

Ice Ridge の強度特性に関する基礎的研究

STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ICE RIDGE

木岡信治¹・安永喜勝¹・佐伯浩²

Shinji KIOKA, Yoshikatsu YASUNAGA and Hiroshi SAEKI

¹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)

²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 教授(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In cold region, the design 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.

We performed a preliminary series of tests(unconfined 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 : Ice ridge, consolidated part, level ice, compressive strength, size effect

1. はじめに

Ice ridge(compaction ridge, shear ridge, hummock)とは互いの平坦氷(level ice)のずり運動、圧力、座屈により発生した破壊氷片(raftered ice, ice block, rubble ice)が上下方向に pile up し、全体として氷脈を形成したものである。その ice block の大きさは様々であり、数十 cm~2m である。その構造は上部の sail, 水面付近の consolidated part, 下部の unconsolidated part で構成される。その固結メカニズムは Ice block 間の圧力融解、ブライン脱落による焼結、せん熱、Keel-sail を通じた熱伝導による間隙部の凍結、等¹⁾で、またそれは Sail や Ice block の形状、寸法、空隙・間隙、気温等の気象条件に左右される。したがって内部構造・熱収支は極めて複雑で、未だ明確にわかっていない。氷海域における沖合構造物の設計荷重(支配荷重)はしばしばこの first-year ice ridge で与えられ、特に consolidated part と呼ばれる破壊氷片が再凍結している部分の強度特性を把握することが重要となる。現状では consolidated part は周辺の level ice よりも1~2倍程度厚いとされ、強度は周辺の level ice と同一と仮定されることが多い。従来から、モール・クーロン材料とみなされる Keel 部(unconsolidated part)について多くの研究者により室内・現地で多数実験が行われ、強度定数として内部摩擦角や結合力(cohesion)が提案されている。一方 consolidated part の強度特性については実験技術・実験

条件等の制約・困難さから、Rogachko 等²⁾による室内・現地での貫入試験・圧縮試験、Stanislav 等³⁾による室内での特に void の影響を考慮した強度試験、等があるが系統的な実験がなされている例は極めて少ない。

本研究は特に consolidated part に注目し、室内実験として、単純化された consolidated part を造り、一軸圧縮試験を行った。その際、様々な破壊氷片(ice block)の代表長、コア径の組み合わせにより、供試体を作成し、系統的な試験を行い、その破壊機構、強度特性を調べた。

2. 実験方法および実験条件

上述したように本来の Ice ridge の構造・物性などは極めて複雑であり、時期・場所によって Ice ridge 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 Ice ridge を再現することは不可能である。まず本実験においては、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状態の氷の性質(強度特性)を調べ、また同じ条件下で作成した平坦氷(構成する ice block)と比較することにより、その基本特性を調査するものである。本実験では便宜上、作成した ice accumulation のことを Ice ridge とよぶことにする。本実験での Ice ridge(consolidated part)の作成方法は以下の手順により行われた。

- 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 (代表長さ a) として多数取り出す。
 - ② 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日放置した。
 - ③ 25%の塩水をいれた水槽 (1200×700×400) を凝固点付近まで冷却させる。
 - ④ 上記の水槽が凝固点付近になればあらかじめ用意した ice block を水槽の所定の高さまで投入した。所定の高さまで凝固すれば (約10日) 水槽から取り出した。また、平坦氷として、その制御は困難であるが、ice block と同じ10パーミルの塩水から同じ寸法の水槽で作成した。
- すべての Ice ridge を同一条件下 (室温、水深、冷凍期間) で作成した。また再現した Ice ridge を下表 (一軸圧縮試験の実験条件) に示すように様々なコア径 (円柱供試体、ice block の組み合わせにより物理試験し、塩分量、密度、一軸圧縮強度、ヤング率等を測定、ice block の代表長さによる影響、寸法効果などを考察するとともにビデオ、カメラにより破壊モードを調べた。

表-1 実験条件

室温	-10℃(常に一定)
ひずみ速度	10 ⁻³ sec ⁻¹
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, 100(mm)

3. 実験結果及び解析結果

まず本実験における供試体の歪み速度、密度、塩分量の平均、標準偏差、変動係数、範囲 (95%信頼区間) を表-1(a)(b)に示す。

歪み速度: $1.2 \times 10^{-3} < \varepsilon < 1.6 \times 10^{-3}$ (95%信頼区間)
平均: 1.4×10^{-3}

表-1 (a) 密度の平均と信頼区間

		μ (g/cm ³)	s	C.O.V	95%信頼区間
R	VU	0.899	0.009	0.01	0.896, 0.902
	VL	0.900	0.009	0.01	0.897, 0.902
	H	0.903	0.009	0.01	0.900, 0.907
	全体	0.900	0.009	0.01	0.899, 0.902
L	VU	0.905	0.010	0.01	0.900, 0.910
	VL	0.891	0.008	0.01	0.887, 0.896
	H	0.912	0.005	0.01	0.907, 0.918
	全体	0.901	0.012	0.01	0.897, 0.905

表-1 (b) 塩分量の平均と信頼区間

		平均(ppt)	s	C.O.V	95%信頼区間
R	VU	4.48	0.31	0.07	4.37, 4.60
	VL	4.32	0.37	0.08	4.20, 4.44
	H	4.68	0.33	0.07	4.52, 4.83
	全体	4.46	0.37	0.08	4.38, 4.54
L	VU	3.49	0.86	0.25	3.06, 3.91
	VL	5.79	1.73	0.29	4.78, 6.78
	H	3.52	0.34	0.10	3.13, 3.92
	全体	4.33	1.64	0.37	3.81, 4.87

注) R: Ridge ice, L: Level ice, VU,VL,H はそれぞれ、氷の成長方向に垂直 (上層、下層) 平行に採取した供試体を示す。

μ : 平均, s: 標準偏差

上表より ridge ice の密度、塩分量とも位置による大きな相違は見られない。また個別に供試体のコア径、d/a による影響を調べたが、それによる依存性は見られず、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 ridge ice はほぼ同一の塩分量と密度を有している。

(1) 強度特性に関する考察

固結層の強度に影響を及ぼす主な要因は、間隙率 (porosity) と隙間(void)の形状であり、実際他の研究者にも指摘されてる。間隙率とは ridge の単位体積中に占める ice block 以外の隙間(void)の割合である。Void 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、

- 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互いに接している (同様に確からしい)。

であり、「各供試体の間隙率は d 及び d/a によらず、同じ確率で実現する」と考え、

- ①各供試体の間隙率は概ね等しいと仮定
 - ②個々の供試体の間隙率を正確に計測することは困難
 - ③上記の強度低下においてその void は空気または未凍結水のことで、本実験の void は凍結している
- の基に、この間隙率の影響は特に考えない事とした。

(a) ridge ice の強度における巨視的等方性質

まず図-1 に氷の成長方向に垂直に抜いた各供試体の強度 (σ_v) (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 (σ_h) 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ridge iceであり、○はlevel ice（平坦氷）である。図よりlevel iceは $\sigma_v = \sigma_h$ の直線化から比較的大きくずれており、 σ_v より σ_h の方が大きく、従来と同様である。一方ではridge iceにおいては、ほぼ $\sigma_v = \sigma_h$ の直線にのっており、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（ σ_u ）及び下層（ σ_d ）の位置における供試体の強度差の割合（パーセンテージ）を調べた（図-2）。図より、level iceに比べ、ridge ice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。

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、ridge ice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。

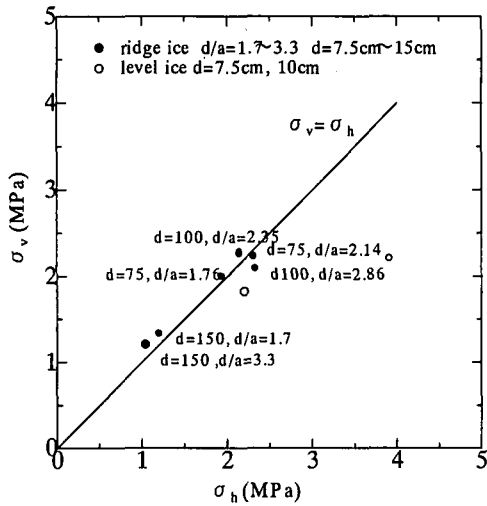


図-1 σ_h と σ_v との関係

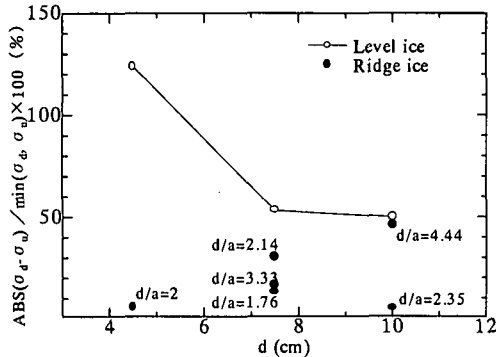


図-2 採取位置による強度の違い

(b) コア径, d/a の変化による ridge ice の強度特性

図-3に d を固定したときの d/a の変化によるridge ice

の強度(σ_v)の推移を示す。なお、縦軸には同じ径の level ice の強度(σ_{10})で割った相対強度を示し、level ice そのものは $d/a < 1$ （図中では $d/a = 1$ ）とし、相対強度は1とした。

この図より相対強度は1より小さく ridge ice の強度の方が小さい。また d/a が大きくなるにつれて強度が若干低下傾向にある。ひとつの原因としては後にも述べるように ridge ice の破壊は構成する ice block との界面で破壊する場合が存在する。この界面の破壊は様々挙げられるが、主として隣接する 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に起因すると考えられる。したがって d/a が大きくなるということは同じコア径（同一のコア体積）に占める ice block の数が増え、また ice block の総（比）表面積が相対的に増大し、破壊しやすい確率が増大するためであると考えられる。しかし図中の座標(1,1)を除けば d/a による変化は僅かである。

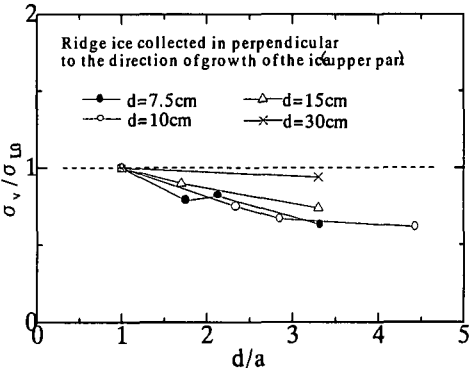


図-3 $d = \text{const.}$ の d/a による強度推移

次に図-4(a)に $d/a = 2$ 及び $d/a = 3$ に固定したときの d の変化による ridge ice の強度の推移を示す。この図より d すなわち供試体寸法が大きくなるにつれ、強度が低下傾向にある。すなわち寸法効果を示している。実験ケース数が少ないので正当に解釈する事ができないが、 $10 < d < 15$ で減少率が顕著であり、それ以降は殆ど変化が無いという見方もできる

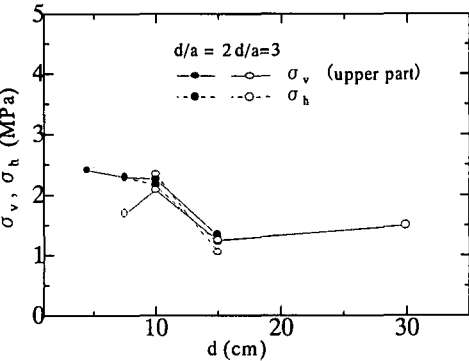


図-4(a) ridge ice の寸法効果($d/a = 2, d/a = 3$)

次に上記の結果より Ice Ridge の強度は採取位置、方向、 d/a による依存性があまり見られない（本研究の範囲内では）ということから、得られた強度結果すべてをコ

ア径についてプロットした（図-4(b)）。これも概ね寸法効果を示している。

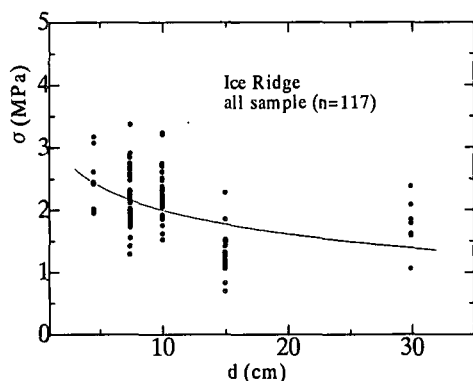


図-4(b) ridge ice の寸法効果 (all sample)

(c) Ice Ridge の強度の確率分布特性

Level ice の強度の確率分布は様々なのが提案されており、場合によっては正規分布として取り扱われる場合もあるが、厳密には対数正規分布（3母数）に従うという見方が一般的である。実際サロマ湖で佐伯らがおこなった強度の確率分布も対数正規分布であったことが報告されている⁴⁾。ここで Ice Ridge の強度の確率分布特性を調べた。なお、各ケースのサンプル数が少ないので上述したように「Ice Ridge の強度は採取位置、方向、 d/a による依存性があまり見られない」ということからこれらのデータを総合的に扱い、同一の母集団に含まれると仮定した。あるいは採取位置、方向、 d/a を含めた Ice Ridge 全体のグローバルな確率分布と考えることもできる。図-5 に各コア径ごとに強度データを対数正規確率紙にプロットしたものを示す。

この図をみると各コア径とも概ね直線性を有していることからこれらは概ね対数正規分布に従うと推察される。なお、各コア径ごとの強度データのサンプル数(25~45)が少ないのでカイ二乗検定は行わなかった。

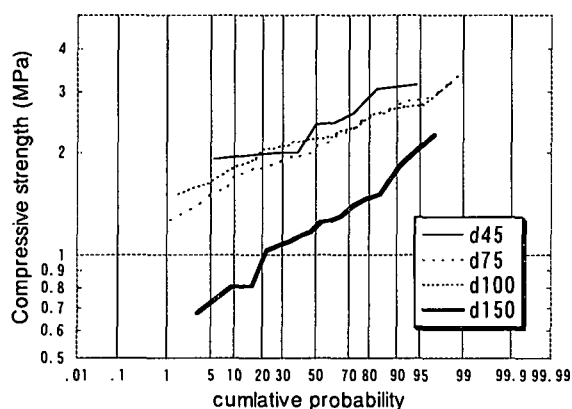


図-5 ridge ice 強度の対数正規確率紙へのプロット

(d) ridge ice 強度のばらつきの程度

ridge ice と level ice の強度のバラツキの程度を調べた。バラツキの指標として変動係数を採用し、図示したもの

が図-6 である。図は省略するが変動係数は若干 d/a による依存性は見られたものの、図-6 からは氷の採取位置・方向、コア径による系統的な違いが見られない。また予想に反して ridge ice の変動係数の方が level ice の変動係数よりも小さくなっている傾向にある（特に $10 < d$ において）。すなわち ridge ice の強度のバラツキの方が小さい。主要因は不明だが、一つには上述した界面破壊により破壊領域が限定され結果として平均化されているとも考えられる。しかしながら各ケースのサンプル数の違いや、現実の ridge ice は構成している ice block や rafted ice 自体（破壊によって生じた）にもクラックが存在することは十分考えられるので断定はできない。

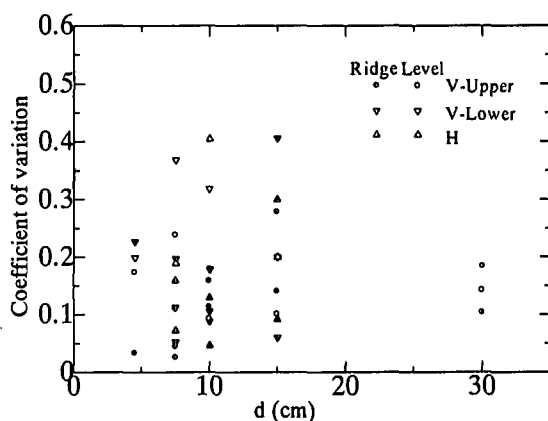


図-6 各実験ケースの変動係数の推移

(e) ridge ice の破壊モード

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 ridge ice 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（特に $10\text{cm} < d$ において）。また載荷時の ridge ice 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り、事実、目視及びビデオ撮影では破壊に支配的なクラックは不明である。しかし、破壊氷片のサイズから ice block のサイズに匹敵するものが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ものと推察される。S.I.Rogachoko 等²⁾の実験室内での Ice Ridge(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。これは上述したように主として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。これらは幾分実現象においても実現しているものと思われる。

(2) ヤング率に関する考察

(a) ヤング率と強度の関係

厳密には本実験の Ice Ridge における $\sigma - \varepsilon$ 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-1 にヤング率と圧縮強度の相関係数を Level ice 及び Ice Ridge についてそれぞれ記す。

表-1 ヤング率と圧縮強度の相関

	All	V(upper)	V(lower)	H
Level ice	0.48	0.13	0.88	0.35
Ice Ridge	0.01	0.01	0.45	0.14

ここに、V(upper)：氷の成長方向に垂直に抜いた供試体（上層）の相関係数、V(lower)：氷の成長方向に垂直に抜いた供試体（下層）の、H：氷の成長方向に平行に抜いた供試体の、All：上記の採取位置・方向をすべて含めた相関係数。

上表より、Level ice において強度とヤング率は弱い相関を示し、Ridge ice はほぼ無相関である。また、すべての場合において、相関係数は Level ice より Ice Ridge の方が小さい。また、両者（Level ice・Ice Ridge）とも、氷の成長方向に垂直に採取した下層側の供試体が比較的高い相関を示しているが、正当な理由は不明である。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 Ice Ridge 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、破壊は組織鈍感性を有しており、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）のヤング率のみに依存すると考えられる。しかるに Ice Ridge のヤング率と強度の無相関性が予想される。

(b) ヤング率の氷の採取位置・方向による依存性

図-7 に氷の採取位置・方向によるヤング率の依存性を示す。図中の添え字は上記のものに対応する。Ice Ridge においては前節の強度程には 1 : 1 に対応しておらず、ばらついているが、このばらつきは図中の線上の上下に分散しており、概して採取位置・方向によるヤング率の依存性に明確な依存性が見られない。一方、Level ice では、比較的直線からずれており片側に偏っている。特に E_v, E_h すなわち、氷の成長方向に垂直、平行に採取した供試体のヤング率の相違が目立ち、 $E_h > E_v$ となっている。これ

は前節（1）(a)に論じたことと、Level ice におけるヤング率と強度の弱い相関性を持つことに対応している。

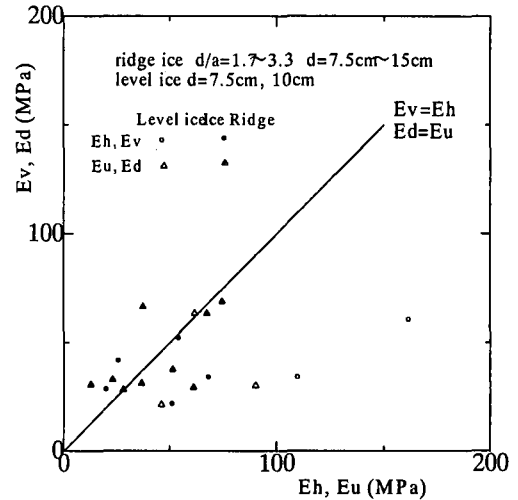


図-7 ヤング率の氷の採取位置・方向による依存性

(c) ヤング率のコア径, d/a による依存性

前節と同様にコア径を固定（一定）した時の d/a による Ice Ridge のヤング率の相違を考察したが、強度の場合とは逆に若干の増加傾向を呈したものの明確な違いは見られなかった。また d/a = 一定の場合におけるコア径による影響を考察したがこれも強度とは異なり、寸法効果を示さなかった。上記のことを踏まえ、 d/a 及び d によるヤング率の推移をすべてのサンプルについてプロットしたものをそれぞれ図-8、図-9に示す。図-8、9からもヤング率のコア径, d/a による明確な依存性は見られない。また Level ice においても同様な傾向となった。

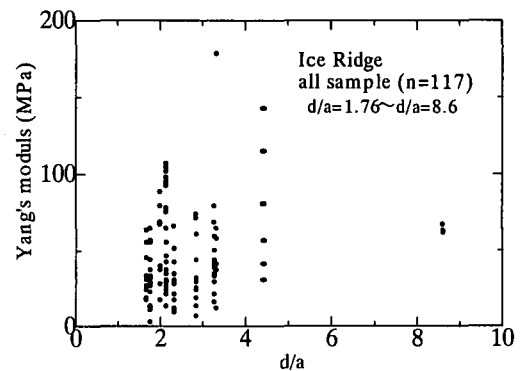


図-8 ヤング率のコア径 d/a による依存性

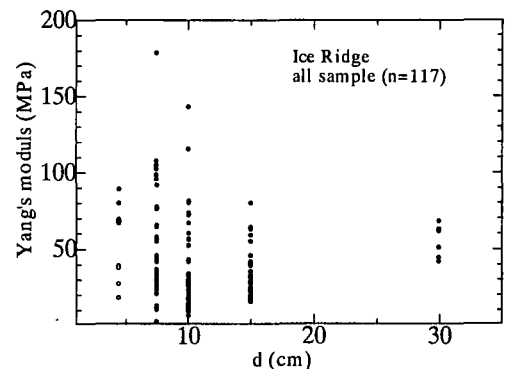


図-9 ヤング率のコア径 d による依存性

(d) ヤング率の確率分布特性

上記のことより本実験において Ice Ridge は氷の位置・方向、 d/a , d について明確な依存性がなく、その個々の関係はランダムにばらついている。したがってすべてのサンプルを同一母集団から採取したものと仮定しその確率分布を調べた。前節と同様に対数正規確率紙にプロットしたものが図-10 である。図より前節と同様、この一連のプロットはほぼ直線性を有していることから対数正規分布に従っているものと推察される。

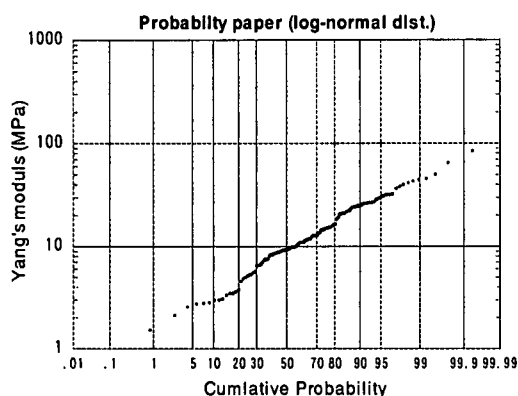


図-10 ヤング率の対数正規確率紙へのプロット

(e) ヤング率のバラツキの程度

図-8~10 から予想されるように、強度の場合に比べて、ヤング率のバラツキは大きい。図-11 に d ごとのヤング率の変動係数の推移を示す。

強度の方は多くのケースで 0.3 以内であったのに対しヤング率は 0.4~0.7 の範囲内が目立つ。一般にはヤング率の組織鈍感性または加算的な性質より強度よりもばらつきが小さいことが予想される。しかし本実験では逆の結果となった。これは $\sigma - \varepsilon$ 曲線の非線型性質からこのヤング率の取り方にばらつきが生じているものと考えられる。また図より概ね、 $E_v(\text{上層}) > E_v(\text{下層}) > E_h$ という順でばらつきが大きくなっており、コア径 d が増加すればばらつきは小さくなる傾向にある。

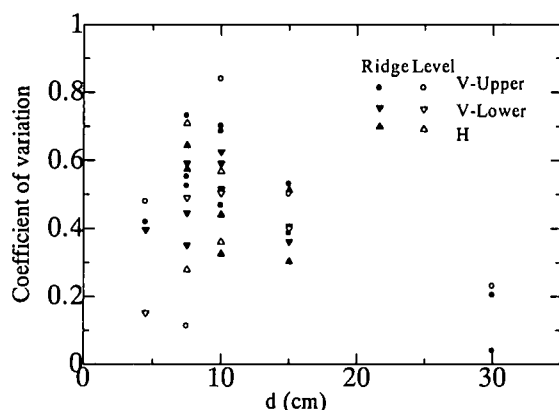


図-11 ヤング率の変動係数の推移

4. まとめ

1. Ice ridge 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. 多くのケースで Level ice に比べて Ice ridge の強度が若干小さい。
3. 供試体径(d)と ice block の代表長さ(a)比 d/a が増加するにつれ Ice ridge の強度は若干減少傾向にあるがその割合は僅かである。また Level ice と同様、供試体寸法が大きくなれば強度は低下し寸法効果を呈した。
4. Ice ridge の圧縮強度は概ね対数正規分布に従う。
5. Ice ridge 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が、間隙部・界面からの破壊が支配的であると考えられる。また特に $10\text{cm} < d$ において氷の方向に無関係で延性的に破壊する場合が多い。
6. ヤング率(圧縮弾性率)において Level ice の圧縮強度とは弱い相関を示したが Ice ridge の圧縮強度とはほぼ無相関である。
7. ヤング率においても、Ice ridge 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。
8. ヤング率の d , a/d に対する依存性は見られない。
9. Ice ridge のヤング率も概ね対数正規分布に従う。
10. 一般に圧縮強度よりもヤング率の方が変動係数が大きく値がばらつく。

謝辞: 本研究は石油開発技術センター(JNOC)の研究助成により達成されたものであり、記して感謝の意を表わします。

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) S.I. Rogachko et al.: EXPERIMENTS ON THE STRENGTH OF REFROZEN LAYERS OF FIRST-YEAR ICE RIDGES, *Proc. of 15th Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions(POAC-99)*, Vol.3, pp.1066-1075, 1999.
- 3) R. Stanislav I et al.: THE INFLUENCE OF POROSITY ON MECHANICAL STRENGTH OF HUMMOCKS, *Proc. of the 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE-97)*, Vol.4, pp.151-157, 1997.
- 4) 正木孝治: 海水強度の変動特性と構造物に作用する氷荷重に関する研究、平成9年度、北海道大学修士論文第2章, 1998.