

# 再凍結氷の強度特性に関する基礎的研究

## STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF REFROZEN ICE

安永喜勝<sup>1</sup>・木岡信治<sup>1</sup>・松尾優子<sup>1</sup>・佐伯浩<sup>2</sup>

Yoshikatsu YASUNAGA, Shinji KIOKA, Yuko MATSUO and Hiroshi SAEKI

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>フェロー 工博 北海道大学大学院教授工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

In cold region, the design ice load for offshore structures is often given by first-year ice ridges, it is important to obtain knowledge about ice ridge, especially consolidated parts, in designing offshore structures. However, the physical properties and strength of sea ice ridge appear to be much more complex than those of undeformed ice or level ice.

The authors conducted a preliminary series of tests (uniaxial compression tests) in the laboratory to investigate the strength and the physical properties of the consolidated part. In order to construct an ice ridge, cubic ice blocks of varies size (a) were place in the ice tank filled with salt water that had greater salinity than that of the ice blocks. After they were refrozen, using varies size core drill (d), we collected core test samples of varies sizes and various d/a ratio, due to combination (a) and (d). and then we examined its physical properties and its strength characteristics in considerations with the size effects.

**Key words :** Ridge Ice, Level Ice, consolidated part, compressive strength, size effect

### 1. はじめに

近年、寒冷地帯における石油や天然ガスなどのエネルギー資源開発が盛んになってきており、それに伴ない沖合構造物に作用する氷荷重の的確な設計評価方法の確立が必要とされている。氷荷重は主に構造物幅、形状、氷厚、海水強度等に依存し、その中でも、海水強度は荷重推定の指標的な要素として必要不可欠である。海水強度に関して、今まで Level Ice の強度特性に関する研究は多く行われてきたが、Ridge Ice や Hummock Ice といった変形氷の強度特性に関してはあまり行われておらず、不明確な部分が多い。

ところで、Ridge Ice や Hummock Ice の構造は上部の sail, 水面付近の consolidated part, 下部の unconsolidated part で構成されているが、氷荷重を推定する上では、破壊氷片が再凍結している consolidated part と呼ばれる部分の強度特性を把握することが重要となる。そこで本研究ではこの consolidated part に注目し、室内実験として単純化された consolidated part (以下、再凍結氷と呼ぶ) を作成し、その際、破壊氷片モデルの代表長 (a)・コ

ア径 (d) の組み合わせ (以下 d/a とする) により供試体を作成し、系統的な一軸圧縮試験を行い Level Ice と比較することでその強度特性、基本的構造を明らかにしていくのが目的である。

### 2. 実験方法

本来の再凍結氷の構造・物性などは極めて複雑であり、破壊状況、生成過程による Sail や Ice block の形状、寸法、空隙・間隙、または気象条件に依存する。したがって、時期・場所によって再凍結氷の構造・物性は様々である。このような背景から現状では実験室規模において「代表的」な自然の再凍結氷を再現することは困難であるので、本実験においては、単純化し等しい条件下で作成した ice block がランダムに入り交じり、その間隙部が凍結したものを再凍結氷とする。

#### (1) 再凍結氷、Level Ice の作成方法

##### 再凍結氷

- ① 10% の塩水をいれた所定の容器にメッシュ状の方枠を入れ、所定の厚さまで凍らせた後、方枠から取り外し、ほぼ cubic 形の ice block (代表長 a) を取り出す。

- ②取り出された多数の ice block は互いの氷温度を同一、一定にするためシート上で1日放置する。
- ③25%の塩水をいれた水槽（1200×700×400）を凝固点付近まで冷却させ塩水が凝固点付近になればあらかじめ用意した ice block を水槽の所定の厚さまで投入する。
- ④所定の厚さまで凝固すれば（約10日）水槽から取り出した。

### Level Ice

10%、25%の塩水を上記と同じ寸法の水槽に入れ所定の厚さまで凝固すれば（約10日）水槽から取り出した。

但し、すべての再凍結氷、Level Ice を同一条件下（室温、水深、冷凍期間）で作成した。

### (2) 供試体の作成方法

以上のように作成された再凍結氷、Level Ice を様々な直径のコアドリル（ $\phi=d$ ）で氷の成長方向に対して平行・垂直に採取した。平行なものを V、垂直なものを H とし、垂直に採取したものの内で氷の上層部のものを HU、下層部を HD とする。

### (3) 試験方法

作成された供試体を一定の載荷速度で一軸圧縮試験を行い、基本的な物理的性質（ヤング率、塩分濃度、密度）、一軸圧縮強度を測定し、 $d/a$ 、コア径  $d$ 、供試体の採取方向・採取位置による影響を解析した。また、試験時にカメラ・ビデオで撮影することにより、供試体の破壊モードを調べた。なお、実験条件は以下の表の通りである。

表－1 実験条件

|               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| 室温            | －10℃(常に一定)                         |
| ひずみ速度         | 10 <sup>-3</sup> sec <sup>-1</sup> |
| 供試体（コア）径      | d=45,75,100,150,300(mm)            |
| 供試体高さ         | 供試体（コア）径の2倍                        |
| Ice block 代表長 | a=22.5,35,42.5,75 100(mm)          |

### 3. 実験結果及び考察

#### (1) 再凍結氷の物理的性質に関する考察

##### a) 密度、塩分濃度

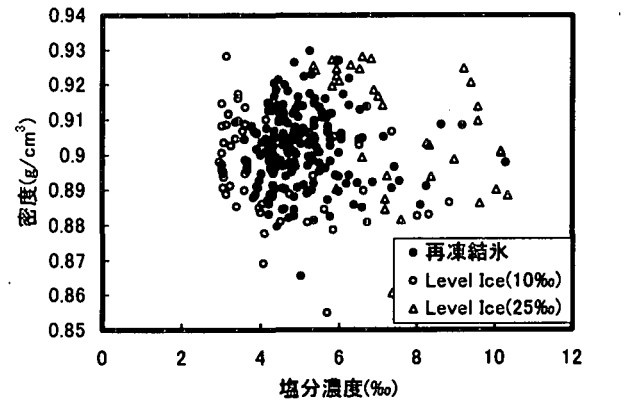


図-1 塩分濃度と密度の関係

再凍結氷と Level Ice の塩分濃度と密度の関係はそれぞれ図-1 のようになった。両者とも明確な相関性はなかった。再凍結氷の密度、塩分濃度において供試体の採取方向・採取位置による影響を調べたが大きな相違は見られず、さらに個別に供試体のコア径  $d$ 、 $d/a$  による影響も調べたが、それによる依存性も見られなかった。また全体として密度、塩分量は正規分布に従っていた。一方、Level Ice は若干の相違が確認されたが、平均的には Level Ice と再凍結氷はほぼ同一の塩分量と密度を有している。

本実験での再凍結氷の場合、

- ① 間隙が ice block の近傍から比較的早く凍りやすく、明確な結晶軸方向を持たず全体的に等しい割合で塩分量が局部的に捕捉されている可能性がある。
- ② 各供試体の内部の ice block は等しい確率分布をもった密度、塩分量を有し、すべて等しい寸法をもつ立方体でランダムな状態で互いに接している

ということを考えれば各供試体の密度、塩分量は位置、方向に依存せず、巨視的には概ね同一の母集団に属しているものと考えられる。

#### b) 間隙率

固結層の強度に影響を及ぼす主な要因は、間隙率 (porosity) と間隙の形状であり、実際他の研究者にも指摘されている。間隙率とは再凍結氷の単位体積中に占める ice block 以外の割合で、間隙の形状が鋭く、間隙率が大きいほど、応力拡大係数が増大し、また応力集中する個所が増大するため、ある荷重下で破壊する機会（確率）が増大する。すなわち強度が低下する。本研究は、上述したように

- ① 各供試体の塩分量、密度は、コア径  $d$  及び  $d/a$  に依存しない
- ② 各供試体の内部の ice block はすべて等しい寸法をもつ立方体でランダムな状態で存在している

であり、「各供試体の間隙率は  $d$  及び  $d/a$  によらず、同じ確率で実現し、形状ほとんどは同じ」と考え、間隙率、形状の影響は特に考えない事とした。

#### (2)再凍結氷の強度特性に関する考察

##### a)強度における巨視的等方性

まず図-2 に氷の成長方向に垂直に抜いた各供試体の強度（ $\sigma_h$ ）（上層・下層の平均）と氷の成長方向に平行に抜いた各供試体の強度（ $\sigma_v$ ）との関係を示す。なお各々の強度試験は一ケースあたり4～8本行われたが代表値としてその平均値を採用している。●は再凍結氷であり、○、△は Level Ice（平坦氷）である。図-1より Level Ice は  $\sigma_v/\sigma_h=1$  の直線から比較的大きくずれており、 $\sigma_h$ より  $\sigma_v$ の方が大きく、従来の結果と同様である。一方では再凍結氷においては、ほぼ  $\sigma_v/\sigma_h=1$  の直線に沿っており、両者にあまり差が無いことを示している。次に氷の成長方向に垂直に抜いた供試体のうちで、

同一ケース (d 及び d/a) の上層( $\sigma_u$ )及び下層 ( $\sigma_d$ ) の位置における供試体の強度の関係を調べた (図-3). 図-1より、Level Ice に比べ、再凍結氷のほうが上下層の位置による強度の差は少ないといえる。

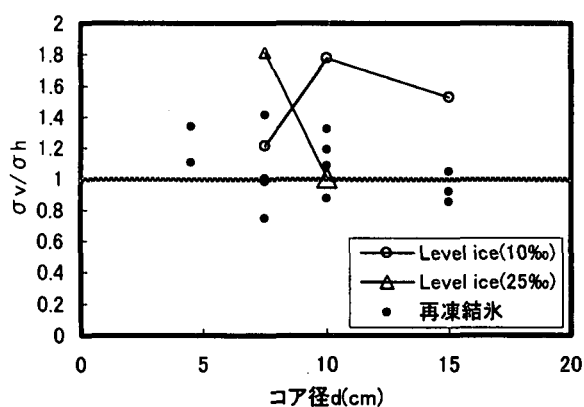


図-2 採取方向の違いによる強度差

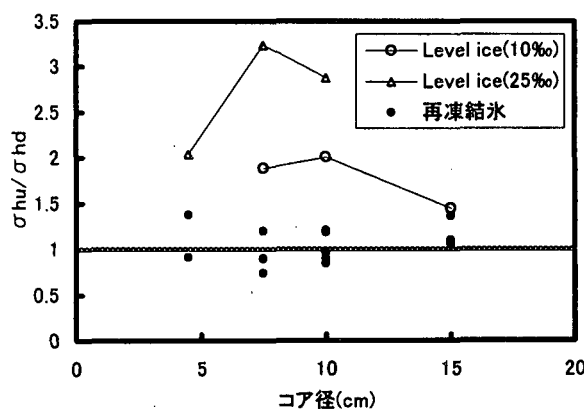


図-3 採取位置の違いによる強度差関係

一般に Level Ice は異方性で、結晶軸の向きや結晶の大きさによって強度が異なり、すなわち氷の向きや位置によって強度が大きく変化する。一方、再凍結氷は氷の方向や位置によってあまり変化がないということが言える。すなわち、すでに結晶が形成された ice block がランダムに入り交じっているため、特定の方向を持たない結晶軸や、特定の大きさを持たない結晶が、同様に確からしい割合で存在しているためであると推論される。

### b) 破壊モード

破壊モードは目視及びビデオ撮影によって確かめられた。まず Level Ice において氷の成長方向に垂直に抜いた供試体は脆性的で爆発的なせん断割れ (破壊) が、氷の成長方向に平行に抜いた供試体は縦割れが多くみられた。これは従来の破壊モードと同様である。一方、再凍結氷の破壊は氷の採取方向・位置に無関係に延性的なものが目立った。

また、載荷時の再凍結氷のクラック発生箇所は ice block 内部、ice block との界面など様々であっ

た。目視及びビデオ撮影であるので破壊に支配的なクラックは不明であるが、 $d \geq 10$  で d/a が大きくなるにつれ間隙部や ice block と間隙部の界面での破壊が目立つようになった。このとき破壊氷片のサイズが ice block のサイズに匹敵するものも多いことから界面破壊・間隙部の破壊が支配的なものが多いと推察される。S. I. Rogachoko 等<sup>4)</sup>の実験室内での Ridge ice (hummock model) の貫入試験においてもこの間隙部での破壊が観測されている。これは主として

- ① 隣接する ice block または間隙の結晶組織の違いによるヤング率の相違、すべり
- ② 間隙部における局部的に捕捉されている高濃度の塩水 (ブライン) に起因する応力集中による局部破壊

等が考えられる。

逆に  $d \geq 10$  で d/a が小さい時は ice block 内部が多かった。これは同じ寸法の供試体に対して ice block が大きくなるのと同等であり、ice block 自体が結晶粒径の大きい弱い部分を含んでいるためと推測できる。

### c) d/a の変化による強度特性

図-4 に各コア径 d を固定したときの d/a の変化による再凍結氷の強度の推移を示す。この図-1より、d/a が 2 より小さい時、その値が小さくなるにつれて強度は低下傾向を示した。これは、d/a が小さくなると間隙または界面部がクローズアップされたり、高濃度の塩水 (ブライン) に起因する応力集中による局部破壊の影響がかなり効いてくるためと思われる。一方、d/a が大きくなるにつれて強度が若干増加傾向を示しており、これは界面の増加によるものと考えられるが、その程度は僅かである。これらの兼ね合いかどうか明確な理由は不明ではあるが  $d/a \approx 2$  で最大値をもつ傾向となった。しかし、コア径 d が大きくなるにつれ d/a による強度差が小さくなったり、図-5 にも示すように、ある d/a の時コア径 d が大きくなるにつれて強度は低下していることが多く、これは後にも述べるように、寸法効果の影響と考えられ、実際現地レベルでは ice block そのものの大きさは数十 cm～数 m あるので d/a による影響は考慮する必要がないといえる。

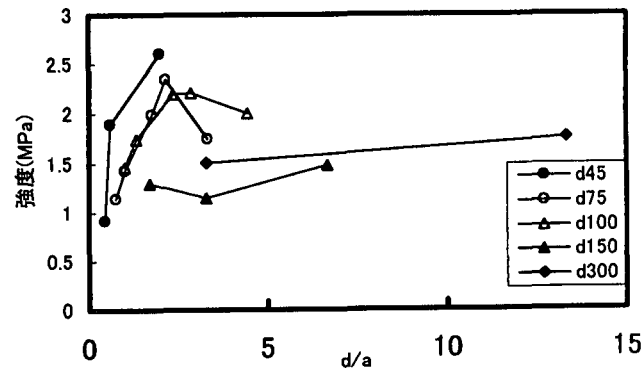


図-4 d/a の変化による強度差推移

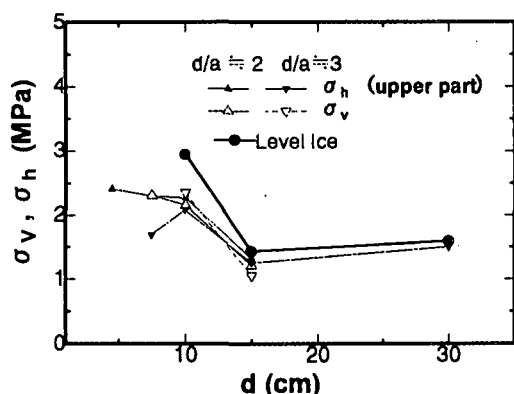


図-5 dの変化による強度推移 (d/a=2,3)

#### d) コア径 d の変化による強度特性

以上のことより得られた強度の結果をコア径についてプロットしたものである。また、濃度の異なる Level Ice についてもプロットした。曲線は累乗近似により求めた。図-6 よりコア径 d が大きくなるにつれて強度は低下傾向にあり寸法効果を呈している。これは氷内部には強度を支配する様々なクラックが存在し、体積が大きくなるにつれてその数は相対的に増加するので、破壊する確率も高くなるからであると思われる。

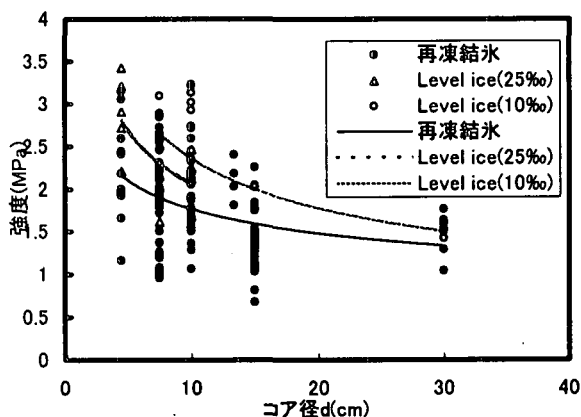


図-6 寸法効果による強度推移

#### e) 再弱リンク説モデルによる強度特性

このように実測値においては寸法効果を呈したが、次に計算値としてこのことを「最弱リンク説」に基づき説明する。氷内部の微視的・巨視的クラック・結晶欠陥を一意にクラックと呼ぶことにし、その強度は確率分布をし、独立していると仮定する。一般に強度は試験片内のクラックの中でもっと弱いクラック強度によって決定されると考えると、クラック強度の確率密度関数を設定しその最小値分布を求めることに帰着する。ここでは途中の詳しい説明は省略するが、母集団の確率密度関数は 3 母数 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) ワイブル分布とすると以下のような結果を得た。

$$E(x) = \gamma + \alpha \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \Gamma(1 + 1/\beta)$$

$$\sigma_x = \alpha \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \sqrt{\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)}$$

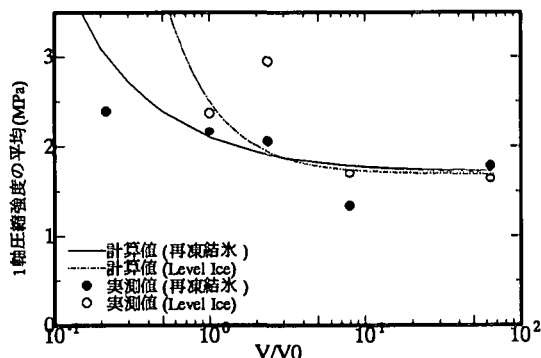


図-7 強度の計算値と実測値の比較 (平均値)

ここで式に現れる母数の物理的解釈は、 $\alpha$ はそのクラックの性状(強度、形状、向き)そのパラツキの程度)、 $\beta$ は強度を支配するクラックのランダム性(均一性係数ともいわれる)、 $\gamma$ は位置係数と解釈でき、最尤推定法により決定した。また、 $V$ は供試体の体積で、 $V_0$ は適当な基準体積である。今、比較的サンプル数の多い  $d=100$  を基準とした場合の平均値についての計算値と実測値を図-7 に示す。図-7 を見てみると、やや実測値と計算値が離れているものがあるが、 $d=100$  の場合のデータしか用いていないにも関わらず、よく寸法効果を表現しているものと考えられる。実測値と計算値が離れているものがあるのは、条件の異なる強度データを強引に同一母集団に組み入れたことや、サンプル数の不足によるものであると思われる。実測値において寸法が大きくなれば強度は低下傾向にあり、ある一定値に漸近することが予想される。この傾向は岩盤・岩石においても報告され、体積が大きくなると巨視的な亀裂や節理が存在するためであるといわれている。氷においてもこれに準じる要因、即ち最弱クラック(極限的に弱い強度)というようなものが存在するならばある程度体積が増えたとこのクラックが含まれてきてそれ以上強度が減少しないと考えることができる。また図-7 より実測値・計算値とも「体積が小さい時、若干 Level Ice の方が再凍結水より強度は大きくなっているが、体積が大きくなれば両者は互いに同程度の強度に漸近する ( $\gamma$  の同一性)」という重要な結果が得られる。これは Level Ice と再凍結水の強度は全く同一視してもよいことになる。また省略したが標準偏差についても同様なことができた。

以上このような方法を用いれば原理的にはわざわざ幾つかのコア径について実験してその曲線や漸近値を求める必要がなく、実験が容易なただ一つのコア径を用いて任意の寸法の強度を推定することができる。

f) 一軸圧縮強度の推定法

一般に氷荷重の推定には一軸圧縮強度がパラメータとして用いられ、 $d=100\text{mm}$  の一軸圧縮強度を代表値として用いられているが、再凍結氷を構成するブロックのオーダーは数  $10\text{cm}$  ～数  $\text{m}$  であり、再凍結氷において  $d=100\text{mm}$  の一軸圧縮強度を代表値として与えるわけにはいかない。一軸圧縮強度はその一つのパラメータに過ぎないから、また十分大きなコア径を用いたとしても、上述したように再凍結氷の強度は Level Ice の強度と一致し、その強度は理論上実験の容易なただ一つの  $d=100$  の強度から漸近値を求めることに帰着する。あくまで構造物に作用する氷力の推定が最終目的であるので、現場の再凍結氷の一軸圧縮強度の推定法として、実験が容易な  $d=75$  あるいは  $d=100$  で ice block そのもの、あるいはその周囲の Level Ice の強度データでその漸近値を求めることが考えられる。また、別の角度からみても再凍結氷の強度は Level Ice の強度より小さいといっても若干程度あり、誤差の範囲に含まれる。現場の不確実性を考慮すれば、再凍結氷の特性を細かく議論するより、むしろ若干大きめの Level Ice の強度と同一視する方が賢明であると思われる。

(3) 強度とヤング率の関係

厳密には本実験の再凍結氷における  $\sigma - \epsilon$  曲線において、破壊点までの領域で下に凸の変曲点が存在し、塑性－弾性－塑性を呈している。大まかには初期接線と、それ以後の直線部分とに分かれるが、本節でのヤング率は後者の方を採用した。

表-2 ヤング率と圧縮強度の相関

|           | H               | V              | All             |
|-----------|-----------------|----------------|-----------------|
| 再凍結氷      | 121/0.28/<br>** | 43/0.54/<br>** | 164/0.37/<br>** |
| Level Ice | 43/0.52/<br>**  | 12/0.73/<br>** | 55/0.69/<br>**  |

表 2 はヤング率と圧縮強度の相関の有無を再凍結氷及び Level Ice についてまとめたものである。ここで、圧縮強度とヤング率が相関があるかどうかについて無相関検定を行った。ここに帰無仮説  $\rho=0$ 、対立仮説  $\rho \neq 0$  とし、仮説が棄却された時には、厳密な表現ではないが、「相関あり」とする。上表において、各セルは、供試体の標本数/相関係数/無相関検定の結果を記しており、\* は 5% 有意水準で相関あり、\*\* は 1% 有意水準で相関あり、× は無相関をそれぞれ表している。検定の結果両方とも幾分、ヤング率と強度の間に相関関係があると判断することができる。次に、再凍結氷と Level Ice を比べてみると Level Ice の方がいくぶん強い相関性を示している。また図-8(a)、(b) は再凍結氷と Level Ice の強度とヤング率の関係をそれぞれすべてプロットしたものである。図-より Level Ice は概ね相関性を示しているのに対して、

再凍結氷はあまり相関性が無いようにみえる。一般にヤング率（弾性率）は強度とは正反対の組織鈍感性または加算的な性質を有しており、即ち再凍結氷においてはその巨視的なヤング率とは個々の構成する ice block または間隙部の氷のヤング率の平均的な値であると考えられる。一方、破壊は組織敏感性を有しており、前述したように、個々の ice block 内部、または局所的な界面破壊が支配的と考えられ、もしヤング率と強度が相関性をもつのなら、破壊が生じるその部分（構成している個々の ice block または間隙部の氷）のヤング率に依存すると考えられる。Level Ice には（巨視的な意味では）ice block、間隙、界面が無く全体として均質とみなせるので、巨視的に見ても局所的に見てもヤング率は工学的には一様とみなせるから、「Level Ice の方が幾分強い相関性を示す」ということを説明できる。

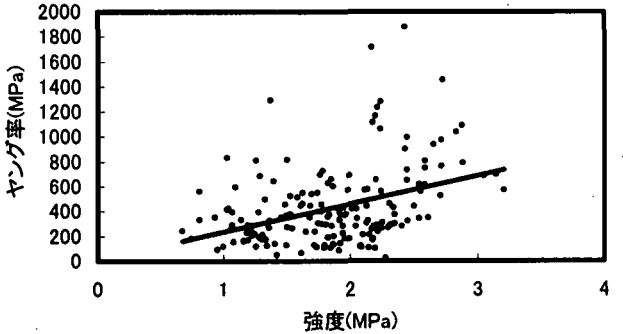


図-8(a) 強度とヤング率の関係(再凍結氷)

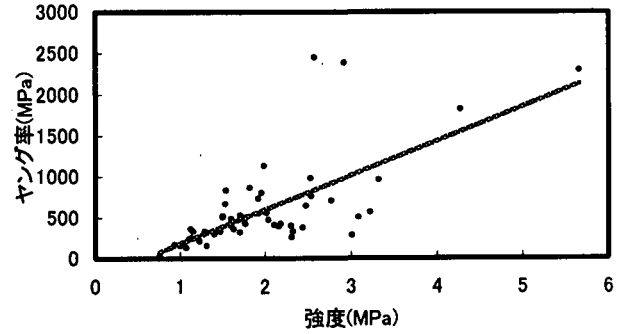


図-8(b) 強度とヤング率の関係(Level Ice)

4. まとめ

- 1. 再凍結氷は Level Ice に比べて氷の位置や方向による強度の差が少ない
- 2. 再凍結氷の破壊モードは ice block 内部のクラック、間隙部の破壊等様々である。また氷の方向に無関係で延性的に破壊する場合が多い
- 3. 多くのケースで Level Ice に比べ再凍結氷の強度が若干小さい
- 4. 供試体径 (d) と ice block の代表長さ (a) の比  $d/a$  が 2 前後で再凍結氷の強度は最大値をもつが、供試体径 (d) が大きくなるにつれ  $d/a$  の影響は小さくなる

5. Level Ice と同様、供試体寸法が大きくなれば再凍結氷の強度は低下傾向にあり寸法効果を呈している

6. 無相関検定の結果、再凍結氷及び Level Ice においてヤング率（圧縮弾性率）と強度は幾分相関を示す傾向にあると推論されるが、Level Ice の方が再凍結氷より比較的強い相関を示すものと考えられる

今まで見たように、再凍結氷に関する強度特性を小規模な模型実験によって調査してきたが、実際のところ、まだ現地に適用できるような汎用性、普遍性をもつ結論が得られたとはいいがく、定性的な性格が残るが、その模型実験を通じて現地に適応できるような以下の重要な 2 点の結論あるいは提案をすることができた。

(a) 再凍結氷の強度特性は巨視的な等方性している。また Level Ice に比べて強度は小さいといっても若干程度で、そのバラツキ、不確定要素をも考慮すれば、氷海域における沖合構造物の設計など、実用上は、再凍結氷の強度は Level Ice 強度と同一視することが望ましいと思われる。

(b) 漸近強度をもって代表値とする。漸近強度というのは、強度の寸法効果曲線において漸近すると予想される値である。これは概ね供試体径  $d=300\text{mm}$  までの強度試験すれば得られると考えられる。また寸法が大きくなるにつれ、Level ice と再凍結氷との強度差は小さくなっていく。従って、未だ一つの提案に過ぎませんが、現地試験では、その Field の氷の強度として、再凍結氷、Level Ice を含め、実験可能な  $d=300\text{mm}$  の供試体の強度を参照するのが、望ましいと思われる。

謝辞：本研究は石油開発技術センター（JNOC）との平成 12 年度技術交流調査のもとに実施されたものである。同社の多大なご支援に対し、記して感謝の意を表します。

## 参考文献

1. A. Prodanovic : MODEL TEST OF ICE RUBBLE STRENGTH, *Proc. of Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions* (POAC-79), Vol. 1, pp. 89-105, 1979.
2. T.T. Wong: SHEAR BOX TESTS ON BROKEN ICE, *Proc. of Port and Ocean Engineering Under Arctic Condition* (POAC-86), Vol. 3, pp. 97-107, 1986
3. M. Lepparanta: FIELD MEASUREMENTS OF THE STRUCTURE AND STRENGTH OF FIRST-YEAR ICE RIDGES IN THE BALTIC SEA, *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (OMAE-89), Vol. 4, pp. 169-174, 1989.
4. S. I. Rogachko et al. : EXPERIMENTS ON THE STRENGTH OF REFROZEN LAYERS OF FIRST-YEAR ICE RIDGES, *Proc. of 15<sup>th</sup> Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions* (POAC-99), Vol. 3, pp. 1066-1075, 1999.
5. R. Stanislav I et al. : THE INFLUENCE OF POROSITY ON MECHANICAL STRENGTH OF HUMMOCKS, *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (OMAE-97), Vol. 4, pp. 151-157, 1997.
6. 木岡信治 : Ice Ridge の強度特性に関する基礎的研究、海洋開発論文集、Vol. 16, pp. 169-174, 2000
7. 木岡信治 : Ice Ridge 強度に関する統計学的考察、寒地技術シンポジウム Vol. 16, pp. 191-198, 2000