

## II-2 海氷の弾性諸定数について

|               |          |
|---------------|----------|
| 北大工学部         | 正 佐伯 浩   |
| ○北見市役所        | 正 小野寺 輝利 |
| パシフィックコンサルタント | 正 中 沢 直樹 |
| 北大工学部         | 小野 敏行    |
| 北大工学部         | 正 尾 崎 晃  |

1. 諸言 海氷に関する工学的研究が始まったのは、ごく最近になってからである。海氷の影響を受ける海域は、全海洋面積の10%程度を占める事を考えるに奇異な感じを受けるが、これは、寒冷地海洋における人間の活動が非常に活発であった事によるものと考えられる。最近になって海氷に対する工学的研究が世界各国で非常に活発になってきた背景には次のような目的があるためと思われる。(1) 最近のエネルギー危機に対応して、寒冷地の海岸、海洋底にその存在が確認されている石油、ガスの探掘装置あるいは地下資源の探査装置の海氷に対する設計法を確立する事及び海氷に対して有効で経済的な構造物を開発するため、これが最近の海氷研究の目的として最も重要な問題である。これは現在、サハリン沿岸、北極海と北に渤海等での石油開発のため結論が急がれている。(2) 寒冷地の開発による航路維持のため、寒冷地国の経済活動の国際化にともなう物質輸送に対する航路維持のため砕氷船、砕氷貨物船、耐氷船の初歩的設計法を確立するため(3) 海氷盤で氷上行走路、氷上軌道、氷上貯蔵基地等のように交通施設あるいは貯蔵施設に利用するため。(4) ある限られた海域の海氷の動きを、養殖漁業等の保護のため制御する必要があるため。特に北海道のオホーツク海沿岸ではこの問題が最も重要になってきている。

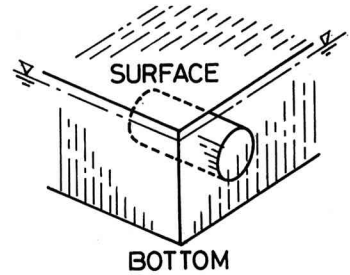


図-1

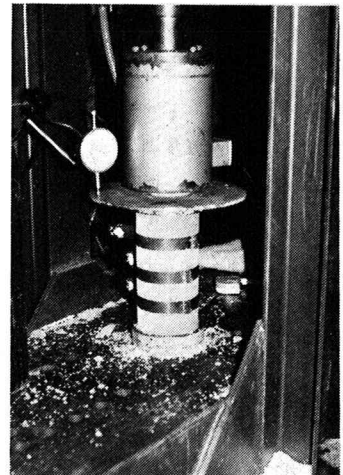
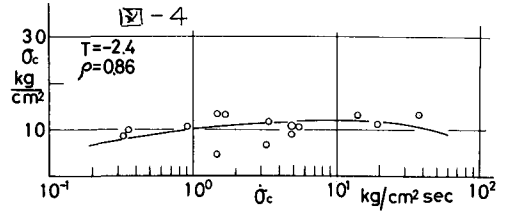
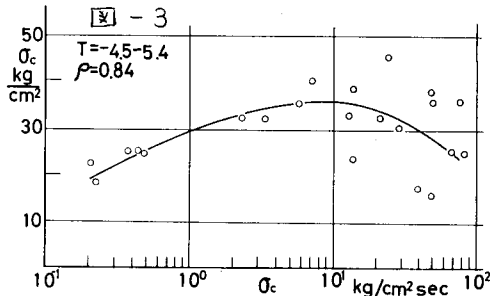


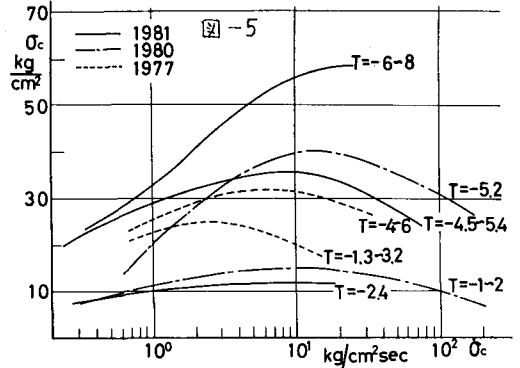
図-2

以上述べたように、海氷に関する工学的諸問題を解決するためには、海氷と氷自体の力学特性を明確にする事が必要である。なぜなら、海岸、海洋構造物に作用する氷力にしても、海氷盤で交通施設に利用する場合でも、また砕氷船等の設計においても、それには、海氷の強度、弾性率、ポアソン比等が明らかにされる必要があるからである。すでに、この種の研究は数多く発表されているが、それぞれ別個に研究されていて、同一の海氷を用いた研究は見当たらない。そこで本研究では、サロマ湖の海氷を用いて、特に海氷の一軸圧縮強度、弾性率、せん断弾性係数、ポアソン比を実験的に調べる事により、オホーツク海の南部海域の海氷の力学特性を見出そうとしたものである。

2. 一軸圧縮強度特性 一般に材料の強度試験においては、供試体の形状、寸法、それと荷重速度(stress rate)、歪速度、それに載荷条件によって強度が異なった値を示す事はよく知られている。本研究においては、筆者等の過去の研究成果から、供試体の形状は円筒形とし、寸法は直径10cm、高さ20cmとした。これは、1975年のIAHRの氷問題委員会が標準試験方法にも示唆している事になる。また載荷板には、硬質ウレタン等を用いて、半径方向の力を除去する事も考えられているが、筆者等の過去の実験結果から、硬質ウレタンそのものが温度の影響を強く受ける事から、今回は磨き鋼板を用いた。荷重速度  $\dot{\epsilon}$  (stress rate)

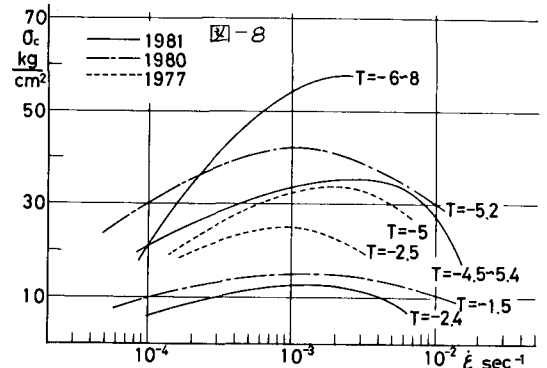
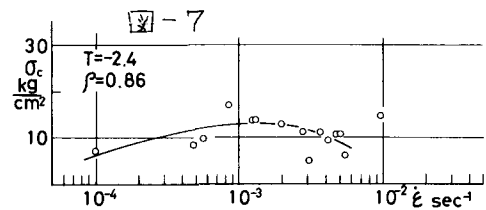


と一軸圧縮強度 $\sigma_c$ の関係の実験結果を図-3、図-4に示す。海氷強度に及ぼす影響因子としては、試験に用いる供試体、試験方法を同一とすると、海氷の温度、塩分量、空隙率等が考えられる。一般に空気を含まない海氷においては、強度とブライトの体積間に強い相関がある事が多くの研究者により発表されているが、オホーツク海



の海氷のように、気泡を多く含む海氷においては、筆者等の研究成果から、海氷強度は、氷温 $T$ と海氷の密度 $\rho$ に強く依存する事が判っている。図-3、図-4のデータにはかなりバラツキが見られるが、 $5.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s} < \dot{\sigma}_c < 20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  の間で強度が最大を示している。これらの結果と、過去の筆者等の結果をまとめたものが図-5である。実験した年によって実験結果に多少の差が見られるが、これは、年によって海氷の密度 $\rho$ 及び塩分量等が多少違っているためである。筆者等が過去7年間、同時期にサロメ湖氷の強度測定を行っているが、年によって海氷の密度、塩分量が違っている。これは結氷時期の差、とくに気温の変化、降雪の有無に大きく関係している。ともかく、この3年間の結果から、一軸圧縮強度は荷重速度 $\dot{\sigma}_c$ に依存しており、 $5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s} < \dot{\sigma}_c < 20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  で最大値を示す事が判らなくなった。これに対して Peyton は、アラスカの海氷を用いて同様の実験を行っており、その結果によると  $\dot{\sigma}_c$  が  $2.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  で最大強度を示している。筆者等が淡水氷で行った実験においても  $\dot{\sigma}_c$  が  $2.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  で最大強度を示している事から、オホーツク海の海氷には若干性質が異なっているものと思われる。その最も大きな理由は、オホーツク海の海氷が北極海等の海氷に較べ

て Porous である事によるものと思われる。次に歪速度と一軸圧縮強度 $\sigma_c$ の関係を調べたものが図-6、図-7である。歪速度の結果とも  $\dot{\epsilon}$  が  $10^{-3} / \text{s}$  の近傍で最大の圧縮強度を示している。歪速の結果と比較したものが図-8である。測定した年によって結果は若干異なっているが、 $10^{-3} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  で一軸圧縮強度は最大値を示す。Schwarz は、バルト



海氷の実験結果から  $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} s^{-1}$  であり、最大の圧縮強度を示す事を報告しているし、海水氷で実験を行った Korzhavin と Carter 等も同様に  $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} s^{-1}$  で最大強度を示す事を報告している。この歪速度  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} s^{-1}$  は、海水の性質で遷移領域になっていて、 $\dot{\epsilon} < 10^{-3} s^{-1}$  では海水は延性(クリープ)、 $\dot{\epsilon} > 10^{-3} s^{-1}$  では脆性性を示すようである。次に、最大の圧縮強度を示す  $5 < \sigma_c < 20 \text{ kg/cm}^2 \cdot s$  の領域での圧縮強度  $\sigma_c$  と氷温の関係と調べたものが図-9である。図からも明らかなように  $T > -8^\circ\text{C}$  の範囲では、氷温が低下するにつれて、一軸圧縮強度は直線的に増加する。事が明かになっている。これは、筆者等の1978年の結果とも一致している。また氷温が  $T < -8^\circ\text{C}$  になると、強度の増加率が小さくなっていく事が、筆者等の結果から明かになっているが、これは、 $T = -8.7^\circ\text{C}$  になると、ブライン中の  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  が凝固析出してくる事に原因があると云われている。

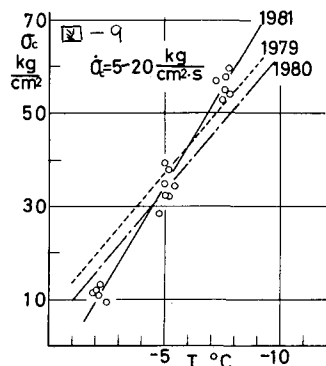


図-9

### 3. 海氷のポアソン比

海氷のポアソン比の測定例は非常に少ない。ポアソン比の測定法には振動法、地震法、直接測定法などがあるが、今まで行なわれた測定例はほとんど動的的方法になっている。これはコンクリートのように直接ストレインゲージを張りつける事が難しく、横断面の歪の測定が極めて困難であるためである。筆者等も海氷の歪測定に各種のストレインゲージを用いて測定したり、歪ゲージと海氷間の接着力を増すために、ゲージに砂粒や砂鉄を張り付けたりして実験してみたが結果はほとんど失敗であった。そこで筆者等は図-10に示すような測定器を新たに開発してポアソン比の測定を試みた。

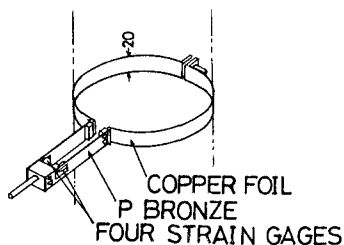
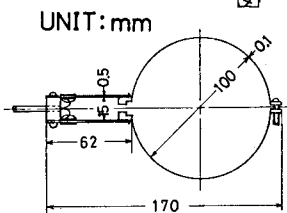


図-11

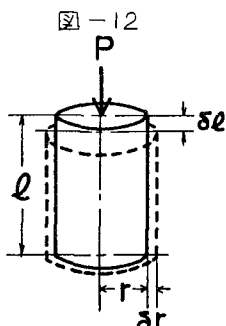
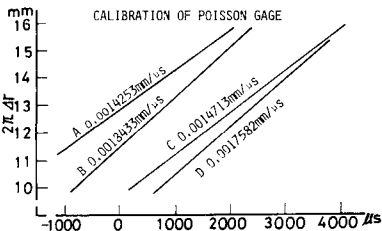


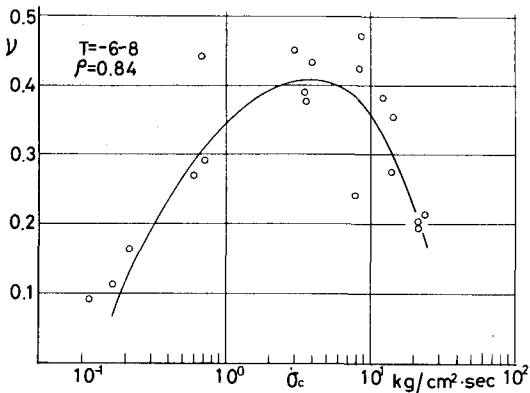
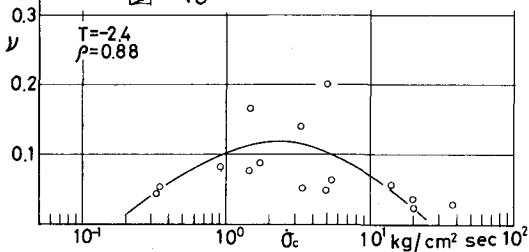
図-12

この測定器は薄い銅板にリネウム鋼の2本の板バネをつけ、板バネの根元部に4枚の歪ゲージを張りつけたもので、これを海氷の内筒状試体にまきつけ、それをゴムで締付けた。実験では直径20mmの内筒状試体の上、中、下の3ヶ所に貼り付けた。本装置のキャリブレーションの結果を図-11に示す。図からも明らかなように、供試体の円周の変形量と歪ゲージの歪の間に直線関係が得られた。

図-14

実験の写真を図-2に示す。本実験においては、このポアソン比の測定装置は供試体の上から5cm, 10cm, 15cmの位置に取り付けた。実験結果を図-13, 図-14に示す。

図-13



両国から明ら

かるように、 $\nu$  実験データは、 $\nu$  なるパラッキが 生ずるが、荷 重速度  $\dot{\sigma}_c \approx 2 \sim 5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  当 りに最大のポ アソン比  $\nu$  を示す領域が 見られる。この

図-15

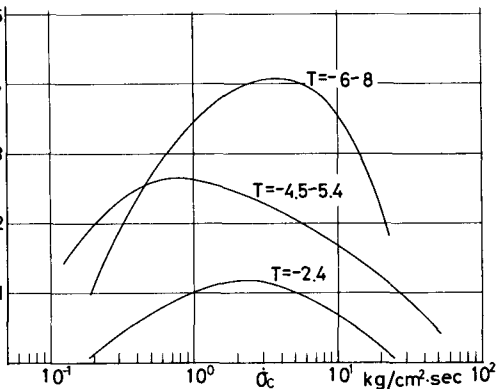
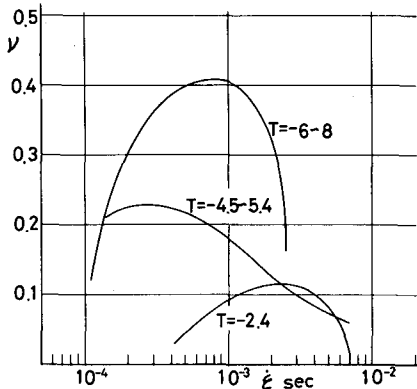
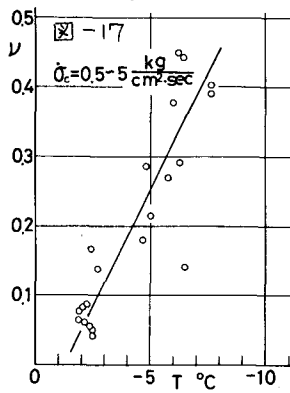


図-16



結果をまとめたものが図-15である。この結果、氷温によって、ポアソン比の最大 値を示す荷重速度は違ってくるが、氷温が  $T > -8^\circ\text{C}$  の範囲では  $0.6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s} < \dot{\sigma}_c < 6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  の範囲でピークを現す事が明らかとなった。またポアソン比は、氷温  $T$  が低くなるほど低い程大きくなる事が明らかとなった。また氷温が低い程 応力の影響を強く受ける事も明らかとなった。また、このポアソン比  $\nu$  と  $\dot{\sigma}_c$  の関係は、 一軸圧縮強度  $\sigma_c$  と  $\dot{\sigma}_c$  の関係とも非常によく一致して、また  $\sigma_c$  のピークの発生位置 はポアソン比のピークの発生位置ともよく一致している。この事、 $\sigma_c$  が最大を示すよ うな応力の時は、実験前の供試体よりも径が大きくなっている事を示している。また、 ポアソン比  $\nu$  が最大を示す、 $\dot{\sigma}_c = 0.5 \sim 5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  の領域でのポアソン比  $\nu$  と氷温  $T$  の関係を示したものが図-17である。このポアソン比も、 $T > -8^\circ\text{C}$  の範囲では、氷温の低下とともに直線的に増加するが、ポアソン比の性質上 0.5 を超える事はないと思われるので、温度が  $-8^\circ\text{C}$  より下っても、 $\nu$  はほとんど変化しないものと考えられる。図-16には、歪速度  $\dot{\epsilon}$  とポアソン比の関係を示す。これも、一軸圧縮強度 とほとんど同じ変化を示し、 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  で最大のポアソン比を示している。尚、本実験で求めたポアソン比の 以下の計算に示したように求められた。図-12に示すように円筒状供試体の半径を  $r$ 、高さを  $l$  とするとき、左を  $u$  とし、半径方向の歪みは次の (1)、(2) 式で計算される。



$$\epsilon_l = \delta l / l \quad \text{----- (1)} \quad , \quad \epsilon_r = 2\pi r \delta r / 2\pi r = \delta r / r \quad \text{----- (2)}$$

ここで、左方向の変位量を  $\delta l$ 、円周方向の変位量を  $2\pi \delta r$  とし、これを、図-2 に示すポアソン比測定装置 とダイヤルゲージを用いて測定される。円周方向の変位量は 3ヶ所計で測定されるので、(3) 式のように平均して、(4) 式によりポアソン比  $\nu$  を計算する。

$$\bar{\epsilon}_r = \frac{1}{3} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \quad \text{--- (3)} \quad , \quad \nu = \bar{\epsilon}_r / \epsilon_l \quad \text{----- (4)}$$

海水のポアソン比については、Oliver 等は  $\nu = 0.32 \sim 0.37$  の値を得ていて、Peschansky は  $\nu = 0.29$  の値を得ている。また石田はオホーリック海の海水に対して  $\nu = 0.38$  の値を得ている。しかし、これらの値は全 て震動法から得た値である。一般にコンクリート 等のような氷以外の材料については、ポアソン比は直接的な 直接測定法による場合の方が小さい値を示す事が知られている。本実験結果についてもピークを除けば、海水 もそのような性質を示しているといえる。また、今回用いた海水においては、このポアソン比の測定に際して、 左方向に一定速度で変位させたが、その時の荷重も直線的に増加するのに対して、半径方向の変化は、破壊荷重の 半分くらいまで、つまり破壊時の変位量の半分の左方向変位量まではほとんど変化せず、それを超えてから急激に変化する事が明らかとなった。これは初期においては、海水内の気泡がつぶれる事によるものと思われるが、計算された気泡量の半分くらいになつてから、半径方向に変形する事が判った。

図-18

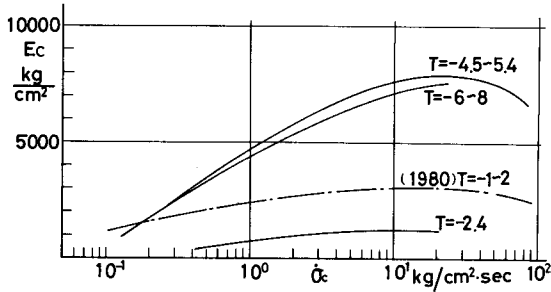


図-19

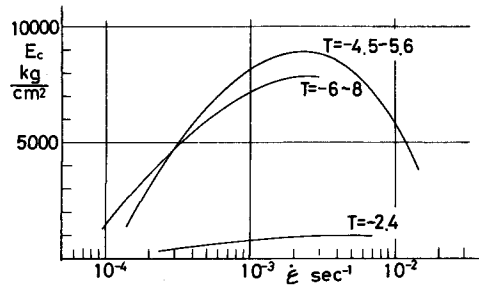


図-20

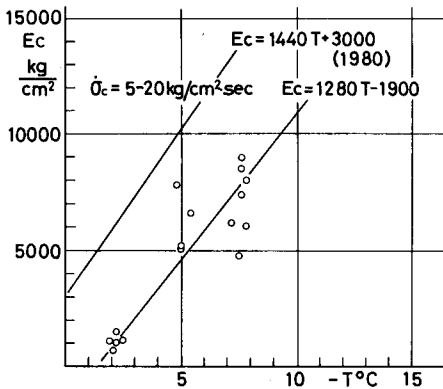
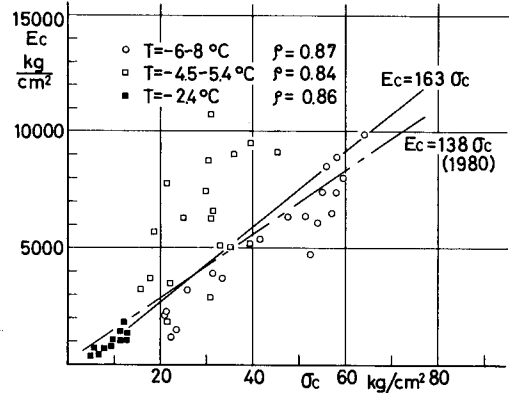


図-21



#### 4. 海氷の弾性係数

海氷の物性値のうち、弾性係数(ヤング率)は最も重要なものの一つである。この弾性係数σ<sub>c</sub>の測定には、振動法による動的測定法と単純桁や片持梁に荷重をかけて、その荷重と変形量から求める方法、さらに一軸圧縮強度試験における荷重強度と歪の関係から求める方法がある。本研究では、ポアソン比を考慮した一軸圧縮強度試験から求めているので、ここでは圧縮弾性係数E<sub>c</sub>について述べる事にする。今回の一軸圧縮強度試験において、応力と歪の関係は、ほぼ直線に近似できる。弾性係数の求め方にも、種々報告されているが、本研究では、応力と歪の両方が載荷時から破壊時まで直線で表わされるデータのみを選んで、 $E_c = \sigma_c / \epsilon_c$ で計算した。σ<sub>c</sub>は一軸圧縮強度で、ε<sub>c</sub>は供試体破壊時の最大歪である。供試体の形状、寸法は前のσ<sub>c</sub>の測定と同じ供試体である。実験データは相当バラツキが大きいから、E<sub>c</sub>と荷重速度σ̇の関係を示したものが図-18である。E<sub>c</sub>は荷重速度σ̇によって変化する、また氷温が低いほど大きくなっている。また、E<sub>c</sub>の最大値は10 kg/cm²・s < σ̇ < 30 kg/cm²・sの範囲に存在している。E<sub>c</sub>のσ̇に対する変化は、氷温が低いほど大きい。図-19にはE<sub>c</sub>と歪速度ε̇の関係を示したものである。この関係も、σ̇の場合と同様にE<sub>c</sub>はε̇に依存し、10⁻³ s⁻¹ < ε̇ < 10⁻² s⁻¹の領域に最大値が存在している。次にσ̇ = 5~20 kg/cm²・sの範囲で、E<sub>c</sub>と氷温の関係を示したものが図-20である。氷温がT > -8 °Cの範囲では、E<sub>c</sub>とTの間には直線関係がある事が判る。今回のデータは1980年の時の値に較べてかなり小さい。これは、海氷の密度が異なる事による。また、E<sub>c</sub>と海氷の一軸圧縮強度の関係を示したものが図-21である。今回の実験範囲T > -8 °C

表-1

| No | T (°C) | ν     | E(kg/cm²) | σ <sub>c</sub> (kg/cm²) | G(kg/cm²) |
|----|--------|-------|-----------|-------------------------|-----------|
| 1  | -5.8   | 0.119 | 3714      | 10.07                   | 3319      |
| 2  | -6.5   | 0.184 | 5493      | 27.19                   | 2320      |
| 3  | -6.0   | 0.123 | 7966      | 31.33                   | 3547      |
| 4  | -7.6   | 0.425 | 8548      | 55.45                   | 3000      |
| 5  | -7.6   | 0.471 | 8979      | 57.79                   | 3052      |
| 6  | -7.6   | 0.277 | 7381      | 59.52                   | 2958      |
| 7  | -7.2   | 0.195 | 6462      | 57.64                   | 2704      |
| 8  | -17.0  | 0.080 | 6338      | 37.97                   | 2934      |
| 9  | -17.8  | 0.024 | 4431      | 34.31                   | 2164      |
| 10 | -15.2  | 0.025 | 7005      | 34.38                   | 3417      |

σ̇ = 10-20 kg/cm²・s

の範囲では $\sigma_c$ と氷温 $T$ の間には直線関係があるので、当然  $E_c$ と $\sigma_c$ の間にも直線関係がある。データはバラツキが多いが、今年のデータからは次の(5)の1次関係が得られた。

$$E_c = 163 \sigma_c \text{ ----- (5)}$$

(5)より、破壊時の $\sigma_c$ は約0.006/となり、今回の供試体(直径10cm, 高さ20cm)の場合、破壊時には、約1.22mm縮んでいることになる。筆者等は、弾性係数 $E_c$ 及びポアソン比 $\nu$ を求めたので、次は(6)式を用いてせん断弾性係数 $G$ を求めた結果が表-1である。但しデータは、荷重速度が $\dot{\sigma}_c = 10 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{s}$

$$G = E_c / 2(1 + \nu) \text{ ----- (6)}$$

のデータである。表-1より、せん断弾性係数 $G$ は平均して約  $3000 \text{ Kg/cm}^2$  であった。

以上、海氷の一軸圧縮強度、ポアソン比、圧縮弾性係数は、全荷重速度 $\dot{\sigma}_c$ 及び歪速度 $\dot{\epsilon}$ に依存し、氷温が低い程依存度が高い事が明らかとなった。また、一軸圧縮強度、ポアソン比、圧縮弾性係数の $\sigma_c$ に対するPeak値は氷温 $T > -8^\circ\text{C}$ の範囲で氷温と直線関係にある事が明らかにされた。

### 〔参考文献〕

- (1) Saeki, H., T. Nomura, A. Ozaki; Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, pp 135~150, 1978
- (2) IAHR Committee on Ice Problems: Report of Task-Committee on Standardizing Methods for Ice, Proc. IAHR Symposium on Ice Problems. 607~618, 1975
- (3) Peyton, H.R.,: Sea Ice Strength, UAGR-182, Geophysical Institute, University of Alaska, 1966.
- (4) Schwarz, J.: The Pressure of Floating Ice Fields on Piles, IAHR Symposium on Ice Problems, 1970
- (5) Saeki, H., A. Ozaki, K. Kubo,: Experimental study on Flexural Strength and Elastic Modulus of Sea Ice, Proc. 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 1981
- (6) Schwarz, J., W.F. Weeks: Engineering Properties of Sea Ice, Jour. of Glaciology Vol.19, No.81, 499~530, 1977
- (7) 石田 完: 海氷中の弾性波の測定, 低温科学, Ser. A. 17, 99~107, 1959
- (8) Oliver, J., A.P. Cray, R. Cotell: Elastic Waves in Arctic Pack Ice, Trans. American Geophysical Union, Vol. 35, 282, 1954