海氷の弾性定数と氷盤の耐荷力について

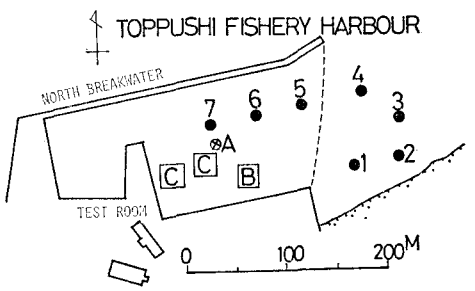
佐伯　浩*　・西谷一典**・小野敏行***
金　光洛****・尾崎　晃*****

1. 緒　　論

最近，寒冷地海岸，海洋での石油探査及び掘削が始まってから，海氷に関する工学的な研究が急激に盛んになってきたが，未だに海氷の強度あるいは弾性定数（ヤング率，ポアソン比等）の測定法や試験方法は確立されていないのが現状で，各研究者がそれぞれの方法で試験を行っている．一般に材料の強度試験あるいは弾性諸定数の測定においては，供試体の寸法及び形状，荷重速度それに歪速度の違いによって，得られる強度や弾性定数の値が異なる事はよく知られている．本研究では，オホーツク海に面したサロマ湖の海氷を用いて，4種類の実験を行い，試験の方法，試験の規模の違いによる曲げ強度 σ_f ヤング率 E の違いについて調べるとともに，無限氷盤の耐荷力試験を行う事により，実際の氷盤の平均的ヤング率及び耐荷力を求めた．また海氷のポアソン比 ν も我々が開発したポアソン比測定装置 (POISSON GAGE) を用いて測定した．

2. 実験装置及び実験方法

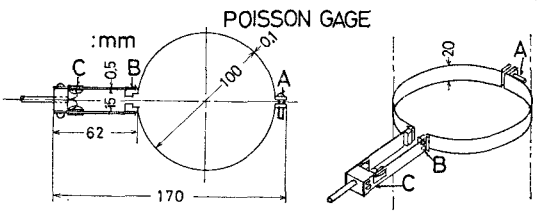
実験は全て，サロマ湖の富武士漁港近辺の海氷を用いて行われた．図—1 に富武士漁港の概略図を示す．破線より港内側は，水深が浅い事と海水の流動が少なく早くから結氷し，氷質もモザイク氷であるが，破線の外側は2月中旬の大降雪の後結氷したもので，グラニュラー氷に近い氷質であった．図—1 において，A点は気温及び氷温の測定点であり，B点は片持梁試験場所，C点は単純桁による曲げ強度試験用の採氷場所で，1～7 までの点は氷盤の耐荷力試験を行った場所である．なお，本実験中の氷温は，鉛直方向に4点測定したが，平均して $T=-1.7°C$ であった．



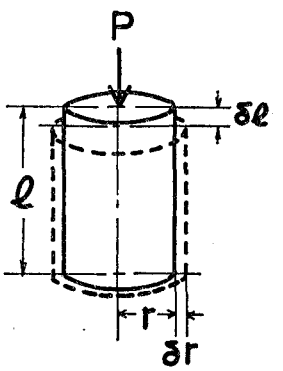
図—1

(1) 海氷のポアソン比 ν の測定

海氷のポアソン比の測定例は非常に少ない．ポアソン比の測定方法には，振動法，地震法，直接測定法などがあるが，今までの測定例はほとんど動的測定法によっている．これは海氷に直接ストレインゲージを張り付ける事が非常に困難だからである．我々は直接，鉛直方向歪とそれに直角方向の歪を測定する事によりポアソン比を求めた．その装置を図—2 に示す．これは，海氷盤から海氷を切り出し，その採取した氷から電気コアドリルで円筒の供試体を造り，圧縮試験を行い，図—3 に示すように鉛直歪量 Δl とそれに直角方向の歪量 Δr を測定



図—2



図—3

* 正会員　工修　北海道大学助教授　工学部
** 正会員　工修　北海道庁土木部
*** 北海道大学工学部
**** 正会員　北海道大学工学部研究生
***** 正会員　工博　北海道大学教授　工学部

して求める．試験は鉛直変位量 Δl は歪ゲージ付きダイヤルゲージで，また横方向歪量は，供試体の上から 5, 10, 15 cm の位置にポアソンゲージを取り付けて測定した．供試体の初期の半径と高さを r, l とすると鉛直歪と横方向の歪はそれぞれ次式で示される．

$$\varepsilon_l=\Delta l/l \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\varepsilon_i=2\pi\Delta r/2\pi r=\Delta r/r \quad \cdots\cdots(2)$$

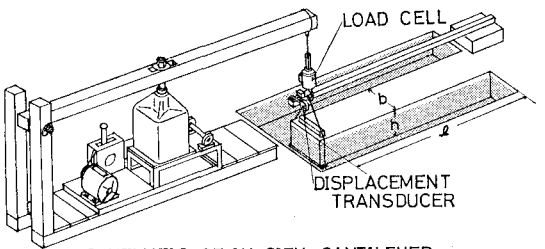
我々の作製したポアソンゲージは円周の増加量 $2\pi\Delta r$ を測定する．なお，横歪は3点で測定するので平均の横歪は式 (3) で表わされるので，ポアソン比 ν は (4) 式で計算できる．

$$\bar{\varepsilon}_i=(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)/3 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\nu=\bar{\varepsilon}_i/\varepsilon_l \quad \cdots\cdots(4)$$

(2) 現地での片持梁試験

実際のヤング率 E や曲げ強度 σ_f を求めるのに，現地氷盤での片持梁試験 (通常 Key Method と呼ばれる) を行った．これは図—4に示すように，まず実際の氷盤



SCHEMATIC OF IN SITU CANTILEVER BEAM AND TEST APPARATUS

図—4

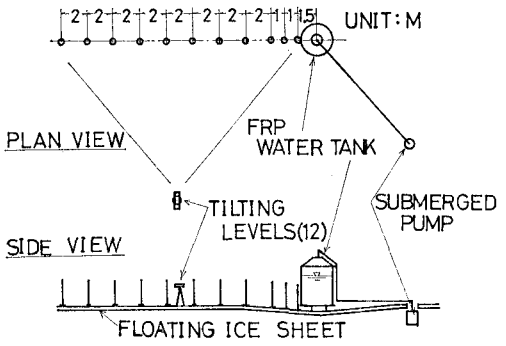
からコの字形に海氷を切り取り，片持梁を造る．この梁の先端に載荷装置により鉛直上向あるいは下向に力を加える事により氷盤の下面部あるいは表面部の曲げ強度あるいはヤング率を求める事ができる．この載荷装置は荷重速度，変位速度を無段変速プーリーとプーリーの組合により広範に変える事ができる．また荷重の測定には荷重変換器を用い，梁の撓みの測定には，撓の先端で，歪ゲージ付ダイヤルゲージで測定した．片持梁の大きさは，長さ約 200 cm，幅約 30 cm，氷厚は 30 cm であった．

(3) 単純桁による試験

この試験は，高さ 10 cm，幅 10 cm，長さ 50 cm の桁を作製し，三等分点載荷法により荷重と撓み量から曲げ強度とヤング率を求めた．試験装置，方法については参考文献を見て戴きたい[1]．また氷温が強度に影響を与えるので，できるだけ実際の氷盤の温度に近い氷温で試験を行った．また試験時のスパン長は 40 cm なので，これを 100 cm の桁の値に換算しなおした．また実際の氷盤の鉛直氷温分布から求めた氷温は $T=-1.7$°C だったので，本実験の結果も $T=-1.7$°C に換算した．

(4) 無限氷盤の耐荷力試験

これは，無限氷盤と仮定できる大きな氷盤上に荷重をかけた時の氷盤の撓み量を測定する事により，氷盤の撓みの理論を用いる事により，実測の撓み量との比較から氷盤の平均のヤング率を求める事ができる．また試験で得たポアソン比 ν と撓みから求めたヤング率と氷盤の耐荷力 P_{cr} から氷盤の平均の曲げ強度も求める事ができる．実験の方法は図—5に示すように，荷重は，FRP



図—5

のタンクに水中ポンプにより海水を入れる事により適当に選ぶ事ができる．まず氷盤上に直接，鋼製の載荷台 (直径 100 cm) を載せ，その上に FRP のタンクを載せる．撓みの測定点は載荷中心点及び半径方向に 11 点で中心から，1.5, 2.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5, 11.5, 13.5, 15.5, 17.5, 19.5 m の地点で，その点に標尺を立てて，レベルにより撓み量を測定する．読取り精度は ±0.5 mm である．最初の氷盤のクラック (放射状クラック) の確認は，タンク近くで音と氷盤の振動から判定した．

3. ポアソン比測定結果について

海氷のポアソン比の測定例のほとんどが動的方法であるが，我々は静的な方法で求めた．測定の結果を表—1に示す．今回の耐荷力試験，片持梁試験の氷盤の平均氷温は $T=-1.7$°C なので，その氷温に近いデータのみを示した．平均のポアソン比は $\nu=0.100$ であった．今までの測定例では，Oliver 等[2]が北極での Pack Ice で地震法により $\nu=0.32\sim0.37$ の値を得ているし，Peshansky[2] も同様の測定法により，北氷洋の海氷から 0.29 の値を得ている．また，Weeks[3] 等は過去の海氷盤について得られた動的方法により得られたポアソン比の結果を表にしているが，それらの値も $\nu=0.25\sim0.38$ となっているがこの理由を挙げると

① 我々の用いたオホーツク海の海氷は密度が $\rho=0.85\sim0.90$ gr/cm³ と小さく，中にかなりの気泡を含んでいる事，

② 田畑等[2]も指摘しているように，海氷においては，

表—1 Poisson's Ratio of Sea Ice

Test No.	ρ (gr/cm³)	T (°C)	σ_c (kg/cm²)	Δl (mm)	ε_l ×10⁻³	ε_1 ×10⁻⁴	ε_2 ×10⁻⁴	ε_3 ×10⁻⁴	ε_t ×10⁻⁴	$\nu=\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$
5	0.895	−1.0	14.81	1.04	5.2	4.0	5.6	2.8	4.1	0.079
6	0.852	−1.1	16.46	0.96	4.8	3.3	4.5	2.6	3.5	0.073
7	0.862	−1.4	13.54	0.88	4.4	4.8	6.7	2.1	4.5	0.102
80	0.887	−1.5	15.20	1.20	6.0	1.7	5.8	4.5	4.0	0.067
81	0.893	−2.0	20.10	0.52	2.6	2.9	4.0	2.3	3.1	0.119
82	0.894	−2.0	22.30	1.52	7.6	9.6	11.3	7.1	9.3	0.122
83	0.893	−1.8	15.10	1.28	6.4	4.2	19.3	2.8	8.8	0.138
	$T=-1.54$°C　$\sigma_c=16.8$ kg/cm²　$\nu=0.100$									

ヤング率やポアソン比等は動的方法で求めた値が静的方法 (Key Method 等) で求めた値より数倍以上大きい値を示す事があり，それは，動的方法は振動を利用していて，氷にかかる応力が極めて小さい事による．等が考えられる．以上の事から氷盤の耐荷力等を求める場合には静的ポアソン比を用いるのが適当と思われる．

4. 現地での片持梁試験結果について

実際の氷盤の曲げ強度，ヤング率を求めるためには，今まで片持梁試験が行われてきた．本研究においても上向，下向の荷重方向に対して，各々5ケースの実験を行ったが，ここでは無限氷盤から得られる値との比較の都合上，上向荷重の結果について述べる．この試験中の氷温は表面から 2 cm, 10 cm, 18 cm, 25 cm の各点でそれぞれ −1.8, −1.7, −1.7, −1.6°C であり，平均して $T=-1.7$°C であった．無限盤での耐荷力試験の荷重速度が $\dot{\sigma}_f=0.02\sim0.04$ kg/cm²·s であるから，この試験においては $\dot{\sigma}_f\fallingdotseq0.03$ kg/cm²·s で試験を行った．結果を表—2 に示す．荷重速度は $\dot{\sigma}_f=0.028\sim0.038$ kg/cm²·s

表—2 Test Results by Means of Key Method

Test No.	Load P (kg)	Length l (cm)	Width b (cm)	Thickness h (cm)	Deflection				
					σ_f (kg/cm)	$\dot{\sigma}_f$ (kg/cm·s)	δ (cm)	E (kg/cm)	T (°C)
1	53.71	194	30.0	30.9	2.18	0.028	0.203	8 730	−1.7
2	59.52	200	29.5	30.2	2.66	0.034	0.247	9 490	−1.7
3	66.93	196	30.0	30.3	2.86	0.033	0.266	9 081	−1.7
4	81.56	198	30.0	30.4	3.50	0.035	0.325	9 245	−1.7
5	89.38	199	30.5	30.4	3.79	0.038	0.352	9 341	−1.7
	Load Direction……Upward　$\bar{\sigma}_f=2.995$ kg/cm²　$\bar{E}=9\,177$ kg/cm²								

で，平均の曲げ強度は $\sigma_f=2.995$ kg/cm²，平均のヤング率は $E=9\,177$ kg/cm² となった．この値は，田畑等が紋別港で得た値と比較的よく一致している．

5. 単純桁試験の結果について

図—1 のC点から採取した海氷より矩形断面の桁をつくり3等分点載荷試験を行った．我々は，曲げ強度と供試体の寸法効果，荷重速度効果それに氷温効果の関係を得ているので，今回の実験結果から，桁長 100 cm，幅，高さともに 10 cm の桁で，荷重速度を $\dot{\sigma}_f=0.03$ kg/cm²·s それに氷温 $T=-1.7$°C に換算したものを求めた．表—3 の σ_f^* は実際の実験値，σ_f は換算したものである．またヤング率については，データの分散が大きく，そのままの値である．試験結果にバラツキが大きいが平均すると $\sigma_f=3.357$ kg/cm²，$E=11\,739$ kg/cm² となる．

表—3 Results of Simple Beam Test

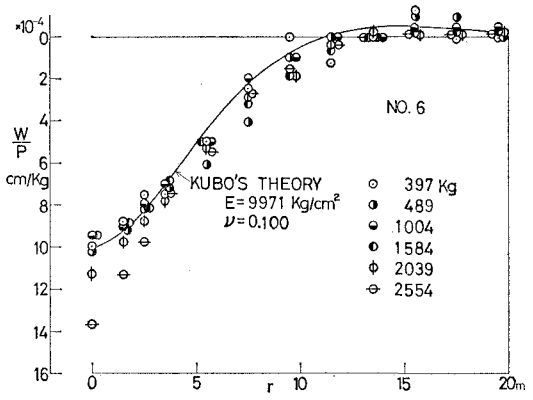
Test No.	T (°C)	ρ (gr/cm³)	$\dot{\sigma}_f$ (kg/cm²·s)	σ_f^* (kg/cm²)	E (kg/cm²)	σ_f (kg/cm²)
31	−1.8	0.88	55.17	3.31	9 943	3.81
32	−1.7	0.88	40.97	2.95	8 385	3.41
33	−1.5	0.88	48.17	2.89	11 062	3.64
35	−1.8	0.88	28.29	2.97	9 916	3.19
36	−2.0	0.88	22.49	4.16	14 582	4.05
37	−2.0	0.88	30.50	3.66	13 900	3.81
38	−2.0	0.88	12.19	3.29	10 549	2.90
40	−1.9	0.88	13.34	3.87	12 938	3.54
44	−1.9	0.88	1.88	4.35	14 200	3.22
49	−1.6	0.88	0.28	3.44	10 954	2.82
50	−1.9	0.88	0.165	3.42	12 701	2.57
		$\bar{\sigma}_f=3.357$ kg/cm²　$\bar{E}=11\,739$ kg/cm²				

6. 氷盤の耐荷力試験結果について

本実験を行った目的は，オホーツク海の氷盤の耐荷力を調べるとともに，海氷盤の平均的なヤング率，曲げ強度を求めるためである．

(1) 無限水盤の撓みとヤング率

実験は7つのケースについて行った．撓みの測定結果の一例を図—6 に示す．本来 r (載荷中心からの距離) が非常に大きくなると，上向に撓むのであるが本実験ではそのような事は起こっていないが，これは r が大きくなると撓み量 W が小さくなり，今回の測定精度では無理なためと思われる．また，この図から荷重 P がある範囲以下なら，久保の求めた理論撓み曲線に一致し，ある荷重範囲を越えると理論曲線から離れてくる．これをより明確にするた



図—6

ある事から図—7より，$0<P\leqq P_{cr}$ の範囲では氷盤は完全な弾性体と考えてよい．また初期クラックが入ると遡性変形の影響が出てくる．図—7で示される，載荷点の撓み W_0 と P より (5),(6) 式より氷盤のヤング率を求めたものが表—4である．W_0/P は図—7の勾配より求め，ポアソン比は我々の得た $\nu=0.100$ を用いる．載荷半径は $a=50$ cm である．集中荷重で計算された E と分布荷重で計算されたものの差は小さく，分布荷重で計算された E が数％小さい値を示す．我々が Key Method で求めたヤング率とそれに対応する氷上での載荷試験 No. 5, 6, 7 のヤング率（分布荷重の場合の）とを比較すると，この試験で得られる平均のヤング率は $E=9\,258$ kg/cm² で Key Method で得られたヤング率と非常に近い値を示す．この事は片持梁試験で得られるヤング率は海氷盤の平均的ヤング率を示す事を意味している．

めに，載荷中心 ($r=0$) の撓み W_0 と荷重 P の関係を示したものの一例が図—7である．ある荷重範囲までは P と W_0 の間には直線関係があり，P がそれを越えると，前の直線からはずれていく．図中の×印は初期クラックの発生点であり，その時の荷重が耐荷力 P_{cr} となる．つまり $P<P_{cr}$ の範囲では弾性理論が適用できる事を意味している．久保[4]の理論によれば，集中荷重の場合の撓み式は (5) 式，半径 a の円に分布する時の撓み式は (6) 式で示される．

$$W_0=P/8\cdot(\gamma D)^{1/4} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$W_0=(1+C_1)P/\gamma\cdot\pi\cdot a^2 \quad \cdots\cdots(6)$$

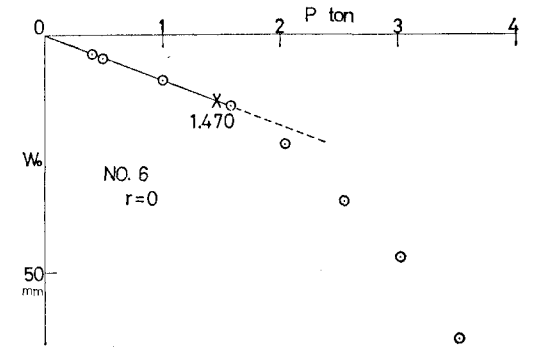
上式において γ は海水の単位体積重量で a は載荷半径，D は曲げ剛度で次式で示される．

$$D=Eh^3/12\cdot(1-\nu^2)=K\cdot h^3 \quad \cdots\cdots(7)$$

C_1 は (a/l) の関数で，l は次式で表わされる．

$$l=(D/\gamma)^{1/4}$$

(5),(6) 式は弾性理論に基づいているが，両式とも γ, a, h, E それに ν が与えられれば P と W_0 は直線関係に



図—7

表—4　Calculated Elastic Modulus E of Floating Sea Ice

Test No.	Type of Ice	h (cm)	$\frac{W_0}{P}\times10^{-4}$ (cm/kg)	ν=0.100 Concentrated Load K (kg/cm²)	ν=0.100 Concentrated Load E (kg/cm²)	ν=0.100 Distributed Load α	ν=0.100 Distributed Load K (kg/cm²)	ν=0.100 Distributed Load E (kg/cm²)
1	granular ice	30	13.25	320.03	3 802	0.1663	311.73	3 703
2	granular ice	35	9.72	374.34	4 447	0.1422	367.21	4 362
3	granular ice	27	12.71	477.24	5 670	0.1628	465.60	5 531
4	granular ice	28	14.25	340.31	4 043	0.1722	333.51	3 962
5	mosaic ice	27	10.56	691.66	8 217	0.1482	678.01	8 055*
6	mosaic ice	27	9.50	893.97	10 620	0.1405	839.31	9 971*
7	mosaic ice	27	9.60	836.27	9 935	0.1413	820.46	9 747*

* $\bar{E}=9\,258$ kg/cm²

（2）無限氷盤の耐荷力

久保[4]の求めた無限氷盤の分布荷重の場合の耐荷力 P_{cr} は次式で示される．

$$P_{cr}=\frac{1}{3}\frac{\pi}{1+\nu}\cdot\frac{\alpha^2}{C_2}\cdot\sigma_f\cdot h^2 \quad \cdots\cdots(9)$$

ここで，$\alpha=(a/l)$ で C_2 は α のみの関数である．撓みから得られたヤング率 E を用い，$\nu=0.100$ とし，P_{cr}

表—5　Calculated Flexural Strength of Floating Sea Ice

Distributed Load　$\nu=0.100$

Test No.	h (cm)	α	C_2	P_{cr} (kg)	σ_f (kg/cm²)
1	30	0.1663	0.03331	1 590	2.235
2	35	0.1422	0.02591	1 600	1.758
3	27	0.1628	0.03222	1 600	2.803
4	28	0.1722	0.03521	2 200	3.490
5	27	0.1482	0.02770	1 410	2.562*
6	27	0.1505	0.02541	1 470	2.727*
7	27	0.1413	0.02565	1 580	2.925*

* $\sigma_f=2.738$ kg/cm²

と h には実測値を用いると (9) 式より氷盤の σ_f を計算する事ができ，その結果を**表—5**に示す．片持梁試験に対応する No. 5, 6, 7 の平均の曲げ強度は $\sigma_f=2.738$ kg/cm² で，片持梁試験より得られる σ_f より小さめの値を示す．これは，片持梁試験が桁の基部で強制的に破壊させられるのに対して，耐荷試験では，載荷部の一番強度の弱い所から破壊する事と曲げ以外の力も作用しているためと思われる．また単純桁による実験値と片持梁試験から得らた値を用いて (9) 式で耐荷力を計算すると前者では 1 780 kg 後者では 1 620 kg となり，No. 5, 6, 7 の P_{cr} より大きめの値を示すが，片持梁で得られた値の方がより近い値を示す．

参考文献

1) Saeki, H., T. Nomura and A. Ozaki: Experimental study on the testing methods of strenth and mechanical properties for sea ice, Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, pp. 135～151, 1978.
2) 田畑忠司: 海氷の力学的性質の研究 II, Low Temperature Science, Ser. A. 17, pp. 147～164, 1958.
3) Weeks, W. and A. Assur: Mechanical properties of sea ice, C.R.R.E.L. Rep., pp. 45～53, Sept. 1967.
4) 久保義光: 自然結氷板の耐荷力について，雪氷，Vol. 20, No. 3, No. 4, 1958.