

冬季のオホーツク海における耐氷構造物の設計理念の現状と技術的課題

北海道開発局 港湾空港部 港湾行政課 本間 大輔

1. まえがき

近年、環境との調和を図る、あるいは新たな水産生物の成育環境を提供する目的で、高天端マウンドを付加した防波堤、衛生管理の必要性から清浄海水の取水施設が建設されつつある。しかし、冬季に流氷が来襲するオホーツク海沿岸においては、上記のような水深の浅い構造物、または、鋼構造形式（杭構造）のような比較的アスペクト比（構造物の幅と氷厚との比）が小さく、部材の剛性に依存するような構造物の場合には、流氷の及ぼす外力を考慮しなければならないと考えられる。本報告では、こうした氷力推定に最も基本的な設計条件のひとつである流氷の動きや喫水深についてオホーツク海沿岸部の実測データから検証するとともに、現状の耐氷構造物設計の概念や方法論、今後の氷海域での海洋構造物の設計に係わる技術的課題について論じる。

2. 耐氷構造物の設計概念と現状

2.1 主な氷荷重作用形態と被害事例

氷海域において耐氷構造物を建設する際に考慮すべき氷荷重のうち最も大きな力を構造物に及ぼし、比較的研究量も多いものは、氷の移動により構造物に作用する水平方向の氷荷重である。そのほか、低気圧に伴う海面の上昇とともに大量の氷盤が防波堤・護岸等を越える越氷や、喫水の大きな流氷による海底掘削などが考えられる。海外における流氷による被害事例としては、灯台の倒壊や海底パイプライン・ケーブルの破断、海岸侵食、遡上による道路の閉鎖、家屋損壊などが報告されている。一方、我が国における港湾・漁港・海岸保全施設の被害として認知されているものは、流氷の港湾・漁港内への侵入によって出漁に支障をきたしていることや、避難船・貨物船が入港できない等が報告されており、漁業被害や海上交通に与える影響が大きいのが特徴的である。その他にも前述した「越氷」によって、防波堤上のパイプラインやドルフィンの破損などのほか、1952年の十勝沖地震の際発生した津波による氷塊の遡上によって家屋損壊等の被害についても報告されている。

2.2 設計基準・理念と現状

1970年以降、極寒地における油・ガス田開発のニーズを背景に、極地開発技術の研究開発が行われてきた。しかしながら、現在においても様々な氷荷重形態に対応する設計指針を具体的に規定したものはない。また、実際の計画・設計にあたっては、ガイドラインの拡張や経験則に基づくものが多く、国際的にスタンダードな基準はないのが現状である。このような背景から、氷海域での万一の事故の甚大さを鑑み、信頼性理論に基づく経済性と安全性に配慮した設計思想が採用されつつあり、上記の導入に当たっては比較的正確な氷象条件に関する統計的情報を入手する必要がある。とくに、アイスリッジ（変形氷）と呼ばれる破壊氷片が山脈状に積み重なった氷塊は大規模化することが多く、その作用力は

支配荷重となる可能性があるにもかかわらず、その内部構造の複雑さ・規模の大きさから、それらの調査・研究例は少ない。我が国においては、アイスリッジなど変形氷の動き・厚さの観測とその分析についてはほとんど皆無であったが、近年になり研究機関等で先駆的に研究が進められている状況にある。

3. わが国における氷荷重を考慮した耐氷/防氷構造物の建造例

海岸保全施設などにみられる離岸堤や護岸などの場合、支配外力は通常考慮される波力のみで十分であると考えられている。事実、施工実績や経験的知見もこれを裏付けている。一方、海中に独立して設置される鋼構造形式のような比較的アスペクト比が小さい構造物の場合、氷荷重が構造設計における支配外力となる場合があり、我が国においても平成8年にオープンした紋別港のオホーツクタワー（図-1 参照）の設計時には氷荷重が考慮された。また、オホーツク海に面しているサロマ湖では、流氷の湖内への流入により、操業停止、養殖施設・漁船など多大な被害に悩まされ、昭和49年には大規模な養殖施設の破壊により22億円を超える被害にみまわれた。このような背景から、船舶航行の安全性の確保や、冬季の湖内の漁港の機能維持を目的とした流氷侵入防止施設（防氷堤）が整備され（図-2 参照）設計では、流氷制御時のワイヤーに作用する力が考慮されている。



図-1 オホーツクタワー

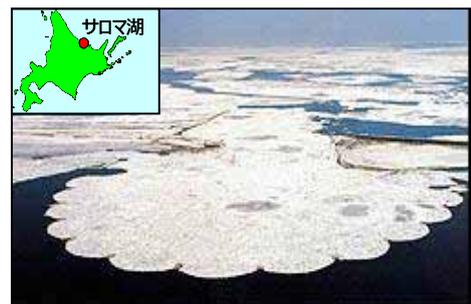


図-2 流氷防止施設（サロマ湖）

4. オホーツク海沿岸の流氷の観測

前述したように、耐氷設計や防氷技術・対策には、氷荷重を算定するための重要な入力情報となる流氷の移動特性や喫水深、断面形状など氷象条件を把握しておく必要がある。過去のデータから、この氷象現象は年変動が大きいため、とくに観測例が極めて少ない前述のアイスリッジのような大規模氷塊の観測を目的とし、北海道オホーツク沿岸において継続して寒地土木研究所でデータの取得を行っている（2000～2005）。

4-1 観測概要

観測地点は、北海道オホーツク沖（図-3 参照）に ADCP（ドップラー式多層流速計）および IPS（超音波式氷厚計）を1基ずつ海底に設置し、海氷の移動方向・速度および喫水深を

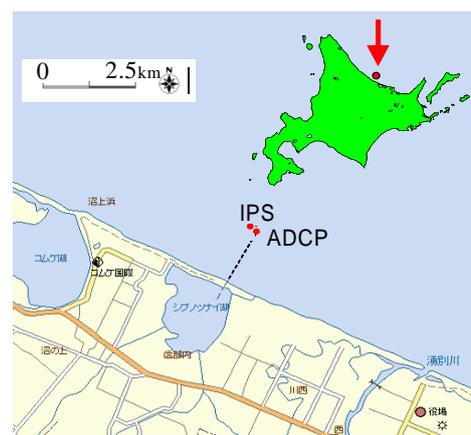


図-3 IPS, ADCP の設置位置

連続的に観測した（図-4 参照）。なお、分析対象データは 2000 年～2005 年に観測されたもののうち、

概ね海氷が存在し、連続的に海氷が確認できる期間、氷の主な移動方向（南東方向）の区間、を満たす 2004 年 2 月 26 日～2 月 27 日のデータ、2001 年 2 月 8 日～2 月 19 日（紋別沖 2.4km，水深 18m）のデータ、標本数は少ないがサハリン北東部で観測されたデータ（Birch, R.et.al,1999）さらに、北大低温研でも同じ方法（湧別沖 11km、水深約 60m）で海氷観測を実施しており、その 2000 年度のデータも参照して分析した。

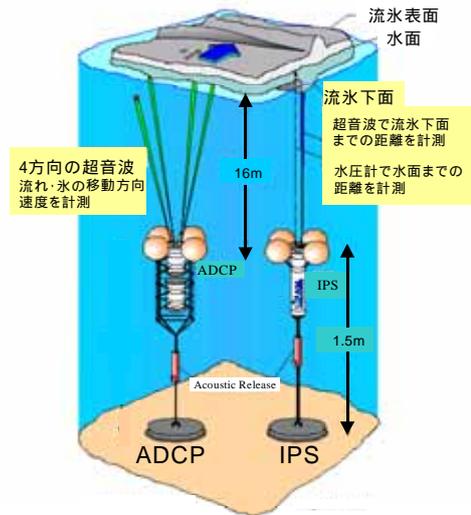


図-4 観測機器の設置イメージ

4 - 2 移動速度および喫水深の下面形状の概要

図-5 は 2000 年度と 2003 年度のデータにおける移動速度の超過確率を示したものであり、移動速度の確率分布は概ね指数形である事が推察された。なお、過去の観測結果同様、沿岸部に沿って南東方向に卓越しており、これは季節風やコリオリ力の影響からも裏付けられる。図-6(a)は、IPS による海氷喫水深の時系列データを ADCP による海氷移動速度を用いて空間データに変換したものである。これは言い換えると、海氷の断面（下面）形状と見なすことができる。また、図-6(b)は、ある 400m 区間を抜粋した拡大例であり、海氷下面は平坦・均一ではなく、数 m 規模の大きな凹凸を有していることが分かる。これらの凹凸は 1 枚ものの氷盤ではなく、圧力、せん断や座屈などにより破壊された氷片が山脈状に堆積して形成されるアイスリッジや、氷の相互に乗りあがったラフティングアイスなどの変形氷である。図-7 には、2000 年度と 2003 年度のデータにおける超過確率分布を示す。2003 年度のデータは、過去と同様、喫水深の頻度分布は指数形に近い形状であったが、喫水深の大きさは、平均が 0.61m、最大が 7 m 程度であり、2000 年度のデータ（最大 4m 程度）に比べ、比較的大きな喫水深であり、年変動が大きいことを確認した。

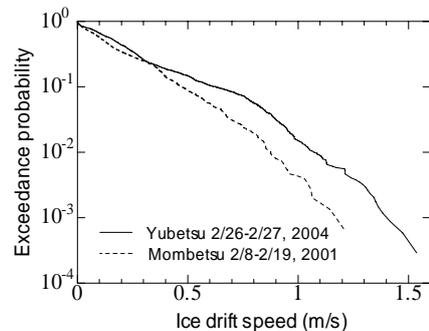


図-5 氷の移動速度の超過確率（2000, 2003 との比較）

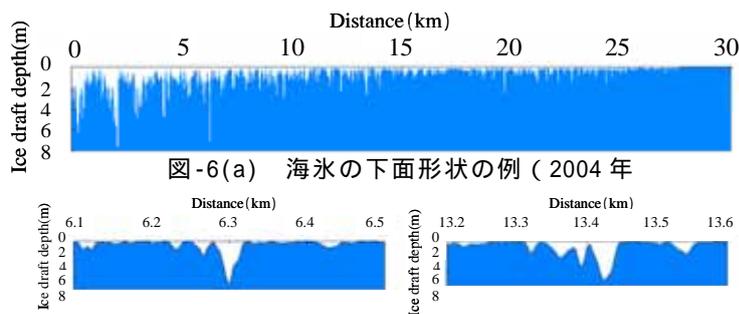


図-6(b) 図-6(a)の一部の拡大例（400m 区間）

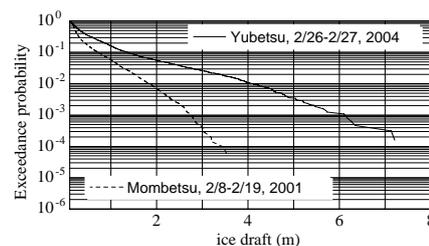


図-7 海氷喫水深の超過確率分布

4 - 3 局所定常 AR モデルを用いた海氷下面凹凸のスペクトル解析とその実用的活用法

対象とするスケールによっては、凹凸の非定常性を考慮しなければならない。その解析手法として、局所定常 AR モデルの適用を適用した。その分析の結果、実用的な観点からは、定常とみなされる各小区間における平均喫水深の分散は異なるが、同様なスペクトル特性があり、その正規化されたスペクトルは同一と仮定でき、過去のデータ特性と全く同様な傾向であった。ゆえに、実用的には代表的な正規化スペクトルを推定するとともに、分散の頻度、範囲などを推定しておけばよく、単純な取り扱いができる。図-8 は過去のデータも含めた代表正規化スペクトルの比較を行ったものである。これらは実用的観点より、概ね同一と見なすことができ、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、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幅広い領域で変形氷の凹凸特性は類似（相似）であるものと推察された。

また、著者らは既に代表正規化スペクトルを用いた凹凸のシミュレーション手法を開発している。上記手法は、海氷と構造物の干渉時の挙動や氷荷重推定、あるいは構造物表面での磨耗量推定、流れによる圧力・摩擦抗力などの推定、等のために必要な入力条件や境界条件としての利用が可能である。本手法は、十分な標本に基づいているとすると、代表正規化スペクトルと分散の確率分布（時空間的なパラメータを含む条件付確率分布）を用いれば、容易に凹凸をシミュレーションできる他、確率論に基づく構造物の性能設計にも用いることが可能である。

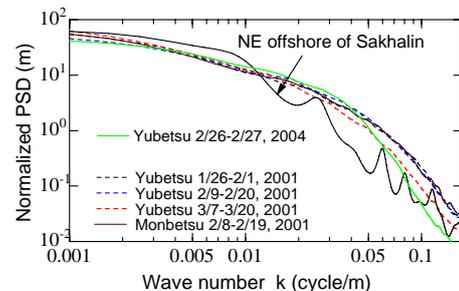


図-8 各ケースの代表正規化スペクトル

5 . 技術的課題と今後の展望

前述のように、現在、耐氷構造物などの設計基準や氷荷重推定手法などの国際基準はなく、入力情報や判断材料となる氷象条件も海域によって氷荷重形態も異なってくることから、わが国においても、様々な氷荷重形態の把握とそれらに対応できる設計手法・指針の整備に向けて引き続き精力的に研究開発する必要がある。また、年変動が大きい氷象の観測などについては、長期間の観測結果が重要となるため、今後も可能な限り、海氷観測を継続していくこと、また、同時に複雑な海氷現象を低コストかつ効果的に観測できるシステムを構築していく必要がある。上述したことは、おもに耐氷設計や防氷技術の観点から論じたものであるが、一方で海氷そのものを利用する試みもなされており、それらを支援する技術開発もまた重要であると考えられる。我が国でも、流氷と慣れ親しむことのできる親水防波堤やオホーツクタワーなども建設され、流氷を魅力ある地域資源の一つとして活用する試みも発展しつつある。流氷は、プランクトン供給、波浪エネルギーの吸収、塩害防止や磯清掃(海底掘削)などで大きな恩恵をもたらしていることを忘れてはならない。このように、「流氷」と共存するという視点で、今後の港湾・漁港・海岸保全施設などの整備を検討していく必要がある。