

海洋構造物に及ぼす氷荷重を評価するために必要な 変形氷固結層の定常クリープ特性について

ON THE PROPERTIES OF STEADY-STATE-CREEP ON CONSOLIDATED LAYER OF
DEFORMED ICE TO ESTIMATE ICE LOAD ACTING ON OFFSHORE STRUCTURE

竹内貴弘¹・木岡信治²・河合孝治³

Takahiro TAKEUCHI, Shinji KIOKA and Takaharu KAWAI

¹正会員 工博 八戸工業大学大学院工学研究科 (〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

²正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 工修 (社) 寒地港湾技術研究センター (〒001-0011 札幌市北区北11条西2丁目10-4)

Offshore structure in ice-covered sea areas suffers from a load due to sea ice movement. Deformed ice such as rubble ice and ridge ice might give a larger load than level sheet ice due to larger thickness. Consolidated layer of deformed ice becomes more important part for ice load estimation than sail and keel parts, due to higher strength, under especially small deformation rate. Therefore, creep tests using ice blocks modeled consolidated layer of deformed sea ice were conducted under constant loading in cold room, and the effects of normal pressure and ice block size, of which consolidated layer composed, were investigated under constant ice temperature. Also, the applicability of Norton's (Glen's) law to secondary creep was investigated for various size of ice block.

Key Words ; sea ice, deformed ice, consolidated layer, ice load, offshore structure

1. 研究目的

多年氷が発生しないサハリン沿岸やボスニア湾などの氷海域においては、沖合の海洋構造物に作用する氷荷重を検討する場合にはfirst-year ice ridgeやhummock iceの移動に伴って発生する外力を推定することが極めて重要である。first-year ice ridgeは、未固結層のsail部分とkeel部分、さらに、固結層のconsolidated layerと呼ばれる破壊氷片が再凍結している部分から構成される^{1)~3)}。この変形氷固結層をモデル化した遷移域(歪速度)での室内強度試験によれば、その圧縮強度は平坦氷のそれより若干小さな値を示す⁴⁾。また、著者ら⁵⁾が行ったモデル化した変形氷固結層の供試体を用いた室内の氷板貫入試験から、固結層厚(h)と貫入速度(V)とするとそれらの比(V/h)が小さいductile条件下($V/h < 2 \times 10^{-3}/s$)では、構造物と氷との接触面積の増加やマイクロクラックの発生領域の拡大などが原因となり、全体氷荷重はbrittle条件下に比較し大きくなることを報告した。このため、海洋構造物に作用する氷荷重の評価に当たっては、固結層厚(h)がそれら周辺の平坦氷厚に比較して数倍程度に大きくなることから、この条件が卓越した氷荷重を与える可能性がある。よって、変形氷固結層を用いたクリープ特性の評価が必要とされる。

一方、Sodhi et al. (1998)は、図-1のような氷と構造物の相互作用状態を想定し、定常状態で発生する氷荷重を導いた⁶⁾。この場合、氷の変形はMaxwell モデルに従うとし、ダッシュポットで表現される定常クリープ状態にある応力と歪速度との関係が“べき乗法則”に従うとしている。上述した変形氷の固結層の氷荷重の評価にあたっては、この固結層の定常クリープ状態の応力と歪速度との関係の評価が必要があるが、これまでは変形氷固結層のクリープ特性に関する研究は皆無である。

本研究では、室内低温室においてIce blockを再凍結することでモデル化した変形氷固結層の供試体を用いたクリープ試験を行った。ここでは、一定応力と歪速度との関係や、それらに影響を与えると考えられる固結層を形成するIce block size (a) や載荷応力が供試体の変形に与える影響を実験的に検討したので、それらの結果を報告する。

2. Maxwellモデルを用いたSodhi et al.⁶⁾の報告

図-1は海氷と構造物の相互作用形態である。氷板を楔型としているのは、実海域での氷板先端部分の形状

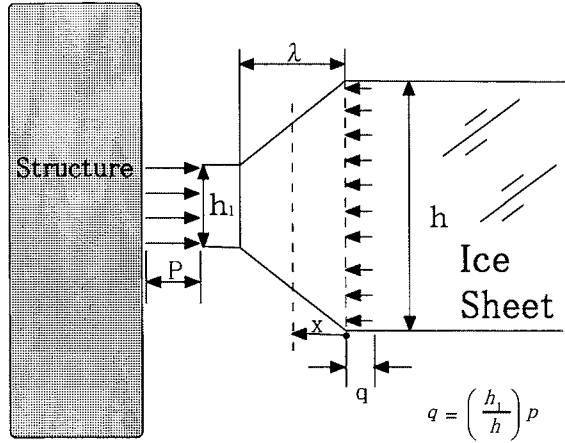


図-1 海氷と構造物の相互作用形態「側面側」
(構造物の奥行き幅 W 、氷板は奥行き・右側方向へ半無限大とする)

が理想的にフラットとなることはほとんど無く⁷⁾、また、構造物の氷板への貫入過程を考慮し図-1に示す氷板形状を初期条件としている。

Section x における応力 $\sigma_{(x)}$ は氷荷重を P とすると、

$$\sigma_{(x)} = P \left[\frac{x}{\lambda} + \frac{h_1}{h} \left(1 - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

また、Dashpotについての応力・歪速度の関係は、

$$\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n \quad (2)$$

ここで、 B は定数である。

はじめに、ダッシュポット部分の変位速度 $\dot{\delta}_c$ は、

$$\dot{\delta}_c = \int_0^\lambda \dot{\epsilon}_c dx = \int_0^\lambda BP^n \left[\frac{x}{\lambda} + \frac{h_1}{h} \left(1 - \frac{x}{\lambda} \right) \right]^n dx \quad (3)$$

により次式を得る。

$$\dot{\delta}_c = BP^n \lambda I_n \quad (4)$$

$$\text{ここで、} I_n = \frac{\left[1 + \frac{h_1}{h} + \left(\frac{h_1}{h} \right)^2 + \cdots + \left(\frac{h_1}{h} \right)^n \right]}{(n+1)} \quad (5)$$

次に弾性部分では、次の関係があるので、

$$\epsilon_E E = \sigma \Rightarrow \dot{\epsilon}_E = \dot{\sigma} / E \quad (6)$$

ここで、 E はヤング率である。

$$\dot{\delta}_e = \int_0^\lambda \dot{\epsilon}_E dx = \int_0^\lambda \frac{\dot{P}}{E} \left[\frac{x}{\lambda} + \frac{h_1}{h} \left(1 - \frac{x}{\lambda} \right) \right] dx \quad (7)$$

から次式を得る。

$$\dot{\delta}_e = \lambda \frac{\dot{P}}{E} I_1 \quad (8)$$

$$\text{ここで、} I_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h} \right) \quad (9)$$

次に氷板の変形がMaxwell モデルに従うと考えると、氷と構造物との相対速度は

$$v = \dot{\delta}_e + \dot{\delta}_c \quad (10)$$

であるから、

$$\dot{P} + \frac{BEI_n}{I_1} P^n = \frac{vE}{\lambda I_1} \quad (11)$$

ここで、定常状態 $\dot{P} = 0$ の場合には、氷荷重は次式となる。

$$P = \left(\frac{v}{\lambda I_n B} \right)^{1/n} \quad (12)$$

以上から、氷板の形状や定常クリープを表現するパラメータ (n , B) が与えられれば、相対速度 v が小さい場合に対応する定常状態の氷圧力 P を計算する事が可能となる。このため、“変形氷固結層”を対象とし、(2)式の関係を評価するためのクリープ試験を行った。

3. 実験方法と実験条件

変形氷固結層は、その生成過程が非常に複雑であるため、代表的な供試体を人工的に作成することはほぼ不可能に近い。しかし、氷荷重評価の重要性から、その“基本的な力学特性を把握”する意味で、ここでは種々のサイズのIce blockを再凍結して作成した供試体を変形氷固結層と呼ぶ。このような変形氷固結層の供試体は、Kioka⁴⁾の方法に従って作成できる。すなわち、最初に、76cm×45cmのトレイに深さ10cmまで10pptの塩水を入れ、底に穴の空いた概ねCubic型でメッシュ状(代表長さ $a=0.023, 0.036, 0.051\text{m}$)の型枠を入れ -15°C の条件下で3日間成長させたものをIce blockとして用いた。それらの塩分濃度は約0.5%であった。次に、100cm×90cm×40cmのボックスに型枠から取り出したIce blockを投入し、別途用意した結氷温度付近(約 -1.1°C)の2%の塩水を混ぜ、 -15°C の条件下で10日間成長させた(図-2)。Ice blockを作成せずに塩水から直接凍結させた供試体をここではNo Ice blockとする。凍結したらコアドリルや電動カッターを用いて直径10cm・長さ20cmの長さを目標に氷供試体を完成させた。この様にして作成された塩水氷供試体の塩分濃度も約0.5%となった。

実験では、図-3に示すcreep試験機を新たに製作し、コンプレッサーにより圧縮した空気をレギュレーターで調整し、ペロフラムシリンダーにより、種々の一定な鉛直圧力(σ)を数時間にわたり塩水氷供試体と与

えた。計測にあたっては、変位計と10kNの歪ゲージ式ロードセルでサンプリング周波数を1次クリープ領域、二次および三次クリープ領域に分け、それぞれ100Hz、1Hzで測定した。

試験条件をまとめたものが表-1である。今回はオホーツク海の様な比較的マイルドな地域を想定し氷供試体の温度 T_1 は、試験前に低温室で保管して、ほぼ -5°C に調節した。この氷温の一軸圧縮強度を参考に、載荷圧力 σ は、0.359~0.614MPaの範囲で一定とした。



図-2 供試体作成の様子



図-3 Creep試験

表-1 実験諸元

Test No.	Ice block size a	Ice Temp.	Diameter	Height	Density	Salinity	Normal Pressure
	m	$^{\circ}\text{C}$	m	m	g/cm^3	%	MPa
1	0.000	-5.0	0.101	0.197	0.91	0.60	0.384
2	0.000	-4.6	0.100	0.201	0.92	0.49	0.449
3	0.000	-4.6	0.101	0.199	0.92	0.58	0.488
4	0.000	-5.2	0.101	0.201	0.91	0.59	0.573
5	0.023	-4.9	0.103	0.200	0.90	0.59	0.365
6	0.023	-4.6	0.101	0.200	0.92	0.48	0.480
7	0.023	-4.9	0.101	0.205	0.92	0.58	0.594
8	0.036	-4.9	0.102	0.205	0.90	0.65	0.382
9	0.036	-3.9	0.101	0.202	0.92	0.68	0.469
10	0.036	-5.0	0.101	0.201	0.92	0.48	0.609
11	0.051	-4.2	0.103	0.202	0.89	0.53	0.359
12	0.051	-4.5	0.103	0.200	0.90	0.49	0.459
13	0.051	-3.7	0.100	0.202	0.92	0.50	0.614

4. 実験結果と考察

(1) クリープ曲線

図-4(a)~(d)は各Ice blockサイズ毎の時間とひずみ量との関係を表すクリープ曲線である。これらの図か

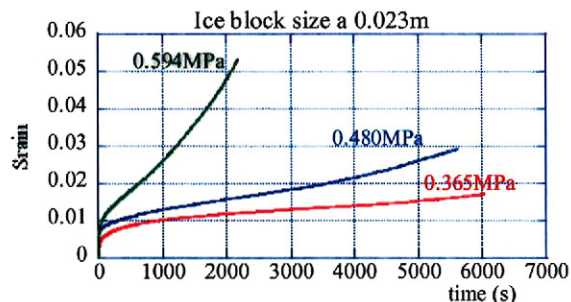


図-4(a) クリープ曲線 (a=0.023m)

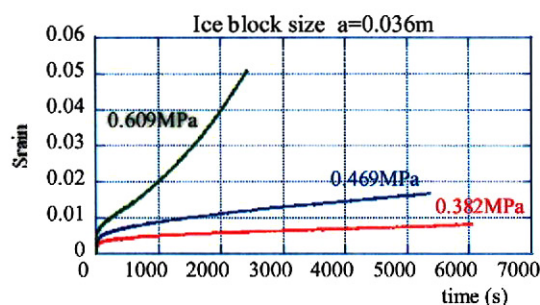


図-4(b) クリープ曲線 (a=0.036m)

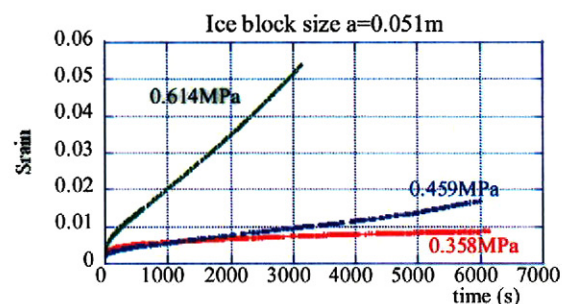


図-4(c) クリープ曲線 (a=0.051m)

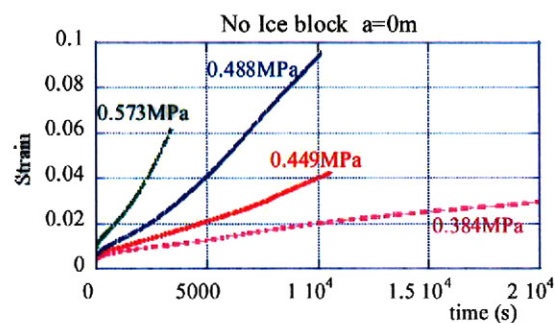


図-4(d) クリープ曲線 (No Ice Block a=0m)

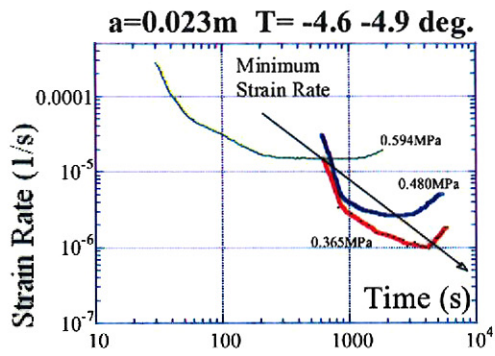


図-5(a) 荷重時間と歪速度の関係 (a=0.023m)

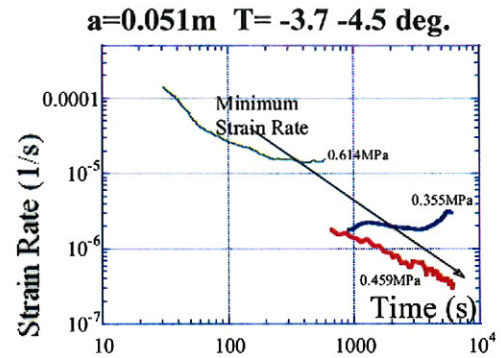


図-7(a) 荷重時間と歪速度の関係 (a=0.051m)

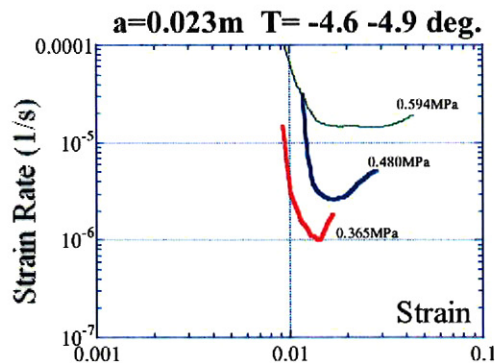


図-5(b) 歪と歪速度の関係 (a=0.023m)

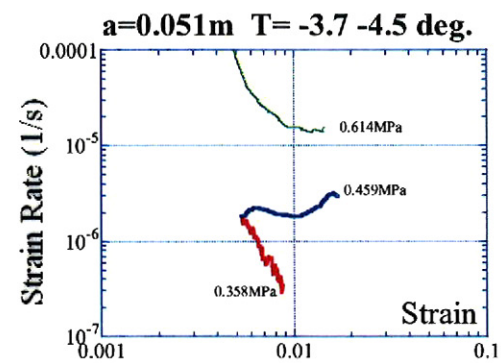


図-7(b) 歪と歪速度の関係 (a=0.051m)

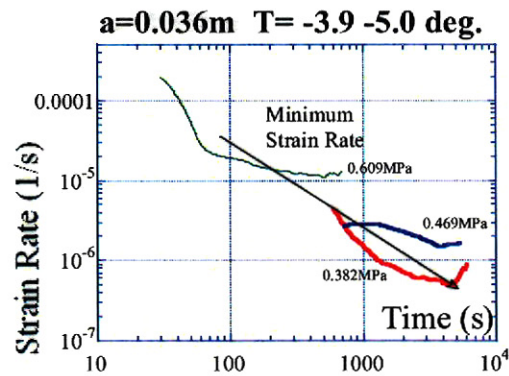


図-6(a) 荷重時間と歪速度の関係 (a=0.036m)

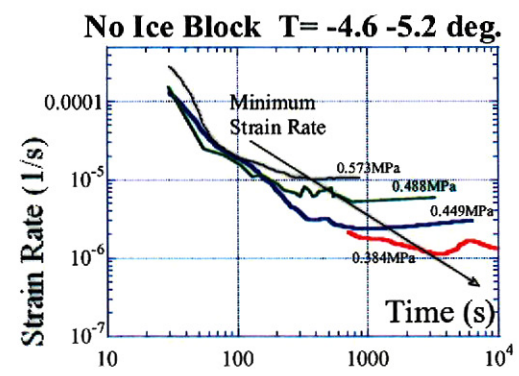


図-8(a) 荷重時間と歪速度の関係 (a=0m)

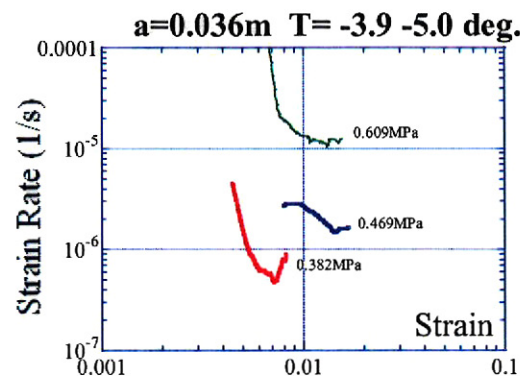


図-6(b) 歪と歪速度の関係 (a=0.036m)

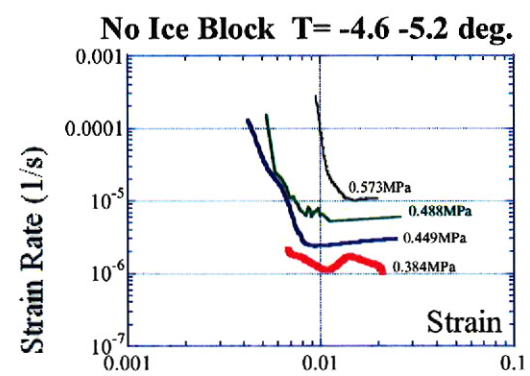


図-8(b) 歪と歪速度の関係 (a=0m)

ら、一定応力を载荷すると瞬間的に変形したのち、ひずみ速度が低下する1次クリープ域、ほぼ一定な2次(定常)クリープ域、加速する3次クリープ域が現れる。ここで、クリープ変形を特徴付け、また、上述した荷重評価にとって必要な2次(定常)クリープ域を代表的な値として取り扱う。2次(定常)クリープ域の速度は最小クリープ速度を与える。また、図では、载荷応力が増大するとひずみの累積速度が増加する様子がわかる。

(2) 定常クリープ

図-4(a)~(d)のクリープ曲線をもとにひずみとひずみ速度の関係や载荷時間とひずみ速度の関係を各Ice blockサイズ毎に計算したのが図-5(a), (b)~図-8(a), (b)である。ひずみ速度は、クリープ曲線の勾配である。载荷時間とひずみ速度の関係では、2次クリープに対応するひずみ速度の最小値部分に注目すると、それが発生するのに必要な载荷時間は载荷応力の増大に伴って減少する様子が分かる(図中の矢印を参照)。これは各Ice blockサイズに対する結果においても同様である。次に、ひずみとひずみ速度の関係においても、2次クリープに対応するひずみ速度の最小値部分に注目すると、それらが発生するのはひずみ量が0.01-0.02のほぼ間にあることが分かる。Ice blockサイズが小さい場合には若干ではあるがひずみ量が大きくなるように見うけられるが、Ice blockサイズの影響に関してはデータのばらつきもあり明確な傾向を断言することはできない。ここで、図-9(a), (b)は、Mellor and Cole (1982)⁸⁾が実施した多結晶純氷を用いた一定応力下での(a)時間とひずみ速度との関係、(b)ひずみ量とひずみ速度との関係を表した図である。これから、1次クリープ域から3次クリープ域が発生していることがわかり、最小ひずみ速度は、ひずみ量が0.008-0.01程度で現れている。図-9(a), (b)についての関係も図-5(a), (b)~図-8(a), (b)と同様な傾向を示している。

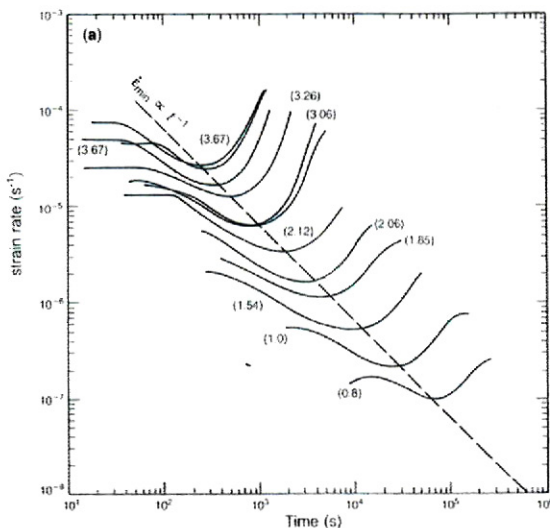


図-9(a) 多結晶純氷を用いた一定応力下での変形 载荷時間とひずみ速度との関係 (Mellor and Cole, 1982より)⁸⁾。括弧内の数字は累積圧力MPa。

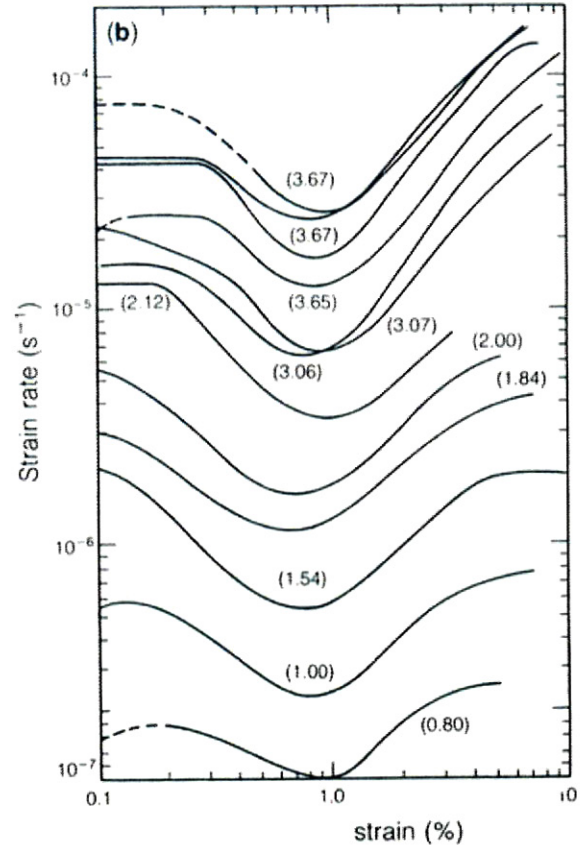


図-9(b) 多結晶純氷を用いた一定応力下での変形 ひずみ量とひずみ速度との関係 (Mellor and Cole, 1982より)⁸⁾。括弧内の数字は累積圧力MPa。

また、多結晶純氷の場合に比較して、今回の海氷を対象とした変形氷固結層の場合の方が、空隙量の増大や温度の影響で、最小ひずみ速度の現れるひずみ量が0.008-0.01に比較して0.01-0.02程度と少し大きくなると思われる。

これらの実験データをもとに、载荷応力と2次クリープに対応するひずみ速度との関係をまとめると図-10の

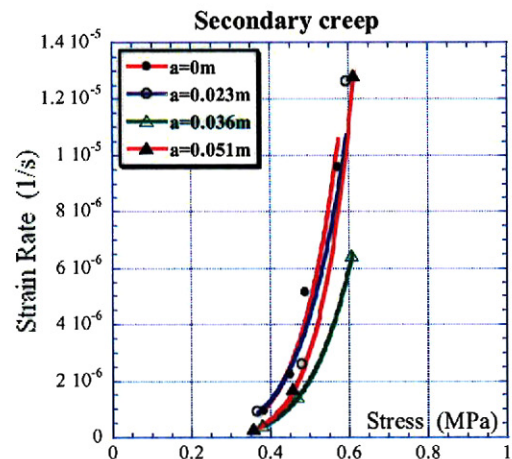


図-10 载荷応力と2次クリープに対応する ひずみ速度との関係

ようになる。実験前にはIce Blockサイズが小さい程、同一の体積に対して占める各Ice Block表面積の合計が大きくなるため、試験結果にどのような影響を与えるか興味深かったが、Ice Blockサイズの影響は明確ではなかった。淡水氷・塩水氷（変形氷ではない）では、1次クリープが結晶界面の滑りに関連しひずみの時間変化が応力と結晶粒径（サイズ）に依存するのに対して、2次クリープでは粒状・柱状氷いずれの場合においても結晶内の主に転位に関連するとされひずみ速度は結晶粒径には依存しない、と報告されている⁹⁾。塩水氷の複数のIce Blockを再凍結することで作成された今回の変形氷においても、同様にIce Blockサイズの影響は明確ではなかった。

以上から推定された、n, Bの値をまとめたものが表-2である。Nadreau and Michel(1986)¹⁰⁾が-5~-20℃の塩水氷（変形氷ではない）に対して与えたn=5.21より若干大きめの値を示した。

表-2 n, Bの推定値

a (m)	B	n	R相関係数
0	2.788×10^{-4}	5.88	0.983
0.023	1.652×10^{-4}	5.26	0.991
0.036	1.176×10^{-4}	5.84	0.999
0.051	3.909×10^{-4}	6.99	0.999
平均	2.381×10^{-4}	5.99	

4. 結論

(1) 変形氷固結層を対象とし、固結層を形成するIce blockのサイズをパラメータとしたクリープ試験を室内低温室で実施した。今回の試験条件で得られたクリープ曲線から、1次～3次クリープが発生していること、2次クリープ時の歪速度についてはそれが発生するのに要する時間は載荷応力の増大に伴って減少すること、また、2次クリープが発生する時のひずみ量は0.01-0.02であった。

(2) 2次クリープを規定する載荷応力と歪速度との関係をIce blockのサイズ毎に示し、それらには明確な違いの傾向が見られなかった。また、この関係が

“べき乗法則” ($\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n$) (雪氷科学ではGlen's lawという) で表現され、定数Bとnの値を推定することにより氷荷重の評価に適用できる。

今後は、別の温度条件、さらにデータのばらつきを理解するためにデータの補足、さらに、空隙率をパラメータとした実験が必要と考えている。

参考文献

- 1) Beketsky, S.P., Astafiev, V.N. and Truskov, P.A., “Design Parameters for Hummocks and Grounded Hummocks in the Sea of Okhotsk,” Proc. Of ISOPE, Vol.2, pp.487-493, 1997.
- 2) Truskov, P.A., Surkov, G.A. and Beketsky, S.P., “STRENGTH PARAMETERS OF HUMMOCKS: FIELD OBSERVATIONS AND LABORATORY TESTS,” Proc. of 8th Int. Symp. on OKHOTSK SEA & SEA ICE, pp.82-95, 1993.
- 3) Timco, G.W. and Goodrich, L.E., “Ice Rubble Consolidation,” Proc. Of IAHR Ice Symposium, pp.427-438, Sapporo, 1988.
- 4) Kioka S., Yasunaga Y., Takeuchi T. and Saeki H., “The Physical Properties of Consolidated Parts of Ice Ridge,” *Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics* by J.P.DEMPSEY and H.H.SHEN, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS SOLID MECHANICS AND ITS APPLICATIONS VOLUME94 (ISBN 1-4020-0171-1), pp.79-90, 2002.
- 5) Takeuchi, T., Soejima, A., Sasaki, M. and Akagawa, A., “ICE INDENTATION TEST ON CONSOLIDATED LAYER MODEL MADE OF SALINE AND FRESHWATER ICE BLOCKS,” Proc. Of 18th IAHR2006, Vol.1, pp.239-246, 2006.
- 6) Sodhi, D., Takeuchi T., Akagawa S., Nakazawa N. and Saeki, H., “Medium-scale indentation tests on sea ice at various speeds”, *Journal of Cold Regions Science & Technology*28, pp.161-182, 1998.
- 7) Takeuchi, T., Akagawa, S. and Saeki, H., “Significant of Ice sheet's Leading-Edge Roughness in Relation to Ice Load,” *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.8, No.3, No.3, pp.161-166, 1998.
- 8) Mellor, M. and Cole, D., “Deformation and failure of ice under constant strain-rate,” *Journal of Cold Regions Science & Technology*5, pp.201-219, 1992.
- 9) Sanderson, T.J.O., “*Ice Mechanics risks to offshore structures*,” Graham & Trotman, 1988.
- 10) Nadreau, J.S.P. and Michel, B., “SECONDARY CREEP IN CONFINED ICE SAMPLES,” Proc. Of IAHR Ice Symposium, pp.307-318, 1986.