



Title	海氷の力学的性質の研究 IX : 現場における曲げ強度の測定 (3)
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi
Citation	低温科学. 物理篇, 24, 259-268
Issue Date	1966-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18048
Type	departmental bulletin paper
File Information	24_p259-268.pdf



海水の力学的性質の研究 IX*

現場における曲げ強度の測定 (3)

田 畑 忠 司

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和40年11月受理)

I. ま え が き

筆者は1963, 64年の各2月に, Key-method を用いて北海道紋別港内の海水の曲げ強度を測定した。その結果, 厚さ23~26 cm, 塩素量4~7%, 表面温度 $-3.7\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ の海水の曲げ強度は $1.1\sim 5\text{ kg/cm}^2$ であることがわかった¹⁾²⁾。更に海水の曲げ強度は, 梁の支持端でその表面に加わる最大引張り応力の増加速度を大きくすると海水の曲げの弾性率が增大するので, その結果として, 曲げ強度も大きくなることを指摘した。更に, -1.5°C の温度であっても, 応力の増加速度が $1\text{ kg/cm}^2\cdot\text{sec}$ 以上であれば, 梁は一見弾性的に変位しつつ破壊にいたることも確かめられた。

1965年2月18~22日の間に同じく紋別港内で Key-method を用いて曲げ強度を測定した。測定は前2年と同じく, 応力の増加速度を変化させながら行なったが, 特に応力の増加速度が小さい場合の測定に重点をおいた。測定に際しては, 加重時の梁の先端に加わる力および着力点での梁の曲げの加速度も記録した。この加速度の値を積分して梁の先端の変位を求めて曲げの弾性率も求めたので, それらの結果について報告する。

II. 測定方法

測定時には港内に厚さ約24 cmの平坦な海水が張りつめていた。ただし, 測定開始前2月15日頃に猛吹雪を伴った多量の降雪があった。このために, この氷には雪に海水が滲透して再凍結した粒状氷の部分が約20 mもあった。しかも表面から約5 cmぐらゐの厚さは非常に軟らかかった。そのため, 測定は, この軟弱な部分をとりぞいて行なった。

用いた方法は Key-method で, 梁の幅, 長さはそれぞれ20~30 cm, 120~210 cmで, 厚さは19~22 cmであった。測定は, 38本の梁について行ない, このうち13本の梁については先端に鉛直下向きの力を加えて曲げ破壊をおこさせ, のこりのものは鉛直上向きに力を加えた。梁には簡単な挺子を利用し, 更に電気荷重計を介して人力で力を加えた。また, 梁の先端

* 北海道大学低温科学研究所 業績第771号

の着力点附近に加速度計を載せておき、電気荷重計と加速度計の出力を電磁オシログラフに記録させ乍ら測定を行なったことも前年度と全く同様である。

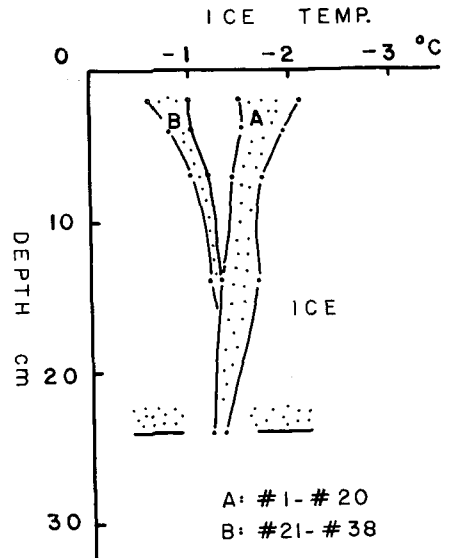
梁の先端に力を加える速さは、ひとつの梁については破壊するまでできるだけ等しくなるようにし、梁がかわるたびにこの速さを変えるように心掛けた。結局梁の支持端の表面における最大引張り応力の増加速度は $0.1 \sim 26 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であった。

測定地点の近くの海水に 2, 4, 7, 14, 24 cm の深さに熱電対を埋設しておき、氷の温度を記録させた。

III. 測定結果

1. 氷の温度

周知のように海水の強度はそれ自身の温度に対する依存度が大きい。測定を行なった期間中の氷の温度の垂直分布を第1図に示した。図中の A の領域は 18 日から 20 までのあいだの最高および最低の温度分布であり、この間に No. 1~20 の測定を行なった。表面近くでの温度の振幅は 0.7°C にすぎなかったため、No. 1~20 の測定は同一の温度条件下で行なわれたものと見做すことにした。22 日にのこりの No. 21~38 の測定を行なったのであるが、この日は気温が高く、且つ日射も強かったため表面温度は -1°C よりも高くなった。図中の B はこの時の温度の振幅を示している。10 cm 以下の部分の氷の温度は殆んど変化していないが、表面近くの部分の温度は前記 A 群よりはるかに高い。海水では -1°C よりも高い温度では海水中のブラインの量が急速に増す結果として、強度が著しく減少することが知られている³⁾。そのため、この B 群に属する No. 21~38 の測定を前記 A 群に属する No. 1~20 とは異なった温度条件下で行なわれた測定と見做すことにした。



第1図 測定期間中の海水の温度の垂直分布

2. 塩素量

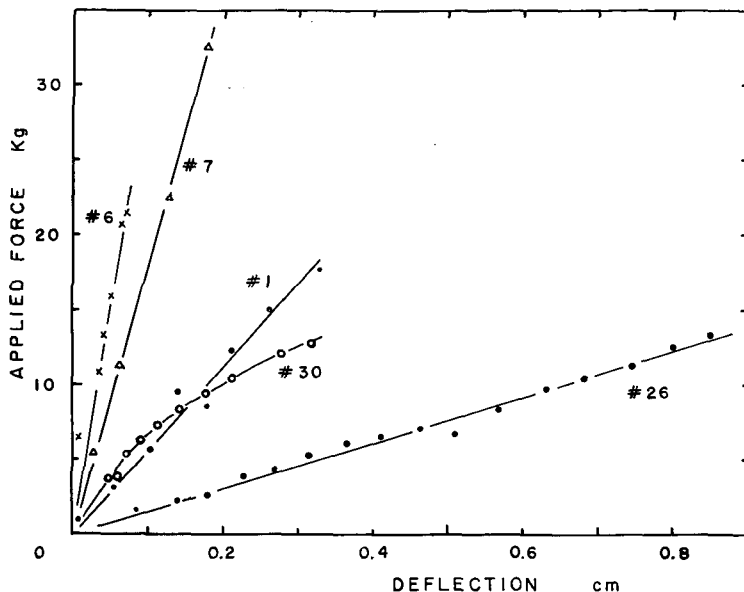
測定された海水の塩素量は小野⁴⁾によって求められたが、表面から 24 cm の深さまでの毎 2 cm ごとの各層の塩素量はそれぞれ、3.1, 2.0, 2.0, 1.9, 2.2, 2.8, 2.5, 2.2, 2.2, 2.1, 2.0, 1.7% であった。これらの値は、1963, 64 年冬のそれよりも小さい。

3. 梁の沈下量

梁の先端の加重点の近くに梁の先端の上下方向の加速度を測るための加速度計を設置し、得られた加速度の値を積分して梁の先端の変位を求めた。ただし、加速度計の性能上の問題の

ために、力をゆっくり加えたときには加速度を正確に求めることができなかった。このため、38 測定中、加速度、したがって変位を求め得たのは 14 例にとどまった。測定された破壊の瞬間の梁の先端の沈下量は 0.06~0.84 cm であった。

第 2 図には梁の先端に加えた力と、加速度から求めた梁の先端の変位との関係を示した。



第 2 図 海水の梁の先端に加えた力と沈下量の関係

図中の No. 1, 6, 7, は氷の表面温度が -1.5°C 以下すなわち第 1 図の A 群に属し, No. 26 と No. 30 は第 1 図中の B 群すなわち表面温度が -1°C 以上の場合の測定である。No. 30 をのぞく他のものは、すでに 1965 年に報告²⁾したものと全く同様に、加えた力の増加に比例して変位が増大しつつ、すなわち弾性的に弯曲して、終に破壊にいたっていることが明らかである。A 群に属する他の 7 個の測定例についても同様に加えた力と変位は直線的に比例していた。このようなときには、図の直線の傾斜から海水の曲げ弾性率を求めることができる。

温度が -1.0°C よりも高かったときに行なった No. 21~38 の測定のうちで、梁の先端の変位を求めることができたのは 4 例であった。これらのうちの 3 例では第 2 図中の No. 30 の如く、梁は塑性的に変形して破壊にいたっている。ただひとつ、No. 26 のみが弾性的に変形しつつ破壊しているが、これはのちにのべる如く、注目すべき異例の結果であるとおもわれる。

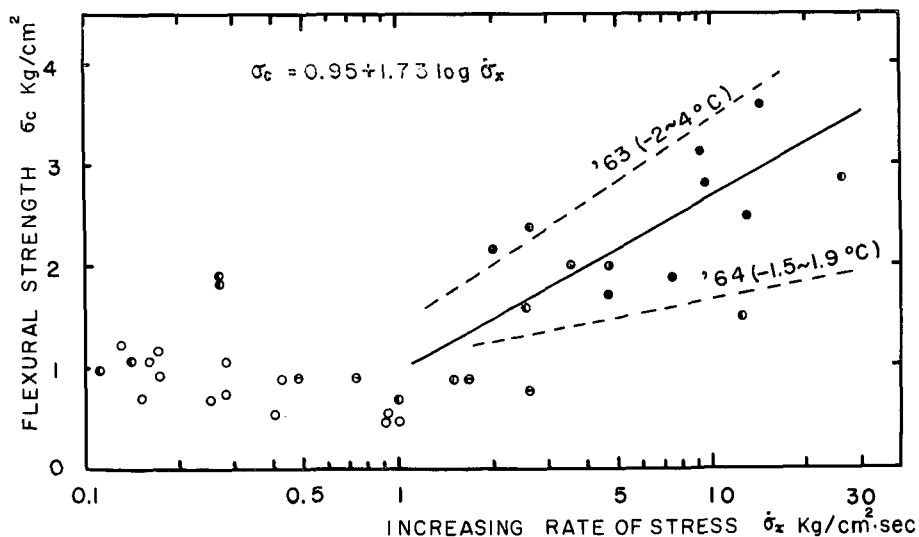
4. 曲げ強度

海水の片持梁のほとんど全部は、その支持端のところで支持面に沿って折れた。それゆえこの場合には支持点における梁の表面で最大の値に達している長さ方向の引張り応力 σ_x のために破断したと考えることができる。 σ_x の破壊の瞬間の値 σ_b 、すなわち曲げ強度は

第1表 海水の曲げ強度，弾性率の測定結果

No.	曲げ強度 σ_c kg/cm ²	$\dot{\sigma}_x$ kg/cm ² ·sec	ヤング率 E ×10 ⁹ C.G.S.	表面温度 —°C	No.	曲げ強度 σ_c kg/cm ²	$\dot{\sigma}_x$ kg/cm ² ·sec	ヤング率 E ×10 ⁹ C.G.S.	表面温度 —°C
1*	3.1	9.3	15.3	1.1	19	0.9	0.015	—	1.7
2*	3.6	14.9	16.1	1.1	20	0.7	0.15	—	1.7
3*	1.6	2.5	—	1.3	21	1.2	0.13	—	0.9
4*	2.0	4.6	10.6	2.1	22	1.1	0.16	—	0.8
5*	2.0	3.6	8.2	2.1	23	1.2	0.17	—	0.7
6*	1.7	4.6	18.8	2.0	24	0.9	0.17	—	0.6
7	2.5	12.9	10.4	1.9	25	1.0	0.28	—	0.6
8	2.8	9.7	15.6	1.9	26	0.9	0.47	0.6	0.6
9	2.4	2.6	8.0	1.8	27	0.7	0.28	—	0.7
10	2.9	26.2	—	1.8	28	0.9	0.42	—	0.7
11	1.9	7.4	11.2	2.1	29	0.9	1.7	3.6	0.7
12	2.2	2.0	9.6	2.0	30	0.9	0.72	3.2	0.8
13	1.1	0.15以下	—	1.9	31	0.8	2.6	2.8	0.8
14	1.8	0.27	—	1.9	32*	0.5	1.0	—	0.8
15	1.9	0.28	—	1.8	33*	0.5	0.40	—	0.9
16	1.5	12.3	—	1.7	34*	0.7	0.25	—	0.9
17	0.7	1.0	—	1.7	37*	0.5	0.92	—	1.0
18	1.0	0.11	—	1.7	38*	0.5	0.93	—	1.0

註 *：梁の先端を押し下げて破壊させた試料。他のものは上に持ち上げて破壊させた。



第3図 曲げ強度と梁の支持端の表面における引張り応力の増加速度との関係。●は第1図のA群中で梁の先端の沈下量が測定されたもの。●は同群であるが沈下量が測定されなかったもの。○はB群で○はそのうちで沈下量が測定されたもの

$$\sigma_c = \frac{6Fl}{bh^2} \quad (1)$$

で求められる。 F は破壊の瞬間に梁の先端に加わった力、 l は長さ、 b 、 h はそれぞれ梁の幅と厚さである。

38本の梁について得られた曲げ強度 σ_c 、 σ_x の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ 、前項の方法で求めた曲げの弾性率を第1表に示した。また第3図に、 $\dot{\sigma}_x$ と σ_c の関係を示してある。

第3図には測定時の表面の氷の温度が -1.5°C 以下であったNo.1~20の測定結果と、 -1.0°C 以上であったNo.21~38の結果とを記号を変えて示してある。また曲げ弾性率が得られた測定も記号を変えて示してある。更に1963年、64年に全く同様の方法で求めた結果の平均的傾向を破線で、及びそれらのときの氷の表面温度も示してある。梁の先端に鉛直下向きに力を加えたものが13例あった。しかしこの場合の結果と、鉛直上向きに力を加えたときに得られた結果とは、63、64年度の場合と同様に、明らかな差が認められなかった。それゆえ図ではこの両者を区別しないで取扱っている。

図から、氷の表面温度が -1.5°C 以下であったA群では $\dot{\sigma}_x$ の増加に伴って曲げ強度 σ_c が大きくなる傾向があることがわかる。この傾向は特に $\dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のときに著しい。しかもこの条件下で測定されたA群の梁の大部分は、図に示したように変位が測定されており、弾性的に弯曲しつつ破壊にまでいたっていることが確かめられている。

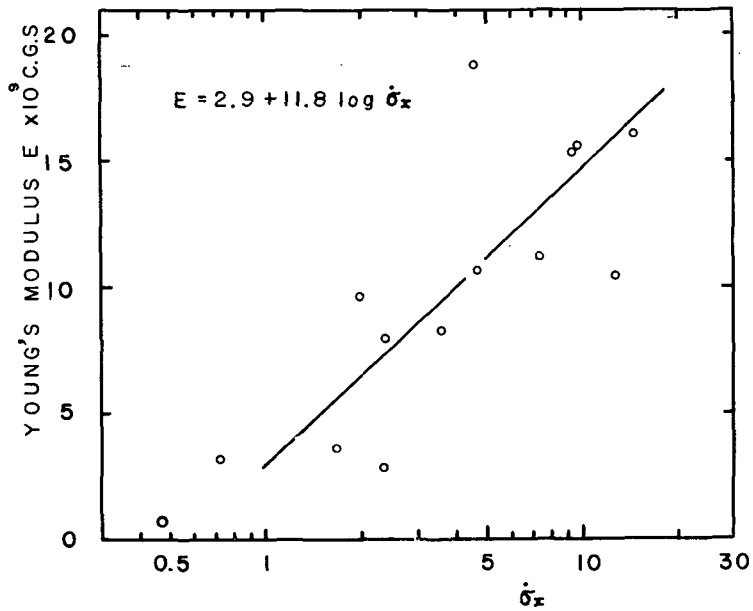
1964年の同様の測定で、表面温度が $-1.5 \sim -2.0^\circ\text{C}$ のときには、 $\dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であれば、梁は弾性的に変形破壊することおよび、 $\dot{\sigma}_x$ が大きくなると曲げ強度も大きくなることが確かめられている。このたびの測定でも全く同じ結果が得られたのである。

ただし、 $0.3 > \dot{\sigma}_x > 0.1$ のあいだにあるA群に属する梁については加速度の測定に失敗したが、以下にのべるように、塑性的に弯曲したものと考えられる。

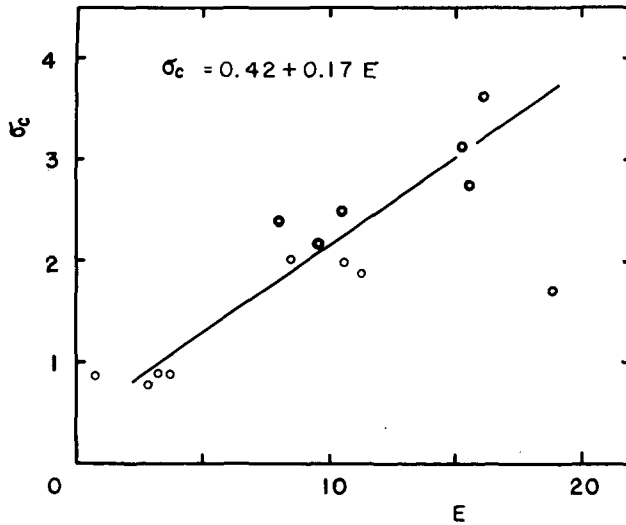
同じく第3図中の氷の表面温度が -1.0°C よりも高かったB群では、 $\dot{\sigma}_x$ に殆んど無関係に破壊強度 σ_c はほぼ一定の値を示していることがわかる。このうちで $\dot{\sigma}_x$ が $0.7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 以上の3例では、すでにのべたように、梁は塑性的に変形破壊したことが確かめられている。それにも拘わらず、 $\dot{\sigma}_x = 0.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の一例(No.26)のみが第2図に示したように弾性的に弯曲破壊しているのが注目される。ある物質に一定の力を加える際に、力の増加速度を小さくして長時間にわたって力を加えつづけるほど塑性変形をおこしやすいことは周知のことである。氷は特に塑性的な性質が著しく、僅か 10 g/cm^2 の圧力によっても塑性変形をおこすことが知られている⁵⁾。しかも温度が高いほどこの性質は著しい。ところで、氷の温度が -1.0°C 以上であったB群のうちでは $\dot{\sigma}_x$ がもっとも大きかった3例の場合に氷の梁が塑性的に変形していた。それゆえ、これらよりも $\dot{\sigma}_x$ が小さかった他の場合にも、加速度を測定できなかったが、梁は塑性変形をしていたと考えるのが妥当であろう。 $\dot{\sigma}_x$ が僅か $0.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ にすぎないNo.26の測定においてのみ梁が弾性的に変形した理由は良くわからないが、何等かの異常な原因による特例ではないかとおもわれる。 $0.1 < \dot{\sigma}_x < 0.3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のあいだにあるA群に属する4例の測定例については、B群のものよりも温度がやや低いが $\dot{\sigma}_x$ が著しく小さいの

で恐らくは B 群と同様に、塑性的に弯曲したであろうと考えられるのである。

以上のことをとりまとめて次のように結論することができる。氷の温度が $-1.5 \sim -2.2^\circ\text{C}$ のときには、応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ が $1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ よりも大きいときには、梁はほぼ弾性的に弯曲しつつ破壊する。このときに曲げ強度は $1 \sim \text{数 kg/cm}^2$ で、 $\dot{\sigma}_x$ が大きくなると増加する傾向がある。氷の温度が -1.0°C 以上のときには $\dot{\sigma}_x < 3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ならば氷は塑性的に変形して破壊にいたり、破壊強度はほぼ一定の大きさ $0.5 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$ である。



第4図 最大応力の増加速度とヤング率の関係



第5図 海水の曲げ強度とヤング率の関係

5. 曲げ強度に影響する要因

第1図の直線の傾斜は曲げの弾性率に比例していることと、第3図の結果から、 $\dot{\sigma}_x$ が大きいほど曲げの弾性率が大きいことが予想される。第4図は加速度を積分して求めた梁の先端の沈下量と加えた力との関係を示している第2図の直線の傾斜から求めた曲げ弾性率 E と $\dot{\sigma}_x$ の関係を示したものである。弾性率は $(1\sim 16)\times 10^9$ C.G.S. の範囲にあり、しかも明らかに $\dot{\sigma}_x$ の増大に伴って大きくなっていることがわかる。この傾向は昨年度に得られた結果と良く一致しているが、今年の場合には弾性率の絶対値がいくらか大きい。

弾性率と得られた曲げ強度 σ_0 の関係は第5図に示したとおりで、弾性率が大きい場合には曲げ強度が大きいことは明らかである。

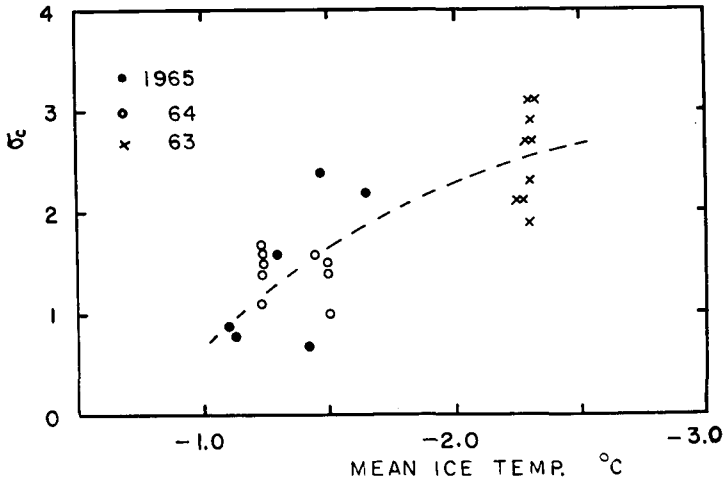
異なった弾性率の物質相互の破壊強度を比較すると、一般には弾性率の大きな物質の破壊強度が弾性率の小さな物質のそれよりも大きいことが知られている。

第3, 4, 5図の関係から、 $\dot{\sigma}_x$ が大きくなると σ_0 が大きくなるのは、 $\dot{\sigma}_x$ が大きくなると弾性率が大きくなり、それに伴って曲げ強度が増大するものと推察される。

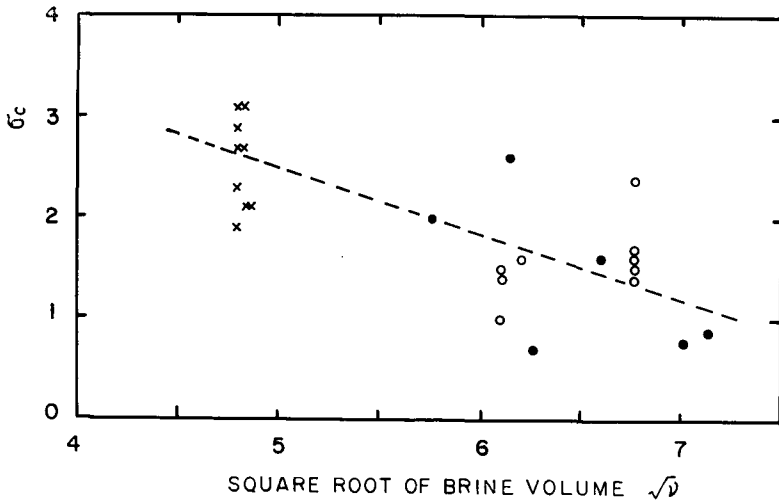
第4図と第5図に示した弾性率の値は、1964年2月に同じく紋別港内の海水で得た値よりは大きい。第3図中に示した海水の曲げ強度が、 $\dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のときに、1964年度の値(破線)よりも大きい傾向を示しているのも、弾性率のちがいによるものであろう。海水の弾性率はそれに加える応力の増加速度のほかに温度、塩素量、内部構造に依存する。前年と今年の海水を比較してみると、海水の温度と塩素量はあまり違っていない。それゆえ、このちがいは主として海水の内部構造のちがいによるものと考えられる。1964年の測定時の海水は約23cmの厚さで、このうち表面から6cm近くは、海水上の積雪の重量のために氷全体が沈降してこの雪に海水がしみだして凍結した、いわゆる、粒状構造の水であった。この下約17cmが海水に固有のモザイク構造をしていた。これに対して今年は、厚さ約24cmの海水のうち表面から約20cmが上記の粒状構造の水で、粒状氷の部分が前年の海水のそれよりも遙かに多かった。

海水の内部構造の違いによる力学的性質の相違はあまり研究されていないが田畑の研究によると⁹⁾、粒状構造の海水の弾性率は、 $-3\sim -50^\circ\text{C}$ の範囲では、同じ密度のモザイク状構造の海水のそれよりもいくらか大きい。このことから、応力の増加速度が同じときに、1965年度の海水の弾性率が1964年に測定された値よりも大きいのは、前者の海水中に占める粒状構造水の部分が著しく多かったことによるものであるとおもわれる。

内部構造と、温度、塩素量がほぼひとしい場合には、海水の曲げ強度は応力の増加速度の関数であることは1963~1965年の3冬にわたる測定で明らかになった。もし、他の条件が同じであれば、海水の曲げ強度が温度の関数であることは、Weeks と Anderson⁷⁾, Assur³⁾ 等の研究によって明らかである。第6図に3冬にわたる測定結果のうち、応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ が $1\sim 3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の場合の曲げ強度と氷の平均温度との関係を示した。3冬の海水がそれぞれ内部構造がちがひ、しかも塩素量も多少異なるために点が可成りバラついてはいるが、温度が高くなると曲げ強度が急激に減少することは明らかである。



第6図 最大応力の増加速度 $3 > \dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のときの曲げ強度と海水の平均温度の関係



第7図 最大応力の増加速度 $3 > \dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のときのブラインの体積比の平方根と曲げ強度の関係

前記 Assur は海水の曲げ強度は海水中のブラインの体積比の平方根に比例すると報告している。第7図は、第6図に用いた資料の温度と塩素量及び Assur の表を用いて求めた海水中のブラインの体積の千分比の平方根と曲げ強度との関係を示したものである。図では点のバラつきが可成り大きいですが、Assur の結論を肯定しているようにもおもわれる。

V. 結 語

前2冬に引き続き、現場の海水の曲げ強度を Key-method を用いて測定した。測定時の氷の厚さは約 24 cm, 温度は $-0.5 \sim -2.2^\circ\text{C}$, 塩素量は $1.7 \sim 3.1\%$ であった。測定に際しては加

重時の氷の梁の先端の加速度も測定し、その結果から梁の沈下量も求めた。それらの結果次のことがわかった。

1) 曲げ強度は $0.5 \sim 3.5 \text{ kg/cm}^2$ であった。氷の表面温度が -1.0°C 以上の場合には、梁の支持端での表面における引張り応力 σ_x の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ が $3.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 以下のときには、 $\dot{\sigma}_x$ に無関係に曲げ強度はほぼ $1 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ であった。表面温度が $-1.5 \sim -2.2^\circ\text{C}$, $\dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のときには、曲げ強度は $\dot{\sigma}_x$ に比例して増大する。

2) $\dot{\sigma}_x > 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ で、氷の温度が -1.5°C 以下のときには梁の先端に加えた力と沈下量は直線的に比例する。この比例関係を用いて求めた弾性率は $(1 \sim 16) \times 10^9 \text{ C.G.S.}$ であった。

3) 曲げ弾性率も $\dot{\sigma}_x$ に比例して増大する。

4) 前年の結果と比較して、他の条件がほぼひとしければ粒状構造の部分が多い海氷は少ないものよりも弾性率が、したがって曲げ強度も大きい。

おわりにのぞみ、現地観測に際しては、紋別漁業協同組合、北海道開発局紋別港修築事業所、紋別市役所の御援助を得たことを厚く感謝いたします。又、測定および資料の整理に際しては低温科学研究所の諸氏の御協力を得たことを付記し謝意を表します。なお加速度の積分には北大計算センターの電気計算機を用いた。

文 献

- 1) 田畑忠司・藤野和夫 1964 海水の力学的性質の研究 VII. 現場における曲げ強度の測定. 低温科学, 物理篇, **22**, 147-154.
- 2) 田畑忠司・藤野和夫 1965 海水の力学的性質の研究 VIII. 現場における曲げ強度の測定 (2). 低温科学, 物理篇, **23**, 157-166.
- 3) Assur, A. 1958 Composition of sea ice and its tensile strength. *In Arctic Sea Ice*, NAS-NRC, U.S.A. 106-138.
- 4) 小野延雄 1966 海水の熱的性質の研究. III. 海水の比熱について. 低温科学, 物理篇, **24**, 249-258.
- 5) Butkovich, T. R. and Landauer, J. K. 1960 Creep of ice at low stresses. *SIPRE Res. Rep.*, **72**, 1-6.
- 6) 田畑忠司 1958 海水の力学的性質の研究 III. 振動法による弾性率の測定 (2). 低温科学, 物理篇, **18**, 115-129.
- 7) Weeks, W. F. and Anderson, D. L. 1958 An experimental study of young sea ice. *Trans. Amer. Geophys. Univ.*, **39**, 641-647.

Summary

A series of cantilever beam test was carried out at Monbetsu-Harbour, which is located in the Okhotsk sea coast of Hokkaido, during the period February 18-20, 1965. The thickness of ice was about 24 cm. The width of the beam was 30-40 cm and the length was 1.5 m. The bending force was applied manually and measured with an electric load cell and recorded with an oscillograph. The vertical acceleration at the free end of the beam was also measured and recorded.

The maximum and minimum values of the temperature profile of the ice were meas-

ured with a series of thermo-couples and are shown in Fig. 1. Observed temperature regime can be classified into two groups, A and B as shown in the figure. Samples No. 21-38 are included in B group and it is recognized that they were tested at extremely high temperature conditions.

The deflection d of a beam was obtained by integrating the acceleration. Summarizing the results for 14 beams, some examples of the relation between d and the applied force are shown in Fig. 2. It was ascertained that each of the 14 beams deflected as an elastic substance, and Young's modulus of sea ice was obtained for each beam.

The flexural strength of a beam σ_c , is obtained by equation (1), where F_c is the force applied to the free end of the beam at failure, l is the length, b is the width, and h is the thickness.

The relation between the obtained flexural strength σ_c and the increasing rate of the maximum tensile stress $\dot{\sigma}_x$ at the surface in the supported end of the beam is seen in Fig. 3. From figures 2 and 3, it is concluded that if $\dot{\sigma}_x$ is larger than $1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ the beam deflects elastically. Most samples of group A were deflected in this high stress rate, and in this case it is obvious that the flexural strength of ice increases with $\dot{\sigma}_x$.

If the surface temperature is higher than -1°C and also if the stress rate $\dot{\sigma}_x$ is less than $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$, it may be said that sea ice beam deflects plastically and the flexural strength has a constant value.

Fig. 4 shows the relation between $\dot{\sigma}_x$ and Young's modulus E . In Fig. 5, σ_c is plotted against E . From these figures, it may be concluded that the flexural strength of sea ice beam increases with increasing rate of tensile stress $\dot{\sigma}_x$ because the Young's modulus increases with $\dot{\sigma}_x$.

Fig. 6 is the relation between σ_c and the mean ice temperature, and Fig. 7 is the relation between σ_c and the square root of relative volume of brine $\sqrt{\nu}$. Flexurel strength σ_c decreases obviously with increasing ice temperature and, as was stated by A. Assur, it may be seen that σ_c decreases in proportion to increasing $\sqrt{\nu}$.