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 を検証することを目的とした現地観測とその取得データの解析を行い、その有望性を確認した。さらに、様々な 条件下における流氷制御施設(アイスブーム)に関する水理模型実験を実施し、本年度では特にアイスアーチン グ・ジャミングの発生機構を考慮した流氷群の施設に及ぼす荷重伝達特性を明らかにした。最後に、津波来襲時 の海氷作用力推定法に関する研究の一環として、本年度では、直立護岸を対象として津波により遡上する氷盤に 関する基礎的な模型実験を実施して漂流挙動を把握した。

キーワード:海氷、流氷、超音波、オホーツク海、アイスブーム

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。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



図-1 アイスブームのイメージ (サロマ湖口)

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) との比較を行った。

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。延長が長い場合には中間部に複数の固 定杭やアンカーを設ける。アイスブームは、北米におい て河川を流下する氷を制御する目的で採用されているほ か、我が国でも、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に、 作用氷力を精度良く推定されることが求められる。しか しながら非連続体である流氷群の挙動やそれらが構造物 に作用する力は非常に複雑であり、未だその推定法が確 立されていない。本年度では、昨年度に引き続き、様々 な条件下における流氷制御施設(アイスブーム)への氷 群の集積状況、施設に及ぼす氷力の履歴・荷重伝達特性 (主にアイスアーチング・ジャミングの発生機構などを

最後に、津波来襲時の海氷作用力推定法に関する研究 の一環として、本年度では、直立護岸を対象として津波 により遡上する氷盤に関する基礎的な模型実験を実施し て漂流挙動を把握した。

2. 流氷観測

2.1 観測方法

観測は、昨年度と同様、図-2 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-3 に示す 地点(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、は平成 19 年 12 月 12 日に無事に設置 し、平成 19 年 3 月 16 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18年12月23日に設置し、3月 9 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。しかし、流氷勢力は弱く、まと まった流氷が来襲したのは限られた期間のみであった。 さらに密接度が比較的低い事から水面が露出し、ノイズ と思われるものが多かった。したがって有意なデータの 解析という観点から、ここでは、比較的流氷喫水深が大 きく、ノイズも少ない2/10~2/21のデータを解析した結 果を報告した。まず例年のように 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。
- 流氷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。

- 過去の結果も含めた代表正規化スペクトル¹(局所定 常ARモデルにより推定された各定常区間の正規化スペ クトルのアンサンブル平均)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-4、5)。
- 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



図-2 流氷観測のイメージ



図-3 IPS と ADCP の設置位置

3.4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-6)。実際、ある定常区間に おける流氷下面形状において、その標準偏差に3.4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-4 過年度も含めた観測地点(2007年はP3)



図-5 流氷下面形状の正規化スペクトル(P3)の推定と過年 度の結果(2001 年→P1, 2004 年→P2)との比較



図-6 各局所定常区間における海氷の有義振幅と標準 偏差の関係

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

昨年度では、人工海氷を用いた小規模な水槽実験によ り、海象計の流氷観測への適用に有望性があることを確 認した。本年度では、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、昨年度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、昨年度 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うことにより、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かどうか の基礎的な検討を試みた。

3.2 解析結果

2/13 と 2/28 に紋別観測局舎へ赴き、流氷下面からの エコー(主に超音波信号を電気的信号に 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)を測定するとともに、別途2月分の生データ(常時、 WD-1100 型データ演算装置及び RD-500A 収録装置の内蔵 ハードディスクに内蔵される)を回収・整理することがで きた。本データの分析は来年度にて実施し、報告する。

昨年度得られた超音波信号、海象計データの解析結果 について、得られた主な結論を以下に示す。

- 流氷のない期間でも超音波水深と圧力水深の差が見られた。従って、音速補正のために同一海域の水温データを入手して温度補正を行う必要があることが分かった(波の測定の場合は、相対的な水面変動のみでよいので温度補正はあまり必要ない)。
- 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-7)。
- 海象計(USW)と IPS の流氷喫水深(あるいは凸部の 大きさ)の時系列データの比較を定量的に行った。 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。しかし、両者の波形のパタ ーンは比較的類似している、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(図-8)、同じ統計的性質がある ことを明らかにした(図-9、10)。よって海象計から 流氷喫水深を概略推定できる可能性を確認した。











4. アイスブーム型海氷制御施設の設計法に関する研究 ーアイスブームと流氷群との干渉模型実験-

4.1 実験方法および実験条件の概要

4.1.1 実験方法

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。昨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。 本年度においては、おもに、アーチングもしくはジャミ ング形成に関する実験を実施した。これらは、上流側の 平面地形や施設配置 (ブームを係留する支柱間隔等)、流 れの状態、氷群の形状や大きさ等によっては、氷荷重を 減ずるような氷群の骨格形成や閉塞が生じる状態を意味

する。例えば、支柱間で氷のアーチが形成、あるいはジ ャミングなどにより、アイスブームに作用する荷重が軽 減する場合がある。実用的観点からは、この場合には設 計荷重を大きく減じることができる。基本的な実験方法 については昨年度とほぼ同様であるが、今一度簡単に述 べる。図-11 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ブームでトラップさせた(模型縮 尺は 1/100~1/150)。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た。模型氷の投入地点はア 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(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 被覆段階での長さに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-11 アイスブームの実験装置

4.1.2 実験条件

上流側の平面地形や施設配置(ブームを係留する支柱間 隔等)、流れの状態、氷群の形状や大きさ等によっては、 氷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。例えば、支柱間で氷のアーチが形成、あるいはジャ ミングなどにより、アイスブームに作用する荷重が軽減 する場合がある。実用的観点からは、この場合には設計 荷重を大きく減じることができる。本年度では、まず、 流速、氷群の形状や大きさ、そして支柱間隔を変えて実 験することにより、目標流速は 0.05~0.15m/s(表面流 速)、a=3~10cm (氷の代表長)、b=12~92cm (支柱間隔)、 また、氷の形状については、図-12 に示すように、円形、 矩形、および混合タイプについて実施し、アーチ・ジャ ミング形成条件を概略的に検討した。



短い 矩形型:辺長2.7cm,厚さ5mm O3cmの面積と等しくなるように辺長を設定 (e) □10cm

矩形型:辺長10cm,厚さ5mm

4.2 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

粒状体物質などの非連続体のシミュレーションに適し ている個別要素法を応用した数値計算手法の基礎的な開 発を試み、模型実験による実験結果と比較し、その適応 可能性について検討した。

4.3 実験結果および解析結果

- ■アーチングもしくはジャミング形成(ブームに作用する氷荷重を減ずるような骨格形成)を表現する指標として、その形成に必要な距離(ここでは1mと仮定)以降の氷群被覆長にともなう荷重増加率、つまり、正規化された荷重(*pBV*²で除す、*V*;流速、*B*;荷重作用幅) ー氷群被覆長曲線の勾配(*Capp*)を提案した。
- ■その形成は、氷の代表長さaと支柱間隔b'との比a/b'、 氷の形状、流速(フルード数)に依存する。あるa/b'よ り、*Carch*が減少傾向にあり、アーチもしくはジャミング 形成に推移すること、また、○型より□型氷群の方が はるかにそれが形成しやすいことが分かった。図-13に 示すように、○型氷群では、およそa'/bが 0.3~0.4 より 大きくなると*Carch*が減少傾向にあり、0.6~0.8 の間で完 全にアーチもしくはジャミング形成が生じるのに対し、 □型氷群では、およそa'/b=0.2 程度で生じた。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

図-12 用いた氷群模型

たところ(図-14)、□型氷の配合率が25%と比較的□型 氷の割合が少なくてもCarch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。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、a/b'=0.2 程度でアーチもしくはジャミング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朝夕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。

■個別要素シミュレーションとの比較を行った。概ねシ ミュレーション結果は実験値の傾向(氷投入時におけ る水面動揺・波の影響を除いたと仮定して予測される 結果)を再現した(図-15)。 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上に 図-16 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。



図-13 a/b'をパラメータとした場合のアーチング/ジャミング 形成状態(複数の同一実験についてはそれらの平均値)[黒は〇 型氷群,赤は口型氷群を表す]



図-15 個別要素シミュレーション結果(カバー率10%)と実験値(カバー率6-24%)との比較例(連続流下)

5. 津波漂流物

5.1 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

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

チ/ジャミング形成状態 (O3cm, □2, 7cm)

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=2.5~3.0cm、T=6.0~9.0s に変化させて実施した。



5.2 氷盤の漂流挙動

図-17 は入射波高H=3.5cm、周期T=6.5s、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²⁾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 が軽いため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-18 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 Umean/Umean_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ともにほぼ同様の傾向であ った。図-19 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Umean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。



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の流氷観測への適用性 を検討した結果、水温による音速補正が必要であること を確認した。また、音速補正済の海象計(USW)と IPS の流 氷喫水深(あるいは凸部の大きさ)の時系列データの比 較を定量的に行った結果、両者の波形のパターンは比較 的類似しており、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、海象計から流氷喫水深 を概略推定できる可能性を確認した。

アイスブームと流氷群との干渉模型実験において、本 年度では、主に、狭窄部での氷のアイスアーチング、あ るいはジャミングの形成条件について調べた。その形成 は、氷の代表長さaと支柱間隔b'との比ab'、氷の形状、 流速(フルード数)に依存し、○型より□型氷群の方が はるかにそれが形成しやすいことが分かった。○型氷群 では、0.6~0.8 で完全にアーチもしくはジャミング形成 が生じるのに対し、□型氷群では、およそ a'b=0.2 程度 で生じた。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、a/b'=0.2 程度でアーチもしくはジ ャミング形成が生じると考えることができた。また、個 別要素法を応用した数値計算手法の基礎的な開発を試み、 模型実験による実験結果と比較し、その適応可能性につ いて検討した。

最後に、津波により遡上する氷盤に関する基礎的な模型実験を行った結果、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、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。

参考文献

- Kioka,S., Yamamoto,Y., Sakai,S.and Takeuchi,T.: Analysis of Ice Bottom Topography on Okhotsk Sea Coast of Hokkaido – Observation results in 2004, Proc. of the 18th IAHR International Symposium on Ice, Vol.1, pp.309-316, 2006.
- 2 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.

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 made the experiments on interaction between sea ice floes and ice booms. The mechanisms of ice arching and jamming formed at the nose of pile structures that moor ice booms were clarified.

Finally, as a result of the experiments on run-up of ice floes with Tsunami, we found the ice drift speed should be almost the same as the current velocity.

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