

海岸構造物に作用する海水の力に関する研究

佐伯 浩*・斎藤 修一**・浜中建一郎***・尾崎 晃****

1. 諸 論

わが国において、海岸・港湾が結氷する海域は北海道のオホーツク海に面した海岸と北海道東部の太平洋岸の一部に限られている。このオホーツク海に面した海岸においては、冬期間は海岸・港湾の結氷とカラフト東部海岸で結氷した海水が季節風によって流水となって襲来し、港湾の機能は全く果たせなくなるとともに、船舶の通行もできない。この海水は海流・潮流・風の効果によって複雑に海面上を移動することが明らかにされている。オホーツク海に面した海岸においては海水（流水）により海岸・港湾構造物が大きな被害を受けたことはない。しかし施工途中の港湾構造物が若干の被害を受けた例はある。また最近では養殖漁業や昆布等が大きな被害を受けたことが報告されている。なお、オホーツク海に面した海岸においては、流水に対する危険から鋼杭構造物はほとんど用いられていない。本研究は海水の力を受ける構造物の設計に必要な外力を求めたものである。

2. 海水の海岸構造物におよぼす力

海水が海岸構造物に作用する力としては次の4つが考えられる。

- i) 衝撃力：流水盤あるいは流水塊が海流・潮流・風あるいは波動によって海岸構造物に衝突する時の力。
- ii) 水圧力：海面が流水群に覆われた時、流れや風によって海水が海岸構造物を押しつける力。
- iii) 付着力：海水が構造物に付着し、水位変動に伴って構造物に力をおよぼす。これは主に杭構造に関係する。
- iv) 熱応力：海水は水温の変化に伴って膨張・収縮を行うが、それによって生ずる力。

以上の4つの力のうち熱応力は特に明け方等の水温の急変時に起こるが、これは淡水氷などの調査結果から圧縮強度に比べて小さい。これは海水が粘弾性体であることから、緩やかな膨張では海水がFlowすることにより、それほど大きな力とはならない。付着力は鋼杭構造等の

場合にその廻りに海水が付着し、水位変動によって付着した海水の浮力や重さによって杭に作用する鉛直方向の力であるが、一般に海面は常に変動しているためにきわめて小さい。よって本研究は衝撃力と水圧力についての試験を行った。一般に海水が海岸構造物におよぼす衝撃力や水圧力を考える場合、海水の破壊強度が海岸構造物に用いられる材料（コンクリート・鋼）の強度に比べて非常に弱い場合、たとえ海水がいかに強い力で押しつけられたとしても海水自体が破壊してしまうことになる。よって一般には、海岸構造物に作用する海水による衝撃力や水圧力は一般に次式で示される。

$$P = \sigma_c \cdot D \cdot h \dots \dots \dots (1)$$

σ_c : 海水の破壊強度 (kg/cm²), D : 海水の力の方向に直角な面の構造物の径あるいは幅 (cm), h : 氷厚 (cm), P : 水圧力あるいは衝撃力によって構造物に作用する力 (kg)

式(1)において σ_c は海水の破壊強度であるが一般には圧縮強度である。よって圧縮強度を求めることにより海水の構造物におよぼす力を求めることができる。衝撃力と水圧力の違いは破壊速度の違いによることになる。よって本研究は海水の圧縮強度を求めることを主たる目的とした。

3. 圧縮試験の問題点

海水の圧縮強度を測定するために次の4点に特に注意を払った。(1) 海水の圧縮強度測定のための供試体の Size Effect の決定。(2) 試験のための海水を採取するにあたり、長時間空中にさらすことにより昇華現象と氷温と気温の違いにより海中にある場合と異なった力学特性を示す。(3) 海水中には気泡・気孔・Brain 等が存在し、その分布は一様でないため荷重を加える時に偏心荷重となりやすい。(4) 測定器を寒中にさらすことによる測定器の耐寒性と精度。

(1) については海水の強度試験の標準供試体の寸法は決まっていない。北大低温研の田畑等は圧縮試験に $\phi 60$ mm の円柱コアを用いているし、Peyton は $\phi 1.4' \times 2.6'$ である。Schwarz は $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ の直方体を用いている。海水は Brain・気泡・気孔を含んで

* 正 会 員 工 修 北海道大学助教授 工学部土木工学科
 ** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
 *** 正 会 員 工 修 北海道大学助手 工学部土木工学科
 **** 正 会 員 工 博 北海道大学教授 工学部土木工学科

いてその分布は一樣でない。よって供試体の大きさは、大きいほど適當である。本研究では土木工学の材料試験の標準寸法を $\phi 150\text{mm} \times 30\text{cm}$ と考え実際の試験は $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の立方体で行ったが、これは A.C.I. の Manual よりこの立方体の圧縮強度の 1.25 倍した値が標準供試体の圧縮強度となるからである。(2) については、海水が海中にある場合には気孔の一部は海水で満たされているが、この海水を切り出すと海水中からかなりの海水が流れ出てくる。また海水を空气中にさらすことにより昇華現象が起こる。また海中にある海水は氷底で $-1.5^\circ\text{C} \sim -1.7^\circ\text{C}$ であり、ごく表面では気温に近い。氷厚・気温によっても異なるが表面から 10cm くらいより深部では $-2.0^\circ\text{C} \sim -4.0^\circ\text{C}$ 以上である。しかし切り出した海水を長時間外気にさらすことにより気孔中等に残った海水が結氷したりすることにより海水の力学特性はかなり変化する。切り出した海水をビニール袋に入れて 24 時間放置しておくとし切り出してすぐ測定した海水に比べて密度は 1 割ほど小さくなり強度も変わる。以上のことを考慮して、われわれは採氷してから圧縮強度試験完了まで 2 時間以内になるように努力した。(3) については海水が等方性でないために、一軸圧縮試験器で荷重をかけると非常に偏心しやすい。偏心荷重となると海水が滑動するため、台座と Pressure Plate には滑り止めに $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の 4 辺に高さ 4mm の鋼棒を取り付けた。(4) については (2) の所で述べたように採氷後ただちに試験をするため満足の施設は採取地点の近くに得られないため、低温のため精密測定器は使用できないため、リングの変位等はすべてダイアルゲージ ($1/100\text{mm}$) を用いた。ダイアルゲージは低温下では性能が悪く 1 時間以上連続して使用することは困難であった。

4. 試験方法と装置

試験は 1975 年 2 月にサロマ湖の富武士で行った。試験に用いた海水はサロマ湖内の 5 か所から採取したものと、常呂海岸から採取した流水を用いた。圧縮試験は最大 3.5t 能力の一軸圧縮試験で荷重速度は変化させることができる。チェーンソーで切り出した縦 60cm 、幅 30cm 、厚さ 40cm の海水をビニール袋に入れて変質化を防いで試験器の所に運搬し、それを 10cm の立方体に整形して、単位体積重量(ここでは密度という)を測定し、圧縮試験を行う。破壊した海水の内部の温度を測定し、同時に破壊した海水を広口ピンにとり溶かして、電気伝導度を測定することにより塩分量 S を求めた。田畑等や Peyton の結果から、海水の強度におよぼす因子としては海水の結晶の形と大きさ・Brain 量・気泡量・気孔量・氷温・荷重速度それに結晶軸に対する荷重方向があげられるが、Brain 量を表わすものとして塩分量 S 、気泡量・気孔量を代表するものとして密度 ρ を測定した。

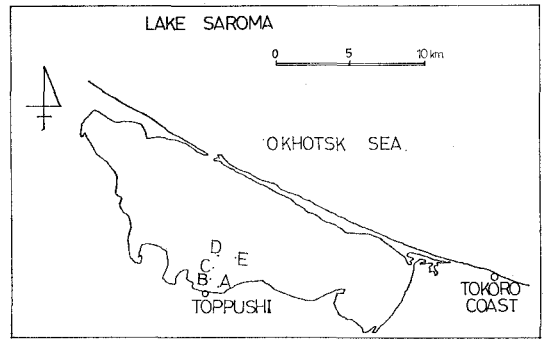


図-1

図-1 にサロマ湖内の海水の採取地点を示す。

5. 海水の塩分量 S と密度 ρ との関係

まず海水の物理的性質を調べるため海水の塩分量と密度の関係を調べた。この結果を図-2 の (a), (b), (c) に示す。Zubov, Pounder 等の実験式より小野は海水の密度を式 (2) のごとく表わした。

$$\rho = \frac{\rho_i}{1 - (1 - \rho_i/\rho_b) \cdot 0.001 \cdot S \cdot (1 - \alpha/T)} (1 - v_a) \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_i = 0.9168 - 0.00014 \cdot T \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho_b = 1 + 0.0008 \cdot S_b = 1 + 0.8 \div (1 - \alpha/T) \dots\dots (4)$$

ρ : 海水の密度 (g/cm^3), ρ_i : 純氷の密度 (g/cm^3), ρ_b : Brain の密度 (g/cm^3), v_a : 気泡量 (%), S : 海水の塩分量 (%), S_b : Brain の塩分量 (%), T : 氷温 ($^\circ\text{C}$), α : Assur の定数 54.11

式 (2) において v_a , T を一定とすると S が大なる程 ρ が大きくなることを示している。図-2 の結果とよく一致している。また図-2 より流水, 24 時間放置の海水は S , ρ ともに小さい値を示している。このことは田畑等も指摘しているように海水の生成条件と生成してからの経過時間に関係している。サロマ湖の結氷が 1 月下旬頃から徐々に始まるのに対して、カラフト東岸から流れてくる流水は 11 月頃から出来始める。氷厚はサロマ湖内の海水、流水ともに約 40cm であったが、表面と低面を $3 \sim 4\text{cm}$ 取り除き残りを 3 つに分け、上層・中層・低層に分けた。層別にみると、表面に近いほど S の量が多いがこれは Brain の量に関係し、この結果は Whitman や北大低温研の結果と、一致している。また表層で塩分量の多い原因の一つに結氷初期に降雪があると、その重さで海水が沈み、その上に海水が浸透し、そのまま結氷するからと考えられる。流水の塩分量が少ないのは、海水が生成して長時間たつと比重の重い Brain 細胞が下方に押しやられるためと考えられている。サロマ湖の海水の塩分量は、この試験の時 $31 \sim 32\%$ でオホーツク海の塩分量にほぼ等しい。

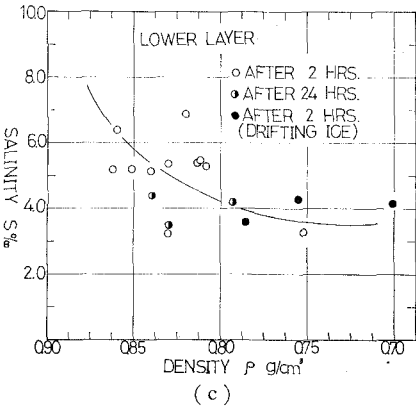
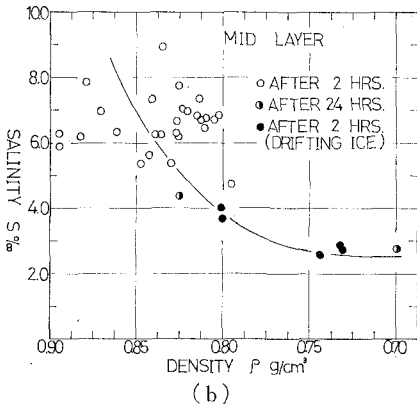
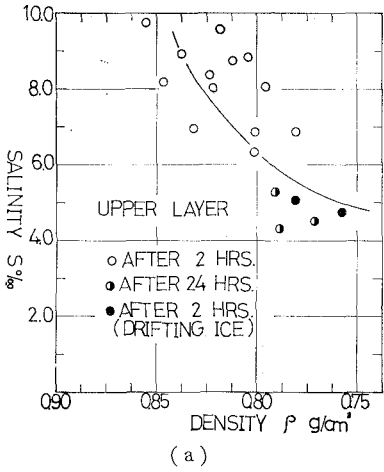


図-2

6. 海水の圧縮強度 σ_c と塩分量 S の関係

図-3 に σ_c と S との関係を示す。上層・中層・下層ともに明瞭な相関はみられない。これは水温がデータによって異なっているためと、流水と24時間後の氷を除くと塩分量にそれほど大きな差がないためである。顕著なことは、流水の強度がサロマ湖の海水に比べて小さく、最大でも約 9 kg/cm^2 である。これは前にも述べた

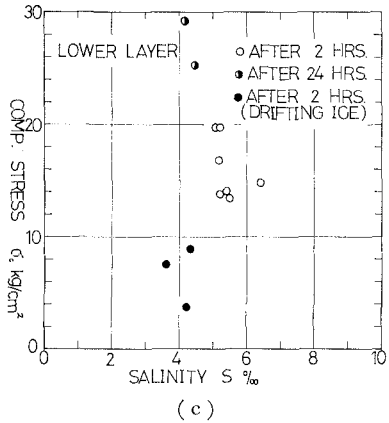
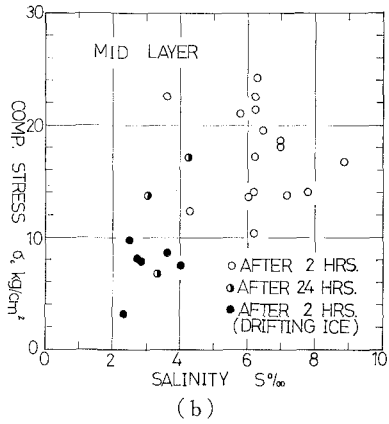
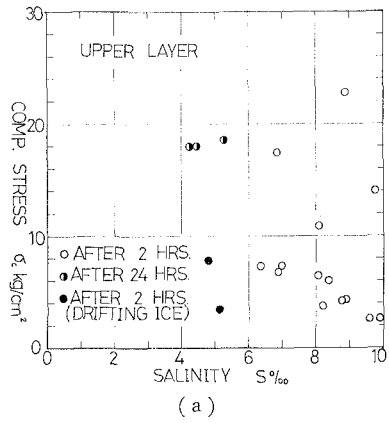


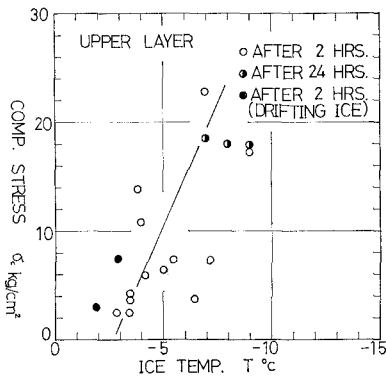
図-3

ように生成後の期間が長いことと生成条件の違いによるものと思われる。また上層部が中・下層に比べて σ_c が小さいがこれは海水の結晶構造の違いにも関係している。

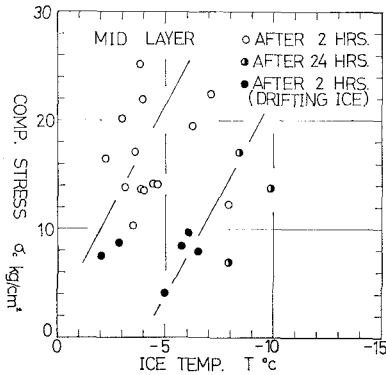
7. 海水の圧縮強度と水温の関係について

海水は、ごく表面近傍では気温に近い温度を示すが、水底では、その場所の海水の結氷温度に近い値を示す。海水の結氷温度は Zubov により式 (5) で示される。

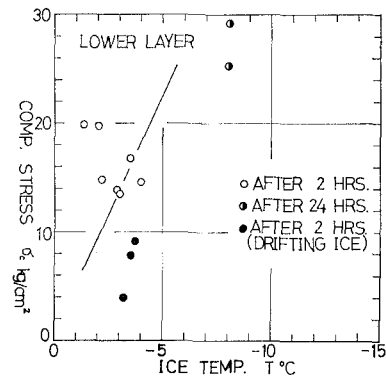
$$T = -0.054 \cdot S \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (5)$$



(a)



(b)



(c)

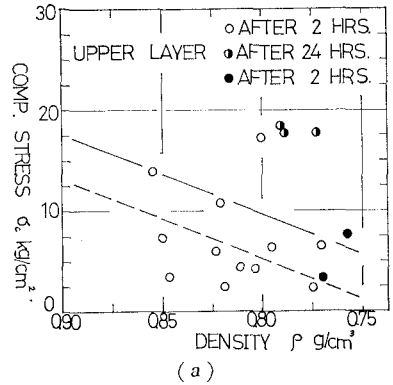
図—4

海水に限らず、河川氷においても氷の強度は氷温に大きく関係している。氷温が低下するにしたがって圧縮強度も大きくなる。図—4 に氷温 T と圧縮強度の関係を示す。これによると T と σ_c は直線関係で近似できる。また上層は下・中層に比べて強度は小さい。これは上層部は降雪等の影響を受けることと結晶構造が上層で Granular Ice であり、これに対して中・下層部では Mosaic Ice であるからである。海水の氷温は気温等によっても異なるが、海水の 90% は海中に没しているため海水の

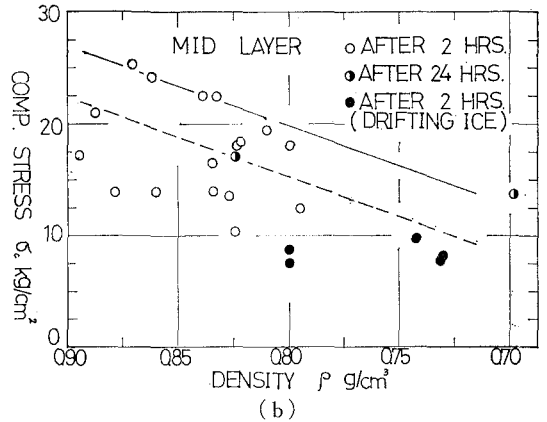
水温の影響を強く受ける。海水の塩分量を 32‰ とすると、式 (5) より、水温は、氷底で -1.7°C に近い。海水の氷温は北大低温研等の調査から $-1.5^\circ\text{C} \sim -4.0^\circ\text{C}$ である。表面では、 -4.0°C 以下になることもあるが、ごく表層に限られるし、また表層の強度も他の層に比べて弱いことより海水全体の氷温としては安全側をとって、 -4.0°C としてよい。

8. 海水の圧縮強度 σ_c と密度 ρ の関係

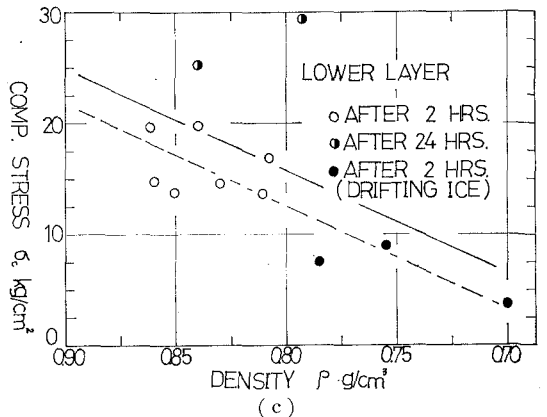
図—5 に σ_c と ρ の関係を示す。図中の破線は水温



(a)



(b)



(c)

図—5

-5°C~-2°C の試験値の平均を示し、実線はその時の最大値を示す。 ρ と σ_e は直線関係で示されることがわかり、 ρ が大きくなれば σ_e も大きくなる。純水の場合の密度 ρ は約 0.92 g/cm³ であるが、海水は気泡・気孔・Brain を含み、特に気泡・気孔が 5~15% 程度を占めるため、密度は純水に比べて小さくなる。流氷はその生成過程の違いにもよると思うが、サロマ湖の海水に比べて気泡・気孔の量が多く、海水の密度が 0.80 g/cm³ 以上であるのに対して流氷の密度は 0.75 g/cm³ 前後で小さいことを示している。同一の密度でも上層が他層に比べて弱いが、これは塩分量、結晶形等の違いによるものと思われる。海水の平均的密度は、上層を除くと約 0.87 g/cm³ が適当と思われる。流氷は大きめの値をとると 0.80 g/cm³ となる。

9. ひずみ速度と圧縮強度の関係

ひずみ速度と圧縮強度の関係を示したものが 図-6 である。ひずみ速度は、圧縮破壊時のひずみ率を破壊に要した時間で割った値である。海水が粘弾性体であることから、変形速度によって圧縮強度が変化することが予測できたので、一軸圧縮試験器の台座の上昇速度を 0.308 mm/sec, 0.425 mm/sec, 0.610 mm/sec の 3 種類変えて、サロマ湖 A 点中層の海水について試験した。用いた供試体の氷温が 0°C~-1.0°C で、塩分量が 5.6~7.7%、密度が 8.02~8.40 g/cm³ である。この結果、ひずみ速度は 0.0002~0.002/sec の範囲である。図のごとく、この範囲では圧縮強度に差がないことが明らかとなった。Schwarz は Baltic 海の海水を用いてこの種の実験を行っているが、データ数、S、 ρ は不明であるが、図の実線のごとくなっている。Schwarz はひずみ速度を広範囲に変えて実験を行っているが、氷温が -10°C 以下では、ひずみ速度が 0.003/sec で最大圧縮強度を示すが、T がそれより高いと、 σ_e はひずみ速度に無関係であることを示しているが、これはわれわれの結果とよく一致して

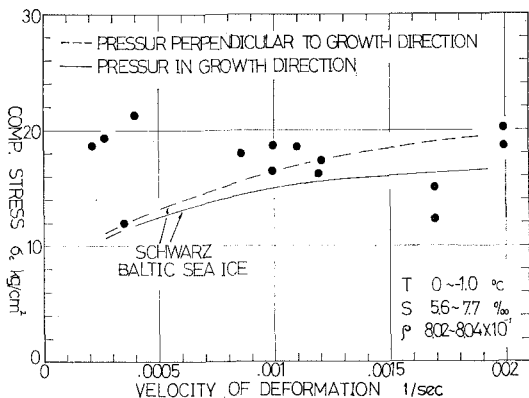


図-6

いる。以上のことから、前にも述べたように、実際の海中にある海水の平均温度は低く見積っても -4°C であることから、変形速度は σ_e にほとんど影響を与えないと考えてよいことになる。この事実は、海水が構造物に作用する場合、衝撃力としておよぼすか、氷圧力としておよぼすかは、海水が構造物に接触した時の海水のひずみ速度の速さによって決まる。今回の試験と Schwarz の結果から、氷温を -4.0°C より高いと考えると衝撃力も氷圧力も大きさは同じと考えてよいことになる。

10. 結晶軸に対する荷重方向の差による圧縮強度 σ_e

海水の場合、結晶軸は鉛直方向になっている。この結晶軸に対する荷重方向によって σ_e が異なることが Peyton や Schwarz によって報告されている。Schwarz は結晶軸方向に荷重をかけた場合と結晶軸に直角になるよう荷重をかけて実験を行っているが、結晶軸に直交するよう荷重をかけた方が σ_e は若干大きくなっているが、氷温が -10°C より高く、ひずみ速度が 0.003/sec 以下では、その差はほとんどないことを示している。氷温 0°C~-1.0°C、密度が 0.805~0.825、塩分量が 6.7~7.7% の時のサロマ湖 A 点中層の結果を 図-7 に示す。図のように、荷重方向による差はほとんど見られない。これは Schwarz 等の結果とも符合する。

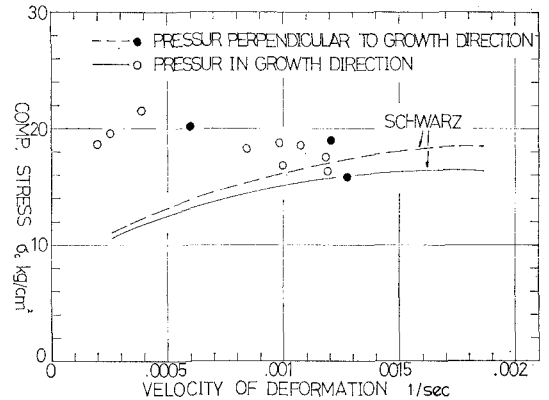


図-7

11. 結 論

海水の圧縮強度は塩分量・氷温・密度によって決まるが、特に氷温と密度とに強い相関関係があることが明らかとなった。また圧縮強度はひずみ速度・結晶軸に対する荷重方向にも影響されるが、われわれの結果と Schwarz の結果から、氷温は -4°C とすると、それらの効果はきわめて小さいことが明らかとなった。よって 図-4 より、海水の氷温を -4°C とすると σ_e は 20 kg/cm² となる。また 図-5 より、海水の平均密度を 0.87 g/cm³

とすると σ_0 は 25 kg/cm^2 となる。これに対して流氷の最大の圧縮強度は 9 kg/cm^2 となる。この値は立方体の供試体の値であるから、これを $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ の標準供試体の σ_0 に換算すると、この値の 1.25 倍すればよい。よってサロマ湖の海水の圧縮強度は 31 kg/cm^2 、流氷は 11 kg/cm^2 となる。よって海岸構造物に及ぼす力は次式で示される。

$$\text{サロマ湖の海水に対して } P=31 \cdot D \cdot h \cdots (6)$$

$$\text{流氷に対して } P=11 \cdot D \cdot h \cdots (7)$$

なお、式(6)、(7)は氷温が -4°C より高い場合であるから、ひずみ速度に関係なく用いられるため、氷圧力と衝撃力のどちらにも使えることになる。

最後に本試験に協力して載いた北大工学部の小野敏行・住田徹の両氏と東海大学の泉冽氏に謝意を表するとともに、試験に便宜をはかって載いた北海道庁網走土木現業所および佐呂間漁業協同組合の方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 田畑・小野：海氷の力学的特性 I，低温科学物理篇，第17，昭33年。
- 2) 田畑・小野：海氷の構造について，低温科学物理篇，第16，昭32年。
- 3) 田畑：海氷の力学的性質 II，低温科学物理篇，第17，昭33年。
- 4) 小野：海氷の熱的性質の研究 IV，低温科学物理篇，第26，昭43年。
- 5) Schwarz, J.: The Pressure of Floating Ice-Fields on Pile, I.A.H.R. ICE SYMPOSIUM 1970.
- 6) Bruun, P.M.・Johannessen, P.: The Interaction Between Ice and Coastal Structures, Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions.
- 7) Peyton, H.R.: Sea Ice Strength, Geoph. Inst. of the Univ. of Alaska 1966.
- 8) Zubov, H.H.: 北氷洋の氷，1945.