



アイスシェル—冬のトランジットリー・ストラクチャー

粉川 牧

北海道東海大学・北方生活研究所

1. はじめに

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、氷を材料とする薄い曲面板構造を意味している。「アイスシェル」は力学的性能に優れ、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き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人工的環境空間を創出する。

スパン 20m~30m 規模の実現に向けて、アイスシェル研究は 1980 年にスタートし、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方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進められた^{1)~7)}。そして、ある程度その研究成果が得られた段階で、底面直径 10m の小規模アイスドームが冬野菜の長期貯蔵としての実験庫、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使用されてきた⁸⁾。

この様にして、実際の自然環境下におけるアイスシェルの構造安全性が徐々に明らかにされる研究経過の中で、それまでの成果を踏まえ、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が実施され、そこでは積雪寒冷地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⁹⁾。これらアイスシェル群の中で常時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ると、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⁶⁾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は未知なことが多く、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、その構造安全性を実証しておくことが不可欠であると思われる。そこで、建設施工技術の改良とその構造安全性の実証を狙いとして、ここ 2 年間に開発研究用として計 2 基建設し、実験的検討を進めて来た。その結果として、スパン 20m アイスドームが冬期間の建築構造物として適用可能なことが分かった。

本報告は、過去 20 年間ににおけるアイスシェル研究を包括的に示そうとするもので、1) 構造工学的研究のレビュー、2) トマムにおける適用事例そして 3) スパン 20m アイスドームの開発実験について述べる。

2. 建設施工法

2.1 概要

「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体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「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⁵⁾。

- 1) 周辺が雪氷基礎リングに繋がるネットと雪面との間に袋状の2重平面膜を設置し、インフレーションして3次元型枠空気膜をつくる。
- 2) 除雪機等で型枠曲面上に薄く散雪し、さらに散水し、型枠上に薄氷を生成する。
- 3) 2)の作業を所定の板厚となるまで、繰り返し行う。その後、デフレーションし、膜とロープを除去する。尚、膜とロープは何回でも使用出来る。
- 4) 完成後、内部から光をあてる。十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左になる。

2.2 型枠空気膜の特長

袋状の膜とネット状ロープを併用し、ロープが膜の膨らみを規制して型枠曲面を形成する。したがって、膜は立体裁断の必要がなく、平面膜の使用を可能にし、その加工が容易となる。また、同一の膜であっても、ロープの長さや配置形状を変えることで多様な曲面形状を得ることができる。そして、これらの曲面は一様外圧下で決定される形であるので、完成後のアイスシェルには主に圧縮力が生じ、圧縮に強く引張りに弱いという氷の材料特性を生かした構造体ができることになる。一方、規則的なふくらみの曲面群とロープ跡の補強リブ群は力学的性能を向上させると同時にシェル内表面に幾何学的造形美をもたらしことにもなる。

2.2 散雪・散水

質のよい氷を効率よく作るには、寒さだけではなく工夫が必要である。散雪はやや固めの雪を除雪機で粉碎し、1回の散雪厚が1cm以下となるよう薄く吹き付ける。この雪は細粒の焼結雪で結合力が強い。さらに、水をスプレーすると浸透し、雪は -10°C 以下の寒気と放射冷却によって、たちどころに剛性と強度をもつ氷板に変わる。雪の使用は、潜熱を小さくして氷を早く作り施工時間を短縮させる為で、通常、経験的に1cmの氷板を作るのに大体1.5時間を要する。又、1回の散雪厚を1cm以下にするのは、アイスシェルの材料不整と幾何学的形状不整の原因となるサンドイッチ現象を避けるためである。

3. 構造安全性

短時間に作用する荷重に対して、アイスシェルが十分な構造安全性を有していることは、氷の短期強度とシェルの弾性理論から明らかである。しかしながら、氷河の例で分かる様に、氷は典型的なクリープ材料で、作用する力が一定でも時間の経過と共に変形が進む性質が顕著である。このクリープ変形が増大して、アイスシェルはやがて崩壊に至ることが十分に考えられる。従って、クリープに対する構造安全性を明らかにすることが、アイスシェルを実現する上で極めて重要であるとの認識の下に、まず、底面直径が 60cm^3 、 2m^1 そして 5m^5 のアイスドームモデルについてクリープ実験を行い、さらに球形シェルの軸対称クリープ座屈解析法を展開し、理論的解明を試みた⁴⁾。その後、前述した合理的な建設施工法が基本的に確立される頃から、実大規模の 10m^5 、 15m^7 そして 20m^6 スパンのアイスドームモデルについて試作実験とクリープ実験を含むフィールド実験を実施し、崩壊までのクリープ挙動に関する理解を深めた。これらの一連の実験で得られた特筆すべき結論は、いずれの場合も大きなクリープ変形を伴った後に崩壊が生じていることで、即ち、事前に十分な時間的余裕をもってその崩壊危険性を察知できるということであった。このことから、アイスシェルは構造的安全性が強く求められる建築構造物としても充分に使用できるのではなかろうかとの確信を得た。

4. アイスシェル in トマム

それまでの研究成果を踏まえて、1997年以来、我が国有数の厳寒多雪地域として知られる北海道は占冠村のホテル・アルファ・リゾート・トマムで毎冬約3ヶ月間、観光客の為のレジャー施設空間として、写真1に示される様に、中小様々な規模のアイスシェルが使用されている。ここでは、建設された数多くのアイスシェルのうち、造形的自由度が高く、筆者にとって極めて挑戦的試みであった「異形ドーム」について、その設計・建設施工状況の概要を紹介する。



写真1 トマムにおけるアイスシェル群

4.1 異形ドーム

3次元自由曲面型枠は2重平面膜と押さえロープを組み合わせで容易に得られるという本法の特長を用いれば、造形的自由度の高いフリー・シェイプ・シェルが可能となる。しかも、その曲面はほぼ一様な内圧下で決定される形であるから、完成後のシェルには主に面内圧縮力が生じ、圧縮に強く引張に弱いという氷の材料特性を活かした力学的合理性に富む構造体が自動的に生成されることになる。ここでは、直径15mの円と同一の面積を有する巴形の2重平面膜を用いて初の「自由曲面シェル」を実現した。写真2は、ビニールと漁網からなる縮尺1/20モデルについて3次元形状測定機を用いて曲面上の各点のXYZ座標値を測定している状況を示している。このデーターを用いて自重下における弾性有限要素解析を行ったところ、面内圧縮力の最大がほぼ 9.8N/cm^2 で充分設計が可能であることを確認した。写真3は現場での型枠空気膜を示す。膜はP.V.C製、ロープは径10mmのポリプロピレン製を平面射影で直交2方向に編んでいる。最大高さ約4.5m。写真4は、型枠空気膜に散雪散水している状況を示す。除雪機で散布された雪は一種の焼結雪で、さらに散水すると -10°C 以下の寒気で氷板に変わる。この時、一回当たりの散雪厚はサンドイッチ現象を避けるよう1cm以下とした。板厚が約15cmに達した後、デフレートし膜を除去すると写真5に示すようなリブ補強された氷の薄肉曲面板で覆われた半透明的空間が得られる。さらに内部造作工事を施し、写真6に示すように観光客が氷のグラスを造る工房として使用された。写真7はその時の外観を示したもので、透光性がよく、構造体は質の良い氷で出来ていることが分かる。

5. 20mドームのフィールド実験

スパン20mアイスドームは1985年、1999年及び2000年の冬に、それぞれ1基ずつ造られ、今までに計3基の建設が実施された。経験を重ねる毎に、その建設施工技術は改良され、クリープ挙動に関する構造挙動の理解も深められてきた。ここでは、これら3基のうち最新に実施した2000年ドームのフィールド実験の概要を示す。

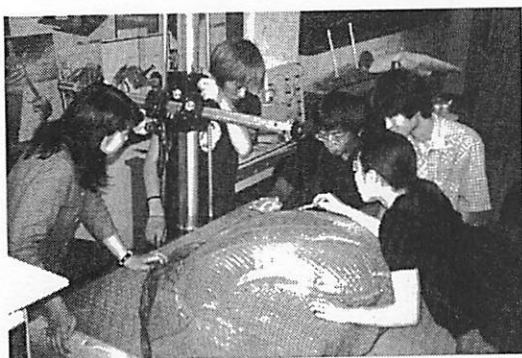


写真2 1/20 縮尺モデルの形状測定



写真3 型枠空気膜



写真4 散雪散水

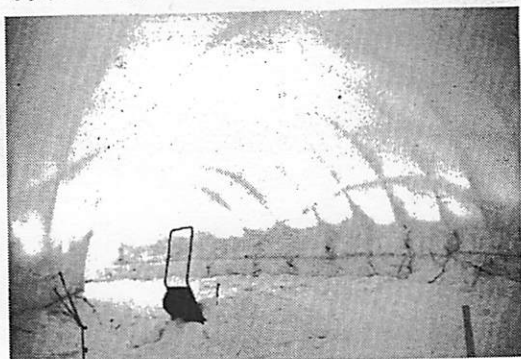


写真5 空気膜除去後の内部



写真6 内部は工房として使用

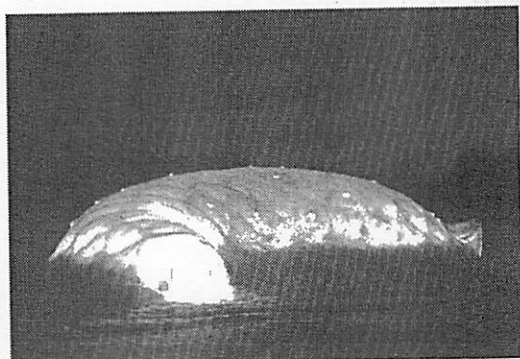


写真7 外観

5.1 建設実験

内周直径約17m、高さ90cm、幅1mの雪氷基礎リングを約1日かかりで施工した後に、写真8に示される様に、直径20mのP.V.C.製2重平面膜と網目ロープからなる型枠空気膜を短時間で建ち上げる。この時、網目形状は六角形と五角形要素からなり、ジオデシック分割を基本にそのパターンを決定した。使用したロープは径14mm(破断強度3t程度)で、節点間距離は全て同一の1.5mとした。図1に示される様に、散雪散水作業は、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

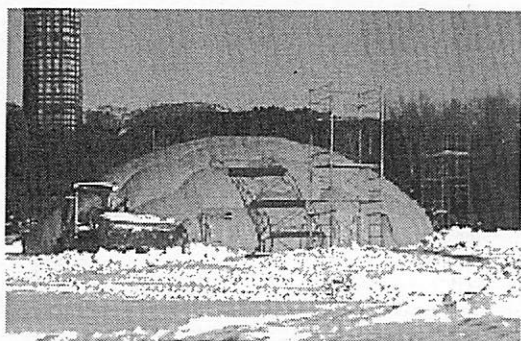


写真8 20m ドーム用型枠空気膜

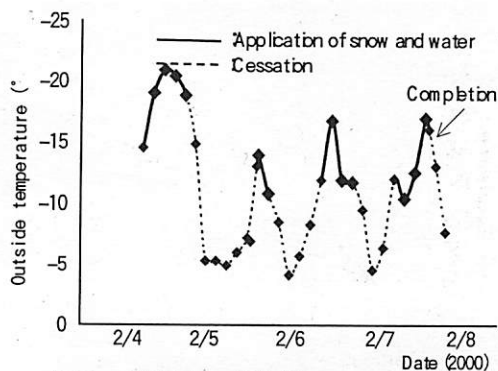


図1 建設中の外気温

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2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時間につき1cm増えたことになる。

5.2 クリープ実験

建設実験の終了後、2月12日～3月27日の期間中、鉛直変位21点と温度5点（外1点、内2点、氷2点）について長時間の自動測定を行った。図3はこの期間のドーム上部における変位—時間曲線を示したもので、構

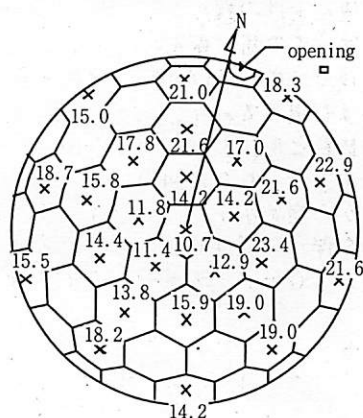


図2 氷厚測定値 (cm)

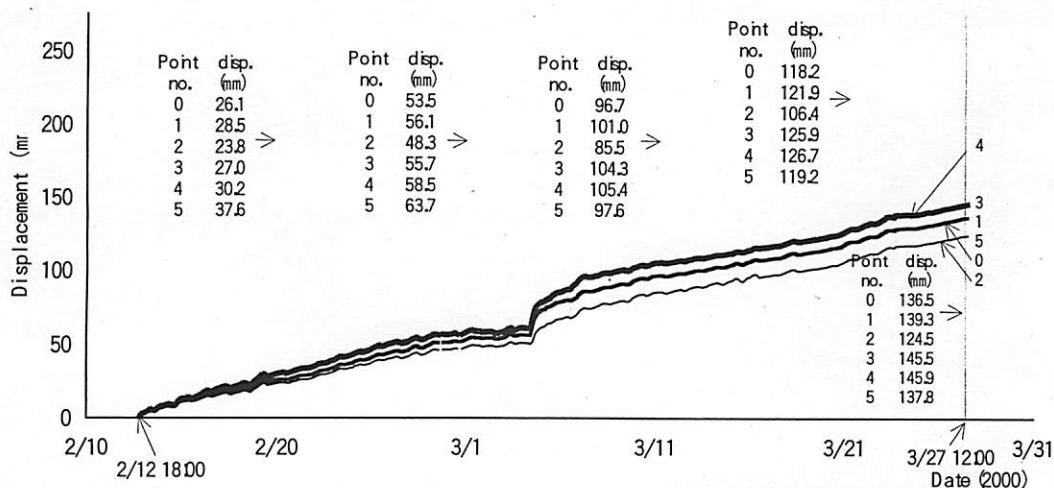


図3 鉛直変位 (δ_{0-5}) —時間曲線

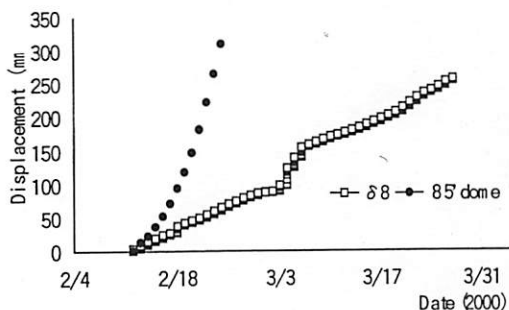


図4 1985年ドームとの比較



写真9 崩壊前の大変形

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、春先における暖気と強い日射の影響を受け、氷構造体の温度(Tice)はドーム全体にわたって、ほぼ0℃に近い状態が続いた為であった。しかしながら、全般的にみれば構造挙動は安定しており、ドーム頂部における平均的な変位速度は2.5～3mm/dayと小さい。図4は材料と形状の不整が見られた「85「ドーム」」との比較を変位について示したもので、質の良い氷で造られた今回のドームが極めて高い構造性能を有していることが分かる。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9に見るように大変形を伴う「延性的」崩壊性状を示した。これらの実験結果を総合的に判断すると、将来的にスパン20mアイスドームの建築構造物としての実施適用は可能であると思われる。

6. おわりに

「雪」は北に暮らす人々にとって邪魔物という捉え方が一般的である。しかし、本報告で示したように、その一方で、雪はアイスシェルを造る有用な構造材料にもなりえる。アイスシェルは冬の自然環境の厳しさを逆に利用して造られる空間構造体であり、北国独自の人工的環境空間をファンタスティックでビューティフルに創出する。このような視点から雪を捉えなおすと、雪は天からの貴重な贈り物と言ってもよいのかも知れない。

参考文献

1. 平沢勇・粉川牧, 1984: Ice Shell Structure の研究 第2報 スパン2m Ice Dome のクリープ破壊実験, 北海道東海大学芸術工学部紀要5号, 7-15.
2. 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.
3. 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.
4. 粉川牧, 1984: Ice Shell Structure の研究 第3報 Ice Dome の軸対称クリープ座屈解析、北海道東海大学芸術工学部紀要5号, 17-24.
5. Kokawa, T., 1985: Experimental Studies on Ice Shell in Asahikawa, Cold Regions Science and Technology, 11, 155-170.
6. 粉川牧・村上賢二, 1986: スパン20mアイスドーム建設の試み、雪氷48巻2号, 67-73.
7. Kokawa, T., 1988: Construction and Creep Test of 15-m Span Ice Dome, Proceeding of IAHR Ice Symposium 1988 Sapporo, 390-399.
8. Kokawa, T. and Watanabe, K., 1997: Ice Shell-Contemporary "Igloo" or "Kamakura", Structural Morphology International Colloquium, Nottingham, 286-292.
9. Kokawa, T., Itoh, O. and Watanabe, K., 2000: Ice Shell- Review and Recent Application, Journal of IASS, Vol. 41(2000), n. 1, 23-29.