

スパン20-30m 級アイスドーム のフィールド実験

FIELD STUDY OF ICE DOME SPANNING 20~30 METERS

粉川 牧 — *1

キーワード:

巨大アイスドーム, トمام, 雪氷建築構造物, 構造技術開発, 建設実験, クリープ測定

Keywords:

Large ice dome, Tomamu, Snow-ice construction, Construction test, Creep test

Tsutomu KOKAWA — *1

A field study of 20m-span ice dome (17m base diameter and 6.5m height) was developed in the year 2000. The test-dome showed a high structural efficiency, so in the following winter of 2001, the experimentation was taken a step further by carrying out a field study focusing on both the construction and creep test of a 30m-span ice dome (25m base diameter and 9.2m height). Based on the findings from these studies, it can be concluded that the application of a 20~30m-span ice dome should be feasible.

1. はじめに

厳寒多雪地域における冬期間の構造物として使用可能な、氷を構造物材料とする薄肉の曲面板構造「アイスシェル」が著者によって考案され、実用化に向けて研究開発が進められて来た。研究当初は、構造工学的見地から迅速にして簡便な建設施工法と短時間加力及び長期クリープに対する構造安全性に関する実験的且つ理論的検討が行われた^{1)~4)}。一方、アイスシェルの実構造物への適用化実験が底面直径 10m 程度の小規模ドームについて実施され、冬野菜の貯蔵実験庫、清酒の低温醸造・貯蔵庫、冬まつりのイベント空間そして南極観測拠点における作業倉庫といった様々な用途に活用されてきた⁵⁾。

この様な経緯を踏まえ、アイスシェル研究は 1997 年以来、アイスシェルを冬の建築構造物に使用するという新たな局面展開に入っている。即ち、北海道占冠村のホテル・アルファ・リゾート・トマムの敷地内において、毎冬約 3 ヶ月間にわたり観光客が使用するレジャー施設空間を様々な規模のアイスシェル群で造るという前人未経験のプロジェクトで、そこでは厳寒多雪地域ならではの実用的且つ幻想的でユニークな冬の建築的環境空間が創出されている⁷⁾。これらアイスシェル群の中で実際に使用しているのは、目下のところ、既にその構造安全性が実証されているスパン 15m 以下の中小規模アイスシェルに限られているが、既往の研究成果を延長して捉えれば、研究当初に夢想したスパン 20~30m 級巨大アイスシェルの建築空間への適用実施が充分可能と思われる。しかしながら、巨大アイスシェルの実証的研究は 1985 年に行われたスパン 20m アイスドームのフィールド実験⁸⁾があるのみで、建設経験に乏しく、その構造安全性についても未知なことが多いため、そのような巨大アイスドームを未だ建築空間として実施適用するに至っていないのが現状である。従って、実施適用可の根拠を得るには、実大モデルによる

フィールド実験を重ねて行い、建設施工技術の改良とその構造安全性を実証しておくことが不可欠である。本報告は、同じ敷地内の一角で、2000 年冬のスパン 20m⁹⁾ アイスドーム (底面直径約 17m, 高さ約 6.5m)、2001 年冬のスパン 30m¹⁰⁾ ドーム (底面直径約 25m, 高さ約 9m) について実施された建設実験とクリープ測定をまとめたものである。

2. 膜理論による検討

底面直径 30m、開角 130° の球形アイスドームにおいて、自重下におけるドーム頂部の圧縮膜応力は、氷の比重を 0.85¹¹⁾ とすると、7.0 N/cm² となる。この大きさは単軸・短時間加力下における氷の圧縮強度の 1/60 以下である¹²⁾ ことから、このドームの構造的実在は力学的に充分な余裕をもって可能である。ここにスパン 20-30m 級巨大アイスドームのフィールド実験に挑む根拠がある。

3. 建設施工法の概要

雪氷建築構造物として「かまくら」や「イグルー」が古くより知られている。「かまくら」は雪積みの山をくりぬいて、「イグルー」は雪や氷のブロックを組積して、それぞれ造られるが、これらは、規模が大きい場合、建設上、重機や大がかりな足場を必要とし、そして完成後の構造物はクリープしやすく耐久性は極めて低い。そこで、速く、簡単に、安く造り、しかも耐久性の高い「巨大アイスシェル」を実現するために、現代的シェル構法を取り入れて、以下の手順に示すように型枠空気膜に散雪散水して建設するという方法を考案した¹³⁾。(1) 雪氷基礎リングを造る。(2) 2 重平面膜と網目ロープを雪面上に置く。(3) 膜を送風機で膨らまし、型枠空気膜をつくる。(4) 外気温が -10℃ 以下且つ放射冷却が活発な夜間、型枠空気膜に散雪・散水作業を行う。散雪は除雪機で行

*1 北海道東海大学芸術工学部 教授・工博
(〒070-8601 旭川市神居町忠和224)

*1 Prof., School of Design, Hokkaido Tokai University, Dr. Eng.

い、一回の散雪厚は1cm以下とする。(5) 散雪・散水作業は板厚が所定の厚さ(スパンの1/100程度)になるまで繰り返し行う。(6) 膜から空気を抜き、膜を除去してドームを完成する。なお、完成後、内部から光をあて、充分に透光していれば質の良い氷でシェルが造られていることの証になる。

4. 20mドームのフィールド実験(2000年2月~4月に実施)

4.1 建設実験

雪氷基礎リングの施工に1日間、膜のインフレーション、上部構造の施工(散雪散水作業)及びデフレーションに正味4日間の計5日間で建設された。2月3日に内周直径約17m、高さ90cm、幅1mの雪氷基礎リングを施工した。2月4日午後、空気を送風し、型枠空気膜を建ち上げた。膜材料は塩化ビニル製で、直径20mの円形2重平面膜の重量は約3.43kNである。まず、その平面膜を現場で広げ、その上に網目ロープを被せ、その端部と基礎リング側のロープをシャックルで繋いだ。網目ロープの形状パターンは図1に示すように六角形と五角形要素からなり、ジオデシック・トリアコン分割8次を基本に決定したもので、使用したロープはポリプロピレン製の径14mm(破断強度29.4kN程度)で、節点間距離はすべて同一にしその長さは、ドーム頂点の高さを6.2mと仮定して、1.5mとした。空気送入は風量44m³/分、最大静圧46mm水頭圧の性能をもつポータブル送風機によった。この送風機を用いると、底面直径20m、高さ6.5mの球形ドームの容積は1162m³となり、計算上、約30分で型枠空気膜が建ち上る。又、このとき、ロープ1本に作用する張力は、端部傾斜角を66度とすると、6.37kNとなり、破断に対して十分な安全性を有している。図2に示される様に、散雪散水作業は、外気温が-10℃

以下で放射冷却が活発となる夜間に行われた。散雪には最大投雪距離22mの除雪機が用いられ、一回当たりの散雪厚を1cm以下になるように慎重に除雪機を操作した。一方、散水には園芸用ノズル6本が使用されたが、最大投水距離で約15m、総水量で約60リッター/分しかなく、この規模のドームに対する散水量としてはやや少ないように思われた。氷の厚みが約15cmに達した後、膜をデフレートしてドームを完成した。完成直後のドームの底面直径と高さは実測によってそれぞれ1720cm、645cmであった。これよりドーム曲面が球面と仮定したときの曲率半径は1040cmと見積もられた。図3に示すように、実測された氷厚分布はかなりばらついており、所定の厚みを得る為の施工上の工夫が今後の課題として残された。ちなみに、当初予定した板厚は、頂部15cm、中腹部17.5cm、下部20cmに対して、夫々、平均で12.5cm、17.9cm、18.4cmであった。今回の場合、延べ散雪散水時間36時間に対して、平均板厚は17.9cmということから平均して氷厚は2時間で1cm増すことになる。

4.2 クリープ測定

建設実験の終了後、2月12日~3月27日、ドーム試験体について変位と温度の長時間測定を行った。図4に示す様に、計21点の鉛直変位測定点が設けられた。測定には既の実績済の“吊り下げ法”が適用され³⁾、全て歪式変位変換器(ストローク50mm10本、100mm11本)を用いて、万能デジタル測定器により3時間のインターバルで自動測定を行った。この測定期間中、ストローク容量を越えないよう数度、変位計のリセットを行った。さらに同図4は外気温1点、ドーム内部気温2点、氷温度2点の温度測定点を示し、測定には、自記記憶型小型温度計(TR-52(株)ティアンドデイ製)が用いられ、その計測インターバルは1時間とした。

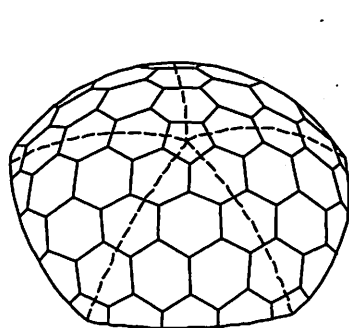


図1 網目パターン

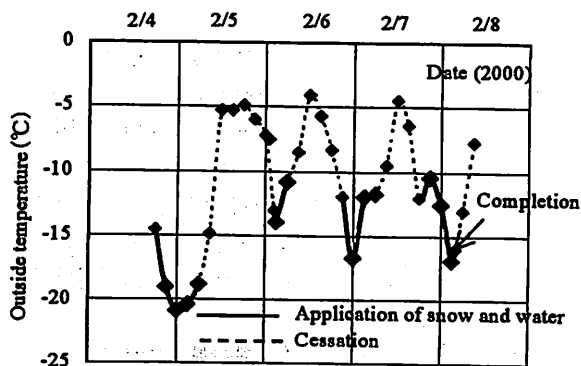


図2 建設中の外気温

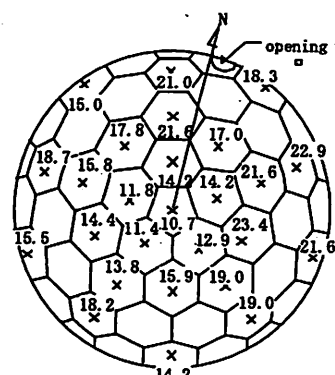


図3 氷厚測定値(cm)

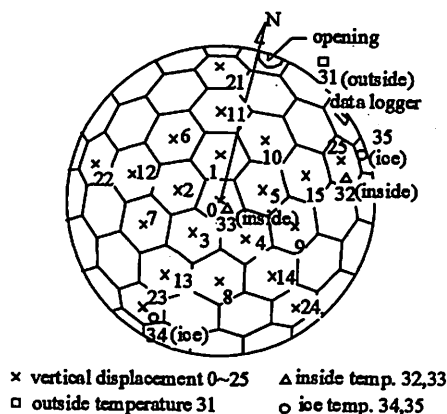


図4 変位・温度の測定点番号

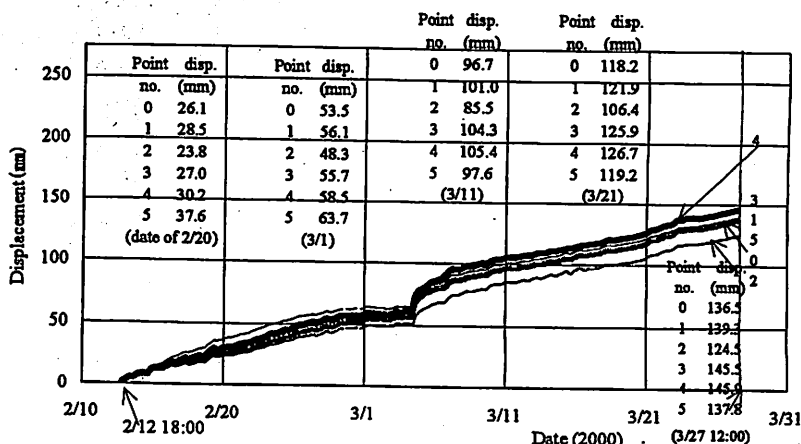


図5 δ_{0-5} -時間 曲線



写真1 崩壊前の大変形

クリープ実験全期間中の変位-時間曲線を図5(測定点番号0~5, 図3参照)と図6(測定点番号6~10)に示す。両図において、構造安全性の観点から、3月4日~3月6日の変形が急激に増加している点が注目される。これは、この間、春先におけるプラス温度の暖気と強い日射の影響を受け、氷構造体の温度(氷温)はドーム全体にわたって、ほぼ0℃に近い状態が続いたためと思われる。この期間を除くと、日射量の多い南面測定点8及び13の変位量が他点に比べやや大きいものの、大局的にドームの構造挙動は安定しており、測定期間中の平均的な変位速度は3~4mm/dayと小さい。自動測定終了後から崩壊が生じた4月4日まで目視で構造挙動を観察したところ、写真1に見るように大変形を伴う「延性的」崩壊性状を示した。

5. 30mドームのフィールド実験(2001年2月~4月に実施)

5.1 建設実験

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た。まず、2月5~6日に建設重機を用いて内径約25mの雪氷基礎リングを施工した。その後、直径30mの円形2重平面膜と図7に示すジオデシック分割に基づく網目ロープを用いて、写真2に示される型枠空気膜を立ち上げた。ここで、膜材は、塩化ビニル製(ポリエステル繊維使用)、重量5.19~5.59N/m²(従って総重量:7.35kN~7.90kN)、引張強度:タテ49±6.53kN/m、ヨコ35.93±6.53kN/m、色:ダークグリーンとし、一方ロープは14mmφポリプロピレンロープを使用した。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8に示すように、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ィションであった。写真3に建設状況を示す。散水は直径40mmφの高圧ホース1本、20mmφの普通圧のホース6本を使用した。水量はトータルで240~290リッター/分であった。このうち高圧ホースによる水量は150~200リッター/分程度と推測される。20mmφホースは5箇所設けられたビテ足場の頂部から、40mmφ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22mの除雪機が、上部へは投雪距離30m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1cm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。クリープ変位測定の前準備に行った氷厚の実測より得られ

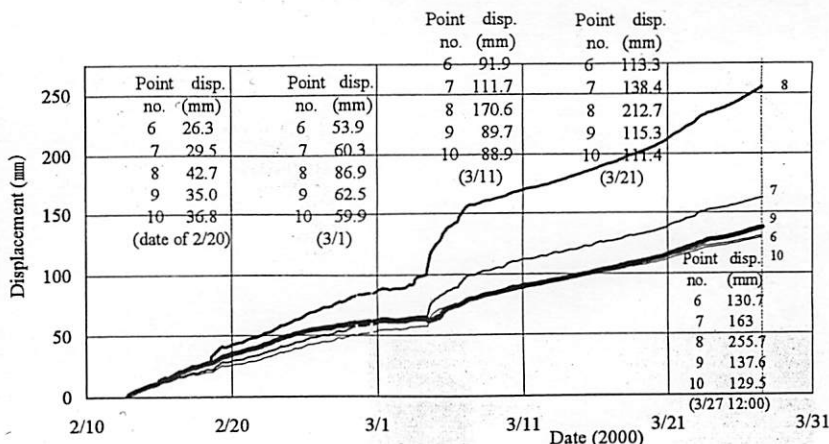


図6 δ_{6-10} -時間 曲線

た平均氷厚は約25cmと見積もられた。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、1cm厚の氷を造るのに2時間を要した事になり、20mドームの場合と同様、15m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、今後経験を重ねて行けば、改良されるものと思われる。

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)。写真5に完成直後のアイスドーム外観を示す。

5.2 変位・温度測定

ドーム完成後直ちに鉛直変位及び温度の測定に入った。変位計は大変位を予想し、20m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-5MDS((株)共和電業製、定格容量5000mm))に変えて、ドーム上部5ヶ所に測定点を設けた。温度計は自己記憶型の小型温度計を使用し、計6点(ドーム内部気温2点、氷温度3点、外気温1点)とした。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。測定期間中における平均温度は、外気温が-8.0℃、内気温が-3.4℃、氷温度が-3.0℃であった。図9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。ここに変位はいずれもほぼ同一の動きをしたドーム中央部5ヶ所の平均値を表している。しかし、図9で示されているように測定値は不自然な動きを示し真の変位挙動を記録していないことが測定終了後に行った検討によっても裏付けられた。その原因は変位計そのものの温度変化に伴う精度の問題であることが特定された。そこで大まかな傾向を知るために、同図において変位曲線の直線近似を行ったところ、その変位速度は1日あたり6.5mmとなった。氷の構成式をニュートン粘性体とするシェルの膜理論によれば自重を受ける球形シェル(雪荷重は平均して、両ドーム共に500N/m²以下程度と観察され、ここでは雪荷重の影響を無視して考察する。)の変位速度はその曲率半径の二乗に比例する。今回の実験において、20mドームと30mドームの曲率半径比の二乗は約1.8と見積もられ、前述した20mドームの変位速度(3~4mm/day)から30mドームのそれを計算すると5.4~7.2mm/dayとなり、実測された平均変位速度6.5mm/dayとオーダー的に良い対応を見た。

5.3 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。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、破壊は「脆性」的であった。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、

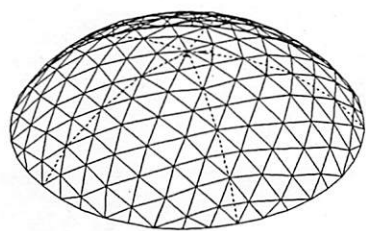


図7 網目パターン

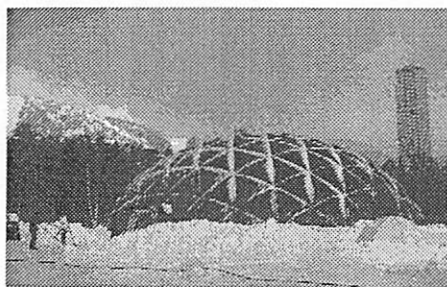


写真2 型枠空気膜

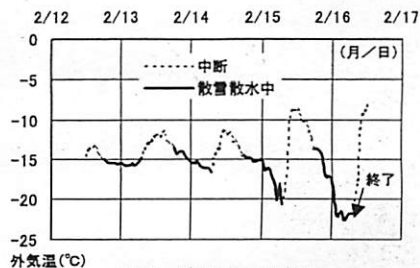


図8 建設中の外気温



写真3 散雪散水



写真4 膜のデフレート



写真5 完成

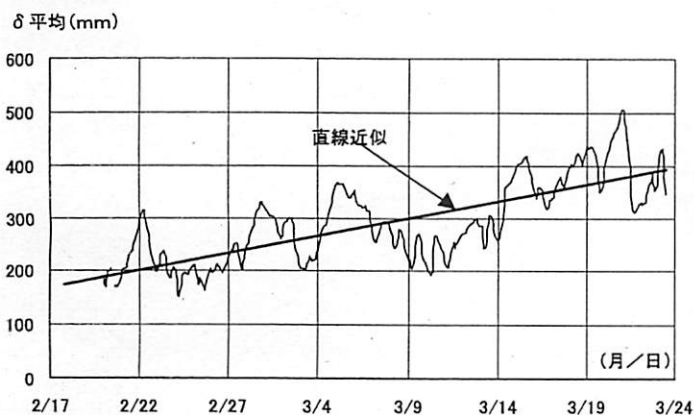


図9 鉛直変位—時間曲線の直線近似



写真6 崩壊状況

建築構造物としては好ましくない破壊性状である。崩壊直後の氷破片は「ざらめ状」で劣化が著しい状況であった。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てシェルの融氷が急激に進みその後一週間ほど経過して崩壊に至ったという状況からすると、融氷が急激に進まないうちは崩壊しないという見方も考えられる。最初の破壊は日射量が最大となるドーム南側中腹部で生じ、既往の実験結果と同様の個所を示している。写真6に2次崩壊後の外観を示す。

6. おわりに

以上の実験結果から、スパン 20-30m級アイスドームの建築的構造物への適用可能性が概ね実証された。しかしながら、巨大アイスシェルは未だかってない建造物であるので、その力学的性状については未知なことが多く、今後も継続してこの種の実験的研究が必要と思われる。

謝辞

本建設実験は北海道東海大学と(株)リゾートマネジメントの合同プロジェクトチームによって行われた。又、30mドームの実施に際し、(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。ここに、厚く謝意を表します。

参考文献

1. 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.
2. 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論文抄録集, 151-152.
3. Kokawa, T., 1985: Experimental Studies on Ice Shell in Asahikawa, Cold Regions Science and Technology, 11, 155-170.
4. Kokawa, T. and Murakami, K., 1986: Challenge to 20-m span ice dome, Shells, Membrane and Space Frames, Proceeding IASS Symposium Osaka, Vol.1, 297-303.
5. Kokawa, T., 1988: Construction and Creep Test of 15-m Span Ice Dome, Proceeding of IAHR Ice Symposium 1988 Sapporo, 390-399.
6. Kokawa, T. and Watanabe, K., 1997: Ice Shell-Contemporary 'Igloo' or 'Kamakura', Proc. of Structural Morphology International Colloquium, Nottingham, 286-292.
7. Kokawa, T., Itoh, O. and Watanabe, K., 2000: Ice Shell- Review and Recent Application, Journal of IASS, Vol.41(2000), n.1, 23-29.

注)

本論文におけるスパン20(30)mは、型枠として用いる円形2重平面膜の直径20(30)mに由来する。

[2004年10月12日原稿受理 2005年2月23日採用決定]