

II—36 氷厚の増加に及ぼす積雪の効果について

日本データサービス(株) (正) 桜庭 章孝
 東海大学 札幌校舎 (正) 奥 利
 北海道大学 工学部 (正) 佐伯 若

1 緒言

最近 寒冷地における海岸海洋開発が 盛んに行なわれてきた。現在では、北極海・サハリン・オホーツク海・渤海等の海域で石油・ガスの資源開発に大きな期待が寄せられている。これらに関連して石油・ガスの掘削、貯蔵タンク 砕氷船等の建設設計に氷の厚さを知る必要性が重視され、気象条件から氷厚を算定することがせまられている。本研究では、結氷後の積雪効果による氷厚増加について実験を行ない積雪後の氷厚増加の推定法とその熱的变化を明らかにしたものである。風速の影響は、考慮していない。

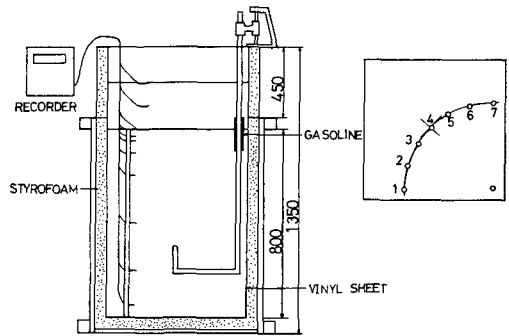


図-1

2 実験装置と実験方法

すべての実験は、北海道大学工学部開発科学実験所内の低温室で行なった。実験装置は、図-1に示すように2つの水槽Aタンク(49×49×85cm)とBタンク(58×58×85cm)を用いたこれらのタンクは側面と底面に20mm厚のスタイロホームを2枚重ねて断熱し、さらに表面を20mm厚のスタイロホームでタンクの側面底面からの熱の出入を可能な限り遮断したタンク内の水温、氷温分布と氷厚増加の測定結果からタンクへの熱の出入は、ほとんどタンク上面からのみである事が確認された。測定項目は気温・水温・氷温・雪温それに氷厚を測定した。気温は3点、水温・氷温の測定は鉛直方向に9点、雪温は表面と底面の2点で測定した。また氷厚の測定には、氷厚測定器を用いて7点で測定した。実験は、気温-30℃に対して雪のない場合を2ケース、雪をのせた場合を4ケース、気温-10℃に対して雪をのせた場合を3ケースを行なった。

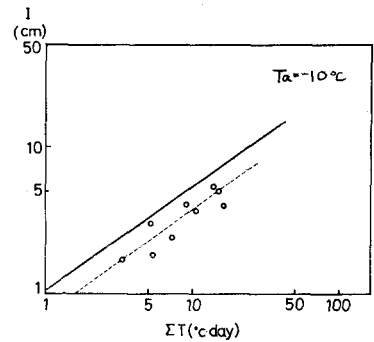


図-2

3 氷厚と積算寒度の関係

本実験において気温-30℃と点線で示す気温-10℃で得られた結果が図-2で、佐伯は、すでに気温 $T_a = -5^\circ\text{C}$ 、 -10°C とそれに -20°C での氷厚 $I(\text{cm})$ と積算寒度 $\Sigma T(^{\circ}\text{C}\cdot\text{day})$ の関係を求めた結果が、図-3である。図から明らかなように、氷厚 I と積算寒度 ΣT の間には次の関係が得られる。

$$I = K(\Sigma T)^m \quad \dots (1) \quad \text{この} K \text{と} m \text{は気温によって異なっ}$$

いる。その関係を示したものが 図-4(a)(b)である。氷厚と積算寒度の理論的解法は、Stefan, Neumann⁽²⁾、それに北大低温研⁽³⁾の結果が知られているが、その理論解は $H_0(\Sigma T)^{1/2}$ の結果が得られているが、Stefan, Neumannは、結氷と表面温度を一定値とし、北大低温研は結氷と表面温度と気温とが等しいという仮定に基づい

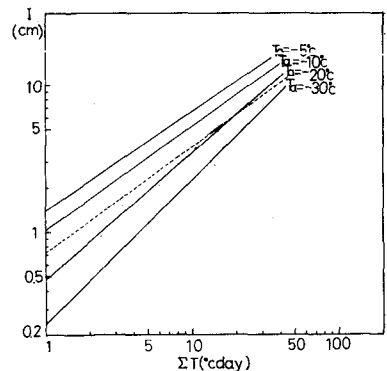
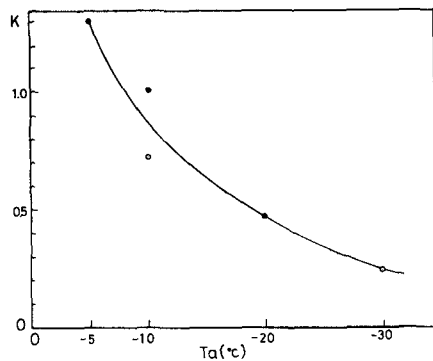


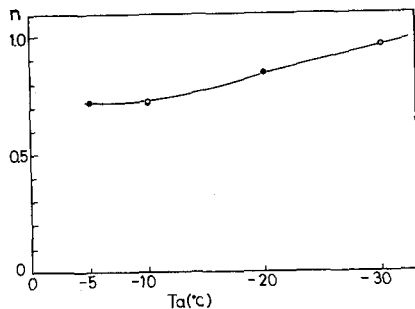
図-3

ている。

この結果は、本実験結果とは異なっている。ここで氷盤表面の温度 T_a と気温 T_a の比 T_a/T_a と結氷開始時間 t (hr)の関係を示すものが図-5である。図から明らかに気温が低くなるにつれて T_a はなかなか気温



(a)



(b)

図-4

と一致しないことが判る。よって彼らの理論解は、表面温度を一定または、気温に等しいとする仮定に誤りがあることが判る。よって、(1)式と図-4(a)(b)より、無風の場合の気温変化に対応する氷厚を求める事ができる。

尤も $T_a = -10^\circ\text{C}$ の場合、過去に得られた結果と本実験で得られた結果を比較すれば、 m の値は、ほぼ等しいが K の値は、本実験で得られた値はやや小さな値になっている。また氷盤表面温度も急速に気温に近づく傾向にある。これは結氷時の判断の違いと氷厚測定誤差によるものと考えられる。

4 氷厚増加に及ぼす積雪効果

本実験は、気温 $T_a = -10^\circ\text{C}$ と -30°C で積雪深 l (cm)を変えて、使用した積雪の条件は、表-1に示す。氷厚が5~7cmになったところで、その気温に冷した雪を氷盤上に散布した。氷盤の上に積雪がある時、積雪の断熱性により氷厚の増加速度は遅くなることを示したが、図-6(a)(b)である。図中の実線は、積雪のない場合の氷厚と時間の関係である。

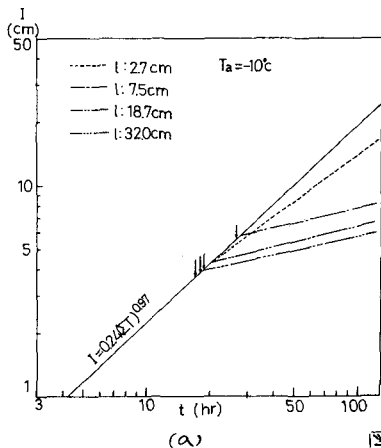
表-1 実験条件

$T_a = -10^\circ\text{C}$	
積雪深 l (cm)	冠雪時間 t (hr)
3.0	37:30
7.8	34:10
16.0	42:00

$T_a = -30^\circ\text{C}$	
積雪深 l (cm)	冠雪時間 t (hr)
2.7	14:30
7.5	21:00
18.7	14:50
32.0	13:30

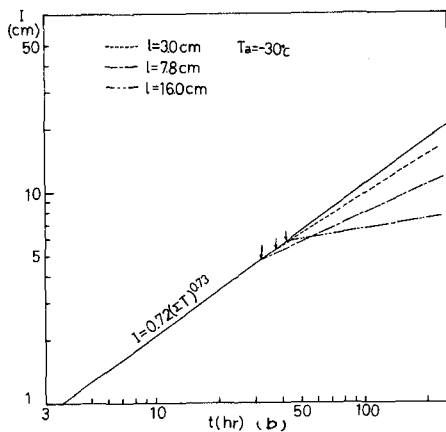
図-5

図から明らかのように積雪深 l が大きい程に氷厚の増加率は小さい事になる。ここで積雪深 l が大きい程に氷厚の増加率も大きくなる。また本実験期間中に積雪深 l の変化はほとんどなかった。



(a)

図-6



(b)

冠雪後の氷厚 I_0 (cm)の変化式は(2)式によって表わされる。

$$I_0 = K^* \cdot t^{m^*} \quad \dots (2) \quad \text{また積雪深度} X \text{の時, 冠}$$

雪した場合との時の氷厚を I^* とすれば(3)式で表わされる。

$$I_0 = I^* X^{m^*} (\Sigma T)^{m^*} \quad \Sigma T \leq X \quad \dots (3)$$

ここで K^* は(4)式で示す。

$$K^* = K \left| \frac{24}{17.1} \right|^{-m^*} \frac{X^m}{X^{m^*}} \quad \dots (4)$$

$\bar{K}$ は 図-6 (a)(b)より 積雪深 l によって変化するが、積雪深 l と

その雪の密度 ρ

の比の関係を

示す。 K^* は、 $\bar{K}$

m 、 m^* が与えら

れば求まる。 n

は $\bar{K}$ により決定

されるので最終

的に $\bar{K}$ と ρ が与

えられること

(a)

より K^* は決定される事になる。次に $\bar{K}=-10^\circ\text{C}$ 、 -30°C の

冠雪時の氷盤表面の温度 T_0 の時間変化を調べた結果が、

図-8 (a)(b)である。図中の矢印は冠雪時間を示す。冠雪

後、氷盤表面温度 T_0 は、急激に上昇するため矢印は急い

でなくなり、その後徐々に T_0 は低下している。 $\bar{K}=-10^\circ\text{C}$ 、

-30°C とも約4時間後 T_0 は安定する。また積雪深 l が

大きい程 T_0 の低下速度が小さい事がわかる。

5 積雪効果の熱的性質

本実験を通して 気温と雪中温度、氷中温度と氷に水

分布の規定結果から、雪、氷の熱伝導率を計算した。

氷と氷が t_1 時間から t_2 時間までに変わる熱量 ΔQ は

(5)式で示される。

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 = & - \left\{ C_i \int_{t_1}^{t_2} f(I) dt + C_w \int_{t_1}^{t_2} f(h) dh \right. \\ & - \left. (C_i \int_{t_1}^{t_2} f_2(I) dt + C_w \int_{t_1}^{t_2} f_2(h) dh) \right. \\ & + (I_2 - I_1) \cdot \rho_i \cdot L \} \quad \dots (5) \end{aligned}$$

C_i : 氷の比熱($\text{cal/g}^\circ\text{C}$), ρ_i : 氷の密度(g/cm^3),

C_w : 水の比熱($\text{cal/g}^\circ\text{C}$), I : 氷厚(cm)

ρ_i : 氷の密度(g/cm^3), L : 融解熱(cal)

$f(h)$: 氷温分布, $f(I)$: 氷温分布

単位時間に変わる熱量は(6)式で示される。

$$\Delta Q' = \Delta Q_1 / (t_2 - t_1) = \Delta Q_1 / \Delta t \quad \dots (6)$$

ここで氷塊内の熱伝導率 λ_I ($\text{kcal/m}^\circ\text{C}$)の式は

$$\lambda_I = \Delta Q' \cdot I / A \cdot (T_{i2} - T_{i1}) \quad \dots (7)$$

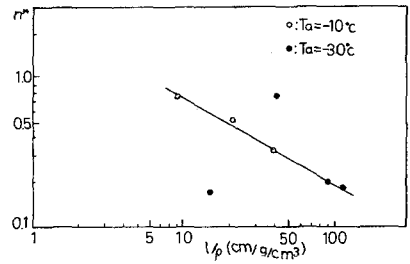
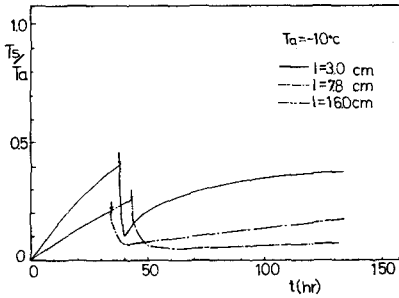
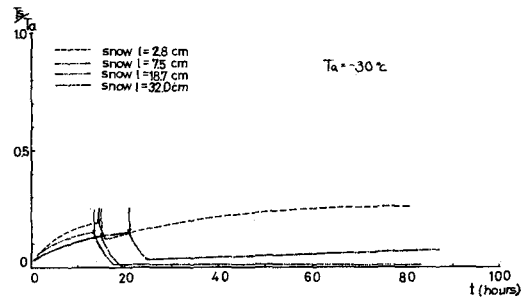


図-7



(a)



(b)

図-8

表-2

Ta = -10°C		
積雪深 l (cm)	雪の密度 ρ (g/cm³)	熱伝導率 λ_s (Kcal/mhr°C)
3.0	0.333	0.217
7.8	0.345	0.274
16.0	0.400	0.324

Ta = -30°C		
積雪深 l (cm)	雪の密度 ρ (g/cm³)	熱伝導率 λ_s (Kcal/mhr°C)
2.7	0.180	0.170
7.5	0.180	0.135
18.7	0.200	0.158
32.0	0.278	0.404

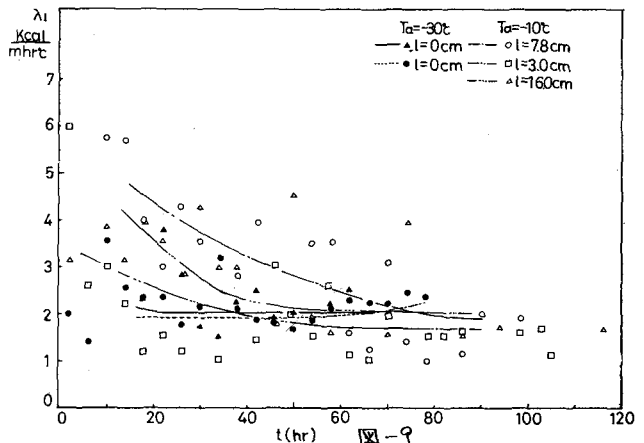


図-9

T_{is} : 氷の表面温度(℃), T_{ib} : 氷の表面温度(℃)

A: 単位面積(㎡)

ただし, $I = (I_1 + I_2)/2$, $T_{is} = (T_{is1} + T_{is2})/2$,

$T_{ib} = (T_{ib1} + T_{ib2})/2$

次に氷, 氷, 雪が時間から時間までに失われる熱量 ΔQ_2 は(8)式で示される。

$$\Delta Q_2 = -[T_{is}^* C_s + C_i \int_{T_{is}^*}^{T_{ib}^*} f(I) dT + C_w \int_{T_{ib}^*}^{T_{is}^*} f(h) dh] - [T_{ib}^* C_s + C_i \int_{T_{ib}^*}^{T_{is}^*} f(I) dT + C_w \int_{T_{is}^*}^{T_{ib}^*} f(h) dh] + (I_2 - I_1) C_i \cdot L \quad \dots (8)$$

T^* : 積雪中の平均温度(℃), C_s : 雪の比熱(%)

単位時間に失われる熱量 ΔQ は(9)式で示す

$$\Delta Q = \Delta Q_2 / (t_2 - t_1) = \Delta Q / \Delta t \quad \dots (9)$$

ここで 積雪伝導率 λ_s (Kcal/m·hr·℃)は

$$\lambda_s = \Delta Q \cdot l / A \cdot (T_{is}^* - T_{sb}^*) \quad \dots (10)$$

Q: 積雪深(cm), T_{is}^* : 雪の表面温度(℃)

T_{sb}^* : 雪の底面温度(℃)

$$T_{is}^* = (T_{is1} + T_{is2})/2, T_{sb}^* = (T_{sb1} + T_{sb2})/2$$

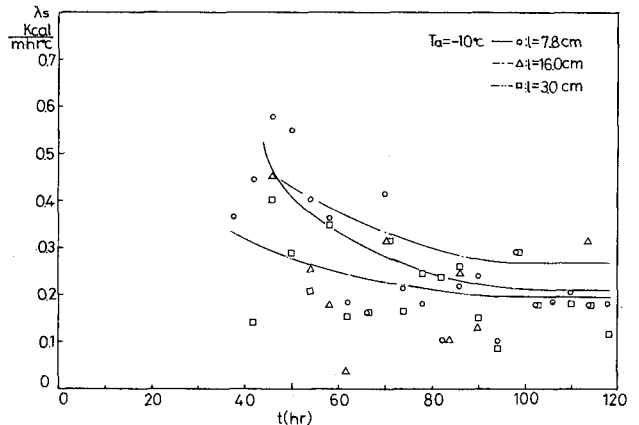
淡水の熱伝導率 λ は, $T_a = -30$ ℃では約60~70時間後にほぼ一定した値をとる。各気温の λ は $T_a = 10$ ℃で1.79~2.91 Kcal/m·hr·℃, $T_a = 30$ ℃で1.98~2.10 Kcal/m·hr·℃で若干の差はみられるが過去の研究結果とほぼ一致する。次に積雪の密度 ρ と熱伝導率を表-2に示す。また λ_s の計算結果を図-10(a,b)に示す。 λ_s は、一般に雪の密度が高いほどその値は大きくなり、その値は北大低溫所の現地測定と非常によく一致する。しかし積雪の熱伝導率と密度の関係は雪質に若干異なりまた含水率によっても熱伝導率の値も異なることが考えられる⁽⁴⁾。

6 結論

- (1) 氷厚の増加は、気温と積雪寒度により決定され、気温に対するK, nの値から氷厚増加式を求めた。
- (2) 冠雪後の氷厚増加は(2)式より気温と積雪の密度と積雪量から、氷厚の変化式を求めた。
- (3) 淡水の熱伝導率は1.79~2.91 Kcal/m·hr·℃の範囲で若干の差はあるが過去の結果からほぼ妥当である。
- (4) 積雪の熱伝導率は一般に雪の密度が高いほどその値は大きい。積雪の熱伝導率は淡水の熱伝導率に比べて約1/2であり積雪の断熱性が認められた。しかし積雪の熱伝導率は雪質によって異なる。

参考文献

- (1) Sacki H, T. ONO, Ozaki and Abe: Estimation of Sea Ice Forces on pile Structures, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, Part 1, pp.465~478, 1978.
- (2) 川下研介: 熱伝導論, オ-4社, pp.337~342, 1966
- (3) Hasemi, T: On the Growth of chin Winter Ice, Low Temperature Science, Ser A, 32 pp.207~218, 1974
- (4) 福江正右: 土質工学における雪と氷, 雪氷の物理・力学的特性, エと基礎 30-8 (295) pp.55~62, 1982



(a)

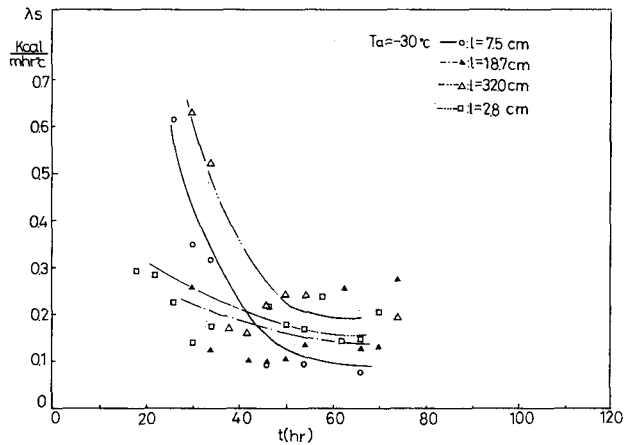


図-10 (b)