

Pack Ice Field の下に流出した原油の回収方法 に関する基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON RECOVERY METHOD OF SPILLED OIL TRAPPED UNDER PACK ICE FIELD

大塚夏彦¹・宇佐美宜拓²・荻原浩二³・高橋伸次郎⁴・佐伯 浩⁵
Natsuhiko OTSUKA, Norihiro USAMI, Koji OGIWARA, Shinjiro TAKAHASHI
and Hiroshi SAEKI

¹正会員 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11-18)

²正会員 北電興業株式会社 (〒060-0031 札幌市中央区北1条東3丁目1番地)

³学生 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)

⁴正会員 株式会社西村組 (〒099-64 北海道紋別郡湧別町栄町)

⁵フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Development of oil and natural gas deposits off Sakhalin's northern coast in the Sea of Okhotsk is currently under way. An accident involving a spill of crude oil or other effluents during the current development of the oil and natural gas deposits off the eastern coast of northern Sakhalin could be expected to affect the environment and economy of the Hokkaido's Okhotsk and Pacific coast. This paper describes a recovery method for spilled oil under a pack ice field established through a systematic experiment.

Key Words: Oil spill, ice floe, pack ice field, recovery method

1. はじめに

オホーツク海は流氷に覆われる、北半球で最も南の海である。このオホーツク海のサハリン東部沿岸において、1999年に原油生産が開始された。これにともない、オホーツク海における原油流出事故が危惧されている¹⁾。実際1999年9月、海底パイプラインから貯蔵タンカーへつながる送油管が波浪によって脱落し、小規模の原油流出事故が発生した。もし、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、流出原油は浮上して流氷の下面に沿って広がる。氷盤の存在によって油は空気にはふれないため、蒸発は進まない。また氷盤によって波浪が低減されるため、乳化も遅れる²⁾。水温が低く氷盤が成長すると、流出油は氷の中にサンドイッチされ、その後油の一部はブラインチャンネルやエアポケットを通じて氷の中に浸透する。このため、流出油の回収作業は非常に困難となる。

著者らはこれまで、平坦な氷盤の下に広がった原油について、海水と氷盤に相対速度を与えることにより氷盤から油膜を分離する方法の研究を行ってきた^{3,4)}。しかしオホーツク海沿岸にやってくる流氷のようなPack Iceの下面は、氷盤厚の違いや複雑な下面の形状による凹凸、

氷盤同士の間など、多数の凹部を形成する。このような氷盤の下に原油が流出すると、原油は広がりながら次第に凹部に滞留するようになると考えられる。この氷盤凹部にトラップされた油を氷盤から分離する効果的な方法は、まだ知られていない。

本論文は、Pack Ice 下面の凹部にトラップされた流出原油を氷盤から分離するために、氷盤と海水に相対速度を与えた時の油の挙動を確認すると共に、空気泡を用いて凹部にトラップされた油を移動・除去する方法について実験的に検討したものである。

2. 氷盤下に流出した原油と氷盤の分離方法

(1) 平坦な氷盤の下に流出した原油の場合

これまでの研究において、著者らは、氷盤を引っ張って海水との間に相対速度を与えることにより、平坦な氷盤の下に流出した油を氷盤から分離する実験を行った⁴⁾。これより、図-1に示すように速度 V_i で移動する平坦な氷盤の下の油膜には、氷盤と油膜の間の静止摩擦力(F_{s0})、氷盤と油膜の間のせん断抵抗力(F_{s0})、水と油膜の間のせん断抵抗力(F_{ow})が作用する。このとき、単位幅あたりの力のつり合い式および運動方程式は式(1)、式(2)となる。

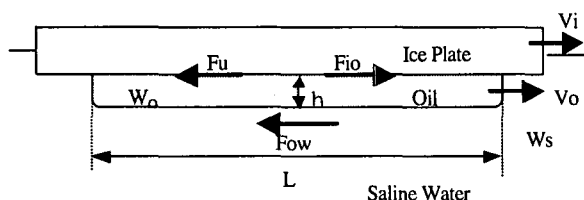


図-1 平坦な氷盤下の油膜に作用する力

$$F = F_{io} - F_u - F_{ow} \quad (1)$$

$$F = m \cdot \frac{dV_o}{dt} = \rho_o \cdot h \cdot L \cdot \frac{dV_o}{dt} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} F_u &= h \cdot L \cdot (W_w - W_o) \cdot \mu \\ F_{os} &= \frac{W_w}{2g} \cdot C_{ow} \cdot V_o^2 \cdot L \\ F_{io} &= \frac{W_o}{2g} \cdot C_{io} (V_i - V_o)^2 \cdot L \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、

F_{io} : 氷盤と油膜の間のせん断抵抗力(kN)

F_{ow} : 水と油膜の間のせん断抵抗力(kN)

F_u : 氷盤と油膜の間の静止摩擦力(kN)

ρ_o : 油の密度 (t/m^3)

V_o : 油の速度 (m/s)

V_i : 氷盤の速度 (m/s)

h : 油層の厚さ (m)

L : 氷盤の長さ (m)

μ : 油と氷盤の摩擦係数

W_w : 海水の単位体積重量 (kN/m^3)

W_o : 油の単位体積重量 (kN/m^3)

C_{ow} : 油と水のせん断抵抗係数

C_{io} : 氷盤と油のせん断抵抗係数

油膜が氷盤と異なる速度で動き出すときの氷盤の速度 V_i は式(4)となる。これと式(3)より、氷盤下面の油膜が氷盤から分離する氷盤速度 V_i は、式(5)で与えられる⁴⁾。

$$\frac{d(V_i - V_o)}{dt} = - \frac{dV_o}{dt} \quad (4)$$

$$V_i^2 \geq \frac{2gh \left(\frac{W_w}{W_o} - 1 \right) \mu}{\frac{W_w}{W_o}} \left(\frac{W_w}{W_o} \cdot \frac{1}{C_{io}} - \frac{1}{C_{ow}} \right) \quad (5)$$

粘度 $0.1 \sim 19 \text{Pa} \cdot \text{s}$ のギアオイルを用いた実験より、せん断抵抗係数は $C_{io} = 0.011 \sim 0.016$ 、 $C_{ow} = 0.0183 \sim 0.0215$ (平均 0.0196) が得られた。また油膜が氷盤から分離するときの氷盤速度は $4 \sim 30 \text{cm/s}$ であった。氷盤と油の間に空

気層を設けると、空気層が無い場合よりもはるかに小さな速度で油膜を分離できることを明らかにした。

(2) Rubble Ice Field の場合

オホーツク海の流氷のような Pack Ice Field の場合、氷盤の下面は多数の凹凸があるため、水中で流出した原油は氷盤の凹部にトラップされる。この場合、氷盤から油を分離するためには、油膜を凹部の段差を乗り越えて移動させる必要がある。油膜をトラップした氷盤を速度 V_i で引っ張って移動させた場合、油膜と水の間にはたらくせん断応力(F_{ow})によって油膜と水の境界面には勾配が生じ、厚さ h は下流側に向かって厚くなる。

一様な流速 V の中の油膜面に作用するせん断応力 τ_o は式(6)となる。油膜面を勾配 I に保つために必要なせん断応力 τ_f は、境界面にはたらく浮力・水圧のつりあいより、式(7)となる。両者を等しいとおくことにより、油層と水の相対速度 V と油膜の勾配 I の関係が式(8)のように得られる。氷盤と水の相対速度が大きくなるにつれて油膜の勾配も大きくなり、下流側の油膜厚さが凹部の段差より大きくなれば、油は段差を乗り越えて流れ出すと考えられる(図-2(a))。

$$\tau_o = C_{ow} \frac{\rho_w (\alpha V)^2}{2} \quad (6)$$

$$\tau_f = (\rho_w - \rho_o) g h \sin \theta = (\rho_w - \rho_o) g h I \quad (7)$$

$$V^2 = \frac{2}{\alpha^2} \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) \frac{1}{C_{ow}} g h I \quad (8)$$

ここに、

V : 流速 (m/s)

α : 流速の係数

ρ_w : 海水の密度 (t/m^3)

I : 油膜下面の勾配

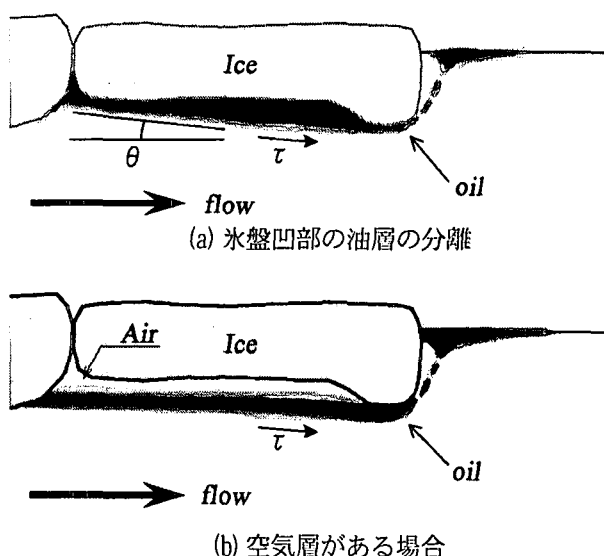


図-2 氷盤凹部にトラップされた油の分離

Pack Ice Field では、氷盤の凹部が深い場合や流れに沿う方向の油膜長さが小さい場合が予想されるため、油膜の厚さ h が段差を越えやすくなるほど厚くならないことが考えられる。油が段差を越えやすくするためには、水中より気泡を噴出して油膜と氷盤凹部の間に空気層を形成することにより、油層を下方に押し出して段差を小さくすることが考えられる。さらには、空気量を増加させることにより、せまい凹部から油を押し出すことができる可能性がある。（図-2(b)）

3. 実験

(1) 海水と原油の代替材料の実験

(a) 実験-A：接触角

実験で用いる海水の代替材料を定めるため、氷および代替材料の板と原油の接触角 θ_c を、塩水(3%)を入れた水槽-A（縦 40cm、横 72cm、深さ 25cm）の中で計測した（写真-1）。氷盤の代替材料として、木材・スチール・アルミ・チタン・ステンレス・テフロン、および粗度を変えた4種のすりガラス板を用いた。原油にはイランアンライトを用いた。

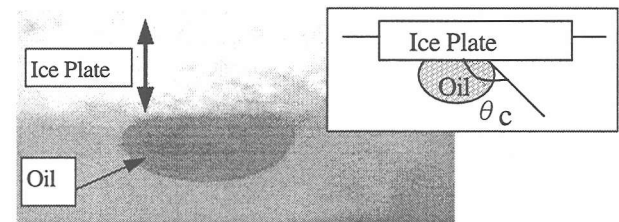


写真-1 接触角の測定

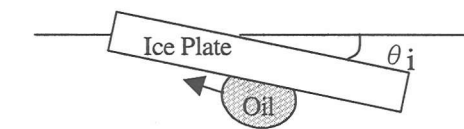


図-3 傾斜角

(b) 実験-B：傾斜角

原油の代替材料を選定するための実験を行った。実験は、 -2°C の塩水(3%)を入れた水槽-A中に置いた模型氷盤を傾斜させ、その下にトラップされた油滴が動き出す角度を計測した。原油としてイランアンライト、代替材料油としてISO-10、32、100のギアオイルを用いた。模型氷盤には、氷、およびすりガラス板を用いた。油量は、2ml、5ml、10mlの3ケースについて実施した（図-3）。

(c) 実験-C：油膜厚さ

原油およびギアオイルを用いて、氷盤およびすりガラス板の下に広がった油膜の厚さを計測した。実験は、 -2°C の塩水(3%)を入れた水槽-A中に氷板、およびすりガラス

板を設置し、その下に 50ml の油を注入し、拡散がほぼ終息した後に（約 1 時間後）上方より油膜面積を計測して厚さを計算した。油の種類は実験-B に同じ。

(2) 実験-D：Pack Ice 下面にトラップされた油の分離実験

(a) 実験装置

氷盤と海水に相対速度を与えた場合に、凹部にある油と海水の挙動を確認するための水槽実験を行った。実験には、長さ 11m、幅 0.6m、深さ 0.5m の循環型水槽を用いた。水槽にはインバーターによって流量を調節できるポンプがついており、下のタンクから水を水槽に流して、流れを発生させることができる（図-4）。

水の代替材料として選定したすりガラス板を用いて、氷盤下面の凹部の模型を2種類製作した。CASE-A は、流れと凹部にトラップされた油膜の挙動を確認することを目的としている。模型氷の形状は幅 30cm 長さ 100cm で、上流側の段差 1.5cm、下流側の段差 2.5cm とした（図-5）。CASE-B は、凹部の段差を乗り越えて油が移動する際の特徴を確認することを目的としている。模型氷の形状は幅 30cm 長さ 120cm で、上流側から順に 2.5、2.5、3.3、5.0、3.3、2.5、2.5cm の高さの板で段差を設けている（図-6）。段差の流れ方向の間隔は 20cm とした。

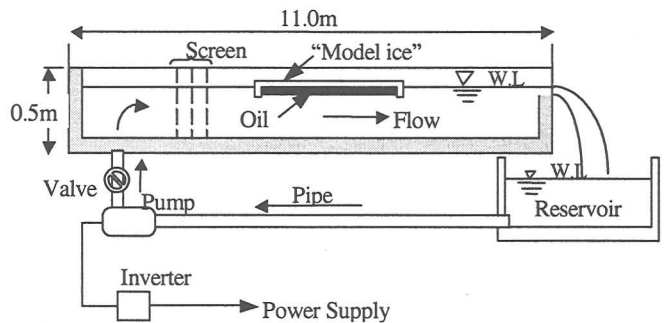


図-4 実験水槽

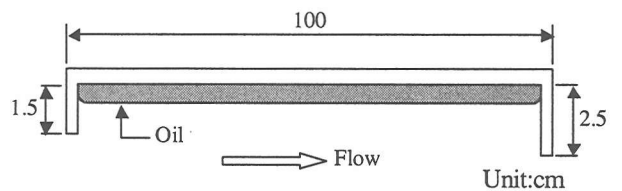


図-5 模型氷盤 A (CASE-A)

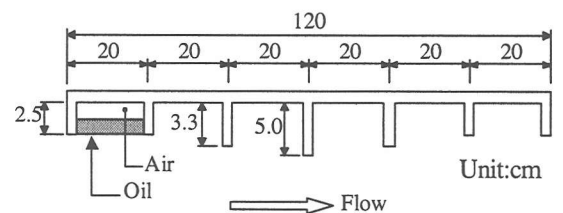


図-6 模型氷盤 B (CASE-B)

(b) 実験方法

まず、模型氷を凹部を下にして水面近くに固定し、その下面にギアオイルを注入して油層を設けた。インバーターで制御されたポンプを起動して水槽水に5~19cm/sの流速を与えた。これにより、模型氷と水の間に相対速度を発生させ、油膜の厚さ h 、油膜の挙動、流速を計測した。

実験時の水温と油温は10℃とし、ISO 粘性グレード 10 のギアオイルを使用した。これは、油温 10℃におけるギアオイルの粘度(0.034Pa・s)が、イラニアンライト原油が冬期オホーツク海の平均的水温-2℃で示す粘度(0.035Pa・s)と同等であったことによる。

CASE-A では、模型氷-A の凹部に油層厚が0.5cm となるように油を注入した。平均流速は5.4, 8.5, 14.0, 18.0cm/s とし、それぞれの流速において油膜厚さを計測した。また、粘度による影響を調べるため、ISO-100 のギアオイル(0.7Pa・s)についても実験を行った。

CASE-B では、模型氷-B の6カ所の区切りのうち、最も上流側の区画に油を厚さ0.5cmの厚さで注入した。油層が形成された後、水中から空気泡を放出した。油層の上の空気層厚さは、0.5, 1.0, 1.5cm とし、それぞれについて流速を変化させて油の挙動を確認した。その後さらに空気量を増大させて、油を凹部から除去できるか確認する実験を行った。

4. 実験結果と考察

(1) 代替材料の選定

原油と氷の接触角 θ_c が146°であったのに対し、ガラス板のみが氷に近い θ_c を示し、それ以外は $\theta_c < 90^\circ$ となり、油が板に付着する結果となった。さらに、ガラス板の表面の粗度を変えて実験を行って、氷と最も近い特性のガラス板を選定した。選定したすりガラス板への接触角を表-1に示す。このガラスを用いて傾斜角を計測した結果を表-2に示す。ISO-10 ギアオイルと選定したガラス板の関係は、原油と氷板の場合とよく一致していることより、原油代替材料に ISO-10 ギアオイルを使用することにした。表-3に、-2℃の塩水中で、氷板およびガラス板の下に広がった原油とギアオイルの油膜厚さを示す。ISO-10 ギアオイルと原油の油膜厚さはほぼ同じとなった。

表-1 接触角の実験結果

Oil	氷板 (°)	選定したすりガラス (°)		
		2ml	5ml	10ml
原油	146	142	138	137
ISO-10	141	141	135	142
ISO-32	154	154	150	145
ISO-100	162	162	152	134

表-2 傾斜角の実験結果

油 種	氷 板 (°)	選定したすりガラス (°)		
		2ml	5ml	10ml
原 油	3.72	10.7	6.8	5.2
ISO-10	1.86	3.9	4.5	2.7
ISO-32	3.15	3.5	3.4	3.5
ISO-100	3.17	4.7	4.5	3.2

表-3 油層の厚さ

油 種	動粘度 at 10℃ (Pa・s)	油層厚さ (cm)	
		氷板	選定した すりガラス
原 油	0.035 (-2℃)	0.84	0.77
ISO-10	0.034	0.57	0.56
ISO-32	0.284	0.71	0.57
ISO-100	0.700	0.68	0.73

(2) 実験-D

(a) CASE-A

氷盤凹部にトラップされた油と水の間に、流れによる相対速度を与える実験を行った結果、油膜の下面には勾配が生じ、流速の増加にしたがって勾配は大きくなることが確認された。油膜の挙動を図-7に示す。流速が14cm/s以上になると、上流側から下流側へと進行する波動が、油膜との境界面に発生した。流速を増加すると、勾配の増大と波動により、油の一部が下流側の段差を越えて下流側水面に流れ出した。しかし、凹部にトラップされた油を完全に除去することはできなかった。流速の変化にともなう油膜厚さの変化を図-8、図-9に示す。

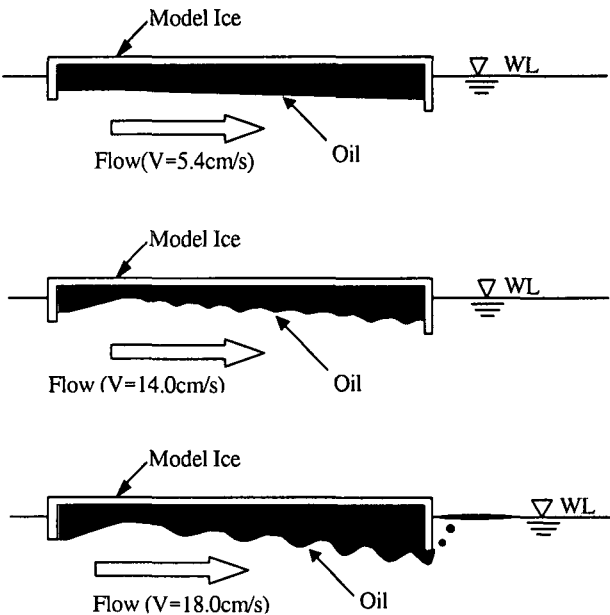


図-7 油膜-水間の界面の状況

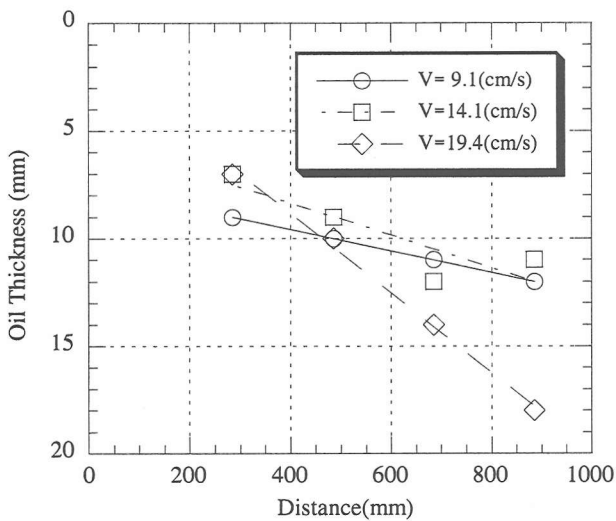


図-8 油膜厚さと流速 (ISO-10)

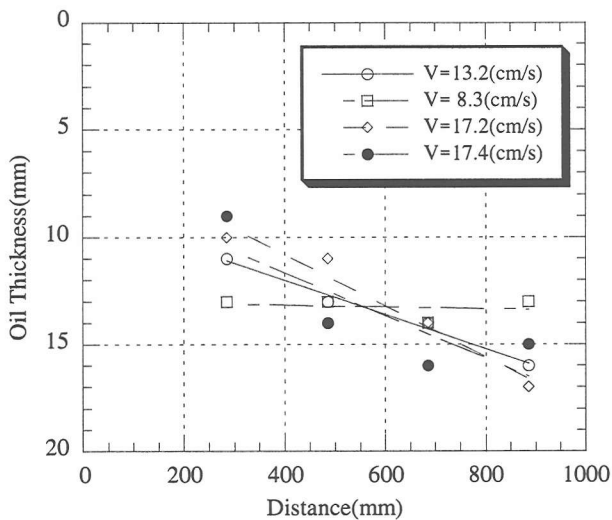


図-9 油膜厚さと流速 (ISO-100)

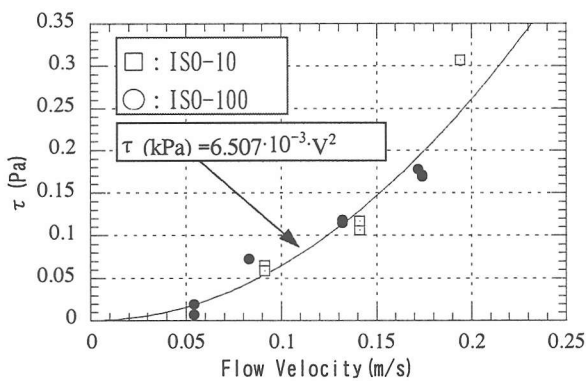


図-10 平均流速とせん断応力

図-10 は、計測した平均流速と、式(7)に油膜の勾配を代入して算定した油膜下面にはたらくせん断応力 τ との関係を示したものである。ここに油と海水のせん断抵抗係数 C_{ow} は 0.0196 とした³⁾。図-10 より、ISO-10、ISO-100

のギアオイルの結果に違いは見られないことから、実験した範囲では、油の粘性の影響はないと考えられる。

図-10 中の近似式(9)は、最小 2 乗法を用いてせん断応力と平均流速の関係を求めた 2 次曲線である。これと式(6)を比較して平均流速の低減係数 α を計算した結果、0.815 となった。

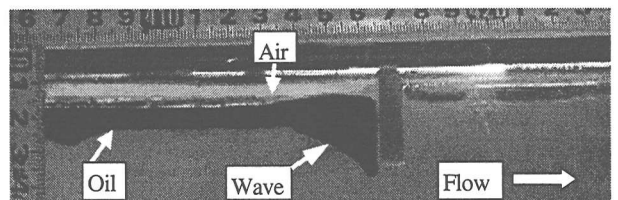
$$\tau = 6.507 \times 10^{-3} \times V^2 \text{ (kPa)}, \quad R = 0.95 \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= C_{ow} \frac{\rho_w (\alpha V)^2}{2} = 0.0196 \frac{\rho_w (0.815 \times V)^2}{2} \\ \alpha &= \left(6.507 \times 10^{-3} \times \frac{2}{C_{ow} \rho_w} \right)^{1/2} = 0.815 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

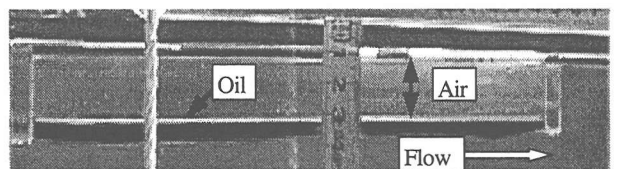
(b) CASE-B

油膜の下から空気泡を噴出させると、気泡は油膜層を通過してガラス板と油膜の間に空気層を形成した。また、油はガラス板には付着せず、凹部全体に安定した空気層が形成された。流速を増大させると、油膜下面の勾配が増大するとともに、油膜下面に波動が発生した。しかし油膜と空気層の境界面には勾配は発生しなかった。実験中の油膜の様子を写真-3 に示す。

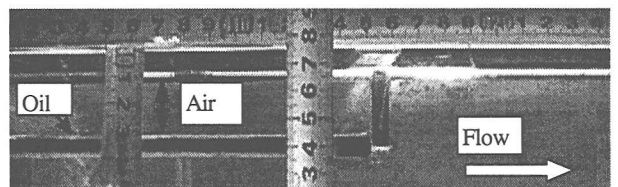
空気層の厚さを増大させることにより、凹部の段差は相対的に小さくなり、油は容易に段差をこえて下流へ流出するようになった。空気量をさらに増大させると、空気層は徐々に油と置き換わり、最終的には凹部のほとんどの油が空気層に押されて段差を越えて流れ出した。



(a) 油膜下面の波動



(b) 空気層と油膜 (空気 20mm、流速 14cm/s)



(c) 空気層と油膜 (空気 20mm、流速 14cm/s)

写真-3 空気-油-水の界面

5. 結論

- 1) Pack Ice 下面の凹部にトラップされた油層と水の間に相対速度をあたえることによって、油層厚には上流側で薄く、下流側で厚くなる勾配が生じる。流速を増大させると下流側の油層厚が増大し、徐々に段差をこえて流れ出すようになる。また、油層と水の境界面に波動が発生し、これが流れの方向に進行して段差を乗り越えるようになる。しかし、凹部にトラップされた油を完全に除去することは困難であることを確認した。
- 2) 実験結果をもとに水の流速および水と油層の間に働くせん断応力、油層下面の勾配の関係を示した。
- 3) 氷盤凹部にトラップされた油層の下から空気泡を噴出すると、気泡は油膜層を突き抜けて氷盤下面と油膜の間に空気層を形成し、油膜と凹部の段差を小さくすることができた。水と油層の間に相対速度を与えながら空気量を増大させることにより、トラップされた油のほとんどを凹部から下流側外部に押し出すことができた。
- 4) 氷盤の下に流れがある場合には、氷盤の移動を押さえ

て海水との間に相対速度を発生させると同時に、空気泡を放出することによって、凹部にトラップされた原油を氷盤から分離できる可能性がある。

参考文献

- 1) 大塚夏彦, 宇佐美宣拓, 荻原浩二, 多田英彦, 佐伯浩: オホーツク海における原油流出事故被害の予測, 日本沿岸域学会論文集, No.12, 2000.
- 2) Yapa, P, D, Chowdhury, T: Spreading of oil spilled under ice, Journal of Hydraulic Engineering, Vol..116, No.12, pp.1468-1483, 1990.
- 3) 大島香織, 宇佐美宣拓, 高橋伸次郎, 河合邦広, 大塚夏彦, 渡辺靖憲, 佐伯浩: 流氷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, 宇佐美宣拓, 高橋伸次郎, 佐伯浩: 寒冷地海洋における流出原油の変質過程と回収方法, 日本沿岸域学会論文集, No.11, pp.85~94, 1999.