

Consolidated layer modelの強度特性 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONSOLIDATED LAYER MODEL

松尾優子¹・安永喜勝²・木岡信治³・佐伯 浩⁴

Yuuko MATSUO, Yoshikatsu YASUNAGA, Shinji KIOKA 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 工修 前田建設工業株式会社 (〒102-8151 東京都千代田区富士見2丁目)

³正会員 工博 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴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, given that first-year ice ridges often govern the design load for offshore structure, it is important to obtain knowledge about ice ridges, especially the consolidated layer, in designing offshore structures. Up to now, the physical properties and strength of sea ice ridge appear to be much more complex than those of under formed ice or level ice. In this study, we performed a preliminary series of tests (uniaxial compression tests) in the laboratory on model ice (refrozen rubble) to investigate the strength and physical properties of the consolidated layer.

In order to construct the consolidated layer model, cubical ice blocks of size were randomly arranged in the ice tank filled with saline water that had greater salinity than that of the ice blocks. After they were refrozen, we collected core sample from consolidated layer model by cylindrical drills with various diameters. And we performed the uniaxial compressive test with various combinations of core diameters and representative length of ice block. In addition, we performed test by changing the strain rate and room temperature, when $d=100\text{mm}$, $a=42.5\text{mm}$.

Key Words : consolidated layer, level ice, compressive strength, strain rate.

1. 研究背景

氷海域に計画, 建設される沖合構造物の設計において氷の強度は, 氷の形態, 厚さと共に最も重要な設計パラメータの一つである. なかでも氷海域に存在するIce ridgeは互いの平坦氷(Level ice)のずり運動, 氷圧力等により発生した破壊氷片(Ice block)が上下方向に積み重なって全体として氷脈を形成したものであり, その規模の大きさからFirst-year Ice ridgeはしばしば沖合構造物の設計荷重として与えられている. そこで特に破壊氷片が再凍結しているConsolidated layerの強度特性の把握が重要となる. これまで, 海水強度に関して平坦氷の強度特性に関する研究は多く行われてきたが¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾, Ice ridge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. そのため, 本研究はConsolidated layerに着目し, 室内実験として単純化されたConsolidated layer modelを作

成し, 系統的に一軸圧縮試験を行い, 平坦氷と比較することにより, その破壊機構, 強度特性を把握することを目的としている. 従来から, 木岡, 安永等(2000, 2001)⁶⁾⁷⁾によって行われており, 本研究は特に歪速度, 温度を変化させた場合の条件を追加し, 新たな考察を行ったものである.

2. 実験方法

(1) 供試体作成方法

実際のConsolidated layerの構造・物性等は生成過程によるIce blockの形状, 寸法, 空隙・間隙, または気象条件によって依存するため, 極めて複雑である. そのため, 実験室規模において自然のConsolidated layerを再現するのは困難である. そこで, 本研究において, 単純化し, 等しい条件下で作成したIce blockをランダムにいれ混ぜ, その間隙部が凍結したものをConsolidated layerとし, Consolidated layer

modelと呼ぶものとする。また、Consolidated layer model, 平坦氷, 及び各供試体の作成方法については、木岡, 安永等(2000, 2001)^{6),7)}に記されている。

(2) 試験方法

作成された供試体を用いて、表-1の実験条件に従い、一軸圧縮試験を行った。室温-10℃, 歪速度を $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ において、 d/a , コア径 d , 供試体の採取方向, 採取位置の影響を調べた。なお、歪速度については室温を-10℃に固定して、歪速度のみを変化させ、室内温度については、歪速度を $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ に固定し、-7℃, -10℃, -15℃それぞれにおいて、 $d=100$, $a=42.5(\text{mm})$ の条件で一軸圧縮試験を行った。全ての試験をカメラ・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。

表-1 実験条件

室内温度	-7℃, -10℃, -15℃(常に一定)
ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$	$1 \times 10^{-5} < \dot{\epsilon} < 3 \times 10^{-2} (\text{sec}^{-1})$
円柱供試体(コア)径	$d=45, 75, 100, 150, 300(\text{mm})$
供試体高さ	供試体(コア)径の2倍
Ice block 代表長	$a=22.5, 35, 42.5, 100(\text{mm})$

※供試体体積とIce blockの体積比は0.7としている。

3. 実験結果及び考察

まず、今までの試験結果を以下に簡単に述べる。なお、これ以降氷の成長方向に垂直に採取した供試体の上層部の強度を σ_{hu} , 下層部の強度を σ_{hl} , 氷の成長方向に平行に採取した供試体の強度を σ_v と表す。

(1) 強度特性に関する考察

a) 強度における巨視的等方性

平坦氷において、供試体の採取位置における強度の関係(σ_{hu} , σ_{hl})は上層(σ_{hu})の強度のほうが大きくなった。また、供試体の採取(载荷)方向における強度の関係(σ_h , σ_v)は、 σ_v のほうが大きくなった。これは従来の結果と同様である。以上のことよりLevel iceは異方性で、結晶軸の向きや位置によって強度が大きく変化することがいえる。一方、Consolidated layer modelは供試体の採取方向, 位置による強度の依存性はあまり見られず等方性とみなすことができた。すなわち、一定の結晶軸を持つIce blockがランダムに入り混じっており、間隙部はIce block近傍から凍り始めるため、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確率で存在しているためと推論される。

b) 破壊モード

歪速度が $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーでは、平坦氷において氷の成長方向に垂直に採取した供試体は脆性的なせん断破壊が、氷の成長方向に平行に採取した供試体は縦割れ破壊が多く見られた。一方、Consolidated layer modelは氷の採取方向・位置に無関係に同じ破壊モードを示し、延性的な破壊が多く見られた。ま

た载荷時におけるConsolidated layer modelのクラックの発生箇所はIce block内部, Ice blockと界面等様々であった。目視及びビデオ撮影のため破壊に支配的なクラックは不明であるが、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の多いと推察される。

c) 平坦氷とConsolidated layer modelの強度の比較
平坦氷とConsolidated layer modelについてそれぞれのケースにおいて強度の比較をおこなった結果、両者はほぼ同程度あるいは平坦氷のほうがConsolidated later modelよりも若干大きい強度を持った。

d) V/Va との変化における強度推移

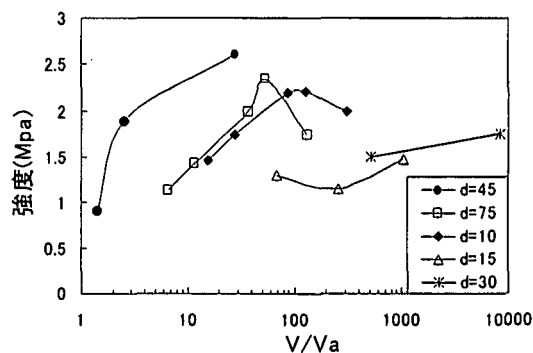


図-1 V/Va の変化における強度推移

木岡, 安永等(2000, 2001)^{6),7)}において、コア径 d とIce blockの代表長 a の比、 d/a による強度変化について考察を行った。その結果 d/a が1付近あるいは1以下で強度は減少する結果となった。本論ではその体積比と強度変化の関係について考察をする。

図-1に V/Va の変化における強度推移を示す。ここで、 V は供試体体積、 Va は1個のIce blockの体積である。

図-1において、 V/Va が50付近より小さい場合強度は急激に減少する。逆に V/Va が50付近よりも大きい場合分散分析により強度は V/Va には依存しないという結果を得た。この原因として、Ice blockがほぼ立方体であったことを考慮すれば、供試体体積が1個のIce blockの体積に対して小さい、すなわち V/Va が小さい場合には弱点とされるIce block間の境界面もしくはIce blockと間隙の境界面は、供試体に対してフラットな面を形成しやすく、主としてその面に沿った破壊が支配的であると考えられる。また、これらの境界面の向きにも依存するであろう。事実、 V/Va が50以下では強度のパラッキが増加した。 V/Va が1付近に近づくときこれはIce blockそのものの強度を示すことが考えられる。しかし、このような状態でさえ、供試体の中には少ない確率になるがIce blockと間隙部の境界面は存在しえるため、供試体に含まれるIce blockの境界面の主方向などの状態に依存する可能性がある。事実 V/Va が50以下では同一条件では強度のパラッキは大きい。

以上より、 V/Va が50付近以下で強度は低下し、それ以上では大きな差はないという結果が得られた。

e) 寸法効果による強度推移

得られた強度をコア径について調べた結果、コア径d(供試体体積)が増加するにつれ強度は低下傾向にあり、一定値に近づくことが予想された。これは氷内部に強度に影響を及ぼすような様々な欠陥やクラックが存在し、体積の増加とともに相対的にその数も増加するためと考えられる。また極値統計論を用いて、この寸法効果を評価し、体積が大きくなった時の強度の漸近値を推定する手法を示した⁷⁾。

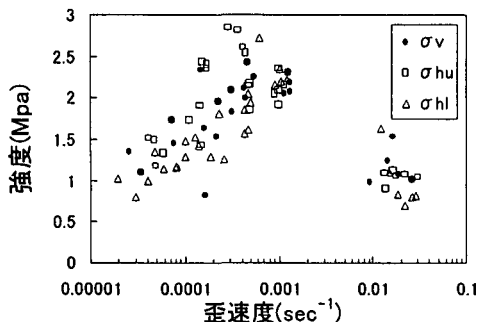


図-2 歪速度と強度の関係 (Consolidated model)

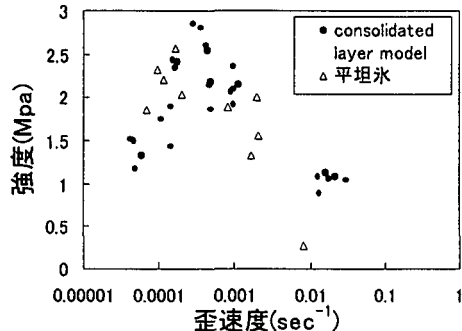


図-3 歪速度と強度の関係 (平坦氷とConsolidated layer model, σ_{hu})

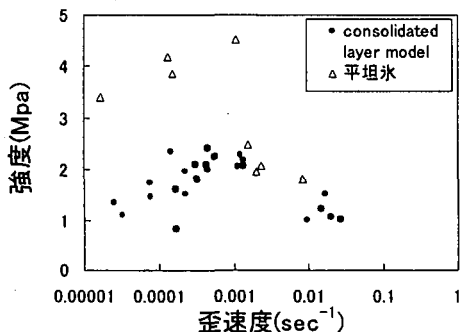


図-4 歪速度と強度の関係 (平坦氷とConsolidated layer model, σ_v)

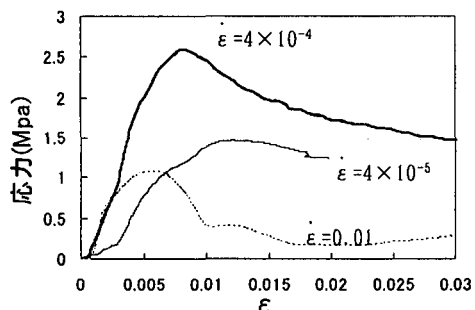


図-5 歪速度変化における応力歪曲線 (Consolidated layer model)

(2) 歪速度の変化に関する考察

a) 歪速度による強度特性

次に、Consolidated layer modelについて、室温-10℃、d=100、a=42.5(mm)のケースにおいて、歪速度を変化させて試験を行った。図-2に歪速度と強度の関係を示す。図-2より、歪速度が増加するにつれ、一軸圧縮強度は増加傾向にあり、採取方向、採取位置に関係なく歪速度が約 $4 \times 10^{-4}(\text{sec}^{-1})$ 付近でピークを持ち、それ以降は減少傾向にあった。また、平坦氷についても同様に試験を行った。図-3と図-4に強度と歪速度の関係について、Consolidated layer model、平坦氷共にそれぞれ示す。図-3と図-4からわかるように、平坦氷はConsolidated layer modelとほぼ同様な傾向を示し、歪速度が約 $4 \times 10^{-4}(\text{sec}^{-1})$ 付近でピークを持った。以上よりConsolidated layer modelと平坦氷においてでは強度のピーク値を示す歪速度の値はほぼ同じであることが確認された。

b) 破壊モード

図-5にConsolidated layer modelの歪速度 $\dot{\epsilon}$ の変化における応力歪曲線を示す。図-5からわかるように $\dot{\epsilon}$ が $10^{-5}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーでは延性的な破壊が目立ち、シャープなピークをもたない。また強度のピーク値を示す歪速度を含む $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーでも未だ延性的な破壊を示し、 $\dot{\epsilon} = 0.01(\text{sec}^{-1})$ 付近でようやく脆性的破壊となり、巨視的な崩壊に至った。その場合の破壊性状は採取方向に無関係に、平坦氷の成長方向に平行に採取した供試体と類似の破壊モードを示した。また、歪み速度が小さいとき、Ice blockと間隙部の境界における破壊が顕著であったが、歪速度が大きく脆性破壊を起こす場合にはIce blockと間隙部の境界面の影響はあまり見られなかった。以上のことは、図-5より、荷重ピークを示す歪量とピーク後の残留強度の履歴からも推察される。一方、平坦氷では、強度がピーク値をとる歪速度のオーダー以上で脆性的な破壊を示し、従来から報告されている傾向を示した。

このように、Consolidated layer modelと平坦氷では同程度の歪速度領域でピークを示すものの、破壊機構は大きく異なる事が明らかになった。

c) 平坦氷とConsolidated layer modelの強度の比較

歪速度 $\dot{\epsilon}$ の変化における平坦氷とConsolidated layer modelの強度については、氷の成長方向に垂直に採取した上層の供試体については両者ともほぼ同程度になった。また、氷の成長方向に平行に採取した供試体については、平坦氷の強度のほうが大きくなった。

以上のことから、Consolidated layer の強度を推定する上で平坦氷の強度を用いることは安全側をとることになるといえる。

(3) 水温変化に関する考察

Consolidated layer modelについて、歪速度 $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ 、d=100、a=42.5(mm)のケースにおいて、室温-7℃、-

10℃, -15℃とそれぞれ変化させて試験を行った。図-6に氷温と強度の関係を示す。強度は各ケースにおける平均値で表す。図-6より、氷温が低下するに従って、強度は増加傾向にあり、過去の研究者によって平坦氷について報告されている結果とほぼ同様な結果を示した。

図-7に氷温変化における応力歪曲線を示す。図-7からわかるように、氷温が-7℃のとき、Ice block間のクラックが目立ち延性的な破壊となり強度が急激に小さくなった。氷温-15℃のとき、Ice block間のクラックはあまり見られず、脆性的な破壊が目立った。これも、歪速度が速いときと同様、平坦氷の氷の成長方向に採取した供試体の破壊モードと類似する傾向を示した。

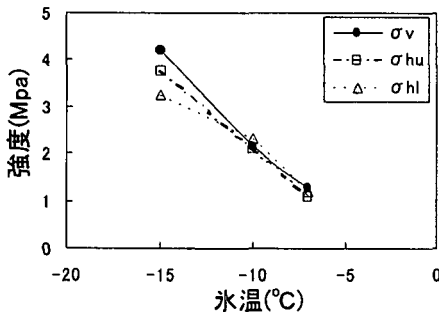


図-6 氷温と強度の関係
(Consolidated layer model)

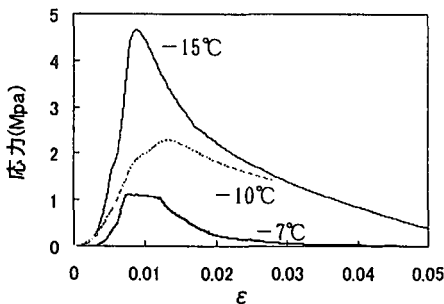


図-7 氷温変化における応力歪曲線
(Consolidated layer model)

(4) 重回帰モデルを用いた Consolidated layer model の強度特性における定量評価

a) 従来の結果を用いた重回帰モデル

これまで述べてきたように、氷の強度は様々なパラメータに依存する。ここでは、線形重回帰分析により、計測可能なパラメータをすべて考慮し、Consolidated layer model の強度に及ぼす、各パラメータ(説明変数)の寄与(標準回帰係数による)を定量評価する。なお、平坦氷のデータと比較するため、平坦氷では温度変化における実験は行っていないので、ここでは温度変化における Consolidated layer model のデータを取り扱わないとする。

まず、重回帰モデルとして、次式に示す母数について線形な回帰式を考える。

$$y = a_0 + a_1 x_1^\alpha + a_2 x_2^\beta + \sum_{i=3}^7 a_i x_i \quad (1)$$

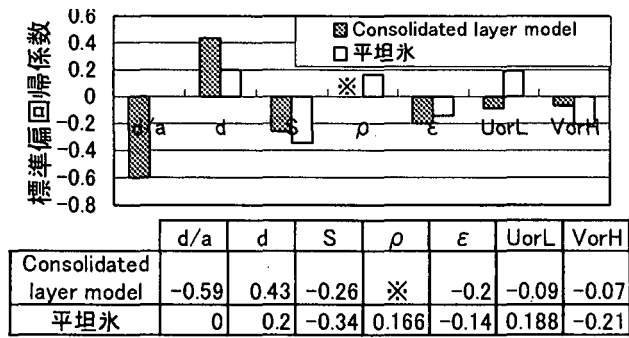
ここに、 y は強度(Mpa), a_i は回帰係数, x_i はパラメータ $x_1 = d(\text{cm})$, $x_2 = d/a$, $x_3 = \text{歪速度}(\dot{\epsilon})(1/s)$, $x_4 = \text{密度}(\rho)(g/cm^3)$, $x_5 = \text{塩分量}(S)(ppt)$, $x_6 = \text{採取位置(上Uor下L)}$, $x_7 = \text{採取方向(成長方向に垂直Hor平行V)}$ で表す。 x_6, x_7 は数量化し、 $x_6 = (\text{上層}:1, \text{下層}:-1, \text{中間もしくはどちらでもない}:0)$, $x_7 = (\text{H}:1, \text{V}:-1)$ とする。平坦氷については d/a の概念がないので $a_2 = 0$ とした。

式(1)において、 d と d/a については前節の結果から非線形関数(べき乗)と仮定、また歪み速度、塩分量、密度については、上述したよう形式上は一定としており、実際その範囲も大きくないので線形関数とする。ここで α 及び β の値は予めしらみつぶし法により、回帰の有意性が示されるうち、重相関が最も高いものとなるよう算定した。この時 α, β の値は、Consolidated layer modelの場合; $\alpha = -0.3, \beta = -1.4$, 平坦氷の場合; $\alpha = -0.4$, を得た。このモデル式は場合により非線形重回帰モデルと呼ばれることもあるが、線形変換すれば、線形重回帰分析に帰着する。本節においては一般には線形変換可能な形、あるいは母数に対して線形であるものは線形回帰モデルとみなす。もし α, β も推定されるべき未知母数であるとみなせば、これは母数に対して非線形となるから非線形重回帰モデルとなる。一般に、回帰モデルに無駄な変数(真の回帰係数が0であるような場合)が含まれる場合、誤差分散の推定値の自由度が小さくなって、母数の推定精度は悪くなる。逆に必要な変数が含まれない場合、誤差分散は過大評価となり、同じく推定精度が悪くなる(これについては上述したよう、これ以上の変数採用は困難であるので、他のパラメータによる強度の影響は正規分布に従う誤差項にプールしているものと考え)。また説明変数間における互いの相関が高い場合、すなわち多重共線性がある場合にも推定精度は悪くなる。ここでは、まず上記の全ての説明変数を採用し、変数減少法によって、上記の問題点に対応した。

以上のようにして推定された標準偏回帰係数を、従来の結果を用いて Consolidated layer model および平坦氷の場合について、図-8に示した。

分散分析より、Consolidated layer model および平坦氷の場合の重回帰モデルによる予測値と測定値との重相関係数はそれぞれ0.7736, 0.6935であった。また、両者とも有意水準1%で重回帰式の当てはまりは有意となり、概ね良好な結果が得られた。また変数減少後の多重共線性はなかった。まず Consolidated layer model と平坦氷の標準偏回帰係数について考察する。この係数は各パラメータが強度に及ぼす寄与の度合いを示すものと解釈される。上述したよう強度は $d, d/a$ のべき乗で、 α, β は負値

であるので、標準偏回帰係数が正の時、強度は下に凸の関数となる（逆に負の時はい上に凸）。また、歪速度、塩分量、密度についてはその係数が正の時、強度が増加することを表す。また採取位置については、定義により、もし係数が正の時、上層の方が強度が大きい事を示し、一方、採取方向についてはその係数が正の時、氷の成長方向に垂直に採取した供試体の強度が大きい事を示す。Consolidated layer modelに関しては、 d 、 d/a の寄与が比較的高く、強度はコア径 d について下に凸、 d/a については上に凸な形状となる。また歪み速度、塩分量が増加すれば強度は減少し、一方、密度が増加すれば強度も増加す



*は変数減少法によって削除された値を示す。

図-8 標準偏回帰係数の比較
(Consolidated layer modelと平坦氷)

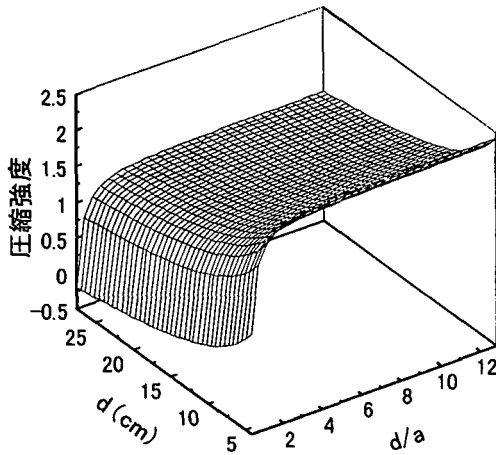
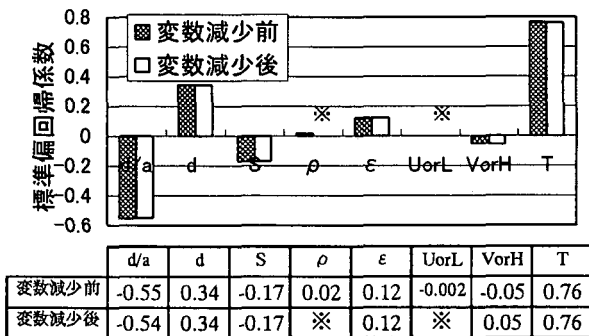


図-9 重回帰によるConsolidated layer model強度予測(d 及び d/a について)



*は変数減少法によって削除された変数を示す。

図-10 強度に関する標準偏回帰係数
(Consolidated layer model)

る。しかしながら、密度に関する寄与は極めて小さく、変数減少法によって削除されている（回帰に有意でない）。これは、密度の変動が極めて小さい、あるいは密度は塩分量と相関がある（多重共線性）によるものと考えられる。次に平坦氷について考察すると、Consolidated layer modelと同様、強度はコア径 d について下に凸、また歪速度、塩分量が増加すれば強度は減少し、一方、密度が増加すれば強度も増加する。また採取位置については上層の方が強度は高く、採取方向については、成長方向に平行に採取した場合の強度の方が大きくなっている。平坦氷については従来から多くの系統的な試験が行われており、本分析結果も、この既存する結果とほぼ同様な傾向を示した。また、Consolidated layer modelの強度は平坦氷の強度に比べて採取位置・方向による依存度が小さくなっているが、これについても前節までの議論を反映している。また、一例として、 d と d/a によるConsolidated layer model強度の予測値の変化を図-9に示す。ただし、この時、歪速度、塩分量、密度は平均値に固定し、 $(H,V)=(1,1)$ の場合のものである。図-9より、 d 、 d/a に関して強度は非線形な関係となっていることが分かる。これより、供試体寸法の増大とともに強度は減少して、ある一定値に漸近することが推察される。また d/a に関しては、その値が1付近以下で急激に強度が減少する。

b) 温度、歪速度を考慮した重回帰モデル

次に、Consolidated layer modelにおいて氷温、歪速度変化のデータをさらに追加して分析を行った。歪速度については、範囲が広い(2)式に示すよう対数を用いた。また、モデルを単純化するため、歪速度が約 $4 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ 以降(ピーク後)のデータは取り扱わないこととした。さらに、(1)式に説明変数として $x_8 = \text{氷温} |T| (\text{°C})$ を追加している。

$$y = a_0 + a_1 x_1^\alpha + a_2 x_2^\beta + a_3 \log(x_3) + \sum_{i=4}^8 a_i x_i \quad (2)$$

図-8に推定された標準偏回帰係数と、変数減少前と変数減少後の値を示す。またこのとき $\alpha = -0.4$ 、 $\beta = -1.2$ となった。分析結果より、Consolidated layer modelの場合の重回帰モデルによる予測値と実験値との重相関係数は0.8574であった。また、有意水準1%で重回帰式の当てはまりは有意となり、概ね良好な結果が得られた。一方、図-10より標準偏回帰係数の符号から考察すれば、 d/a 、塩分量 S が増加するにつれ、強度は減少傾向にあり、コア径 d 、歪速度 ϵ 、氷温 $|T|$ の増加とともに、強度が増加傾向にあり、特に d/a 、コア径 d 、氷温 $|T|$ の強度に対する影響が非常に強いことがわかる。しかしながら、密度 ρ 、採取位置(UorL)に関する寄与は極めて低い。以上の結果から、Consolidated layer modelは d/a 、コア径 d 、氷温に着しく依存することが確認できた。

4. 主要な結論

以上をまとめると以下のような結果になった。

1. Consolidated layer modelは平坦氷に比べ、氷の位置や方向による強度の差が少ない。
2. 供試体体積 V とIce block1個の体積 V_a との比 V/V_a が50付近以下では強度は大きく現象するが、それ以上では V/V_a の影響は小さくなる。
3. 平坦氷、Consolidated layer modelともに、供試体寸法が大きくなれば強度は低下傾向にあり寸法効果を呈しており、両者はほぼ同程度の値に漸近する。
4. 平坦氷とConsolidated layer modelの強度では、どのケースにおいても、平坦氷の方が若干大きい、ほぼ同程度の強度を示した。
5. 本実験条件下における歪速度において、Consolidated layer modelと平坦氷ともに、強度がピークを持つ歪速度領域はほぼ同程度であった。
6. $10^{-5}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーでは延性的な破壊が目立ち、明確なピークをもたない。また強度のピーク値を示す歪速度を含む $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーでも未だ延性的な破壊を示し、 $\dot{\epsilon} = 0.01(\text{sec}^{-1})$ 付近でようやく脆性的破壊となり、巨視的な崩壊に至った。その場合の破壊性状は採取（載荷）方向に無関係に、平坦氷の成長方向に平行に採取した供試体と類似の破壊モードを示した。
7. 氷温変化におけるConsolidated layer modelにおいては氷温が低いほうが強度は高くなり、平坦氷とほぼ同様な傾向を示すことが明らかとなった。氷温が -7°C のとき、Ice block間のクラックが目立ち延性的な破壊となり強度が急激に小さくなった。氷温 -15°C のとき、Ice block間のクラック

クはあまり見られず、脆性的な破壊が目立った。これも、歪速度が速いときと同様、採取（載荷）方向に無関係に、平坦氷の氷の成長方向に採取した供試体の破壊モードと類似する傾向を示した。

8. 重回帰分析の結果、Consolidated layer modelの強度において特にコア径、 d/a 、氷温に対する依存が著しいことが推察された。

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 8th 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 15th 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 8th 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, 2001.
- 7) 安永喜勝: 再凍結氷の強度特性に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol.17, pp.601-606, 2000.