

氷盤下に形成した空気層の挙動と氷盤下流出油の分離に関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF AIR LAYER FORMED BENEATH ICE SHEET AND METHOD FOR SEPARATING OIL FROM ICE

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

Natsuhiko OTSUKA, Kouji OGIWARA, Kohei KANAAMI, Shinjiro TAKAHASHI, 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番18号)

² 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)

³ (株) 西村組 (〒099-64 紋別郡湧別町栄町)

⁴ 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)

If an oil spill were to occur under the sea in the winter drift ice season, the spilled oil would spread along the lower surface of the ice. In this case the spilled oil is thought to gradually settle in the cavities and gaps under ice sheets. Accordingly, the recovery of spilled oil becomes very difficult. However, the oil can be separated from those cavities by introducing an air layer between the oil and the ice floe. But these gaps between ice floes are usually thin and weak. This paper examines a characteristics of air layer which formed under the lower surface of the gaps of ice floes. The experiments on bearing capacity of ice between gaps of ice floes against the pressure of air layer and characteristics on heat transfer of ice and air layer were conducted. The experiments showed that the ice between gaps of ice floes could be stable against air pressure, and the air layer insulated the heat transfer through ice and saline so that growth of ice would be prevented.

Key Words: Oil Spill, Oil Spilled under Ice, Air Layer

1. はじめに

1999年夏より始まったサハリン東部大陸棚での原油開発では、今後の本格的な生産が始まると、海底パイプラインを用いて通年で生産することが計画されている。冬の流氷期に海中で流出事故が発生すると、流出原油は浮上して流氷の下面に沿って拡がり、次第に流氷下面に形成された凹部に滞留するようになると考えられる。著者らはこれまでの研究により、流氷下面の凹部に溜まった流出原油を氷盤下面の凹部に溜まった油と氷盤の間に空気層を形成することにより、油と氷盤の界面の抵抗、および凹部の段差を小さくすることが有効であることを示した¹⁾²⁾。しかし、氷盤同士の間部分は氷厚が薄く強度が低い場合、空気層が漏出する可能性がある。

また、低温の気象によって氷盤が冷やされて成長すると、空気層やその下の油層が氷中に取り込まれる可能性がある。

本研究は、氷盤下面に設けた空気層の圧力に対する流氷盤同士の間隙部分の安定性、および空気層が氷盤の成長に及ぼす影響を明らかにすること目的としている。

2. 氷盤間隙部に形成した空気層

(1) 氷盤間隙部下面に形成した空気層

氷盤間隙部の下面に空気層を形成した場合、氷盤には下方から空気層の圧力が作用する。氷盤群の密接度が小さく、氷盤間隙部の氷厚に比べて空隙部の間隔が広い場合、破壊は曲げが主体となると考えられる。

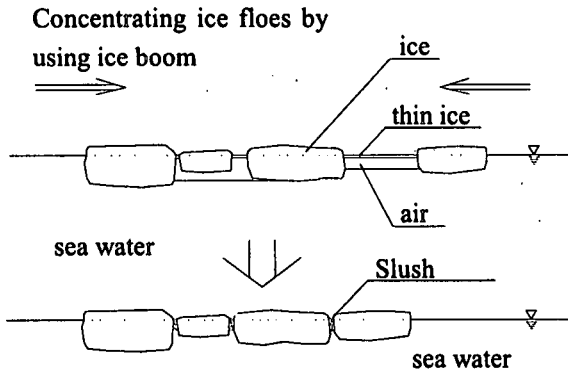


図-1 氷盤間隙部下の空気層

氷盤間隙部の氷に生じる単位幅当りの曲げモーメントは、間隙部の周辺が凍着によって固定された矩形氷版に、空気圧・自重による等分布荷重が作用する場合とみなすことにより、次式にて算定できる。

$$\begin{aligned} \lambda \leq 1 \quad M_x &= Xql_x^2, M_y = Yql_y^2 \\ \lambda > 1 \quad M_x &= Xql_y^2, M_y = Yql_x^2 \\ \lambda &= l_x / l_y \end{aligned} \quad (1)$$

氷にはたらく空気層圧と自重は、

$$\begin{aligned} q_a &= \rho_w g \left(\frac{\rho_i}{\rho_w} t_i + t_a \right) \\ q &= q_a - \rho_i g t_i \end{aligned} \quad (2)$$

海氷の曲げ強度 σ_f を知る方法として、ブライン量、塩分量、氷の温度による(3)式がある³⁾。

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 7.5 \times 10^5 \left(1 - \frac{v_b}{0.202} \right)^{1/2} \quad (N/m^2) \\ \sqrt{v_b} &< 0.33 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_b &= S(0.532 - 49.185/T), (-0.5^\circ\text{C} \sim -22.9^\circ\text{C}) \\ S(\%) &, T(^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \quad (4)$$

これより、曲げ応力 σ_b および氷盤間隙部の氷の曲げ強度 M_b は、

$$\sigma_b = \frac{6M}{t^2} \quad (5)$$

$$M_b = \frac{\sigma_f t^2}{6} \quad (6)$$

ここに、

M_x, M_y ; それぞれ x 軸 y 軸方向曲げモーメント
 Y ; 曲げモーメント係数
 Q ; 等分布荷重強度
 l_x, l_y ; x 方向, y 方向の辺長
 ρ_i, ρ_w ; 氷, 海水の密度
 g ; 重力加速度

v_b ; 海氷のブライン量(%)

t ; 海氷の厚さ

S ; 氷の塩分量 (%)

T ; 氷の温度($^{\circ}\text{C}$)

空気層の厚さが大きくなり、空気の圧力が増大して曲げモーメントが上記の M_b を越えると、曲げ破壊が生じ、空気は大気中へ抜け出すと考えられる。

一方、氷盤の密接度が大きく、空隙部の間隔がその氷厚に比べて小さい場合、破壊はせん断が主体となると考えられる。海氷のせん断強度はブライン体積への依存性が知られており、およそ $5 \times 10^2 \sim 13 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ 程度といわれている⁴⁾。

(2) 下面に空気層がある場合の氷盤成長特性

氷盤の表面から鉛直下方に z 軸をとり、温度 θ 、時間 t とするとき、熱伝導の方程式は次式となる。

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (8)$$

c, ρ, K はそれぞれ氷盤の比熱、密度、熱伝導率である。定常状態では(8)式は(9)式のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0, \therefore \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

氷・空気の系を水平な層にわけて考えると、

$$K_i \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_i = K_a \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_a = \text{const} = Q \quad (10)$$

ここに、

θ ; 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

Q ; 熱流量

K_i ; 氷の熱伝導率(W/m/K)

K_a ; 空気の熱伝導率(W/m/K)

氷盤下面に空気層がある場合、空気層の熱伝導率が小さいため、塩水から上方に放出される熱量が少なくなり、氷結が阻害されると考えられる。

3. 実験

(1) 氷盤間隙部に形成した空気層の安定性実験

水槽に流氷盤同士の間部分を再現した模型氷を作成し、その下に空気層を形成して安定性を確認する実験を行った。実験に用いた水槽は、 $^B 0.2\text{m} \times ^L 1.7\text{m} \times ^H 0.85\text{m}$ で、側面部に透明アクリル盤を用いて、側方から観察できるようにした。また、実際の海域を想定し、水槽内の氷の成長を鉛直方向からのみにするため、側面部には断熱材を巻き、側方・下方からの温度伝達をなくした。この水槽を低温室に設置し、

塩水に一定間隔で氷盤を浮かせ、その間隙部を凍結させた。氷盤間隔および生成した氷の氷厚を変えて、間隙部にエアコンプレッサーにより一定圧力にて空気を注入し、氷盤間隙部の強度・塩分濃度を測定した。氷盤の間隔は 10,15,20cm の 3 ケース、氷厚は 0.2~1.2cm とし、各条件において間隙部氷盤の破壊時の空気層厚を測定した。また、間隙部がスラッシュアイス状態で 5 時間放置したのちに、同様の実験を行い、空気の挙動を確認した。

(2) 氷盤下に形成した空気層による熱伝達特性

流水氷盤間隙部下面に空気層がある場合の氷盤の成長特性、および熱の伝導特性に関する実験を行った。

(1)と同様の側面透明アクリルの水槽にて、塩水に流水氷盤を浮かせ、その間隙部を凍結させた。定めた氷厚に成長した時点で、空気を注入し、氷盤表面、氷盤下面、空気層の温度、空気層下の水温、外気温の時間変化を熱電対により計測した。さらに、一定時間置きに写真を撮り氷の成長状態を観測した。

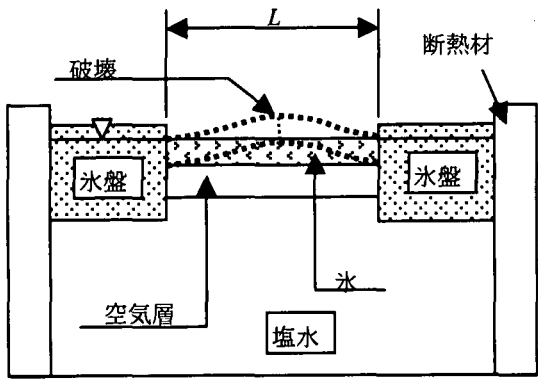


図-2 空気層に対する氷盤間隙部の安定性実験

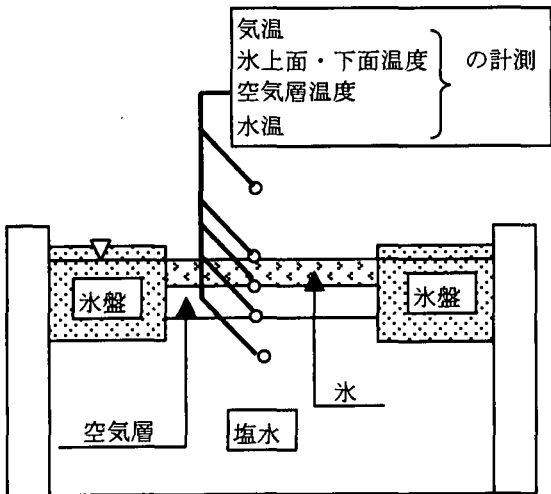


図-3 氷盤の熱伝導特性実験

4. 実験結果と考察

(1) 氷盤間隙部に形成した空気層の安定性

実験結果より、氷盤間隙部の氷における曲げ応力を計算して表-1 に示す。また、実験中における氷の様子を写真-1 に示す。実験氷はおよそ 4~9(kN/m²)の曲げ応力にて破壊した。これに対し、(3)式にて算定した曲げ破壊応力度は 250~324(kN/m²)であった。このように実験に供した氷は材例が若く、氷厚も小さいため、充分に成長した氷よりもはるかに弱い強度状態のものであった。また、明瞭な曲げ破壊が発生しない場合でも、クラックが発生して空気が上方へ抜け出すパターンでの破壊が確認された。氷の支間長と破壊時の荷重を図-4 に示す。図中の曲線は氷厚 1.0(cm)、曲げ破壊応力 6.0(kN/m²)として荷重と支間長を計算した結果を示す。実験値では支間が増大するにつれて破壊時の荷重が小さくなっており、計算値はこの傾向を良く表している。また、図-5 に氷厚と破壊時荷重の関係を示す。図中には、曲げ強度を 6(kN/m²)とした場合における、支間長別の破壊時荷重を計算して示す。ばらつきはあるものの、実験値と計算値は概ね同じ傾向を示している。これより、曲げ破壊の力学モデルにて空気層圧に対する氷の強度安定性を評価できると考えられる。

スラッシュアイスから再凍結させたケースでは、水中に噴出した空気泡が初めは水中に貫入するものの、固結部分にあたって滞留し、氷の下方に空気層を形成した。さらに空気量を増大させると、最終的にはクラックが発生して氷上に少しずつ漏出した。

表-1 実験結果

氷厚 (cm)	空気層 厚(cm)	支間長 (cm)	曲げ応力 (kN/m ²)	Memo
0.9	4.9	20	30.2	割れない
1.2	3.7	15	11.0	crack
1	3.2	10	7.9	crack
1	4.3	10	10.6	crack
0.15	3.5	10	383.4	crack
0.15	5.3	10	580.6	破壊
0.2	1.5	15	161.0	crack
0.15	1.4	20	310.5	crack
0.75	0.8	20	7.1	破壊
0.85	2.6	15	15.4	crack
1	1.7	10	4.2	破壊
1	2	20	10.0	破壊
1	1.5	15	6.4	破壊
1.1	3.6	10	7.3	crack
1.1	4.5	10	9.2	破壊

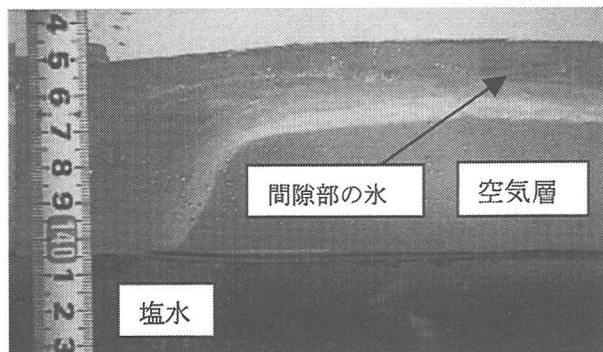


写真-1 実験氷と空気層（曲げ破壊した例）

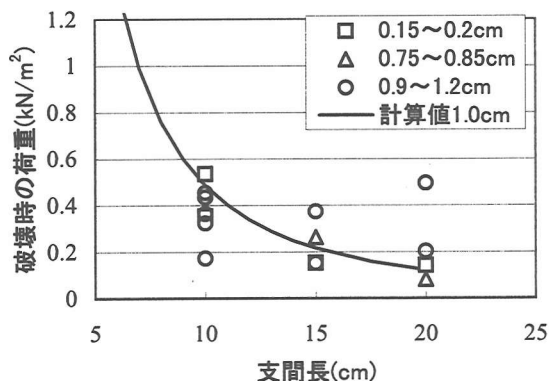


図-4 支間長と破壊時荷重

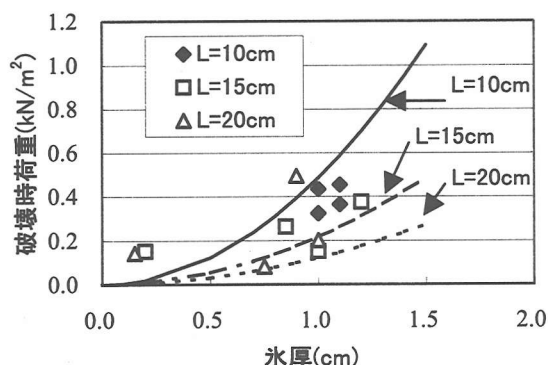


図-5 氷厚と破壊時荷重

そこで、曲げ破壊応力 $2.0 \sim 6.0 (\text{kN/m}^2)$ として、氷盤間隙部の氷厚と破壊限界における空気層厚を算定して、図-6、図-7に示す。曲げ破壊応力が $6.0 (\text{kN/m}^2)$ 程度あれば、間隙部の氷厚 10cm の場合、間隙幅 30cm において空気層厚 50cm 程度までは空気もれがなく、間隙部の氷は安定しているものと考えられる。また、油回収のためにアイスプームにて氷盤を移動・集約することにより氷盤間隙部がスラッシュアイス状の状態となっても、再凍結により曲げ破壊応力が $2.0 (\text{kN/m}^2)$ 程度あれば、間隙幅 20cm において空気層厚 30cm 程度までは間隙部の氷は安定しているものと考えられる。

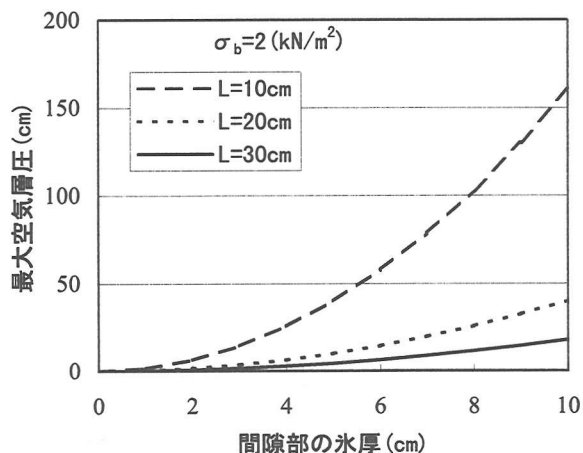


図-6 氷厚と最大空気層厚 ($\sigma_b=2 \text{kN/m}^2$)

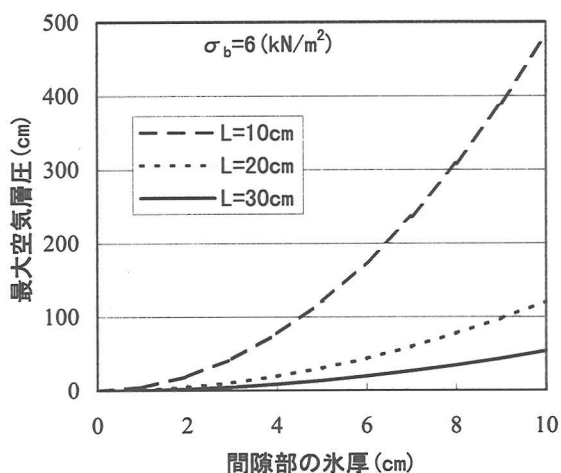


図-7 氷厚と最大空気層厚 ($\sigma_b=6 \text{kN/m}^2$)

(2) 氷盤下に形成した空気層による熱伝達特性

外気、氷盤上面、氷盤下面および空気層、塩水の温度変化を計測した結果を図-8～図-10に示す。また氷厚・空気層厚の変化を表-3に示す。

図-8では、空気層が氷盤側方から漏出したため、空気層位置の温度が水温とほぼ同様となっている。これに対して空気層が安定して存在していた図-9、図-10では、氷盤上面から順に氷盤下面・空気層・水温の順に温度が上昇している。

空気層を設けなかった Case-B④では、実験開始後72時間で氷厚が下方に約 3.2cm 成長した。一方空気層が抜けた Case-A④以外では、氷盤の成長は認められなかった。また、周囲の氷盤は72時間後で下方に約 2.5cm 成長した。このように空気層を設けたケースでは、氷盤の成長が阻害されることが確認された。

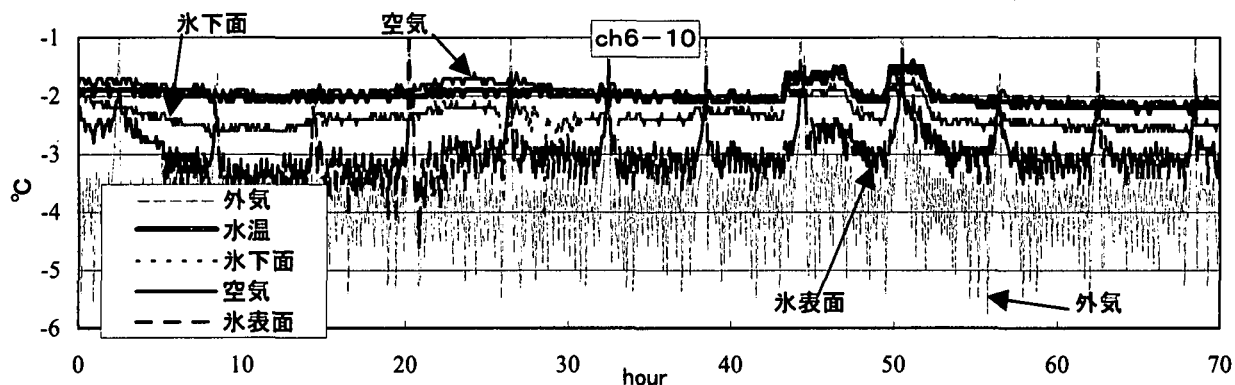


図-8 温度変化 Case-A④

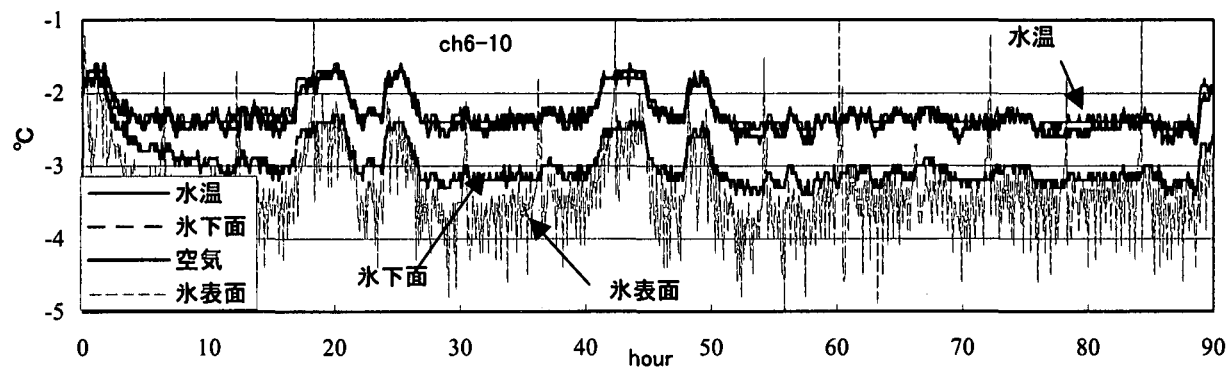


図-9 温度変化 Case-B①

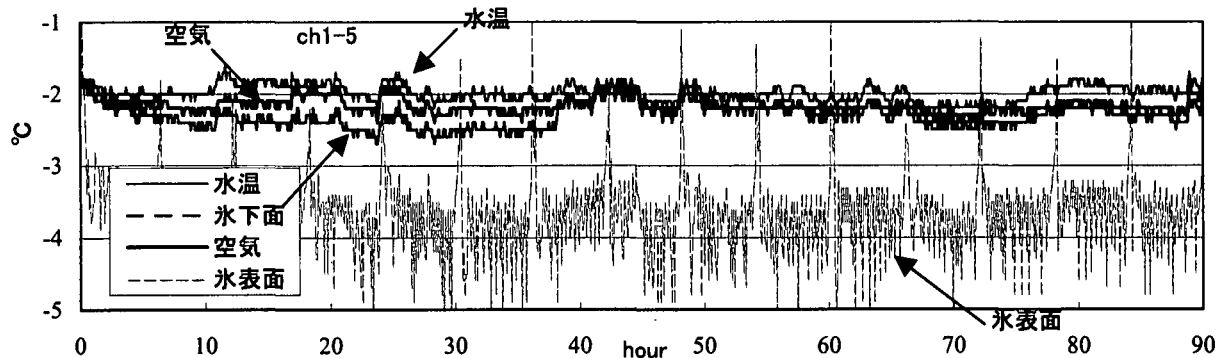


図-10 温度変化 Case-B⑥

表-3 氷厚の変化

番号	Case-A				Case-B			
	氷厚(cm)		空気層 (cm)		氷厚(cm)		空気層 (cm)	
	0hr	50hr	0hr	50hr	0hr	50hr	0hr	50hr
①	2.8	2.4	3.0	0.4	2.5	2.7	6.2	2.2
②	2.8	2.5	3.2	0.5	2.7	2.5	3.5	3.3
③	3.0	2.5	3.5	2.5	2.1	2.1	2.3	2.2
④	5.0	6.5	2.5	0.0	2.5	5.7	0.0	0.0
⑤	6.0	5.4	1.9	0.1	2.8	2.8	2.2	1.9
⑥	5.0	4.5	3.2	0.1	2.5	2.5	3.9	3.7

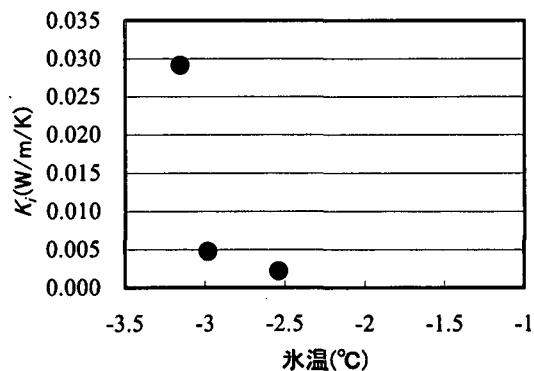


図-11 氷の熱伝導係数

つぎに、式(10)を用い、空気の熱伝導率 K_a を与えることにより、氷の熱伝導率を算定した結果を図-11に示す。(ここに、 $K_a=0.024 \text{ W/m/K}$ とした。)

小野は北海道の紋別港内で海氷の熱的性質を測定しており、その際の熱伝導率は氷温 -3.4°C にて $1.4 \times 10^{-3} (\text{cal/cm/s}^\circ\text{C})$ 程度 (0.033 W/m/K) であったことを報告している⁵⁾⁶⁾。本実験における熱伝導係数はこれより小さめであるが、概ねオホーツク海における海氷に近い性質であったと考える。

5. 結論

(1) 実験より、氷盤同士の間隔が広くかつ氷厚が薄い場合には、空気層厚を増すと間隙部の氷は曲げ破壊し、空気は氷上に漏出した。空気層圧に対する間隙部の氷の耐力は、間隙幅の2乗に比例して低下し、氷厚の2乗に比例して増大することを確認した。

(2) 流氷盤同士の間に形成された薄い氷部分に関して、4 辺固定版として弾性的に強度の評価を行った。これより、氷盤空隙部がスラッシュアイス状の状態となっても、再凍結により曲げ破壊応力が $2.0 (\text{kN/m}^2)$ 程度あれば、間隙幅 20cm において空気層厚 30cm 程度までは、間隙部の氷は空気層を閉じ込めることが可能であると考えられる。

(3) 氷盤下面に空気層があると、氷盤下の塩水と氷盤が接しないこと、および熱の伝導が阻害されるため、氷盤の成長速度は遅くなる。したがって、氷盤下に空気層を形成することにより、流出した油層が氷中にサンドイッチ状に取り込まれる現象を予防する効果がある。

(4) 以上の結果より、氷盤下に形成した空気層は、氷盤間隙部においても比較的安定して維持されると考えられる。また、アイスプームで氷盤群を移動・集約した場合に、氷盤の間隙部が狭められてスラッシュアイス状となり、内部に狭い隙間ができて、空気は容易には漏出しないと考えられる。

本研究は運輸施設整備事業団による「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) 大島香織，宇佐見宣拓，高橋伸次郎，川合邦広，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，土木学会海洋開発論文集，Vol.14，pp435-439，1998.
- 2) 大塚夏彦，宇佐美宣拓，荻原浩二，高橋伸次郎，佐伯 浩：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，土木学会海洋開発論文集，Vol.16，pp.175-180，2000.
- 3) (社)寒地港湾技術研究センター：氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル，pp.24，1996.
- 4) (社)寒地港湾技術研究センター：氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル，pp.25，1996.
- 5) 小野延雄：海氷の熱的性質の研究Ⅳ，低温科学，北海道大学低温科学研究所，Ser.A26.，pp.329-349，1968.
- 6) 小野延雄：海氷の熱的性質の研究Ⅲ，海氷の比熱について，低温科学 物理編，北海道大学低温科学研究所業績，第 752 号，Ser.A24.，pp.247-257，1965.