

流出油の氷中取り込み現象について

Entrapment of Oil Spilled under an Ice Cover

泉山 耕¹・宇都正太郎²・堺 茂樹³

Koh IZUMIYAMA, Shotaro UTO and Shigeki SAKAI

¹正会員 工博 海上技術安全研究所 (〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1)

²工博 海上技術安全研究所 (〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1)

³正会員 工博 岩手大学 工学部 建設環境工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

A study was made on the formation of oil-ice sandwich, a phenomenon in which oil placed underneath an ice cover is entrapped in ice under freezing conditions. The study was made as a part of a larger research project on the behaviour and recovery method of oil spilled in ice-covered waters. Laboratory tests were performed to study the ice growth under the oil layer. Numerical calculation that takes into account the convective heat transfer through the oil layer agreed well with the experimental results. It was attempted to predict the formation of oil-ice sandwich in field conditions.

Key Words : Oil spill in ice, Oil-ice sandwich,

1. はじめに

北海道北方のサハリン島沖の大陸棚における石油・天然ガスの開発が本格化している。釧路の一つである Sakhalin II では、1999年に商業生産が開始され、また、他の釧路 Sakhalin I においても生産の開始が発表された。これらの開発は、現在は無氷季に限定されているが、近い将来、冬季を含む通年生産に移行する予定である。しかしながら、万が一氷海域での油流出が起きた場合の汚染防除についての研究・技術開発は極めて立ち遅れた状態にある。このような状況に鑑み、氷海域における流出油の挙動と回収方法に関する研究プロジェクトが開始された¹⁾。

本プロジェクトの目的の一つに、油の氷の中への取り込み現象についての研究がある。油の氷中への取り込みは、氷の下面に油が流出した場合に発生し、氷の成長期・融解期にそれぞれ異なるメカニズムに基づくものが起こる。本研究では氷の成長期における流出油の氷中取り込みを取り扱った。この場合、氷の下に拡がった油の周囲に氷が成長して油層を氷が上下から挟み込む結果となることから、このような状態をオイル・アイス・サンドウィッチと呼ぶ。オイル・アイス・サン

ドウィッチの形成は油による汚染防除対策を考える上で重要である。なぜなら、このような油に対しては回収等の汚染防除作業が実質的に不可能となることから、油が氷とともに移動し、油流出が発生した場所とは全く異なる場所において再出現するというメカニズムによる油汚染領域の移動・拡大が起こり得るからである。従って、油汚染防除作業は、オイル・アイス・サンドウィッチの形成前に行われる必要がある。

それでは、オイル・アイス・サンドウィッチの形成は、油の流出後どの程度の時間で起こるのであろうか？本研究の目的はこの問いに対する解答を与えることにある。このため、低温実験室における実験に基づいてオイル・アイス・サンドウィッチ形成のモデル化を行った。また、前述のプロジェクトにおいて並行して実施された氷の下における油の拡がりについての数値シミュレーション結果とこれを組み合わせることにより、実際に油流出事故が発生した場合を想定したオイル・アイス・サンドウィッチ形成過程の計算を行った。

2. 実験

海上技術安全研究所の低温実験棟において、オイル・

アイス・サンドウィッチの形成に関して2種類の実験を実施した。第一の実験では、オイル・アイス・サンドウィッチ発生の基本的メカニズム把握を目的として、この現象を実験的に再現した。この実験では1m×1mの水面積、深さ0.6mの水槽を用いた。水槽壁の一面はアクリル製であり、これを通して内部の観察ができる。また、側壁及び底部には断熱処理を施してある。この水槽に濃度3.3%の人工海水を満ちし、室温-20℃の低温室内に置くことにより氷板を成長させた。氷板が5cm程度に成長した段階で氷板下面に油を流出させた。供試油としては、機械用潤滑油及びA重油を用いた。油の流出後は氷の成長を定期的に観測するとともに、油の氷中への取り込みが完了した時点において油を含む氷を切り出した。

第二の実験は油の下における氷の成長について定量的データを得る目的で実施した。この実験では、側面及び底面を断熱した小型容器に上記人工海水を入れ、その上部に油を満ちたものを室温-20℃の低温室内に置き、一定時間後に油の下面における氷の成長量を計測した。低温室内における冷凍開始時の人工海水及び油の温度は、いずれもこの濃度の人工海水の結氷温度である-1.8℃とした。

3. 油の氷中への取り込み過程

第一の実験において得られたオイル・アイス・サンドウィッチ部の氷の断面写真の例を図1に示す。この写真の例の場合、氷板が約60mm程度に成長した時点で油を流出させた。氷断面下部の細長い開口部が油が存在していた部分である。油の流出後、その周囲・下面に氷が成長することにより氷の中にサンドウィッチ状に油が取り込まれていたことが判る。

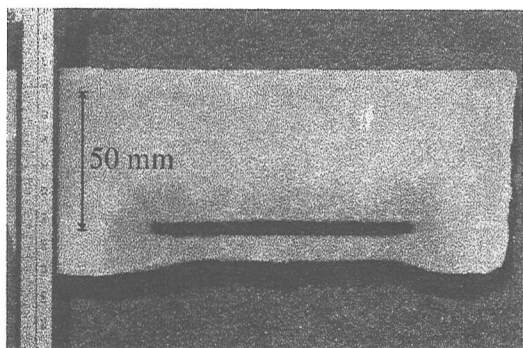


図1 油を取り込んだ氷の断面

図1に示されるようなオイル・アイス・サンドウィッチ形成の過程としては、以下のような2種類のものが考えられよう(図2参照)。

過程1: 油の周囲から氷が成長し、これが油の下面に回り込んで油が氷中に取り込まれる。

過程2: 油の周囲と底面に氷が同時に成長し、油が氷中に取り込まれる。

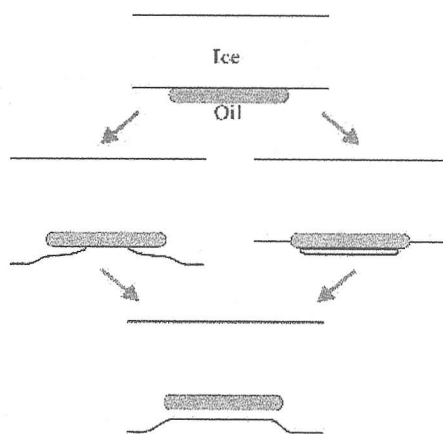
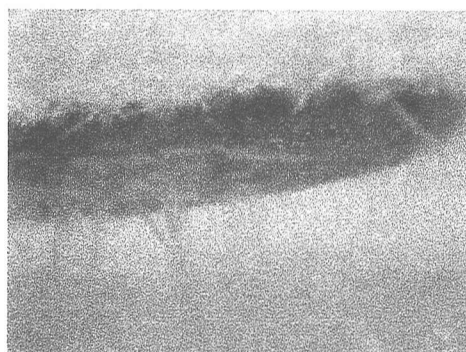
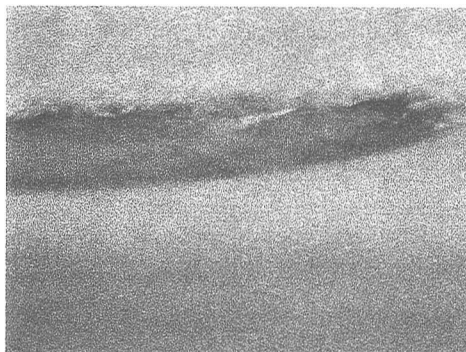


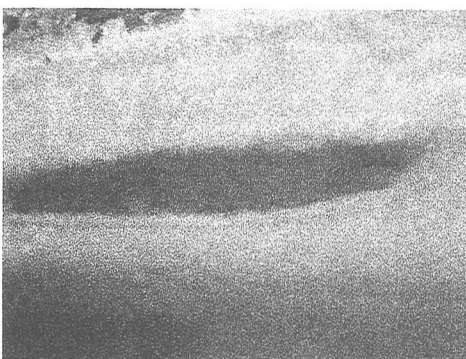
図2 オイル・アイス・サンドウィッチ形成の過程



(a) 55分後



(b) 97分後



(c) 165分後

図3 油層下面における氷の成長

これらの2種類の過程は、結果的にはいずれも図1に示されるようなオイル-アイス・サンドウィッチを形成するが、それに必要な時間を考えるという観点からは大きく異なるものとなる。すなわち、過程1の場合はオイル-アイス・サンドウィッチ形成までの時間が油層の水平方向の拡がりの程度に依存するのに対し、過程2においてはこのような油の面積の影響は小さく、油層底面における氷の成長の速度がオイル-アイス・サンドウィッチ形成までの時間を決めることとなる。

図3は、アクリル製の側壁を通して、油の周囲の氷の成長の様子を時間を追って撮影した写真である。図3(a)は油の流出後55分後の写真であるが、油の底面に小氷片が発生していることが判る。この氷片は時間とともにその数を増し(図3(b)), 165分後の図3(c)ではほぼ油の底面全体を覆うまでに至っている。このような油の下面における小氷片の発生は、Martinによっても報告されている²⁾。このような小氷片の発生は氷の成長の初期における一般的過程である。以上の観測から、オイル-アイス・サンドウィッチの形成は、前記の過程2によるものと考えられる。

4. 油の下面における氷の成長量の計算

(1) 計算方法

前節では油の底面における氷の成長がオイル-アイス・サンドウィッチ形成のキー・プロセスであることを示した。この氷の成長は、油層を通しての熱伝達による潜熱の放出によるものである。一方、図1にも見られるように、油の下面における氷の厚さは油の周縁部を除いてほぼ一様であった。この事実は油の下面における氷の成長速度が場所によらず一定であることを示すものである。従って、油層を通しての熱伝達は鉛直方向の一次元的なものにより近似できよう。

一次元熱伝達は、一般に以下の式により表現される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに、 T 、 k 、 c 及び ρ は、それぞれ、温度、熱伝導係数、比熱、密度である。油の下面から油層及び氷を通しての熱伝達については、水、油及び氷の温度を、それぞれ、 T_{WATER} 、 T_{ICE} 、 T_{OIL} とすると、以下の境界条件が与えられる。

$$\begin{aligned} \text{氷上面において: } & T_{ICE} = T_{TOP} \\ \text{油の上面において: } & T_{ICE} = T_{OIL} \\ \text{油の下面において: } & T_{OIL} = T_{WATER} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 T_{TOP} は、氷の上面における温度である。

油の下面における氷の成長は以下により与えられる。

$$\delta_{ICE} = \frac{\delta q dt}{L\rho_{ICE}} \quad (3)$$

ここに、 δ_{ICE} は微小時間 dt の間に成長する氷の厚さであり、 L 及び ρ_{ICE} は、それぞれ、氷の潜熱及び密度で

ある。また、 δq は dt 内に油の下面の単位面積を流れる熱量であり、以下で計算される。

$$\delta q = k_{OIL} \left. \frac{dT}{dz} \right|_{\text{at Oil-Water Interface}} \quad (4)$$

ここに、 k_{OIL} は油の熱伝導係数である。

本研究では、式(1)を境界条件(2)の下に数値的に解き、式(3)及び(4)により油の下面における氷の成長量を計算した。計算にあたって水温は標準的海水の結氷温度である -1.8°C とした。また本計算では、油が流出したときの母氷板の厚さに対して油下面に成長する氷の厚さが十分に薄いものとして、この新たに成長した氷を通しての熱伝達は無視している。

(2) 油を通しての熱伝達

上記の計算では、氷と油を通しての熱伝達を計算することとなる。このうち氷による熱伝達については、基本的には固体の熱伝達として取り扱えよう。これに対して油を通しての熱伝達については、油層内部における対流の影響を考える必要がある。

対流熱伝達は、一般に、ヌセルト数 Nu により表現される。水平・平行な2平板間の流体を通じての鉛直方向の対流熱伝達のヌセルト数は以下で表現される。

$$Nu = \frac{k_C}{k} \quad (5)$$

ここに、 k_C は対流がある場合の熱伝導係数であり、上式は、対流があることにより実効的な熱伝導が、無い場合に対して Nu 倍となることを示している。一般に、ヌセルト数はグラスホフ数 Gr とプラントル数 Pr の積で与えられるレイリー数 Ra の関数として与えられる。

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad Gr = \frac{g\beta\Delta Th^3}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{c\mu}{k} \quad (6)$$

ここに g は重力加速度、 ΔT 及び h は、それぞれ、流体の厚さ及び上下面間の温度差、 β 、 ν 、 c 、 μ 及び k は、それぞれ、流体の体積温度膨張係数、動粘性係数、比熱、粘性係数及び熱伝導係数である。

流体内の対流はレイリー数の増大に伴って層流状態から乱流状態へと変化する。ヌセルト数の関数形としては、次式が与えられている³⁾。

$$Nu = \left\{ \left[1 + 1.446 \left(1 - \frac{Ra_\sigma}{Ra} \right) \right]^{15} + \left[\frac{Ra f(Pr)}{1420} \right]^5 \right\}^{1/15} \quad (7)$$

$$f(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0.5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$

ここに Ra_σ は限界レイリー数であり、流体の厚さと水平方向の長さの比の関数として与えられる。

上式で与えられるヌセルト数により油の下面における氷の成長が説明できるかどうかについて、第2の実験結果によって検証した。式(5)に示されるように、ヌ

セルト数は対流がある場合と無い場合の熱伝導率の比として与えられる。また、油の下面における氷の成長量は、油を通しての放熱量に比例する。従って、第2の実験により計測された氷の成長量 h_C と対流熱伝達が無い場合の氷の成長量 h_N の比 h_C/h_N は、理論的にはヌセルト数に一致する。このような形で解析した実験結果と式(7)により与えられるヌセルト数をレイリー数の関数として示した図が図7である。なお、実験結果の解析にあたっては、対流の影響の無い十分に小さなレイリー数におけるデータが無いことから、別の計測で求めた油の熱伝導係数と氷の潜熱から、対流の無い場合の氷の成長量を求めている。

図4より、実験結果は式(7)に対して若干小さめの値を与えるものの全体としての傾向は良く一致していることが判る。図には、式(1)に基づき、油による熱伝導率として式(5)及び(7)を用いて計算を行った数値計算結果も示した。計算結果は実験結果よりも僅かに高い値を与え、式(7)との一致が良い。この理由としては、計算においては油の下面に成長した氷による熱抵抗を無視していることが考えられる。また図には、Wolfeらによるオイル-アイス・サンドウィッチ形成実験結果に基づくヌセルト数の推定結果も示す⁴⁾。この実験結果も、ばらつきは大きいものの、全体的傾向としては本研究における他のデータとの整合性は良い。以上の結果から本研究では、油を通した熱伝達の表現式として式(7)を用い、油の下面における氷の成長を計算することとした。

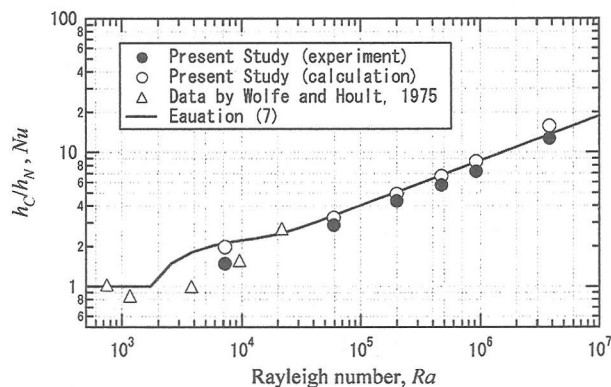


図4 ヌセルト数

5. 現地の条件下におけるオイル-アイス・サンドウィッチ形成の推定

冒頭に述べたように、本研究の目的は、オイル-アイス・サンドウィッチ形成に要する時間についての具体的な指標を与えることにある。このために、前節で述べた油下面における氷の成長モデルを、本プロジェクトにおいて実施されていた氷盤下における油の拡散についての数値計算結果と組み合わせることにより、現

地におけるオイル-アイス・サンドウィッチ形成過程をシミュレートした。

氷盤下における油の拡散挙動に関する数値計算結果の例を図7に示す。同図は40,000 m³の油が氷盤下面の一点から流出した状態を想定した計算結果であり、氷盤下面における油の拡散領域が示されている。このような場合の油の拡散挙動は氷盤の底面の凹凸の影響を受けるが、この計算ではオホーツク海において計測した氷盤下面の形状の情報を用いられている。図より、40,000 m³という大量の油の流出にもかかわらず油の拡散が直径700 m程度という比較的小さな領域に留まっていることが判るが、これは、氷盤下面の凹部に油が貯留されることによる。なお、氷盤下における油の拡散挙動に関する研究の詳細については、文献5)から8)を参照されたい。

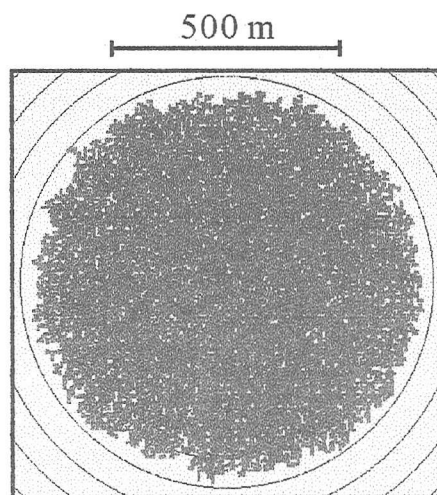


図5 氷盤下面における油の拡散計算結果

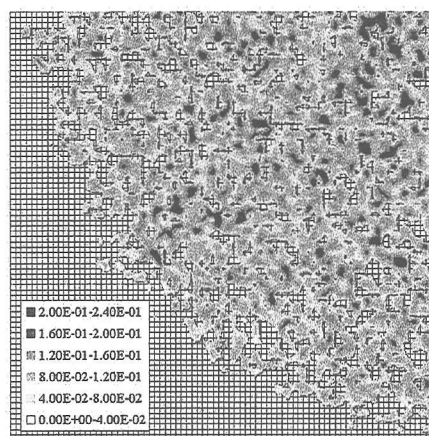


図6 図5の計算結果における油層の厚さの分布

図7に示された計算結果に対してオイル-アイス・サンドウィッチ形成の推定計算を行った。前節の議論から判るように、油の底面における氷の成長速度は様々なパラメーターに影響されるが、その一つが氷盤の下に

存在する油層の厚さである。油層厚さは、氷盤下面の凹凸の程度により決まる。図7のシミュレーションの場合の油層の厚さの分布を図6に示す。なお、図が煩雑なものとなることを避けるために、油の1/4の領域についての油層厚の分布を示している。同図より、油層は厚いところでは20 cmを超えるものとなっていることが判る。

一方、油の特性もその下の氷の成長速度に影響する。この場合、熱伝導率・比熱といった熱的特性の影響は当然のことながら、油層を通しての熱伝達率が対流の発達に依存することを考えると、油の流体特性も重要なパラメータとなってくる。このため、ここでは油の動粘性係数を変化させて計算を行った。油の動粘性係数は、油種により大きく変化する。図7は、カナダ環境省発行の Oil Catalogue⁹⁾に示されたデータをもとに原油及び加工油の動粘性係数の分布を示したものであるが、非常にバラエティーに富んでいることが判る。このような動粘性係数の違いがオイル-アイス・サンドウィッチ形成に影響を与えることが考えられる。このため、今回の計算では、油の動粘性係数としては、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 及び $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の3種類の値について計算を行った。これを含めて、計算に用いた油と氷の特性値を表1に示す。また、氷上面の温度は -15°C とした。

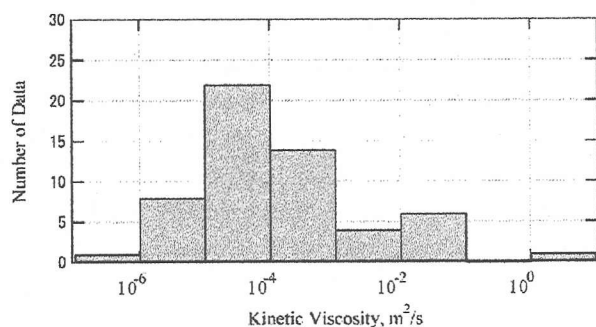


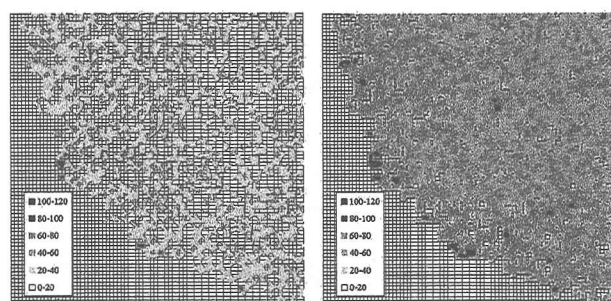
図7 油の動粘性係数の分布

表1 計算に用いた油と氷の特性値

	油	氷
熱伝導率, $\text{J m}^{-1} \text{ deg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	2.00	0.13
比熱, $\text{J kg}^{-1} \text{ deg}^{-1}$	1700	2000
密度, kg m^{-3}	845	910
動粘性係数 $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-6}$	---
体積膨張係数	9×10^{-4}	---
潜熱, kJ kg^{-3}	---	330

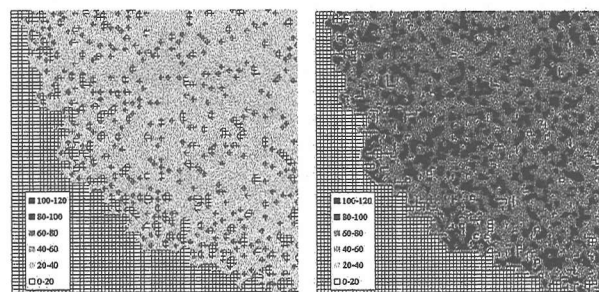
図8, 図9及び図10に、図6に示した油の領域に対して、油の底面における氷の成長についての計算結果を示す。これらの図は、油の動粘性係数が、それ

ぞれ、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 及び $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のケースについての計算結果であり、それぞれ、油の流出から、(a) 120 時間後、(b) 360 時間後における氷の成長量を示したものである。



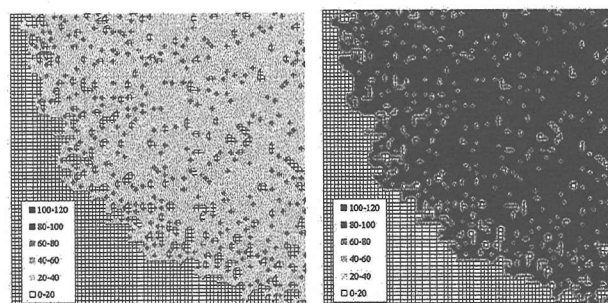
(a) 120 hours (b) 360 hours

図8 計算結果 ($\nu=1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$)



(a) 120 hours (b) 360 hours

図9 計算結果 ($\nu=1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)



(a) 120 hours (b) 360 hours

図10 計算結果 ($\nu=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

6. 考察

図8, 図9及び図10に示した計算結果は、現地におけるオイル-アイス・サンドウィッチ形成の程度について具体的な指標を与えるものとなっている。図9はほぼ平均的な動粘性係数である $\nu=1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の油についての計算結果であるが、5日後における油下面での氷の成長量は30 mm程度であるのに対し、15日経過した時点では50 mm以上、ところによっては100 mm

を超える厚さの氷が成長している。流出油の回収等の汚染防除作業の実行に対する油底面における氷の成長量の影響は、作業の手法にもよるため一概には言えないが、成長開始直後の氷の強度が弱いことをも考慮すると、この場合、流出後10日程度までの間が流出油に対する汚染防除作業が可能な期間と考えられる。

また、オイル-アイス・サンドウィッチ形成速度に対する油の動粘性係数の影響についても興味深い結果が得られている。流出から5日経過時における20mmを超える厚さの氷の成長を見ると、図8では油の底面の一部に限られているのに対し、図10では全域に亘って氷が成長している。また同様に、15日を経過した時点での氷の厚さは、それぞれ、前者が50mm程度であるのに対し、後者では100mmと大きな違いがある。このような違いは油層内部での対流の発達による熱伝達量の違いによるものであり、油の流体力学的特性がオイル-アイス・サンドウィッチ形成速度に影響を与えることを示したものとなっている。

以上のように、本研究の結果によりオイル-アイス・サンドウィッチ形成についての定量的指標をえることができた。しかしながら、本論文に示した手法は幾つかの面において実現象の単純化を含んでいる。以下、これらについて議論して将来的な研究の発展の方向を探ってみたい。

議論すべき第一点目は、氷板上面の積雪の影響である。本研究では、氷の熱伝導係数としては、海氷について計測された一般的な値を仮定して熱伝達計算を行った。しかしながら、現実の海氷を通しての熱伝達には様々な因子が影響を与える。特に積雪の影響は大きい。雪はその内部に空隙を多く含むため、一般に断熱性が高く、積雪の程度によってその下部の氷の成長が左右される。このような雪による断熱効果は、積雪深・空隙率（雪の密度）等により決まり、これらは対象海域における降雪量・風速・海氷表面の凹凸の程度といったパラメータに依存する。もし、油流出の可能性のある海域として具体的な検討対象海域が設定されるのであれば、その海域における積雪の特性を考慮してこれを含んだ、積雪-海氷-油層を通しての熱伝達モデルによりオイル-アイス・サンドウィッチ形成計算をすることとなる。

一方、氷の上面温度の変動の影響も今回の計算では考慮されていない。今回の計算では、氷の上面温度を-15℃と一定として計算を行ったが、実際には気温の変化・風の影響等によりこの温度は変動する。これについては、氷の上面における温度の変動の影響は氷内部のある程度の深度までには伝わらないことが示されているため、今回の計算例のように氷が比較的厚い場合にはその底部における温度の変動は小さなものとなることが考えられる。しかしながら、氷の成長初期段階で、氷厚が薄い場合にはこのような温度の変動がオイル-アイス・サンドウィッチ形成に影響を与える可能性はある。

謝辞

本研究は、運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的研究推進制度」による研究の一環として実施されたものであり、ここに同事業団に謝意を表す。

参考文献

- 1) 佐伯, 大塚, 塚, 泉山, 山本: 寒冷海域に流出した原油の回収に関する基礎的研究, 寒地技術論文・報告集, Vol. 18, pp. 459-466, 2002年.
- 2) Martin, S. (1979). "A Field Study on Brine Drainage and Oil Entrainment in First-Year Sea Ice." *Journal of Glaciology*, Vol. 22, No. 88, pp. 473-502.
- 3) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改訂版第4版, 1986年.
- 4) Wolfe, S. and Houtt, D. (1974). "Effects of Oil under Sea Ice." *Journal of Glaciology*, Vol. 13, No. 69.
- 5) Izumiyama, K., Konno, A. and Sakai, S. (2002). "Experimental Study on Oil Spreading under Ice Covers" *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 821-826.
- 6) Izumiyama, K., Uto, S., Konno, A., Sakikawa, M. and Sakai, S. (2002b). "Spreading of Oil under Ice Covers: Effects of Bottom Roughness of Ice" *Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice*, Vol. 2, pp. 128-133.
- 7) Sakai, S., Liu, X. and Izumiyama, K. (2002). "A Numerical Model for the Simulation of Oil Spreading under Ice Cover" *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 816-820.
- 8) Yamamoto, Y., Sakikawa, M., Homma, D. and Kioka, S. (2002). "Underside Profile and Drift Characteristics of Sea Ice on the Japanese Coast of Okhotsk Sea" *Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice*, Vol. 2, pp. 399-406.
- 9) Environment Canada (1992). A Catalogue of Crude Oil and Oil Product Properties (1992 Edition).