

海水および淡水氷の強度特性に関する研究

Study on the Properties of Compressive Strength of Sea Ice and Fresh Water Ice

竹内貴弘^{*}・田淵浩文^{**}・今泉 章^{***}榎 国夫^{****}・岡本 智^{*****}・佐伯 浩^{*****}

Takahiro. Takeuchi, Hirofumi. Tabuchi, Akira. Imaizumi

Kunio. Enoki, Satoshi. Okamoto and Hiroshi. Saeki

It is very important to know the precise compressive strength of sea ice in order to estimate ice force acting on marine structures. This study aims to estimate the uniaxial compressive strength of sea ice and fresh water ice.

The authors carried out systematic experiment on uniaxial compressive test and dynamic elastic modulus measurement of ice. Finally, compressive strength and static elastic modulus of ice depend on ice temperature and density, and it is clarified that they can be estimated by using a dynamic elastic modulus.

Keywords: Sea Ice, Fresh Water Ice, Uniaxial Compressive Strength, Dynamic Elastic Modulus

1. はじめに

北極海、北部オホーツク海等、冬期結氷する海域に海洋構造物を建設する場合、その設計外力は水力となることが殆どである。水力の算定に際しては、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、氷盤と構造物との接触条件等が問題となる。結氷する湖沼、河川等に構造物を建設する場合も海水、淡水氷の違いはあるものの、海洋構造物の場合と同様な水力の算定が重要となるし、また、河川の場合には、氷盤の移動にともなう橋脚の摩耗、ダム湖等では、水位の低下にともなう取水塔に作用する鉛直方向水力が問題となる。

海水及び淡水氷の強度の決定については、過去にSchwarz, Michel, Tabata, Hirayama, Saeki等により直接破壊試験を行った結果が報告されている。また、Saeki等により、シュミットハンマーを用いる方法、超音波測定法、動弾性係数試験等の非破壊試験から強度を推定する方法も提案されている。しかしながら、ある海域の氷盤の強度を推定する場合、その氷盤に対してどのような試験を行えば良いか、どの程度の回数の試験を行えば良いか等、その指針が示されていないのが現状である。

本研究では、サロマ湖の氷盤から採取した氷（海水）を用いて一軸圧縮試験を行い、海水の強度、弾性係数等の弾性諸定数を求めるとともに、その頻度分布等を調べることににより、海水の強度の決定法に対して基本的な指針を与えることを目的とする。同時に動弾性係数の測定を行い、動弾性係数試験による海水の強度推定法の確立を目指す。また、淡水氷として、桂沢ダム湖の水を用いて行った試験結果と比較を行い淡水氷への適用について検討した。

2. 実験

2.1 供試体の作成

供試体に用いた氷はサロマ湖で採取した。図-1のようにA1, A2, ..., F4まで計24個のブロックを採取し、それを北大工学部開発科学実験所の低温室に持ち帰り、実験に用いた。

サロマ湖の氷厚は約50cmで、上3分の1が雪が固まってできた雪氷、残りの下3分の2が通常の海水氷であった。一つのブロックの大きさは、縦、横、高さが、それぞれ100cm, 30cm, 50cmで、このブロックから電動コアドリルを用いて、図-2のように氷の成長方向に対して垂直

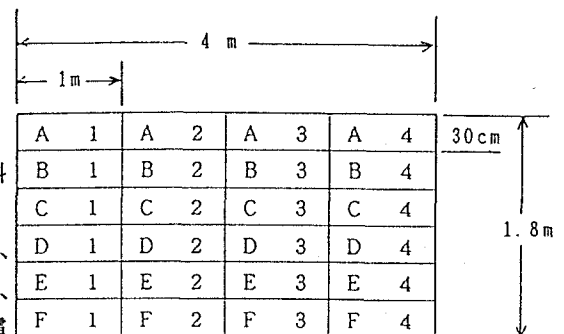


図-1 海水の採取

* 正会員 清水建設(株) 技術研究所
 ** 運輸省船舶技術研究所
 *** 正会員 (株)西村組

**** 正会員 秋田工業高等専門学校
 ***** 学生員 北海道大学大学院
 ***** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

(060 札幌市北区北13条西8丁目)

に円筒を抜き取り、高速切断機で両端面を整形し、高さ20cm、直径10cmの円筒供試体を作成した。供試体は一つのブロックから7本ずつ3層で21本、合計で約400本作成し、実験に用いた。

2.2 動弾性係数の測定

測定は、北大開発科学実験所内の低温室で、市販の動弾性係数測定装置を用いて行った。この装置に供試体を載せ振動させ、振動の周期を変化させることにより共振を生じさせて供試体の一次共振周波数を求め、これにより動弾性係数を算定する。円筒供試体を弾性体と仮定すると以下のような式を用いて動弾性係数を算定することができる。

$$E_D = C_1 \cdot W \cdot f^2$$
$$C_1 = 408 \times 10^{-5} \cdot L / A$$

ここで、 f (Hz) : 共振周波数、 E_D (kg/cm²) : 動弾性係数、 L (cm) : 供試体の長さ、 A (cm²) : 供試体の断面積である。

実験は水温を-3℃と-10℃の二つの温度で行った。Saeki等(1991)の研究によれば、共振周波数は5~10回の測定で充分であるとされており、今回は一本の供試体につき計6回の一次共振周波数の測定を行い、その算術平均をその供試体の一次共振周波数とした。

2.3 一軸圧縮試験

動弾性係数試験を終えた供試体を用いて、直接破壊試験(一軸圧縮試験)を行った。一軸圧縮試験も動弾性係数試験と同様に水温は-3℃と-10℃の二温度で行った。また、氷、特に海水は粘弾性的性質を有するため、一軸圧縮強度は歪速度(1/sec)に依存し、歪速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ (1/sec)のオーダーでピークをとることが過去の研究により明らかになっている。今回の実験では、強度がピークをとる歪速度、 $1 \times 10^{-3} < \dot{\epsilon} < 3 \times 10^{-3}$ (1/sec)の範囲で実験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 海水の強度の分布について

図-3は水温-3℃の下層70本の一軸圧縮強度の頻度分布である。この図から一軸圧縮強度は、ほぼ正規分布をしていることがわかる。また、今回の実験の際に、破壊の形態が通常のせん断破壊でなかったような供試体、極端に不良が見られる供試体、整形の際に不備があったと思われる供試体のデータについては、あらかじめ除外した。これは、約40本に1本(2~3%)の割合で見られた。

表-1は各ブロックごと(7本)の下層の一軸圧縮強度の平均値である。水温-3℃の下層70本の平均値 $\bar{\sigma}_c = 39.43$ (kg/cm²)に対し、D1を除き±10%の誤差に含まれることがわかる。過去の研究により、海水の一軸圧縮強度の分布は平均値に対し、約30%のばらつきがあることが示されていることから、氷盤の一軸圧縮強度を推定する際には、この値は充分であると言える。

表-2は、図-1に示す氷盤でD1を基準とし、位置ごとに平均値を求めたものである。D1だけの平均値に比べ、D1, D2の平均値、D1, D2, D3の平均値の方が徐々に全平均に近づいていく。また、D1, E1の平均値、D1, E1, F1の平均値も同様に全平均に近づいていく。全平均値 $\bar{\sigma}_c = 39.43$ (kg/cm²)の±5%の誤差を認めるとすると、表-2から、横方向については、D1~D3までのブロックの平均値、縦方向については、D1, E1の平均値を用いれば全平均の±5%に含まれる

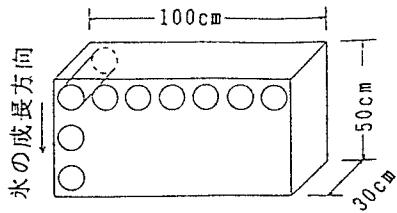


図-2 ブロックの形状と供試体の方向

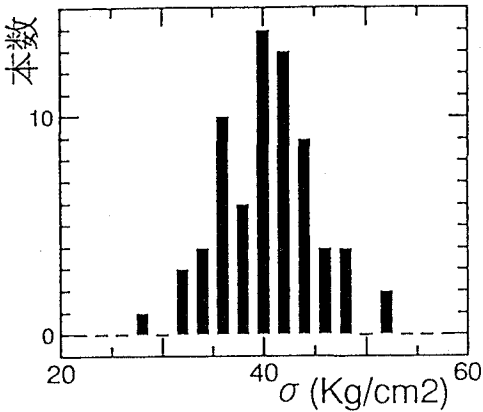


図-3 一軸圧縮強度 σ_c の頻度分布
($T = -3^\circ\text{C}$, 下層)

	D1	D2	D3	D4
$\bar{\sigma}_c$	44.37	39.84	40.28	36.14

	E1	E2	E3	E4
$\bar{\sigma}_c$	39.04	40.51	39.11	38.88

	F1	F2	F3
$\bar{\sigma}_c$	38.90	42.95	35.43

表-1

	$\bar{\sigma}_c$
D1	44.37
D1~D2	41.49
D1~D3	41.02
D1~D4	39.96
D1, E1	40.98
D1, E1, F1	39.75
全平均	39.43

表-2

ことがわかる。従って、この氷盤の一軸圧縮強度の平均値を5%の誤差で求めるには、横方向に約2mにわたっての供試体の採取、縦方向に約50cmの供試体の採取で充分であるといえる。

水温 $T = -3^{\circ}\text{C}$ の上、中層、また、水温 $T = -10^{\circ}\text{C}$ の場合の各層においても同様の傾向がみられたことから、本研究においては、各ブロックごとの7本の平均値をそのブロックの一軸圧縮強度とし、実験結果をまとめることにした。

3.2 海水の弾性諸定数について

(1) 図-4 は一軸圧縮強度 σ_c と圧縮弾性率 E_c の関係である。この図から一軸圧縮強度と圧縮弾性率は比例関係にあることがわかる。弾性体では $E_c = \sigma_c / \varepsilon$ の関係があるが、これに一致する結果となっている。

(2) 図-5 は密度 ρ と一軸圧縮強度 σ_c との関係である。一軸圧縮強度は密度に比例し直線的に増加することがわかる。海水の組成は水、気泡、ブライン等から成り、このうち荷重を受け持つのは氷の部分である。密度が小さくなると気泡、ブラインの量が増え、荷重を受け持つ氷の部分が少なくなることにより一軸圧縮強度が小さくなると思われる。また、 $T = -3^{\circ}\text{C}$ に比べ $T = -10^{\circ}\text{C}$ の場合の方が増加の割合が大きく、一軸圧縮強度は水温 T にも依存することがわかる。図-6 は同様の結果を水温 T を横軸にとった場合のグラフである。この図から一定密度の海水に対しては水温の低い方が一軸圧縮強度が大きいと言える。

(3) 図-7 は密度 ρ と圧縮弾性率 E_c の関係である。この図から圧縮弾性率は密度に依存し、密度が増加するにつれ直線的に増加することがわかる。また、一軸圧縮強度と同様、水温に依存し、水温が低いほど圧縮弾性率は大きく、その増加の割合も大きい。

(4) 図-8 は密度 ρ と動弾性率 E_D との関係である。この図から密度と動弾性率は密度が増加するにつれ、ほぼ直線的に増加し、動弾性率は密度に比例することがわかる。また、動弾性率の水温 T による差は認められず、動弾性率は水温によらず、密度に依存することがわかる。

(5) 図-9 は動弾性率 E_D と圧縮弾性率 E_c との関係である。圧縮弾性率は動弾性率に依存し、動弾性率の増加にともない直線的に増加する。また、圧縮弾性率は水温 T に依存することから、ここでも水温 T をパラメータとして動弾性率と圧縮弾性率の関係が得られる。

(6) 図-10 は動弾性率 E_D と一軸圧縮強度 σ_c との関係である。図のように動弾性率と一軸圧縮強度は水温 T をパラメータとして直線で表すことができる。しかしながら、水温による相違は動弾性率にすると10%以下の違いで、一軸圧縮強度を推定する際にはその影響は小さい。従って、動弾性率を求めることによって水温に関係なく、一軸圧縮強度を決定することができると言える。Saeki等

(1990, 1991) の研究によれば動弾性率を求めることにより、一軸圧縮強度は水温、密度、塩分量に関係なく一義的に決定されるとしている。本研究においては、一軸圧縮強度、圧縮弾性率と動弾性率の関係について比較的よい一致を見ることができた。

4. 淡水氷との比較

淡水氷については1990年、桂沢ダム湖から採取した淡水氷を用いて供試体を作成し、同様な圧縮試験を行った。海水と同様に淡水氷

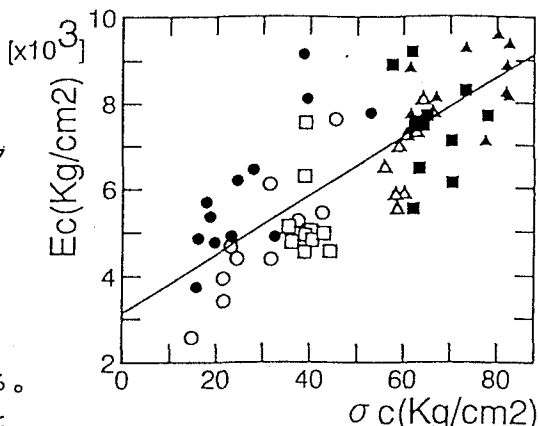


図-4 一軸圧縮強度 σ_c と圧縮弾性率 E_c の関係

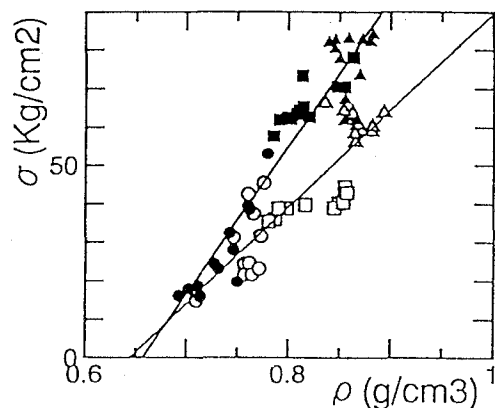


図-5 密度 ρ と一軸圧縮強度 σ_c の関係

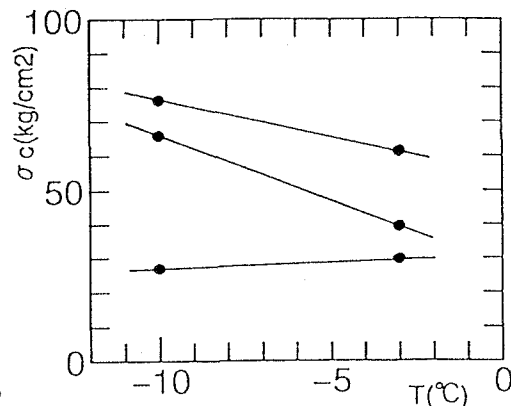


図-6 水温 T と一軸圧縮強度 σ_c の関係

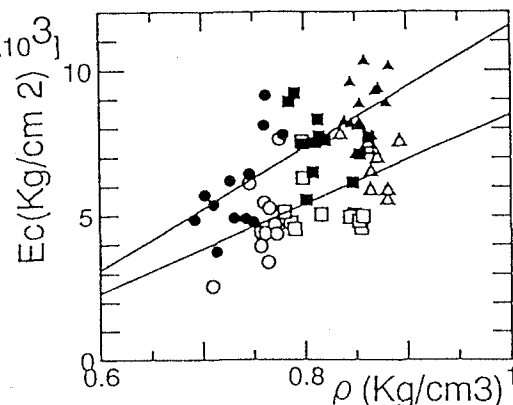


図-7 密度 ρ と圧縮弾性率 E_c の関係

でも、その一軸圧縮強度の頻度分布は同様と考えられるため、実験結果は海水の場合と同様に、それぞれの実験条件に対し、各供試体の平均値で整理した。桂沢ダム湖の水盤は3層から成り、上層、下層が雪氷、中層が通常の淡水氷であった。圧縮試験には強度が最も大きいと思われる中層の水を用いた。

図-11は水温 T と一軸圧縮強度 σ_c の関係である。一軸圧縮強度は水温に依存し、水温が低くなるにともない一軸圧縮強度は大きくなることがわかる。一般に淡水氷はその構造から、海水より強度が大きいと考えられ、またSaeki等(1989,1990)の実験により、それが確かめられている。図-6に示した海水と比較すると、淡水氷では一軸圧縮強度の範囲が20~80 (kg/cm²) であるのに対し、今回行った海水の実験では、10~80 (kg/cm²) であり、際だった相違は見られなかったが、これは、サロマ湖の海水に比べ、桂沢ダム湖の水がかなり雪、気泡を多く含んだ氷であったことによると思われる。これは、密度の測定から明かである。また、水温が低くなるにつれ、一軸圧縮強度が増加しているという点では、海水、淡水氷ともに同様な傾向が見られる。

図-12は淡水氷の水温 T と圧縮弾性率 E_c との関係であるが、これも、一軸圧縮強度と同様に水温に依存し、水温が低くなるに従い、圧縮弾性率も増加している。これについても、海水と同様な傾向が見られる。

5. おわりに

今回の実験に用いたサロマ湖の海水は、密度が約0.7~0.9 (g/cm³) の範囲にあり、一般的な海水に比べ、小さめであるが、これは氷の採取時期が、氷が緩み、氷盤移動が激しくなる3月であったことによるものである。実海域において、氷力等が問題になってくるのは、この氷盤移動の時期であることが多く、今回の実験結果はそういった点にも適用できるであろう。また、直接破壊試験により海水の弾性諸定数に対して、水温、密度等の条件による相関関係が得られた。さらに、非破壊試験として動弾性係数試験による一軸圧縮強度、圧縮弾性率の推定も可能となった。この結果を用いれば、現地でも、動弾性係数試験を行うことにより、氷盤の一軸圧縮強度、圧縮弾性率が推定でき、直接破壊試験を行うよりはるかに便利である。また、限られた範囲の氷盤の一軸圧縮強度を推定する場合、氷盤からある一定量の供試体をサンプリングすることにより氷盤の強度を推定できることも明かとなった。今後は数多くの供試体を用いて実験を行い、さらに統計的な解析を行うことが重要となるだろう。

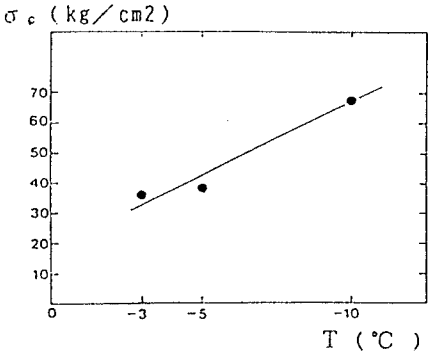


図-11 水温 T と一軸圧縮強度 σ_c の関係 (淡水氷)

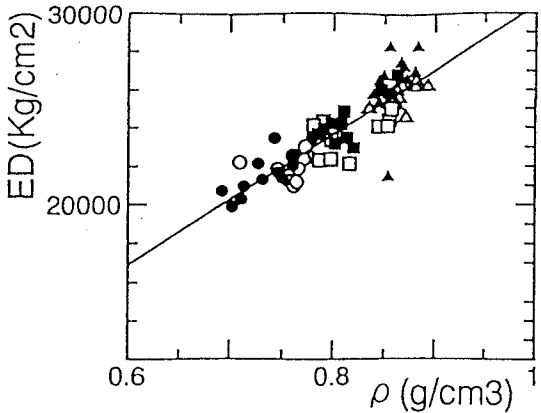


図-8 密度 ρ と動弾性率 E_D の関係

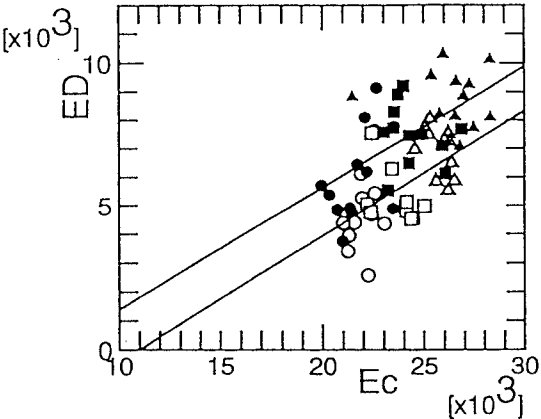


図-9 動弾性率 E_D と圧縮弾性率 E_c の関係

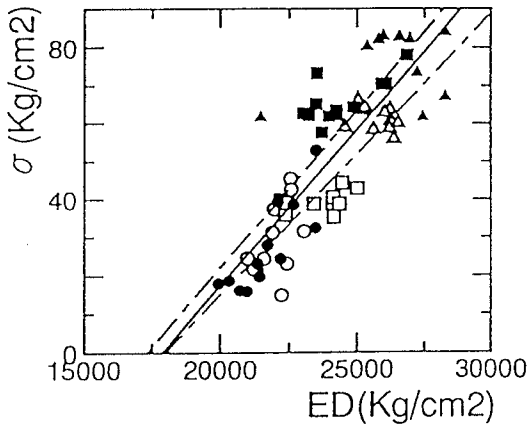


図-10 動弾性率 E_D と一軸圧縮強度 σ_c の関係

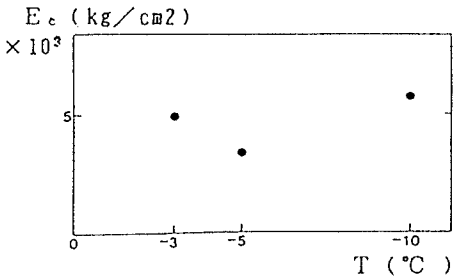


図-12 水温 T と圧縮弾性率 E_c の関係 (淡水氷)

参 考 文 献

- (1) 田畑 忠：海水の力学的性質の研究Ⅱ、低温科学物理編、第17号、1958
- (2) 田畑 忠：海水の力学的性質の研究Ⅲ、低温科学物理編、第18号、1958
- (3) Saeki, H., T. Nomura and A. Ozaki: Experimental Study on the testing methods of strength and mechanical properties for Sea Ice, Proc. of 4th IAHR Symposium on Ice, part1
- (4) Schwarz, J. and W.F. Weeks: Engineering Properties of Sea Ice, Journal of Glaciology vol.19 No.81 pp499~530, 1977
- (5) 佐伯 浩、折谷徳弘、後藤克人、山下俊彦、村木義男：動弾性係数による海水強度の推定方法、海岸工学論文集、第37巻、1990
- (6) 佐伯 浩、秋原真哉、小野敏行、山下俊彦、服部卓也：非破壊試験法による海水の強度及び弾性定数の推定法、第7回寒地技術シンポジウム講演論文集、1991
- (7) 高橋陽一、寺島貴志、折谷徳弘、中澤直樹、佐伯 浩：淡水氷の強度について、第7回寒地技術シンポジウム講演論文集、1991
- (8) 前田智春、笹本 誠、堺 茂樹、石田 宏、平山健一：試験条件をパラメータとした氷圧縮及び曲げ強度の表示法について、第5回寒地技術シンポジウム講演論文集、1989