

アイスドーム模型の試作と強度試験

半貫敏夫¹・石沢賢二²・二見賢仁¹・津久井啓太¹

A Laboratory Test on Construction of Ice Domes and Their Load-Carrying Capacity

Toshio HANNUKI¹, Kenji ISHIZAWA², Kenji FUTAMI¹
and Keita TSUKUI¹

Abstract: Ice domes will be useful as a shelter of depot and laboratory space without heating systems which will be constructed on the ice field in the Arctic or Antarctic. In this paper, efficacious use of ice domes is discussed for facilities of research camp in the Antarctic. Some experiments on construction technique of ice domes and their load-carrying capacity were carried out in a low temperature laboratory. It was confirmed experimentally that ice domes could be made by spraying water onto a spherically inflated membrane form under the condition of holding a temperature below -18°C . Mechanical property of artificial ice made in the laboratory was examined by some bending tests of simply supported ice beams so as to discuss a constitutive model of ice for numerical analysis. Load-carrying capacity and creep behavior of ice dome models were examined in the laboratory and analytical models of ice structure for a numerical procedure of the design were discussed and compared with the tests. A usefulness of elastic-plastic model for the mechanical behavior of ice structures in a short term loading and a convenience of Maxwell model for the long time creep of ice structure were confirmed in the discussion. These laboratory tests and analytical applications led to the first step of realization of the ice dome construction in the Antarctic.

要旨: 南極氷床上の観測基地で補助的施設に利用する目的で、アイスドーム工法について検討した。低温室内の模型実験で、作り方、短時間漸増荷重に対する力学的性質およびクリープ特性を調べた。そして実験結果から氷の力学モデルを設定し、設計資料用の数値解析法について検討した。その結果、氷構造の短時間漸増荷重に対する力学応答は等方性連続体仮定の弾・塑性有限要素モデルで、長期クリープは Maxwell モデルでほぼ表せることが確かめられた。

1. はじめに

南極の氷床上観測基地で、あまり手間をかけずに数カ月から1年程度の期間、使える建築空間（たとえば物資貯蔵庫や暖房のいらぬ実験室など）を作るための工法として、アイスドームを取り上げ、その構築法や短時間漸増荷重時の強度、クリープ特性を実験室内の模型

¹ 日本大学理工学部, College of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda-Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101.

² 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

実験で調べ、安全管理のための強度・変形予測手法を検討した。

雪と水を素材として、これを空気膜構造の型枠表面に吹き付けて凍結させ、氷のシェルを作る試みは粉川(1987, 1990), KOKAWA(1985, 1988), KOKAWA and MURAKAMI(1986)等によって旭川で実施された。はじめに基底部直径 10 m, 高さ約 3 m のアイスシェルの建設に成功, 続いて直径 15 m, 高さ 3.3 m のアイスシェルを建設, さらに規模を拡大して同じ工法で直径 20 m のアイスシェル試作も行われた。現在, この工法で造られるシェル空間のうちで, 主に直径 10 m クラスの構造体が冬期間の食料貯蔵庫として実用に供されているほか, イベント用空間にも使われている。

GLOCKNER(1988)は, 北極圏での経済活動の活発化に伴う貯蔵庫, 避難所, 簡単な作業空間のためのシェルターとしてガラス繊維で補強したアイスドームを提案した。ドームの型枠は粉川と同様な発想の空気膜でつくる部分球で, その表面に補強繊維を取り付け, 水を吹き付けて凍結させる工法を用いている。野外で, 直径 2.35 m, 高さ 0.57 m の開口部付きモデルを作って強度試験を実施, 繊維補強の有効性, 補強アイスドーム実用化の可能性を示した。

これらのアイスシェルを建設する時の気象条件は, 雲・風共に少なく, 気温が約 -10°C 以下(粉川の実験; GLOCKNER の場合は -14°C で実施)であればよく, 建設機材は簡単な除雪機, 型枠のエアドームと送風機, 水を吹き付ける設備などで, 材料は雪と水である。現場に持ち込む建設用資材の少なさ, 工法の単純さ, 短期間で建設可能という点でアイスドームは極地建築の条件を満たす工法の一つである。旭川での KOKAWA(1988)の試作実験によれば延べ 20 時間の吹き付け作業でシェル厚 15 cm, 直径 15 m のアイスシェルが造られている。欠点は構造材である氷の物性が温度に敏感でクリープが大きいこと, シェル構造のために部分的な損傷やクリープによる大変形が生じた場合に局所的修復が難しいことなどである。

本論では, 出来上がった氷構造物の形態の単純さと力学的合理性, 安定性を考慮して, シェル形状を「半球」に限定した実験を行ったので「アイスドーム」の呼称を使った。南極氷床上でこれを建設する場合は, ドームの一部に強度上の欠点となる開口部を無理に作らなくても, 出入口はドームとは独立な雪洞を掘削することで確保する方法も考えられる。

本論の具体的な目標は以下の 4 項目である。

- (1) $-15^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ の気象環境(あすか観測拠点の年平均気温: -18.5°C , 年平均風速: 12.5 m/s, 建設期間である夏 1 月の平均気温: -12.0°C , 平均風速: 13.8 m/s (以上 1988, 1989 年の統計), みずほ基地の年平均気温: -32.5°C , 年平均風速: 10.8 m/s, 建設作業可能な夏 1 月の平均気温: -18.3°C , 平均風速: 8.4 m/s) でアイスドームの建設が可能かどうかの確認。
- (2) その建設技術や建設上の注意事項の整理。
- (3) アイスドームの短時間漸増載荷時の強度, 変形など, 基本的な力学特性の確認と設計

用の数値解析法（氷の力学モデル）の検討。氷の力学的挙動を、時間の影響を無視した形でとらえることのできるような、ごく短時間に作用する外力に対する氷構造物の応答を調べるのが目的。

(4) アイスドームのクリープ特性の把握と設計用数値解析法（氷のクリープモデル）の検討。

これらの模型実験は国立極地研究所の低温試験室 (2.995 m 幅×8.295 m 奥行×2.900 m 高さ, -18°C 室温) で行った。

2. アイスドームの試作実験

アイスドームを建設する上での技術的問題を整理する目的で、低温実験室でアイスドーム模型を試作した。

型枠：アイスドームの型枠となる空気膜構造体としてはじめに選んだのは市販のビーチボール（直径約 40 cm）であった。実物として直径 10 m、高さ 4~5 m、シェル厚 10 cm の規模のドームを想定しているため、寸法の縮尺は 1/25 である。これより模型ドームのシェル厚の目安はおよそ 4 mm となる。このビーチボールを型枠とした予備実験を行ったところ、空気圧によって型枠寸法が微妙に変わるので、力学実験のように一定形状の模型を量産してデータを統計処理するには不便なことが分かった（半貫ら, 1991）。そこで本実験では一定寸法のドームを量産するために剛な型枠として外径 45 cm のアクリル製半球を用いた。この場合の寸法縮尺率は約 1/22、模型シェル厚の目標値は、4.5 mm である。出来上がったアイスドームから剛な型枠を外すのを容易にするため、アクリル球の表面を液体合成樹脂の薄膜で覆った。

型枠の設置：脱型作業を容易にするため 5 mm 厚さのスチレンボードを敷き、その上にアクリル型枠を設置した。基底部には裾ばり（エッジビーム：30 mm 幅×25 mm 高さ）用の溝を作るため、スチレンボードの堰板を円周に沿って配置した。氷に接する内側は 0.2 mm のプラスチック板で絶縁し、脱型の便を図った。

製作順序：はじめに人工雪（氷を薄く切削したもの）を裾ばり型枠内に詰めて、その上から、約 5 分かけて 350 ml の水を注ぎ、凍結させた。10 分の養生時間をとった後に、ドーム型枠の表面に霧吹き（ノズル径約 0.5 mm）で散水し、凍結させて氷の薄膜を重ねる作業を数回繰り返した。製作中の状況を図 1 に示す。

-18°C の環境では霧吹きで水を散布するだけで型枠表面に氷の薄膜を作れることが分かったため、型枠表面上に雪と水でシャーベット状の流動体を造る粉川の方法を試すのはやめて、散水作業だけでドームを作ることにした。1 回に散布する水量、散布作業の時間間隔、作業回数などについて試行錯誤を重ね、その結果を整理して、第 1 回目の散水量を 10 分間で 400 ml、次からは 10 分かけて 600 ml 散水し、5 分間の養生という作業単位を標準化し



図 1 アイスドームの試作過程
 Fig. 1. Process of an ice dome model making.

た。

模型 1 個の製作にはドーム表面に 5 回の散布で 2800 ml, これに裾ぼりの 350 ml を加えて合計 3150 ml の水を使い, その製作時間は約 1 時間 25 分であった。

南極で実際にドームを建設する時には, 原料の水は雪を溶かして作ることになるので, 水の使用効率が製作コストに影響する大事な要素になる。これを使用水量と出来上がったアイスドーム質量の比で定義し (厳密には裾ぼりに使った人工雪の質量が省かれているが数値に大きな変動はない), 表 1 にまとめて示す。これより水の使用効率は 70% 台が確保できることが分かった。ただし現地での実際の作業では, 地上からホースで散水することになるので,

表 1 試作したアイスドーム模型の寸法, 重量と水の使用効率
 Table 1. Dimensions of ice dome models and weight ratio of the ice dome model to water used as material of sprayed ice. These construction tests were done in a testing room with constant -18°C .

Dome No.	Thickness (mm)			Depth of edge beam (mm)	Weight (g)	Vol. of water (ml \div g)	Weight ratio W/V (%)
	top	middle	bottom				
1	7.50	6.93	3.43	22.08	2200	3150	69.84
2	5.75	5.90	3.93	24.23	2300	3150	73.02
3	5.85	6.10	4.20	29.23	2430	3150	77.14
4	6.00	7.25	4.75	24.28	2500	3150	79.37
5	6.08	7.85	5.50	32.33	2550	3150	80.95
6	6.55	6.88	4.45	27.23	2500	3150	79.37
7	5.90	6.30	4.88	27.40	2320	3150	73.65
8	5.73	6.38	4.38	28.35	2350	3150	74.60
9	6.35	5.35	3.38	28.15	2050	3150	65.08
Average	6.26	6.55	4.32	27.03	2356	3150	74.78

風があると水が吹き払われて水の使用効率は低下するはずだから、表1の結果は使用効率の上界値と考えるべきである。

また、同表中に示すように、製作中のシェル厚の調整が難しく、特にドーム裾付近の垂直に近い壁面では吹き付けた水が凍結する前に流れ落ちるので他の部分よりも薄肉になりがちである。なお表中の板厚は、各ドームの破壊試験終了後、破片の板厚をノギスで測定した値、各2個の平均値である。

実際の作業では施工中にシェル厚を確認できるような目印を型枠表面につける必要がある。粉川は膜材表面の要所に、角柱状に加工した押し出し発泡ポリスチレン板（商品名：スタイロフォーム）を貼付けてシェル厚を確認した。これは建設終了後膜材を撤去してもシェル内に残るので、昇華によるシェル厚減少量の監視等、アイスドームの維持・管理にも利用できる。またドーム裾の薄肉になりやすい場所は、裾ばりを作る時のように、建設の初期段階に雪で固めるなどの補助手段を使って断面を厚くする工夫が要る。ドーム裾部でシェル厚が極端に薄いと建設作業中に、自重による崩壊が起こる恐れがあるからである。

3. 実 験

前項の方法で試作したアイスドームの力学的特性を調べ、設計用の数値解析法を検討するため、以下のような3種類の実験を行った。これらの試験のために、図2のような簡単な加力装置を作り、すべての実験でこの装置を用いた。てこ先端の荷重皿に重錘を段階的に載せることによって試験体に力を加える。力はこの支点を中心とする半径60 cmの円の接線方向に加わるから、初期状態で、てこが水平になるように荷重点の棒の長さを調整すれば、10 mm程度の変位量の範囲 ($\tan(1/60) = 0.016665 \approx (1/60) = 0.016667$) では力はほぼ鉛直方向にのみ作用すると考えた。変位はセンサー部分を断熱材で保護したひずみゲージ型の変位変換器で電氣的に測定し、データロガーで自動記録した。

- (1) 氷の薄層を重ねて作った人工氷の力学モデル（応力-ひずみ関係）を調べるための単純支持ばりの曲げ試験。
- (2) 短時間漸増载荷時のアイスドームの強度と変形性状を調べるための頂部一点集中载荷試験。
- (3) アイスドームのクリープ性状を調べるため、頂部一点に一定の集中荷重を加えた長期载荷試験。

アイスドーム素材としての人工氷の力学特性を調べるための基礎実験としては一軸の引張、圧縮実験を行うのが理想だが、試験設備の関係でこれらが実施できなかったため、一番手軽に行える単純ばりの曲げ試験結果を用いて概算した人工氷の応力-ひずみモデルを検討することにした。

一般に氷の破壊形式はひずみ速度によって変わり、一軸圧縮の場合およそ 10^{-4} s^{-1} (GOLD,

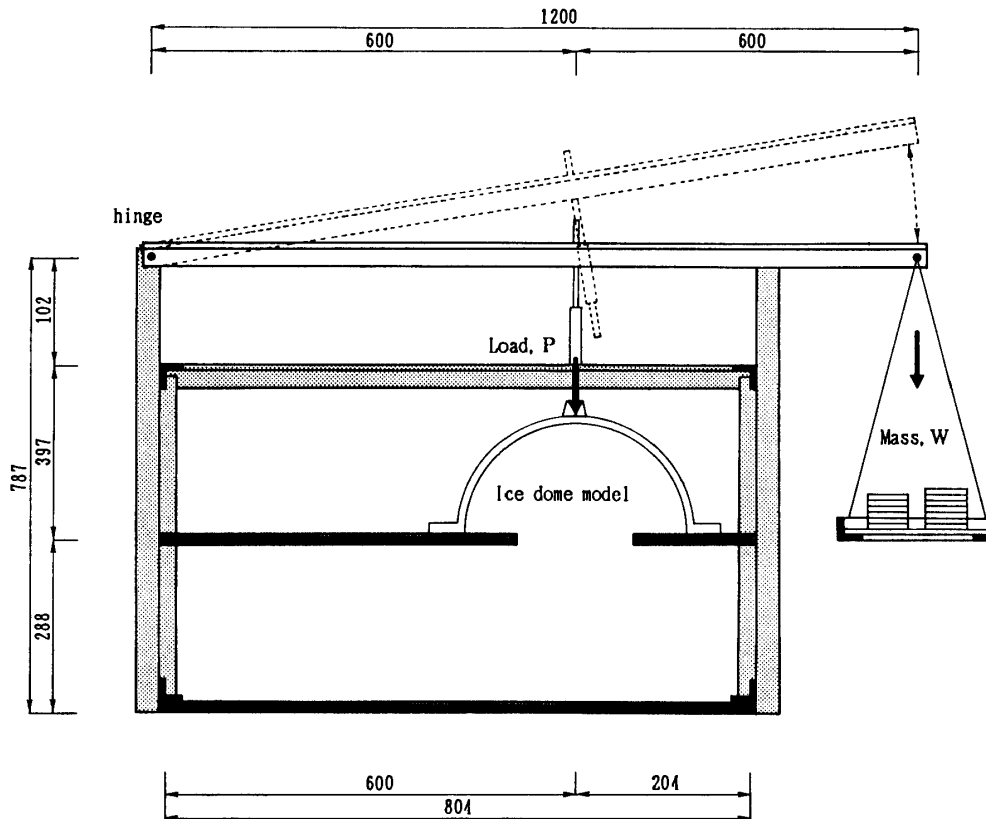


図 2 力学実験装置 (単位 mm)
 Fig. 2. Equipments of mechanical test (unit: mm).

1977)~ 10^{-6} s^{-1} (MELLOR, 1980) を境にして脆性的破壊と延性的破壊に大別される。建設中に加わる風荷重またはスノウドリフト等による急激な局所的積雪増加のように短時間に急増する荷重に対しては、氷の脆性的挙動が卓越することが予想されるので、このような短時間作用荷重に対するアイスドームの力学的応答を調べるのが第 2 の実験である。第 3 のクリープ試験はまだ継続中で、ここでの検討は中間的に整理した一体のデータに対する考察である。

3.1. 人工氷角柱の曲げ試験

断面 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 、長さ 240 mm の人工氷角柱を 2 種類の方法で作った。一つはドーム本体の製作と同様に 10 回に分けて型枠内に注入した水を凍結させて氷の薄層を重ねた積層氷、ほかは裾ばりの製作法に合わせて人工雪を詰めた型枠の上から水を注いで凍結させたものである (表 2)。これらの角柱をスパン 200 mm で単純支持し、中央に 1 点集中荷重を加えて、図 3 のように荷重 P と中央点の相対たわみ δ を破壊まで記録した。荷重は 4.9 N を 15 秒ごとに段階的に加えた。载荷速度は $0.33 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 、試験終了後、実験結果の P - δ 関係から計算したひずみ速度はおおよそ $(3 \sim 3.5) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ であり、これはおおよそ、上述の脆性・延性破壊の領域を分ける境界に相当する値である。

試験結果の P - δ 関係を氷の種類別に図 4 に示す。試験体によってかなり広い範囲に P - δ

表 2 人工氷角柱試験体の寸法, 質量, 密度
Table 2. Dimensions of ice beams for the bending test.

Kind of ice	No.	Width (mm)	Depth (mm)	Mass (g)	Density (kg/m ³)
Layered ice	1	30.9	30.3	190	846
	2	29.5	30.4	190	883
	3	29.8	29.9	195	912
	4	29.9	30.1	198	917
Average		29.7	30.1	193	900
Flooded ice	1	30.1	30.3	200	914
	2	29.8	30.5	190	871
	3	29.7	30.8	185	843
	4	29.4	30.7	190	877
	5	30.6	30.4	195	873
	6	29.8	30.8	180	817
Average		29.9	30.6	190	865

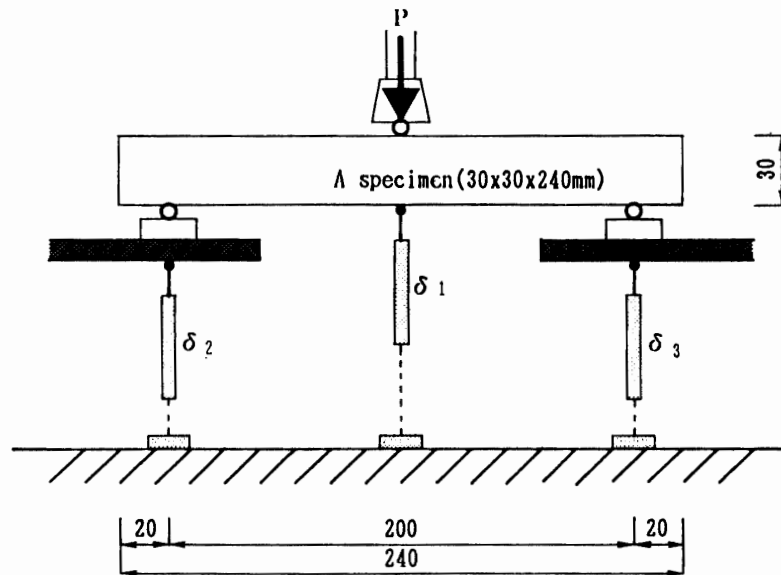


図 3 2 種類の人工氷角柱 (断面寸法 30 mm × 30 mm) の曲げ試験
Fig. 3. Bending tests of two kinds of ice beams made from layered ice and flooded ice respectively with the same square cross-section, 30 × 30 mm. Ice beams were simply supported and subjected to a centrally concentrated load, P. $\delta_1, \delta_2, \delta_3$: Measured points of displacement.

曲線が分散した。破壊荷重は人工氷の作り方によらずほぼ一定で、積層氷の平均値が 0.195 kN (標準偏差 0.007 kN), 他は 0.21 kN (標準偏差 0.021 kN) であった。図から分かるように P - δ 関係はほぼ直線で表される。実験では破壊が何の前触れもなく突然起こったように感じられたが、 P - δ 関係を詳しくみると高荷重域で非線形性がわずかに見られ、延性的性質の片りんがうかがわれる。破壊状況の典型を図 5 に示す。

人工氷の構成則, 応力-ひずみ関係の推定: 氷は粘弾性物質であり, その力学特性も応力速

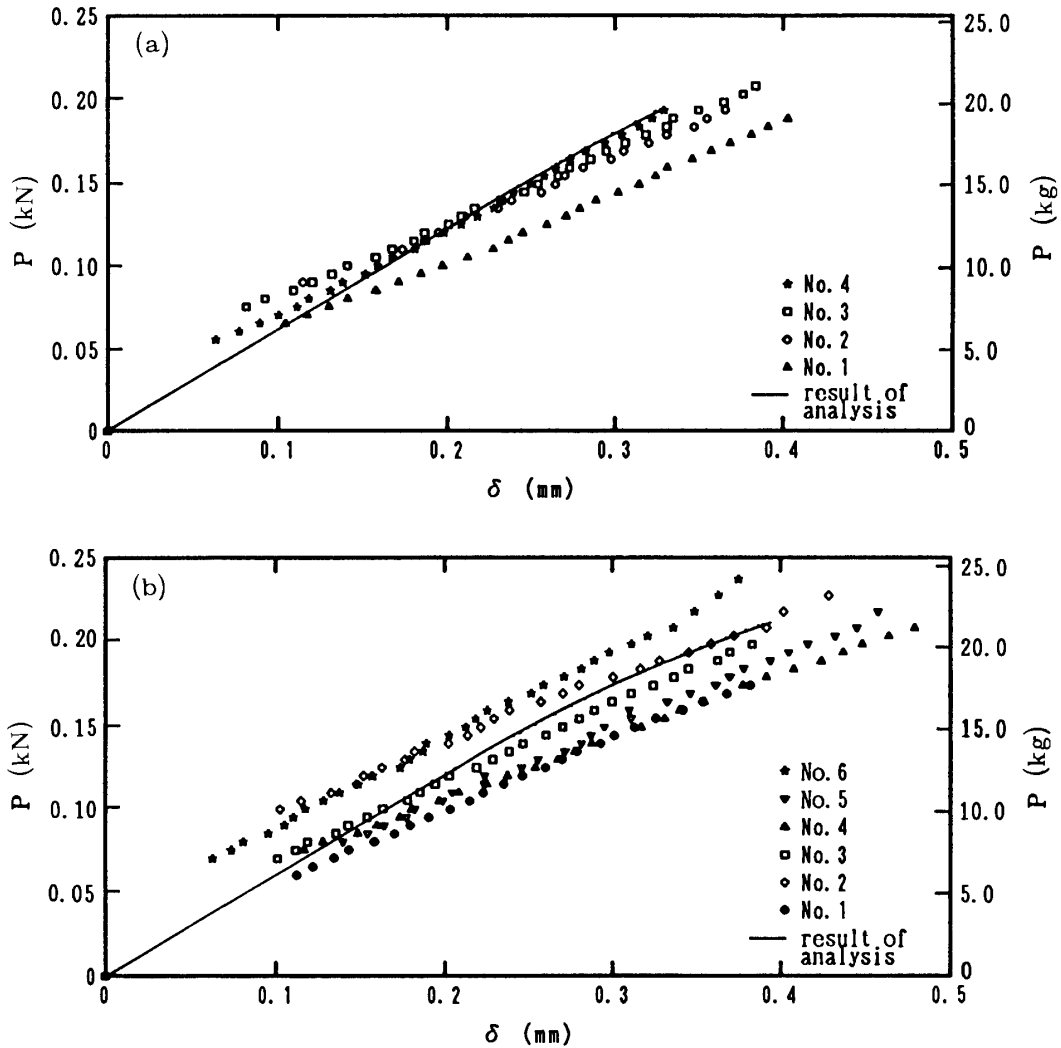


図4 人工氷角柱の曲げ試験結果 ($P-\delta$ 関係). (図中の実線は弾・塑性有限要素モデルによる解析結果)

(a) 10層の積層氷で作ったはりの $P-\delta$ 関係

(b) 型枠内に人工雪をつめ、上から水を注いで凍結させたはりの $P-\delta$ 関係

Fig. 4. Load-deflection behavior ($P-\delta$ relation) of layered ice beams and flooded ice beams. Numerical results of elastic-plastic finite element analysis of ice beams were compared with the test. P : Centrally concentrated load, P (N). δ : Relative displacement from the loading point (center of the beam) to the supporting foundation ($\delta = (\delta_1 - (\delta_2 + \delta_3))/2$; mm).

(a) $P-\delta$ relation of layered ice beams.

(b) $P-\delta$ relation of flooded ice beams which were made by flooding water into a mold packed with ice chips. Edge beams of the ice dome model were made from the flooded ice.

度、ひずみ速度で議論すべきだが、ここでは工学的に（巨視的に）とらえた氷構造物の力学現象を再現するためのモデルとして応力-ひずみ関係を扱うことにした。図4の $P-\delta$ 関係から応力-ひずみ関係を復元するため、図6のように各 $P-\delta$ 関係図を3本の折れ線 (tri-linear型) で近似した。図中のパラメーター P_i , K_i , δ_i ; $i=1\sim 3$ は各 $P-\delta$ 関係図上から直感的に定

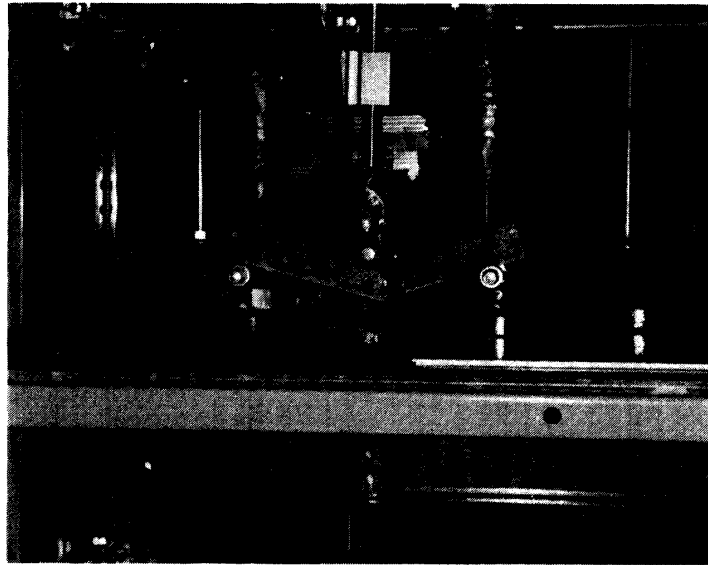


図 5 氷角柱の曲げ破壊状況
 Fig. 5. Collapse pattern of layered ice beams.

めたもので物理的根拠はない。これらのパラメーターを整理して表 3 に平均値±標準偏差で示す。

この tri-linear 型 $P-\delta$ 関係のそれぞれの部分的線形区間に、断面の平面保持を仮定すると、tri-linear 型の曲げ応力-ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 関係が計算できる。表 4 にはこれらのパラメーターのうち初期剛性 E_1 と第 1 線形限界応力 σ_1 および最大曲げ応力 σ_3 の値を、各試験体について示した。こうして得られた tri-linear 型 $\sigma-\epsilon$ 関係の第 2 勾配以降の非弾性区間を、増分形

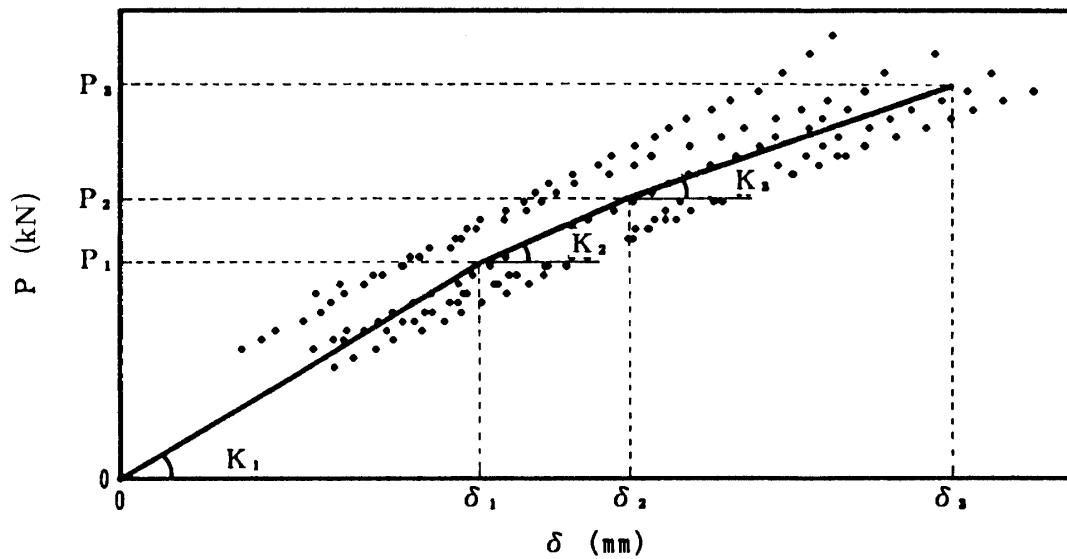


図 6 氷角柱曲げ試験を近似する tri-linear $P-\delta$ 関係
 Fig. 6. Tri-linear model for the $P-\delta$ relation of artificial ice beams. K_1, K_2, K_3 : Stiffness. P_1, P_2, P_3 : Load of each linear bounds. $\delta_1, \delta_2, \delta_3$: Deflection of each linear bounds.

表 3 製作法の異なる 2 種類の人工氷で作ったはりの曲げ試験における荷重-変形関係の平均値モデル (tri-linear model) の定数 (表中の数値は平均値±標準偏差)

Table 3. Numerical constants of load-deflection model of artificial ice beams which were made by two kinds of formation; layered ice and flooded ice.

Kind of ice		Layered ice	Flooded ice
Stiffness (N/mm)	K_1	585±60	612±114
	K_2	459±33	442±74
	K_3	404±39	351±53
Load (N)	P_1	133±8	115±9
	P_2	160±5	150±10
	P_3	195±7	210±21
Displacement (mm)	δ_1	0.230±0.036	0.193±0.028
	δ_2	0.289±0.030	0.276±0.053
	δ_3	0.378±0.029	0.448±0.048

Symbols K_i , P_i and δ_i are defined in Fig. 6. Numerical data are shown in average±standard deviation.

表 4 はりの曲げ試験結果から導いた曲げ応力-ひずみ (σ - ϵ) モデルの定数; 初期剛性 E_1 , 第 1 線形限界応力 σ_1 および最大曲げ応力 σ_3 . 最下段は平均値±標準偏差.

Table 4. Constants of σ - ϵ model which were introduced from bending test of ice beams.

(a) 積層氷について
(a) Layered ice

(b) 人工雪混入氷を凍結させた氷について
(b) Flooded ice

Test beam No.	Layered ice			Test beam No.	Flooded ice		
	Initial stiffness (GPa)	Stress (MPa)			Initial stiffness (GPa)	Stress (MPa)	
		First linear bound	Maximum stress			First linear bound	Maximum stress
	E_1	σ_1	σ_3		E_1	σ_1	σ_3
1	1.119	1.467	1.985	1	1.757	1.451	2.461
2	1.458	1.528	2.121	2	1.391	1.290	2.139
3	1.554	1.507	2.335	3	1.211	1.163	2.206
4	1.633	1.321	2.136	4	1.259	1.184	2.352
Ave.	1.441	1.456	2.145	5	1.851	1.161	2.514
	±0.196	±0.080	±0.125	6	1.126	1.161	1.838
				Ave.	1.432	1.235	2.252
					±0.275	±0.107	±0.227

* Ave: Average±standard deviation.

の数値解析法に適用する都合上さらに指数関数で近似し, なおしたモデルを図 7, 表 5 に示した. ここで, 表 4 の第 1 線形限界応力 σ_1 を σ_y と書き換えてあるがこれは物理的な意味での降伏点ではない. 氷の弾性域はもっと狭く, GOLD (1977) によれば作用時間 100 s 以内の応力で概略 1 MPa 以下, 他方, 降伏せん断応力を近似的に 0.1 MPa とする説もある (楠ら, 1973). また, 図 7 の高応力域の非線形性は気温とひずみ速度を特定値に設定したとき

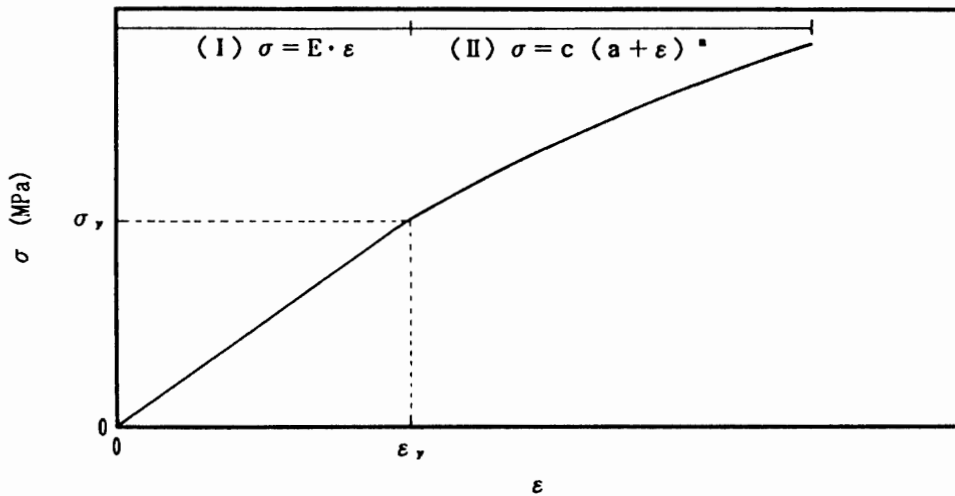


図 7 氷角柱曲げ試験の $P-\delta$ 関係から復元した応力-ひずみ関係 ($\sigma-\epsilon$)
 Fig. 7. Stress-strain relation model of artificial ice calculated with tri-linear $P-\delta$ model of the ice beam bending test (Fig. 4). In-elastic $\sigma-\epsilon$ curves were approximated in an exponential function.

表 5 増分形有限要素法のための人工氷の応力-ひずみモデルの定数
 Table 5. Numerical constants of stress-strain model of artificial ice for test runs by the finite element analysis (F.E.M.).

$\sigma-\epsilon$ model	Constants and boundary	Layered ice	Flooded ice
I Elastic (Linear) $\sigma = E \cdot \epsilon$	Linear bound stress : $\sigma_y (\sigma_1 \doteq \sigma_y)$	1.456 (MPa)	1.235 (MPa)
	Linear bound strain : $\epsilon_y (\epsilon_1 \doteq \epsilon_y)$	$1.01 (\times 10^{-3})$	$0.86 (\times 10^{-3})$
	Stiffness: E	1.441 (GPa)	1.432 (GPa)
II In-elastic $\sigma = c(a + \epsilon)^n$	Constant: c	0.146 (GPa)	0.171 (GPa)
	Constant: a	$84.87 (\times 10^{-3})$	$84.56 (\times 10^{-3})$
	Constant: n	0.65	0.695

の、弾性と粘性の効果が複合された結果とみるべきであり、物理的に厳密な議論ではこの図は載荷速度 0.33 N s^{-1} (概算のひずみ速度 $(3 \sim 3.5) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) のはりの試験に固有の情報と考えねばならない。しかし、GOLD (1977) の整理したデータによるとひずみ速度のオーダーが変わらない範囲であれば、剛性、強度とも極端に変化することはないから、この $\sigma-\epsilon$ モデルをもとに計算した設計用の情報も、ひずみ速度の条件と有効数値に注意して取り扱い限り意義あるものになるはずである。

表 4, 5 の初期剛性: $E_1 \doteq 1.4 \text{ GPa}$ は動的試験から得た多結晶氷のヤング率データ (東, 1981; GOLD, 1977) の約 14~16% の大きさであった。しかし GOLD (1977) によればこのヤング率も試験の周波数によって変わり、 10^{-3} Hz 付近では $E = 3 \sim 6 \text{ GPa}$ にまで下がる。一般に静的荷重を加えて得た $\sigma-\epsilon$ 関係から求めた剛性は動的試験の結果よりも小さく、 -2°C の海水の現場試験では $0.1 \sim 2 \text{ GPa}$ という値も得られている (楠ら, 1973) ので、本実験の初期

剛性も、小さめではあるがほぼ妥当な値とみることができる。この人工氷の物性は最大応力 $\approx 2.3 \text{ MPa}$ 、最大ひずみ $\approx 0.2\%$ などを含めて POPLIN and RALSTON (1992) による北極の氷の実験値 (ひずみ速度 10^{-6} s^{-1}) に近い。

図 7 と表 5 にまとめた応力-ひずみモデルの妥当性を確かめるため、図 8 のような有限要素分割による弾・塑性解析で実験の状態を再現すると、図 4 の実験結果の中に実線で示したような結果が得られた。

使用した解析プログラムは、増分形の定式化による山田・横内 (1981) の方法を基本として若干の修正を加えたもので、定ひずみ三角形要素を用いた 2 次元問題の材料非線形有限要素法である。人工氷を、図 7、表 5 の応力-ひずみ関係をもつ等方性連続体と仮定して解析した。降伏の判定は、各要素の相当応力が特定値に達したときに降伏が始まるとする、金属塑性問題でよく使われる Mises の条件を使っている。

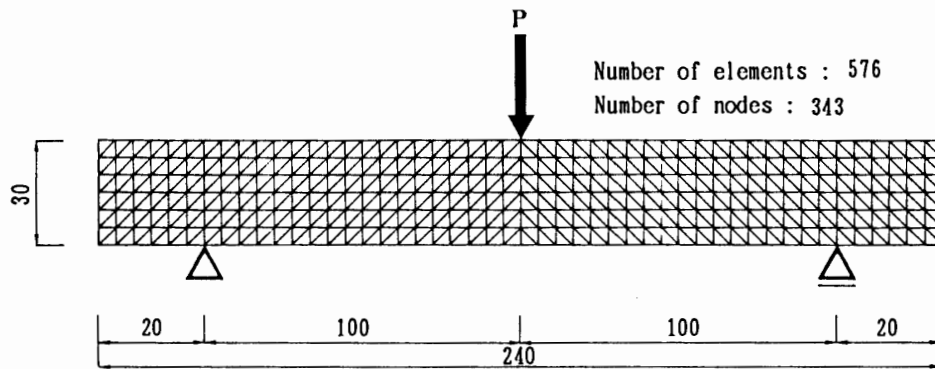


図 8 氷角柱曲げ試験を再現するための弾塑性解析モデルと有限要素分割
 Fig. 8. A calculation model of ice beams by the elastic-plastic finite element method and its finite element pattern (unit: mm). The number of elements is 576 supposing that had constant strain field and the number of nodes is 343.

数値解析結果の曲線を実験と比較すると、積層氷の非弾性部分の剛性がやや高めだが、ひずみ速度が $(3.0 \sim 3.5) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 程度の荷重を受ける人工氷ばりの平均的荷重-変形挙動をほぼ表現出来ているものとみてよいだろう。

3.2. アイスドームの短時間漸増載荷試験

図 9 に示すごとく、頂部に加えた集中荷重を段階的に漸増させて、アイスドームの破壊までの挙動を調べた。荷重は 15 秒ごとに 19.6 N ずつ加えた。載荷速度は $1.3 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ で、前項の曲げ試験の約 4 倍である。図 10 は頂部荷重 P と荷重点の相対変位 δ (アイスドーム荷重点の絶対変位と基底部平均変位の差) の関係である。図 4 と同様にかかなり広い範囲にデータが分散している。表 6 に、各試験体の初期剛性、破壊強度、最大相対変位 δ の一覧を示す。各ドーム模型試験体寸法 (底面直径、高さ) は一定だから、この数値的変動の原因とし

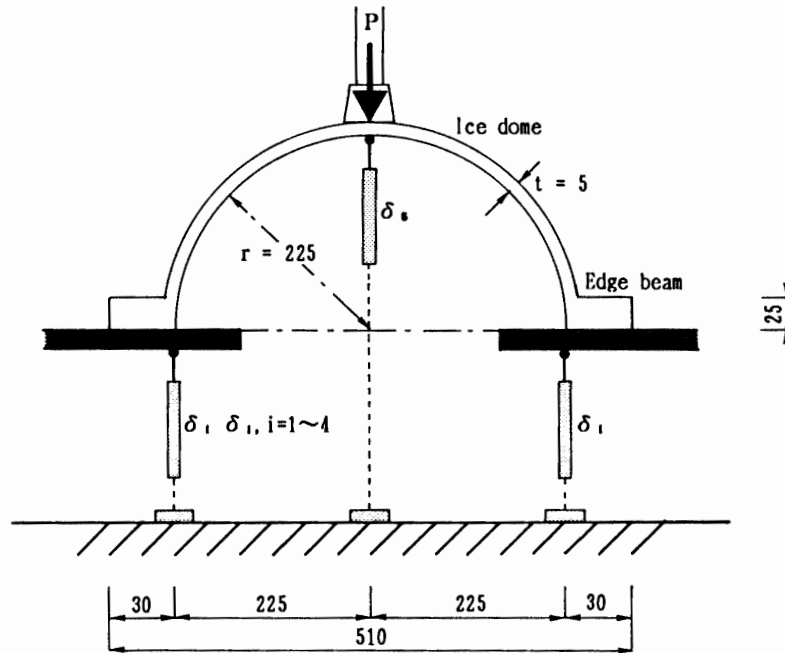


図 9 断面 25 mm×30 mm の裾ばり付きアイスドームの短時間載荷試験
 Fig. 9. Tests on a load-carrying capacity of ice dome with a circular edge beam with square cross-section, 25×30 mm. Ice dome models were simply supported and subjected to a concentrated load, P on the top of domes. Displacement was measured at five points on the model; $\delta_1 \sim \delta_4$: Vertical displacement of axi-symmetrical four points on the circular edge beam made by flooded ice. δ_5 : Vertical displacement of the top of ice domes. δ : A relative vertical deformation from the top of ice dome to the base. ($\delta = \delta_5 - (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)/4$; mm).

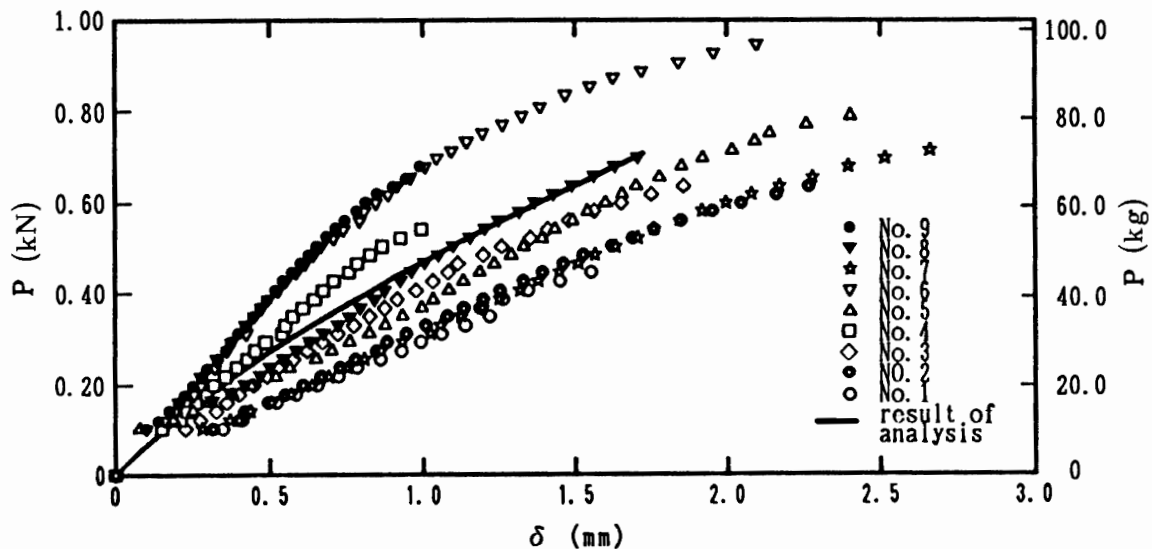


図 10 アイスドーム試験体 9 体の短時間載荷試験結果 (荷重-変形関係) (図中の実線は弾・塑性有限要素モデルによる計算結果)
 Fig. 10. The test result of ice dome models (9 specimens); the relationship of axi-symmetrical load, P to relative deformation, δ at the loading point of ice dome models. Numerical results of the finite element analysis for P - δ relation of the ice dome model were compared with the tests.

表 6 アイスドームモデルの短時間載荷試験結果；初期剛性，最大荷重および最大相対変位

Table 6. Initial stiffness, collapse load and maximum deflection of ice dome models in short-term loading tests.

Model No.	Initial stiffness (N/mm)	Collapse load (N)	Maximum deflection (mm)
1	302.5	443.8	1.554
2	325.8	635.2	2.268
3	442.7	635.2	1.858
4	610.9	539.3	0.995
5	371.8	789.1	2.404
6	777.3	946.3	2.097
7	314.2	713.9	2.661
8	474.0	697.1	1.704
9	769.9	697.1	1.039
Average	487.7±177.9	677.4±135.0	1.872±0.509

て考えられるのは主としてシェル厚と積層氷の品質である。本実験では頂部に集中荷重を加えたので，試験中の目視による観察の範囲では，初亀裂は荷重点周辺で，主として経線方向に発生することが多かった。このように氷の破壊は荷重点周辺から進展するので，ドームの破壊強度は頂部板厚と関係が深いと思われたので，試験体の3種の板厚（頂部板厚，平均値，最小板厚）と強度の関係を図上にプロットして検討した。ドーム強度は板厚の変化に対して非常に鋭敏に反応し，頂部板厚が 5.73 mm から 7.5 mm まで約 1.8 mm 変化する間に，強度は 0.44 kN から 0.95 kN まで変わる。No. 1 試験体を除けば頂部板厚-ドーム強度間にも正比例関係が認められるが，3種の板厚のなかで，全データに対して一番はっきりと正比例関係が認められたのは図 11 に示すドーム強度-最小板厚関係であった。本実験の場合は氷の板厚変化に加えて，積層氷板内部に存在する種々の欠陥が強度に大きな影響を及ぼしている

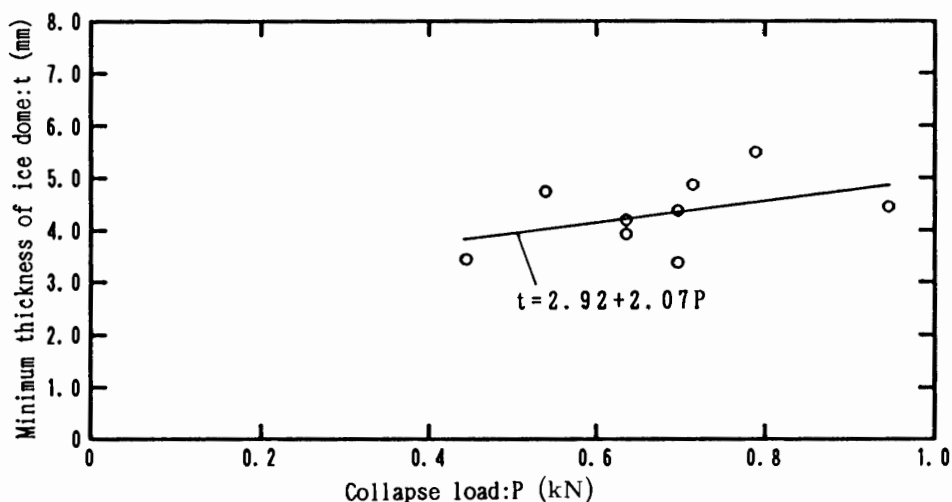


図 11 アイスドームの破壊強度と最小板厚の関係

Fig. 11. Relations of collapse load and minimum thickness of ice domes.

と考えられる。この板厚-強度間の比例関係は、模型の形状や荷重の条件が違おうが粉川・平沢(1982)の実験から得られた強度-板厚関係の一部と似た傾向である。粉川らは底面直径約 60 cm, 高さ約 21 cm のアイスドーム模型に部分分布荷重を加えた短時間加力試験を行い、その力学的性状を、強度に焦点を絞って考察した。これによると初亀裂荷重, 破壊荷重等が、球殻の弾性解から得られた最大応力に氷の破壊条件を適用することによって予測できると結論づけている。

図 12 にドームの破壊状況の典型を示す。目視による観察で、経線方向が卓越する亀裂が認められると間もなく破壊は突然に訪れ、経線方向に数分割される形で板要素が四散する。破壊後の破片の観察から、荷重作用点周辺ではドーム内側(引張側)に蜘蛛の巣状の亀裂が発達しているのが認められた。図 5 のはりの場合と同様に、短時間に漸増する荷重に対しては脆性的挙動が卓越する(例外もあるが総体的にみて図 10 の荷重-変形関係にあまり非線形性が現れずに崩壊している)ので、この種の荷重を受ける場合の設計安全率は、少なくとも

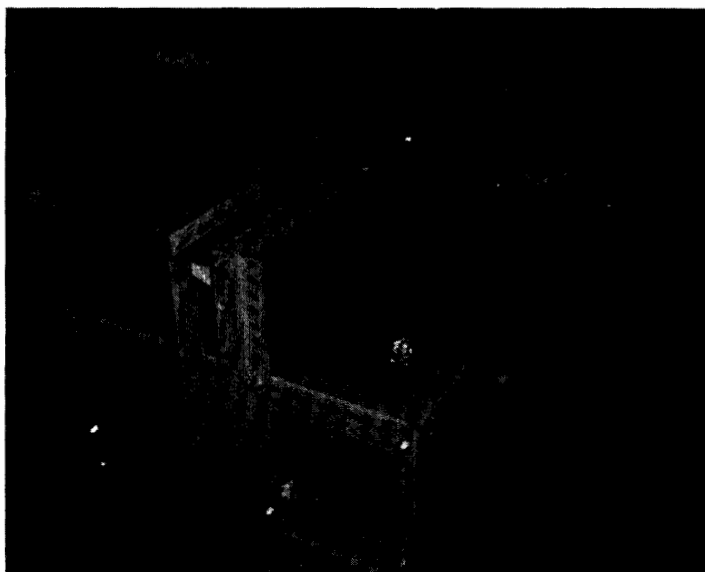


図 12 アイスドーム模型の破壊状況
Fig. 12. Collapse pattern of ice dome models.

コンクリート(構造材として単独で使う場合、建築材料の中では比較的延性に乏しい)の材料安全率, 3 を上回る数値を取る必要があろう。

数値解析的検討: 載荷速度がはりの曲げ試験よりも大きい、前項で得た応力-ひずみモデル(図 7, 表 5)がそのままこの場合も適用できると仮定し、さらに氷を等方性連続体と仮定した弾・塑性有限要素法でドームの荷重-変形挙動の解析を試みた。荷重とドームが共通の対称軸をもつので軸対称問題として次元を 1 次低減した 2 次元解析を行った。解析モデルの形状、荷重作用位置、境界条件および要素分割を図 13 に、数値計算結果の荷重-変形関係

を図 10 の実験値の中に実線で示した. この数値例は実験モデルの平均板厚より小さめの $t=5\text{ mm}$ を設定した等厚ドームモデルだが, 非線形領域も含めてアイスドームの平均的荷重-変形挙動をほぼ表現できていると考えられる. 解析では $P=51.3\text{ N}$ で初めて荷重点内側の一つの要素応力が非弾性となった. 実験ではドーム頂点で直径 50 mm の短円柱状硬質ゴムを介して荷重を加えているので, 図 13 の頂部一点集中載荷モデルに無理があるための早期非弾性化と考えられる. つづいて荷重の増加と共に, 荷重点の周囲に非弾性要素が広がり, $P=244.6\text{ N}$ までの間に, 図 13 中に順位番号をつけて示した 5 個の要素が非弾性状態に入った. 最大荷重点では図 13 中に示した 13 要素が非弾性となった. これよりドームの崩壊は頂部

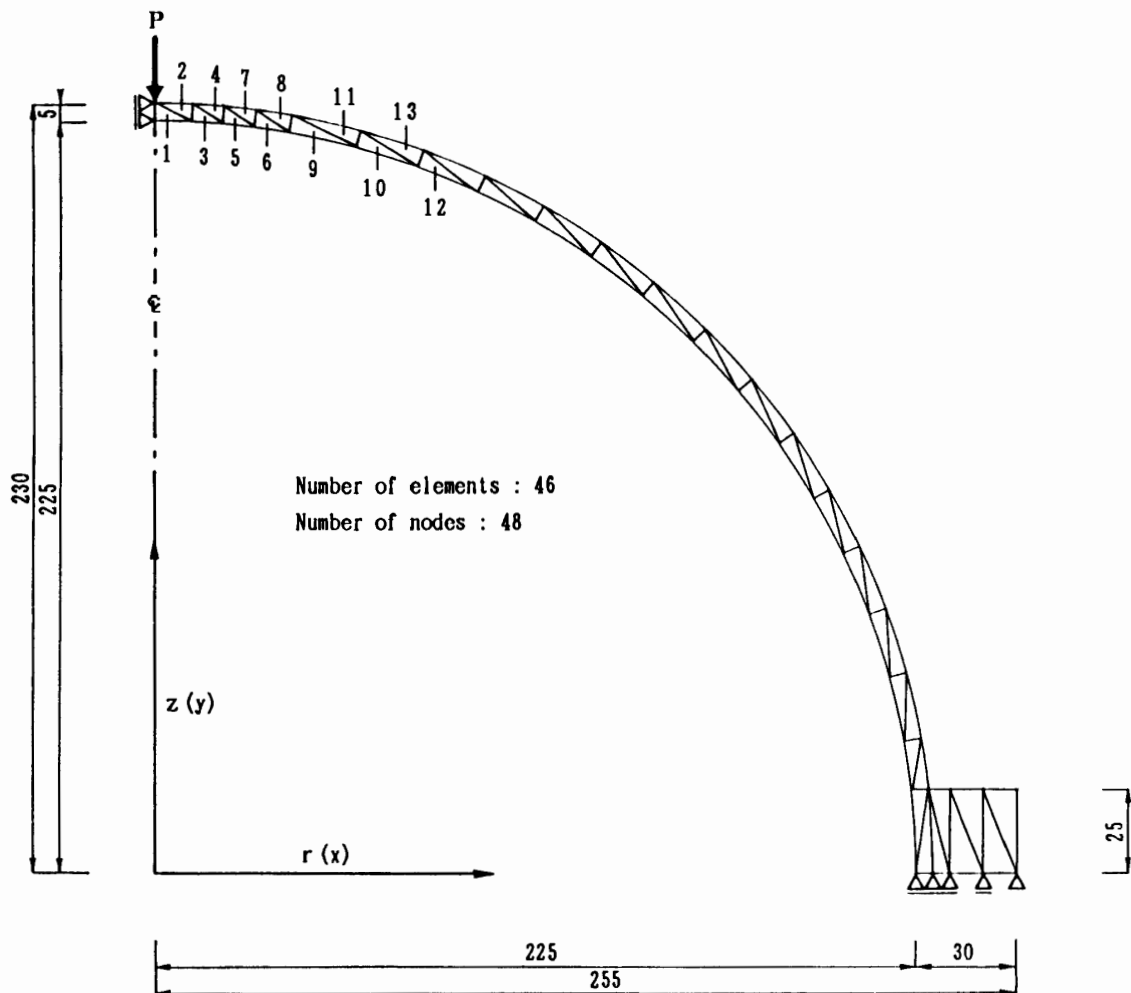


図 13 アイスドームの弾塑性解析モデルと有限要素分割および要素の非弾性化順序

Fig. 13. An axis-symmetrical model for the elastic-plastic finite element analysis of the ice dome and its finite element pattern. The model consisted of 46 triangular elements supposing that had constant strain field. Mechanical behavior of the ice in Fig. 7 and Table 5 was used. Elements around loading point in the figure are in the order of elements coming to elastic limit (unit: mm).

の荷重点周囲から始まるものと予想され、試験中の観察による荷重点周辺の亀裂発生現象も裏付けられる。

以上の数値例の検討から、適切な氷の応力-ひずみモデルが（例えば図 7, 表 5 のように）予め与えられれば、等方性連続体仮定の有限要素解析で短期間に急増する荷重を受ける氷構造物の荷重-変形挙動がほぼ推定できることが確かめられた。

3.3. アイスドームのクリープ試験

前項と同様な方法でアイスドーム頂部に一定の集中荷重を加えて低温室内に放置し、その荷重点と基底部との相対変位, δ を 1 時間ごとに自動記録した。頂部に加えた荷重の大きさはドームの破壊荷重平均値の約 20% (141.2 N) である。こうして得た約 350 時間の $\delta-t$ (時間) 関係の一例を、低温室の室温履歴と共に図 14 に示す。先に述べたようにクリープ試験は

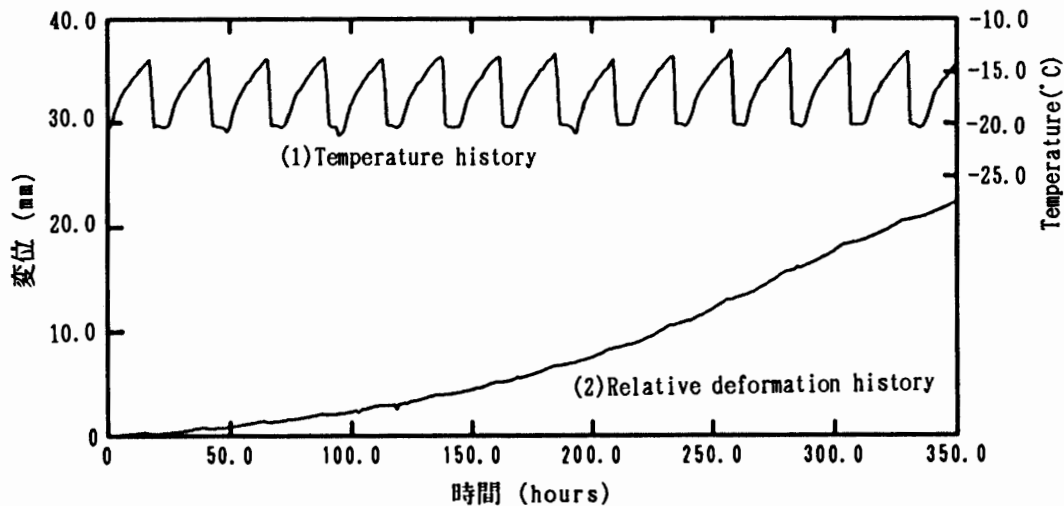


図 14 アイスドームのクリープ試験結果 (141.2N の集中荷重 (短期崩壊荷重の約 20%) を加えて、平均 -18°C の低温室内に放置したアイスドーム試験体の変形の時刻歴)

Fig. 14. A creep test of ice dome. A load of 141.2 N was set on the top of ice dome constantly and the dome was left as it was in the testing room controlled with -18°C on the average. The load was about 20% of collapse load of the dome. (1) Temperature history of the test room. (2) Relative deformation history of the testing ice dome. A measurement system of δ is the same as shown in Fig. 9.

継続中であり、ここで示すのは中間的に整理した一体の試験結果である。設定荷重が大きすぎたため、変形は時間とともに指数関数的に増大している。このまま変形が進めばクリープ破壊が起こるはずだが、さきに試験装置の計測能力が限界に達したので実験を中止した。

4. アイスドームのクリープ解析

積雪・氷のクリープを力学モデルで解析する時、粘・弾性要素の組み合わせ方で、Max-

well-Voigt の複合モデル (4 要素模型) がよく使われる (図 15). 氷は本来この 4 要素モデルで表される性質をもっているが, 数値モデルとして使う場合は 4 個の弾性・粘性定数を予

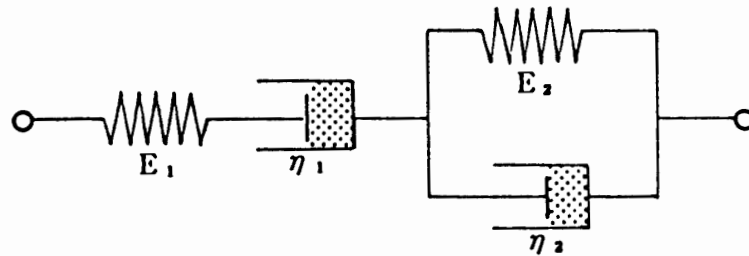


図 15 氷の粘・弾性力学モデル

Fig. 15. A visco-elastic model on mechanical properties of ice. (Maxwell model + Voigt model = Burger's model).
 η_1, η_2 : viscosity factor, E_1, E_2 : elastic modulus.

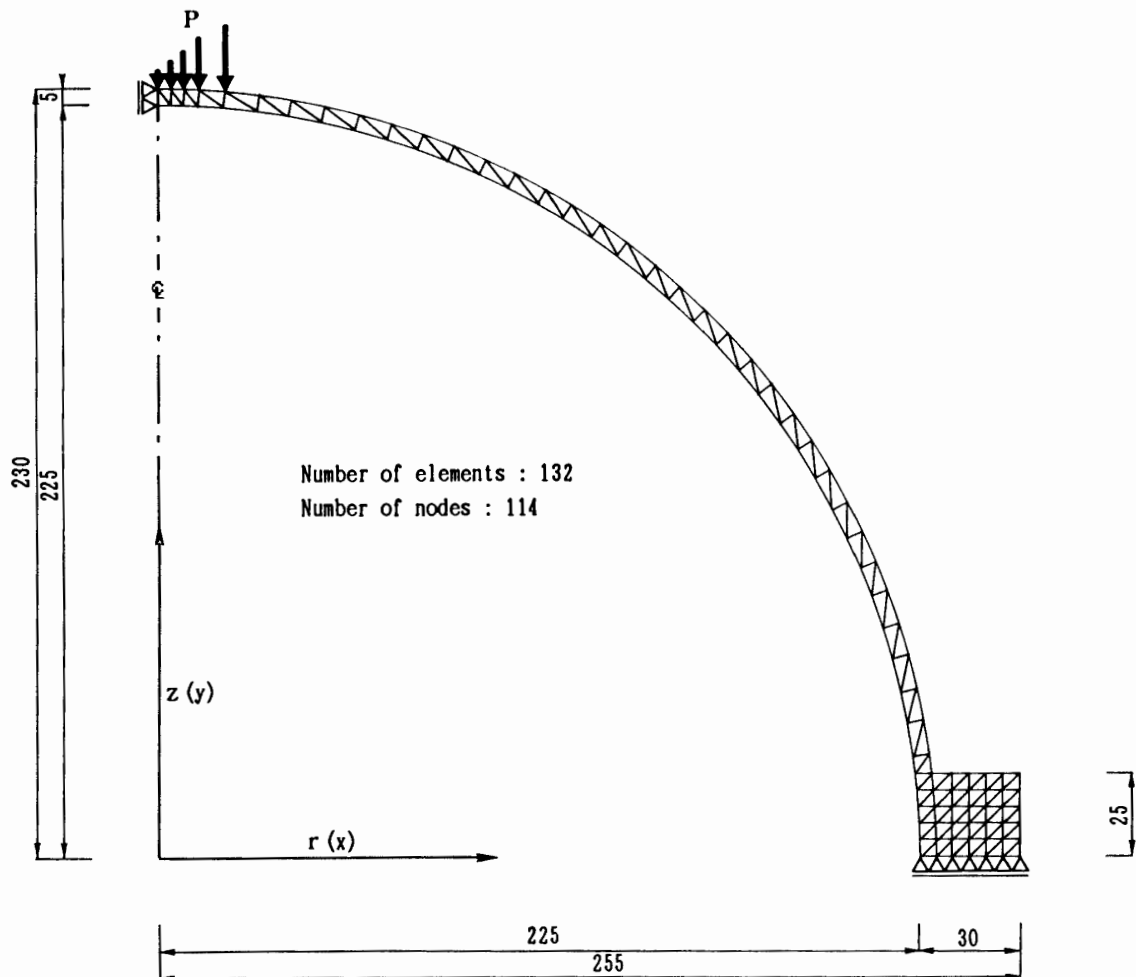


図 16 アイスドームのクリープ解析モデル

Fig. 16. An axis-symmetrical model for the visco-elastic finite element analysis of the creep of ice dome. The model consisted of 132 triangular elements. Mechanical behavior of the ice proposed in Fig. 7 and Table 5 was used (unit: mm).

め準備する必要がある。ここでは問題を簡単にするために、定常クリープに注目して 2 要素の Maxwell モデルを試用した。この Maxwell 粘性に関する篠島 (1962) の実験式を修正して、時効硬化を加えたモデルを使って雪洞の長期クリープを解析した (半貫ら, 1989) 経験に基づき、今回の実験のように比較的密度のばらつきが大きな人工氷についても、その温度依存性を指数関数型で仮定できるとして、はじめに式 (1) の形の粘性係数を導入して、クリープ計算を試みた。

$$\eta = \eta_0 \exp(aT) \quad (\text{g} \cdot \text{h} / \text{cm}^2), \quad (1)$$

ここで η_0 : 粘性係数の基準値, a : 温度依存性の係数, T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。氷の場合はクリープの過程で密度変化はほとんどないので、密度依存性は η_0 のなかに含めた。すなわち η_0 を密度の関数と考えた。

クリープ計算に使用したプログラムは、場の状態決定には増分形の有限要素法を、時間に関する積分には差分法を用いたものである (半貫ら, 1989)。解析対象が軸対称問題なので 2 次元問題として解析した。有限要素法解析モデルの要素分割と載荷および境界条件を図16に示す。前項の数値解析の経験から、変形が荷重点周囲に集中することが予想される。実験では硬質ゴムにより直径 50 mm の円内に荷重を分布させたので、解析モデルではこれを均等

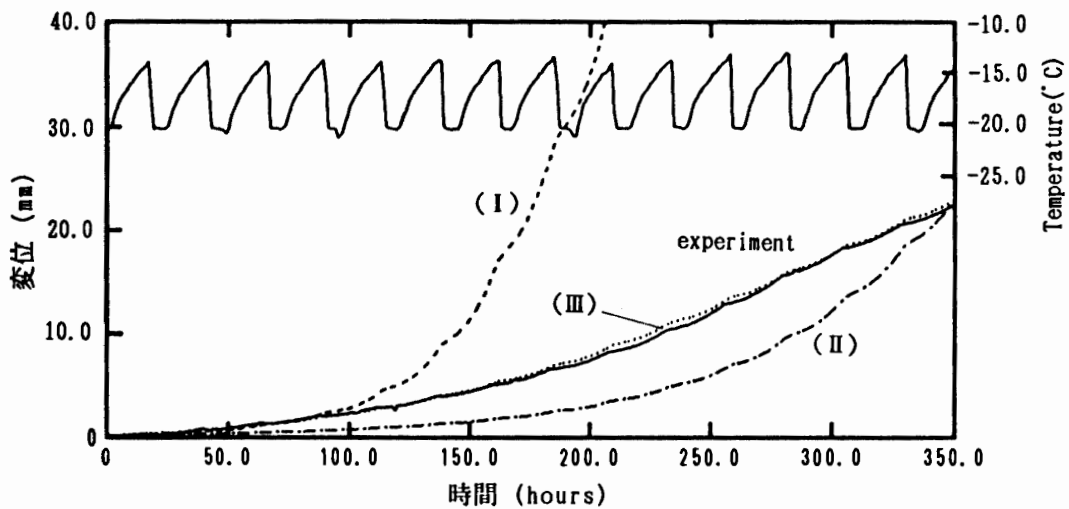


図 17 いくつかの粘性係数表示式を用いた解析結果と実験 (実線) の比較
 曲線 I : $\eta = \eta_0 \exp(aT)$; $\eta_0 = 6 \times 10^7$, $a = -0.134$ を用いた解析結果
 曲線 II : $\eta = \eta_0 \exp(aT)$; $\eta_0 = 12 \times 10^7$, $a = -0.134$ を用いた解析結果
 曲線 III : $\eta = \eta_0 \exp(aT) \exp(bt^{1/2})$; $\eta_0 = 3.12 \times 10^7$, $a = -0.134$, $b = 0.12$ を用いた解析結果 (ここで, T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$), t : 時間 (hour)).

Fig. 17. Analytical results with some function models of Maxwell's viscosity compared with creep test.

Curve I: calculated with $\eta = \eta_0 \exp(aT)$, $\eta_0 = 6 \times 10^7$, $a = -0.134$,
 Curve II: calculated with $\eta = \eta_0 \exp(aT)$, $\eta_0 = 12 \times 10^7$, $a = -0.134$,
 Curve III: calculated with $\eta = \eta_0 \exp(aT) \exp(bt^{1/2})$; $\eta_0 = 3.12 \times 10^7$,
 $a = -0.134$, $b = 0.12$; where T : temperature ($^{\circ}\text{C}$) and t : time (hour).

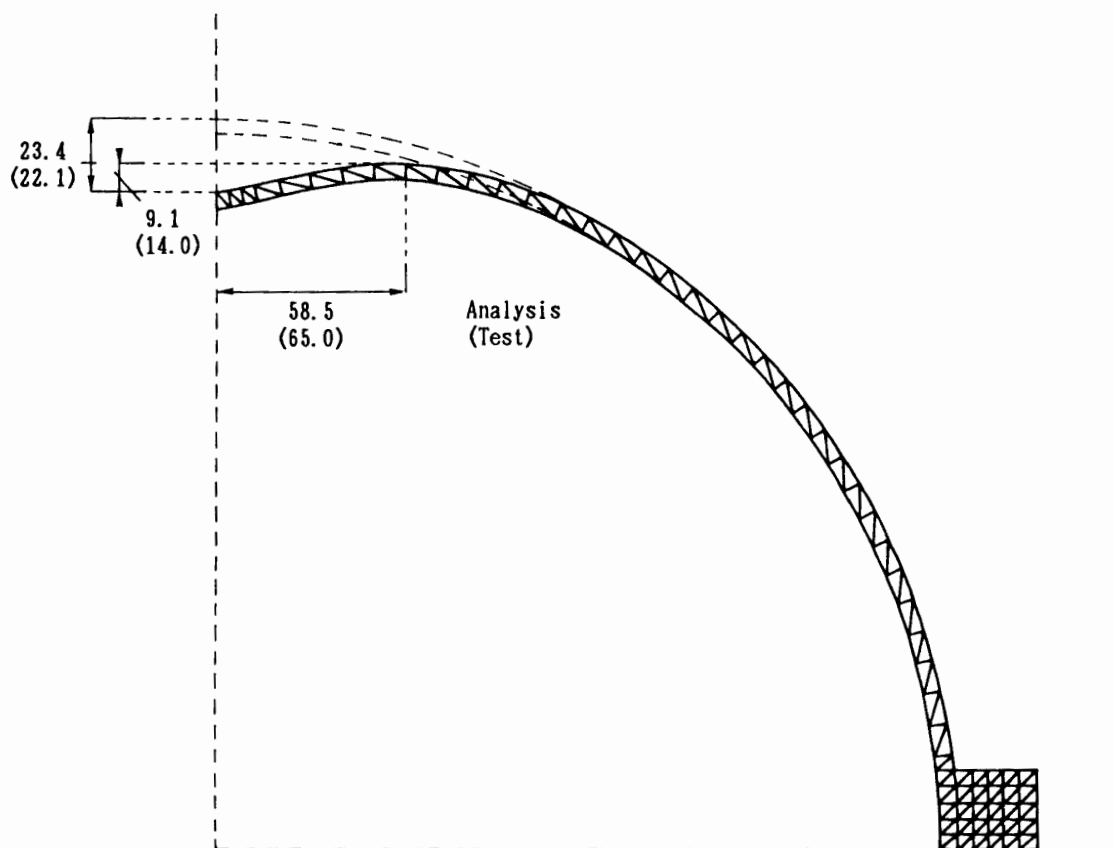


図 18 クリープ解析から得られた 350 時間後の変形 (図 14 の最終値) と実験値 (図中, カッコ内の数値) の比較

Fig. 18. A deformation of ice dome after 350 hours that was calculated by the creep analysis system. A deformation of the dome top was compared with the test result.

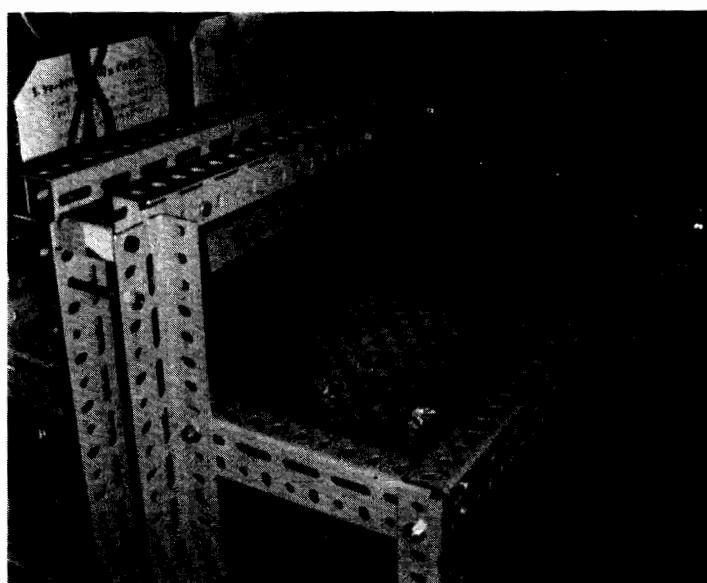


図 19 アイสดーム模型の 350 時間後のクリープ
Fig. 19. Creep of the ice dome model after 350 hours.

分布荷重とみなし、単位幅の線荷重に置き換えて分散させ、図 16 に矢印で示した。

式 (1) で Maxwell 粘性を評価した計算例を図 14 の実験値に重ねて示したのが図 17 である。初期クリープに照準を合わせると図中の点線で表した曲線 I ($\eta = \eta_0 \exp(aT)$, $\eta_0 = 6 \times 10^7$, $a = -0.134$ として計算した) のようになり、後半の変形に合わせて粘性を制御すると一点鎖線の曲線 II ($\eta = \eta_0 \exp(aT)$, $\eta_0 = 12 \times 10^7$, $a = -0.134$ として計算した) になって、式 (1) の関数形では実験値を再現出来そうもないことが分かった。そこで雪と同様に、粘性係数が時間とともに増加すると仮定し、式 (2) のような関数形を仮定して再計算した結果が、図 17 の中に細かな点線で示してある。

$$\eta = \eta_0 \exp(aT) \exp(bt^{(1/2)}) \quad (\text{g} \cdot \text{h}/\text{cm}^2), \quad (2)$$

ここで b : 時効硬化係数, t : 時間である。

この、式 (2) の形の粘性係数を使うと ($\eta_0 = 3.12 \times 10^7$, $a = -0.134$, $b = 0.12$ を仮定), 実験結果によく似たクリープ曲線が得られ、最終変形図 (図 18) も実験とほぼ一致した。解析結果は荷重作用点付近の局所的変形の状態 (図 19) をよく表しており、この実験の範囲では氷の粘性係数も時間と共にすこし大きくなる期間があると解釈することも可能である。他方、図 18 のように変形が進むと幾何学的非線形性の影響が大きいはずだが、ここで使った解析システムでは大変形問題の幾何剛性を考慮していない。要素に対する荷重の作用位置もわずかに変わるので、この数値計算結果の信頼度は大変形域で低下するとみるべきである。実験では氷の物性値の変化、釣り合いの幾何学的非線形性などの効果が複合した結果が現れているのだから、時効硬化だけに影響を集約するのは危険であるという見方もできる。いずれにしろこれは前項までの吟味と異なり、いまのところ実験データが 1 例しかないので、変動が予想されるデータの分布域も分からず、図 14 だけからアイスドームのクリープ性状を結論づけることはできない。しかし、ここで試した計算法を使うと、クリープ特性の再現にも期待がもてると言うことはできよう。

アイスドームのクリープ崩壊 (クリープ座屈) については粉川 (1983, 1984) の研究があり、構造安全性のパラメーターとして作用荷重と崩壊までの時間の積にクリープ係数を乗じた無次元クリープ座屈値をとりあげて検討している。

5. ま と め

南極氷床上でのアイスドーム実現の可能性が確かめられ、本研究の所期の目的は達成できた。

アイスドーム設計のための力学応答計算手段として、短時間作用荷重に対しては等方性連続体仮定の弾・塑性有限要素モデルの有用性が確かめられた。ただし適切な応力-ひずみモデルを準備することが前提条件となる。

長時間のクリープに対しては、単純化のために4要素モデルのVoigt要素を省略した2要素のMaxwellモデルだけでも有用な設計情報を用意できる可能性が確かめられた。解析的なクリープモデルについてはさらに多くの実験と併せて組織的に検討する必要がある。

6. 今後の課題と実用化へ向けての検討

次のステップとして実スケールのモデルを使った南極での試作実験とクリープ測定を考慮しており、すでに著者の一人があすか観測拠点で第32次観測隊の協力のもとに粉川の方法によるアイスドームを建設し、いくつかのデータを得ている。これについては稿を改めて検討したい。

アイスドームの設計システムを完成させるためには、氷の物性、とくに粘性項の温度依存性に関するデータを充実させる必要がある。また、日射によるドーム表面の昇華・融解量の評価と設計への導入法の検討が残されている。

1977年に観測されたみずほ基地の光沢雪面における昇華・凝結収支量の記録(国立極地研究所, 1982)によると、凝結が卓越するのは4月中旬から9月中旬までの冬季5カ月で、この間の凝結量が $0.64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、昇華が卓越するのは9月中旬から4月中旬にかけての夏季を中心とする7カ月で、昇華量の合計は $5.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ であり、年間の収支は圧倒的に昇華が卓越して $4.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ という値を示す。これを氷厚の年間減少量に換算すると、密度を $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ として $4.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}/0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}=5.39 \text{ cm}$ となる。同データによると、最も昇華が多いのが12月で $2.09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (密度 $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の氷厚換算で 2.32 cm/月)、次いで1月は $1.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (氷厚換算で 1.69 cm/月)、11月から2月までの4カ月間で氷厚が約 5.8 cm 減少する(平均の氷厚減少速度は約 1.4 cm/月)。アイスドームもほぼ同条件で昇華が進行すると考えると、みずほ基地の場合、夏季にはほぼ月一回の割合でシェル厚を 1.5 cm 増す程度の散水作業を維持・管理システムに組み入れる必要がある。この昇華速度を制御する工夫としては、輻射熱遮断用のカバー(断熱シート)でドームを覆う方法、あるいは除雪機を使って定期的に雪をかけてドーム表面をカバーすることなども考えられよう。

ドームの保守については、使用中の危険度の判断をシステム化する必要がある。ドーム単体はスノドリフトがつきにくい構造だが、ドーム周囲の障害物の状況によっては急激にスノドリフトが成長することもあり得る。このような短時間に加わる荷重によって破壊が起こる場合は、変形能力が小さいので、ドームに作用する荷重(例えば積雪深)で危険度を判断できるような方法を工夫するのがよいだろう。クリープが進行して破壊が起こる場合は、変形量を監視して限界値を判断する方法が考えられる。

このクリープの進行による変形に対しては、これを補修・補強する方法を見つけるのが難しい。この場合は変形が許容限界に達したら作り替えるのが一番簡単だが、貯蔵庫として利

用するときにはドーム内の物品管理や貯蔵物資の簡単な移動システムを考えておく必要がある。

謝 辞

本論文をまとめるに当たって、北海道東海大学芸術工学部の粉川牧教授に有意義な助言と貴重な情報を提供していただいた。人工氷の物性解釈については、北海道大学低温科学研究所の成田英器講師から助言をいただいた。以上の方々に深く感謝いたします。また、日頃設営工学全般についてご指導いただいている国立極地研究所設営専門委員会建築分科会長、佐藤稔雄日本大学教授に感謝いたします。日本大学理工学部建築学科の白石克己、山中健司、山梨稔、藤田浩稔の諸君には卒業研究の一環として実験に参加・協力していただいた。また、実験は国立極地研究所の低温室で行った。関係各位のご協力に感謝いたします。なお、実験費用の一部は、同研究所の客員教官研究費によるものである。

文 献

- GLOCKNER, P. G. (1988): Reinforced ice and ice domes: Opportunities for the North. *Int. J. Space Struct.*, 3 (2), 84-102.
- GOLD, L. W. (1977): Engineering properties of fresh-water ice. *J. Glaciol.*, 19, 197-212.
- 半貫敏夫・内田昌勝・小寺 浩・渡辺澄人・佐藤稔雄 (1989): 雪面近くに作られた建築空間用雪洞の長期クリープ解析. その 1~3. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 構造 I, 日本建築学会, 187-192.
- 半貫敏夫・二見賢仁・石沢賢二・津久井啓太 (1991): アイスドーム模型の試作と強度実験. 第 14 回極域気水圏シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 57-58.
- 東 晃 (1981): 寒地工学基礎論. 東京, 古今書院, 165-167.
- 粉川 牧 (1983): アイスドームのクリープ崩壊実験. 第 33 回応用力学連合講演会・講演論文抄録集, 151-152.
- 粉川 牧 (1984): Ice shell structures の研究. 第 3 報: Ice domes の軸対称クリープ座屈解析. 北海道東海大学紀要, 5, 17-24.
- KOKAWA, T. (1985): Experimental studies on ice shells in Asahikawa. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 11, 155-170.
- 粉川 牧 (1987): 雪と氷でアイスドームを造る. *科学朝日*, 47(2), 6-9.
- KOKAWA, T. (1988): Construction and creep test of 15 m span ice dome. *IAHR Ice Symposium*, 1988, Sapporo, Vol. 2, 390-399.
- 粉川 牧 (1990): アイスシェル. *建築技術*, 469, 188-189.
- 粉川 牧・平沢 勇 (1982): Ice shell structures の研究. 第 1 報: 短時間加力による ice domes の力学的性状. 北海道東海大学紀要, 3-4, 77-85.
- KOKAWA, T. and MURAKAMI, K. (1986): Challenge to 20 m span ice dome. *Proc. I.A.S.S. Symposium on Shells, Membranes, and Space Frames*, Vol. I, ed. by K. HEKI. Osaka, 297-304.
- 国立極地研究所編 (1982): 南極の科学 4. 氷と雪. 東京, 古今書院, 69-74.
- 楠 宏・鳥居鉄也・原田美道・山縣 登・吉田栄夫編 (1973): 南極. 東京, 共立出版, 84-174.
- MELLOR, M. (1980): Mechanical properties of polycrystalline ice. *Physics and Mechanics of Ice*, Symposium Copenhagen, ed. by P. TRYDE. Berlin, Springer, 217-245.
- POPLIN, J. P. and RALSTON, T. D. (1992): Physical and mechanical properties of Hobson's Choice Ice Island cores. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 20, 207-223.
- 篠島健二 (1962): 雪の粘弾性的取扱い. *鉄道技術研究報告*, 328, 53.

山田嘉昭・横内康人 (1981): 有限要素法による弾塑性解析のプログラミング—EPIC IV 解説—. 東京, 培風館, 183.

(1992 年 3 月 31 日受付; 1992 年 6 月 8 日改訂稿受理)