

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

粉 川 牧,**平 沢 勇***

A Study on Ice Shell Structures

.Part 1 On the behaviour of ice domes under short term loading

by

Kokawa TSUTOMU and Hirasawa ISAMU

Abstract

It is suggested that ICE SHELL STRUCTURES may be an efficient method for providing an architectural solution to the problem of improving the environment in the arctic regions.

This paper describes an experimental and theoretical investigation of short term static behaviour of ice domes. It contains as follows.

- (1) Axisymmetric distributed load was applied up to failure to about fifty small scale models on a circular area concentric with the apex.
- (2) Tests on uniaxial strength of snow-ice material were conducted and analytical method of elastic spherical cap under same loading conditions were developed. By combination of these results, we proposed the method of predicting initial cracking loads, collapse loads and elastic deformations of test models.
- (3) The theoretical collapse loads moderately agreed with the experimental values.

§1 はじめに

氷及び雪氷の力学的性質に関しては既に雪氷物理学の分野で研究が行われ、その解明もかなり進んでいる様である。¹⁾ これら基礎的研究の成果を踏まえ、近年北方圏では雪氷を構造材料とした“Temporary Structures”の技術開発が行われている。^{2),3)} 本研究で対象とする“Ice Shell”もこの流れの一つと考えられ、北方圏特有の生活空間を創り出す建築技術として提案されるものである。Ice Shell とは、従来、生活環境の障害物としてしか見做されていなかった雪氷を、構造材料として活用し、これと力学的合理性に富む曲面(シェル)構造を組み合わせた構造物のことを言い、もしこの Ice Shell が比較的大規模にして且つ構造的に安全であれば、

北方圏に於ける冬期間の“Temporary Structure (一時的構造物)”として将来大きな期待がもてる。しかしながら、Ice Shell に関する構造工学的研究は極めて僅かで、^{4),5)} 力学的性能についても未解明なことが多く、又、実際につくられているものも^{6),7),8)} 規模的にかなり小さいのが現状である。

本研究はスパン30メートル程度の規模をもつ“Ice Shell”を対象として、簡便にして迅速な建設方法を提案且つ実証し、さらに構造的安全性に関して実験的且つ理論的検証を行うことを目的としている。本論文はその第1報として、短時間加力に於ける“Ice Shell”の力学的性状を解明しようとするもので、集中的等分布荷重を受ける周辺固定縮尺 Ice Domes の破壊実験を実施し、

*受理 昭和57年12月10日

**北海道東海大学芸術工学部建築学科講師

***北海道東海大学芸術工学部建築学科助教授

その結果として得られた初亀裂荷重、最大荷重及びヤング係数を、雪氷の一軸圧縮、引張強度実験結果と球殻弾性理論解によって比較検討を試みたものである。

§ 2 縮尺 Ice Domes の破壊実験

1 供試体の製作

底面直径約60cm、開角約90度、周辺固定の Ice Domes 供試体を次の様にして製作した。2枚1組の F. R. P. (ガラス繊維で補強されたプラスチック) 曲面板を型枠とし、そのすき間 (10~18mm程度) にシャーベット状の雪を軽くつめ、さらに水を注入して凍結硬化させる。写真-1に示す様に、供試体を降雪から保護する為に、凍結硬化は簡易テント内で行われた。図-1は実験期間中 (

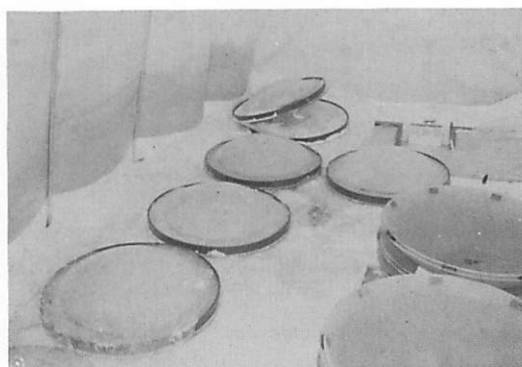


写真-1 供試体の製作状況

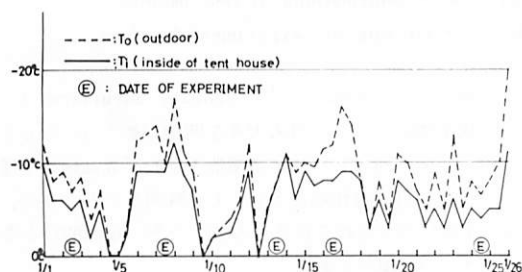


図-1 実験期間中の温度変化 ①

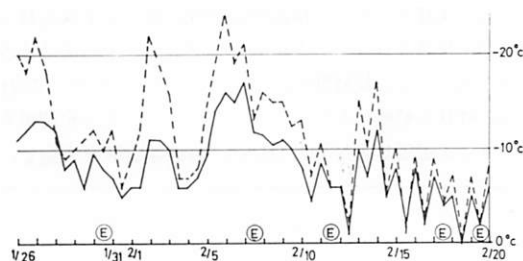


図-1 実験期間中の温度変化 ②

昭和57年1月~2月)の温度変化を外気温とテント内温度について示したもので、テント内温度 T_i は外気温 T_o と比べて高く、特にその差が最大となるのは2/2のときで約10°Cも違いがある。これはテントに積る雪の断熱作用によるものである。凍結硬化に要する時間は勿論、 T_i が低ければそれだけ短くなるが、いずれの場合も1日あれば充分であった。凍結硬化後、F. R. P. 型枠をはずす際強引に行うと供試体に無理な変形を与えクラックを生じるので、その防止策として供試体と型枠の境界面を融かしてから脱型した。最後に、周辺が固定状態となる様に供試体を基礎底板上にとりつけた中心直径約60cm、幅約8cm、高さ約5cmの溝部分にセットし、さらにシャーベット状の雪をつめ、テント内で再び凍結硬化させ供試体を製作した。

2 供試体の温度及び板厚測定方法

供試体雪氷の温度 T_s は製作場所であるテント内温度 T_i と時間遅れもなく、ほぼ一致したので、供試体温度 T_s は破壊実験中に於ける T_i の平均温度で評価することにした。殻厚測定は供試体破壊後ノギスで4ヶ所について行い、その平均を殻厚 h とした。

3 载荷及び測定方法

簡易テント内で製作した供試体を実験室内に持ち運び加力実験を行った。この場合室温が+2°C~5°Cであるので供試体温度上昇の強度に及ぼす影響が懸念されたが、加力開始から最大荷重に達する迄の時間が約3分以内と極めて短時間であるので、この影響はないものと判断した。図-2に実験方法の概要を示す。供試体①中央部分

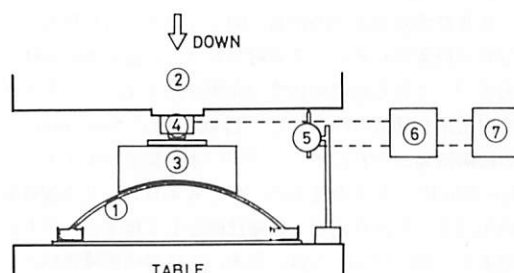


図-2 実験方法の概要

がほぼ集中的等分布载荷となる様に、供試体と加力装置 (電子自動平衡型アムスラー万能試験機: マル井製作所) ヘッド②の間に接触直径約30cmの木製加圧板③をおき、荷重速度を5~10kg/secとして実験を行った。荷重はアムスラー取り付けの荷重変換器 (歪ゲージ式: 5トン用) ④で、供試体の変位はアムスラーヘッドとベッドの

相対変位に等しいものとし変位変換器（歪ゲージ式：ストローク10mm）⑤で、夫々計測する。荷重と変位の出力は動歪測定器⑥を介して、X-Yレコーダ⑦上に記録させた。

写真-2に縮尺Ice Domesの実験状況を示す。

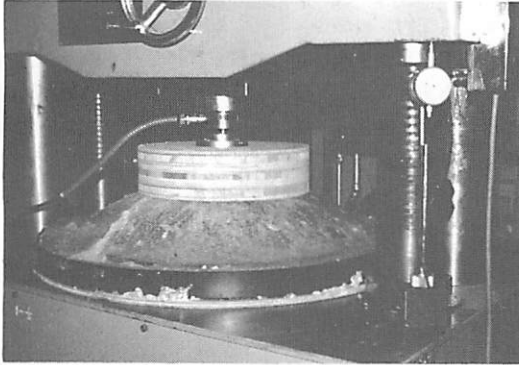


写真-2 縮尺Ice Domesの実験状況

4 実験結果

供試体総数は53体で、その内訳として表-1に破壊実験を行った月日、そのときの供試体温度 T_s 、供試体数、図に用いられるシンボルを示す。図-3に荷重-変位曲線の一例を示す。図中、横軸 W は変位計の読み、縦軸 P は加圧板を介して供試体に作用する全荷重で、 h は殻厚、 P_c 、 P_b は夫々、初亀裂荷重、最大荷重を表わす。この図にも示されている様に縮尺Ice Domesの力学的性状は次の様である。加力してまず、Domesの非載荷部分経線方向に初亀裂線が入る。これは、雪氷は引張りに弱く且つ緯線方向に引張力が作用している為である。初亀裂が発生すると加力装置の性質によって荷重は一旦低下する（荷重が単調に増加する場合は、荷重値はそのまま変位が急増する。）が、破壊はせず、載荷能力を回復する。これは、周辺固定が亀裂発生に伴う供試体の膨脹を拘束する為と思われる。さらに載荷を続けると、細

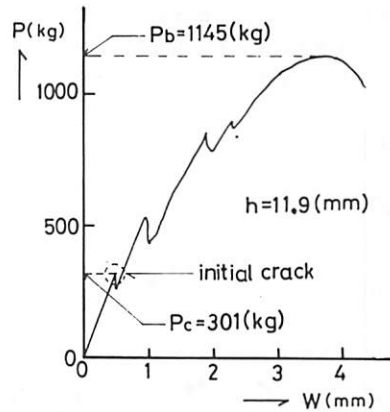


図-3 実験荷重-変位曲線（1/16実施）

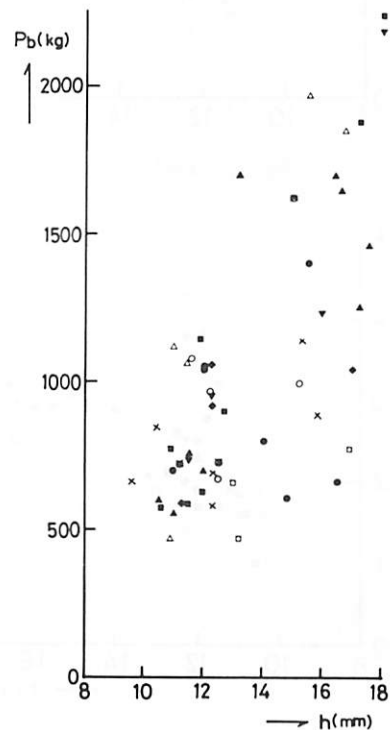


図-4 実験最大荷重

表-1 実験日程表

実験日	供試体温度	供試体数	シンボル
1982/1/2	-5(°C)	7	●
1/7	-8	9	▲
1/13	-8	3	⊗
1/16	-8	8	■
1/24	-3.5	4	▼
1/30	-9.5	4	◆
2/7	-11	4	○
2/11	-6	5	△
2/17	-4	6	x
2/19	-2	3	□

かい亀裂と数度におよぶ比較的大きな亀裂を生じつつ、やがて最大荷重点に達する。

図-4は、殻厚 h (mm) を横軸に、最大荷重 P_b (kg) を縦軸にとって、供試体温度 T_s (°C)（各シンボルについては表-1参照）毎に実験結果をまとめたものである。結果はバラツキが大きいものの、 P_b は h に比例しているのが分り、一方、 T_s の P_b に及ぼす影響は、 T_s が一

2℃（図中□印）のとき P_b は小さいが、その他の温度範囲に於ては認めることができなかった。

図-5は初亀裂荷重 P_c を、図-6は P_b/P_c をそれぞれ

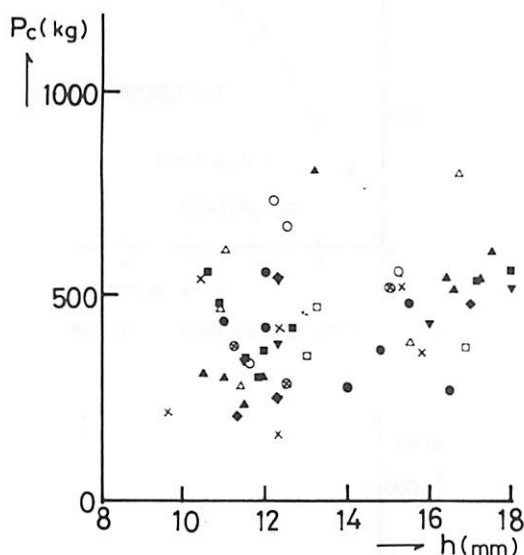


図-5 実験初亀裂荷重

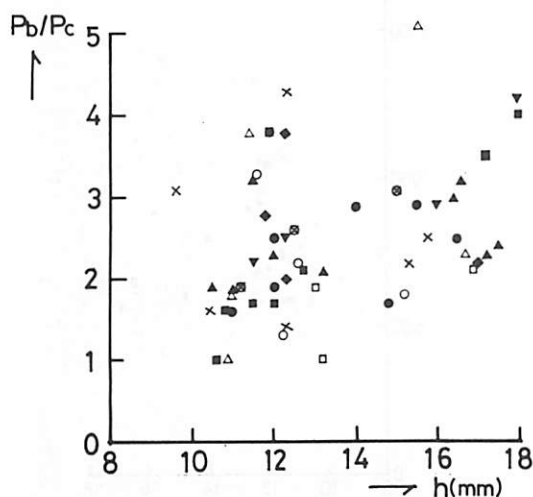


図-6 最大荷重 / 初亀裂荷重

れまとめたもので、これらより P_c は T_s の影響が認められないこと、 P_b の場合に比べて h による増加割合が小さいこと、従って同じ事ではあるが P_b/P_c は h が増すにつれ大となることが示された。

§ 3 一軸強度実験

一言で多結晶氷といってもいろいろあり、その生成過程により力学的性質も異なる。そこで、ここでは、§ 2

で述べた Ice Domes 併試体雪氷材質と同様な試験体をつくり、一軸の圧縮、引張実験を行った。

1 圧縮強度実験

圧縮試験体の製作に用いた雪は人工的雪、天然雪の2種類であった。尚、ここでいう人工的雪とは氷を粉末状にしたものを意味する。

a 人工的雪の場合

氷を手動氷かき機によって粉末状にしたもの（人工的雪）に水を混入し、シャーベットにしてウレタンゴム成形棒につめ、縦5cm、横5cm、高さ15cmの角柱雪氷試験体を温度調節可能な（精度は±2℃程度）冷蔵庫で作る。約50体について実験を行い（写真-3参照）、荷重速度



写真-3 一軸圧縮強度実験

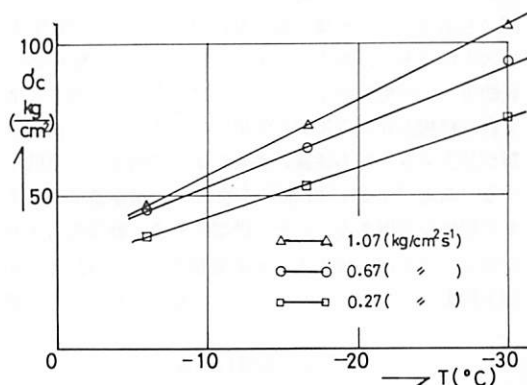


図-7 一軸圧縮強度

と試験体温度が圧縮強度 σ_c とヤング係数 E_c に及ぼす影響を調べた。ここに、 σ_c は圧縮破壊荷重を断面積（5cm×5cm=25cm²）で除して求めた。一方、 E_c はX-Yレコーダに描かれた荷重-変位曲線の原点近傍の傾きから計算した。図-7より、 σ_c (kg/cm²) は温度 T の低下につれ、又荷重速度が大きくなるにつれ、増加することが分かる。一方、図-8より、 E_c (t/cm²) は T が

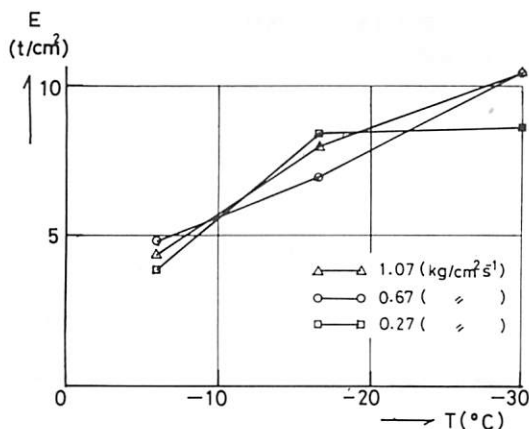


図-8 ヤング係数 (一軸圧縮)

低くなると大きくなるが、荷動速度とほぼ関係ないことが示された。

b 天然雪の場合

天然雪と水を混ぜ、a の場合と同じ形状寸法をもつ試験体を簡易テント内で縮尺 Ice Domes と一緒に作り、

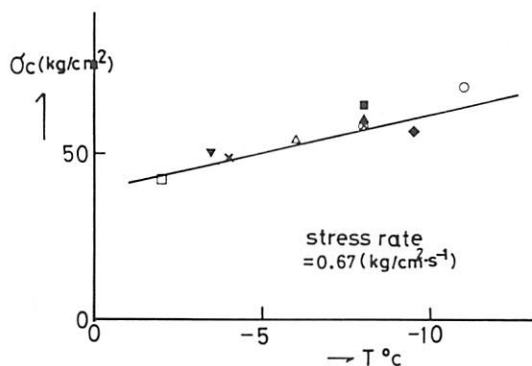


図-9 一軸圧縮強度 (人工的雪と天然雪の比較)

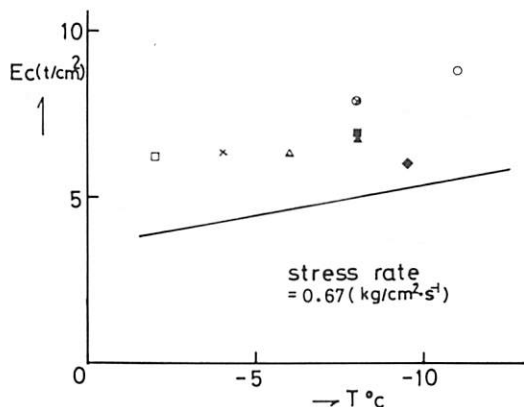


図-10 ヤング係数 (人工的雪と天然雪の比較)

Domes の破壊実験と平行して圧縮試験を行った。図-9, 10は荷重速度を $0.67 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ として、 σ_c , E_c について人工的雪の場合と比較したものである。これより、 σ_c は両者良く一致するが、 E_c は人工的雪の場合の方が約30%大きな値を示しているが分かる。

2 引張強度実験

試験方法として、純引張りによる方法と割製による方法の2つを試みた。尚、材料としての雪はいづれの場合も人工的雪 (氷かき機で得られた粉末状の雪) を用いた。

a 純引張りによる方法

図-11に示すダンベル形試験体 (厚さ3cm、のど部分断面積約9cm²) を圧縮試験体の場合と同様、ウレタンゴム成形枠により冷凍庫内で作った。写真-4に示すように両端にフックをとりつけ、荷重速度を約 $0.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ として実験を行った。図-12はのど部分で破断した約30体の引張強度 σ_t (図中●印) を示したものであ

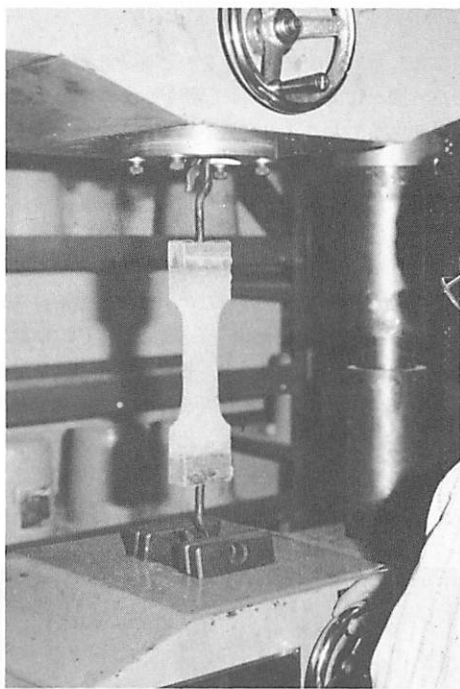


写真-4 純引張強度実験

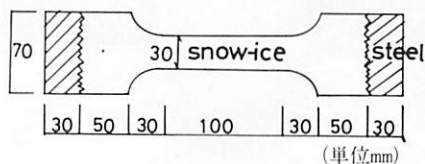


図-11 純引張試験体形状寸法

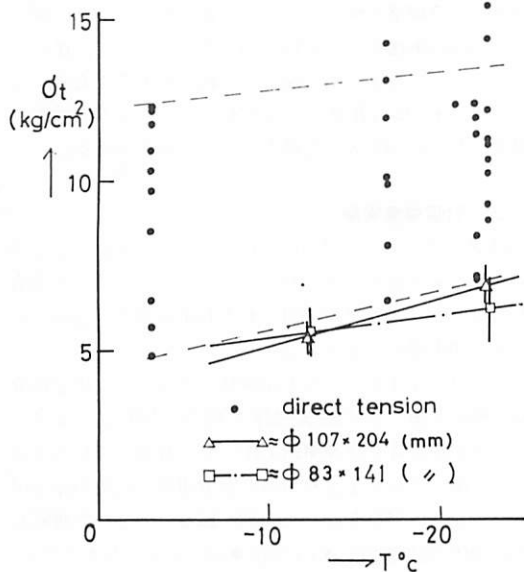


図-12 一軸引張強度

る。ここに σ_t は破断荷重をのど部分断面積で除して求めた。図-12より、 σ_t は圧縮強度 σ_c の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ の範囲にバラツキしており、温度低下につれ多少増加することが分かる。

b 割裂による方法

塩ビ管を用いて直径107mm×長さ204mmと直径83mm×長さ141mmの円柱試験体をそれぞれ約20体つくり、写真-5に示す割裂実験を行った。引張強度 σ_t は次式で求めた。 $\sigma_t = 2 P_t / \pi d l$ ここに、 P_t は割裂時の最大圧縮荷重、 π は円周率、 d は直径、 l は長さを表わす。結果は図-12に示され、これより寸法効果の影響は小さいこと、純引張の場合と比較してバラツキが少ないこと、強度 σ_t は純引張強度の下限值に近いことが分かる。

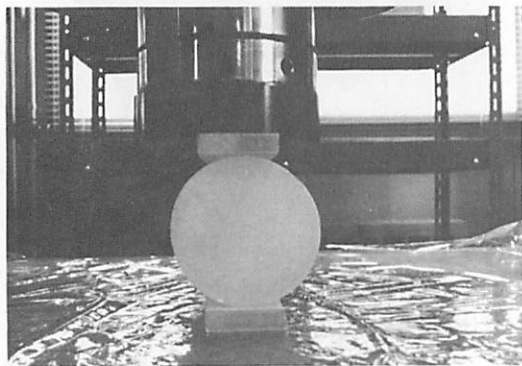


写真-5 割裂強度実験

§ 4 部分球殻弾性理論解

1 基礎式

§ 2で述べた縮尺 Ice Domes 破壊実験の解析モデルを図-13で仮定する。このとき、基礎方程式は Meisner

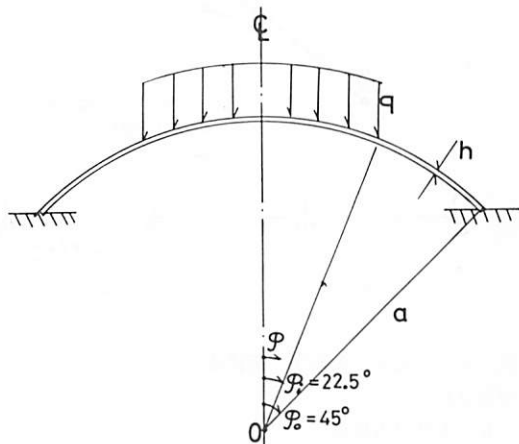


図-13 ICE DOMESの解析モデル

式(1)、(2)で与えられる。(9)

$$L(V) - \nu V = -\frac{a^2}{D} \cdot Q\varphi \dots \dots \dots (1)$$

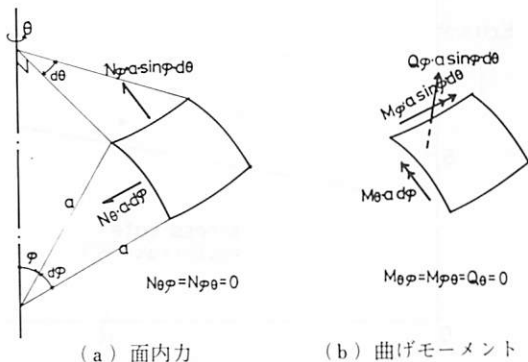
$$L(Q\varphi) + \nu Q\varphi - (2 + \nu)a \cdot f(\varphi) \sin\varphi = EhV \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $Q\varphi$:せん断力、 V :回転角、 h :殻厚、 a :曲率半径、 ν :ポアソン比、 E :ヤング係数

D :板剛性 $\left(= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \right)$ $f(\varphi)$:荷重分布関数 ($0 \leq$

$\varphi \leq \varphi_i$ のとき q , $\varphi_i \leq \varphi \leq \varphi_0$ のとき零)、 q :分布荷重値

$$L(\quad): \text{線形微分演算子} \left\{ = \frac{d^2(\quad)}{d\varphi^2} + \cot\varphi \frac{d(\quad)}{d\varphi} - \cot^2\varphi \cdot (\quad) \right\}$$



(a) 面内力

(b) 曲げモーメント

図-14 球殻の合応力 (軸対称変形)

さらに、式(1)、(2)の解V, Qφ から、図-14に示される
合応力Nθ, Nφ, Mφ, Mθが式(3)、(4)で求まる。

$$\left. \begin{aligned} N\varphi &= -Q\varphi \cdot \cot\varphi - \frac{a}{\sin^2\varphi} \int_0^\varphi \sin\varphi \cdot f(\varphi) d\varphi \\ N\theta &= -Q\varphi + \frac{a}{\sin^2\varphi} \int_0^\varphi \sin\varphi \cdot f(\varphi) d\varphi \\ &\quad - a \cdot \cos\varphi \cdot f(\varphi) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

$$\left. \begin{aligned} M\varphi &= -\frac{D}{a} (V + \nu \cot\varphi \cdot V) \\ M\theta &= -\frac{D}{a} (\cot\varphi \cdot V + \nu V) \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

$$\text{ここに、} \quad \frac{d}{d\varphi}$$

2 0 ≤ φ ≤ φ_i の解

式(1)、(2)の解は、φ = 0 で有限であることを考慮して
次式(5)、(6)で与えられる。

$$Q\varphi = \sqrt{x} (A_i \cdot S_i + B_i \cdot S_2) \dots\dots(5)$$

$$V_i = \frac{\sqrt{x}}{Eh} \left\{ -(2 + \nu) a q + (A_i \nu - B_i \mu^2) S_1 \right. \\ \left. + (B_i \nu + A_i \mu^2) S_2 \right\} \dots\dots(6)$$

$$\text{但し、} x = \sin^2\varphi, \mu^2 = 2 \sqrt{\frac{3a^2(1-\nu^2)}{h^2} - \frac{\nu^2}{4}} \\ = 2\rho^2,$$

S₁ + iS₂ = F(α, β, γ; x) : Gauß の超幾何関数

$$i = \sqrt{-1}, \alpha = \frac{3 + \sqrt{5 + i \cdot 8\rho^2}}{4}, \beta = \alpha^* (\text{共役複素数}),$$

γ = 2, A_i, B_i は未定係数

3 φ_i < φ ≤ φ_o の解

式(1)、(2)の解は、さらにもう一つの独立解を加えて式(7)
(8)で与えられる。

$$Q\varphi_o = \sqrt{x} (A_o \cdot S_1 + B_o S_2 + C_o S_3 + D_o S_4) \dots\dots(7)$$

$$V_o = \frac{\sqrt{x}}{Eh} \left\{ (A_o \cdot \nu - B_o \mu^2) S_1 + (B_o \cdot \nu + A_o \mu^2) S_2 \right. \\ \left. + (C_o \nu - D_o \mu^2) S_3 + (D_o \nu + C_o \mu^2) S_4 \right\} \dots\dots(8)$$

$$\text{ここに、} S_3 + iS_4 = F(\alpha, \beta, \gamma; x) \log x + \sum_{n=0}^{\infty} p_n x$$

$$p_o = \frac{\gamma - 1}{(\alpha - 1)(\beta - 1)}, \quad p_1 = 1,$$

$$p_n = \frac{\alpha(\alpha+1) \cdots (\alpha+n-2) \beta(\beta+1) \cdots (\beta+n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots (n-1) \gamma(\gamma+1) \cdots (\gamma+n-2)}$$

$$\cdot \left\{ \sum_{s=0}^{n-2} \left(\frac{1}{\alpha+s} + \frac{1}{\beta+s} - \frac{1}{\gamma+s} - \frac{1}{1+s} \right) + 1 \right\};$$

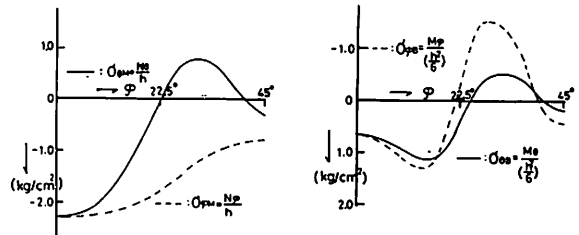
n ≥ 2, A_o, B_o, C_o, D_o は未定係数

4 未定係数の決定

φ = φ_i に於ける合応力 Nφ, Nθ, Mφ, Mθ の連続条件
と、φ = φ_o に於ける周辺固定条件 (ε_θ = $\frac{N\theta - \nu N\varphi}{Eh} = 0$,
V = 0) から 6 個の未定係数 A_i, B_i, A_o, B_o, C_o, D_o
が決定され、殻の合応力が式(3)、(4)によって、さらに変
形が求まる。

5 解析例

a = 30√2 cm, h = 1.2 cm, φ_i = 45°, φ_o = 22.5°, ν =
0.4, P_{total} = 2πa² (1 - cosφ_i) · q = 100 kg のときの
面内応力度 σ_{φM} ($= \frac{N\varphi}{h}$), σ_{θM} ($= \frac{N\theta}{h}$) と曲げ応力度
σ_{φB} ($= \frac{M\varphi}{h^2}$), σ_{θB} ($= \frac{M\theta}{h^2}$) を図-15 に示す。これ



(a) 面内応力度 (b) 曲げ応力度

図-15 球殻弾性理論解 (h = 12mm, P = 100kg)

より、経線方向の合応力度は σ_{φB} が最大となる φ = 30°
近傍で殻表面が引張状態となるが、その他では圧縮が作
用しており、一方緯線方向の合応力度は載荷部分で圧縮、
非載荷部分では σ_{θM} が引張で且つ σ_{θM} > σ_{θB} であ
るから引張応力度が働き、その最大は φ = 30° 近傍殻表
面で生ずるのが分かる。

§ 5 考察

§ 3 の単一材強度実験値と § 4 の球殻弾性理論解から
Ice Domes の初亀裂荷重、最大荷重、変形 (ヤング係
数) を求める方法を提示し、さらに § 2 で得た縮尺 Ice
Domes の破壊実験結果と比較することを試みる。

1 初亀裂荷重について

§ 2 で述べた様に初亀裂線は非載荷部分経線方向に入
る。これは図-12より雪氷は引張に弱く、図-15の解析
例で示した様にこの部分で緯線方向に大きな引張合応度
が働いている為である。雪氷の引張強度は種々の欠陥に
敏感な影響を受け易く図-12に示された様に大きくバラ
ツイしており、当然 Domes の初亀裂荷重も図-5 に示す
様に広範囲にばらついている。ここでは、球殻弾性理論

解に於ける非載荷部分の緯線方向合応力度 ($\sigma_{\theta M} + \sigma_{\theta B}$) が § 3 で雪氷の引張強度下限値 5 kg/cm^2 に達する時の荷重を理論的初亀裂荷重 P_{CT} と定義し, § 4 に基づき数値計算を行い, 実験値と比較する。図-16の実線は

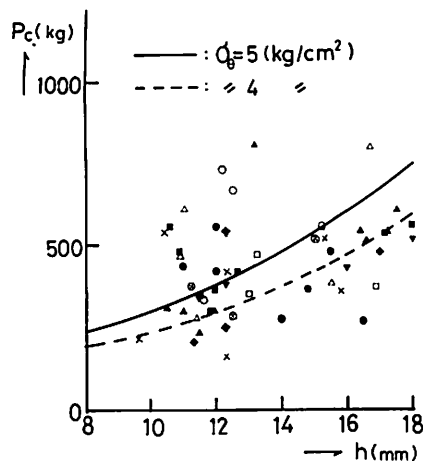


図-16 理論的初亀裂荷重曲線

$P_{CT}-h$ 曲線を表わし, これより P_{CT} は殻厚 h が薄い場合, 実験値のほぼ平均値を示し, 一方, h が厚い場合 ($h=15\sim18\text{mm}$), ほとんどの実験値を上回っていることが分かる。図中破線は緯線方向応力度が引張 4 kg/cm^2 に達する時の荷重であり, 実験値と良い対応を示している様であるが, その理由は明らかでない。

2 最大荷重について

実験結果によれば, 初亀裂が発生しても, Domes は直ちに耐力を失うのではなく, その後載荷重を増すことができる。これは周辺固定が亀裂発生に伴う体積膨張を拘束する為と思われる。初亀裂発生後加力を続けると大小の亀裂が生じやがて最大荷重に達する。崩壊の原因が未解明な現状では, 亀裂の進展を考慮して精密な数値解析を行い最大荷重を求めることは極めて困難であるので, ここでは最大荷重の推定に次の方法を試みる。まず, 球殻弾性解に於いて, 曲げ応力 M_{θ} , M_{θ} はその応力度が直線分布故に影響が小さいと考え破壊要因から除外し, 面内力 N_{θ} , N_{θ} によってのみ破壊が生ずると仮定する。ここで破壊条件に雪氷物理学の知見を用いる。¹⁰⁾ 即ち直交する2軸方向にそれぞれ引張応力度 σ_t と圧縮 σ_c が同時に作用する氷板の破壊条件を図-17で与える。図中 σ_{ct} , σ_{ct} はそれぞれ一軸引張, 圧縮強度で, § 3の結果から σ_{ct} として $50 (\text{kg/cm}^2)$, σ_{ct} として $5 (\text{kg/cm}^2)$ (下限値), $10 (\text{kg/cm}^2)$ を用いる。結局, 理論的最大荷重 P_{BT} は, 球殻弾性理論解に於ける非載荷部分面応力度 $\sigma_{\theta M}$ (引張), $\sigma_{\theta M}$ (圧縮) が図-17に示す破壊線上に

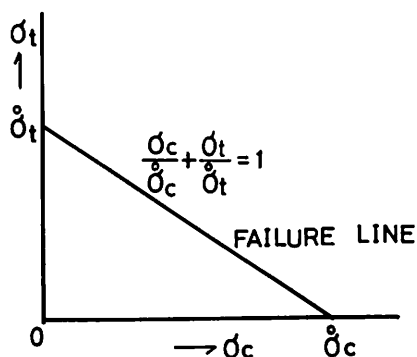


図-17 雪氷板の破壊条件

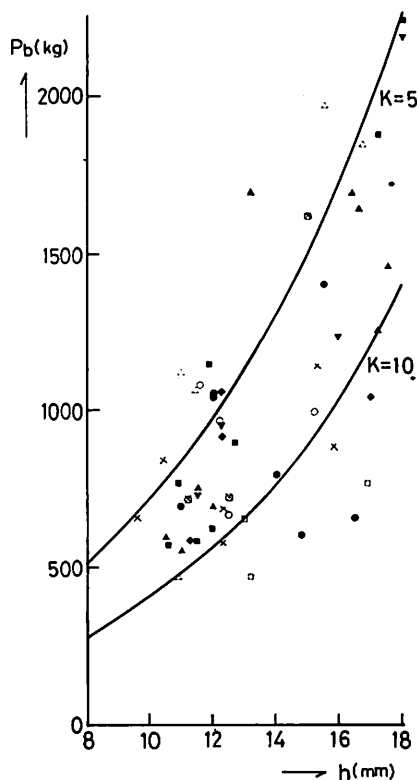


図-18 理論的最大荷重曲線

達するときの荷重として求める。図-18は実験値と比較したもので, 2本の実曲線は P_{BT} を表わし, パラメータには σ_{ct}/σ_{ct} を意味する。これより, 実験値の大部分が2本の曲線間にあることが分かり, 最大強度の理論的予測方法として本方法が有効であると思われる。

3 ヤング係数について

球殻弾性理論解に於ける頂点の法線方向変位 w は式(9)で表わされる。

$$w = -\frac{a}{Eh} \left\{ (1+\nu) \int_0^{\varphi_0} \left(\frac{N\varphi - N\theta}{\sin \varphi} \right) d\varphi + (1-\nu) N\varphi \Big|_{\varphi=0} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $N\varphi$ 、 $N\theta$ は式(3)で求められている。

式(9)と Domes の破壊実験で得た荷重／変位から、ヤング係数 E_s を計算できる。図-19は E_s と圧縮強度実

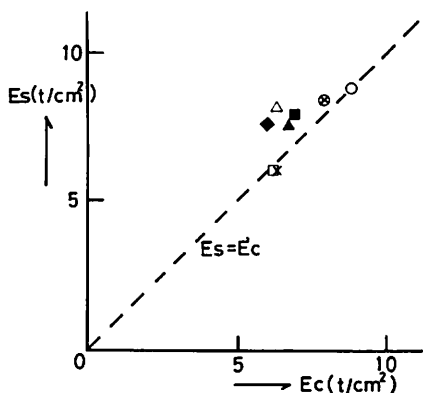


図-19 ヤング係数の比較（球殻と一軸圧縮）

験で算定したヤング係数 E_c との関係を示したものである。これより、 E_s は E_c よりやや大きな値を示しているものの、比較的良く一致しており、 E_c と殻理論から殻の変形を大略推定することが可能であることが分かった。

§ 6 まとめ

北方圏の生活空間を創造する一建築技術として提案されている“Ice Shell”の短時間加力に於ける力学的性状を知る為、集中的等分布荷重を受ける周辺固定縮尺 Ice Domes の破壊実験を実施した。加えて、雪氷の一軸強度実験結果と球殻の弾性理論解から Ice Domes の初亀裂荷重、最大荷重、初期変形を理論的に推定する方法を示した。両者を比較検討し、次の結論を得た。

(1)球殻弾性理論解に於ける非載荷部分の緯線方向合応力度が引張で 4 kg/cm^2 に達する時の荷重は破壊実験で得た初亀裂荷重の平均値にほぼ対応する。

(2)雪氷の一軸圧縮強度を 50 kg/cm^2 、引張強度を 5 kg/cm^2 （実験下限値）～ 10 kg/cm^2 の範囲として二軸下の破壊条件式を直線与え、さらに球殻弾性理論解の非載荷部分内応力度が上記破壊線上に達するとして求めた理論の最大荷重領域は実験で得た最大荷重の大部分を包含する。

(3)供試体温度が -2°C 以上で最大強度は低下することが実験的に示された。

(4)一軸圧縮実験のヤング係数は Ice Domes 実験値と球殻弾性理論解から求めたものと良く対応する。

謝辞

本研究を行うにあたり御協力を頂いた北海道東海大学 学生渡辺宏二君、百瀬忠君、高橋清一君、吉田隆君、同研究生高田昇君に謝意を表する。

なお、研究費として、昭和56年度文部省科学研究費（一般C：代表者粉川牧）と北海道東海大学北方生活研究所費を使用した。

＜参考文献＞

- (1) Peter V Hobbs : 「Ice Physics」, CLARENDON PRESS, OXFORD, 4, Mechanical Properties, pp.249-342., 1974
- (2) Gold, L. W. : 「The Use of Ice Covers for Transportations」, Can. Geotech. J., vol. 8, No. 2, pp.170-181., 1971
- (3) Michel, B. etc. : 「Ice Bridges of the James Bay Project」, Can. Geotech. J., vol.11, pp.599-619., 1974
- (4) R. G. Stanley and P. G. Glockner : 「The Use of Reinforced Ice in Constructing Temporary Enclosures」, Marine Sci. Commun., 1(6), pp.447-462., 1975
- (5) Leslie Hajdo : 「The Time-Dependent Deformation of Ice Domes」, Int. J. Solids Structures, vol. 15, pp.261-267, 1979
- (6) Von H. Isler : 「EIS-VERSUEHE」
- (7) 中谷宇吉郎 : 「極北の氷の下町」, pp.52-54, 暮しの手帖社, 昭和41年8月1日, 第2版
- (8) IL 9, 「Pneus in Nature and Technics」, pp.119-120., 1976
- (9) P. B. J. Gravina (名須川良平訳) : 「回転シェルの理論と計算」, pp.120-135., 宇野書店, 1966
- (10) D. E. Nevel and F. D. Haynes : 「Interpretation of the Tensile Strength of Ice Under Triaxial Stresses」 CRREL, 1976