

空気泡と相対速度を用いた氷盤と流出油の 分離技術に関する研究

METHOD FOR SEPARATING SPILLED OIL FROM PACK ICE BY USING AIR
BUBBLES AND RERATIVE VELOCITY

近藤浩文¹・石川亮¹・大塚夏彦²・佐伯浩³

Hirofumi KONDO, Ryo ISHIKAWA, Natuhiko OTUKA, Hiroshi SAEKI

¹ 北海道大学大学院工学研究科 (〒001-0013 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² 正会員 工博 北日本港湾コンサルタント (株) (〒003-0029 札幌市白石区平和通 2 丁目北 11 番 18 号)

³ フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

If an oil spill occurs under pack ice fields in the ocean, oil would spread beneath the ice cover and then trapped into recesses under pack ice. In this paper the method for separating oil that trapped into recesses beneath the pack ice is investigated. In this method, it is proposed to remove oils from recesses by introducing air bubbles and flush out by relative velocity between ice and seawater. In order to create relative velocity between ice and seawater, authors are proposing ice booming to control ice movement. A series of experiments for separating oil, which trapped into recesses of model ice, were carried out by using water tank. From the experimental results, the behavior of oil and air bubbles was investigated.

Key Words: Oil spill; Pack Ice; Ice Boom; Recovery Method; Air Bubble

1. 背景

サハリン島東方沖の大陸棚において、原油開発が進められている。現在は夏期のみ生産であるが、2006 年からは海面が流氷に覆われる冬期も含めた通年生産が開始される計画である¹⁾。この開発プロジェクト進行に伴って、冬期オホーツク海における油流出事故対策への関心が高まっている。氷海中に流出した油は、氷盤の下あるいは氷盤の間の海面にトラップされるため、その拡散範囲は通常の海面流出に比べて非常に狭くなる²⁾。しかしその回収においては、まず氷盤と油を分離することが必要になる。この氷盤の下にトラップされた油を氷盤から分離するのは容易ではない。このため現時点では、氷海流出油の回収に関する有効な方法は確立されていない。

著者らは、氷盤の下にトラップされた油と氷盤を分離する方法として、空気泡を海中から噴出することにより、凹凸のある氷盤下面にトラップされた油を氷盤から分離し、同時に氷盤と海水との間に相対速度を与えて油を下流方向に移動させることにより、氷盤の下から流出油を分離する技術を提案している(図-1)³⁾。また、氷盤と海水との間に相対速度を与える方法として、2 隻の砕氷船でアイスブームを曳

引し、氷群を制御することにより、海水との間に相対速度が発生させられるものと考えている(図-2)。本研究は、これまでに実施した水槽実験をもとに、より詳細な氷盤模型による水槽実験を行い、本原理の有効性と効率に関する検討を行うことにより、実オペレーションでの必要条件を明らかにすることを目的として実施したものである。

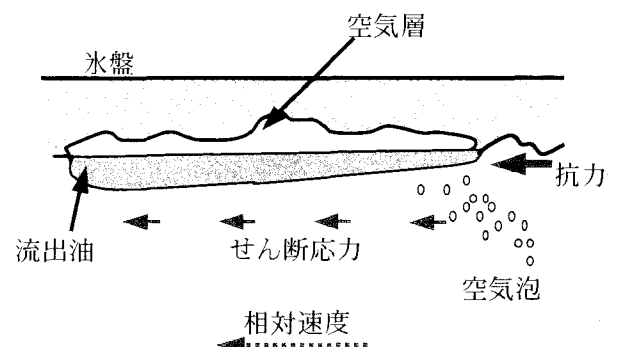


図-1 氷盤と油の分離イメージ

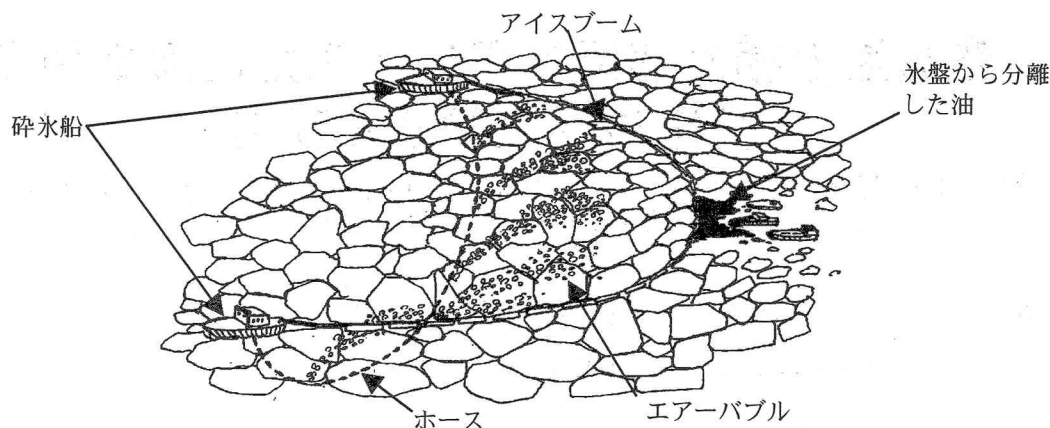


図-2 アイスブームを用いた分離イメージ

2. 実験

(1) 実験材料の検討

実験における氷盤模型および流出原油には、状態の管理が容易な代替材料を用いることとした。まず原油代替材料には、密度が原油と同等で、かつ種々の粘度の材料を得ることの出来る ISO グレードのギアオイルを選定した。冬期オホーツク海に流出したサハリン原油を想定した場合、これまでの研究から、原油の粘度は流出初期の約 $3 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ から、流出約 1 週間後に相当する $2.2 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 程度の範囲にあると予想される⁴⁾。氷群が存在する海中で油が流出した場合、氷盤の存在によって波による攪拌が弱まり、エマルジョン化の進行は遅くなるものと考えられる。これより、ギアオイルには ISO15, ISO32, ISO100 の 3 種類のギアオイルを用いた。また、着色剤をギアオイルに添加し、視認性を向上させて使用した。表-1 に実験条件におけるギアオイルの粘度および、比重を示す。

模型氷盤には、ガラス板を使用した。ただし、界面の状態を氷盤と原油との付着特性に近づけるために、超親水性剤を吹き付けてある。本実験に先立ち、模型氷盤と原油および実験に用いるギアオイルの接触角の測定実験を実施した。水温・油温は表-1 に同じである。実験状況を図-3 に示す。表-2 にギアオイルとガラス板との接触角を示す。この表より、超親水性剤を添付したガラス板とオイルの接触角は、氷盤とイランニアンライト原油との接触角に近い状態であると言える。

表-1 ギアオイルの粘度と比重

油種別	温度(℃)	粘度($\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	比重
ISO-15	15	44	0.875
ISO-32	12	133	0.872
ISO-100	16	350	0.880

表-2 模型氷盤の接触角 (単位: 度)

油種別	海氷との接触角 θ_c	ガラス板との接触角 (超親水性剤付)
イランニアンライト原油	146	
ISO-15	155	149
ISO-32	157	147
ISO-100	151	146

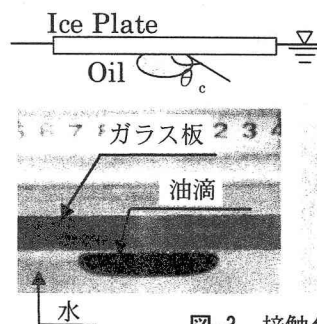


図-3 接触角実験

(2) 縮尺

本研究では、実施した実験は基本的には小さな規模の実際の流出であるとしてとらえている。ただし、密度差を持つ流れに関する内部フルード数 Fi を用いて縮尺効果を考えてみる (式(1))。成層の特性長 L として油がトラップされた氷盤の凹凸(油層の厚さ)をとることとする。実海域での条件として、オホーツク海における流氷盤の厚さは平均で 0.4m 程度、最大で 1.5m 程度と言われる⁵⁾ことより、油層厚を 0.5m と仮定する。実験条件として、氷盤模型の凹凸 1.0cm、模型氷盤と水流との相対速度を 7.0~14.0cm/s と仮定すると、幾何学的な縮尺は 1/50 となる。また実験条件における流速は、0.5m/s~1.0m/s に換算される。

$$Fi = \frac{U}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_o)gL}} \quad (1)$$

ここに、 U ;流速, ρ_o ;油の密度, ρ_w ;水の密度, $\Delta\rho = \rho_w - \rho_o$, g ;重力加速度, L ;成層の特性長

(3) 実験方法

模型氷盤とオイルの分離実験の方法について以下に示す。

- 1) 実験水槽には幅 1m, 長さ 15m の水槽を使用した。
- 2) 模型氷盤は, 一辺が約 0.9m 大の正方形の強化ガラスに 10cm 四方, 厚さ 1cm のガラス板を格子状に貼り付けて, 8 行 8 列の凹凸を作成した。模型氷盤は水路上部の台車に固定し, 水面と同等の高さになるように設置した。
- 3) ギアオイルを模型氷盤の凹部に注入し, 氷盤に油がトラップされた状態を形成させた。注入したギアオイルは, 模型氷盤全体で 1.6l である。空気泡を模型氷盤前方端の水中より噴出し, 台車を 7.0cm/s および, 14.0cm/s の速度で移動させた。なお, 台車の可動距離は 7.0m である。実験時における空気泡および, ギアオイルの挙動を台車上部に固定したビデオカメラにて撮影した。
- 4) 空気泡の噴出口は直径 1.7mm で, エアホースに 2.0cm の間隔で設けた。エアホースは両端から空気を送り込めるように, エアーコンプレッサーに接続した。空気流量は 7cm/s の実験ケースで 15l/min., 14cm/s の実験ケースにおいて 30l/min. に設定し, 実験中に注入した空気泡の総体積は 25l とした。
- 5) 実験装置および, 模型氷盤を図-4, 図-5 に, 実験条件を表-3 に示す。

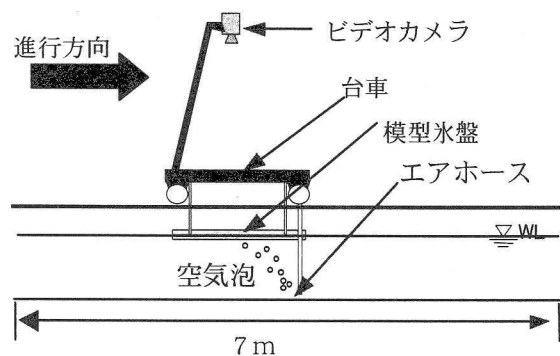


図-4 実験装置

表-3 実験条件

Case	ギアオイル	台車の移動速度 (cm/s)	空気泡流量 (l/min.)
1-1	ISO-15	7	15
1-2	ISO-15	14	30
2-1	ISO-32	7	15
2-2	ISO-32	14	30
3-1	ISO-100	14	30

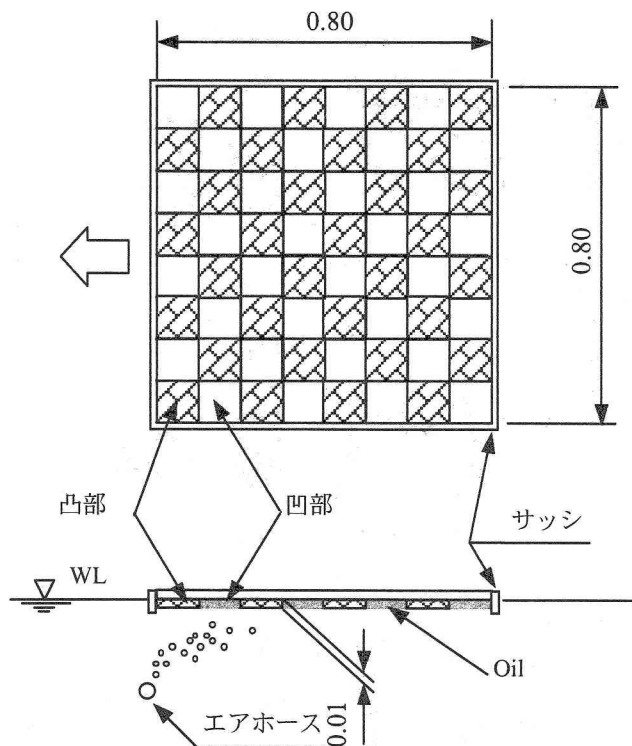


図-5 模型氷盤 (単位: m)

3. 実験結果と考察

(1) 油の挙動と置換効率

図-6 に実験を開始する前の氷盤凹部にギアオイルがトラップされている状況を示す。台車を移動開始させ, 空気泡を注入すると, 空気泡は氷盤前方から順次凹部へと入りこみ, 油層へと浸透して油と置き換わった。置換された油は, 氷盤下面に沿って下流側へと流れ出し (図-7), 最終的には模型氷盤下流側の水面に流れ出した。高粘度油を使用した Case3-1 においても, 空気泡は容易に油と置き換わった (図-8)。

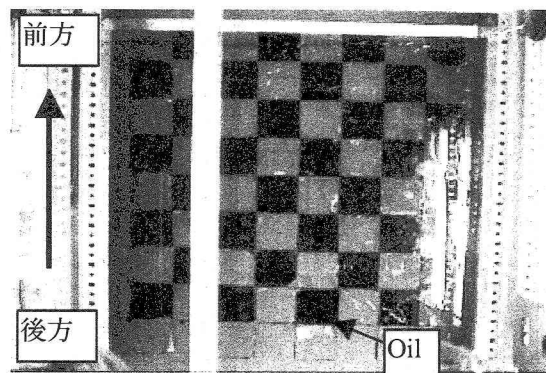


図-6 空気泡注入前

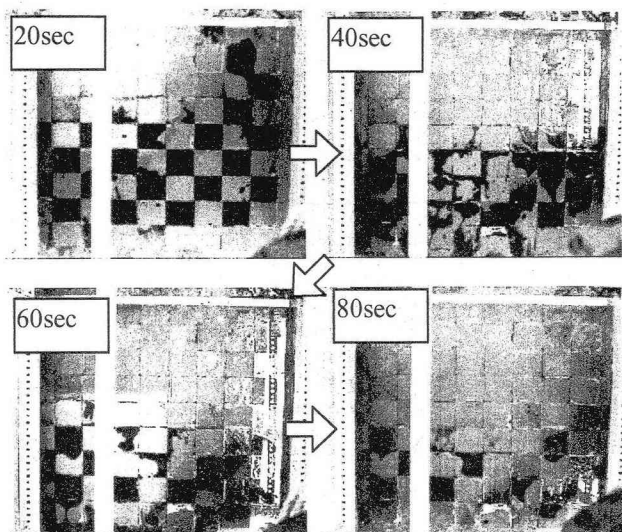


図-7 置換状況 (Case1-1)

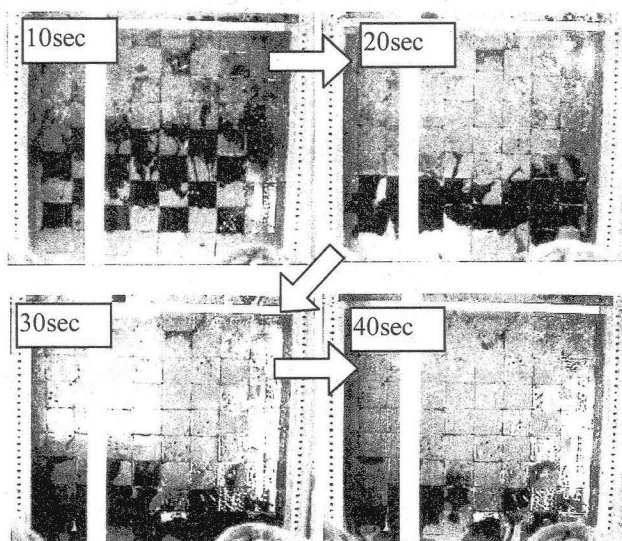


図-8 置換状況 (Case3-1)

台車を停止させた後、凹部に残存している油を回収し、その体積を計測した。図-9、図-10 に注入された油に対する置換された油の割合を示す。相対速度が大きほど、空気流量が多いほど、油の分離効率は向上した。一方、空気流量および相対速度が同じケースにおいて、粘度による置換効率の違いは無いことがわかる。以上より、十分な空気流量を与えることにより、小さな相対速度であっても油を氷盤から分離できることが予想される。

図-11 に各列の凹部油を置換するのに要した時間を示す。凹部にトラップされた油は、空気泡によって模型氷盤前方より順次置換されている。また、相対速度および、空気泡流量が大きくなると、置換に要する時間は短くなる。特に、空気泡が噴出口から直接模型氷盤に届く範囲においては、油は即座に空気泡によって置換される。

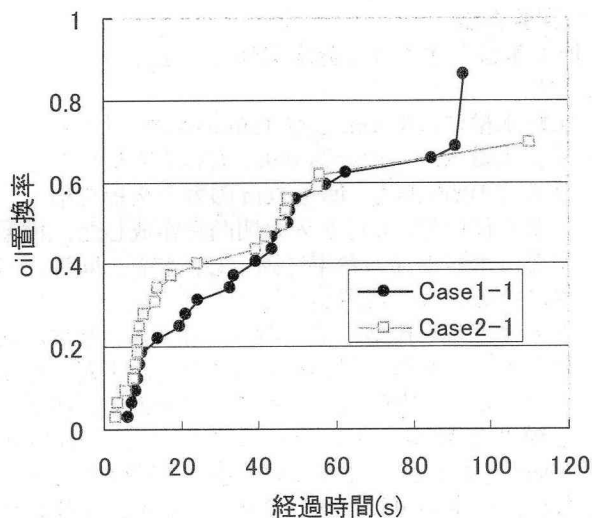


図-9 置換効率 (速度 7cm/s, 空気泡流量 15 l/min.)

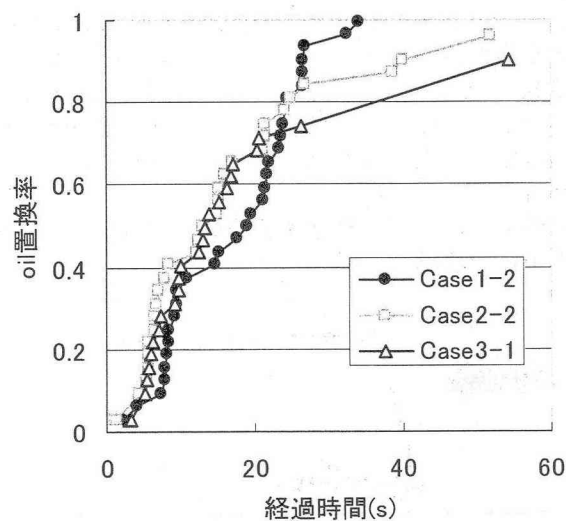


図-10 置換効率 (速度 14cm/s, 空気泡流量 30 l/min.)

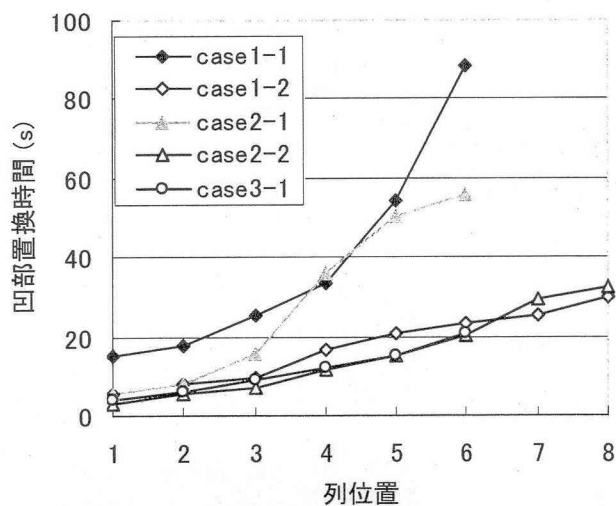


図-11 凹部置換時間

(2) 油が氷盤下面を移動するのに必要な相対速度

氷盤凹部から分離された油は、空気層の下では容易に下流側に流れ出す。しかし氷群の下面全てにわたって空気層を設けることは容易ではない。アイスブーム下流側に設けた水面にて油を回収するためには、油が氷盤の凸部に溜まった状態で、下流側に移動するのに必要な相対速度が必要である。この条件は、これまでの水槽実験より約 13cm/s 程度であることがわかっている⁶⁾。これに対し、オホーツク海の流れに関する観測より、場所によるものの約 0.1～0.5m/s 程度の海流の存在が報告されている⁷⁾。一方、流れの中でアイスブームを用いて氷盤を制御する場合、氷盤が反転する限界の速度は約 1.4m/s 程度との報告がある⁸⁾。このように氷盤を反転させずに、油を氷盤から分離するための必要速度を与えることが原理的に可能であると考えられる。

(3) 気泡起因流の影響

本方式では、空気泡が水中を上昇することによって上昇流が発生し、これが氷盤に達すると水平方向の流れになることで、油と海水の間の相対速度が冗長されているものと考えられる。このときの水平方向の流速は式(2)で得ることができる。

$$\frac{U_{\max}}{\sqrt[3]{gQ_0}} = \alpha \left(\frac{h+h_0}{h_0} \right)^{-1/3} \quad (2)$$

Q_0 : 単位幅流量, h : ホース水深, h_0 : 大気圧の水柱高さ, α : 1.46

式(2)を用いて今回の実験条件における気泡起因流の流速を算定すると、0.19～0.25m/s となる。したがって、算式どおりの流れが生じているならば、今回の実験条件では油を移動させる主たる流れは気泡に起因して発生した水平流で、氷盤を移動させることによってその方向を制御したものと想像される。

これに対して、実験結果では、氷盤の下を後方に移動する油の速度は、概ね 3cm/s 程度、すなわち時速約 100m であった。

(4) 氷盤下の油の分離効率

いま、氷盤と海水との相対速度に空気泡による水平方向流速を加えたものが、油層に働く相対速度と仮定する。油の移動速度は、海水との速度差に起因するせん断応力の影響を受ける。また、せん断応力は相対速度の二乗に比例すると考えられる。

一方、オホーツク海における実際の氷盤の凹凸は、紋別沖において平均 5.0cm 程度との報告がある⁹⁾。またさらに大きな凹凸も存在することから、実際の作業条件では、油の分離効率は空気流量に大きく依存すると考えられる。そこで、実験結果において、油と水の界面における相対速度の二乗と空気量の積に対して、油の時間当り置換量 (0.9m 四方の模型氷盤範囲からの) の関係を整理して図-12 に示す。

図より、最小二乗法にて空気流量、相対速度と油

の分離速度の関係を求めて、式(3)を得た。両者はよく相関していることがわかる。

$$\eta = 0.397 \cdot Q \cdot (V_r + V_{air})^2 \quad (3)$$

ここに、 η : 油置換速度(kl/s), Q : 空気流量(kl/s), V_r : 相対速度(m/s), V_{air} : 気泡起因流(m/s)

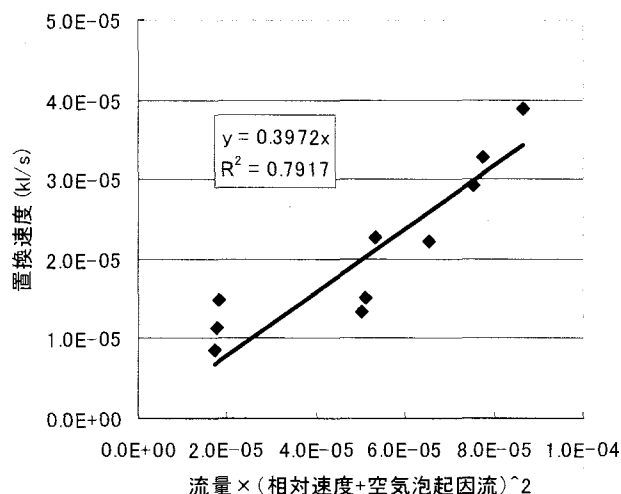


図-12 置換速度

(5) 流出油の分離オペレーションの試算

式(3)を用いることにより、実際のオペレーションにおける必要空気量、相対速度、作業能力の推定について試算する。

いま、100kl の流出油を 4 時間で氷盤より分離する作業オペレーションを想定する。凹凸の顕著なオホーツク海の流れ形状条件における油の拡散範囲は、5000kl の流出で半径 150m 程度との試算報告がある^{10), 11)}。このときの単位面積当り平均油層厚より推定すると、100kl の油の拡散範囲は直径約 42m となる。これに対して、幅 100m の規模でアイスブームにて油を囲い込み、曳航する。

気泡起因流は空気流量とエアーホース深度によって変わるものの、ここでは余裕をみて合計の相対速度を 0.2m/s と仮定する。以上の条件を用いて式(3)で試算すると、必要とされるエアーコンプレッサーの空気流量は約 0.6m³/s となる (表-4)。また必要となる空気量は油量の 80 倍程度となった。

氷盤から分離した油の回収は、2m³ バケツを搭載した 499DWT ガット船を想定する。ガット船クレーンのサイクルタイムは約 60sec 程度であることがわかっている¹²⁾。1 サイクルあたりの油回収量をバケツ容量の 10% と仮定すると、時間当り回収量は 12kl 程度となる。従ってこの回収効率で、4 時間で 100kl の油を回収するためには、ガット船 2 隻が必要になる。

ただし、実際のオペレーションに必要なとされる条件を検討するには、アイスブームによって囲まれた

範囲や、作業時間、空気泡流量、相対速度および、流出油の特性との関係について、より具体的に明らかにしていく必要がある。

表-4 流出油の回収モデルシナリオ

流出油量 (kl)	100
作業時間 (hr)	4
置換速度 (m ³ /s)	9.259E-03
相対速度 v_r (m/s)	0.2
空気泡流量 (m ³ /s)	0.58
注入した空気泡の全体積 (m ³)	8352

4. 結論

- 1) 模型氷盤凹部にトラップされた油を空気泡および、油層と水との間に相対速度を与えることにより、分離する実験を行った。結果、空気泡は油層を抜けて油層を置換し、置換された油は下流側へと流れ出した。
- 2) 十分な量の空気泡が注入された場合、7～14cm/s程度の相対流速にて油を模型氷盤から分離できることがわかった。これは、オホーツク海でアイスブームを用いて氷盤を制御する際に、氷盤がアンダーターニングする限界速度よりも十分に小さい。
- 3) 氷盤凹部にトラップされた油の置換速度は、空気泡流量と相対速度の2乗の積に比例する。
- 4) 100klの氷盤下の油流出に対して、アイスブームと空気泡を用いた油分離回収オペレーションの試算を行った。これより、現実的な規模、船舶・機材にて氷盤から油を分離し、回収できる可能性のあることを示した。
- 5) 実海域での作業状況および、必要とされる条件を決定するためには、アイスブームによる氷盤制御範囲や、作業時間、空気泡流量、相対速度および、流出油の状態との間にある関係性をより具体的に明らかにすることが求められる。

本研究は、シップ・アンド・オーシャン財団による平成16年度技術開発基金による補助のもとに実施したものである。

参考文献

- 1) サハリンプロジェクトシンポジウム(2005), 海上保安庁, シップ・アンド・オーシャン財団, 2005.1.25, 札幌
- 2) Otsuka, N., Ogiwara, K., Takahashi, S., Maida, K., Watanabe, S., and Saeki, H.: "Experimental Study on Spreading of Oil under Ice Floes", Proc. of Poac'01, Vol.3, pp.1333-1342, 2001.
- 3) 大島香織, 宇佐見宣拓, 高橋伸次郎, 川合邦広, 大塚夏彦, 渡辺靖憲, 佐伯浩: 流水下に流出した原油の回収方法に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol.14, pp.435-439, 1998.
- 4) 大塚夏彦, 大島香織, 石川博基, 宇佐見宣拓, 渡辺靖憲, 佐伯浩: 海氷盤中にトラップされた原油の変質過程, 寒地技術論文・報告集, Vol.14, pp.326-332, 1998.
- 5) Uto, S., and Shimoda, H.: On the Sea Ice Properties in the Southernmost Part of the Sea of Okhotsk by the Ship-Based Observations, Proceedings of The 15th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, pp.142-148, 2000.
- 6) 既出3)
- 7) Oshima, K., Wakatsuchi, M., Fukamachi, Y. and Mizuta G.: Near Surface Circulation and Tidal Currents of the Okhotsk Sea Observed with the Satellite-Tracked Drifters, Journal of Geographical Research, American Geophysical Union, 2002.
- 8) 榎国夫, 石井千万太郎, 國松靖, 佐伯浩: Ice Boomによる氷盤移動制御, 海洋開発論文集, Vol.8, pp.153-158, 1992.
- 9) 山本泰司, 先川光弘, 本間大輔, 梅沢信敏: オホーツク海沿岸部における流氷形状・移動状況の現地観測, 海洋開発論文集, vol.18, pp.779-784, 2002.
- 10) 泉山耕, 金野祥久, 松本健司, 堺茂樹: 氷盤下における流出油の拡散—氷盤下面の凹凸の影響—, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1341-1345, 2002.
- 11) Izumiyama, K., Uto, S., Konno, A., Sakikawa, M. and Sakai, S.: Spreading of Oil under Ice Covers: Effects of Bottom Roughness of Ice, *Ice in the Environment*: Proc. of the 16th IAHR International Symposium on Ice, Vol.2, pp.128-133, 2002.
- 12) 高橋伸次郎, 米田克幸, 大塚夏彦, 宇佐美宣拓, 萩原浩二, 佐伯浩: 流出油の分離回収方法についての野外実験, 寒地技術論文・報告集, Vol.16, pp.43-47, 2000.