

氷盤下に流出した油と氷盤の分離法に関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE METHOD FOR SEPARATING ICE AND OIL WHICH SPILLED BENEATH ICE FLOES

金編康平¹・近藤浩文²・大塚夏彦³・米田克幸⁴・柿崎裕太⁴・佐伯浩⁵

Natuhiko OTUKA, Kouhei KANAAMI, Katuyuki MAITA, Hirofumi KONDO, Hiroshi SAEKI

¹ 石川県庁(〒920-8580 金沢市鞍月1丁目1番地)

² 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)

³ 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)

⁴ 西村組(株)(〒099-64 紋別郡湧別町栄町)

⁵ 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)

A series of experiments for separating oil which trapped under cavities of model ice floes were carried out by using water tank. In the experiment air bubbles were injected beneath the model ice with water flow. And the method for separating oil from ice floes by injecting air bubbles and by using relative velocity between oil and water, in the case of oil spill accident under ice floes, was discussed.

Key Words: Ice floe, Oil spill, Oil recovery, Ice boom

1. 背景

1999年夏より、サハリン東部沿岸において原油の生産が開始された。生産された原油はタンカーにて北海道の近海を航行して輸送されており、近海での大規模な油流出事故の危険性が指摘されている。また、現在は流水の無い夏期のみでの生産であるが、通年で原油を生産する計画が積極的に進められている¹⁾。通年での生産に伴い、冬の流氷期に海中で流出事故が発生すると、原油の比重は海水よりも小さいため、流出油は浮上して流水の下面に沿って広がる。オホーツク海沿岸における流水の下面は、氷厚の違いや下面の形状による様々な凹凸があり、流出した原油は次第に凹部に滞留するようになる²⁾。このような流出油を回収するためには、まず氷盤から油を分離することにより、海面にある油を回収する機材が稼働できるようにすることが必要である。

著者らは、アイスブームを用いて氷盤の移動を制御し、海流と氷群の間に相対速度を与えることにより、氷盤から油を分離する方法について研究を進めている(図-1)³⁾。

本研究は、流氷下面の凹部に溜まった流出原油について、空気泡を海中から噴出して凹部の油を置換すると同時に、氷盤と海水に相対速度を与えることによって、氷盤から油を分離するために必要な条件を得ることを目的としている。このため、還流水槽

中にガラス製の氷盤模型を設置して油の分離実験を行い、相対速度と油の分離効率等について検討を行った。

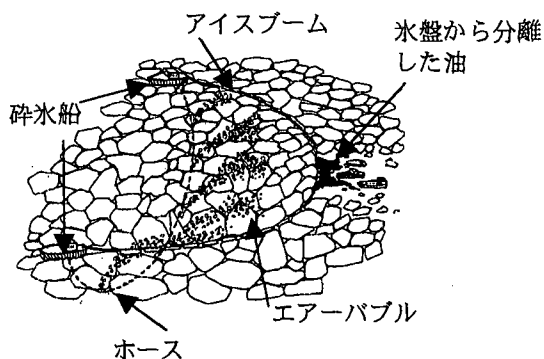


図-1 アイスブームを用いた氷盤と流出油の分離イメージ

2. 実験方法

(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 $3 \cdot 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}$ から、流出 1 週間後の $2.2 \cdot 10^2 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 程度の範囲にあると予想される⁴⁾。ただし氷群が存在する静穏な海中での流出を想定し、エマルジョン化は考えていない。これより、ギアオイルには ISO15, ISO64 の 2 種類のギアオイルを用いた。実験中の水槽中の水温および油温は約 10°C で、このときのギアオイルの粘度は $25\text{--}270 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ であった。

氷盤モデル材料には、実際の氷盤と原油の界面特性に近い性質を有することが求められる。非常に Light であるサハリン原油⁵⁾と比較的に近い性質をもつイランライト原油について、氷盤と原油滴の接触角を測定した事例を表-1 に示す⁶⁾。これと同等となるような材料を選定した既往の実験より、ガラス板が比較的氷盤と近い性質を持っていることより、モデル氷盤の材料にはガラス板を用いることとした。

表-1 原油・氷盤代替材料と接触角

	氷盤	ガラス板
原油	146	142
ISO-10	153	141

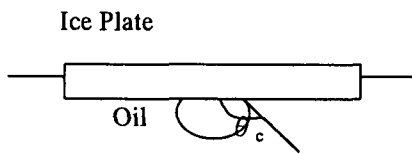


図-2 氷盤と油滴の接触角

(2) 縮尺

海上油流出に関する理想的な実験プロセスにおいては、流出油量、油の粘度、油と海水や氷盤との界面特性などを正確な物理的環境条件に基づいてモデル化や実験を実施し、現地スケールでの現象に対する係数等を詳しく設定することが望まれる。しかし実験室内において、現地スケールとの間の縮尺効果を理想的に考慮して、取り扱うことは容易ではない。

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)をとることにする。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⁷⁾ことより、油層厚を 0.5m と仮定する。実験条件として、氷盤モデルの凹凸 $1.0\text{--}2.0\text{cm}$ 、試験水槽内の流速 $5.0\text{--}10.0\text{cm/s}$ と仮定すると、幾何学的な縮尺は $1/50\text{--}1/25$ となる。また実条件における流速は $1/50$ において $0.354\text{--}0.707(\text{m/s})$ 、および $1/25$ において $0.25\text{--}0.5(\text{m/s})$ に換

算される。

$$Fi = \frac{U}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_0)gL}} \quad \dots\dots (1)$$

(3) 模型氷盤と油の分離実験

氷盤と油の分離実験の方法を以下に記す。

- 1) 実験装置として、幅 2.0m 、長さ 15.0m の循環水槽を幅方向に $1/2$ に仕切った水路を使用した(図-3)。
- 2) 幅約 0.9m 、長さ約 1.8m のガラス平板に、厚さ 1.0cm で 20cm 平方のガラス板を格子状に貼り付けて、凹凸のある模型氷盤を作成し、水深約 45cm の水面近傍に設置した。凹凸は 1.0cm 、および 2.0cm の 2 ケースとした。(図-4)
- 3) 模型氷盤の下側凹部にギアオイルを注入した後、水槽水に流れを与え、同時に油層の下方から空気泡を定流量放出した。空気泡により凹部の油が置換され、油が下流側に分離される状況をビデオ撮影した。
- 4) 実験時の流速は $5.0\text{cm/s}\text{--}10.0\text{cm/s}$ を目標として水槽水を循環させた。また、実験時の模型氷盤直近の流速をプロペラ式流速計にて計測した。計測位置は模型氷盤上流端の凸部下面近傍、および下流端の氷盤模型下面近傍とした。また横断方向は水路中央、中央より 20.0cm 、 26.75cm とした。
- 5) 実験条件を表-1 に示す。

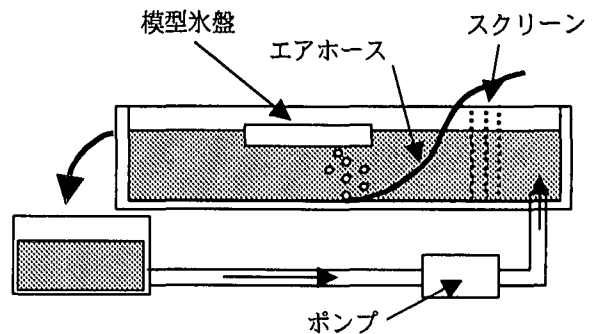


図-3 実験水槽

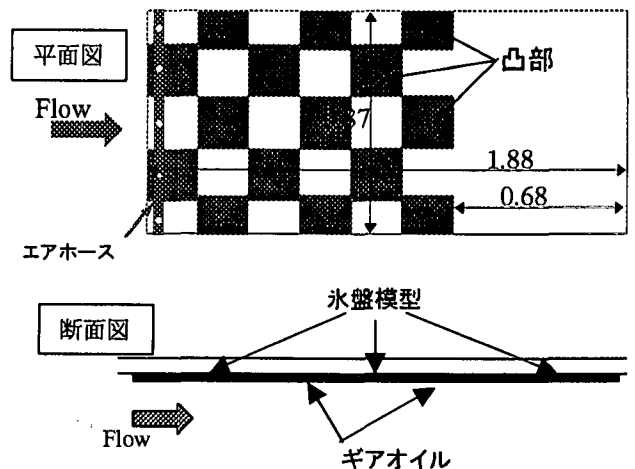


図-4 模型水盤 (単位: m)

表-1 実験条件

流速(cm/s)	5.0(case-1) 10.0(case-2)
空気注入速度(l/s)	0.1
空気流入量(l)	30 (at300sec)
油量	1.68l
凹部での油膜厚(m)	0.005
ギアオイル粘度(Pa·s)	$25 \times 10^{-3} \sim 270 \times 10^{-3}$

3. 実験結果と考察

(1) 流速分布

図-5に模型水盤近傍の水平方向の流速分布を示す。水盤前方と後方では case-1 で 2cm/s, case-2 で約 3cm/s 程度流速が減少している。また、中心部に対して側方 2 列目・3 列目での減少が確認できる。

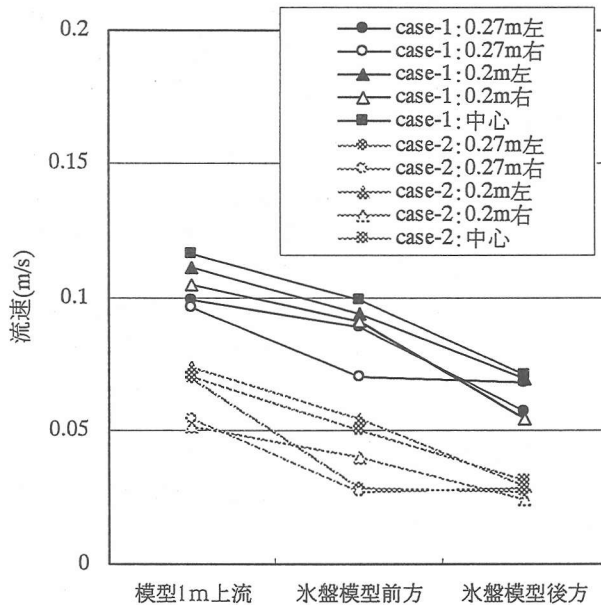


図-5 模型水盤近傍の流速分布

(2) 水盤凹部への油の残存率

模型水盤凹部に油を貯留させた状況を図-6に示す。黒色の部分が凹部に貯留している油である。この状態で、空気を噴出させずに水槽水に流速を与えた場合、油は移動せずに凹部に滞留したままであった。その後、水盤模型前方下面から空気を注入させると、空気泡は水盤模型前方から凹部に順次入り込み、油と置き換わった(図-7)。凹部から出た油は、順次下流側の凹部に移動し、最終的には模型氷の下流側水面に流れ出した(図-8)。

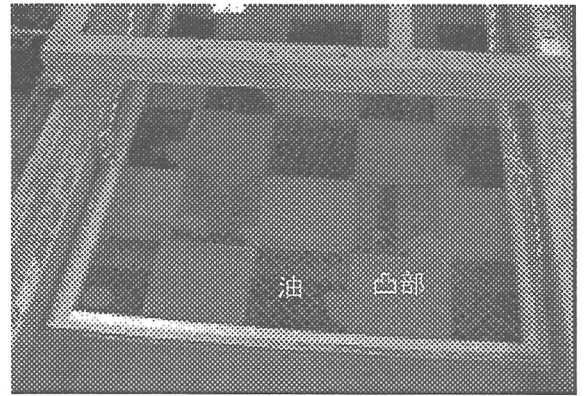


図-6 空気注入前

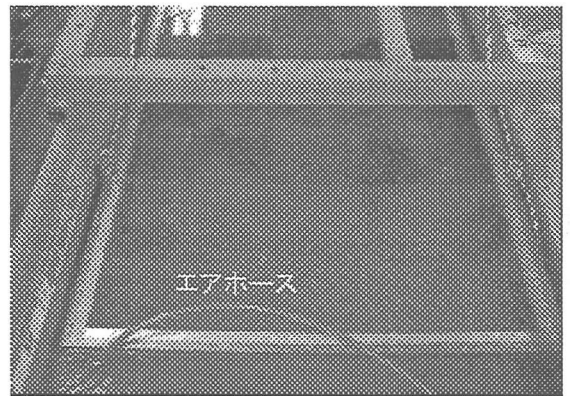


図-7 空気注入後

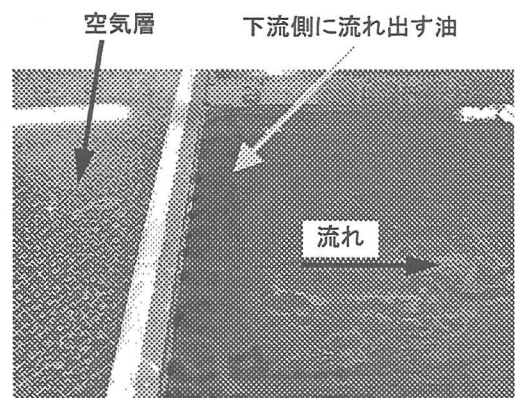


図-8 水盤模型背後からの油の流出

図-9に、凹凸 1cm の場合の各流速・粘度における凹部の油残留量を示す。同様に図-10に凹凸 2cm の場合の結果を示す。

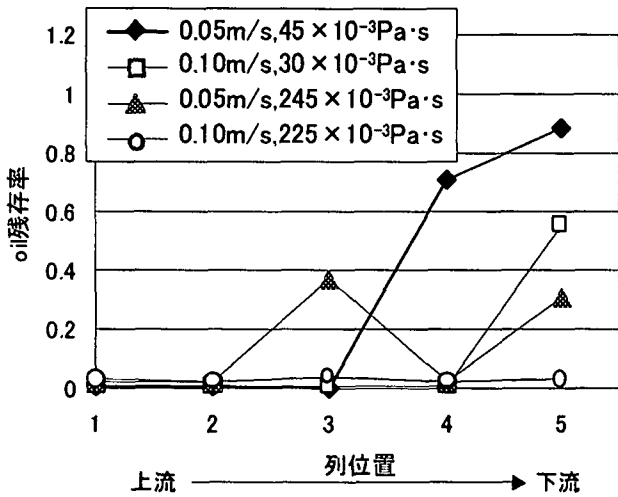


図-9 凹部の油残存率(凹凸 1cm)

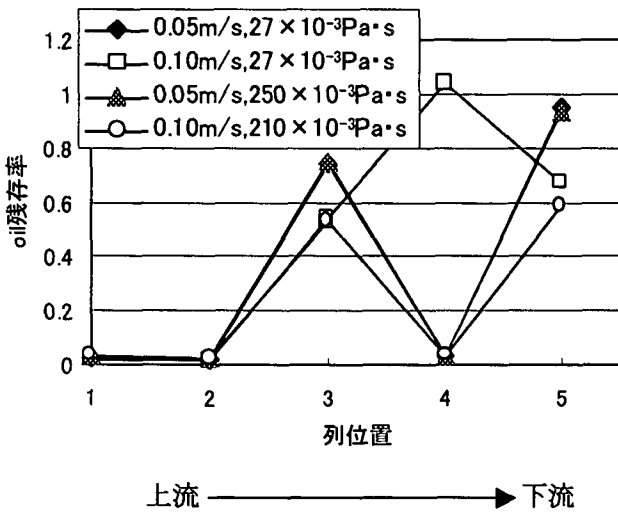


図-10 凹部の油残存率(凹凸 2cm)

凹凸 1cm の場合、前方列の凹部にあった油はほとんど分離された。また流速 5cm/s に比べて流速 10cm/s では、より残存率が低くなっており、流速が大きほど分離効率が高くなっている。低粘度のケースにおいて後方列の残存率が大きくなっているのは、上流側で空気に置換された油が下流側の凹部に順次流入したためである。これに対して高粘度油のケースでは、凹部から置換された油が下流側凹部に流入するのに時間を要し、凸部に滞留し、移動中の段階で実験を終了したためである。全体としては、高粘度油の場合でも、下流側の凹部の油も置換されたことがわかる。

凹凸 2cm の場合では、低流速である 5cm/s のケースおよび高粘度油のケースにおいて、前方 1・2 列目は空気に置換され、それが 3 列目および凸部に残存し、一方、空気泡は前方列の油が置換されるより早く 4 列目に達して 4 列目を置換する結果となった。

これに対し、低粘度油で流速 10cm/s のケースでは、油の移動が活発で前方列の油が順次下流側に移動しているため、比較的一様に後方列に向かって残存量が大きくなる結果となった。しかし、凹凸が大きくなっても、十分な空気量が注入されれば氷盤と油の分離が可能であることが確認された。

また各実験を通じて、中央の凹部と側方の凹部で残存状況が一樣ではなく、全体として流速の大きな中央部で油の移動が活発であった。

(3) 氷盤凹部の油の置換効率

図-11 に、凹凸 1cm のケースにおいて、油をトラップさせた模型氷盤凹部について、空気によって置換された体積（凹部に残存した油量は差し引いてある）の時間変化を整理した結果を示す。油を貯留した凹部の体積は 4.3l で、このなかに 1.68l の油を注入してある。また模型氷盤後方の空隙部を含めて凹部全てに空気を 1.0cm 厚に充填するためには 10.956l の空気量が必要となる。空気による置換速さは、流速による変化はあまり見られない。また、高粘度油のケースでは、油が下流側の凹部に流入する前に、下流側の凹部も空気泡によって置換されるため、粘度による置換速さの違いも顕著にはならなかった。

図-12 は、同じく凹凸 2cm のケースの場合である。油を貯留した凹部の体積は 8.6l で、このなかに 1.68l の油を注入してある。また模型氷盤後方の空隙部を含めて凹部全てに空気を 2.0cm 厚に充填するためには 21.912l の空気量が必要となる。実験結果は、粘度、流速による違いはあまり無く、300 秒間の実験で平均 6.2l の凹部空隙が空気によって置換された。

どちらの氷盤凹凸ケースにおいても、注入した油量以上で、凹部体積の約 70% が空気によって置換された。

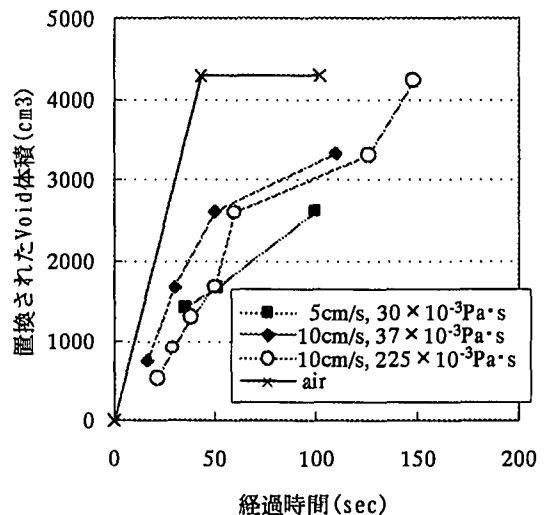


図-11 凹部の置換時間(凹凸 1cm)

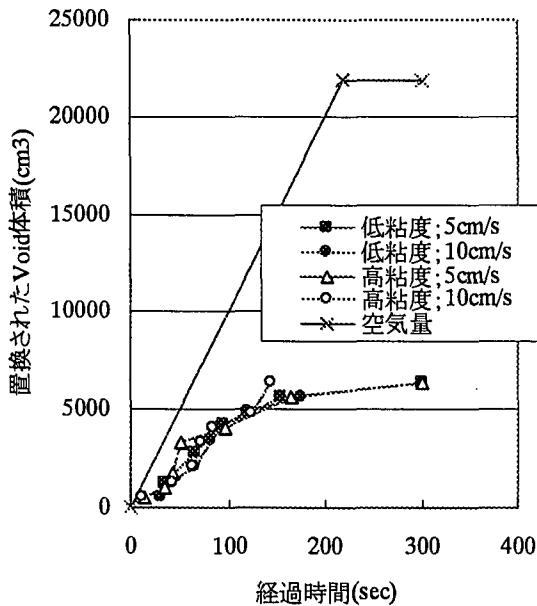


図-12 凹部の置換時間(凹凸 2cm)

(4) 氷盤と流出油の分離方法

以上より、空気泡を水中より噴出することによって、氷盤群の凹部にトラップされた流出油を氷盤から分離することが可能であることを確認した。ただし効果的に油と氷盤を分離するためには、氷盤群の凹凸の深さとその分布特性を把握し、適切な空気量を海中に噴出することが必要であると考えられる。また空気噴出量の決定には、アイスプームで囲う範囲、作業時間、空気層が拡散する速さなどを考慮して決定することが必要である。

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。アイスプ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⁸⁾。これに対し、オホーツク海の海流に関する観測より、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⁹⁾。一方、流れの中でアイスプ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¹⁾。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。

4. 結論

- 1) 凹凸のある模型氷盤の凹部に油をトラップさせ、流れと水中で放出した空気泡による油と氷盤の分離実験を行った。その結果、空気泡は油層を通過してガラス下面と油の間に入り込み、凹部の油は空気層によって置換されるとともに、流れによって下流側へと移動した。その結果、模型氷盤下流側には、氷盤から分離された油が流れ出した。
- 2) 油をトラップした凹部の空気による置換率は、油の粘度、流速にあまり影響されず、凹部空隙体積の約 70%程度が比較的容易に置換された。
- 3) 十分な空気を放出した場合、模型氷盤と油を分離するために必要な水の流速は、約 5~10cm/s 程度であった。これは実海域の海流の流速よりも小さいか同程度である。また、アイスプームでオホーツク海の氷盤を反転させずに曳航できる速度よりも小さい。したがってアイスプームを用いて、氷群と海水に対し、油と氷盤を分離するのに必要な相対速度を生起するための必要条件を満たすことが出来ることを確認した。

本研究は、運輸施設整備事業団(CATT)の実施する「運輸分野における基礎的研究推進制度」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に関する説明会 (1999), Sakhalin Energy Investment Company LTD.
- 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, 河合邦広, 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: 海水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) 既出 1)
- 6) 既出 3)
- 7) Uto, S., and Shimoda, H. (2000) 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.
- 8) 既出 3)
- 9) Oshima, K., Wakatsuki, 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 Graphysical Union, 2002.

10) 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.