

氷厚増加に伴うケーソン内の水圧変化の予測法について

佐伯 浩*・泉 洌**・小倉 滋***
酒井雅史****・尾崎 晃*****

1. 序

最近のエネルギー危機に対応するため、今まで比較的未開拓の地域であった、渤海、オホーツク海それに北極海等寒冷地の海岸・海洋における石油・ガスの掘削の必要に迫られてきている。しかし、この海域では気温が非常に低下するため、寒冷地特有の技術的諸問題の解決と寒冷地に適応した新しい技術の開発が望まれている。また、上述の海域は比較的水深が浅く、海水の影響を受けるためにコンクリート構造物の有利性も認識され始めてきている。本研究は、寒冷地海岸・海洋におけるケーソン内部の海水の結氷後の氷厚増加により体積が増加することによるケーソン内の水圧増加について実験を行ない、氷厚増加に伴うタンク内の水圧変化の計算手法を明らかにしたものである。このようなケーソン内部の圧力によってケーソンが破壊したと思われる例がいくつか報告されている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った。実験装置は図-1に示すように4.8 mm 厚の鋼製円筒形のタンクを2個用いた。1個は、本実験に用いるタンクであり、もう一個は氷厚測定のためのダミーである。タンクの内径は69.76 cm、深さは89.50 cmである。実際のケーソンは、その大半を水中に没しているため、ケーソンの側壁、底板部からの熱の出入はに没しほとんどないので、側壁部は10 cm 厚のガラスウールと4 cm 厚のウルトンで断熱し、さらに表面をビニールシートで覆っている。底部は5 cm 厚のガラスウールと2 cm 厚のウレタンさらに4 cm 厚のス

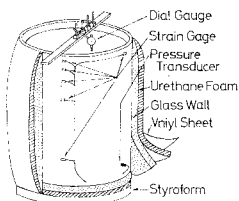


図-1

タイロフォームで断熱している。タンクの内圧増加機構を解明するために、内圧測定のための防水型圧力変換器、タンクの歪量測定のため、タンクの鉛直方向に15点、円周方向に6点、計21点の歪ゲージ、それに結氷氷盤の内圧による撓み測定のため4個のダイヤルゲージを設置した。実験は15ケース行い、気温 $T_a = -30^\circ\text{C}$ に対しては淡水に対して6ケース、海水に対して4ケース、 $T_a = -20^\circ\text{C}$ に対しては淡水のみで4ケースの実験を行ない、さらに氷厚と積算寒度に関する実験も合せて行った。

3. 氷厚と積算寒度の関係

実際のケーソンは蓋コンクリートおよび上部コンクリートで覆われていて、実験の条件は違っているが、ケーソン内の水面と蓋の間に空間があるとすると現実とよく一致していることになるし、輻射の効果を単純に取扱うことが可能となる。筆者の一人佐伯²⁾は、すでに $T_a = -5^\circ\text{C}$ 、 -10°C それに -20°C での氷厚 H (cm) と積算寒度 ΣT ($^\circ\text{C}\cdot\text{day}$) の関係を求めているが、今回の $T_a = -30^\circ\text{C}$ の実験を加えたものが図-2である。図からも明らかなように H と ΣT の関係は次式で示される。

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

また、気温とその気温の継続時間 t (hr) と積算寒度の間には、

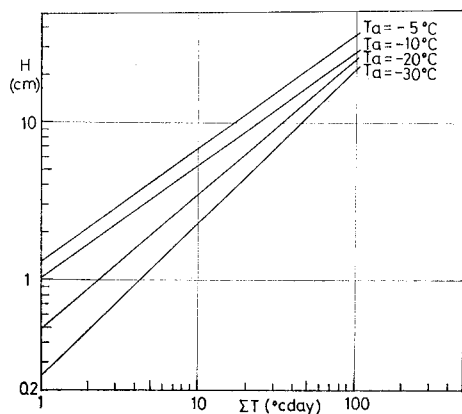


図-2

* 正 会 員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 正 会 員 東海大学講師 札幌校舎
*** 正 会 員 埼玉県庁技師 土木部
**** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
***** 正 会 員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科

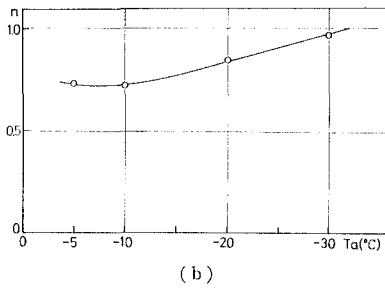
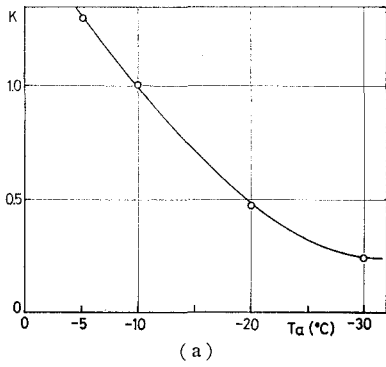


図-3

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

の関係があるので、氷厚は次式で示される。

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

この K と n は気温によってのも表わされ、その関係を
図-3 に示す。氷厚と積算寒度の理論的研究としては、

Stefan, Neumann³⁾ それに
北大低温研⁴⁾の結果がよく
知られているが、それらの
理論では $H \propto (\Sigma T)^{1/2}$ と
の結果を得ていて、本研究
の結果とは異っている。氷
盤表面の氷温 T_s の時間変
化を調べたものが 図-4 で
ある。気温が高い時には、
氷盤表面温度は比較的早く
気温に近づくが、気温が低

くなるにつれて T_s はなかなか気温に一致していないこ
とが判る。Stefan 等の理論においては、氷盤表面の温度
は気温に等しいとの仮定に基づいているが、その仮定に
誤りがありことが判る。図-3 と式 (3) より、気温の
変化に伴う氷厚が求められる。

4. タンク内の水圧変化に関する実験結果

淡水と海水それぞれの氷厚増加に伴う内圧 P の時間
変化と氷盤の撓み W の時間変化の実験結果の一部を
図-5, 図-6 に示す。図-5 の淡水と海水の結果を比較
すると、 $t=80$ hrs で淡水の場合 $P=5$ kg/cm², 海水
の場合 $P=0.5$ kg/cm² で氷の種類によって内圧にかなり
の差がある。また、時間 t はタンクの水面が全面結氷し
てからの時間である。また氷盤の撓みの実験で D.G. 1,
D.G. 4 はそれぞれタンクの中心から 0 と 30 cm の位置
の撓みを示す。淡水と海水の場合では氷盤の変形状態が

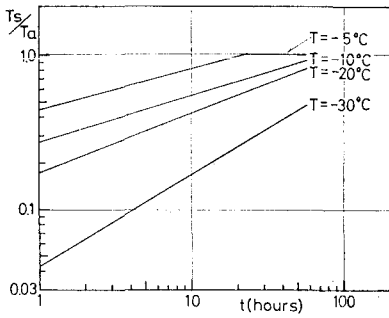


図-4

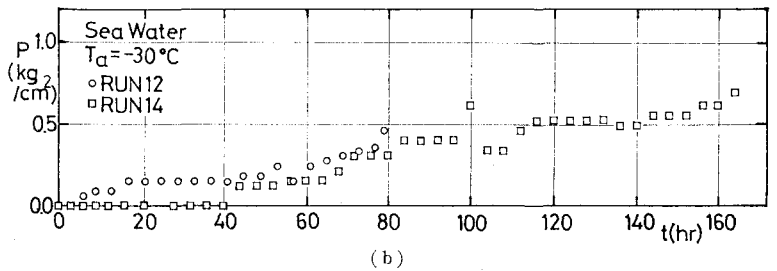
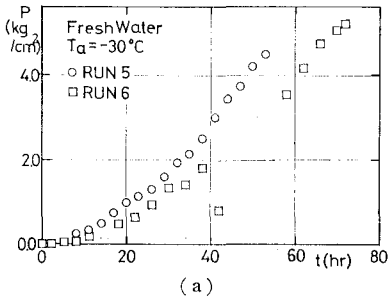


図-5

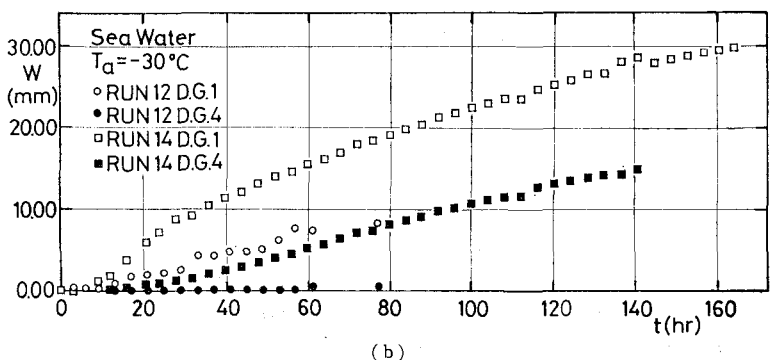
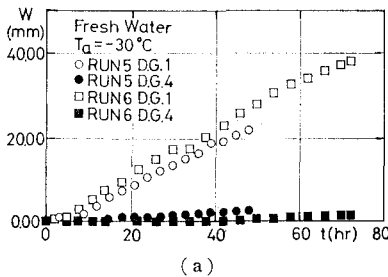


図-6

湘っていて、淡水の場合には、水面が全面結氷後3時間くらい経つと、タンクの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(2~5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に向かって成長してゆくが、クラックから湧水することはない。実験終了後、氷盤を切断してみるとクラックの深さは1~2cmであったが、その半分は新しい氷で密着していた。海水の場合には、全面結氷後1~2時間経つとタンク壁面から湧水があり、氷盤の全面積を覆うが、再結氷した後は、氷盤にはクラックは発生せず、時間の経過とともに、氷盤表面は氷片と海水の混合状態となり、その塩分濃度は時間の経過とともに濃くなる。これは氷盤から海水の透水が起っていることを示している。

5. タンク内の水圧変化の計算モデル

淡水、海水ともに凍ると体積が増加するが、図-5の結果からも明らかなようにタンク容積の1/4が結氷しても内圧はそれほど大きくならない。本章では、5つのモデルについて考察し、最も適当なモデルを求めようとするものである。

5.1 モデル I

このモデル I では、結氷に伴う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および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 とし、液体の圧縮率を α とし、水深、氷厚を図-7のごとくすると、最初 H_{w1} あった液体が凍って氷厚 H_i になったとすると、タンク

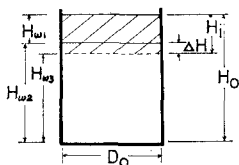


図-7

径を D_0 、液体の重さ、氷の重さをそれぞれ W_{w1}, W_i

とすると W_{w1} と W_i は次式で示される。

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

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

また、両者の重さは等しいので式(4)、(5)より $\rho_w \cdot H_{w1} = \rho_i \cdot H_i$ となるので ΔH は次式で示される。

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

圧力の変化を P とすると次式が得られる。

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

淡水、海水、淡水氷それに海水の密度はそれぞれ温度によって若干変化するが、他の測定精度に比べればその影響を無視できるので淡水、淡水氷、海水それに海水の密度をそれぞれ 0.9998 g/cm^3 , 0.9168 g/cm^3 , 1.0300 g/cm^3 , 0.9224 g/cm^3 ⁵⁾ とし、淡水、海水の圧縮率を $\alpha = 4.5 \times$

表-1

MODEL 1 $P \text{ (kg/cm}^2\text{)}$			
t (hr)	淡 水 $T_a = -30^\circ\text{C}$	淡 水 $T_a = -20^\circ\text{C}$	海 水 $T_a = -30^\circ\text{C}$
5	74.9	31.0	61.7
10	127.3	58.6	112.2
15	175.0	85.5	160.5
20	220.4	112.2	208.0
25	264.5	138.9	255.5
30	307.9	165.8	303.4

$10^{-5} \text{ cm}^2/\text{g}$ として、実測の氷厚変化を与えて水圧変化を計算したものが表-1で、図-5の実測水圧に比べて計算値の方が100倍程大きく、このモデルは不適当と言える。

5.2 モデル II

モデル I ではすべての変形を無視したため理論値は過大な水圧を示したので、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。内圧、タンクの肉厚、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, t' それに σ とすると $2t' = PD_0$ で $\sigma = t'/h = PD_0/2h$ となる。タンク周長、その伸びと歪みをそれぞれ $l, \Delta l$ それに ϵ とすると、 $\Delta l = \pi \cdot D_0 \cdot \epsilon = \pi \rho D_0^2 / 2 E_s \cdot h$ となるので内圧による周長 D_2 は次式で示される。

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

氷厚による体積の変化量を ΔV_1 、タンクの歪による体積の増加量を ΔV_2 とすると内圧 P は次式で示される。

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

式(6)を用いることによりモデル II の内圧 P は次式で示される。

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

表-2

MODEL 2 $P \text{ (kg/cm}^2\text{)}$			
t (hr)	淡 水 $T_a = -30^\circ\text{C}$	淡 水 $T_a = -20^\circ\text{C}$	海 水 $T_a = -30^\circ\text{C}$
5	29.6	12.2	24.4
10	50.5	23.2	44.5
15	69.6	33.9	63.8
20	87.9	44.5	82.9
25	105.7	55.2	102.1
30	123.3	65.9	121.5
35	140.9	76.8	141.3
40	158.5	87.8	161.4
45	176.2	99.0	182.1
50	194.0	110.4	203.4

$$+\frac{4E_s^2h^2}{D_0^3}\left(\frac{\rho_i/\rho_w-1}{H_0/H_i+\rho_i/\rho_w-2}\right)=0 \quad \dots\dots(10)$$

実測の氷厚の変化と $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $h=0.48 \text{ cm}$ を入れて計算した結果が表-2で、側壁の歪みを考慮してもモデルⅠの70%で、実測値よりはるかに大きい。

5.3 モデルⅢ

次にタンク側壁の変化のほかに、タンク底板および氷盤の撓み w を考慮すると、内圧による氷盤の撓みによる内部体積の増加量を ΔV_3 とすると次式で示される。

$$\Delta V_3 = \iint \omega r d\theta \cdot dr = 2\pi \int_0^a \omega r dr \quad \dots\dots\dots(11)$$

周辺固定の等分布荷重の撓みの式はタンクの半径、氷盤の曲げ剛性、氷のヤング率およびポアソン比を a , D , E_i それに ν_i とすると次式で示される。

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

式(12)を式(11)に代入すると ΔV_3 は次式で示される。

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

鋼のヤング率、ポアソン比、厚さをそれぞれ E_s , ν_s それに h とするとタンク底板と氷盤の撓みによる体積の増加量はタンクの荷重を無視すると次式で示される。

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

モデルⅠ, Ⅱで得られた ΔV_1 , ΔV_2 を用いると圧力は次式で示される。

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

この式(15)より圧力 P は次式で表される。

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

式(16)に図-1で示される氷厚式を代入し、 ν_i には過去の測定値から $\nu_i = 0.3^6$ とし、ヤング率としては氷の粘弾性的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Ⅱより5%程小さい値を示した。

5.4 モデルⅣ

上述した3つのモデルの計算内圧は実験値よりはるかに大きい値を示す。このモデルⅣでは氷盤とタンク内壁間でスリップが起こるものとして計算を行った。これは図-5(a)のRun 6で内圧が急激に下がる現象が起っているからである。そこでスリップ量を z とし、スリップは一定速度で起っていると仮定して $z = \beta \cdot t$ と考えて内圧の式を求めたものが式(17)である。

$$P^2 + \left\{ \frac{4E_s h}{D_0^3} \left(D_0 - \alpha E_s h \frac{\Delta H + H_0 - H_i}{\Delta H - H_0 + H_i - 2z} \right) \right.$$

表-3

MODEL 4	$P \text{ (kg/cm}^2\text{)}$		$T_a = -30^\circ\text{C}$	
	$\beta = 0.01 \text{ cm/hr}$		$\beta = 0.0001 \text{ cm/hr}$	
	淡水	海水	淡水	海水
1	6.69	4.09	8.88	6.27
2	12.65	9.02	14.87	11.22
3	17.99	13.58	20.15	15.89
4	22.77	17.94	25.81	20.17
5	27.36	22.16	29.63	24.49
6	31.77	26.27	34.84	28.53
7	36.83	30.33	38.32	32.59
8	48.17	34.31	42.47	36.59
9	44.22	38.25	46.53	40.55
10	48.19	42.16	50.51	44.47

$$- \frac{D_0^3}{64} \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s h^3} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i H_i^3} \right) \frac{1}{\Delta H - H_0 + H_i - 2z} \right\} \cdot P + \frac{4E_s^2 h^2}{D_0^3} \cdot \frac{\Delta H - 2z}{\Delta H - H_0 + H_i - 2z} = 0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここで、 β の値を変えて P の変化を計算したものの一列が表-3で、この計算結果から判断すると β を変化させても良い結果が得られなかったし、D.G. 4 の変化量でもそれほど z は大きくない。氷盤の厚さは一様でなく、壁部近傍では厚くなっていて凍着力も大きくなっていてスリップしにくくなっている。また、実測の圧力を式(17)に入れて、逆に z を計算すると、実測のD.G. 4 の変化より大きな値になることから、 z の効果は無視はできないが、これ以外の効果も導入する必要があることが明らかとなった。

5.5 モデルⅤ

4. でも述べたように、特に海水の場合、内圧が上ってくると氷盤に内部の海水が氷盤を通して上ってきて、海水氷盤上は氷片と濃度の高い海水の混合状態となる。このことは海水氷盤の透水係数がかなり大きいことを示している。そこでモデルⅤでは上述したⅠ~Ⅳの条件と透水の効果も考慮した。液体の単位体積重量を ω^* (gr/cm³)、透水係数を k (cm/hr) とすると Δt 時間に氷盤を透過する水量 Q (cm³) は次式で示される。

$$Q = k \cdot \left(\frac{\pi D_0^2}{4} \right) \left(\frac{P/\omega^*}{H_i} \right) \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots(18)$$

さて、式(17)に実測の圧力 P を代入して仮想のスペリ量を計算し、実際のタンク側壁に一番近いD.G. 4点の変位量との差の分が氷盤の透水性により外に逃げ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きる。RUN 6(淡水)とRUN 12(海水)の圧力の変化から求めた透水係数を K_E とし、淡水氷の6ケースの定数から求められた P と t の回帰式と海水氷の4ケースから得られた回帰式を用いて求めた透水係数を K_O とし

表-1

MODEL 5			$T_a = -30^\circ\text{C}$		
t (hr)	RUN 6 $K_E (\times 10^{-3})$	淡水氷 $K_C (\times 10^{-3})$	t (hr)	RUN 12 $K_E (\times 10^{-3})$	海氷 $K_C (\times 10^{-3})$
2	0	2.59	3	0	0.90
5	1.10	3.53	6	0.43	1.69
8	2.07	3.24	9	0.94	2.37
18	2.05	2.49	17	2.18	4.01
30	1.78	2.01	29	3.94	6.19
42	1.71	1.72	41	6.52	8.21
54	1.44	1.52	53	8.86	10.11
72	1.29	1.30	65	11.19	11.83

て、計算しその結果を表-4に示す。表-4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傾向がある。また、氷厚が5 cmより薄い場合には淡水氷と海氷の透水係数にあまり差が見られないが、それより厚くなると海氷の透水係数の方がはるかに大きくなる。海氷の透水係数は斎藤・小野⁷⁾、Pounder・Little⁸⁾の研究があるが、斎藤等⁷⁾の結果によれば、氷厚9.6~11.4 cmの実験から、氷盤の表層2 cmくらいの範囲の透水係数は $1.3 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-6}$ cm/secで、それより下層部では、 $8.4 \times 10^{-2} \sim 1.1 \times 10^{-4}$ cm/secで、われわれの結果と非常に近い値を示している。本研究の解析法の妥当性を示している。また、Pounder等⁸⁾は、北極海の多年氷での特殊な実験から、 $K = 1.2 \times 10^{-2} \sim 3.4 \times 10^{-4}$ cm/secを得ていて、この透水係数も本研究の結果とよく一致している。この事実はモデルVがかなり実際の現象を説明しているものと思われる。以上の結果から、ケーソン内の水圧を予測するためには氷厚の時間変化、ケーソン側壁部での氷盤のスリップ速度、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、内圧の時間変化が計算できることになる。また、本研究の結果から淡水の場合にはスリップはないものと考えてよいが、海水の場合には今後の研究が必要と思われる。

6. 結 論

- 1) ケーソン内に空間がある場合には、氷盤の撓み、透水が可能となり、特に海水の場合には、内圧はそれ程大きくならない。また、氷厚の時間変化、スリップ速度、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、氷盤の弾性定数が与えられれば、ケーソン内圧の時間変化が予測可能となる。

- 2) 海氷の透水係数は $1.18 \times 10^{-2} \sim 4.3 \times 10^{-4}$ cm/secで、斎藤等や Pounder 等の透水係数の実験結果と良い一致を示した。また結氷初期は透水係数は小さいが、時間の経過とともに大きくなる。
- 3) 淡水氷の透水係数は氷厚が5 cm以下の時は、海氷と同程度であるが、氷厚が増加するにつれて透水係数は小さくなり、海氷より小さい値を示す。
- 4) 氷厚の増加は気温と積算寒度によって決定され、気温変化に対する氷厚変化式を求めた。
- 5) 実際のケーソンにおいては、特に氷厚に比べてケーソンの内寸法が大きい場合には、内圧によって氷盤が曲げ破壊したり、ケーソン壁面でスリップすることが予想されるので、内圧変化の計算に当っては、氷盤の曲げ破壊、氷盤のスベリの検討も行われなければならない。
- 6) ケーソン内の氷盤は、内圧が高くなると、撓んだり、ケーソン内壁部でスリップしたり、氷盤の透水性のために内圧の増下は抑えられる。よってケーソン内圧を低下させるためには、ケーソン内に氷盤の撓み、スリップ量それに透水量を見込んだ空間を残しておくことが望ましい。

7. あとがき

本研究を行うにあたり、北海道大学工学部小野敏行氏、元北海道大学大学院生田中祐人氏それに日本データサービス(株)桜庭章彦に大変お世話になった。記して、深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 北海道開発局：氷海航行支援技術に関するフィージビリティスタディ——氷海域の港湾・沿岸工学に関する調査——，1983。
- 2) Saeki, H., T. Ono, A. Ozaki and S. Abe: Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structures, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, Part 1, pp. 465~478, 1978.
- 3) 川下研介：熱伝導論，オーム社，pp. 337~342, 1966.
- 4) Hasemi, T.: On the Growth of thin Winter Ice, Low Temperature Science, Ser A, 32, pp. 207~218, 1974.
- 5) Hobbs, P. V.: Ice Physics, Clarendon Press, 1974.
- 6) Saeki, H., A. Ozaki and Y. Kubo: Experimental Study on Flexural Strength and Elastic Modulus of Sea Ice, Proc. of 6th Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol. 1, pp. 536~547, 1981.
- 7) Saito, T. and N. Ono: Percolation of Sea Ice I—Measurements of Kerosene Permeability of NaCl Ice—, Low Temperature Science, Ser. A, 37, pp. 55~62, 1978.
- 8) Pounder, E. R. and E. M. Little: Some Physical Properties of Sea Ice, I, Canadian Jour. of Physics, 37, pp. 443~473, 1959.