

速 報

スパン 30 m アイスドーム建設の試み

粉 川 牧¹⁾

要 旨

北海道のトマムにおいて、2001 年 2 月上旬から 4 月上旬の間、底面直径約 25 m、高さ約 9 m のアイスドームの建設実験とクリープ測定を行った。型枠として用いた円形 2 重平面膜の直径が 30 m であることから、以後、スパン 30 m アイスドームと称する。建設施工に要した日数は正味 6 日間（雪氷基礎リングの施工に 2 日間、型枠空気膜の建ち上げ及び散雪散水作業で 4 日間）と極めて短期間でドームを完成し、巨大アイスシェルに対する本工法の施工合理性を実証した。完成後のクリープ実験において、ドーム中央部分の平均クリープ変位の推定値 6.5 mm/day は、過去に実験した 20 m ドームの測定値から予測される値と定量的により対応を示した。一方、崩壊は外気温が頻繁に 0°C を越え、さらにその日平均がプラスとなる日が 3 日続いた後の 4 月 10 日に生じたことから、本ドームは十分な耐久性を有していることが示された。今回の実験から、スパン 30 m 巨大アイスドームの建築的構造物への適用可能性が実証された。

キーワード：スパン 30 m アイスドーム、建設実験、クリープ実験、構造安全性

Key words: 30-m span ice dome, construction test, creep test, structural safety

1. 背景・目的

豊富な雪と厳しい寒さから「アイスシェル」は造られる。ここで「アイスシェル (Ice Shell)」とは文字通り、氷を構造材料とする薄い曲面板構造を意味している。よく知られているように、薄い曲面板、即ちシェルは貝殻、卵殻、蟹の甲羅、花卉など自然界に多く見られる構造体で、軽くて強く固い極めて高い力学的合理性を有している。このことから、「アイスシェル」は、古典的雪氷建築物として知られる「イグルー」や「かまくら」に比較して遥かに大規模な空間を覆うことができる。そして、その構造形態と氷のもつ半透明性テクスチャーは個性的な空間表現を与えることから、「アイスシェル」は積雪寒冷地の冬期間における独自の環境空間を創出する建築技術として提案されてきた (粉川 *et al.*, 1982/1983)。

この「アイスシェル」を冬期間の建築構造物として適用するというこれまでにない新しい試みが

1997 年以来、北海道は占冠村のアルファリゾート・トマムで展開されている (Kokawa *et al.*, 2000)。そこでは、厳寒多雪という自然環境条件下でしか実現しえないアイスシェルが、冬の約 3 ヶ月間、レジャー施設空間「アイスドーム」として使用されている。これらのアイスシェル群は、目下のところ、いずれも既にその構造安全性が実証されているスパン 15 m 以下の中小規模のものに限られている。しかし、既往の研究成果を延長して捉えると、より大規模なアイスシェルの適用実施が可能と思われる。そこで、1999 年と 2000 年に同じ敷地内の一角で、多目的な建築空間として使用可能な大規模アイスシェルを技術開発すべく、スパン 20 m アイスドーム (底面直径約 17 m、高さ約 6.5 m) のフィールド実験が行われてきた (粉川 *et al.*, 2002)。

本実験的研究は、さらにその規模を拡大し、スパン 30 m 巨大アイスドーム (底面直径約 25 m、高さ約 9 m) を実験的に建設し、完成後にクリープ実験を行い、巨大アイスシェルの構造技術的可能

1) 北海道東海大学芸術工学部建築学科
〒070-8601 旭川市神居町忠和 224

性を実証的に探ろうとするものである。

2. 建設実験

2.1 施工手順の概要

- (1) 内周直径約 25 m の雪氷基礎リングを造る。
- (2) 直径 30 m の P.V.C. (合成繊維で補強された塩化ビニール膜) 製 2 重平面膜とジオデシック分割を基本にそのパターンが決定されたポリプロピレン製網目ロープを雪面上に置く。
- (3) 2 重平面膜を送風機で膨らまし、型枠空気膜をつくる。
- (4) 型枠空気膜に散雪・散水する。散雪は除雪機で行い、一回の散雪厚は 1 cm 以下とする。ドーム頂部への散水は高压スプレーノズルで行う。
- (5) 散雪・散水作業は板厚が 25 cm 程度になるまで行う。
- (6) 膜から空気を抜き、膜を除去してドームを完成する。

2.2 雪氷基礎リングの施工

平成 13 年 2 月 4 日～6 日に雪氷基礎リングの施工を実施した。まず、2 月 4 日に建設場所の測量及び整地を行った。続いて、2 月 5、6 日に建設重機を用いて内径約 25 m の雪氷基礎リングを施工した。その状況を写真 1 に示す。なお、アンカー位置は内周の 40 等分点上にあり、上部網目ロープとの連結箇所は設計時の基礎最上部を変更し、基礎最下部とした。これは、ロープの伸長(約 5 % を見込む)を配慮したためである。

2.3 型枠空気膜

型枠空気膜は 2 重平面膜と網目ロープから構成される。

1. 膜は直径 30 m の 2 重平面膜とし、膜材の仕様を下記に示す。

基布 T-SF (ポリエステル短繊維) 100 % , P.V.C. デップ (防水) 加工, 重量 $530 \sim 570 \text{ g/m}^2$ (従って総重量: $750 \text{ kg} \sim 806 \text{ kg}$), 引張強度: タテ $49 \pm 6.53 \text{ kN/m}$, ヨコ $35.93 \pm 6.53 \text{ kN/m}$, 色: ダークグリーン。

2. 網目ロープ: 図 1 に示される曲面上を図 2 で示す立体網目で覆う。この網目パターンはジオデシック・トリアコン分割 8 フリークエンシーを基本として決定され、各節点間距離を球面三角法に



写真 1 雪氷基礎リングの施工。

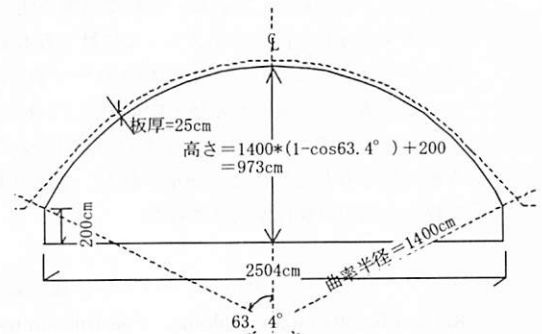


図 1 設計断面。

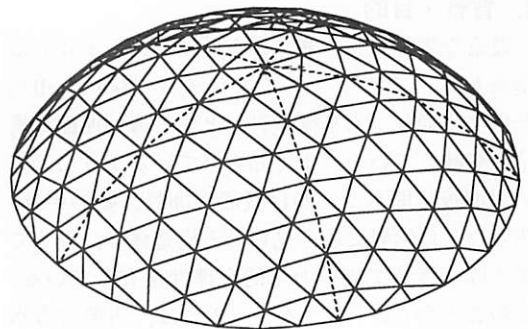


図 2 網目パターン。

より算定し、その結果が図 3 に示されている。内圧 490 N/m^2 (送風機の最大静圧) の時、ロープ張力は計算上約 9.8 kN と予測され、十分な安全を見込んで、破断強度約 29.4 kN の性能を有する $14 \text{ mm}\phi$ ポリプロピレンロープを選定した。

2.4 型枠空気膜の建ち上げ

2 月 7 日に膜を現場に搬入し、以後 2 月 11 日まで型枠空気膜の調整を行った。使用した送風機の

性能は最大風量 $44 \text{ m}^3/\text{min}$ で、計算上は約 1 時間で建ち上がるはずであったが、実際は膜と網目ロープの調整なども含め作業は難航し、多くの時間を要した。写真 2 に調整終了後の型枠空気膜を示す。続いて 2 月 12 日の午後、目盛りのついたスタイロフォーム角柱を膜面上に取り付ける作業を行った。なお、この角柱は散雪散水中のシェル厚を知るために約 40 本用意されたが、外気温が -13°C と低かったため、この内約 30 本が膜との接着がうまくゆかず無効となり、角柱の膜面への安定した接着方法が今後の課題として残された。

2.5 散雪散水作業

散雪散水作業は 2 月 12 日夕方～16 日早朝の 4 日連夜にわたって行われた。図 4 に示されるように、この期間中のトマムはかなり冷え込み、アイスシェル造りには絶好のコンデションであった。写真 3 に建設状況を示す。散水は直径 $40 \text{ mm}\phi$ の高圧ホース 1 本、 $20 \text{ mm}\phi$ の普通圧のホース 6 本を使用した。水量はトータルで $240 \sim 290$ リッター/分であった。このうち高圧ホースによる水量は $150 \sim 200$ リッター/分程度と推測される。 $20 \text{ mm}\phi$ ホースは 5 箇所 に 設けられた足場の頂部から、 $40 \text{ mm}\phi$ の高圧ホースはシェル周辺を移動しながら、それぞれ散水作業が行われた。一方、散雪は 2 台の除雪機によった。シェル中間部及び下部への散雪は投雪距離 22 m の除雪機が、上部へは投雪距離 30 m の高性能除雪機が、それぞれ用いられた。散水に比べて、一回の厚みを 1 cm 以下となるよう膜面に散雪する技術はかなりの熟練を必要とするが、今回の実験ではアイスシェル造り 5 年のベテランが専属的にこの作業を行った。後述するように、完成後のシェルの厚みは平均で約 25 cm 程度と思われ、一方散雪散水作業の総時間数は 56 時間であった。このことから、 1 cm 厚の氷を造るのに 2 時間を要した事がわかり、 15 m スパン以下の中小規模の施工速度に比べて 3 割程度遅くなっている。これは、巨大アイスドーム建設の経験不足によるためで、今後経験を重ねて行けば、改良されるものと思われる。

2.6 型枠空気膜の除去作業

2 月 16 日午前 8 時に送風機の電源を切り、型枠空気膜の除去作業に入った (写真 4 参照)。この

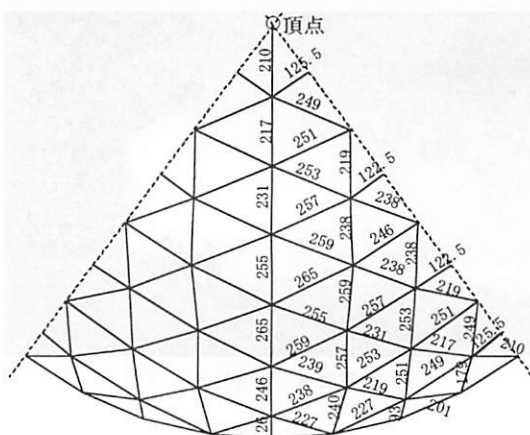


図 3 ロープ長 (単位: cm).

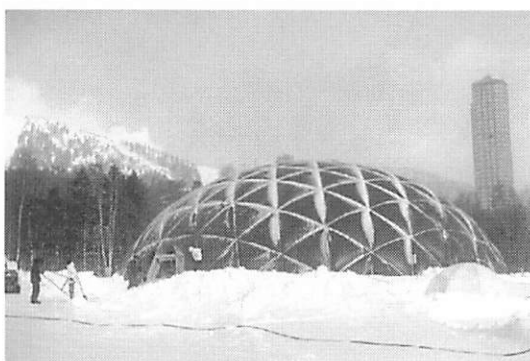


写真 2 型枠空気膜。

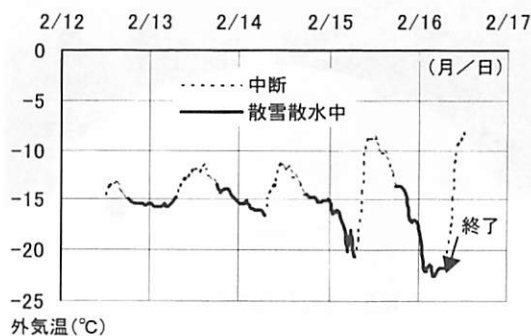


図 4 建設期間中の外気温。

作業で、送風機を膜の建ち上げ時と逆の方向に取り付けて行ったが、膜内の空気をほぼ完全に抜き去るのに約 5 時間を要した。その後、膜を畳み、除去した。写真 5 に完成直後のアイスドーム外観を示す。



写真3 散雪散水。



写真4 膜の除去作業。

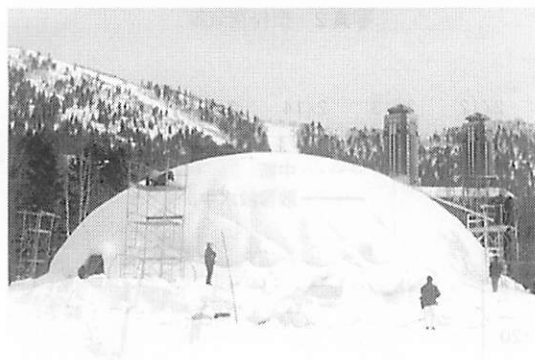
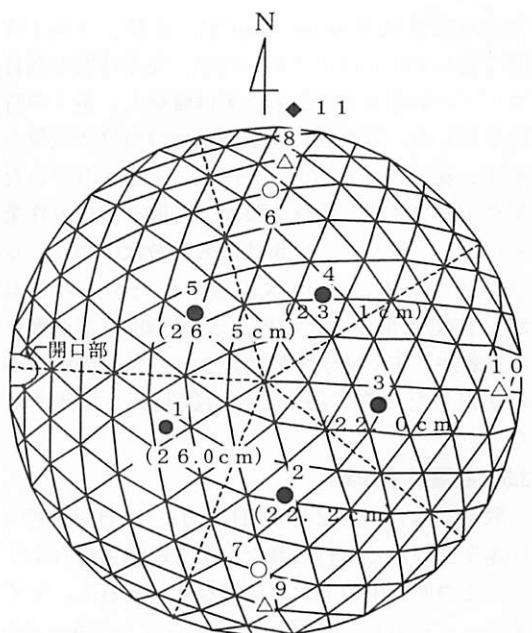


写真5 完成したアイスドーム。

3. クリープ測定

この規模の巨大アイスドームが長時間の使用に耐えられるかを実証するために、完成後から崩壊まで、ドームの挙動を調べた。

崩壊は4月10日に生じた。2月17日から3月24日まで、鉛直変位5点、温度（内・外気温、



●変位測定点 (1～5)
○内気温 (6～7) △氷温度 (8～10) ◆外気温 (11)

図5 変位・温度測定点番号。

氷温) 6点について自動計測を行った。その後崩壊までは、変形挙動を目視で観察した。これらの結果を20 m ドームの実験結果と比較検討した。

3.1 氷厚・形状測定

空気抜きの開始時に空気膜を作業足場とし、図5に示される変位測定箇所の取り付けと同時に板厚測定を行った。その結果、上部シェルの厚みは22～26 cmであった。一方、シェルの中間部と下部は、膜面への接着が有効であった約10本のスタイロフォーム角柱の目盛りを読み取ったところ、西面（風上側）が25～30 cm、東面（風下側）がやや薄く22～27 cmの厚みに分布していることが分かった。膜を除去した後、雪面からドーム頂点までの高さを実測したところ、921 cmが得られ、網目ロープの伸びを5%と仮定したときの計算値926 cmと極めてよく対応した。このことは型枠空気膜の形状を数値的に予測する際、網目ロープの伸長を考慮すべきであることを示唆している。

3.2 変位・温度測定

図5に鉛直変位及び温度の測定位置と測定点番号を示す。測定点数は変位5点（測定点番号1～

5), 温度 6 点 {ドーム内部気温 2 点 (6, 7), 氷温度 3 点 (8~10), 外気温 1 点, (11)} とした. 変位計は大きい変位を予想し, 20 m ドームの時に使用した歪式からポテンショメータ式変位変換器 (DTP-5 MDS ((株) 共和電業製, 定格容量 5000 mm)) に変え, 変位を測定するため図 6 のように設置した. 温度計は自記記憶型の小型温度計 (TR-52 (株) ティアンドデイ製) を使用した. 変位と温度, それぞれの測定間隔を 3 時間, 1 時間として 2 月 17 日~3 月 23 日の間, 自動計測を行った. 図 7 はこの期間中の温度-時間曲線を示す. なお, 途中 (3 月 4 日~3 月 13 日) の外気温曲線は記載されていない. これは, この間, 外気温計測センサーが雪の中に埋もれた状態にあったことが後日判明したためである. 表 1 にそれぞれの測定点における平均温度を示す. これより, 外気温, 内気温, 氷温度の順に温度が低くなっていることが分かる. 内気温が従来の実験値に比べてかなり低く且つ大きく変動しているのは, 風上側に設けられた開口部からドーム内部に向かって外部の冷気が大量に入りこんだためである. 図 8 に同一の期間 (2 月 17 日~3 月 23 日) における変位-時間曲線を示す. ここに図中 δ_i ($i=1 \sim 5$) は測定点 i (図 5 参照) の鉛直変位を表す. いずれもほぼ同一の動きをしていることが分かる. 例えば, 3 月 20 日~3 月 21 日の場合, 150 mm の下降, 3 月 21 日~3 月 22 日における 190 mm の上昇に示されるように, 随所に極めて大きな変化が生じており, これらの結果は真の変位挙動を記録していないように思われた. そこで, その原因を究明するために, 氷及び鎖の熱膨張, 雪面の上下動及び開口部近傍の亀裂による影響など多面的な角度から定量的・定性的解釈を試みた. しかし, これらはいずれも結果に対する正当な説明を与えないことが分かった. そこで, 変位計そのものの温度変化による影響を実験的に調べてみた. 図 9 は実験終了後の 5 月末から 6 月初旬に行った実験での結果の一部を示したもので, 変位計の測定値と外気温の関係を表している. ここで, 変位の測定は図 6 に示される方法に準じて行った. 即ち, 変位計を既存下屋建物の土間コン床上に設置し, そのケーブル上端をほぼ不動と思われる同一建物の鉄骨梁に固定して, 変位測定を行った. これよ

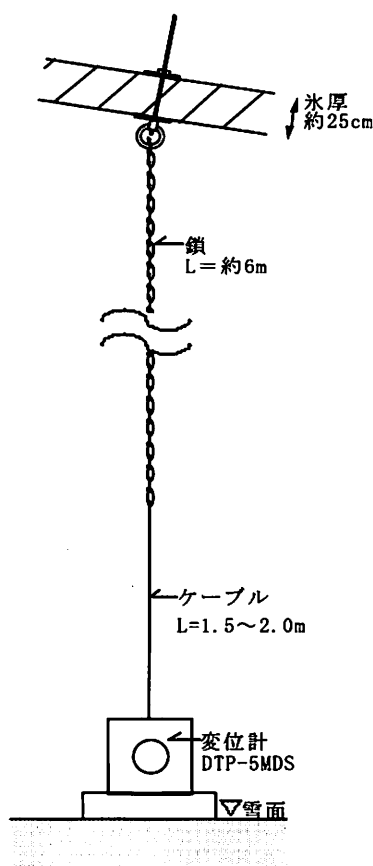


図 6 変位測定方法.

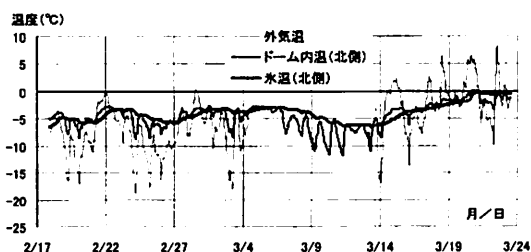


図 7 温度-時間曲線 (2/17~3/23).

表 1 平均温度 (°C) (2 月 17 日~3 月 23 日).

外気温 (測 定点番号 11)	内部気温		氷温度		
	北 (6)	南 (7)	北 (8)	南 (9)	東 (10)
-4.9	-4.5	-4.5	-3.9	-3.2	-3.9

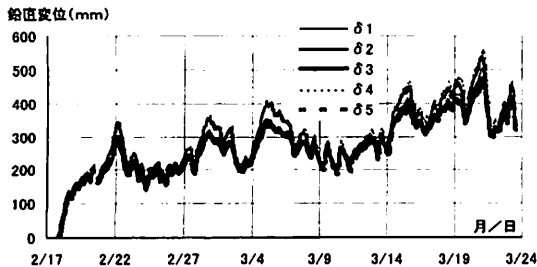


図8 鉛直線変位—時間曲線 (2/17~3/23)。

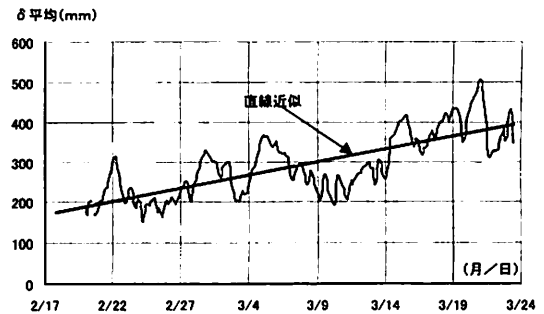


図10 変位曲線の直線近似。

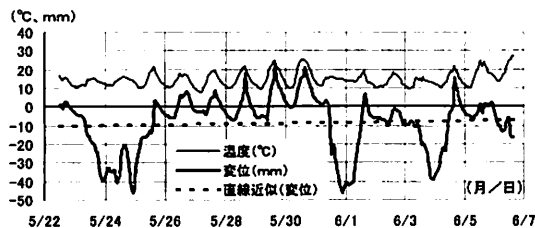


図9 不動点間の変位と気温。

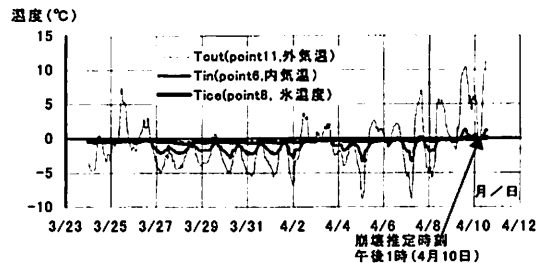


図11 温度—時間曲線 (崩壊前)。

り、例えば、外気温が13度変化すると変位は45 mm変動するなど、気温の変化に対して変位測定値が極めて大きく変動することが明らかとなり、これが今回の実験結果にも影響を与えていたことが推論された。しかし、変位の推移から温度依存性の数量的関係を求めることはできなかった。同図において変位曲線の直線近似を最小二乗法によって行くと、その傾きが意味する変位速度はほぼゼロになる。そこで、この結果を踏まえて、前図8に示される5本の曲線の平均に対して直線近似を行ったところ(図10参照)、その変位速度は1日あたり6.5 mmという結果を得た。この値は、シェルの膜理論と氷材料のマクスウェル型線形クリープの仮定から理論的に導かれる値、すなわち既往の20 m ドーム実験(粉川 *et al.*, 2002)の変位速度(3~4 mm/day)の1.8倍である5.4~7.2 mm/dayとオーダー的に合っている。ただし、前にも述べたように、変位計の変動について温度依存性を定量的に見いだせないことは、温度以外にも影響を与えた要素がある可能性を示している。したがって、今回のこのような形でクリープの値を得たが、変位の測定については、測定機

器の選定および測定手法についてさらなる検討が必要と考えている。

3.3 崩壊状況

3月24日に変位計を取り外し、その後目視観察を行った。崩壊は4月10日午後1時頃に発生したものと推定される。破壊寸前まで、目視で分かるほどの大変形が発生しなかったことから、「脆性」的な破壊と判断される。これは、過去の実験で観察された粘り強い崩壊性状と異なり、急激な破壊現象で、建築構造物としては好ましくない性状である。構造物の規模が大きくなるとこのような性状を示すのかどうかを見極めるため、今後さらに繰り返して実験的検討が行わなければならないものと思われる。崩壊後、氷の破片を観察すると「ざらめ状」で劣化が著しい状況であった。図11から分かるように、4月2日以後、外気温はプラスとなることが多く、さらに日射も一段と強くなった。観察者の話によれば、この頃からシェルの融氷が急激に進み、氷の融ける音がシェル内部に響きわたり、そして、風下側に雪が集中して積もる偏在荷重がシェルに作用していたもののシェル全体の不均一なゆがみは目視では認められな

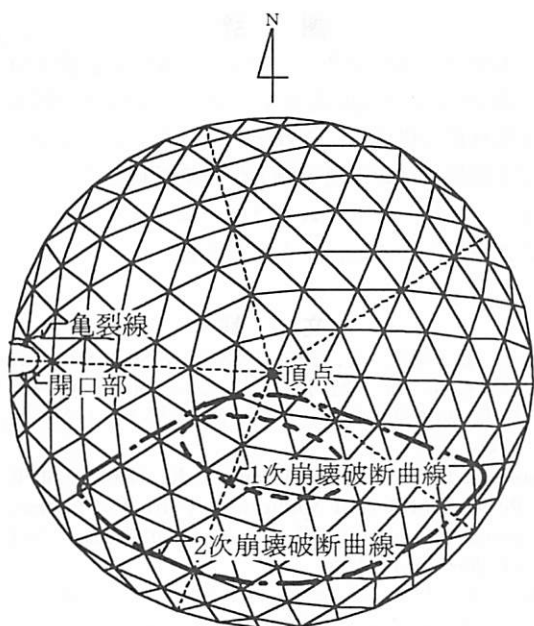


図12 破壊状況(伏せ図)。



写真6 破壊状況(遠景)。

かった、と言う。図12は破壊状況を表したもので、最初の破壊は日射量が最大となる南側中腹部で生じ、過去の実験結果と同様の場所を示している。なお、開口部に当初から発生していたクラックはその後あまり進展せず、破壊に及ぼす影響は見られなかった。写真6に2次崩壊後の外観を示す。

4. おわりに

シェルの膜理論によれば、今回の規模のドーム頂部に生ずる圧縮膜応力は、雪荷重を 980 N/m^2 (密度を 0.2 g/cm^3 とした時、積雪深で 50 cm に

相当)と見込んでも、 98 kN/m^2 程度と算定される。この応力の大きさは氷の短時間加力強度の $1/40$ 程度に過ぎず、強度的に十分な余裕をもって 30 m スパンの巨大アイスドームは成立する。この根拠のもとに、実際の建設実験に挑み、さらにその構造的安全性を実証すべくクリープ測定を行った。

その結果、 30 m 規模の巨大アイスドームが冬のテンポラリーな建築構造物として実施可能であることが分かった。つまり、型枠空気膜に散雪散水する本工法は短期間(基礎工事を含めて一週間程度)で巨大アイスシェルの施工を可能にし、さらに完成したシェルは十分な耐久性(今回の場合、2月16日に完成し、平均外気温がプラスとなる日が3日続いた4月10日に崩壊した。もし、完成時期を早めれば、ほぼその分だけ、存在期間が増えるものと思われる。)を有していること等が主な結論として示された。なお、クリープ測定では、温度変化が今回の実験で使用した変位計の精度に大きな影響を及ぼすことが実験終了後の検討で明らかとなった。そのため、実験ドームの変位挙動を細かく正確に捉えることはできなかったが、それでも、最小2乗法による直線近似から求められた平均的な変位速度の値 6.5 mm/day は、過去の 20 m ドームの実験結果に膜理論と氷材料をマクスウェル型線形粘性材料と仮定して得られた計算値とオーダー的に合うことが分かった。

建設施工機材、特に散雪散水機材の性能的制約から、今のところ、スパン 30 m 規模が実際に造ることができる大きさの限界と思われるが、機材がそろえば、 40 m スパン規模の建設も夢ではない。 40 m 規模と言えば、西暦 120 年頃に造られたローマのパンテオンドームが石造による現存する世界最大級のドームとして知られているが、氷は石と比較して加工性に優れかつ比強度(圧縮強度/密度)的にもそんな色なく、この規模のものを氷で造ることは構造工学的に充分可能と思われる。一方で、氷の薄膜曲面は光の透過性に優れ、アイスシェルは造形性かつ芸術性豊かな空間を創出する。日中は自然光が入り込み清廉で軽快な内部空間を、夜はドーム内部の明かりが暗闇の中に照らし出されて妖しく幻想的な外部空間をそれぞれ演出し、アイスシェルは厳寒多雪地域の冬期間にお

ける独自で個性的な人工的環境空間を創出する。特に、巨大アイスシェルは巨大空間なるがゆえに、様々な冬の活動に対応が可能で、その壮大な空間は極めて造形的魅力に富むものであろうことは想像に難くない。

巨大アイスシェルは未経験の水建造物であるが故に、その力学的性状についても未知なことが多い。従って、今回のように造作が首尾よく行われたとしても、それだけで構造安全性に対する信頼性が得られたと考えるのは早計である。それゆえに、その建築空間への実施適用にあたっては、充分慎重な対応が求められねばならない。今後は十分に安全が見込める厳冬期の短期的使用に限定しつつ、建設技術の更なる改良と力学的性状のより深い理解を狙いとして継続的な実験的研究が必要とされる。

謝 辞

本研究の遂行に際し、(財)計量生活会館より平成 12 年度研究助成金を、又、東レ株式会社より膜材料の提供を、それぞれ受けた。建設及び測定準備作業は北海道東海大学建築学科とホテルアルファリゾートトマムの合同プロジェクトチームによった。ここに、厚く謝意を表します。

文 献

- 粉川 牧・平沢 勇, 1982/1983: Ice Shell Structure の研究 第 1 報 短時間加力による Ice Dome の力学的性状, 北海道東海大学芸術工学部紀要 3・4 合併号, 77-85.
- Kokawa, T., Itoh, O. and Watanabe, K., 2000: Ice Shell-Review and Recent Application, Journal of International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 41 (2000), n.1, 23-29.
- 粉川 牧, 伊藤 修, 渡辺 大, 2002: スパン 20 m アイスドームの建設実験とクリープ測定, 雪氷 64 巻 1 号, 59-68 頁.

Construction of 30-M Span Ice Dome

Tsutomu KOKAWA

Department of Architecture, School of Art and Technology, Hokkaido Tokai University

Abstract: A field study on both the construction and creep test of a 30-m span ice dome (25 m in base diameter, 9.2 m in height and 25 cm in average ice thickness) was carried out at Tomamu in Hokkaido during the winter of 2001. It took only six days for the completion of the big dome. The construction was done by blowing snow and spraying water onto an air-inflated membrane as formwork. Subsequent to the construction, a creep measurement was carried out under natural condition and the structural behavior up to collapse was examined. As a result, the average displacement rate of the central part from February 17th to March 23rd, was about 6 mm/day to 7 mm/day, and it was shown that the dome had good enough structural efficiency. Based on the result of this study, the application of a 30-m span ice dome for an architectural facility is basically possible.

(2001 年 11 月 20 日受付, 2002 年 1 月 19 日改稿受付, 2002 年 5 月 2 日再改稿受付, 2002 年 5 月 10 日受理,
討論期限 2003 年 1 月 15 日)