

流氷下に流出した原油の回収方法に関する基礎的研究 Development of Recovery Methods for Spilled Oil under Ice Floes

大島 香織* 宇佐美 宣拓* 高橋 伸次郎** 川合 邦広**
Kaori Ohshima, Norihiro Usami, Shinjiro Takahashi, Kunihiro Kawai
大塚 夏彦*** 渡部 靖憲**** 佐伯 浩****
Ohtsuka Natsuhiko, Yasunori Watanabe, Hiroshi Saeki

ABSTRACT

Development of oil and natural gas deposits off Sakhalin's northern coast on the Sea of Okhotsk are currently under way. Should an accident involving a spill of crude oil or other effluents occur during the development of the oil and natural gas deposits that is currently under way off the eastern coast of northern Sakhalin, it can be expected to have an impact on the environment and economy of the Hokkaido's Okhotsk Sea and Pacific Ocean coast. This paper describes the recovery method for spilled oil under ice floes through the systematic experiments.

Keywords: spilled oil, the recovery method, under ice floes, the Sea of Okhotsk

1. はじめに

オホーツク海のような寒冷海域では、流氷に覆われた海洋に原油が流出すると、通常海域とは異なった挙動を示す。氷盤下面に原油が流出すると、波浪も振幅の小さい長周期波となるため、劣化もなく、氷盤下に存在するため揮発や変質も小さく、生物分解もされにくいと言われている。その反面、揮発成分の持つ毒性の影響を受けることになり、また、氷盤下面にトラップした原油層の下海水の結氷も起こり、原油をトラップしたサンドイッチ状の氷盤を形成する可能性もある。よって、被害を最小限に押さえるために、原油流出後直ちに回収できるような方法の開発が必要となる。

今まで氷海域における石油・ガス開発の事例としては、アラスカのクック湾、北極海のボーフォート海、スカンジナビア半島北部バレンツ海等であり、小さな流出事故はしばしば起こっていると言われている。サハリン沖の開発では、地震帯にも近く、流れも早く、氷の運動も活発であることから、流出事故が発生すると、東カラフト海流と冬季節風により、流氷とともに一気に南下し、北海道のオホーツク海沿岸に大きな環境・経済インパクトを与える危険をはらんでいる。

以上の観点から本研究では、氷盤下における原油の基本的性状を明らかにするとともに、流氷下面にトラップされた流出原油の回収方法開発の基礎的研究を行ったものである。

2. 原油の代替材料の調査

今回実験では、サハリン沖原油に特性が類似しているイラン原油（イラニアン・ライト）を用いて行った。しかし、イラン原油は、揮発成分を30%以上含んでいることから分かるように、取り扱いが危険であり毒性を含んでいる。また、時間が経過するとともにその物性も変化する。そこで、実験の安全性を高め、系統的な実験を行うために、原油に変わる代替材料を用いることを考えた。ここで我々は代替材料として粘度の異なる4種類のギアオイル（ISO粘度グレード10, 32, 100及び460）を選択し実験を行った。

2. 1 密度・粘度の測定

2. 1. 1 密度・粘度の測定方法

原油及び代替材料の密度は、石油密度計を用いて測定することにより求めた。また粘度は、ビスコテスター（回転円筒形粘度計、測定範囲0.002～400 Pa・s）を用いて測定した。また、どちらの測定も流氷期の海水中における温度を想定して、室温-2℃と10℃で測定を行った。

2. 1. 2 実験結果

まず、イラン原油の密度の温度特性を測定した結果が、図-1である。これより、イラン原油は温度が上がると密度が減少するという性質が明らかとなった。

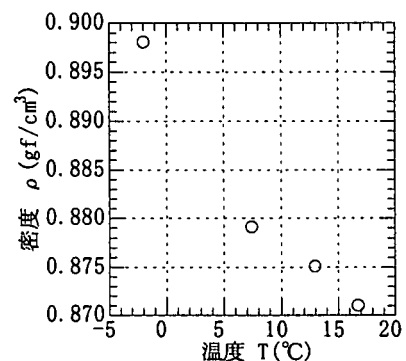


図-1 イラン原油の温度Tと密度ρの関係

*	学生会員	北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北13条西8丁目)
**	正会員	(株)西村組
***	正会員	北日本港湾コンサルタント
***	正会員	北海道大学工学部

また、原油と他の代替材料との密度と粘度を測定したものが表－1である。

表－1 原油と代替材料の密度 ρ と粘度 η

ISO粘度グレード	平均密度 ρ (gf/cm ³)		平均粘度 η (dPa·s)	
	T=-2℃	T=10℃	T=-2℃	T=10℃
10	0.874	0.867	0.81	0.272
32	0.88	0.873	4.1	2.84
100	0.895	0.892	20	6.95
460	0.912	0.906	190	35
原油	0.898	0.879	4.9	0.53

この結果より、流氷期の海水温に近い水温－2℃において、イラン原油に最も近い材料としてISO 粘度グレード 32 ギャーオイルが考えられる。

2. 2. 1 接触角・傾斜角の測定

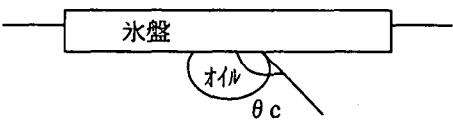
海氷盤と原油及び代替材料間の付着特性を知るために、二つの方法で系統的な実験を行った。一つは、海水中の海氷とその下面の原油及び代替材料の接触角の測定である。この接触角は、氷盤と諸材料間の表面活性エネルギーに起因する付着の強さを表す指標である。

もう一つは、海水中に浮かべた矩形氷盤下面に原油等をトラップさせ、氷盤をゆるやかに傾斜させて原油等が移動する時の氷盤の角度を測定するもので、この傾斜角は、氷盤と原油等の静止摩擦係数に相当する。

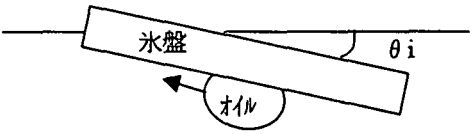
2. 2. 2 接触角・傾斜角の測定実験

接触角は、水槽（幅 30cm×長さ 60cm×高さ 35cm）に海水を入れ、海氷盤（幅 20cm×長さ 30cm×厚さ 5～13cm）を浮かべ2本のポイントゲージで氷盤を固定し、その氷盤の下面に原油及び代替材料をトラップした状態で側方から写真撮影を行い、写真を解析することで求めた。（図－2）

接触角の測定後、1本のポイントゲージを固定したまま、別のポイントゲージを下方にさげることで氷盤をゆっくりと傾斜させる。原油及び代替材料が移動した時点で、ポイントゲージの伸びと、2本のポイントゲージ間の距離から、傾斜角と静止摩擦係数を求める。（図－3）



図－2 接触角 θ_c



図－3 傾斜角 θ_i

これらの実験より、原油及び代替材料の平均の接触角と傾斜角、摩擦係数をまとめたものが表－2である。

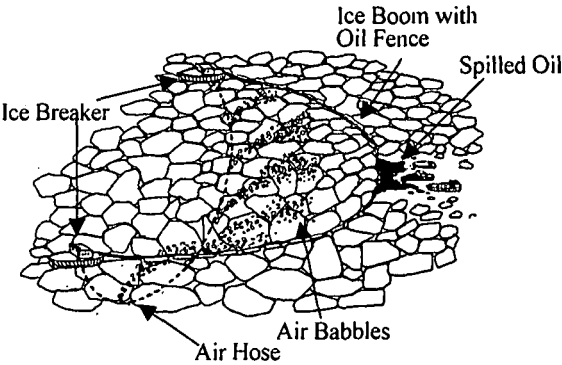
表－2 原油及び代替材料の平均接触角(θ_c)と平均傾斜角(θ_i)、平均摩擦係数(μ)

ISO粘度グレード	平均摩擦係数 μ	平均傾斜角 θ_i (度)	平均接触角 θ_c (度)
10	0.033	1.86	153
32	0.055	3.15	153
100	0.055	3.17	151
460	0.056	3.13	148
原油	0.065	3.72	146

この両試験の結果（表－2）と、粘度及び密度試験より、イラン原油に最も性質に近い材料としてISO 粘度グレード 32 ギャーオイルを選定した。

3. 原油の回収実験

氷盤下の原油回収方法として、現在ノルウェー等では氷盤に穴をあけ、そこからポンプにて流出原油と海水を同時に吸い取り、その後分離する方法が提案されている。しかし、氷厚が不均一であったり、オホーツク海のように種々の大きさの氷盤で、厚さもそれぞれ異なっている場合、そのような方法で回収することは難しい。著者等は氷盤とその下の海水の相対速度を利用して、海氷群と原油を分離する方法と、より氷盤と原油を分離しやすくするため、原油がサンドイッチ状になって固結するのを防止するために海中からコンプレッサーで空気を吹き込み、同時に氷盤と海水に相対速度を与え



図－4 原油の回収方法の概略図

て海氷群にトラップされた原油を分離する方法の二つについて実験を行った。

氷盤と海水に相対移動がない場合には、2隻の小型砕氷船で、アイスブームを曳引することにより、氷盤と海水間に相対速度を与える。このアイスブームに作用する張力あるいは、砕氷船の必要推進力については、すでに著者等の成果がある。回収方法の概略図を図-4に示す。今回実験は二種類行い、一つは海水に浮かんだ氷盤下面に対象原油をトラップさせた状態で氷盤を移動させ、氷盤と原油が分離する速度を求めるものである。もう一つは氷盤下に空気を吹き込み、氷盤と原油の間に空気が存在する状態で氷盤を曳引し、氷盤と原油を分離する方法である。本実験では、原油の代替材料としてISO粘度グレード32ギアオイルを使用した。また、その比較として他のギアオイルについても同様の実験を行った

3. 1 オイルと海水間のせん断抵抗係数(Cos)の測定

3. 1. 1 オイルと海水間のせん断抵抗係数の測定実験

オイルと海水間のせん断抵抗係数を知るために、縦の辺長を変化させた3種類の木の枠（縦90、180、270cm×横30cm×高さ1.5cm）にギアオイルを入れ、速度を変えて曳引しその時の荷重を測定した（図-5）。また、その結果の一例として、ISO粘度グレード32ギアオイルの速度と荷重の関係を図-6に示す。これより、辺長Lの長さが長くなるほど、オイルの抵抗が増していることがわかる。

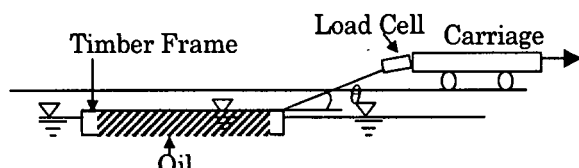


図-5 せん断抵抗係数の測定

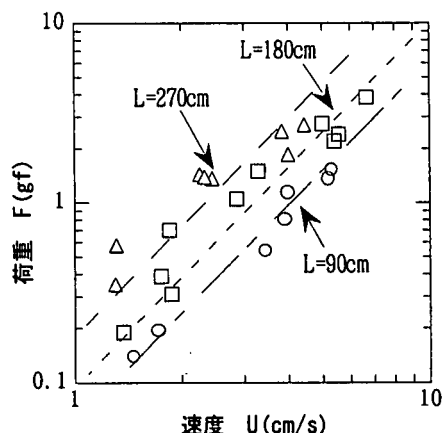


図-6 速度U(cm/s)と荷重F(kgf)の関係
(ISO粘度グレード32ギアオイル)

3. 1. 2 オイルと海水間のせん断抵抗係数の算定

この実験結果より、木の枠の形状抵抗係数(Cd)とオイルのせん断抵抗係数(Cos)を求める。そこで、図-6より速度U、荷重Fと辺長Lの関係を示した（図-7）。この図におけるL=0における荷重が形状抵抗力Fdに相当する。ここで求められた形状抵抗力Fdと、以下に示す抵抗力の関係式よりせん断抵抗力Fsが求められる。

$$\text{抵抗力の関係式} \quad F = F_d + F_s$$

$$F_d = \frac{w}{2g} C_d B h U^2 \quad F_s = \frac{w}{g} C_{os} B L U^2$$

ここで、w:水の単位体積重量(gf/cm³)、
B:幅(cm)、L:辺長(cm)、U:速度(cm/s)である。

これらの関係式より、形状抵抗係数Cdは、0.6となった。この値を用いてせん断抵抗係数Cosをそれぞれのギアオイルについて求めた結果は0.0183~0.0215であった。よって、これからの解析にはこの値の平均値である、Cos=0.0196を使用する。

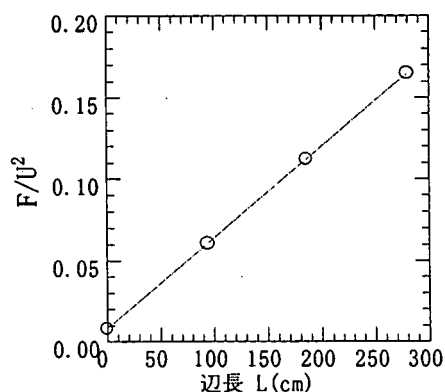


図-7 各速度における荷重と辺長の関係

3. 2 氷盤下でのオイルの移動速度

水槽に海水を満たし、氷盤（縦50cm×横40cm×氷厚7cm）を浮かべ4種類のギアオイル（ISO粘度グレード10、32、100及び460）を氷盤下面にトラップさせ、氷盤の速度を変えてギアオイルが移動する速度を測定した。

その結果の一例を示す（図-8）。これは、ISO粘度グレード32ギアオイルのものである。この図から氷盤の速度が約13cm/s以下の場合、オイルは移動せず氷盤とともに移動することがわかる。また、他のオイルについても同様の現象が見られた。そこで、オイルが移動し始める時の氷盤の速度をVi0とすると、この実験より得られたVi0

は表-3 になる。

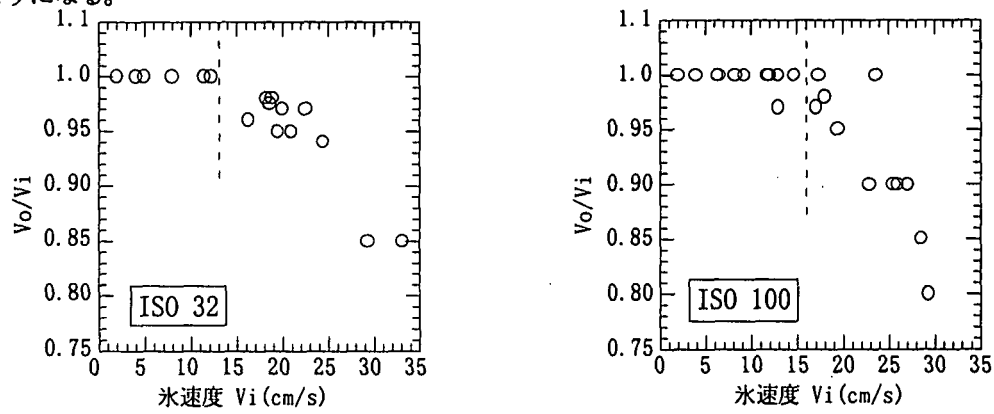


図-8 氷盤の移動速度(Vi)とオイルの移動速度(Vo)の関係

表-3 オイルが移動し始める時の氷盤の速度 (Vi0)

ISO粘性グレード	速度Vo(cm/s)
10	4
32	13
100	16
460	30

よって、氷盤群下面の流出原油を回収するためには、上述した Vi0 以上で、かつアイスプームでトラップされた氷盤群がアンダーターニングしないための条件 (60~70cm/s 以下) で氷盤を移動させることにより、その氷盤群背後に流出油が分離されて出てくことになる。

3. 3 氷盤下に広がるオイルの厚さについての実験

氷盤下面に流出したオイルが長時間放置された後の厚さを測定した。測定方法は、水槽 (幅 30cm×長さ 60cm×高さ 35cm) に海水を入れ、海氷盤 (幅 20cm×長さ 30cm×厚さ 5~13cm) を浮かべ、その下に一定量 (約 50ml) の原油と 4 種類のギアオイルをトラップさせ、30 分から数時間放置した後に、その広がった面積を測定することによりオイルの平均厚さを測定した。その結果が表-4 である。これらの値は、後にオイルに作用する力を考える際に使用した。

表-4 原油とオイルの厚さ h (cm)

ISO粘度グレード	平均の厚さ(cm)
0	0.57
32	0.71
100	0.68
460	0.49
原油	0.84

3. 4 オイルと海氷間のせん断抵抗係数(Cio)の算定

速度 Vi で移動する氷盤下のオイルには、静止摩擦力 (Fu)、氷とオイルのせん断抵抗力 (Fio) そして氷と海水または水とオイルのせん断抵抗力(Fos)が作用する (図-9)。また、単位幅当たりのオイルに作用する力の関係式は次のようになる。

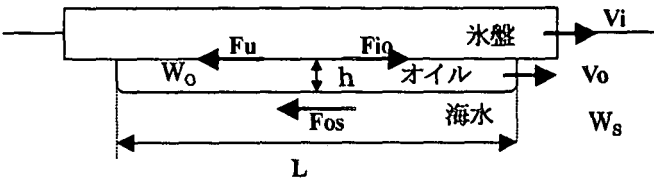


図-9 オイルに作用する力

$$F = F_{io} - F_u - F_{os} \tag{1}$$

$$F = m \cdot \frac{dV_o}{dt} = \rho \cdot h \cdot L \cdot \frac{dV_o}{dt} \quad F_{io} = \frac{W_o}{2g} \cdot C_{io} (V_i - V_o)^2 \cdot L \quad F_u = h \cdot L \cdot (W_s - W_o) \cdot \mu \quad F_{os} = \frac{W_s}{2g} \cdot C_{os} \cdot V_o^2 \cdot L$$

ここで、h はオイルの厚さ(cm)、L はオイルの幅(cm)、μ はオイルの摩擦係数、ρ はオイルの密度(g/cm³)、Ws、Wo は、海水の単位体積重量(g/cm³)とオイルの単位体積重量(g/cm³)である。また、Cos は 3.1.2 章で得られたオイルの海水とのせん断抵抗係数である。Vi、Vo は、氷盤の移動速度(cm/s)とオイルの移動速度(cm/s)である。

また、オイルが動き出す時の氷盤の速度 Vi の条件は、氷盤とオイルの相対移動速度を V=Vi-Vo とすると、氷盤を一定速度で移動させる時、

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dV_o}{dt} \tag{2}$$

(1)、(2) 式より、氷盤下面のオイルの分離が開始される氷盤移動速度 Vi は次式で示される。

$$Vi^2 \geq \frac{2gh(\frac{W_s}{W_o} - 1) \cdot \mu}{\frac{W_s}{W_o}} \left(\frac{W_s}{W_o} \cdot \frac{1}{C_{io}} - \frac{1}{C_{os}} \right)$$

この式に 3.2 章で求めた $Vi0$ 、オイルの海水とのせん断抵抗係数 $Cos=0.0196$ 、 h 、 μ 、 Ws 、 Wo を代入することによって、それぞれのオイルについての海水とのせん断抵抗係数 Cio を求めることができる。この結果、海水とのせん断抵抗係数 Cio は $0.011\sim0.016$ の値をとることがわかった。

3. 5 氷盤下に空気が存在する場合のオイルの移動速度

次に空気が氷盤とオイルの間に存在する場合のオイルの移動速度について実験した。この実験では氷盤の代わりに木盤を使用し、その下に空気を満たし 4 種類のギアオイル (ISO 粘度グレード 10, 32, 100 及び 460) をトラップさせ、木盤を曳引しギアオイルの移動速度を測定した。

その結果の一例を以下に示す (図-10)。これより、氷盤下に空気が存在する時はせん断抵抗係数が非常に小さくなるため、氷盤を移動する速度は、空気が存在しない場合よりもかなり小さくても良いことが明らかになった。よって、氷厚の互いに異なる氷盤群で構成される氷盤下の原油の回収では、あらかじめ空気を吹き込むことにより流出油面を水平し、氷盤と原油の分離をよりし易くできることを示した。

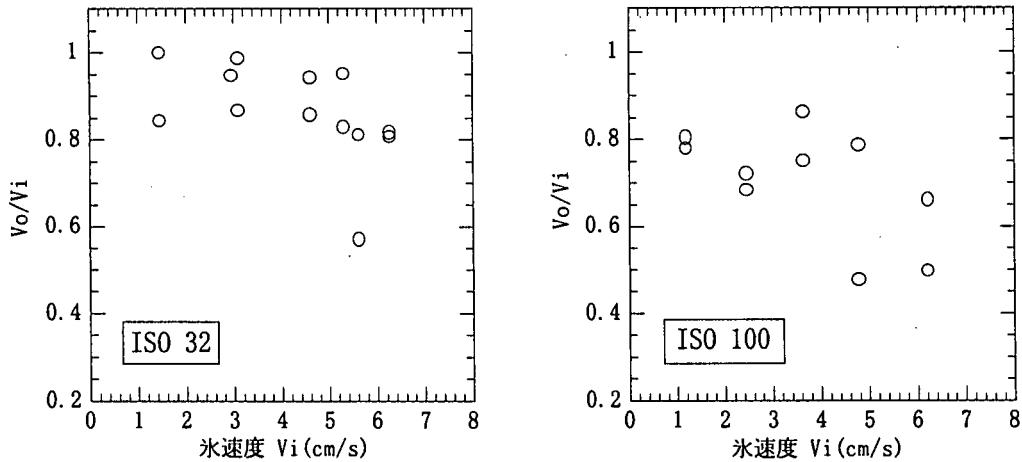


図-10 氷盤下に空気が存在する場合の氷の移動速度(V_i)とオイルの移動速度(V_o)の関係

4. 結論

- 1) 約 -2.0°C での各材料の粘度・密度を明らかにした (表-1)。イラン原油は ISO 粘度グレード 32 のギアオイルに近いと思われる。よって、粘度・密度が主要因になるような実験を行う際には、原油の代替材料としてこのギアオイルを使用することが可能であることを示した。
- 2) 海水中に浮かせた海水氷盤の下面に各種材料をトラップし氷盤を徐々に傾け、動き出したときの角度(傾斜角 θ)、及び静止摩擦係数(μ)を示した (表-2)。海水中の原油は海水氷盤が 3.72 度傾くと動き出し、この時の摩擦係数は 0.065 となる。よって氷盤と海水の相対速度により両者を分離する実験では、この摩擦係数により近い材料を選択すべきである。
- 3) 静止した海水に氷盤を浮かせ、その下面に様々なギアオイルをトラップさせた状態で氷盤を移動させた。ISO 粘度グレード 32 は氷盤の移動速度が約 13cm/s を越えると油は氷盤から分離することが明らかとなった。また、摩擦係数が大きいほど分離しにくいことが明らかになった。
- 4) 同様に海水氷盤に各種材料をトラップさせた状態で下方から気泡を送り、氷盤と材料間に空気層をつくると、氷盤の速度が $2\sim3\text{cm/s}$ 以下で全材料とも分離することが明らかとなった。

以上の結果より、アイスブームの両端を砕氷船で 1 ノット程度の速度で曳引すると浮氷盤 (level ice) と原油を分離することが可能であることを示した。また、原油をトラップした氷盤下面に空気を吹き込むと $2\sim3\text{cm/s}$ と小さな曳引速度で分離が可能となる。また、氷厚の異なった浮氷盤群の場合にも空気を吹き込み、氷盤群の下に一樣な空気層を形成することで、分離がより簡単となることが明らかとなった。

また、空気を吹き込むことにより、空気層に原油の揮発成分が蒸発してもトラップされ、氷盤間から大気中に吹き出したとしても、氷盤下の原油中の揮発分を減少させる効果がある。

参考文献

Liukkonen, S., Ryttonen, J., Alhimenko, A. and Kniazeva, E. "On the Adhesion of Oil to Ice" Proc. Of the 7th ISOPE Conference Vol. 2, pp 579 - 586 ,1997