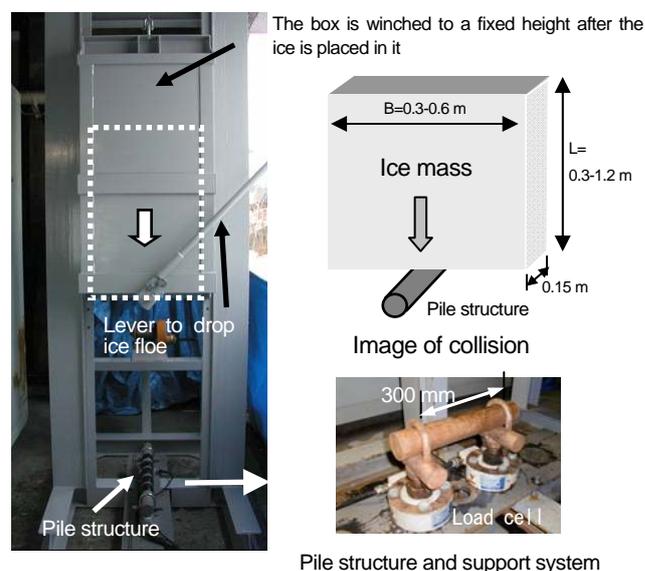


図-5.1 自由落下方式による海氷の衝撃実験装置

また、氷の寸法が $B=L=0.6\text{m}$ の条件において、氷の塩分濃度が衝突力に与える影響を調べた。このため、人工海氷は、0‰(淡水), 5‰, 10‰, 25‰の異なる塩分濃度の水を凍らせることにより作成した。さらに、図-5.2 に示すように、氷の衝突面が衝突方向に対して傾斜した場合についての実験（水平面より 15deg., 30deg. 傾斜）も実施した。

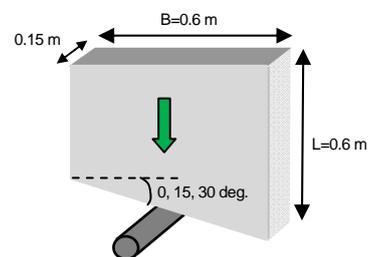


図-5.2 海氷形状を変化させた場合のモデル図

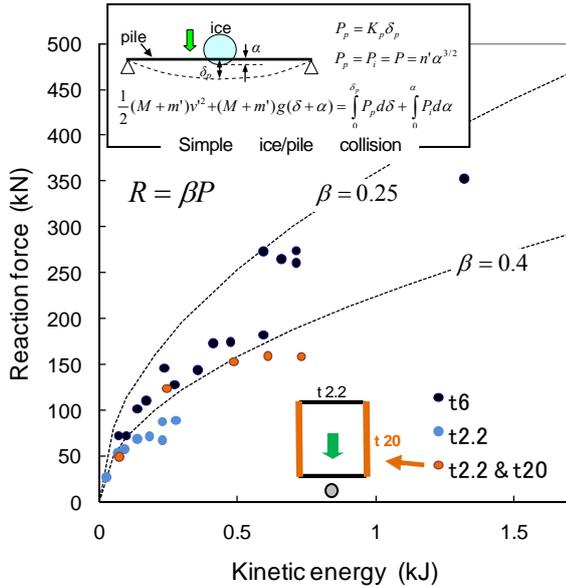
5.3 主要な結論

5.3.1 昨年度実施した実験について

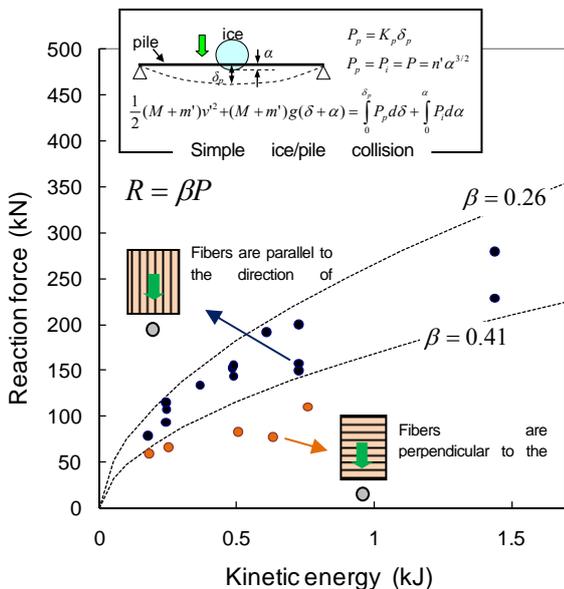
- 人工海氷の質量や寸法・形状を同一となるよう調

整した木材(無垢のカラマツ)と鋼製材料 (SS400, t2.2, t6, t20) の衝突実験結果を解析した。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(支点反力)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。

- 鋼製材料の衝突力(支点反力)は、板厚(塑性変形の程度)によって異なり、運動エネルギーが増大するにつれてその差が顕著に現れ、特に板厚が薄



(a) 鋼製材料 (SS400, t2.2, t6, t20)



(b) 木材 (無垢のカラマツ)

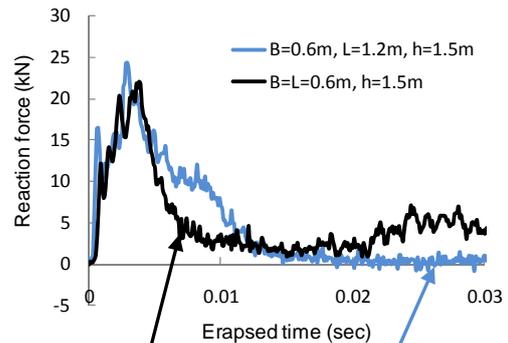
図-5.3 海氷以外の衝突力特性(波線はエネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる予測値、 β は補正係数)(昨年度実施分)(D=0.06m, B=0.6m, L=0.3-1.2m, h=0.36-1.5m)

い場合、運動エネルギーに依存しないある一定値に近づく事が予想された(図-5.3(a))。

- 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、およそ半分程度となることが分かった(図-5.3(b))。
- 本実験条件における鋼材と木材との衝突力の大きさの比較ではやや前者の方が大きくなった。
- 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っても、実測の衝突力の傾向をよく説明できた(図-5.3(a),(b))。

5.3.2 今年度実施した実験結果について

- 衝突力(支点反力)は、衝突後 $2-3 \times 10^{-3}$ sec 程度で荷重がピークを迎えた。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、海氷上端部までクラックが及んで海氷が二つに破壊・分離した。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、海氷上端部まで及ばず、途中で分岐して側部に到達した(図-5.4)。
- 合支点反力のピーク値発生時刻は運動エネルギーによらず、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20と推定され、正味の衝撃力よりもその応答値(反力)の



(a) B=L=0.6m (b) B=0.6m, L=1.2m

図-5.4 支点反力波形及び破壊モード

方がやや大きな値であることが推察された。

- 本実験の場合、衝突力（支点反力） R は、およそ 2m/s 以上の衝突速度で運動エネルギー E の大きさにかかわらず一定値となった。加えて、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より 1 オーダー小さくなるほか、前述の鋼材や木材にくらべて 1 オーダー小さな値となった（図-5.5）。

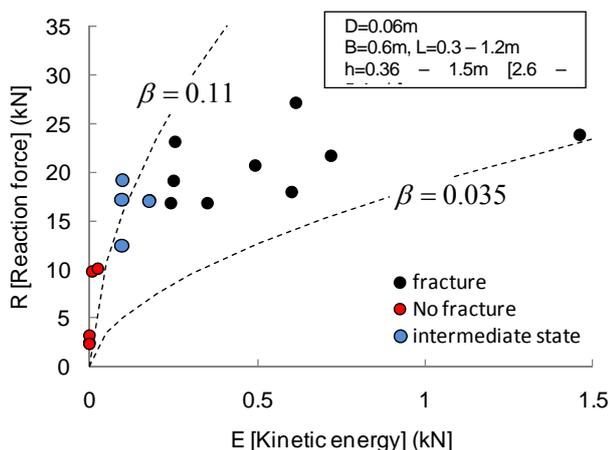


図-5.5 海水の衝突力特性（波線はエネルギー保存則と材料間の接触にヘルツの接触理論を適用した簡易モデルによる予測値， β は補正係数）

- 氷が構造物に衝突して脆性破壊を生じ、その破壊氷片が自由に運動・飛散する場合（特に構造物規模に比べ氷塊の規模が大きい場合）には、衝突力は小さくなり、運動エネルギーがあるレベルに達すると一定値になる事が推察された。
- 氷が構造物に及ぼす力積(I)と衝突前の運動量(MV)との関係についても考察した結果、特に氷が脆性破壊を生じる場合、運動量の増大とともに力積も増大するが、ある一定値に達する傾向にあった。同一の運動量では、破壊を生じる場合の力積は、破壊を生じない場合より非常に小さくなった。また、破壊を生じない場合、 I/MV は 1 に近くなった（実測では 1 を超えているが計測誤差があったと思われる）（図-5.6）。
- 一連の結果から、次式に示す運動量保存則からも推察されるように、

$$I = \int P dt = \sum m_i \mathbf{V}'_i - MV$$

m_i, \mathbf{V}'_i は衝突後の各破壊氷片の質量と速度ベクトル
氷が衝突後破壊して自由に運動するかどうかは衝突力と力積を推定する上で重要なファクターとなる事が推察された。

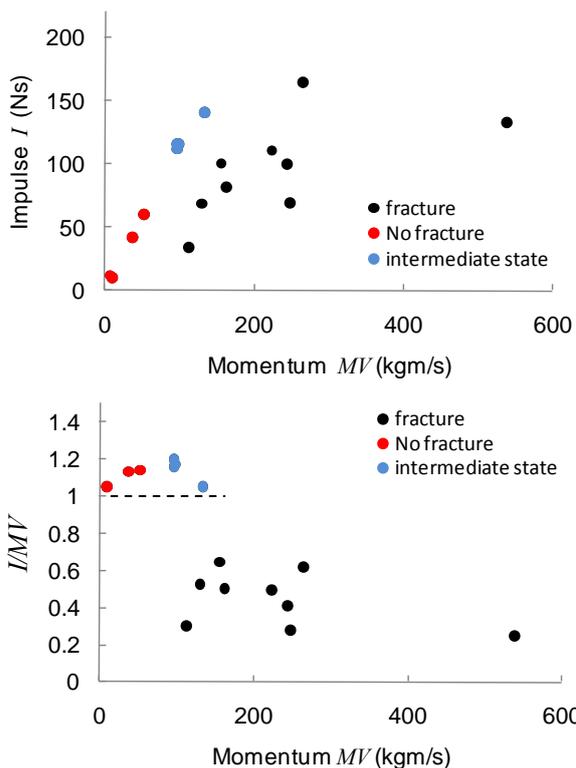


図-5.6 力積(I)と衝突直前の運動量との関係

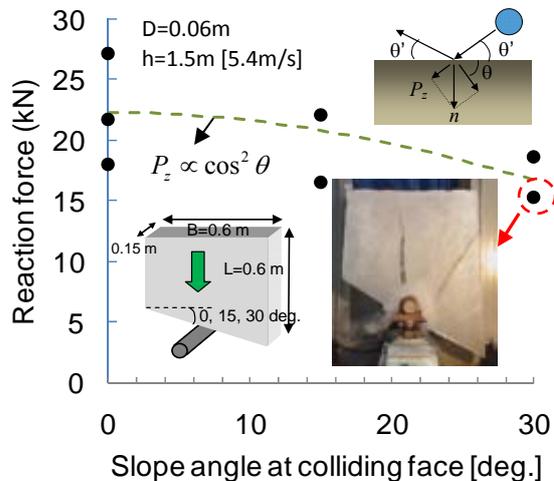


図-5.7 氷の衝突面が衝突方向に対して傾斜した場合の衝突力特性

- 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-5.7）。

5.2 海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究

- 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ことが推察された。

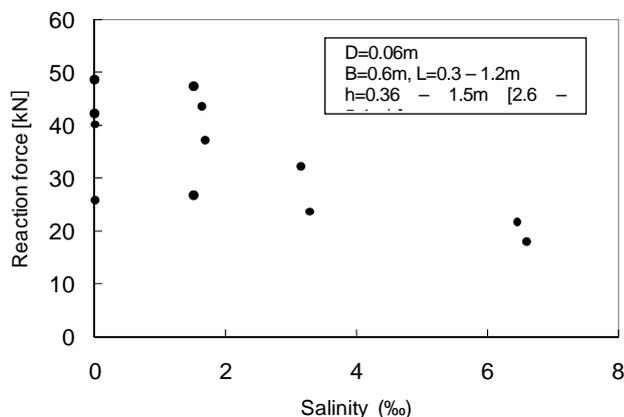


図-5.8 氷の塩分濃度が衝突力に与える影響

5.3.3 海氷の衝突シミュレーションについて

- 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）の条件変化による推移・傾向特性、つまり、衝突面が衝突方向に対して傾斜した場合や、速度、質量による衝突力の推

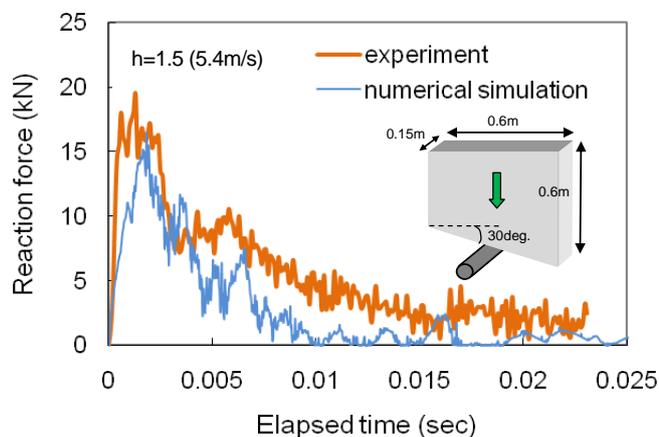


図-5.9 支点反力波形及び破壊モードの実測とシミュレーションとの比較例（氷の衝突面が衝突方向に対して30deg. 傾斜した場合）

移・傾向特性を良好に再現した（図-5.10-5.11）。

- 津波来襲時の被害予測あるいは重要構造物の防御および設計に資する実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築することを目的に、衝突速度等種々の条件での海氷の衝突シミュレーションを実施し、実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築するための環境を整備した(図-5.11)。

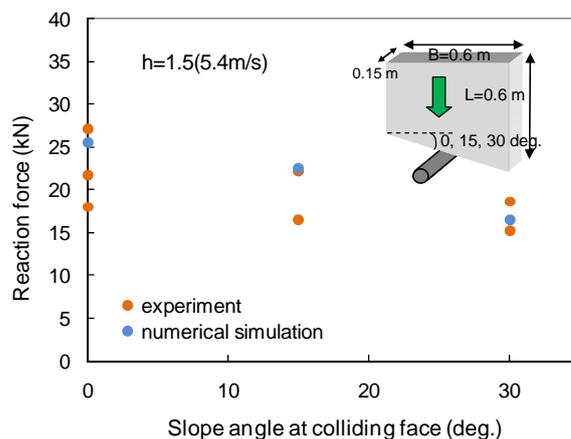


図-5.10 氷の衝突面が衝突方向に対して傾斜した場合の衝突力の計算値と実測値の比較

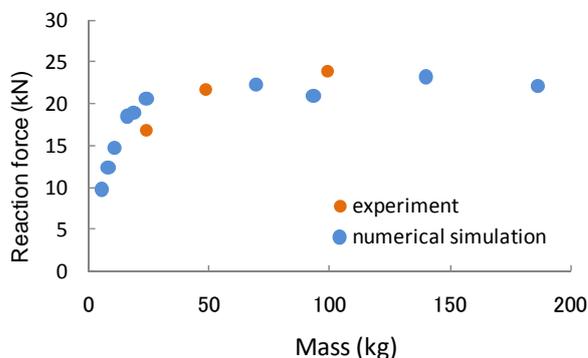
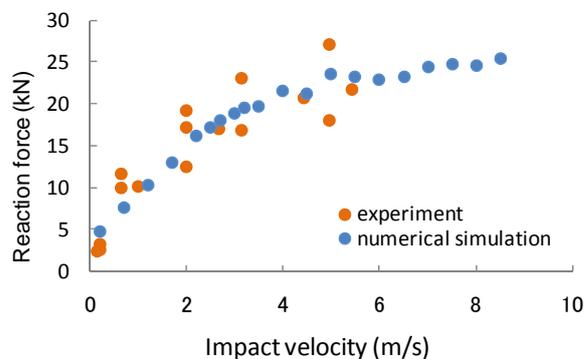


図-5.11 速度および質量をパラメータとした時の衝突力の変化のシミュレーションおよび実測値との比

6. まとめ

■ オホーツク海における流氷観測より

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。

■ 流氷制御施設（アイスブーム）に関する研究より

上流側の平面地形（水路形状）がアイスブーム型海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。断面変化部（急縮部）近傍では荷重は増大するが、水路幅程度の被覆長以上であれば、構造物に作用する荷重は実質減少すると考えられた。したがって、横断方向（海氷の流入方向に直角）に突き出ているような自然地形や既設構造物等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ることは有意義であると考えられた。

■ 海氷による沿岸構造物の摩耗に関する研究より

材料損耗にとって重要と考えられる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。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。また、その実測波形特性なども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。

また、すべり摩耗試験装置を用いた鋼材（SS）の摩耗・腐食試験を実施した。すべての条件において、損耗量は摩擦距離にほぼ直線的に比例して増大する傾向にあった。摩耗（損耗）量－摩擦距離の直線勾配である摩耗（損耗）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。多くの金属材料間の摩耗で従うとされている損耗量が圧力に正比例するという Holm の式は、ある圧力以下の範囲内で成り立ち、ある圧力以上では、一定となる事が推察された。しかし、摩擦試験中に鋼材が腐食し、その錆が氷に付着する場合は見られ、氷が正味鋼材を摩耗（凝着）させるより、腐食による損耗や、錆粒子の介在によるアブレシブ摩耗によるものの方が大きい可能性がある事が推察された。したがって、実海域において、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「腐食摩耗」によるものである可能性があるため、今後、これを明らかにする実験を行う必要があることを確認した。

さらに現地調査として、流氷の作用を強く受けるためにチタンクラッド鋼で保護されている紋別のオホーツクタワー（コンクリート製）の肉厚調査や外観調査といった劣化調査を実施した。建設後 15 年経過しているが、損耗量はほぼゼロであり、外観状況も極めて良好であった。ゆえに、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考えられた。上述のように、鋼材の損耗は主に「腐食摩耗」によるものの可能性が、この結果からも推察された。

■ 津波来襲時の海氷作用力推定法に関する研究より

まず昨年度実施した、人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）と鋼製材料の衝突実験結果を解析した。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（支点反力）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、およそ半分程度となることが分かった。

本年度、新たな条件で実施した衝撃実験結果から、氷が構造物に衝突して脆性破壊を生じ、その破壊氷片が自由に運動・飛散する場合（特に構造物規模に比べ氷塊の規模が大きい場合）には、衝突力や力積は小さくなり、運動エネルギーがあるレベルに達すると一定値になる事が推察された。また、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し、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。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%以下では一定となることが推察された。

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、衝突面が衝突方向に対して傾斜した場合や、速度、質量による衝突力の推移・傾向特性を良好に再現した。また、実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築することを目的に、衝突速度等種々の条件での海氷の衝突シミ

5.2 海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究

ュレーションを実施し、実用的な氷塊衝突力の簡易推定式を構築するための環境を整備した。

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 (投稿中), Vol.26, 2010.
- 2) 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氷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.
- 3) 関口浩二, 遠山哲次郎, 荒田崇, 清水敏晶 : サロマ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) 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
- 5) 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.

We made the experiments on interaction between sea ice floes and ice booms, which were especially focused on the effect of the shapes of water channel or more complicated boundary conditions on the ice load acting on the ice booms. Ice load acting on the ice boom becomes small in those cases compared to a simple condition such as a strait channel, and we gave an important notice for design.

We also examined problems on the abrasion of coastal structures by sea ice. By using DEM, we developed the estimation method of ice floe behaviors adjacent to structures and ice pressure acting on the structures, which are thought to be one of important factors for the abrasion. We confirmed the calculation method would be appropriate by making a comparison with measured values. According to the wear tests between sea ice and metal material (SS) by a form of “*block on plate*”, we found that the abrasion of metal material would be based on “corrosion” rather than “frictional wear” such as “abrasive wear” or “adhesive wear”. This could also be confirmed by our field observation of the “Okhotsk Tower” with which sea ice interacts in every winter season, where the concrete body around sea water level has been coated with titanium-clad plates.

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, including timbers and steel along with sea ice, considering tsunami-related debris such as timber, containers and vessels. When ice causes brittle failure/splitting, and fragments move freely after impact with a structure (especially when the ice floe is large compared to the structure), the impact load or the impulse was small in comparison to cases without failure, and was presumed to become a constant value regardless of the level of the kinetic energy or the momentum. While we developed its numerical simulation method using the discrete element method [DEM] and confirmed its validity, we prepared for the environment to develop a simple formula for the estimation of the ice impact force.

Key words : *Okhotsk sea, Sea ice, Ice force, Ice boom, Tsunami, DEM, Impact, Abrasion, Wear*