

氷盤下にトラップされた流出原油の 氷盤中への滲透

PERMEATION OF SPILLED CRUDE OIL INTO SEA ICE SHEET

大島香織¹・大塚夏彦²・石川博基³・高橋伸次郎⁴・渡部靖憲⁵・橘治国⁵・佐伯浩⁶

Kaori OHSHIMA, Natsuhiko OHTSUKA, Hiroki ISHIKAWA, Shinjiro TAKAHASHI,
Yasunori WATANABE, Naokuni TATIBANA and Hiroshi SAEKI

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060 - 0813 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

²正会員 北日本港湾コンサルタント㈱、³学生会員 北海道大学工学部 土木工学科

⁴正会員 西村組㈱、⁵正会員 工博 北海道大学大学院助教授

⁶フェロー 工博 北海道大学大学院教授

Development of oil and gas deposits off Sakhalin's northern coast in the sea of Okhotsk are currently under way. An accident involving a spill of crude oil could be expected to affect the environment and economy of the Hokkaido's Okhotsk coast. If the oil spill occurred in winter season due to the accidents of pipeline, oil tanker and oil rigs, spilled oil would be trapped under the ice floes. If the operation for recovery of spilled oil will be late, spilled oil under the ice floes will be trapped in the ice sheet. In this paper the authors report the behavior of spilled oil trapped under ice sheet and the permeation of spilled oil into ice sheet.

Key Words : *Spilled oil, crude oil, ice sheet, Sakhalin, permeation*

1. はじめに

現在、サハリン北東沿岸オホーツク海において石油・天然ガス開発が行われており、今年の夏には実際に生産も開始される。海洋における原油掘削が始められて以来、世界中で多くの流出事故が発生している。1997 年に起きたナホトカ号の事故も記憶に新しい。これら原油流出事故の主な原因には、暴噴や操作ミス等による火災、海底パイプラインの損傷、タンカー事故、あるいは生産用海洋構造物そのものの破壊などがある。

現在開発が行われているオホーツク海は、冬期になると一面流氷に覆われるという特有の自然条件を有する。この流氷の存在により、原油流出事故が発生する危険性がさらに増大する事も考えられる。ま

た、サハリン東部沿岸で輸送タンカーの事故等の原油の流出事故が発生すると、流出した原油は海流や流氷とともに北海道のオホーツク海沿岸に到達する可能性もある。

特に冬期に流出事故が起きると流氷などの氷盤下面に原油が流出する可能性がある。このような場合の原油の回収は通常の温暖な海域で事故が起こった時よりも困難となると思われる。その原因の一つは、流出後さらに氷盤が成長すると流出した原油がサンドイッチ状に氷盤中に閉じ込められてしまうためである。このような状態になると、原油は氷盤中のブラインなどに滲入していくと考えられる。

本研究の目的は、冬期流氷下面にトラップされた流出原油の挙動と、さらに氷盤が成長した時の原油

の氷盤中への滲入のメカニズムを明らかにすることである。

2. 滲透実験

氷盤中に原油がトラップされた時、原油は氷盤中のブラインや空隙などへ滲透することが考えられる。その滲透量を測定するために各種実験を行った。

(1) 実験 I

実験 I として、水槽に塩分濃度の異なる海水を入れ、海氷盤を作成しその下に一定量の原油を注入し、さらに海氷盤を成長させた後、水槽より氷盤を取り出す。

氷盤を取り出し、水平方向に 4 層または 5 層に分けて切断し、それぞれの層の氷を溶かし原油と海水に分け、氷盤中への原油の含有率の鉛直分布を求めた。また、氷盤の塩分濃度を測定し、既研究成果¹⁾より透水係数を求め、氷盤への原油の含有率と透水係数の関係を明らかにした。

a) 実験方法

実験には 2 種類の水槽を用いて行った。1 つ目の水槽（以降、水槽 A とする）は、縦 80×横 80×深さ 90cm の耐水ベニア水槽内壁部に 50mm 厚の発泡材を入れ、その内側に透明のビニール箱を入れた物を用いた。この水槽には氷厚増加による体積増加の影響を減らすためと断熱材の役割をもたすため変形しやすい発泡材(50mm)を内側に用いている。この水槽の一部は外からも水槽の内部が観察できるような構造となっている（図-1）。

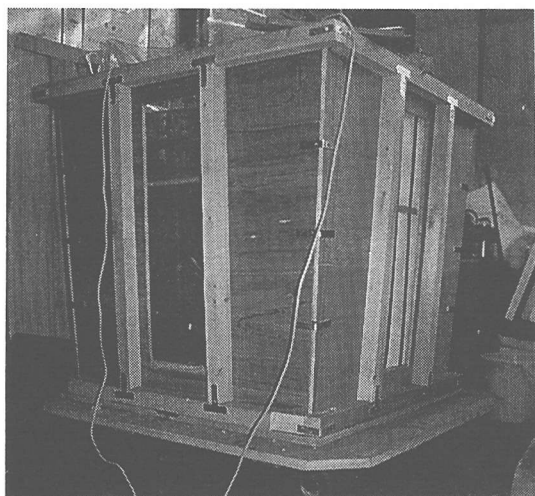


図-1 実験水槽(水槽 A)

凍結時は、この箱の回りを 100mm 厚の断熱材で覆い側面、底面からの熱の出入を抑制する。

2 つ目の水槽は、プラスチック製容器（縦 32×横 71×深さ 28cm）（以降、水槽 B とする）である。実験時にはこの水槽の周りに断熱材を巻いて側面などからの熱の出入りを抑制した。

実験は異なる濃度の海水を用いて CASE1～5 の 5 パターンについて行った。

CASE1 の実験は水槽 A を用いて行った。用いた海水の塩分濃度は 33‰である。凍結時の室温は始め -10℃、その後 -5℃にして行った。

CASE2～4 に実験には水槽 B を用いた。海水の塩分濃度は CASE 2 が 25‰、CASE 3 が 30‰、CASE 4 が 34‰である。これらの海水を満たした水槽を、室温 -5℃の低温室に入れ実験した。

CASE1～4 は氷厚が 7～10cm になった時点で原油注入装置（図-2）を用い原油を氷盤下面に注入した。その後氷盤を成長させた。原油注入量は CASE2～4 は 180ml、CASE1 は測定できなかった。これらの実験では原油の注入量が少なく氷盤下面にトラップされた全ての原油が氷盤中に滲透してしまったこともあり、CASE5 は原油の注入量を増やして実験を行った。

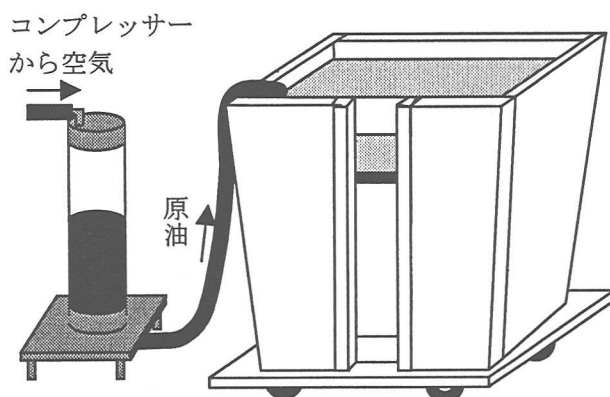


図-2 原油注入装置

CASE5 は水槽 A を用い海水の塩分濃度 33‰で氷盤を作成した。氷厚が約 15cm になった時点で氷盤下に原油を注入した。注入した原油は約 2000cm³である。注入前の原油の粘度は、1.73dPa・s、密度 0.8725g/cm³(-5℃)であった。その後氷盤をさらに成長させた。氷盤が約 30cm 程度になった時点で水槽から取り出した。

CASE5 の室温は、他の実験との関係もありほとんどが -25℃で行わなければならなかった。原油注入

時は - 5℃～ - 10℃程度にした。温度がかなり低い状態での実験であったため、氷盤下面の形状は不均一な結晶の状態であった。そのため注入時の氷盤下面を平らにするため、原油注入前に氷盤を一度取りだし、底面を削った後氷盤を再び水槽に戻した。その際に、海水の塩分濃度も再び 33‰に調整した。

また、いずれの実験でも氷盤の隅に自由水面を設けることにより氷盤下面への圧力がかからないようにした。

b) 氷盤の塩分濃度

氷盤が成長した後に氷盤ごと水槽から取り出した(図-3)。

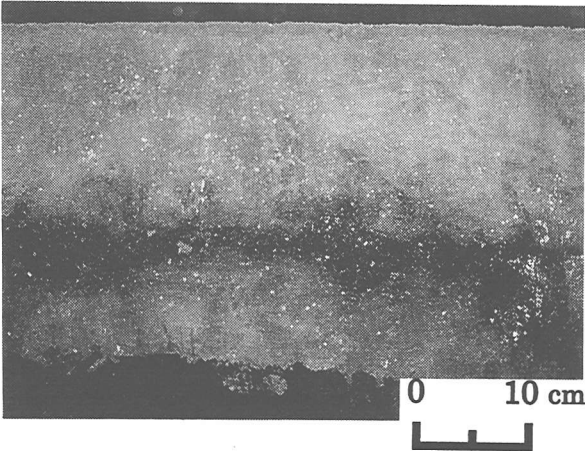


図-3 水槽から取り出した海氷盤断面 (CASE5)

それぞれの実験での氷盤の塩分濃度を測定した。表-1 は CASE1～4 の平均塩分濃度、表-2 には CASE5 の各層ごとの平均塩分濃度を示す。

表-1 氷盤の塩分濃度 (CASE1～4)

	海水塩分濃度 (‰)	氷盤塩分濃度 (‰)
CASE1	33	6.40
CASE2	25	8.05
CASE3	30	10.33
CASE4	34	8.71

表-2 氷盤の塩分濃度 (CASE5)

CASE5	海水塩分濃度 (‰)	氷盤塩分濃度 (‰)
1層 (5cm)	33	2.1
2層 (5cm)	33	2.9
3層 (5cm)	33	3.0
4層 (5cm)	33	2.7
5層 (6cm)	33	4.1

これらの氷盤を氷厚方向に CASE1～4 は 4 層、CASE5 は 5 層に分けて切断し、それぞれの層の氷を溶かし分液ロートで原油と海水を分離した (図-4)。分離した海水の重量を測定し、氷盤中に浸透した原油量を求めた。この結果より、各層の原油の含有率を求めた (図-5)。

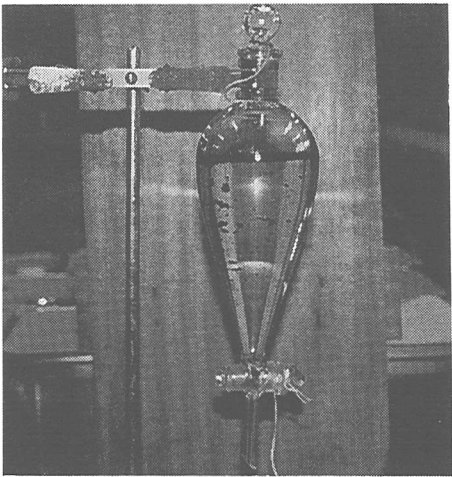
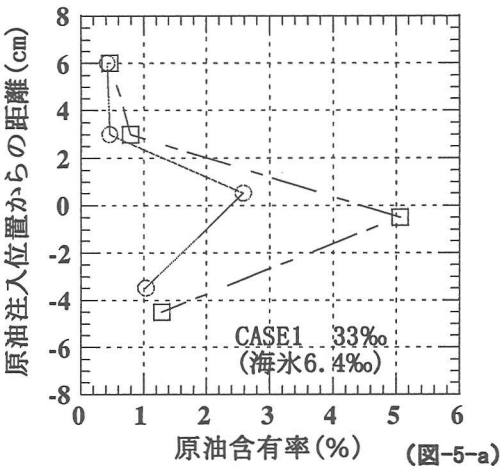


図-4 海水と原油の分離



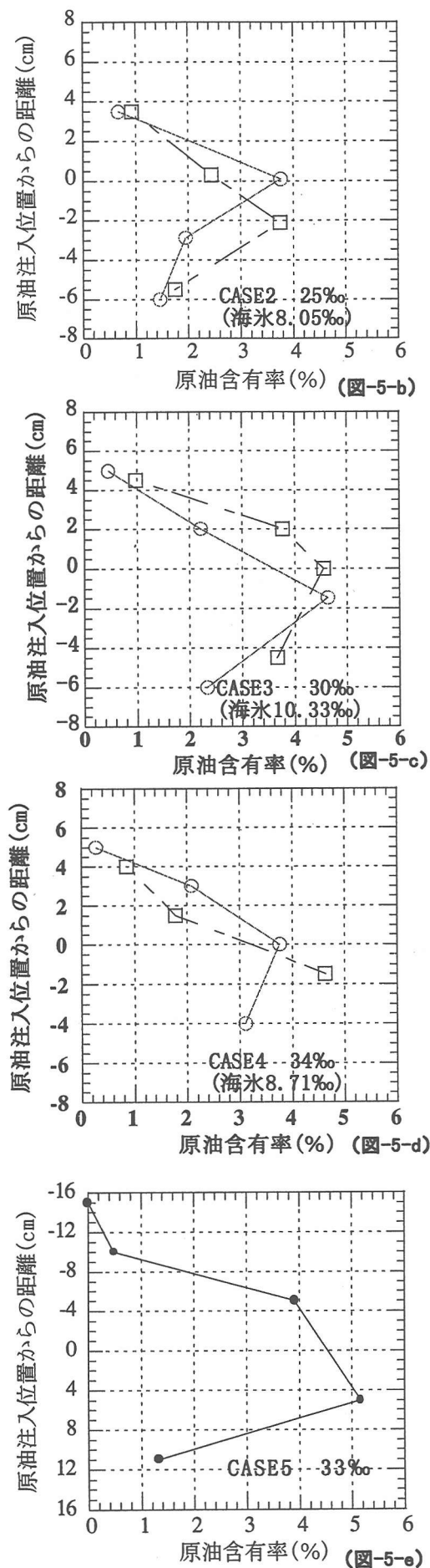


図-5 原油含有率の鉛直分布

これらの結果より、海水盤中にトラップされた原油は氷盤中に滲透したが、上層にまで滲透していくものは少なく 1%以下であることがわかる。また、今回の結果の水槽 B (CASE2~4) での原油注入位置よりも下層氷盤の原油含有率が高いのは、水槽の高さが小さかったため、原油注入後十分に氷盤が成長できず結晶状になってしまい完全に原油がトラップされなかったためと思われる (図-6)。

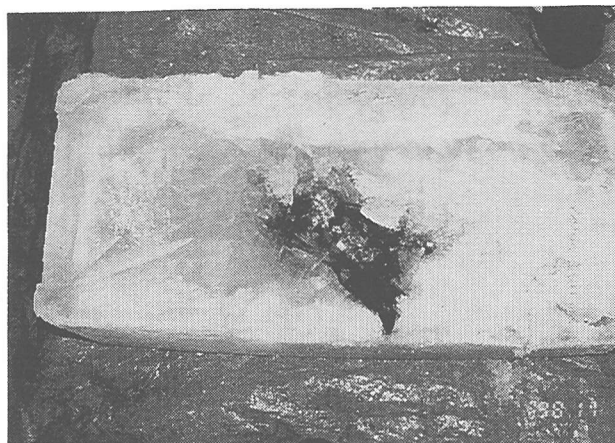


図-6 水槽から取り出した氷盤下面 (水槽 B)

また、海水の透水係数は塩分濃度と氷温に依存することが過去の実験で明らかになっている。本実験での氷盤の透水係数と原油注入位置よりも上層の原油含有率の関係を表-3、4 に示す。

表-3 氷盤の透水係数 (CASE1~4)

	氷盤塩分量 (%)	透水係数 (-5℃) (cm/sec)
CASE1	6.40	0.0013
CASE2	8.05	0.0022
CASE3	10.33	0.0035
CASE4	8.71	0.0026

表-4 氷盤の透水係数 (CASE5)

CASE5	氷盤塩分濃度 (%)	透水係数	
		原油注入時	氷盤成長後
1層	2.1	0.000012	0.00000048
2層	2.9	0.000038	0.000018
3層	3.0	0.0002	0.000038
4層	2.7		0.000055
5層	4.1		0.0006

また、氷盤の透水係数と原油注入位置よりも上層の原油含有率との関係を図-7、8に示した。

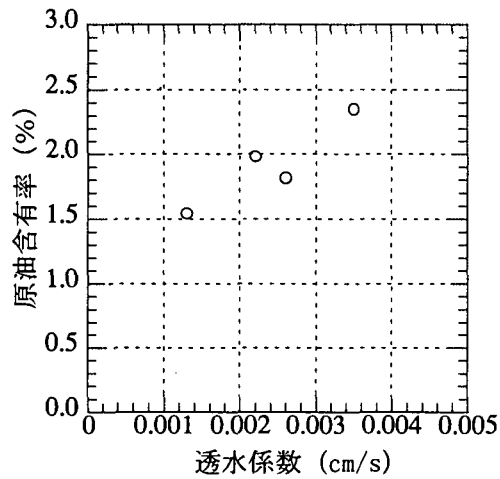


図-7 氷盤の透水係数と原油含有率の関係 (CASE1～4)

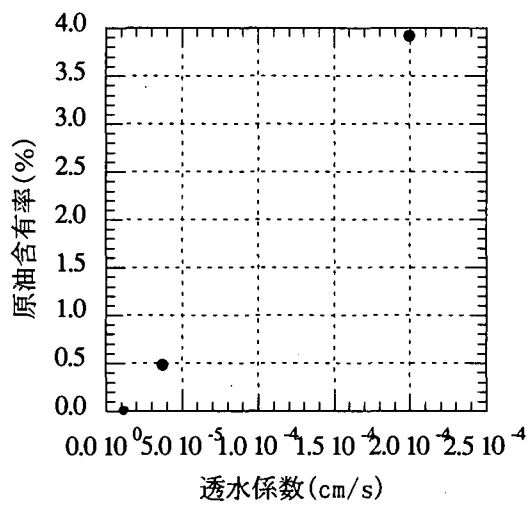


図-8 氷盤の透水係数と原油含有率の関係 (CASE5)

これより、海氷盤の透水係数と原油注入位置より上層の原油含有率には強い相関があることが明らかになった。

(2) 実験Ⅱ

実験Ⅱとして氷盤への滲透速度を調べる実験を行った。用いた水槽は透明のプラスチック製容器で、この水槽に同一条件（海水塩分濃度 30‰、室温 -5℃）で海氷盤を作成した。その氷盤を切り出し再び海水に浮かべ同時に一定量の原油（約 100ml）を氷盤下面に注入した。注入後、時間を変えて氷盤を取りだし氷盤中への滲透状態を調べた。

実験時の氷厚は 8 ～ 9 cm 程度であった。この氷

盤を氷厚方向に上層から 1, 2, 3 層として切断した。各層とも 3cm 程度の厚さである。また、氷盤下面は氷の成長途中の結晶の状態であり原油がその結晶の間に付着していた。その部分を 4 層として原油の含有量を測定した。原油の含有量を正確に測るため、表面に付着している原油は低温の海水を用い、できる限り洗い流してから測定した。測定結果を結果を表-5 に示す。原油滲透割合とは原油注入量に対する氷盤中への滲透量の割合である。原油滲透割合は注入時の原油の密度を 0.9g/cm³ として求めた。

表-5 経過時間と原油含有量・透水係数・滲透割合

経過時間	層	含有量 (g)	透水係数 (cm/sec)	滲透割合 (%)
0.5h	1	0	0.0082	4.19
	2	0	0.0075	
	3	3.77	0.0091	
	4	4.08		
1.5h	1	0	0.0086	8.71
	2	0	0.0080	
	3	7.84	0.0099	
	4	4.29		
3h	1	0	0.0093	6.67
	2	0	0.0093	
	3	6	0.0083	
	4	6.53		
6h	1	2.96	0.0089	8.38
	2	2.09	0.0107	
	3	2.49	0.0102	
	4	5.01		
10.3h	1	4.31	0.0093	12.09
	2	4	0.0188	
	3	2.57	0.0122	
	4	6.97		
15.2h	1	4.97	0.0086	12.04
	2	4.5	0.0139	
	3	1.37	0.0169	
	4			

この結果より、ほぼ 1～3 層の原油含有量は時間とともに増加している傾向にある。しかし、氷盤中の結晶の状態が等しくなく一個所のブラインに集中的に浸透するなど、滲透の状態は一様ではなかった。

また、4 層の含有量が多いのは細かい結晶の間に原油が入り込んでいるためである。

(3) 実験Ⅲ

実験Ⅲとして、透明のプラスチック製容器に 30%の海水を満たし、それぞれの結氷開始時期を変え、室温他の条件を同一にして氷盤を作成した。一定量の原油（約 100ml）を氷盤下に注入し、一定時間おいた後、氷盤中への原油の滲透量を観察した。

氷厚は、5～10cm 程度の 4 種類であった。10 時間経過した後取り出したが、本実験では測定に十分な滲透は確認できなかった。

そのため、さらに 2 日ほど置いて滲透量を測定した。この測定時は、実験Ⅱよりも時間を置いたため完全に原油が氷盤中にトラップされた状態であった。取り出した氷盤を原油注入位置より上層と下層に分けて原油の含有量を測定した（図-9）。

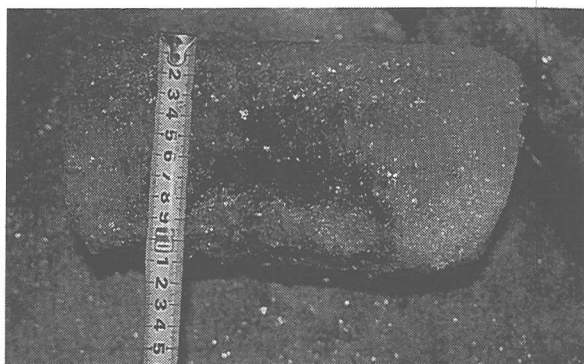


図-9 2日後に取り出した氷盤

原油含有量の測定結果より注入原油に対する浸透した原油の割合を求めた。今回も注入時の原油の密度は 0.9g/cm^3 として計算した。2 ケースについて測定を行った結果を表-6 に示す。

表-6 原油の含有量と滲透割合

		含有量 (g)	滲透割合 (%)
CASE1	上層	10.0	11
	下層	28.1	31
CASE2	上層	5.0	6
	下層	13.0	14

今回の実験で滲透量の割合で倍近い差が出た原因として考えられるのは、上層と下層に分けた際に低温の海水で氷盤に付着した原油を洗い流し方に違いがあったと思われる。

3. 結論

- 1) 海氷盤中にトラップされた原油は氷盤中に滲透したが、図-5 に示すように上層にまで滲透していくものは少なく 1%以下であることがわかった。また、原油注入位置では水平方向にも浸透していることが確認された。
- 2) 原油の含有率は原油がトラップされた付近で約 3～5%と一番多くなることが明らかになった。また、注入位置より下層の注入後に結氷した氷中にも滲透が見られた。この原因は氷盤の成長に伴い対象位置の氷温は低下し、そのためブライン中の塩水が強度の弱い下層に向かって移動することになるためと考えられる。
- 3) 原油含有率と透水係数には図-7、8 より強い相関が見られた。
- 4) 氷盤下に下方から連続的に原油が流出した場合、流出原油は氷盤下で水平方向に拡散するが、その時、一部の原油は氷盤中に滲透するため、拡散係数は淡水氷等に較べて小さくなることが予想される。
- 5) 氷盤下に流出した原油の滲透割合は、実験Ⅱ、Ⅲより 10%前後になる事が明らかになった。

低温環境下では、トラップされた油層の下の海水も結氷し、海水中にトラップされることになる。よって、氷盤下に流出した原油は速やかに回収しないと事実上回収不能となる可能性が高い。

なお、本研究は石油公団石油開発技術センターの研究助成を受けた事を記す。

参考文献

- 1) 佐伯浩、竹内貴弘、窪田太、五十嵐昇：海氷盤の透水係数に関する研究、海洋開発論文集、VOL. 1、pp. 74-77、1985。
- 2) 大塚夏彦・大島香織・石川博基・宇佐美宣拓・渡部靖憲・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。

(1999. 4. 19. 受付)