氷海域における船舶の安全及び油流出事故対策*

泉 山 耕**

Shipping Safety and Oil Spill Response in Ice-covered Waters

By Koh Izumiyama

With the increasing demands for energy resources, hydrocarbon development is expanding its field to what is called frontiers, including ice-covered waters. Surface transportation by tankers in ice plays an important role as a major transportation mode of the developed resources to and from the refinery and/or to the market. On the other hand, ice-covered waters are known to be vulnerable to pollution. Large oil spilling by a tanker accident could cause irretrievable damage to the environment. Oil spilling response in ice, however, requires totally different technologies from those in open water conditions. For the sustainable development of resources in ice-covered waters it is indispensable to secure shipping safety and prepare a proper response system against pollution due to oil spilling.

1. はじめに

人類と氷海域との関わりは7, 8世紀頃のアイルランドの僧侶による北極海探検航海にまで遡ることができる¹⁾。その後、大航海時代における探査・航路啓開の試みの時を経て、19世紀終盤から20世紀初頭にかけては両極点への初到達が様々な探検家達により競われた。このような探検には氷海中を航行可能な船舶が不可欠であったが、その後の船舶技術の発達とともに氷海域は、通常の海域に比べて過酷な環境であることには変わりはないが、海上輸送の場としても利用されることとなった。

そして20世紀後半になると氷海域、特に北極海は、石油・ガス等の資源の開発・輸送の場という新たな面からの注目を受けることとなる。1970年代の二度にわたるオイルショックは、60年代後半からカナダ北極海等において発見されていた資源の開発に対する世界的関心を巻き起こした。この北方資源の開発を目的として、氷海域用海洋構造物、氷海域可航型タンカー等についての研究開発が我が国をはじめとする各国で行われた。この一方、氷海域が汚染に対して脆弱な海域であるとの認識の下、開発に伴う汚染、特に油流出の問題についても各種の研究が為された。

この氷海ブームとでも言うべき動きは、油価が予想ほど上昇しなかったなどの理由によりその後沈静化した。現在再び氷海域資源の開発に注目が集まり始めている。このような開発の代表例を我が国北方に位置するサハリン島大陸棚に見ることができる。周知のように同島があるオホーツク海は、冬季に流氷が発生する海域である。現在サハリン島を取り巻くように開発鉱区が設定されているが、その中の一つ Sakhalin II では1999年にすでに石油の商業生産が開始されている。この生産は、現在は無氷季に限定されているが、本年秋から冬季を含めた通年生産体制に移行の予定である。また、Sakhalin I も近いうちに当初の通年体制生産を開始するとされ、その他の鉱区、特に北部に位置する Sakhalin V においても開発の動きが活発である。

このサハリン大陸棚における開発は、エネルギー供給の多角化を図りたい我が国にとっては朗報であるかもしれない。しかしながらその一方、タンカー事故等による油流出に対する危惧も高まっている。特に、氷海域における油流出については、起こり得る現象についての知見・汚染防除技術の開発は極めて未発達な状態にある。一方、このような油流出事故を未然に防止するためにはタンカー等の船舶の氷海中での安全性の確保が重要である。本文では、氷海域における船舶の航行安全と油流出に対する対策について、海上技術安全研究所における研究結果をも交えながら述べる。

*原稿受付 平成19年3月6日。

**海上技術安全研究所(東京都三鷹市新川6-38-1)。

2. 氷海域とは

これまで筆者は、標題も含めて「氷海」あるいは「氷海域」という用語を特に説明も無く使ってきた。しかしながらこの言葉とその内容は、一般にどの程度認知あるいはどの様に認識されているのだろうか。おそらく読者の多くにとってはあまり馴染みの無い言葉であろう。ここでは、本文の内容に対する基礎的情報を確認するために、まず氷海について少しまとめてみたい。

広辞苑で氷海を引くと、「一面に結氷した海」とある。これに対し、日本雪氷学会編の雪氷辞典には氷海の項は無く、氷海という用語には少なくとも科学的に厳密な定義は与えられていないようである。そこで、あくまで筆者の認識によるものではあるが、広辞苑の表現に追加的コメントを加えてみたい。氷海の一般的なイメージは上記のようなものであろうが、我々氷海屋(氷海研究者、氷屋とも言う)にとっては、この表現は氷海の一状態を表すものに過ぎない。まず、氷海では必ずしも「一面に」あるいは「全面に」氷が存在する訳ではなく、大小様々な氷が浮き、その間には開水域が存在する場合もある、と言うよりもこの方が一般的である。ちなみに、海面において氷が占める面積率を密接度と呼び、例えば氷が60%を占める状態を「密接度6/10」のように表現する。次に、「結氷した海」という表現からは、氷がその海域で凍結・成長した状態を示している印象を受けるが、実際には氷は海流・風等の外力を受けて運動・移動する。このように漂流する氷が流氷であり、海の氷の大半がこの範疇に入る。

図1 北半球での氷の分布(文献2)の図より作画)

それでは氷海域はどのように存在するのであろうか。図1は北半球における海の氷の分布を示した図である。北極点周囲の色の濃い部分は夏季にも氷が存在する海域であり、その南側には季節的に氷が存在する海域が広がる。同図より、氷の量は必ずしも経度だけでは決まらず、地域的な差があることが判る。たとえば、ノルウェーや西部ロシアの北方に位置するバレンツ海にはほとんど氷が存在しない。これは赤道北部に発しヨ

ーロッパ西岸を洗うメキシコ湾流の影響である。一方、オホーツク海には非常に低い緯度まで氷の存在を見ることができる。事実、北海道東部沿岸にまで流れ着く流氷は、世界で最も緯度の低い海域に到達する流氷といわれる。これは、アムール川からの淡水の流入、大陸からの寒気の吹き込みといった氷が発生しやすい条件がオホーツク海には整っていることによる。

広辞苑による氷海の表現に対するコメントで触れたように、氷海には様々な形態の氷が存在する。図2(a)は、北極海における氷の形態を氷野の断面図の形で模式的に示した図である。陸近くには海岸に接して安定した状態で成長した定着氷(land-fast ice)があり、前述の広辞苑の表現はこの状態に当たろう。定着氷域の外側には様々な大きさの氷盤(ice floe)から成る流氷域がある。流氷域の氷盤には様々な外力が働くが、氷盤内あるいは氷盤間に働く圧縮力により氷が座屈破壊して線上に砕氷片が堆積した状態も出現する。このような氷は、氷上から見ると山脈上に氷の堆積が延びていることから氷丘脈(ice ridge、図2中の三角形断面の氷)と呼ばれる。当然のことながら水面下には氷上の高さの数倍の深さがあり、船舶の航行にとっては困難な氷況である。図2(b)及び(c)には、それぞれ流氷と氷丘脈の例を示した。陸に近い浅海域では氷丘脈は時に着底し、スタムハ(stamukhi、ロシア語)と呼ばれる。

(a) 北極海における氷野の断面の模式図

(b) 流氷域

(c) 氷丘脈

図2 海における氷の形態

開水状態から凍結を開始し、成長の期間が一年に満たない氷を一年氷 (first-year ice) と呼ぶ。一年氷は成長の程度 (厚さ) により数種類に分類される。オホーツク海・バルト海・ハドソン湾等の氷は全て一年氷である。一方北極海などの高緯度海域では、夏に融け残って冬に再び成長する多年氷 (multi-year ice) が存在する。多年氷は一年氷に比べて厚さ・強度ともに大きく、これも船舶にとっては厳しい氷況である。北極海の中央部は、このような多年氷により通年覆われている。ただし、この極点周辺の氷野においても氷の運動は活発であり、新たな氷丘脈の形成、氷盤の分離による開水域の形成とそこにおける一年氷の成長といった過程が常に起きている。

3. 氷海域における船舶の安全

氷海域を航行する船舶の安全性と一口に言っても様々な切り口がある。しかしながらその中で最も重要であり、また通常の開水域と比べて全く異なる点は、周囲の海水との接触により船体が受ける荷重「氷荷重」の発生である。本節ではまず氷荷重について、その特性とそれに対応した船体構造の例を示し、また海上技術安全研究所における研究の動向の一端を紹介する。一方、氷海域が氷荷重の発生に代表されるように船舶の航行にとって過酷な環境であり、また事故による油流出等に対して脆弱な海域であることの認識の下、氷海域を有する国あるいは地域では、船舶の氷海中航行安全を担保するための規則・システム等を整備している。これには、カナダ・バルト海沿岸国・ロシアといった国々が含まれる。これらの国々の規則・システム等には、その発達の経緯・理念等に基づきそれぞれ独自のものがあるが、ここでは紙面の都合上、より高い合理性を目指して改変が行われているカナダのシステムについて述べる。

3. 1 氷荷重 開水中を航行する船舶には、静水圧や波浪による荷重などが発生する。このような流体力学的な荷重と比べた場合、氷荷重には狭い領域に集中的に高い荷重が発生するという特徴がある。このような局所的な高荷重に対抗するため、氷海域を航行する船舶の船体構造は通常船舶よりも強固に造られる。また、船舶は時として厚く頑強な氷に突入して船首部が持ち上げられ、船体全体が曲げを受ける場合もある。船体構造は、このような全体荷重に対しても耐えるものでなければならない。

ノルウェーの著名な探検家ナンセンは、北極点初到達を目指す船として、氷荷重に耐えることを目的とした特殊な構造を有するフラム号を建造した。ナンセン

は、氷荷重に対して耐え得るようにフラム号の船体外板に何層もの板材・角材を用いるとともに、この外板を支えるために船体内部にも多くの補強用のビームを配した (図3 (a))。また、船体断面が丸みを帯びた形状となっているが、これは氷から受ける荷重を上方向の力に変換することにより船体が押し潰されることなく氷の上に持ち上げられ、氷と共に漂流して北極点に近づいたときに徒歩で到達を極めようという発想に基づくものである。ナンセン自身は北極点初到達を実現できなかったが、フラム号は見事にその機能を果たし、その後同号を引き継いだアムンゼンは南極点初到達を果たした。ナンセンの発想はその後の船舶にも受け継がれ、我が国の南極観測船「ふじ」もフラム号のような半円形の断面形状を有している。しかしながらこのような丸みを帯びた船型は波浪中による横揺れが激しい。このため「ふじ」の後継船「しらせ」では、氷荷重に対するデータの蓄積、構造計算技術の発達等を背景として、丸みを帯びた断面から箱型の断面形状を有する船型となっている (図3 (b))。

(a) Fram 号 (b) 「ふじ」と「しらせ」
図3 船体中央部断面の変化 (文献1)より

このように氷海域を航行する船舶に関わる技術は着実に進展し、船舶の大型化・高性能化が進んでいるが、氷荷重についてはまだ不明な点が多い。氷荷重の発生は氷の破壊を伴う複雑な現象である。これについての研究の最も主要な手法は、実船舶を用いた氷海域での計測である。ただしロードパネル等による氷荷重の直接計測は困難なために実施例も限られ、ほとんどの場合においては、外板あるいはフレームといった氷荷重を受ける構造部材の歪みを計測することにより氷荷重の推定を行っている。海上技術安全研究所でも冬季オホーツク海において海上保安庁の砕氷巡視船「そうや」及び「てしお」によるこのような計測を行っている。しかしながら氷海域での実船舶実験の機会は少なく、特にわが国では極めて限られている。また、船体上の広い領域にわたって船体応答計測を行うことは技術的に困難であり、最も氷との接触頻度が高い船首部を中心として一部の領域に対して計測が行われる場合が多い。この結果、氷海域実験から得られる情報は、象に触れる盲人の寓話に例えられるような限定的なものと

ならざるを得ず、船体氷荷重の全体像を把握することは難しい。

このような氷海域実験の問題点を補完することを目的として、海上技術安全研究所では実船舶による計測に併せて、水槽での模型実験による氷荷重研究も行っている。この実験では、当所の氷海船舶試験水槽（長さ 35.0m、幅 6.0m、水深 1.8m、冷却温度-20℃）に製氷した模型氷（厚さ、強度等を模型縮尺率に合わせて調整した氷）の中で模型船を走行させ、その時に船体各所に働く氷荷重を計測する。氷荷重の計測は、シート状の圧力センサーにより行う。図4はこのような実験の様子であり、模型船の外板表面に8枚のセンサーシートが張り付けてある。このように模型実験では船体上の広範な領域に対して氷荷重の計測が可能であり、船体周りの氷荷重分布についての情報を得ることができる。

図4 模型実験による氷荷重計測

計測結果の一例を図5に示す。この実験に用いた模型は、いわゆるポッド型推進器（podded propulsor）を搭載した模型である。ポッド型推進器は、高い旋回力が得られるなどの特徴があり、氷海域用の船舶をはじめとして様々な船舶への応用が進んでいる。図5に示した実験では、ポッド型推進器の高い旋回性能を活かして氷板中での旋回試験を行い、旋回の内側と外側の船体に働く氷荷重を比較した。図では横軸の右方向を船首、左を船尾として船体各所に働く氷荷重の分布が示されている。図が煩雑となることを避けるために、旋回内側の荷重分布は負の領域に示し、直進状態で得られた荷重分布を参考データとして破線で示している。図から判るように、直進状態及び旋回の内側では氷荷重は船体前半において卓越し、船尾にはほとんど荷重が発生していない。これに対し旋回外側では船尾においても船首と同程度の荷重が発生している。これはポッド型推進器の発生する高い旋回力のために旋回外側の船尾部が氷に押し付けられた結果発生した荷重と考えられる。砕氷現象は船首において卓越することから、従来の設計基準等では船首において最大荷重を想定し、

船体中央部、船尾部と設計荷重値を低減させることが一般的である。図5に示された結果は、新たな推進器の登場によりこのような氷荷重モデルを見直す必要があることを示唆するものである。

図5 氷荷重の船体周りの分布

3. 2 カナダ北極海航行安全システム カナダ北極海を対象とした船舶の航行安全システムは、同海域の環境保全を目的としたものであり、前述の北極海の資源開発の動きに対応して 1971 年に制定された Arctic Waters Pollution Prevention Act (AWPPA) が中心法規である。この法律は沿岸から 100 海里の海域内における汚染の防止を規定したものであり、汚染者に対して無過失責任を追及することが定められている。なおこの法については、まだ国連海洋法条約による海洋の法的区分が定められる以前のことであり、いかに海洋汚染防止のためとはいえ外国船に対する一方的規制について国際的な批判があった³⁾。AWPPA では、北緯 60 度以北のカナダ北極海を氷の状態の厳しさにより 16 の Shipping Control Zone に分割し、それぞれに対して船舶の氷に対する強さ（船体の補強の程度、推進機関の馬力等）を示す船級であるアイスクラスにより航行可能な期間を定めている（Zone/Date System: ZDS）。

図6 AWPPA による Shipping Control Zone（文献4）

それぞれのアイスクラスに対する具体的な要求要件は AWPPA の下位法規である Arctic Shipping Pollution

Prevention Regulations (ASPPR) に定められている。ASPPR の与えるアイスクラスには、上位の Arctic Class Ship と下位の Type Ship があり、それぞれがさらに AC10 から AC1 と Type A から Type E に分類される。それぞれのアイスクラスを有する船舶の各 Zone に対する可航期間は両者の組み合わせのマトリックスとして与えられ、例えば、図 6 のハドソン湾北部の Zone 14 に対しては、Arctic Class 6 の船舶は 6 月 15 日から翌年の 2 月 15 日まで航行が可能であるのに対し、Type A の船舶が航行可能な期間は 6 月 25 日から 11 月 30 日までに限られる。

ZDS における海域分類と船舶の航行可能期間は、それまでの氷況データ及び航行実績に基づいて決定されたものである。しかしながら、このような固定的なシステムでは、可航期間に航行したにもかかわらず氷況が厳しく船体に損傷が起きた、あるいは氷況が穏やかで明らかに航行可能と考えられるが規則上航行が認められない、といったケースが発生する。このような問題を解決するよりフレキシブルなシステムとして、近年 Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) が開発された。このシステムでは、これから航行しようとする海域の実際の氷況の観測(衛星画像や船上からの観測)結果を航行の判断に用いる。具体的には予定航路を氷況がほぼ一定であるとみなすことのできる領域 (Ice Regime) に分割し、それぞれの Ice Regime に存在する氷の種類と自船のアイスクラスの関係により決まる係数 (Ice Multiplier) 及びそれぞれの種類の氷の密接度から計算される Ice Numeral の値により航行の可否を判断する。Ice Numeral の計算結果として 0 以上の値が得られた場合は、航行が可能であると判断される。

AIRSS による Ice Numeral の計算結果と Zone/Date System による規定を比較した例を図 7 に示す⁴⁾。この図には Zone 11 を通る航路(図 6 内の実線)に対して 1986 年の氷況から Type B の船舶に対して計算された Ice Numeral (図中の点) と ZDS が与える可航期間(同ボックス) が示されている。同一の日付についても複数の Ice Numeral が与えられているが、これは航路上に複数の Ice Regime が存在し、それぞれについて Ice Numeral が計算されるためである。図にはこれらの Ice Numeral の最大・最小値を結ぶ線が示されている。これと ZDS による航行可能期間を比べると、最大値は航行可能期間を通じて正の値を示すが、最小値は期間の前半では負の値となっている。この図は 1986 年の氷のデータに対して計算された結果であるが、この年は氷況が厳しい年であり、それがこのような結果となったと考えられる。

このように AIRSS は実際の氷況に応じて航行の可否を判断することのできるフレキシブルなシステムで

ある。ただし、長年にわたって ZDS を用いてきた船社等の混乱を避けるため、現在は ZDS から AIRSS への移行期間として ZDS による可航期間外における航行の可否の判断に用いられている。

図 7 AIRSS による計算結果と Zone/Date System

4. 氷海域油流出対策

氷海域において流出した油の挙動は開水域におけるものと大きく異なる。これに伴い流出油による汚染の防除についても開水域とは異なる対応が求められる。本節では、氷海域における油流出対策を考える上でのベースとして、まず、このような油流出にかかわる問題点とその特性について述べる。次いで油流出に対する汚染防除手法について、現場燃焼と分散剤の使用の適用性・問題点等に触れた後、機械的回収について、海上技術安全研究所におけるものも含めて研究開発の動向を示す。

4. 1 氷海域油流出の問題と特性 これまでに氷海域の環境が汚染に対する脆弱であることを何度か述べてきたが、もう少し具体的に述べてみよう。まず問題となる点は、氷の存在である。氷の存在は油流出事故等が発生した場合の汚染防除措置をとるに際して大きな妨げとなる。また、氷の中に油が閉じ込められて氷とともに移動するという、通常海域には無い汚染の異動・拡大メカニズムも起こり得る。一方、低温環境の影響も重要である。油等の汚染物質が海洋に持ち込まれる、あるいはそれがさらに海岸に打ち上げられた場合、それらの多くは最終的に微生物により分解・無害化される (bio-remediation)。しかしながら氷海域では低温環境のためにこの活動が低く、汚染物質が長期にわたって存在することとなる。このように氷海域は、油流出等が発生した場合の汚染除去が困難であるとともに除去し切れなかった汚染物質の影響が長期にわたる可能性があり、汚染に対して脆弱な環境を有する海である。

図8 氷海域に流出した油の挙動

図8は氷海域に流出した油の挙動を模式的にまとめた図である。油と氷の相対的位置関係によって、起こり得る現象が異なる。まず、氷の下に油が存在する場合、その拡がりには開水域におけるものと比べて格段に小さな領域に抑えられる。これは、油に働く界面張力が拡がりを押さえる方向に働くことと、氷の底部の凹部に油が貯留される効果のためである。氷の下における油の拡がりが増えらるということは、汚染防除という観点からは有利な特性である。しかしながら、氷の下に存在する油の検出は極めて困難であり、幾つかのアイディアはあるものの、未だ有効な手法は確立されていない。さらに、油がそのまま放置された場合はその周囲に氷が成長して油が氷の中に取り込まれる (oil encapsulation) 現象が起こる。このように氷中に取り込まれた油の除去は困難であり、氷とともに油が移動するという氷海域特有の汚染物質の移動が起こり得る。

このような氷に取り込まれた流出油の移動シナリオは、サハリン大陸棚開発にかかわる油流出を考えるとときわが国にとって重要である。近年、北海道大学低温科学研究所を中心とする研究により、オホーツク海における海流が定量的に明らかにされた。それによれば、サハリン島東岸に沿って北海道に向かう強い流れが存在している (East Sakhalin Current、図9)。流氷もこの流れにより北海道沿岸まで運ばれている。一方、油の氷中取り込み現象を再現した現地実験の結果として、半年近い時間において氷の中から再び取り出された油の特性は、当初のものとほとんど変化していなかったという報告が為されている⁵⁾。従って、万が一 East Sakhalin Current の上において油流出が発生し氷の中に取り込まれて南へ運ばれた場合、その氷の融氷とともに原油の特性を保持したままの油が我が国近海に再出現するというシナリオも考えられる。

一方、比較的小型の氷盤群中に流出した油は、主として氷盤間の水空き部に拡がる。このとき氷は油の拡がりに対するバリアーとして働くことから、油膜の厚さは開水域におけるものよりも厚くなる。これにより

油の蒸発率は低下するが、油種によっては低温のためにワックス層が形成され、これが揮発成分の蒸発をさらに妨げる場合もある。一方、氷海域では氷の存在により波浪が減衰することから、油のエマルジョン化の進行は遅い。

氷の上面への油の流出は、氷の上に油の流出源があった場合の他に、氷盤の運動により開水部にあった油が跳ね上げられるポンピング現象によっても油が氷盤の上に移動する。また、融氷期には氷の内部に管路 (brine channel) が形成されるが、これを通じて氷の中あるいは下面に存在する油が氷の表面にまで上昇する現象も報告されている⁵⁾。このような氷の上面の油は雪との混合物を形成し、汚染防除作業をより困難なものとする。

図9 オホーツク海における表面流れ (文献6))

4. 2 汚染防除対策 氷海域における油流出に対する主要な汚染防除対策技術としては、現場燃焼、分散剤の使用、そして機械的回収が挙げられる。ここではまず前2者についてその概要を述べた後に、機械的回収については次項で回収装置の研究開発例を取り上げる。

現場燃焼 (in-situ burning) は流出現場において油を燃焼させてしまおうという手法であり、Arctic Council による Field Guide for Oil Spill Response in Arctic Waters によれば、北極海における油汚染防除手法としては最も現実的なものとされる。前述のように氷の中に油が流出した場合には氷は油に対するバリアーとして働き油膜を厚く保つとともに、エマルジョンの進行も遅らせることから、氷海域では燃焼には有利な条件が整う。また、耐火型のオイルフェンスで油を囲んでその中で燃焼させようというアイディアもある。しかしながらその一方、低温環境下における着火には工夫が要る。

また、煙や燃焼残渣の発生もあり、国によっては流出油に対する汚染防除手法としての現場燃焼を禁じている場合もある。

分散剤の使用は、開水域における汚染防除においても考慮されるオプションのひとつである。しかしながら、分散・希薄化されたとはいえ油は海中に残るとともに、分散剤自身の環境に対する影響についても考慮する必要がある。このため分散剤の使用には、開水域においても多様な面からの判断が必要であるが、氷海域においては氷による海面の静穏化のため分散効果が低減することも考慮しなければならない。また、一般に分散剤は使用温度によりその効果に変化するとされ、油種・現場の環境温度との関係に基づく最適なマッチングが必要となる。

4. 3 機械的回収 流出油の機械的回収は、海中から何らかの方法で油を分離・回収しようとするものであり、もし効果的に機能すれば最もクリーンで望ましい方法である。このため開水域における油の機械的回収には様々な装置が開発されてきた。これに対し氷海域に関しては、未だ決定判といったものが無い。これは、氷海域における油の機械的回収は、まず氷と油を分離した後、水から油を回収するという二段階の作業が必要となり、特にその第一段階について有効な手法が見出せていないことに最大の理由がある。

氷海中における油の機械的回収に関しては、ノルウェー・ドイツ等の研究機関が参加した国際共同研究 MORICE (Mechanical Oil Recovery in Ice-infested Waters) がこれまでで最も本格的な研究プロジェクトであろう。MORICE では、図 1 0 に示すようなコンセプトに基づく回収装置の開発が行われた。この装置では、油の流出した氷盤群中を進みながら氷を孔の開いたベルト (grated belt) により持ち上げ油と分離する。油はベルトの下に設置された、ドラム/ブラシタイプの吸着型回収装置により回収する。付加的な機構として、ベルト上ではシャワーにより氷盤に付着した油を回収部へ落とす。油から分離された氷盤は装置の後部から海中に戻される。

図 1 0 MORICE による氷海域用流出油回収装置

一方、フィンランドの Lamor 社は、同国環境研究所との共同研究により、Lamor Oil-Ice Separator (LOIS) を開発した。この装置においても MORICE のコンセプトと同様に grated belt が用いられるが、MORICE とは逆に氷を押し下げることにより油との分離を図り、水面に浮いた油を回収する。この場合、油の浮上は水と油の密度差によることとなって重力による MORICE のコンセプトよりも分離効率が落ちるが、これを補うためにベルトを振動させて油の氷とベルトからの分離を促す。LOIS はすでに商品化され、これを装備した油回収船もある (図 1 1、舷側中央の付加物が LOIS)。

図 1 1 LOIS を装備した油回収船

上記の 2 種類のコンセプトは、その他これまでに考案されたものよりは有効な手法と考えられることからここに取り上げたが、まだ次のような疑問点がある。まず MORICE のコンセプトにおいては、当然のことながら装置の浮力を超える重量を持つ氷盤を対象とすることはできない。理論的には装置を大型化することによってより大きな氷盤の処理も可能であろうが、大馬力のベルト駆動機構が必要となる。一方 LOIS については、主としてバルト海特有の氷況に対して開発された装置であることを考えなければならない。バルト海における氷は比較的安定して存在することから、砕氷船が一定の航路 (channel) を水中に啓開し、そこを船舶が通行する。このようにして繰り返し船舶の航行を受けた channel 内は直径 30 cm 程度の小氷塊に覆われる。LOIS はこのような氷況に対しては有効かもしれないが、一般的な氷況に対してはいかがであろうか。

以上のような従来のコンセプトに対する疑問への回答を得るべく、海上技術安全研究所では気泡を用いた氷海域用油回収装置の研究開発を行っている⁸⁾。この装置では氷と油を氷-油分離水路の中に導入し、その下の気泡発生管から気泡を発生させる (図 1 2)。気泡により起因された流れにより氷と油は油回収槽に向けて移動するが、油回収槽前面に設けられた格子により油だけが回収槽に流入しここで回収される。この回収装置において処理することのできる最大の氷盤サイズは

氷・油分離水路の幅により決まるが、これは構造強度等の条件が許す範囲で大きく取ることができる。また、気泡発生という極めて簡易な原理に基づく装置であることから、設計・建造も上記2装置に比べて容易なものとなろう。本装置については、幅4 m・長さ6 mという氷・油分離水路を有する大型模型を用いた水槽実験によりその有効性を確認し、現在さらなる研究を実施中である。

図12 海上技術安全研究所が開発中の油回収装置

5. おわりに

本文では、氷海域における船舶の安全と油流出事故対策について述べた。紙数の制約もあり代表的な例だけに限られた内容ではあるが、これらの問題についての読者の理解の一助となれば幸いである。

氷海域を航行する船舶の需要はこのところ急速な伸びを示し、ある船級協会が近年船級発行したタンカーの中の約1/3が何らかのアイスクラスを取得しているという報告がある⁹⁾。このような中、氷海域における船舶の安全性の確保はさらにその重要性を増して行くであろう。そこにおいては氷荷重に対する的確な理解が肝要であるが、特に従来にはない新たな形式の船舶への氷荷重についてはさらなる研究が必要である。本文ではその一つとして高い旋回性能を有するポッド型推進器を有する船舶の例を取り上げたが、これに加えて非氷海用の船型を有する船舶に対する氷荷重についても研究を進める必要がある。氷海域における石油・ガス資源開発の進展に伴い、開水域用の船型を有する船舶の氷中航行の機会が増えつつある。このような船型の周りにおける砕氷現象は氷海用船舶におけるものとは大きく異なるが、この場合の氷荷重についての情報は極めて限られている。一方、氷海域での船舶の航行安全を図るシステムとしてカナダの例を紹介した。AIRSSの考え方は、いわば氷海域における船舶の安全性を定量的に評価するものであり、この手法を他の海域、例えばオホーツク海に適用することは非常に興味深い。

一方、氷海域における油流出問題はサハリン開発の進展とともに我が国にとって早急に対策が必要な問題となってきている。本年2月に北海道紋別市において開催されたシンポジウムでは「オホーツクを油汚染から守ろう」と題するワークショップが開催され、その最後にオホーツク海の海洋環境保全のための計画とその実施・実行を提案する紋別宣言が出された。しかしながら氷海域における油汚染に対する技術・システムは極めて未発達な現状にあり、研究開発が急務であると言えよう。

海上技術安全研究所では、氷海域における主要な問題として船舶の航行安全と油汚染に関する研究を行っている。本文においてもその一部を紹介したが、今後も研究成果を研究論文等により発表して行く予定である。これらに対して引き続き忌憚りの無いご意見をいただくことをお願いして本文を終える。

参考文献

- 1) シップ・アンド・オーシャン財団, 北極海航路, 2000年, 扇興社, 242頁.
- 2) Sanderson, T., 1983. Ice Mechanics – Risks to Offshore Structures. Graham and Trotman Ltd., p. 253.
- 3) 栗林忠男, 現代国際法, 2002年, 慶應義塾大学出版会株式会社, 585頁.
- 4) Kubat, I. et al., 2005. A Methodology to evaluate Canada's Arctic Shipping Regulation. Proc., POAC05
- 5) Nelson, W. et al, 1981. Oil Migration and Modification Processes in Solid Sea Ice. Proc., Oil Spill Conference.
- 6) Ohshima, K. et al, 2002. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. Journal of Geographical Research, Vol. 107, No. C11.
- 7) Jensen, H. and Mullin, J., 2003. MORICE – new technology for mechanical oil recovery in ice infested waters. Marine Pollution Bulletin 47.
- 8) Izumiyama, K. et al, 2005. Development of a Recovery Unit for Oil in Ice. Proc., POAC05.
- 9) Demand surges for Ice Class. 2005, DNV Forum, #01 2005.

著者紹介

泉山 耕

- ・1957年生
- ・海上技術安全研究所
- ・北海道大学大学院工学研究科
博士（工学）
- ・氷海工学