

# 氷盤群の下に流出した油の拡散特性に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SPREADING OF OIL SPILLED AMONG PACK ICE

大塚夏彦<sup>1</sup>, 荻原浩二<sup>2</sup>, 金編康平<sup>3</sup>, 高橋伸次郎<sup>4</sup>, 佐伯 浩<sup>5</sup>

Natsuhiko OTSUKA, Kouji OGIWARA, Kohei KANAAMI, Shinjiro TAKAHASHI, Hiroshi SAEKI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>三菱重工業(株) 広島製作所 (〒733-8553 広島市西区観音新町4-6-22)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>(株)西村組 (〒099-64 紋別郡湧別町栄町)

<sup>5</sup>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)

In the Sea of Okhotsk, crude oil production had started in the summer of 1999, on the northeastern shelf of Sakhalin Island. And crude oil was exported by oil tanker from July to November because of ice floes in the winter season. However, it is planned to continue the production of crude oil through the year by sub sea pipelines. This development increases the risk of oil spill accident in the ice-covered waters.

In this paper, experimental study is presented in order to investigate the behavior of crude oil spreading among pack ice. The experiments were carried out including model pack ice consist of the board of circular ice, and some cases of different discharge, volume conditions and ice concentrations.

**Key Words:** Oil spill, oil spreading, pack ice, ice concentration

## 1. はじめに

1999年夏に始まったサハリン沖大陸棚における石油生産(サハリンI), および計画中のサハリンIIでは将来, 通年での原油生産が計画されている。これらの通年生産では, 掘削サイトからの海底パイプライン輸送, および砕氷タンカーの組み合わせによる輸送が検討されている。このような原油開発の進展にともなって, 冬期のオホーツク海における原油流出事故の危険性が現実性を帯びてきた。パイプラインやタンカーの事故により海中で油が流出した場合, 油は氷盤の下に沿って拡がることを指摘されている。一方, 流氷の密接度が低く氷盤の間に開水面がある場合には, 油は氷盤の間の水面に沿って広がることが予想される。このように氷盤群中に流出した油を回収するためには, 油の拡散範囲や拡散挙動特性を知ることが必要である。

Yapa and Weerasuriya(1997)<sup>1)</sup>は, 破壊されて小さくなった氷塊が集まってできた氷盤の下に流出した油の拡がりについて報告している。またOtsuka<sup>2)</sup>らは, 凹凸のある氷盤の下への油の拡がりについて実験している。ただしこれらの研究では氷盤の間に開水面はなく, 油は氷盤中に浸透しながら氷盤の下に沿って拡がる場合を取り扱っている。一方Sayed and Ng(1993)<sup>3)</sup>は, 密に詰まった状態の模型氷群の上に流出

した油の拡がりの挙動について実験を行っている。この研究では, 油膜の拡がる範囲は, 開水面への流出時に比べてきわめて小さくなること, ただしその範囲は油の粘度, 氷盤の状態に大きく影響されることを指摘している。実際のスケールでの実験として, Buist and Bjerkelund(1986)<sup>4)</sup>は実際に流氷のある海上で行った3つの流出実験結果について報告している。この研究では, 密接度の異なる氷群中に1m<sup>3</sup>の原油を流した結果, 油の拡がりの範囲は, Fay(1971)<sup>5)</sup>のモデルで計算した開水面における油の拡散範囲に比べて非常に小さくなること, 油膜が拡散する速度も遅くなるとともに, 油の拡散状態が浮力・粘性抵抗フェーズから浮力・界面張力フェーズに移行する時間も遅れることを指摘している。

オホーツク海の流氷は, 北海などの海水のような比較的平坦で連続的な氷盤とは異なり, 活発に移動し, その状態が変化することが知られている。このように種々の密接度をもつ氷盤群中に油が流出した場合に関する知見はわずかである。本研究は, 氷盤群の状態によって海中に流出した油がどのように拡散するか, その基本的特性を確認することを目的としている。本論文では, 密接度を変えた模型氷盤の下に原油を注入して油が拡がる様子を観察する実験を実施し, 氷盤の影響について考察した。

## 2. 実験方法

氷盤相互の間に開水面が存在する状態を想定し、密接度の異なる氷盤群において、海水中で流出した油がどのように拡散するかについて、実験的に研究を行った。実験は、模型氷盤群を水槽に浮かべ、その下方から油を流出させて、挙動を記録・解析する方法にて行った。

実験装置には塩水を満たした直径 1.6m の円形水槽を用いた(図-1)。水槽の底面はガラス窓となっており、下方から実験中の観察ができるようになっている。模型氷盤には、30%の塩水を凍らせて作成した直径 10cm、厚さ 3cm の平坦な円形の氷盤を用いた。油は一定の圧力・流量に調整しながら水中から流出させ、水槽底面の窓よりビデオカメラにてその拡散状況を記録した。また、水槽の上部からも目視とカメラにより拡散状況を確認した。

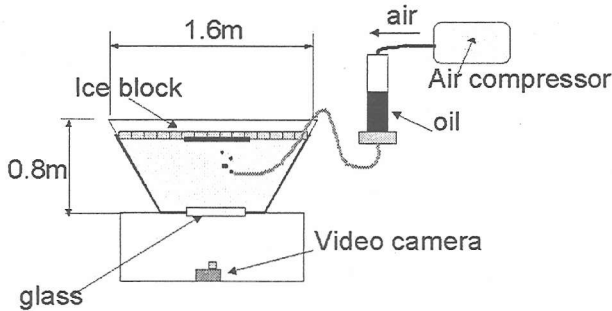


図-1 実験装置概略図

実験中の水温は約-0.5℃、模型氷盤は密接度 90%、60%とした。模型氷盤の設置状況を(図-2)に示す。また、氷盤が無い状態での流出実験も実施して、比較を行った。実験にはイランライト原油を使用した。油の粘度、比重は回転式ビスコテスター、比重計を用いて計測した。各ケースにおける実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

	Case1	Case2	Case3-1	Case3-2
密接度	0%	60%	90%	90%
油温度(℃)	1	-0.5	-0.5	-2.5
粘度(mPa・s)	95	190	145	118
比重	0.876	0.876	0.876	0.876
注入量 (l)	0.079	0.157	0.157	0.864
Q(l/s)	0.00248	0.00193	0.00442	0.01542
水温(℃)	0.2	-0.5	-0.5	-0.5

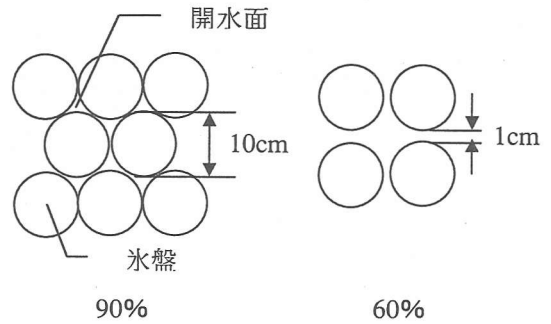


図-2 氷盤の配置

## 3. 実験結果

### (1) Case1 (氷盤なし)

氷盤がない場合における原油の拡散状態を図-3に示す。原油は注入直後から、急速に拡散し、注入量を面積で割った平均油膜厚は、0.1mm以下となった。水面に浮かんだ油膜ははじめ濃淡があるものの(図-4)徐々に一様になった。

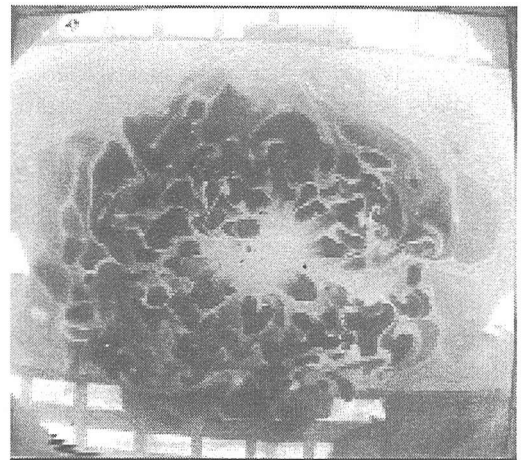


図-3 密接度 0%(注入停止直後)



図-4 密接度 0%(注入停止 810 秒後)

## (2) Case2 (密接度 60%)

密接度 60%の拡散状況を図-5, 図-6 に示す. 原油は格子状に配置した円形氷盤の間の水面を伝わって拡がった. なお, 氷盤間の間隔に多少ばらつきがあったため, 油膜は間隔が広い部分から早く拡散した. 原油は注入停止後も広がりつづけるが, 間隔が 5mm 以下の場所では拡散が停止した(図-6). また, 設置した氷盤群範囲外の開水面への拡散も見られた. この時, 原油は開水面の場合のような急激な拡散はせず, 安定した状態となった(図-7).

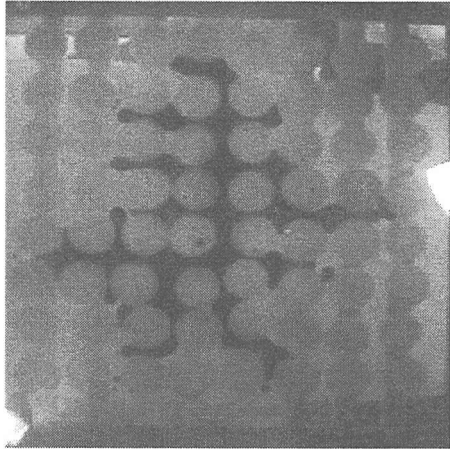


図-5 密接度 60%(注入停止直後,開始 80 秒後)

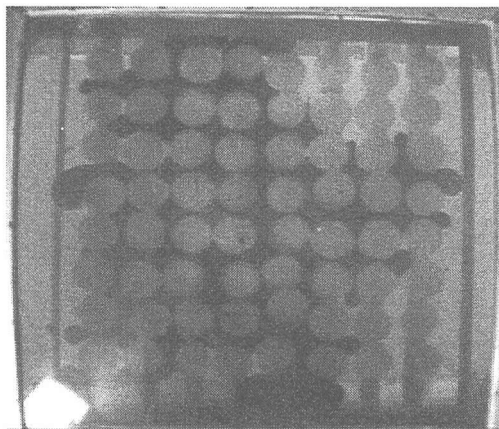


図-6 密接度 60%(注入停止直後,開始 40 分後)

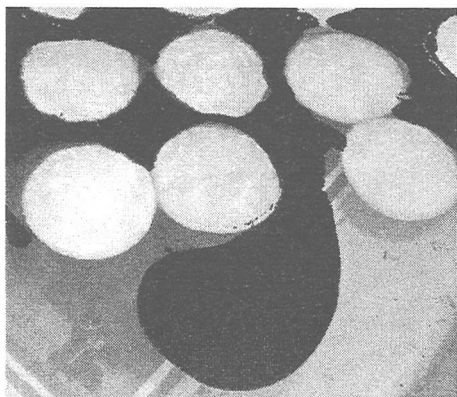


図-7 氷盤群外への拡散

## (3) Case3 (密接度 90%)

密接度 90%の場合では, 油の流量, 注入量を変えた 2つのケースで実験を行った. Case3-2 は Case3-1 に比べ流量を大幅に増加させ, かつ注入量を大きくした条件で実験を行った. Case3-1, Case3-2 における拡散状況を図-8, 図-9 に示す.

油量および流量を小さくした Case3-1 では, 流出油は円形の氷盤同士が接している部分の上を乗り越えて, 徐々にとなりの開水面部分に流れ出した. 氷盤に囲まれた開水面部分が油で一杯になると, また氷盤の接合部分を乗り越えることを繰り返しながら拡がった(図-10). この間, 油は氷盤の下面に滞留することはなく, 常に開水面部分にたまった状態であった.

油量および流量を大きくした Case3-2 では, はじめ流出点近傍の開水面部分から油が氷盤上にあふれ出して氷盤の上を覆いながら拡がった. その後, 油膜の辺縁部は Case3-1 と同様に, 氷盤同士が接している部分の上を乗り越えて隣の開水面部分へと徐々に拡がっていった. 図-9 において氷盤部分が黒く覆われているところが, 油が氷盤上を覆っている部分である.

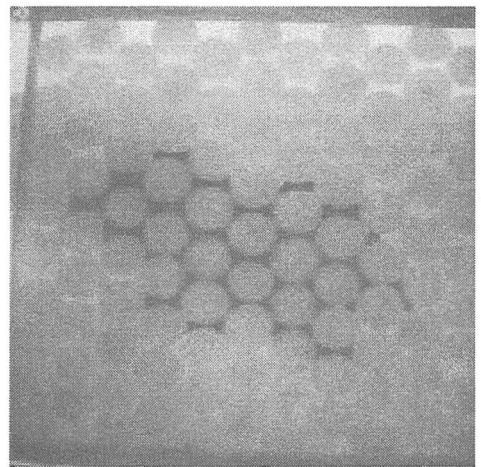


図-8 Case3-1(1 時間後)

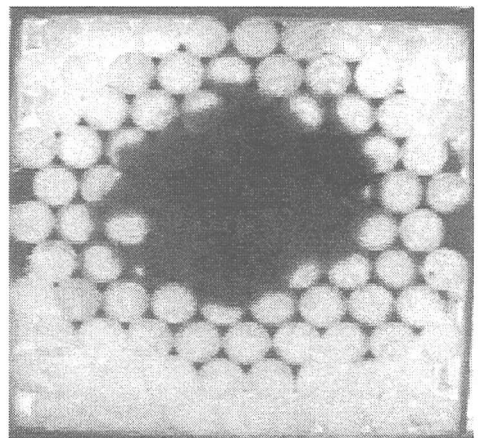


図-9 Case3-2(90 分後)

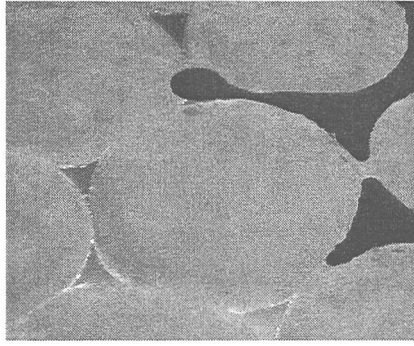


図-10 原油が氷盤間を伝わる様子(Case3-1)

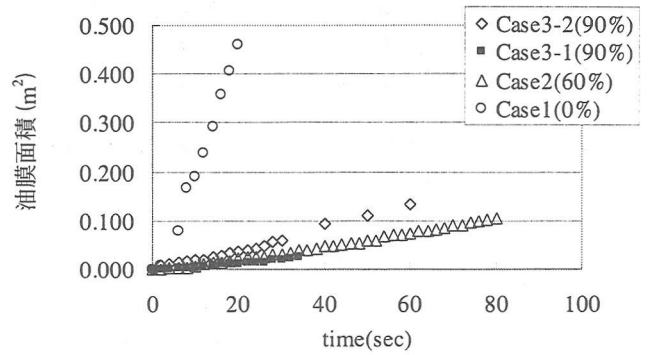


図-11 定流量状態の油膜面積の比較

#### 4. 考察

##### (1) 流量一定モード

油の流出実験において一定流量にて油を注入している間と、注入を終了し体積が一定となった状態では、油が拡がる条件および挙動は異なる。そこで、それぞれの状態を順に流量一定モードおよび体積一定モードと呼び、各モード別に油の挙動を整理する。

各ケースにおける注入速度は表-1 に示す通りである。図-11 に、流量一定モードにおける油膜面積の時間変化を示す。油膜面積は、ビデオカメラにより撮影されたデジタル画像のピクセル数を数えることにより算出した。油膜の面積はほぼ一定の速度で時間に比例して拡大した。密接度 0%時の油膜面積の拡散速度は、氷盤群がある状態に比べ約 10 倍と非常に大きなものとなった。また、密接度 90%の Case3-1, Case3-2 を比較すると、流量の大きかった Case3-2 の方が油膜の拡がりやすくなった。

図-12 は、流量一定モードでの油層厚さの時間変化を示す。原油注入直後に多少変動があるものの、その後はほぼ一定の厚さを保ったまま拡散している事が確認された。

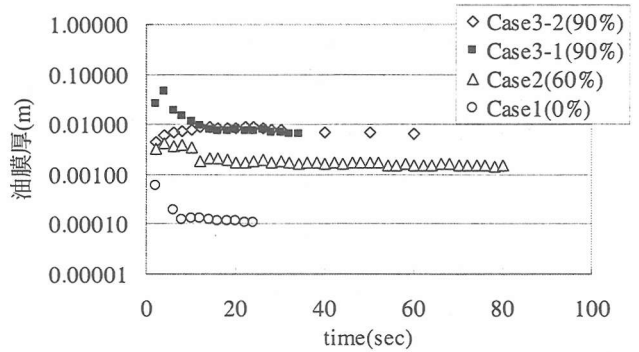


図-12 定流量状態の平均油膜厚の比較

##### (2) 体積一定モード

体積一定モードにおける油膜面積の変化を図-11 に、この間の油膜厚変化を図-12 に、最終的な平均油膜厚を表-2 に示す。原油の注入が終了した後も油膜はゆっくりと拡がり続けるが、最終的には油膜面積は一定値になった。また油量の同じ Case2 と Case3-1 を比較すると、密接度が高い Case3-1 の方が拡がりの面積は小さくなっていることがわかる。

平均油膜厚は時間の経過とともに薄くなり一定値に収束した。最終的な油膜厚は、氷盤が存在し、かつ密接度が高いほど大きくなった。氷盤が存在する場合の油膜厚は、密接度 90%の Case3-1, 3-2 では氷盤のない Case1 の約 60 倍、密接度 60%の Case2 では約 10 倍の厚さとなった。

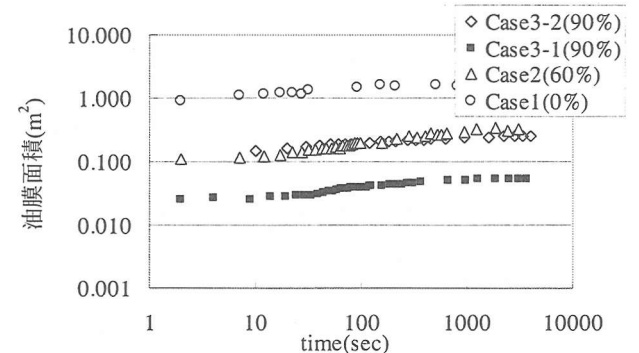


図-13 定体積状態の油膜面積の比較

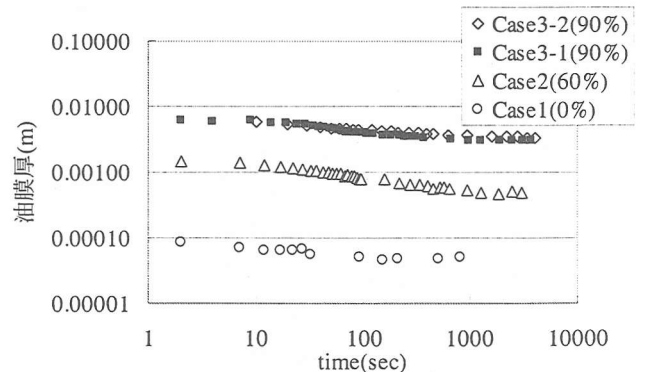


図-14 定体積状態の平均油膜厚の比較

表-2 最終油膜厚

Case	密接度	油膜厚
Case1	0%	0.05mm
Case2	60%	0.5mm
Case3-1	90%	3.0mm
Case3-2	90%	3.3mm

### (3) 相似則について

自由水面に流出した油の拡がりのモデルとして、Fay(1971)<sup>9)</sup>は現象を3つの段階に整理して考察した。油の流出直後は、油膜は厚く、浮力が拡がりを加速し、慣性力がそれを遅らせる力として支配的となる(第1段階)。時間とともに油膜が薄くなると、次には粘性力が拡がりを遅らせる力として支配的となる(第2段階)。さらに油膜が薄くなるにつれて、表面張力と粘性力が支配的な力になる(第3段階)。

また、平坦な氷盤の下に流出した油の場合については、Yapa and Chowdhury (1990)<sup>6)</sup>が、Fayによる拡がりの理論をもとに、界面張力と浮力のつり合いによって拡がりが終結するモデルにより、油膜の広がり終息する時の半径およびその時間を求める解を示した。

このような海上油流出に関するモデル化や実験プロセスにおいて、実際の流出と実験・研究スケールの関係はきわめて難しい問題である。理想的には、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。すなわち、油の拡がりの第1段階ではフルードの相似則を適用できると考えられるが、粘性力が主体となる第2段階ではレイノルズ数の一致を、また表面張力が主体となる第3段階ではウェーバ数の一致をはかることが必要となると考えられる。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、流出油量、油の粘度、油と海水や氷盤との界面特性などを取り扱うことは容易ではない。

そこで本研究では、実施した実験は小さな規模の実際の流出であると捉えている。この拡散実験における油の拡がりのプロセスの中に、実際の流出時における基本的な物理現象のいくつかが含まれており、これを実際の流出事例等と比較検証することによって、氷群中での油の挙動の概要を検討することができると考えられる。

### (4) 現地実験との比較

カナダで行われた実規模の実験(Buist et al)<sup>4)</sup>では、氷盤密接度が大きくなると油の拡散範囲が抑えられることを報告している。この現地実験では、本研究とほぼ同等の粘度の原油が使用されており、流出油の厚さは密接度約50%の実験時に0.04~0.2mm、ただし実験終了時においてもまだ油膜は拡がる傾向を示しており、最終的な厚さはさらに小さくなった

可能性があると考えられる。また密接度90%の実験時には氷盤の間に多くのスラッシュアイスが存在し、油膜厚さは1.5cm~3.0cmであったことを報告している。これは、油が連続氷盤の下に拡がる場合と同程度の厚さに相当している<sup>7)</sup>。また、氷盤と油は一緒に移流したことが報告されている。なお現地実験時の氷盤の大きさは4~28m、氷厚0.5~1.6m程度であった。

オホーツク海南部における流水の形状を確認した報告はまだ少ない。これまでの研究によれば、氷盤の直径では約100mのもの比率が大きく(Toyota and Enomoto, 2002)<sup>8)</sup>、また氷厚は平均して約0.5m程度(Uto and Shimoda, 2000)<sup>9)</sup>であったことが報告されている。したがってBuistらの実験条件は、概ねオホーツク海の場合にも当てはめられると思われる。

Buistらの現地実験と本研究における実験を比較すると、氷盤密接度は同等であっても、実際の流水群では氷盤同士の間隔はより大きくなる。しかし密接度が大きくプール状の開水面を相互につなぐ部分が狭くなると、室内実験と現地の条件の差は縮小してくと考えられる。

密接度がほぼ同程度であったCase2と上記の現地実験結果では、油膜厚さは同程度のオーダーとなっている。また密接度90%の実験における油膜厚は、スラッシュアイスの存在により現地実験の方が非常に大きな値を示した。

## 5. 結論

密接度を変えた模型氷盤群中にイラニアンライト原油を流出させる実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 氷盤の密接度が高く開水面は氷盤に囲まれて孤立している場合、油は円形氷盤同士の接合部の上を越えて隣の開水面へと順次拡がっていった。この際、実験に用いた原油の密度は氷盤の密度よりも小さいため、氷盤間の開水面に溜まった油の量が増えて厚さが増大すると、油層の下面が氷盤下面よりも深くなる前に、氷盤接合部の上を越えて油が流れ出したと考えられる。
- 2) 密接度が低く氷盤同士が接していない場合、油は氷盤同士の間隙を通じて拡がった。ただし間隙の幅が小さなおくところでは、油の拡がりが停止した。
- 3) 氷盤が無い状態での流出実験では、油膜の厚さは約0.05mmとなったのに対し、氷盤のある場合は0.5~3.3mmとなった。このように、油膜の厚さは氷盤が存在することによって厚くなり、拡散する範囲は非常に小さくなることを確認した。

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) Yapa, P. D. and Weerasuriya, S. A. "Spreading of Oil Spilled under Floating Broken Ice." Proc. Journal of Hydraulic engineering, Vol.123, No8, pp.676-682, 1997.
- 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) Sayed, M. and Ng, M. S. "Crude oil spreading in brush ice." Rep. NO. 6B3017.3, 1993.
- 4) Buist, I.A. and Bjerkelund, I., "Oil in pack ice; preliminary result of three experimental spills ", Proc. 9<sup>th</sup> Arctic Oil Spill Program, pp.379-397, 1986.
- 5) Fay, J. A. "Physical processes in the spread of oil on a water surface." Proc. Joint Conf. on Prevention and Control of Oil Spills, pp463-467, 1971.
- 6) Yapa, P, D and Chowdhury, T "Spreading of oil spilled under ice", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.116, No.12, pp.1468-1483, 1990.
- 7) 荻原浩二, 大塚夏彦, 米田克幸, 高橋伸次郎, 金編康平, 佐伯浩: 氷盤下における流出油の挙動に関する実験的研究, 寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.322-328, 2001.
- 8) Toyota, T. and Enomoto, H., "Analysis of the sea ice floes in the southern Sea of Okhotsk using ADEOS/AVNIR images", Proceedings of The 17th International symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, pp.150-156, 2002.
- 9) Uto, S. and Shimoda, H., "On the Sea Ice Properties in the Southernmost Part of the Sea of Okhotsk by the Ship-based Observations", The 15th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, The 2<sup>nd</sup> Ice Scour & Arctic Marine Pipelines Workshop, pp.142-148, 2000.