

II—38 中詰材の凍結に伴うケーソン内の圧力変化について

北海道大学工学部 (学)	酒井 雅史
東海大学丸根校舎 (正)	泉 冽
埼玉県庁 (正)	小倉 滋
日本デ・タサービス(株) (正)	桜庭 章彦
北海道大学工学部 (正)	佐伯 浩

§1 緒言

近年、寒冷地における石油やガスの掘削や地下資源探査装置などの研究、開発が盛んになっている。特に、渤海、オホーツク海や北極海などの寒冷な地域では、気温の著しい低下のため、寒冷地特有の技術的問題の解決とそれに適応した新しい技術を開発する必要がある。また、これらの海域は水深も浅く、海水の影響を受けやすいため、コンクリート構造物も見直されてきている。

本研究は、寒冷地の海岸および海洋においてケーソン内部の海水の結氷後の氷厚増加による体積増加に伴うケーソン内の水圧増加に関する実験を行ない、氷厚が増加したことによるケーソン内の水圧変化を予測するための計算方法を求めることを目的としている。

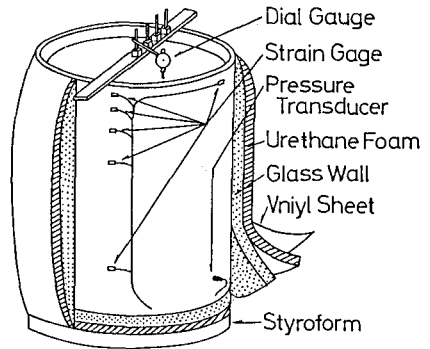


図-1

§2 実験装置と実験方法

実験装置は図-1に示すように厚さ4.8mmの鋼製の円筒形タンクを2個使用した。1個はタンクのひずみ及び圧力測定のためであり、もう1個は氷厚測定のためである。実際の現地でのケーソンは、大部分が水中に没するためにケーソン内への熱の出入りはほとんどないと考え、タンクの側壁部をガラスウールとウレタンで断熱し、表面をビニールシートで覆っている。底部はガラスウール、ウレタン、スタイロフォームで断熱している。タンクの内圧を測定するために防水型圧力計、またタンクの歪量を測定するために、タンクの鉛直方向に15点、円周方向に6点の計21点の歪ゲージ、さらに結氷後の氷盤の内圧によるたわみを測定するために中心から10cmごとに、4個のダイヤルゲージを設置した。実験は気温 $T_a = -30^\circ\text{C}$ で淡水に対して6ケース、海水に対して4ケースと、 $T_a = -20^\circ\text{C}$ で淡水に対してのみ4ケースの計15ケースの実験を行った。

§3 氷厚と積算寒度の関係

実際のケーソンの上部を覆っているコンクリートとケーソン内の水面との間に空間があると仮定すると、本研究の実験条件に一致することになる。過去すでに $T_a = -5^\circ\text{C}$ 、 $T_a = -10^\circ\text{C}$ 、 $T_a = -20^\circ\text{C}$ について、氷厚 H cmと積算寒度 ΣT ($^\circ\text{C} \cdot \text{day}$)の関係を求めたが、これらに $T_a = -30^\circ\text{C}$ の結果を加えたのが図-2である。図からも明らかなように H と ΣT の関係は(1)式で表わされる。また、気温とその気温の継続時間 t (hr)と積算寒度 ΣT との間には(2)式の関係があるので、そのときの氷厚の関係は(3)式ようになる。

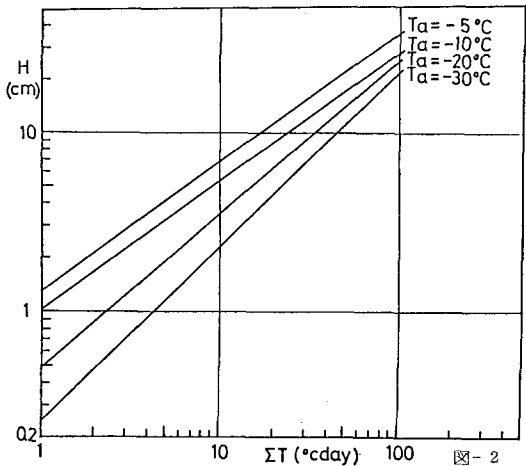


図-2

ここで K および n は気温による定数で、それを図-3、図-4に示す。これらと(3)式より気温の変化に伴う氷厚を求めることができる。

氷厚と積算寒度の理論的研究としては、Stefan, Neumann 北大低温研究所の研究が知られているが、その理論によると $H \propto (\Sigma T)^{1/2}$ となり、本研究の結果とは異なっている。氷盤表面の氷温 T_s の時間変化を図-5に示す。

気温が高い場合には、氷盤の表面温度は早く気温に近づくが、気温が低くなると、 T_s は気温に一致するのにかなりの時間を費やすことがわかる。このことから Stefan 等の理論においては、氷盤の表面温度 T_s と気温 T_a とが等しいと仮定しているが、この仮定が誤りであるということがいえる。

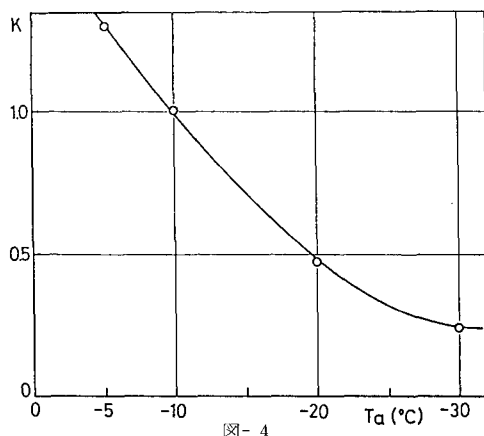


図-4

$$H = K (\Sigma T)^n \quad (1)$$

$$\Sigma T = t \times |T_a| / 24 \quad (2)$$

$$H = K (t \times |T_a| / 24)^n \quad (3)$$

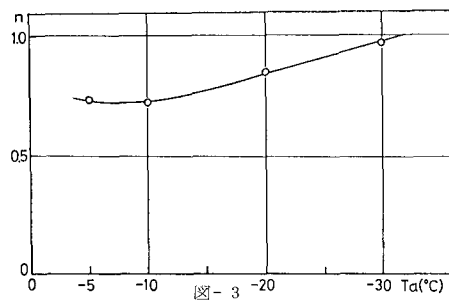


図-3

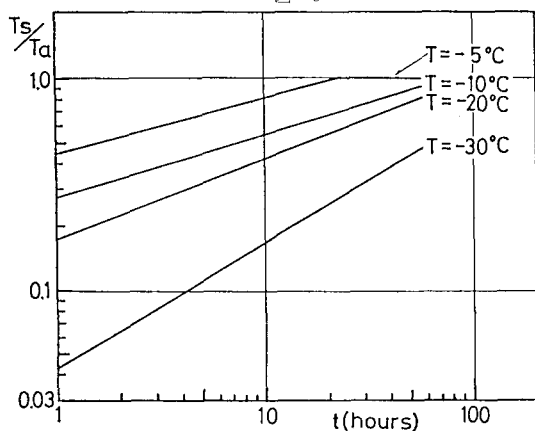


図-5

§4 タンク内の水圧変化の実験結果

淡水と海水の氷厚増加に伴う内圧 P の時間変化と氷盤のたわみ W の時間変化の結果の一部を図-6、図-7に示す。図-6の淡水と海水を比較すると、 $t=80$ hrsで淡水の場合 $P=5 \text{ kg/cm}^2$ 、海水の場合 $P=0.5 \text{ kg/cm}^2$ と内圧にかなりの差がある。ここで時間 t はタンクの表面が全面結氷してから時間である。図-7の D.G.1 と D.G.4 はタンクの中点と中点から 30 cm の位置のたわみである。氷盤の変形状態は淡水と海水の場合では異なっている。淡水の場合には、水面が全面結氷して3時間くらいたつと、タンク側壁と氷盤の間から淡水が湧き出してくる。その後再結氷してから数時間すると、タンク中央から放射状に5~6本のクラックが入り、時間の経過とともにそれらのクラックが壁方向に成長してゆくが、クラックから湧水することはない。淡水の場合の氷盤のクラックが成長する様子を図-8に示す。数字は結氷後の経過時間を示す。50 hrs ぐらいからクラック幅が広がりはじめ、70 hrs で 5 mm、80 hrs では 7 mm、100 hrs では 10 mm の幅が広がる。また、80 hrs ぐらいから氷盤に対して水平にクラックが入り、時間の経過とともに成長する。氷盤を切断してみると、クラックの深さは 1~2 cm あったが、その半分は新しい氷で密着していた。海水の場合には、表面の全面結氷後、数時間でタンク側壁面から湧水が起こり氷盤全面を覆うが、再結氷後は淡水の場合とは違い、氷盤にクラックは発生せず、時間の経過とともに氷盤表面は氷と海水の混合した状態となり塩分濃度は時間とともに濃くなるという結果が得られた。これは氷盤から海水の透水が起こっているためと考えられる。

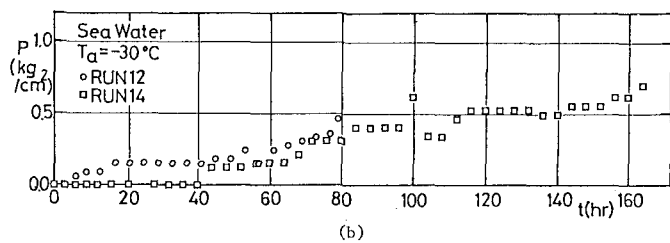
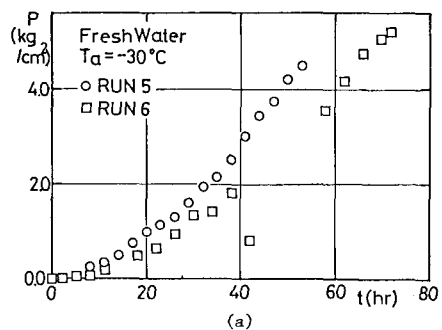


图-6

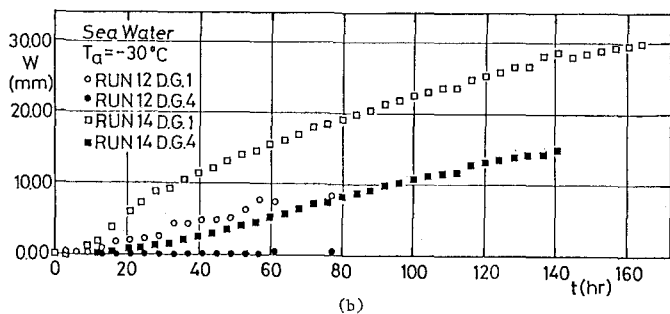
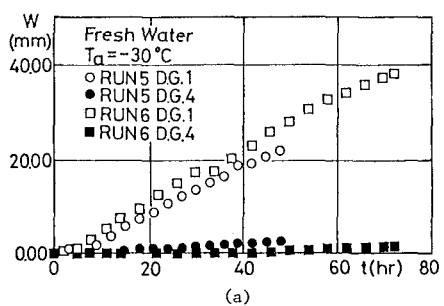
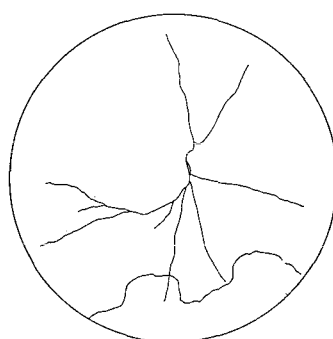
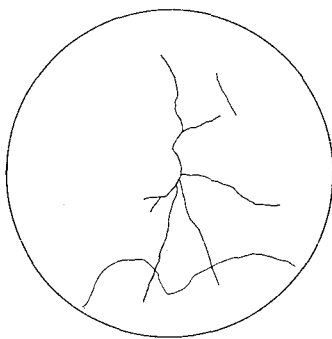
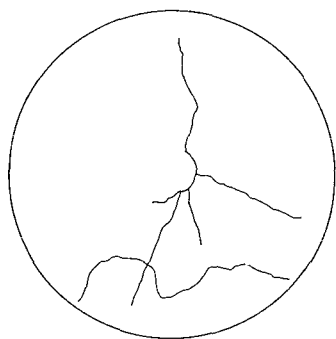


图-7

18 hours

45 hours

56 hours



69 hours

81 hours

105 hours

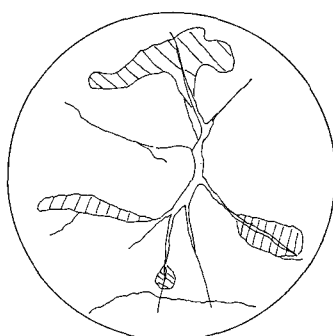
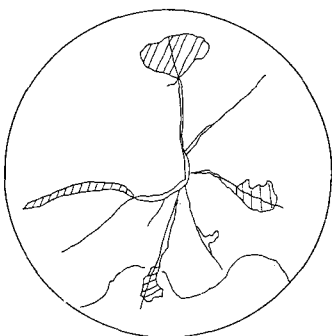
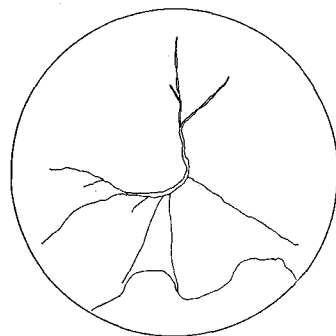


图-8

§5 タンク内の水压変化を予測する計算モデル

淡水、海水とも凍ると体積が増加するが、図-6の結果から内圧はそれほど大きくならない。ここでは、水压変化を予測するために5つのモデルを仮定し最も適当なモデルを求めようとするものである。

○モデル1

このモデルは、結氷後の体積増加のみを考慮し、タンク、氷盤の変形を無視しタンク側壁と氷盤の滑り、氷盤の透水はないものとする最も単純なモデルである。液体の密度、氷の密度をそれぞれ ρ_w, ρ_i 、液体の圧縮率を α とし、水深氷厚を図-9のようにし、最初に H_{w1} あった液体が凍、氷厚 H_i になったとする。タンクの径を D_0 、液体の重さ氷の重さを W_{w1}, W_i とすると W_{w1}, W_i は(4),(5)式で示される。また、(4)式と(5)式は等しいので、 $\rho_w H_{w1} = \rho_i H_i$ となり $4H$ は(6)式で示される。さらに圧力の変化 P は(7)式で示される。これに実際の淡水、淡水氷、海水、海水氷の密度と圧縮率を用いて、実測の氷厚変化を与えて水压の変化を計算したのが図-10である。これは図-6に比較して計算値の方が100倍ほど大きく、このモデルが不適当であるといえる。

○モデル2

このモデルでは内圧によるタンク側壁の変形を考慮する。タンクの内圧、肉厚、鋼材のヤング率、鋼材に作用する引張力、引張応力をそれぞれ $P, h, E_s, \epsilon, \sigma$ とすると、 $2\epsilon = PD_0$ 、 $\sigma = \epsilon/h = PD_0/2h$ となる。タンクの周長伸び、歪みをそれぞれ $4\epsilon, \epsilon$ とすると $4\epsilon = \pi D_0 \epsilon = \pi PD_0^2/2E_s h$ となるため内圧による周長 D_2 は(8)式で表わされる。氷厚による体積の増加量を $4V_1$ 、タンクの歪による体積の増加量を $4V_2$ とするとタンクの内圧 P は(9)式で表わされる。これに(6)式を用いることによりモデル2のタンク内圧 P は(10)式で示される。実測の氷厚変化と $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $h = 0.48 \text{ cm}$ を代入して計算すると図-11の結果になり、タンク側壁の歪を考えなくてもモデル1の70%の計算値になり、まだ実測値よりはるかに大きい。

○モデル3

このモデルではタンク底板および氷板のたわみを考慮する。内圧増加に伴う氷盤のたわみによる体積の増加量を $4V_3$ とすると(11)式で示される。また周辺が固定されている場合の等分布荷重のたわみはタンクの半径、氷盤の曲げ剛性、氷のヤング率、ポアソン比を α, D, E, ν とすると(12)式で示される。(12)式を(11)式に代入し、 $4V_3$ は(13)式のようになる。鋼のヤング率、ポアソン比、厚さを E_s, ν, h

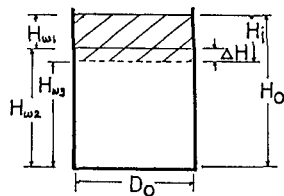


図-9

$$W_{w1} = \rho_w \cdot \pi \cdot D_0^2 \cdot H_{w1} / 4 \quad (4)$$

$$W_i = \rho_i \cdot \pi \cdot D_0^2 \cdot H_i / 4 \quad (5)$$

$$4H = H_i - H_{w1} = \{1 - (\rho_i / \rho_w)\} \cdot H_i \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{\alpha} \frac{4V}{V} = \frac{1}{\alpha} \frac{4H}{H_{w2}} = \frac{1}{\alpha} \frac{1 - (\rho_i / \rho_w)}{(H_0 / H_i) - (\rho_i / \rho_w)} \quad (7)$$

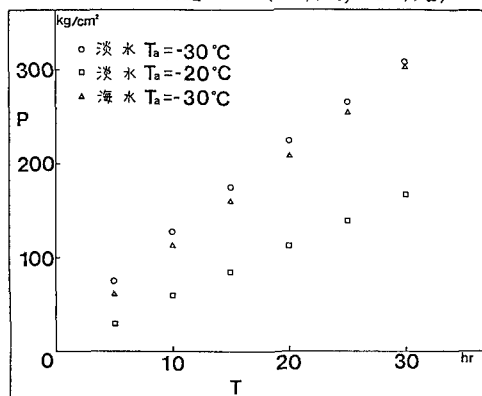


図-10

$$D_2 = (2 + 4\epsilon) / \pi = D_0 \{1 + (P \cdot D_0 / 2E_s h)\} \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{\alpha} \frac{4V}{V} = \frac{1}{\alpha} \frac{4V_1 - 4V_2}{V} \quad (9)$$

$$P^2 + \frac{4E_s h}{D_0^2} \left(D_0 + \alpha E_s h \frac{H_0 / H_i - \rho_i / \rho_w}{H_0 / H_i + \rho_i / \rho_w - 2} \right) \cdot P + \frac{4E_s^2 h^2}{D_0^2} \left(\frac{\rho_i / \rho_w - 1}{H_0 / H_i + \rho_i / \rho_w - 2} \right) = 0 \quad (10)$$

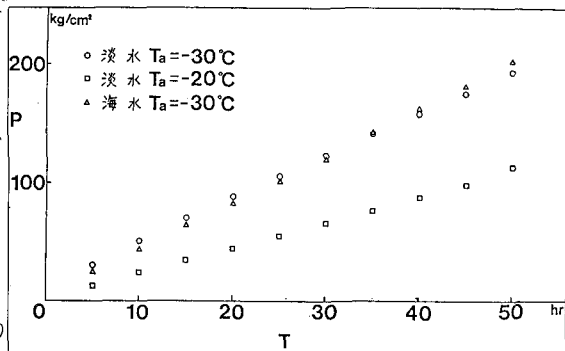


図-11

とするとタンク底板と氷盤のたわみによる体積増加量はタンクの荷重を無視すると(14)式で示される。モデル1、2で得られた $4V_1, 4V_2$ を考慮してタンクの圧力は(15)式で示される。(15)式により内圧 P は(16)式で示される。この(16)式に(1)式に示される氷厚増加の式を代入し、氷のポアソン比は過去の測定値から $\nu_i = 0.3$ 、ヤング率は、氷の粘弾性体としての性質を考慮して小さめの値を用いて内圧を計算したがその効果はあまりなく、モデル2よりは小さいもののほとんど似たような値を示した。

○モデル4

これまでの3つのモデルで計算した内圧は実測値よりはるかに大きな値を示す。このモデル4では氷盤とタンク側壁間でスリップが起ころものと仮定して計算した。これは図-6(a)のRUN6で内圧が急激に下がるという現象が起こ、ているからである。スリップ量を z とし、このスリップが一定の速度で起こ、ていると仮定して $z = \beta t$ を考慮して内圧の式を示したものが(17)式である。ここで β の値を変えて内圧 P の変化を計算したものが図-12でこの結果から β を変化させてもそれほど良い結果は得られなかった。タンクの氷盤の厚さは一様ではなく、壁面に近づくにつれて厚くなっているので凍着力も増し、スリップしにくくなっている。このためD.G.4の変位量もそれほど大きくはないと思われる。また、実測した圧力を(17)式に代入し、 z を逆算してみると、実測のD.G.4の変位量より大きな値をとることが、スリップ量 z の影響を無視することはできないが、さらにこれ以外に別の効果も考慮する必要があることがわかった。

○モデル5

モデル4でも述べたように、海氷の場合には、タンクの内圧が上、まると氷盤上に内部の海水が氷盤を通して上、てきて、氷と濃度の高い海水の混合した状態になる。これは海氷盤の透水係数が非常に大きいことを示している。モデル5はこれまでのモデル1~4の条件に透水を考慮した。液体の単位体積重量を ω' (gr/cm³)、透水係数を K (cm/sec)とすると $4t$ 時間に氷盤を透過する透水量 Q (cm³)は(18)式のようにになる。(17)式に実測したタンクの圧力 P を代入して仮想のスベリ量を求め、実際のタンクのD.G.4の変位量との差が氷盤の透水性により外へ逃げだしたものと仮定して数値計算により透水係数を求めることがでる。淡水(RUN6)と海水(RUN12)の圧力変化

$$4V_3' = \iint \omega r d\theta dr = 2\pi \int_0^a \omega r dr \quad (11)$$

$$\omega = P \cdot (a^3 - r^3) / 64 D, \quad D = E_i H_i^3 / \{12(1 - \nu_i^2)\} \quad (12)$$

$$4V_3' = \pi \cdot D_0^6 \cdot (1 - \nu_i^2) \cdot P / 1024 \cdot E_i \cdot H_i^3 \quad (13)$$

$$4V_3' = \frac{\pi D_0^6}{1024} \cdot P \cdot \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s h^2} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i H_i^3} \right) \quad (14)$$

$$P = \frac{1}{\alpha} \frac{4V}{V} = \frac{1}{\alpha} \frac{4V_1 - 4V_2 - 4V_3}{V} \quad (15)$$

$$P^2 + \left\{ \frac{4E_s h}{D_0^2} \left(D_0 - \alpha E_s h \frac{4H + H_0 - H_i}{4H - H_0 - H_i} \right) - \frac{D_0^2}{64} \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s h^3} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i H_i^3} \right) \frac{1}{4H - H_0 - H_i} \right\} \cdot P + \frac{4E_s^2 h^4}{D_0^2} \frac{4H}{4H - H_0 - H_i} = 0 \quad (16)$$

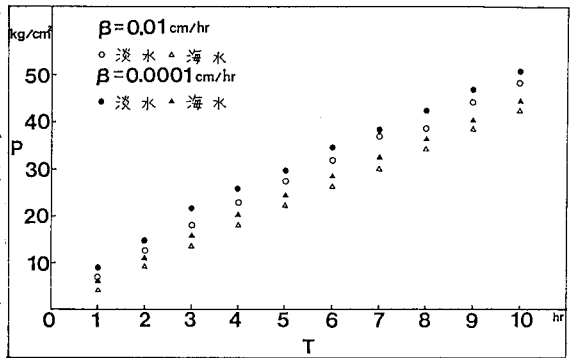


図-12

$$Q = K \cdot \left(\frac{\pi D_0^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{P/\omega'}{H_i} \right) \cdot 4t \quad (18)$$

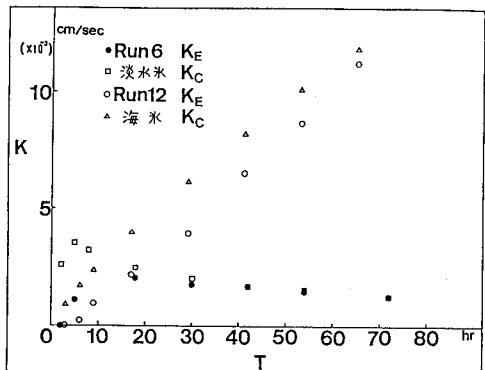


図-13

から求めた透水係数を K_E とし、淡水氷の6ケース、海氷の4ケースから求めた P と m の回帰式を用いて求めた透水係数を K_C とし、計算した結果を図-13に示す。図-13からも明らかなように、淡水氷の場合には、氷厚の増加とともに透水係数は小さくなるが、海氷の場合には、氷厚の増加とともに透水係数は大きくなる。また、氷厚が5cmより薄い場合には、淡水氷と海氷の透水係数にはあまり差が見られないが、それよりも氷厚が厚くなると、海氷の透水係数の方がかなり大きくなる。これまで海氷の透水係数は斎藤・小野、Pounder・Littleの研究などがあるが、斎藤等の結果によると、氷厚9.6~11.4cmの実験では氷盤の表層2cm以下の透水係数は $K=1.3 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-6}$ cm/secで、それより下層では $K=8.4 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-4}$ cm/secで、また、Pounder等は北極海の多年氷を用いて $K=1.2 \times 10^{-2} \sim 3.4 \times 10^{-4}$ cm/secを得ており、計算により求めた値と非常に近い値を示しており、この解析が妥当であることを示している。このことからモデル5が実際の状況をよく説明していることがわかる。

以上の結果から、ケーソン内の内圧の時間変化を予測するには、氷厚の時間変化、ケーソン側壁の氷盤スリップ量、氷盤の透水係数、ケーソンの寸法とケーソン材料のヤング率とポアソン比、氷盤のヤング率とポアソン比が与えられればよいということがわかる。

§6 まとめ

- 1) 氷厚の増加は気温と積算寒度によって決定でき、気温の変化に対して氷厚式を求めた。
- 2) ケーソン内に空間が存在する場合、氷盤のたわみ、透水が可能であり、特に海氷では、内圧はそれほど大きくなりません。さらに、氷厚の時間変化、ケーソン側壁と氷盤のスリップ量、氷盤の透水係数、ケーソンの寸法とケーソン材料の弾性諸定数、氷盤の弾性諸定数が与えられると、ケーソンの内圧の時間変化を予測することができる。
- 3) 海氷の透水係数は $1.2 \times 10^{-2} \sim 4.3 \times 10^{-4}$ cm/secで、斎藤等やPounder等の透水係数の実験結果と良く一致した。
- 4) 淡水氷の透水係数は氷厚が5cm以下の時は、海氷と同じ程度だが、氷厚が増加するにつれて透水係数は小さくなり、海氷よりも小さな値を示す。
- 5) ケーソンの内圧によ、氷盤が曲げ破壊したり、ケーソンの側壁で氷盤がスリップすることも予想され内圧変化の計算では曲げ破壊やスリップも考慮しなければならぬ。
- 6) ケーソン内部の氷盤は、内圧の増加途中で、たわんだり、スリップしたり、氷盤の透水性のために内圧はそれほど増加しない。したがって、ケーソンの内圧を低下させるには、ケーソンの中に氷盤のたわみ、スリップ、透水を見積った空間を設けておけばよい。

参考文献

- 1) Saeki, H., T. Ono, A. Ozaki and S. Abe: Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structure. IAHR
- 2) Saeki, H., A. Ozaki, Y. Kubo: Experimental Study on Flexural Strength and Elastic Modulus of Sea Ice
- 3) Saito, T. and N. Ono: Percolation of Sea Ice I - Measurements of Kerosene Permeability of NaCl Ice
- 4) Pounder, E.R. and E.M. Little: Some Physical Properties of Sea Ice
- 5) 川下研介: 熱伝導論、オーム社