

動弾性係数測定による海水の諸強度の 推定方法に関する研究

佐伯 浩*・小野敏行**・折谷徳弘***

上田俊也***・秋原真哉****

1. 研究の目的

北極海、北オホーツク海等の極寒冷地における石油、天然ガス等の開発のために、氷海域向けの海洋構造物の開発が期待されている。氷海域に建設される海洋構造物の設計においては、その支配外力は氷盤の水平移動に伴う氷力であるが、氷力の算定にあたっては海水の強度及び弾性係数、海水の移動速度、氷厚と氷盤の形態、さらに構造物の断面形状、寸法、壁面角、それに氷盤と構造物の接触条件等が与えられなくてはならない。海水の条件の中で、海水の強度及び弾性係数以外の条件に関しては、現在リモートセンシングの実用化が図られつつあるが、強度や弾性係数の測定方法については未だ適当な方法がない。現在行われている直接試験方法では油圧ポンプ、ジャッキ、計測器等が必要となり、これはかなり重量が大きくなるため、上述した極寒冷地における実測データの不足という状況を招いている。本研究は、現地での移動に便利であり、低コストである小型ヘリコプターに搭載可能な方法（計測器重量合計 250 kgf 以下）で、かつ現場の低温条件下でも迅速に測定を行うことのできる試験方法の開発を目的として、海水の動弾性係数測定から、海水の一軸圧縮強度と、曲げ強度の推定を可能にしようとするものである。

2. 海水の諸強度の測定方法

海水の強度測定方法には、直接破壊試験と非破壊試験とがある。直接試験方法には前述したように現地氷盤から所定の大きさの供試体を作製し、それに対して直接に荷重をかけ、一軸圧縮試験や曲げ強度試験を行う方法と、現位置試験として、片持ち梁試験やポアホール試験があるが、試験機材の重量が大きき試験自体も大がかりな上、電源の確保等も大変である。このような理由により、極寒冷地の氷盤上における現位置試験を行うのは大変な困難を伴うものとなっている。また地震波法といって、氷盤に開けた穴の中でダイナマイトを爆発させ、そ

れによって氷盤を伝わる振動波を数カ所の観測地点で測定することにより諸強度を推定するという方法も存在するが、非常に大がかりでコストもかかるため、より手軽でより多くのデータを採取するという目的に対しては不適である。非破壊試験方法には反撥硬度法、超音波測定法、電磁波法等が存在する。反撥硬度法としては、シュミットハンマーを用いて反撥力により強度を測定する方法があるが、供試体の表面の強度はわかるが、内部の強度が測定できない。また -20°C 以下の低温条件下においては測定値の分散が大きくなるといった欠点がある。また超音波測定法というのは超音波パルスを供試体に発射させ、既知距離間の伝播時間を測定し、音速を求め、その減衰率から強度を判定する方法である。これに関しては、酒井（1984）や佐伯ら（1985）により系統的な研究が行われているが、発信部と受信部の軸を正確に合わせる必要があるため、測定結果の正確さがある程度観測者によって決まること、また海水温度が低く密度の大きな高強度の海水に対しては減衰が生じ難くなるため、強度の測定が出来なくなることなどの欠点が存在する。電磁波法というのは、マイクロ波の反射をコンピュータで解析し、強度を推定するのだが、方法そのものが未だ完成されていない上、マイクロ波の処理には大型のコンピュータが必要のため、現地試験には適しているとは言い難い。佐伯ら（1990）により、動弾性係数測定による一軸圧縮強度の推定に関する有為性が確かめられているが、本研究においては、より系統的に海水の動弾性係数測定による、海水の諸強度と、静的弾性率の推定方法の確率を目指すものである。

3. 研究の内容

実験は -5 、 -10 、 -20°C の 3 温度とし、海水の塩分量は、オホーツク海や、北極海の平均的塩分量に合わせて 4.0‰ 、 6.6‰ の二種類で行った。また、強度試験に際しては、Michel ら（1977）を始めとする数多くの研究で明らかになっている、海水が最大の強度を示す歪速度が $10^{-3}/\text{sec}$ のオーダーで試験を行った。実験の際、供試体の採取方向は、氷の成長方向に対して、垂直と水平の二種類で、それぞれ添え字 V と H をつけ、図中

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

** 北海道大学 工学部土木工学科

*** 学生員 北海道大学大学院 工学研究科

**** 北海道大学大学院 工学研究科

においても、それぞれ、 V と H とした。また直接載荷試験と、動弾性係数測定は同一方向に対して試験を行った。動弾性率の測定には、市販の動弾性係数測定装置を用いた。図-1 は動弾性係数測定装置である。これに供試体を載せ振動させる。この振動の周期を変化させ、共振を生じさせることにより、供試体の一次共振周波数を求め、これより、動弾性係数を算定する。なお、佐伯ら(1990)は前述の動弾性係数測定装置を用いて、直径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒供試体の縦動弾性係数 E_{Dc} を測定し、同じ供試体の一軸圧縮強度 σ_c との関係求めた。それによると、水温、海水中の塩分量、海水の密度に関係なく、動弾性係数 E_{Dc} と一軸圧縮強度 σ_c は一本の曲線で表され、現地における海水の一軸圧縮強度の推定に非常に有効であることを示した。

今回の実験では、一軸圧縮強度 σ_c と縦動弾性係数 E_{Dc} に関する補足実験と、曲げ強度 σ_f と曲げ動弾性係数 E_{Df} に関する実験を行った。

(1) 円筒供試体 (以降添え字 c) について

1990年の実験と同様、直径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒供試体の縦振動の一次共振周波数を測定することにより、縦動弾性率を求めた後、一軸圧縮試験を行う。なお図-2 は一軸圧縮試験機である。供試体の縦歪はダイヤルゲージで、荷重は容量 10 tonf のロードセルで測定した。

(2) 曲げ供試体 (以降添え字 f) について

高さ 10 cm, 幅 10 cm, 長さ 120 cm の桁供試体の曲げ破壊試験を行った後、その破壊された供試体の中から高さ 5 cm, 幅 8 cm, 長さ 35 cm の桁供試体を切り出し、たわみ振動の一次共振周波数を測定することにより、曲げ動弾性率をもとめる。図-3 は曲げ試験機である。供試体の歪はダイヤルゲージで、荷重は容量 200 kgf のロードセルにより測定した。

4. 動弾性係数の求め方

(1) 円筒供試体について

円筒供試体が縦振動をする場合それを弾性体と仮定すると以下の式が成立する。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_D}{\rho}}$$

これをより実用化すると以下ようになる。

$$E_D = C_1 \cdot W \cdot f^2$$

$$C_1 = 0.0408 \times L/A$$

但し、 f : 一次共振周波数 (Hz), E : 動弾性係数 (kg/cm²), ρ : 密度 (kg/cm³), L : 供試体の長さ (cm), W : 供試体の重量 (kgf), A : 供試体の断面積 (cm²) である。

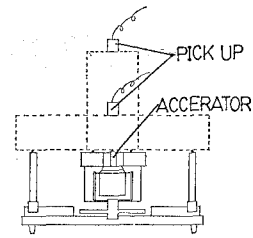


図-1 動弾性係数測定装置

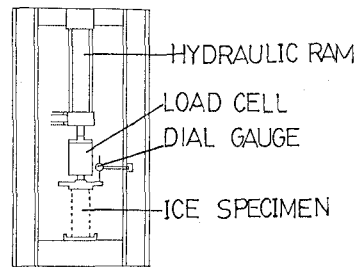


図-2 一軸圧縮試験機

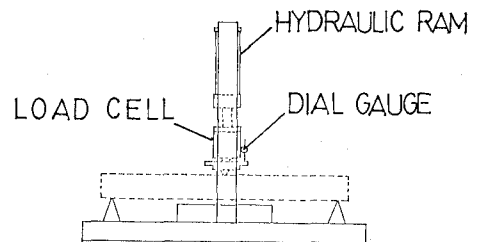


図-3 曲げ試験機

(2) 桁供試体について

桁供試体がたわみ振動をする場合も、これを弾性体と仮定すると、

$$E_D = C_2 \cdot W \cdot f^2$$

$$C_2 = 966 \times 10^{-6} \times L^3 T / b f^3$$

$$T = 1 + 81.79 \left(\frac{K}{L} \right)^2 - \frac{1.314(K/L)^4}{1 + 81.09(K/L)^2} - 125(K/L)^4$$

$$K = h/3.464$$

である。但し、 f : 一次共振周波数 (Hz), m : 振動係数 (一次共振の場合には 4.370), L : 供試体の長さ (cm), W : 供試体の重量 (kgf), b : 供試体の幅 (cm), h : 供試体の高さ (cm) である。

5. 実験の結果と考察

各温度において桁供試体一本に対し 100 回ずつ一次共振周波数を測定した結果、それぞれ分散が非常に小さかったため、(図-4~図-6) 同一供試体を同一条件下で

測定してその平均値をもってその供試体の一次共振周波数とした。また、より正確なデータを得るため、図-7以降の図にプロットした点は、同一条件下における供試体数本の平均値を用いた。

(1) 円筒供試体について

a) 氷温と縦動弾性係数 E_{Dc} の関係 (図-7)

塩分濃度が大きい程、動弾性係数は小さい傾向があり、温度が低い程、動弾性係数は大きくなる傾向がある。

b) 一軸圧縮強度 σ_c と縦動弾性係数 E_{Dc} の関係 (図-8)

図に示した様に、氷温、海水中の塩分量、海水の密度のいずれにも関係なく、一本の曲線で表される。なお図中の曲線は、1990年の $-3 \sim -10^\circ\text{C}$ の範中で得られたものであるが今回の実験結果と、非常に良い一致を示すので、これは信頼に足るデータではないかと思われる。

c) 一軸圧縮強度と氷温の関係 (図-9)

氷温が下がるにつれて、一軸圧縮強度は増加している。なお図中の直線は1990年の同様の実験結果であり、今回の実験結果もこれに近いと思われる。

d) 氷の採取方向と一軸圧縮強度の比について (図-10)

10)

佐伯ら (1983) 他の過去の研究により、氷の成長方向に対し、垂直と水平の一軸圧縮強度の比 σ_{CV}/σ_{CH} はほぼ1であり、今回の結果もこれに近いと思われる。

e) 静的弾性率 E_c と縦動弾性率 E_{Dc} の関係 (図-11)

これも氷温、塩分量、密度に関係なく一本の曲線で表される。なおこのことは静的弾性率 E_c と一軸圧縮強度 σ_c が $\sigma = \varepsilon E$ という比例関係にあることと、前述の様に一軸圧縮強度 σ_c と縦動弾性率 E_{Dc} が一本の曲線で表されることから考えてみて妥当な結論であるといえよう。

(2) 桁供試体について

a) 氷温と曲げ動弾性係数 E_{Df} の関係 (図-12)

塩分濃度が大きいほど、曲げ動弾性係数 E_{Df} は小さくなる傾向があり、温度が低いほど、曲げ動弾性係数 E_{Df} は大きくなる傾向がある。このことは縦動弾性係数にみられた傾向と一致し、これが海水の動弾性係数に関する一般的な傾向であると思われる。

b) 曲げ強度 σ_f と桁供試体の曲げ動弾性係数 E_{Df} の関係 (図-13)

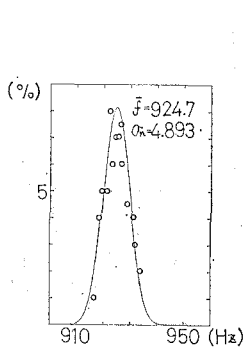


図-4 -5°C 曲げ動弾性係数分散

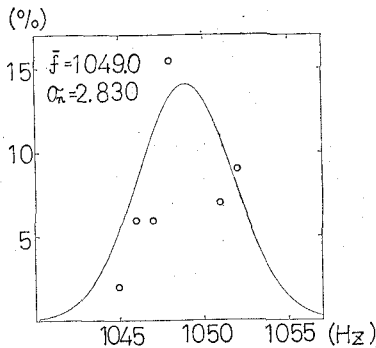


図-5 -10°C 曲げ動弾性係数分散

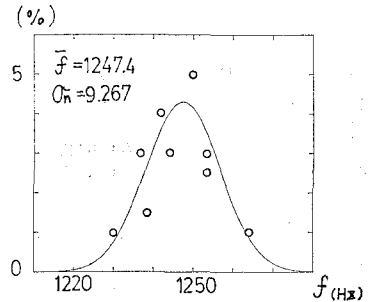


図-6 -20°C 曲げ動弾性係数分散

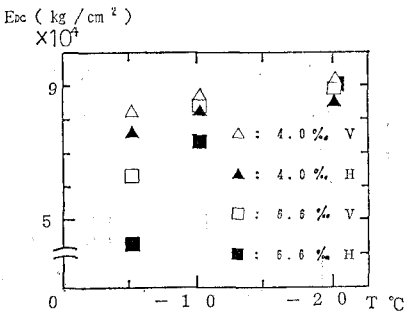


図-7 氷温と縦動弾性係数 E_{Dc} の関係

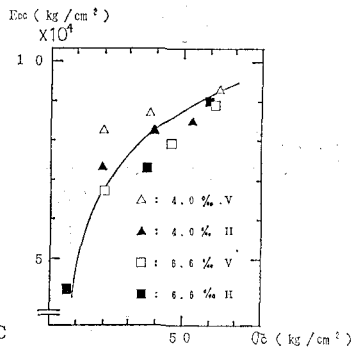


図-8 一軸圧縮強度 σ_c と縦動弾性係数 E_{Dc} の関係

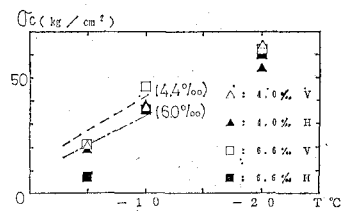


図-9 一軸圧縮強度 σ_c と氷温の関係

これも円筒供試体の場合と同様に、水温、海水の塩分量、海水の密度のいずれにも関係なく、一本の曲線で表されられると思われる。

c) 曲げ強度 σ_f と水温の関係 (図-14)

水温が下がるにつれて、曲げ強度 σ_f は増加している。Saeki ら (1984) 等の過去の実験により、 -20°C までは曲げ強度は増加し、 -20°C を越えると強度の増加はあまり見られなくなる、という性質が明らかになっており、今回の結果も、その性質に当てはまるといえる。

b) 氷の採取方向と曲げ強度の比について (図-15)

これも佐伯ら (1984) 他過去の研究により、氷の成長方向に対して垂直と水平の曲げ強度の比 σ_{fv}/σ_{fh} は、ほぼ1であることが分かっており、今回の結果もほぼこれに近いと思われる。

e) 静的弾性率 E_f と曲げ動弾性率 E_{Df} の関係 (図-16)

これも円筒供試体の場合と同様に、静的弾性率 E_f が増えると、動弾性率 E_{Df} も増加するような一本の曲線で表されだろという実験前の予想に反して、静的弾性率 E_f が増加すると、動弾性率 E_{Df} は減少する傾向

がみられた。この原因は、静的弾性率 E_f の分散が大きかったためと考えられ、更なる実験が必要であると思われる。

(3) 曲げ強度 σ_f と縦動弾性係数 E_{Dc} の関係 (図-17)

これも一軸圧縮強度 σ_c と縦動弾性係数 C_{Dc} の関係や、曲げ強度 σ_f と曲げ動弾性係数 E_{Df} の関係と同様に、水温、海水中の塩分量、海水の密度に関係なく、一本の曲線で表されられると思われる。

6. 結 論

今回の実験により、①縦動弾性係数 E_{Dc} と一軸圧縮強度 σ_c の関係、②曲げ動弾性係数 E_{Df} と曲げ強度 σ_f の関係、③縦動弾性係数 E_{Dc} と曲げ強度 σ_f の関係についてが明らかになった。特に①と③により現地試験において電動コアドリルで採取した円筒供試体の縦動弾性係数 E_{Dc} を求めることで、一軸圧縮強度 σ_c と曲げ強度 σ_f が推定できることとなった。本試験方法の優れている点として、i) 直接試験方法がチェーンソー等を用いて供試体を切り出さなければならないのに対し、この

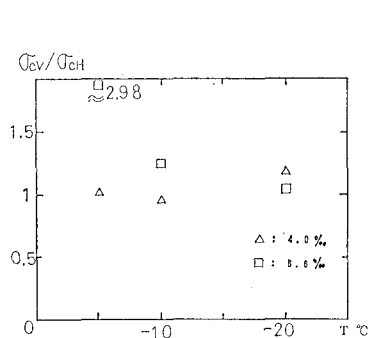


図-10 氷の採取方向と一軸圧縮強度の比について

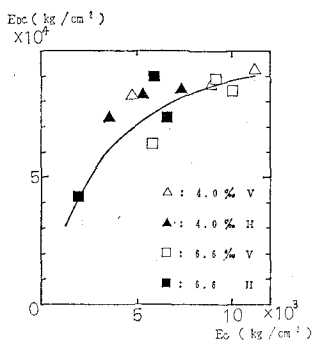


図-11 静的弾性率 E_c と縦動弾性率 E_{Dc} の関係

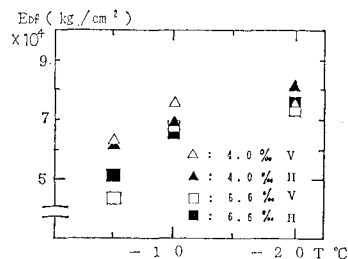


図-12 水温と曲げ動弾性係数 E_{Df} の関係

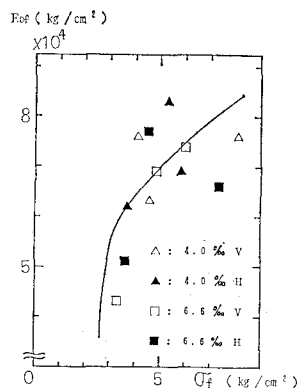


図-13 曲げ強度 σ_f と曲げ動弾性係数 E_{Df} の関係

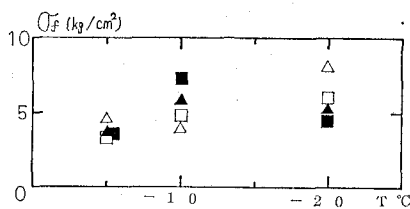


図-14 曲げ強度 σ_f と水温の関係

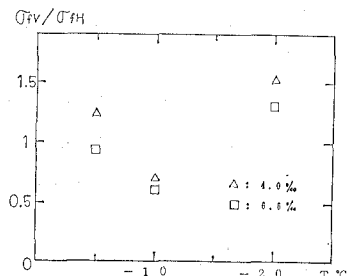
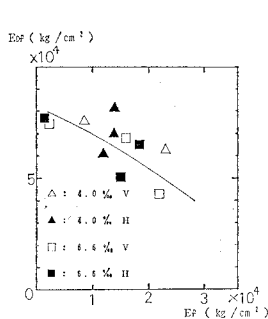
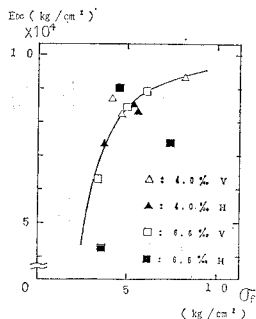


図-15 氷の採取方向と曲げ強度の比について



図—16 静的弾性率 E_s と
曲げ動弾性率 E_{df}
の関係



図—17 曲げ強度 σ_f と縦
動弾性係数 E_{dc}
の関係

試験方法では、電動コアドリルで切り出した氷柱の両端を切り落とすだけで供試体を作成できるというのは非常に手軽である。ii) 今回用いた動弾性係数測定装置、発電機、電動コアドリル、高速切断機等の測定に必要な機材の総重量は 170 kgf 程度となり、燃料を含めてもヘリコプターに搭載可能な程度の軽量なものとなる。iii) 縦動弾性係数 E_{dc} を求めることで、一軸圧縮強度 σ_c と曲げ強度 σ_f の両方が推定できるので、単純に考えても試験の手間が半分で済む、等がある。但し、考慮しなくてはならない点としては、高強度の供試体の場合には、共振するような挙動を見せずに、一つの剛体として、加振されることにより、測定装置の台座から浮くような挙動を見せる可能性がある、ということである。この点に関する本試験方法の適用範囲は未だ不明である。

また、今回は触れなかったが、電動コアドリルで切り

出した氷柱の中から更に桁を切り出し、その曲げ動弾性率を測定することにより、曲げ強度等を推定することが可能であると思われる。

以上本手法により極寒冷地における実海水の強度、及び弾性率に関するデータを軽便、広範囲に取得することが可能となるであろう。今後の課題として、氷温、塩分量、上述の適用範囲に関して更なる実験が必要であると思われる。

参考文献

- 佐伯 浩・折谷徳弘・後藤克人・山下俊彦・村木義男 (1990): 動弾性係数試験による海水強度の推定方法, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 689-693.
- 酒井雅史・五十嵐勝美・小野敏行・佐伯 浩 (1984): 超音波による海水の強度特性について, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 40, pp. 323-326.
- 田畑忠司 (1958): 海水の力学的性質の研究 II, 低温科学物理編, 第 17 号, pp. 147-164.
- 田畑忠司 (1959): 海水の力学的性質の研究 III, 低温科学物理編, 第 18 号, pp. 115-127.
- Michel, B. and N. Toussaint (1977): Mechanisms and theory of indentation of ice plates, Jour. of Glaciology Vol. 19, No. 81, pp. 285-300.
- Saeki, H., S. Saito, K. Hamanaka and A. Ozaki (1976): Experimental Study on the compressive strength of sea ice and ice force on a circular pile.
- Saeki, H., T. Nomura and A. Ozaki (1989): Experimental Study on the testing methods of strength and mechanical properties for seaice, proc. of 4th IAHR Symposium on ice, part 1, pp. 135-149.
- Saeki, H., T. Ono, K. Izumi, M. Sakai and N. Nakazawa (1984): Determination of compressive strength of sea ice by using ultrasonic pulse, Proc. of 7th IAHR Ice, Problems, Vol. 2, pp. 339-348.