

氷海域における海洋構造物と氷盤の相互作用に関する研究  
その 1 低温実験室における尿素模型海水の作製法と物性試験の概要

Study on Interaction between Ice Cover and Offshore Structures Surrounded by Ice Floes  
Making Process and Mechanical Properties of the Urea Model Ice in the Low Temperature Room

○加瀬佑弥<sup>1</sup>, 高橋基喜<sup>1</sup>, 末武紘一<sup>2</sup>, 北嶋圭二<sup>3</sup>, 中西三和<sup>3</sup>, 安達洋<sup>4</sup>  
Kase Yuya<sup>1</sup>, Takahashi Motoki<sup>1</sup>, Suetake Koichi<sup>2</sup>, Keji Ktajima<sup>3</sup>, Nakanishi Mithukazu<sup>3</sup>, Adachi Hiromi<sup>4</sup>

The purpose of this study is to investigate interaction between ice cover and offshore structures surrounded by ice floes. In this report, the making process and outline of several tests for investigating the mechanical properties urea model ice are presented

1. はじめに

船橋キャンパスのテクノブレース 15 の海洋建築工学科構造材料実験室に設置された低温実験室は模型海水(以後, 模型氷)の製作ができる施設として, 氷海域における海洋構造物に作用する氷荷重や氷盤と構造物の地震応答性状を調べる目的で利用されてきた。これまでに多くの研究成果<sup>1)-4)</sup>を発表してきたが, ここ数年の間に, 冷却装置の故障や物性試験用の装置が老朽化し利用できない状態が続いた。本研究は, 装置を修復した機会にあらためて模型氷を用いた実験システムの再構築を目的とし, 模型氷の作製法と氷海域の氷盤の物性を確認するための試験を行った。また, 流氷が氷海構造物に貫入する際の氷盤と構造物の基本的特性を確認するために一方向貫入試験を行った。本報では模型氷の作製と模型氷の物性確認試験の概要を示す。

2. 模型氷の作製

2.1 相似則及び物性目標値

模型氷の作製に先立ち実海域の氷盤の物性を再現するための模型氷の物性を相似則一覧として Table.1 に示す。本研究では, 実海水と模型氷の Froude 数((1)式)をあわせる相似則<sup>1)-4)</sup>を適用した。相似則の設定に当たっては, 試験条件として Reynolds 数の大きな範囲で行う

ものとし, 粘性の影響は極めて小さいものとした。

$$\text{Froude 数} : Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \dots (1) \quad \begin{matrix} V: \text{速度} & L: \text{長さ} \\ g: \text{重力加速度} \end{matrix}$$

Table.2 に尿素模型氷の物性目標値を示す。模型氷は濃度 0.3%の尿素水溶液とする。これは, 尿素模型氷が比較の実海水に近い特性を有しているためである。尿素模型氷の実物に対する相似比  $1/\lambda$  は  $1/30$  とし, 想定海域であるオホーツク海の氷象条件<sup>1)-4)</sup>に適用した。

2.2 尿素模型氷の作製

模型氷の作製は, 低温実験室に設置してある氷海水槽で行う。低温実験室は, 壁面上部に取り付けた 2 台の冷却器により冷気を強制循環させる方式である。また, 温度制御は計測室に設置された動力制御盤により一定温度で連続する定値運転と, 任意の温度変化プログラムに沿って運転するプログラム運転が可能である。設定温度の範囲は,  $-30^{\circ}\text{C} \sim +5^{\circ}\text{C}$  の範囲である。

Fig.1 に低温室内温度コントロール図を示す。尿素模型氷は以下の手順で作製する。氷海水槽に任意の水位まで水を入れ 0.3%の尿素を溶かし入れる。水温  $0^{\circ}\text{C}$ , 室温 $-10^{\circ}\text{C}$ になり氷晶を確認した後, 水面全体に尿素水溶液を噴霧器で均一に噴霧し氷膜を張る作業(種まき)を行う。その後, 室温 $-17.5^{\circ}\text{C}$ (設定温度 $-20^{\circ}\text{C}$ )で冷却す

Table 1 Similitude law of model ice

長さ [m]	$L_m = \frac{1}{\lambda} L_p$	慣性力 [N=kg m/s <sup>2</sup> ]	$F_m = \frac{1}{\lambda^3} F_p$
時間 [sec]	$t_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} t_p$	ヤング率 [N/m <sup>2</sup> ]	$E_m = \frac{1}{\lambda} E_p$
単位体積質量 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_m = \rho_p$	応力 [N/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_m = \frac{1}{\lambda} \sigma_p$
質量 [m <sup>3</sup> ×kg]	$M_m = \frac{1}{\lambda^3} M_p$	歪 [無次元]	$\epsilon_m = \epsilon_p$
重量 [N=kg m/s <sup>2</sup> ]	$W_m = \frac{1}{\lambda^3} W_p$	歪速度 [1/sec]	$\dot{\epsilon}_m = \sqrt{\lambda} \dot{\epsilon}_p$
加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	$\alpha_m = \alpha_p$	ばね定数 [N/m]	$K_m = \frac{1}{\lambda^2} K_p$
速度 [m/s]	$V_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} V_p$	円振動数 [rad/s]	$\omega_m = \sqrt{\omega_p}$
変位 [m]	$\delta_m = \frac{1}{\lambda} \delta_p$	周期 [sec]	$T_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} T_p$

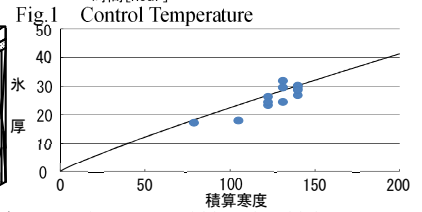
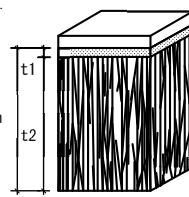
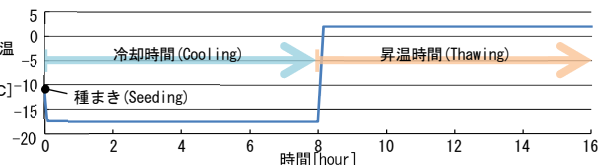
p: プロトタイプ m: モデル

Table 2 Physical property

	実海水	模型氷
氷厚 [mm]	1000	30
水中塩分・尿素濃度 [%]	3.0	0.3
水温 [°C]	-10.0	-10.0
応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	圧縮	3.0
	曲げ	0.6
	せん断	1.0
	付着	5.3
ヤング率 [N/mm <sup>2</sup> ]	1000	33
ポワソン比	0.3	0.3

Table 3 Dimension

	実海水	模型氷
t1 [mm]	100	3
t2 [mm]	900	27
h [mm]	1000	30
t1/h [%]	数%~10%	数%~10%



1: 日大理工・学部・海建 2: 日大理工・院(前)・海建 3: 日大理工・教員・海建 3: 日大理工・教員・海建 4: 日大名誉教授

る(冷却時間)。氷厚は冷却温度と冷却時間の積(積算寒度)によりコントロールする。所定の氷厚になったのち、所定の物性を持った模型氷を得るまで+2°Cで昇温(昇温時間)する。

### 2.3 海水の結晶構造

Fig.2 に実海水の概念図を示す。実海水は積雪、結晶構造上部、結晶構造下部の三層で構成されている。結晶構造上部は不規則な結晶構造を持つ硬い氷(トップレイヤー)であり、結晶構造下部は垂直な結晶方向を持つ柱状構造の氷となっている。模型氷では積雪がない2層構造とした。Table.3 に実海水と模型氷の寸法目標値を示す。模型氷の全氷厚  $h$  は 30mm, 結晶構造上層部  $t1$  は 2mm であり,  $t1/h$  は 6.7% となった。実海水の割合と概ね同じ値の氷であることを確認した。

### 2.4 氷厚成長

氷厚の成長は積算寒度  $S$ (冷却温度×冷却時間)により示される。既往の研究<sup>4)</sup>では、修復前の低温実験室における氷厚成長の推定式は(2)式により算出されることが示されている。

$$h = 0.039S^{0.88} \dots (2)$$

今回製作した氷厚と積算寒度の関係を Fig.3 に示す。作製した模型氷の氷厚は氷海水槽の 15 か所の氷片の平均値としている。

## 3. 氷の物性試験概要

模型氷の物性を確認するため、昇温時間をパラメータとして曲げ強度、圧縮強度を計測する曲げ試験と圧縮試験を行った。両試験共に昇温時間 5~13 時間後まで 1 時間おきに 1 回試験を行い、計 9 回行った。

### 3.1 曲げ試験

Fig.4 に曲げ試験体概要を、Fig.5 に曲げ試験用の治具を示す。試験体は氷盤に繋がった片持ち梁形式で長さ  $L$ :幅  $b$ :氷厚  $h$  が 7:2:1 となるようにのこぎりで切出した。曲げ試験は試験体の先端を試験機により垂直上方向に載荷する上曲げ試験と垂直下方向に載荷する下曲げ試験の二つの試験とし、1 回の試験で 3 体ずつ行った。

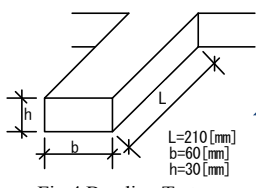


Fig.4 Bending Test

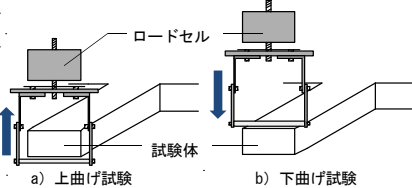


Fig.5 Gig of Bending test

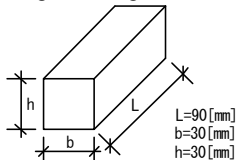


Fig.6 Pressing Test

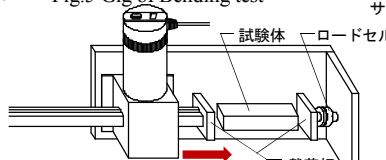


Fig.7 Machine of Pressing test

### 3.2 圧縮試験

Fig6 に圧縮試験体概要を、Fig7 に圧縮試験装置を示す。試験体は長さ  $L$ :幅  $b$ :氷厚  $h$  が 3:1:1 となるような直方体に切り抜き、歪速度が  $7.8 \times 10^2 \text{sec}^{-1}$  となる速度で載荷を行った。圧縮試験では、1 回の試験で 6 体ずつ試験した。

## 4. 貫入試験概要

氷の物性試験を行った後、出来上がった模型氷を用いて一方向貫入試験を行った。Fig.8 に貫入試験装置の概略図を示す。試験体は多柱式円柱型構造物を想定して円柱の模型とし、コンポブロックに取り付けた。円柱試験体はステンレス製の物とし、径は 48mm とした。水平荷重はロードセル、貫入量はコンポブロックに取り付けたストローク式変位計により計測した。なお、ストローク式変位計による反力は無視できるものとした。

### 4.1 歪速度

氷盤の破壊形式は歪速度による影響を受ける。実海水ではその破壊形式から延性領域 ( $\epsilon < 5 \times 10^{-4}$ ), 遷移領域 ( $5 \times 10^{-4} < \epsilon < 10^{-2}$ ), 脆性領域 ( $10^{-2} < \epsilon$ ) の 3 つの領域に分類される事が既往の研究により明らかにされている。<sup>1)~2)</sup> 本試験の歪速度は延性領域、遷移領域、脆性領域の 3 領域について相似則を考慮し、それぞれ  $1.5 \times 10^4$ ,  $1.5 \times 10^2$  および  $1.5 \times 10^1 (\text{sec}^{-1})$  とした。

### 4.1 一方向貫入試験

Table.4 に一方向貫入試験の諸元を Fig.9 に一方向貫入試験概念図を示す。本試験では前項で述べた歪速度をパラメータとし、貫入試験を行った。貫入量はどのケースも 5mm とし、貫入速度は Ralston の提案式(3)を用いて、歪速度と試験体径から算出した。

$$V = \epsilon \cdot 2D \dots (3)$$

$\epsilon$ :歪速度  $V$ :貫入速度  
 $D$ :円柱試験体

貫入試験は流氷を想定して一方向に円柱試験体を氷盤に向かって直進させることにより貫入させる。なお、貫入試験前は円錐試験体と氷盤は接していない。

## 5. まとめ

尿素模型海水の作製方法と、各試験の概要を示した。

### 【参考文献】

その 2 にまとめて示す。

Table 4 Penetration test

case	試験体径 [mm]	貫入量 [mm]	歪速度 [ $\text{sec}^{-1}$ ]	貫入速度 [mm/sec]
1	48	50	$1.5 \times 10^{-4}$	0.0144
2			$1.5 \times 10^{-2}$	1.44
3			$1.5 \times 10^{-1}$	14.4

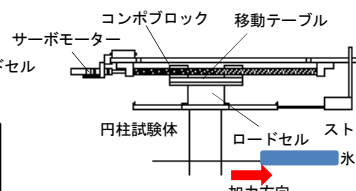


Fig.8 Machine of Penetration test

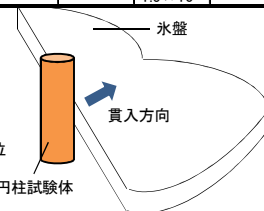


Fig.9 Penetration test