

能取湖の海水の圧縮強度特性 —強度分散と結晶構造の影響—

Characteristics of Compressive Strength of Sea Ice at Notoro Lagoon

— Strength Dispersion and Influence of Grain Structure —

松下久雄*,

高脇 透**,

平山健一***,

Hisao Matsushita,

Toru Takawaki,

Ken-ichi Hirayama,

正木孝治****,

本田秀樹****,

佐伯 浩*****

Takaharu Masaki,

Hideki Honda,

Hiroshi Saeki

Mechanical tests were conducted under around -2°C with small size specimens prepared to obtain compressive and bending strength of the ice sheet facing the indenter, which is one year sea ice. Physical characteristics of the sea ice were summarized using various relationships as follows : density vs. salinity, compressive strength vs. density or salinity, compressive vs. bending strength, compressive strength vs. grain structure and inhomogeneity in compressive strength in the horizontal direction. The test results can be explained well by assuming that both compressive strength and bending strength are proportional to $D^{-1/2}$ (D : crystal grain size).

KEY WORDS: one year sea ice, physical properties, grain structure, mechanical strength

1 はじめに

構造物に作用する氷荷重を推定するためのモデルの構築においては、氷板の強度特性が基本的なパラメータとして重要である。そこで、能取湖の貫入試験に用いた、短期間（3～25日）で形成された試験海水に対して、小型試験片を用いた圧縮試験及び曲げ試験を行い、氷板の強度特性（圧縮強度と曲げ強度）を把握した。貫入試験時は試験海水が海水中にあることから、圧縮試験及び曲げ試験とも海水温度（ -2°C 前後）で実施した。また、海水の基本的な物理的性質（密度、温度、塩分量及び結晶組織）も同時に計測した。得られた実験結果から、試験海水の物理的性質と強度特性との関係、特に海水の結晶構造に注目した検討を行った。

2 試験方法

2.1 強度試験

貫入試験の各ケースに対し、図 2.1 に示すように試験海水（幅 1.5m のもの、この他幅 3m も実施）の前方部分から供試体を取り出し、圧縮試験片（ $\phi 45 \times L90$ 又は $\phi 75 \times L150\text{mm}$ ）各 16 本、3 点曲げ試験片（ $W45 \times B 45 \times S L450\text{mm}$ 又は $W75 \times B75 \times SL750\text{mm}$ ）各 6 本を採取した。各試験片は、貫入試験時の水温（海水の温度）とするために加工後海水プール中にストックして強度試験時に取り出し手早く実験に供した。強度試験は、貫入試験から基本的には 1 日（当日）長くても 3 日以内に行った。

試験機は、図 2.2 に示すような、圧縮試験及び曲げ試験が行えるものとし、モーター駆動により試験片に変位速度一定の荷重を付加した。圧縮試験では荷重軸に取付けた変位計により試験片の変位を、また、曲げ試験では試験片の底部にセットした変位計により試験片の撓みをそれぞれ計測した。一方、ロードセルにより荷重を計測し、X-Yレコーダ上で荷重と変位または荷重と撓みとの関係を求めた。圧縮試験、曲げ試験とも歪速度 $10^{-3}/\text{sec}$ で試験を行い、荷重と変位との関係を求め各試験片の最大強度、ヤング率等を求めた。

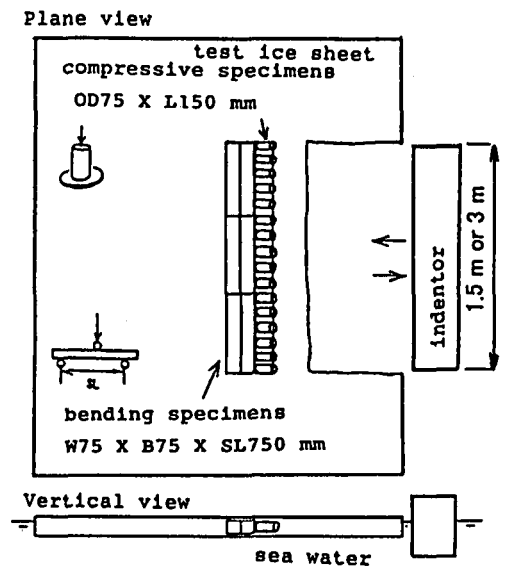


図 2.1 試験片採取位置

- * 正会員 三井造船株式会社 船舶艦艇事業本部 技術開発部 (290 市原市八幡海岸通1番地)
- ** 株式会社三造試験センター
- *** 正会員 岩手大学工学部建設環境工学科
- **** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻(研究当時)
- ***** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

2.2 物理的性質の測定

試験海水の塩分量、密度、水温、結晶構造を求めた。柱状結晶と粒状結晶との割合は、各試験海水中央部の結晶構造用サンプルで測定した値を用いた。

3 実験結果及び考察

3.1 塩分量と密度との関係

図 3.1 に示すように、試験海水の密度と塩分量とは、ばらつきは大きいが、比例関係が見られる。また、柱状結晶の割合とは関係ないことがわかる。

3.2 結晶構造

図 3.2(a)～図 3.2(c)に代表的な結晶構造写真を示す。試験海水の結晶構造は、鉛直上方が粒状構造（結晶粒径は 2 mm 程度）、下方が柱状構造（10～20mm）である。

3.3 圧縮強度と塩分量及び密度との関係

正木ら¹⁾が調べているように、流水やサロマ湖の自然海水の圧縮強度は、密度の増加に伴い増加する傾向があるが、本実験の試験海水では、図 3.3 に示すように、圧縮強度は塩分量及び密度にあまり依存せず結晶構造（柱状結晶の割合）に依存する傾向が見られる。これは、本実験での試験海水が短期間で形成された初生水であるため海水の結晶組織が固まっていないためと考えられる。

Proportion of Columnar crystals	100 %	50	20	0	—
mark	●	◐	◑	○	△

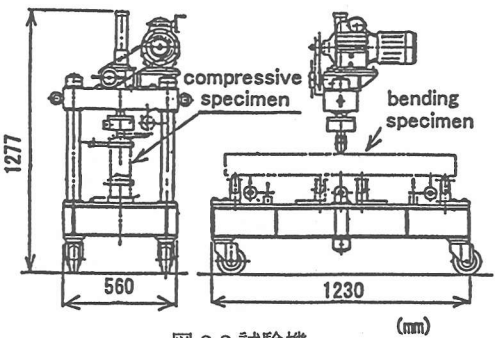


図 2.2 試験機

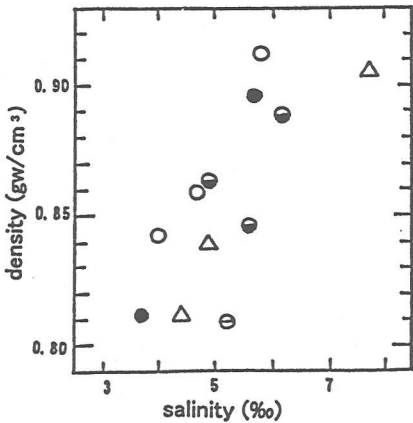


図 3.1 塩分量と密度との関係

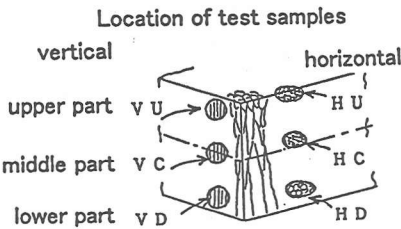
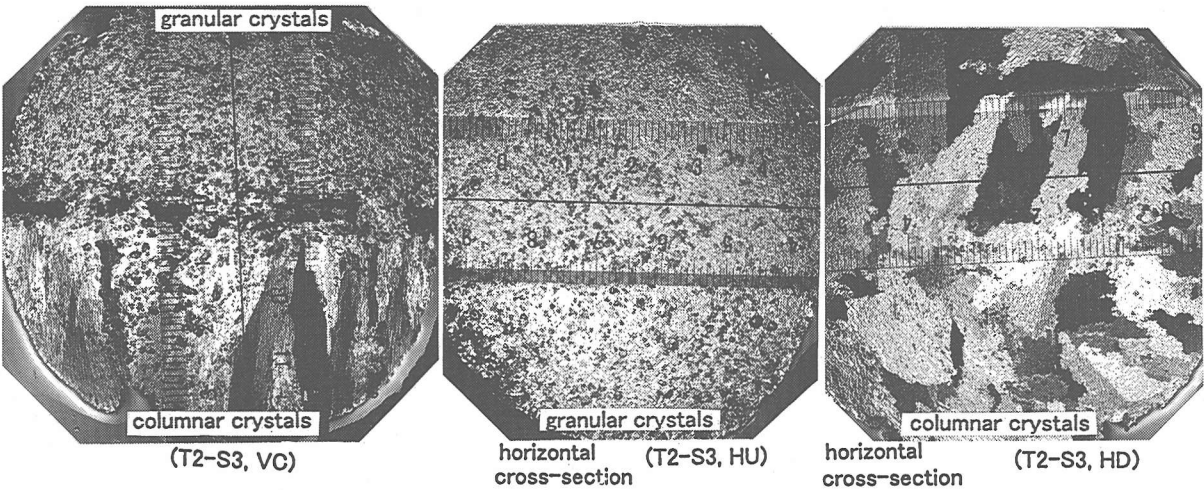


図 3.2 海水の結晶構造

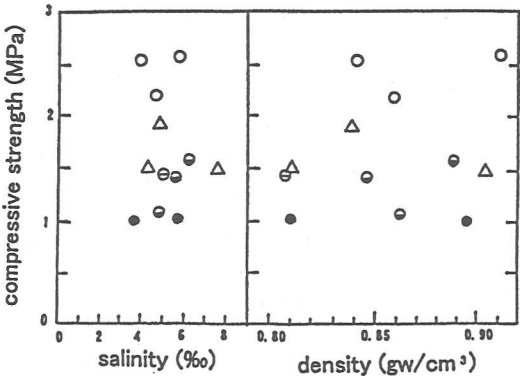


図 3.3 圧縮強度と塩分量及び密度との関係

3.4 圧縮強度と曲げ強度との関係

図 3.4 に示すように、ばらつきは大きいが圧縮強度と曲げ強度とは比例関係が認められ、平均圧縮強度は平均曲げ強度の 4 倍程度である。

3.5 ヤング率

図 3.5 に示すように、ばらつきは大きいが曲げヤング率と圧縮ヤング率とは比例関係が認められる。また、曲げヤング率の方が圧縮ヤング率よりもばらつきは大きい。ヤング率は、圧縮時で 100~400MPa、曲げ時で 100~600MPa であった。図 3.6 に模式的に示すように、圧縮試験では結晶粒界が押され、曲げ試験では逆に結晶粒界が引張られるため、この粒界の変形能力が直接曲げ変形に影響する。今回の試験海水は短期間で形成された海水であることから粒界強度にばらつきがあり、曲げヤング率のばらつきが大きくなったものと考えられる。また、このことから、図 3.7(b)に示すように、曲げヤング率と曲げ強度とは明確な相関関係が認められないものと考えられる。圧縮ヤング率と圧縮強度とは、図 3.7(a)に示すように、ほぼ比例関係が認められる。ここに、図 3.8 に模式的に示すように、試験片が粒状結晶で構成されている場合（柱状結晶の割合 0%）には、結晶粒が小さく結晶粒界が多いことから後述するように圧縮強度が大きくまた結晶粒界での多くの微小割れの発生により試験片全体の変形を吸収することが考えられる。これに対し、柱状結晶が多い場合には逆のことが考えられる。実験結果はこの仮定を支持している。

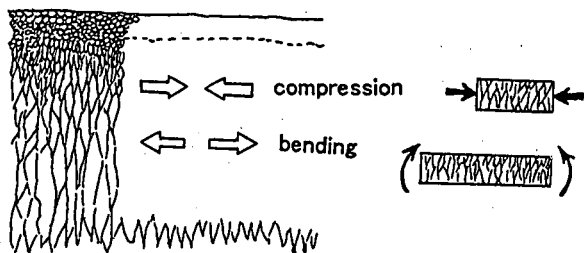


図 3.6 圧縮試験及び曲げ試験時の局部応力の方向と結晶構造との関係

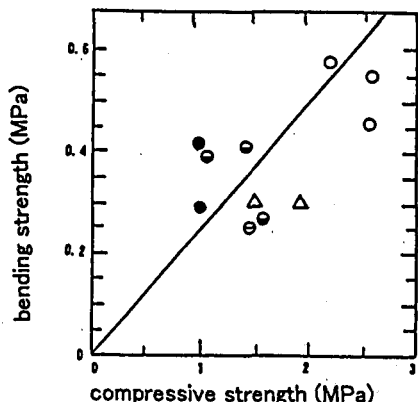


図 3.4 曲げ強度と圧縮強度との関係

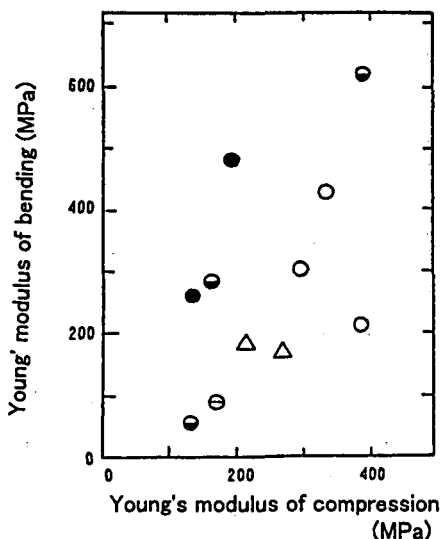


図 3.5 曲げヤング率と圧縮ヤング率との関係

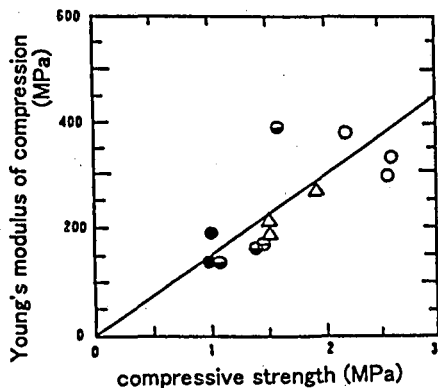


図 3.7(a) 圧縮強度と圧縮ヤング率との関係

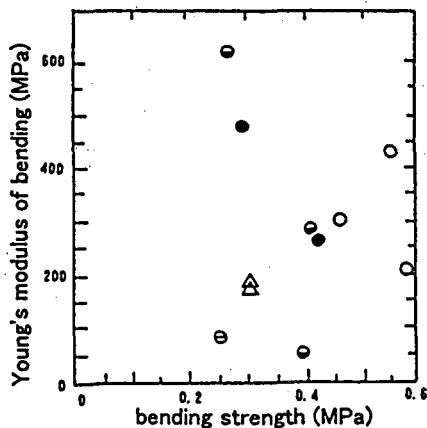


図 3.7(b) 曲げ強度と曲げヤング率との関係

3.6 柱状結晶の割合での整理

“柱状結晶の割合”に注目して密度、塩分量、圧縮強度、曲げ強度、圧縮ヤング率、曲げヤング率について整理したところ、密度、塩分量は柱状結晶の割合とは相関性は少ないが、圧縮強度や曲げ強度は柱状結晶の割合が多くなる（粒状結晶の割合が少ない）ほど、小さくなる傾向が見られる。図 3.9 参照。

これは、圧縮強度が結晶粒径に依存し、結晶粒径が小さい程圧縮強度が大きくなることを示している。また、曲げ強度は、柱状結晶の割合が 0%（粒状結晶が 100%）の場合以外は、柱状結晶の割合が 0%の場合よりも小さくなり、また、ほぼ一定になる傾向がある。これは、曲げ強度も柱状結晶の粒界強度に依存していることを示している。ここに、曲げ破壊の場合には曲げ試験片の底面で引張り応力が発生することから、柱状結晶が底面にある場合には試験片全体の柱状結晶の割合に関わらずほぼ一定の曲げ強度を示すことが考えられるが実験結果もその様になっている。ミクロ的な材料強度の立場から考えると図 3.10 に示すように、“圧縮”及び“曲げ”負荷とも結晶粒界でのミクロな剪断変形によるき裂の発生が圧縮強度及び曲げ強度を支配しているものと考えられる。この場合、横堀が金属材料で指摘しているように²⁾³⁾転位の集積によるミクロき裂の発生と同様に考えると、結晶粒径 D の $-1/2$ 乗に比例するものと考えられる。実験結果はこの仮定とよく合っている。即ち、粒状結晶（約 2mm）と柱状結晶（10~20mm）の結晶粒径 D の比は $1/5 \sim 1/10$ となることから D の $-1/2$ 乗の比は $2 \sim 3$ となる。一方、実験結果も粒状結晶と柱状結晶の圧縮強度比は $2.1 \sim 2.5$ 、また曲げ強度比は 2 前後と、それぞれ D の $-1/2$ 乗の比（ $2 \sim 3$ ）と一致している。

$$\sigma_B, \sigma_C \propto \tau_G \propto 1/\sqrt{D}$$

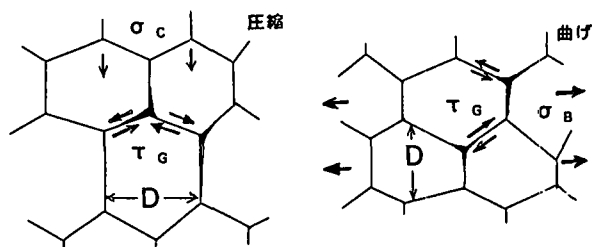


図 3.9 局部応力集中による結晶粒界でのミクロき裂発生（概念図）

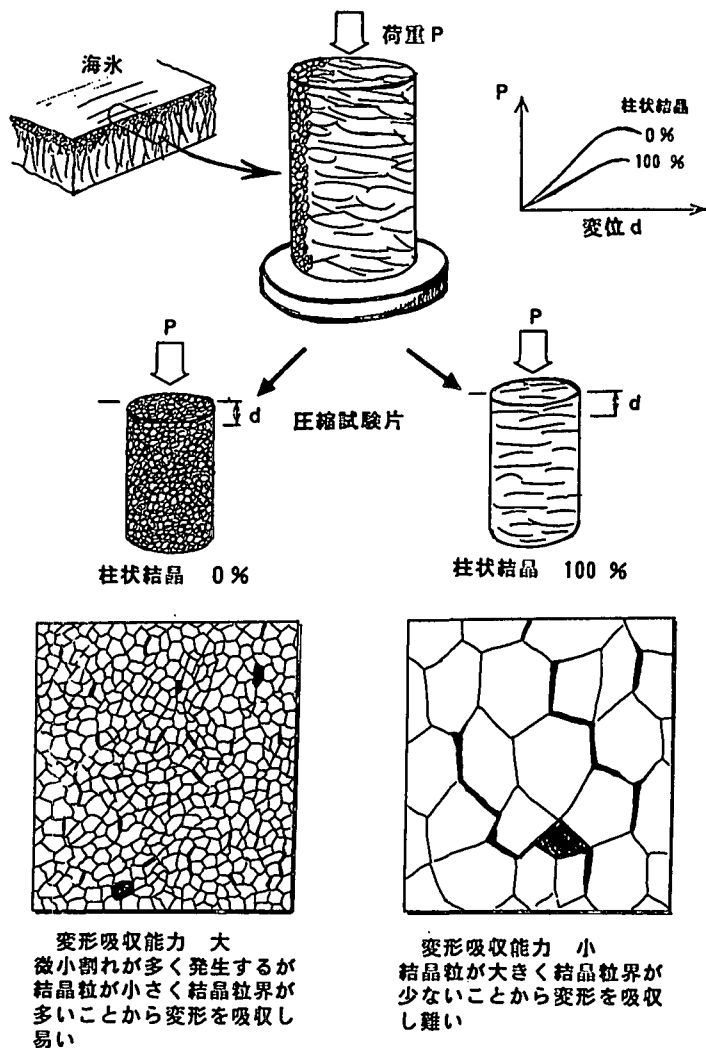


図 3.8 圧縮試験における結晶粒径の大きさの影響（概念図）

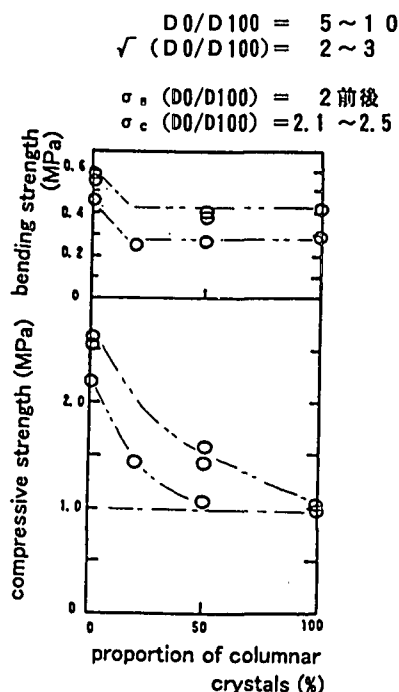
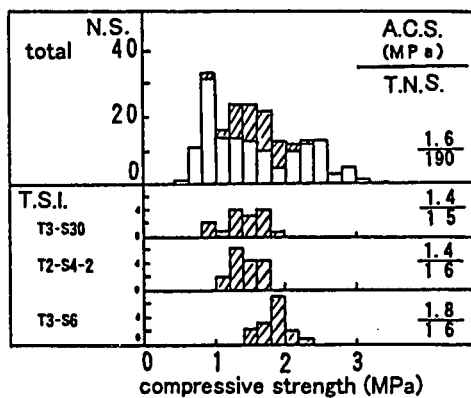
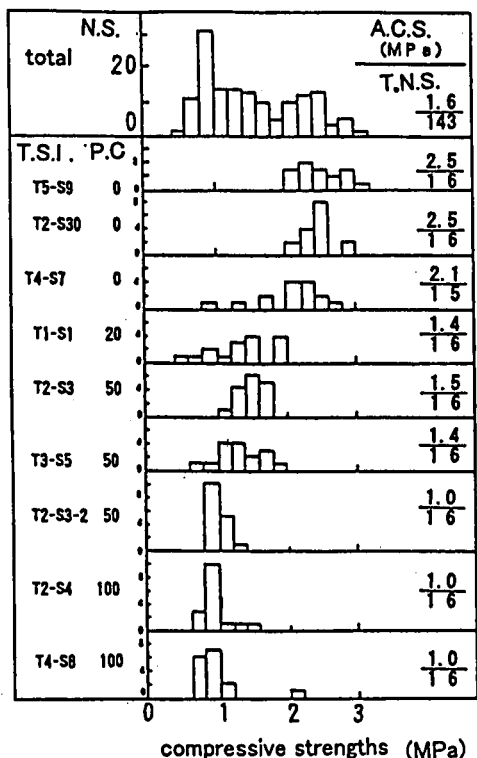


図 3.10 曲げ強度、圧縮強度と柱状結晶の割合との関係



T.S.I. : test sea ice
A.C.S. : average compressive strength (MPa)
T.N.S. : total number of specimens
P.C. : proportion of columnar crystals (%)
N.S. : number of specimens

図 3.11 各試験海水での圧縮強度のばらつき

3.7 圧縮強度のばらつき

図 3.11 に示すように、圧縮強度は試験海水によりばらつきがみられる。また、図 3.12 に示すように、柱状結晶の割合が大きいほど変動係数は大きくなる。ここに、図 3.13 に示すように、平均気温が低い程柱状結晶の割合は大きくなること、また、図 3.14 に示すように、平均気温が低く急速に形成された海水ほど変動係数が大きいことから、このばらつきの原因としては、平均気温の違いにより氷の成長速度が異なるため個々の各試験片の結晶粒径や結晶粒界の界面強度や気孔量が変化していることが考えられる。

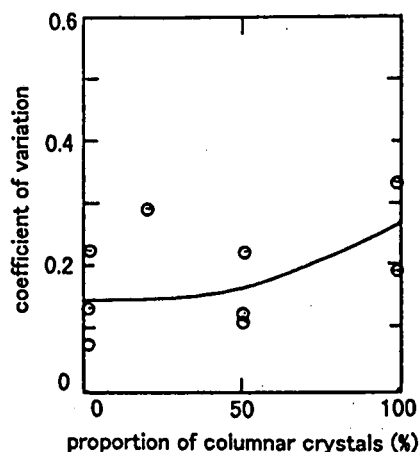


図 3.12 柱状結晶の割合による変動係数の変化

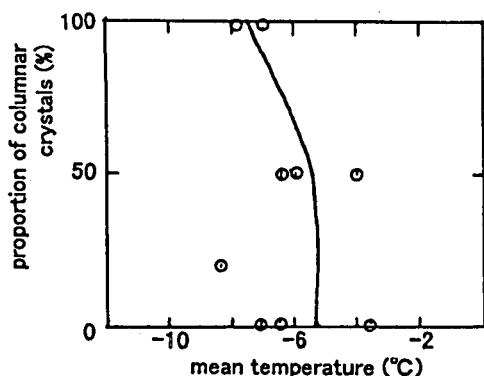


図 3.13 平均気温による柱状結晶の割合の変化

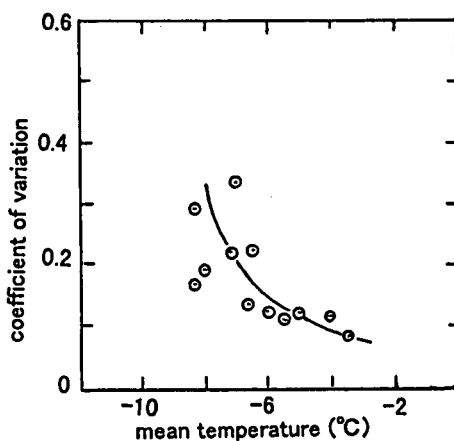


図 3.14 平均気温と変動係数との関係

3.8 各地の海水強度との比較

表 3.1 に示すように、今回の能取湖での試験海水の圧縮強度や曲げ強度は北部バルチック海⁴⁾やオホーツク海⁵⁾の天然海水とほぼ同じであるが、曲げヤング率は 1/10 程度と少なくこれらに比べて柔らかい海水であることが考えられる。

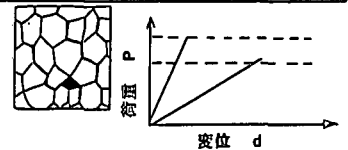
4. まとめ

構造物の氷荷重を推定するための実験として行われた貫入試験用に能取湖で短期間（3～25 日）に形成された試験海水に対して、水温 -2℃ 付近での強度特性（圧縮強度及び曲げ強度）及び物理的性質（密度、塩分量、結晶構造）を求めそれらの相関性を明らかにした。また、結晶粒径が及ぼす強度特性への影響について材料強度の立場から考察した。主な結果を以下に示す。

- (1) 水温 -2℃ 付近では圧縮強度に及ぼす密度及び塩分量の影響はあまり見られない。
- (2) 圧縮強度は曲げ強度の 4 倍程度である。
- (3) 柱状結晶の割合が多くなる（粒状結晶の割合が少ない）ほど、圧縮強度は小さくなる。これは、圧縮強度が結晶粒径に依存していることを示している。
- (4) 曲げ強度は、柱状結晶の割合が 0%（粒状結晶が 100%）の場合以外は、柱状結晶の割合が 0% の場合よりも小さくほぼ一定になる傾向がある。これは、曲げ強度が柱状結晶の粒界強度に依存していることを示している。
- (5) 圧縮強度は水平方向の採取位置によりばらつきがみられる。
- (6) 平均気温が低い程急速に形成された海水ほど、圧縮強度の変動係数が大きい。

表 3.1 各地の海水強度の比較例

	能取湖	Kemi- I in the Northern Baltic	Okhotsk Sea Sakhalin
海水	試験氷 (初生)	天然氷	天然氷 Drift-ice
最大氷厚(m)	0.24	0.86	
Salinity (‰)	3.7-7.7		0.9-6.3
密度(gr/cm ³)	0.81-0.91		
Columnar Grain Size(mm)	10-20	2-20	
試験温度(℃)	-2		-3 - -13.4
Strain Rate	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³
圧縮強度 σ_c (MPa)	1.0-2.5	1.7-2.4	0.6-4.0
曲げ強度 σ_b (MPa)	0.24-0.56	0.44-0.56	
圧縮ヤング率 E_c (GPa)	0.13-0.37		
曲げヤング率 E_b (GPa)	0.06-0.59	3.0 -6.4	
	This Work Matsushita	IAHR96 Report M. Määttänen Ice Failure -	IAHR96 Report Truskov 3-D Variability -



本研究は（社）日本海洋開発産業協会（通称:JOIA）の「海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究」（委員長 佐伯浩北大教授）のもとに平成 7 年度に実施されたものである。本実験実施に際し島田建設（株）成田主任殿はじめ多くの方々及び東京農業大学の学生小林君、松浦君、野中君野協力を得たので記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) T.Masaki, Y.Ohkubo, H.Honda, N.Otsuka and H.Saeki, "CHARACTERISTICS OF UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF SEA ICE IN THE SEA OF OKHOTSK", IAHR96 Proceedings of The 13th International Symposium on Ice, Vol. 1, pp.72-79, 1996.8.
- 2) 例えば横堀武夫著「材料強度学」岩波全書
- 3) 岸本、印藤、松下「Al-Mg 合金 A5083-O 超厚板の破壊強度特性」、日本材料強度学会誌 第 12 巻 1 号 pp.11-22, 1977
- 4) M.Maattanen, "ICE FAILURE AND ICE LOADS ON A CONICAL STRUCTURE KEMI-1 CONE FULL SCALE ICE FORCE MEASUREMENT DATA ANALYSIS", IAHR96 Proceedings of The 13th International Symposium on Ice, Vol. 1, pp.8-16, 1996.8.
- 5) P.A.Truskov, G.A.Surkov and V.N.Astafiev, "3-D VARIABILITY OF SEA ICE UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH", IAHR96 Proceedings of The 13th International Symposium on Ice, Vol.1, pp.94-101, 1996.8.