

雪氷による建築空間の構築技法 —現状と最近のアイデア

北海道東海大学教授 粉川牧

Snow-Ice Construction for Architectural Space in Winter — State of the Art and Recent Ideas

ABSTRACT

Snow-ice is a useful structural material for creating architectural space during winter in snowy and cold regions. New snow-ice structures have been recently developed for a winter recreational facilities in northern countries all over the world. A snow vault structure has been used at IceHotel, jukkasjarvi in Sweden and Snow Castle, Kemi in Finland. The ice shell structure, which was invented by the author, has been applied to architectural facilities in Kamikawa District, Hokkaido. In addition to informations of these structures -state of the art, this paper describes also new ideas, such as 'Ice Dome on Lake ice plate', 'a snow-ice dome construction' and 'snow membrane', for creating winter space by snow-ice material.

1. はじめに

冷熱による食料品の保存・貯蔵や夏期の冷房システムの開発、エネルギー源としての温度差発電などの例に示される様に、近年、雪氷利用の工学的研究とその実用化が急速に進んでいる¹⁾。その背景には、「雪や寒さは生活の妨げ、疎ましきもの」といった従来の消極的考え方から脱け出て、雪氷に対する能動的な姿勢が見られる。つまり、「雪氷は闘う対象ではなく、有効利用すべきものである—Do not fight it. Make use of it.」²⁾といった発想の転換がある。

雪氷の有効利用としては、前述の冷熱、エネルギー源のほか、水資源、スキー場、観光資源、雪中農業など様々な分野に及んでいるが、その他に、本報告の内容と関連して雪氷の構造材料への利用がある。とりわけ、河川や湖の結氷板は、ロシアや北米では交通や貯蔵を目的として古くより利用され、19世紀末には既に河川氷板上に鉄道が敷設されていたという。20世紀に入ってからは、河川氷板が氷上車道、建設足場や木材伐採搬出のためのプラットフォームそして氷橋、湖氷板や浮氷板が冬期間の飛行場などとして生活、産業及び軍事目的に様々に活用

されてきた³⁾。日本でも第二次世界大戦中に実施された満州の氷上軌道⁴⁾や北海道・天塩川の氷橋が氷板の利用例としてよく知られている。さらに、1970年代にはカナダでは、北極海海底油田探索用の基地として巨大アイスプラットフォームが建設されている⁵⁾。そして、今日の北海道では、冬、結氷した湖氷板の上が公魚釣り、アイススケート、スノーモービルなど様々な冬のリクリエーションやイベントのためのスペースとして利用されている(例えば、阿寒湖、朱鞠内湖、然別湖など)。

前述の氷板の土木工学分野への利用に対して、雪氷材料の建築構造物への利用としては「かまくら」や「イグルー」がある。これら古典的雪氷建築物を技術的に発展させた「現代の雪氷建築物」が、近年、世界の厳寒積雪地域で開発され、冬期間のアクティビティーを活性化するための一種の「人工的環境物（Built Environment）」として、実際に適用されている。氷を構造材料とする薄肉の曲面板構造、「アイスシェル」もその一つの例として挙げられ、北海道は上川管内において、冬のテンポラリーな建築構造物として実用化されている⁶⁾。

本報告は、未だ萌芽的ではあるが、着実に歩を前に進めている現代の「雪氷建築物」の適用状況を、北スウェーデン、北フィンランド、北海道を例に示し、加えて、「雪氷建築」時代の到来に備えるべく、目下、筆者によって検討されつつあるいくつかのアイデアを概略、紹介する。

2. 雪氷建築構造物の現状

北海道の各地で開催される冬のフェスティバルに出現する雪（氷）像の中には、世界の歴史的建造物である宮殿、博物館などを模して、実物さながらの大きさに造られているものがある。これらの建造物は外観上、大建築物を思わせるが、基本的には大きな雪の塊を削ってつくる巨大な彫刻・オブジェであって、その内部に空間をつくらず、建築物としての機能はない。この場合、たとえ雪像が部分的に崩壊しても、その事によって人に障害を負わせたりしないような方策を講じることはさほど難しいことではない。

雪像に対して、内部空間を使用する雪氷建造物、即ち雪氷建築物としては、古くはかまくら、イグルーの例があるが、これらは、規模が小さく、その構造安全性が問題となることはない。しかしながら、今日、北北欧や北海道で建設されている雪氷建築構造物は、これらの規模をはるかに超え、その使用も長期にわたるもので、構造工学的視点からの十全な検討を踏まえて建設が行われなければならない。

2-1 北北欧の雪氷建築構造物

a. 北スウェーデン・ユッカスヤルビ村アイスホテルの雪ボールト⁷⁾

ユッカスヤルビ村は北スウェーデン・キルナ空港から東に車で20~30分程度のところ。北極圏内に位置し、アーチチックサークルから約200km。ここに、毎冬、雪氷で造られるホテルが出現する。特に、ホテル内部の様々なインテリア器具は近くを流れるトルネ川のぶ厚い透明度の高い自然氷によって、品よく芸術的に仕上げられている。1989年より現在のスタイルに。毎冬12月~翌年4月開業。スパン6m、高さ5.5mの尖頭アーチボールト状雪構造物が主要構造物として建設される。ジャッキダウンとスライドができる特殊な金属製アーチ状型枠にスノ

ウメーカーによる人工雪を撒き、且つホースで散水しながら造る厚肉のボールト状雪構造物。雪の比重は水も使



図1 雪ボールトの建設場所

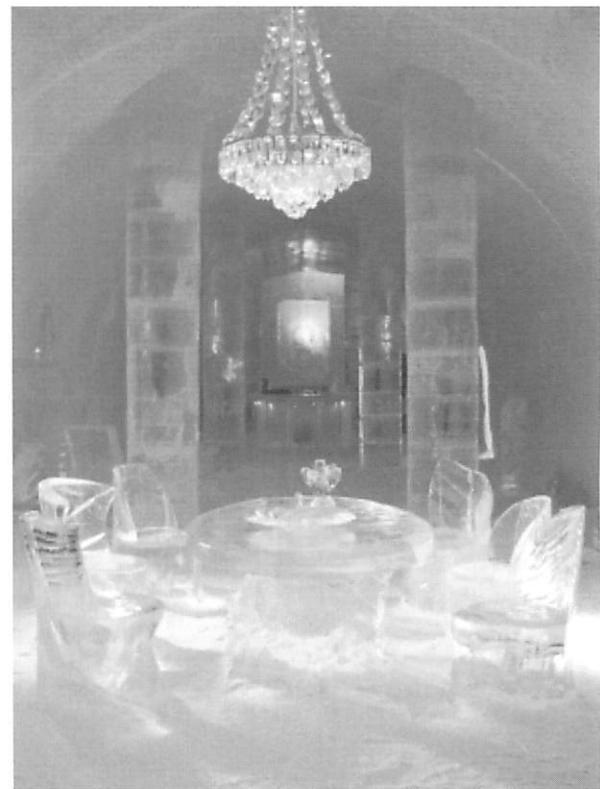


図2 アイスホテルの内部

用していることから、通常の雪よりは重く0.5~0.7程度と推定される。クリープ変形による過大な変形を防ぎ、長期間の使用を可能とするために、建設後アーチスパン中間を氷柱で支持。

b. 北フィンランド・ケミ市スノウキャッスルの雪ボーグルト^{8),9)}

ボスニア湾最北部に面した北フィンランドの小都市ケミでは、アイスホテルとほぼ同様なコンセプトのもとに、1996年以來、多数の雪造ボールト構造物を観光客の宿泊施設として建設している。雪氷材料の調合にボスニア湾



図3 スノウキャッスルの全景

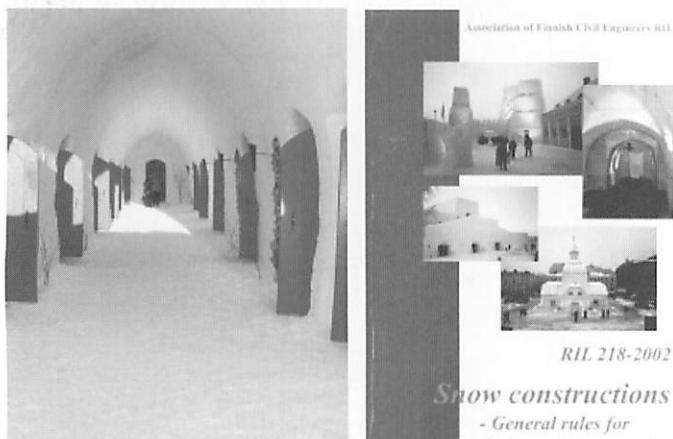


図4 スノウキャッスルの内部、設計基準書

の海水を利用するものの、その建設技術はアイスホテルのそれとほぼ同じで、2番煎じの感が強い。しかし、これらの建設を契機として、構造工学的研究が進められ、最近、雪構造物の設計・施工指針⁹⁾がフィンランドの構造技術者達の手によって、世界に先駆けて作成されたことは高く評価されてよい。

2-2. 北海道・上川管内のアイスシェル（アイスドーム）

北北欧の雪ボールト状建築物の建設技法とは異なり、型枠空気膜に散雪散水して造る氷の薄肉曲面板構造物、



図5 アイスドーム建設場所



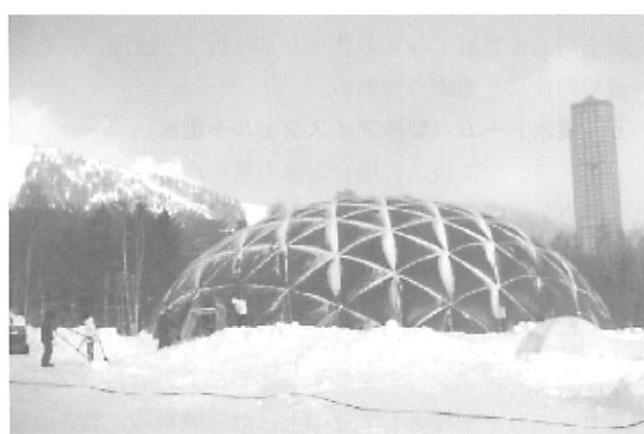
図6 清酒の低温醸造貯蔵庫 ((株)高砂酒造)

アイスシェルが1980年代の初めに考案され¹⁰⁾、種々の実験的検討がなされた後、今日では上川管内の3箇所、トマム、高砂酒造、中川町でアイスドームが実用化されている。特に、北海道有数のリゾート地占冠村トマムでは、

1997年以來、毎冬12月下旬～翌年3月下旬の3ヶ月間、アフタースキーのレジャー施設として、底面直径15m以下の中小規模アイスドームが多数建設されてきた。なお、シェルの力学的合理性に裏付けられて開発された本アイ



図7 アイスシェル in トマム（2002-2003 冬）



a 型枠空気膜



b 膜の除去

図8 スパン30m級アイスドームのフィールド実験

スシェル建設技法は、スパン20~30m級の巨大アイスドームを1週間以内という驚異的短時間で建設施工し、十分な耐久性を有していることが既往の実大フィールド実験¹¹⁾で確かめられている。

3. 当面の課題

3-1. アイスドーム設計・施工・維持管理の指針作成

前述のフィンランド技術指針⁹⁾では、雪を工学的構造材料と捉え（雪比重は0.4~0.7を対象）、健全な雪建築物を建設するための具体的方針を与えており、建築や構造の専門家が設計・施工・維持管理の一連の業務に携わっていることが記載されている。アイスシェルの場合、これほどの内容を有する指針は現状では望めないが、健全にアイスシェルを建設・維持管理するために何らかの指針づくりが必要な時期に来ているものと思われる。特に施工時と使用限界時にに関する具体的規定が急がれる。

3-2. 新たな雪氷空間の創出に向けて

アイスシェルの建築技法に加えて、雪や氷を材料にした様々な空間構築技法の開発が望まれる。これらの技法を冬の空間造りに活用すれば、人々の戸外での活動を促し、積雪寒冷地における冬の生活や暮らしはより豊かなものになることが期待される。との考えのもとに、現在、検討を進めつつある雪氷空間の創出に係わる2、3のアイデアを以下に概略紹介する。

a 湖氷板上のアイスドーム建設

アイスシェルは型枠空気膜に散雪散水して造られるこ

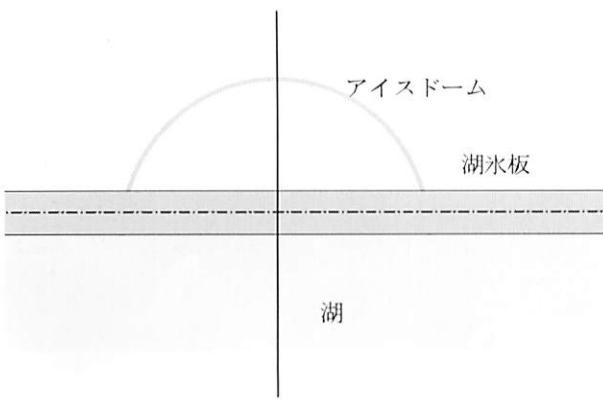


図9 湖氷板上のアイスドーム

とから、必要な寒さと雪の他に水が用意できる場所であればどこでも、アイスシェル建設が可能と思われる。その建設場所の一つとして結氷した湖氷板が考えられる。近年、北海道内のいくつかの湖が、冬のリクリエーション会場として利用されているが、例えば、結氷した湖氷板上に「アイスドーム」を建設し、「公魚釣り」、「アイススケート」、「スノーモービル」など様々な冬のリクリエーション活動に対応できる期間限定付きの簡易建築構造物として使用することができるかも知れない。このとき、アイスドームを長期にわたり支える湖氷板の力学的安全性が問題となる。そこで、実現に向かう理論的アプローチの第一歩として、氷の粘弾性モデルを Maxwell

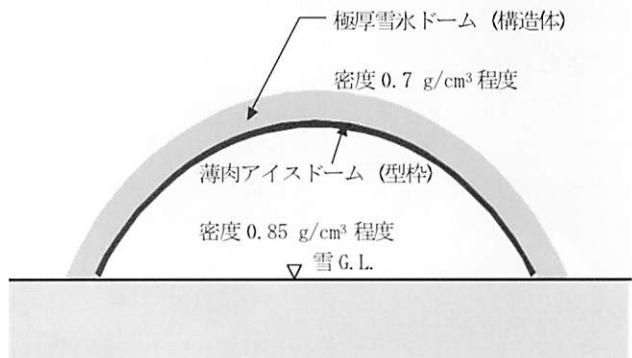


図10 雪氷ドーム

流体と仮定して、さらに古典平板の弾性理論解に対応原理を適用して、時間とともに変化する氷板の応力、変位・歪を閉形級数解で与えるクリープ解析法を展開し、数値解析的検討を進めつつある。

b 雪氷ドーム(型枠アイスシェル+雪氷)

アイスシェル技法の場合、氷の質を高めるために、施工は外気温が-10°C以下、且つ放射冷却が活発な夜間と定められている。しかし、10m以下の小規模ドームの場合、所定の力学性能を保つことを前提として、もっと施工条件を緩めた簡単な建設技法があつてもよい。そこで、氷厚数cmの薄いシェルをまず-10°C以下の最初の夜間で造り、これを型枠としてその上に散雪散水し、最終的に比重で0.7程度、厚さ30cm~40cmの雪氷ドームを建設する方法である。この方法によれば、最初の夜間を除いて、

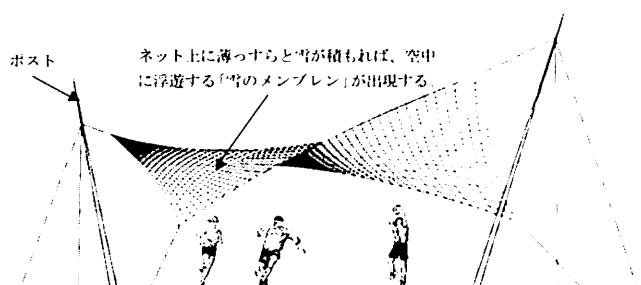


図11 雪のメンブラン

-10°C以下でなくとも施工が可能で、施工作業の合理化が期待できる。さらに雪氷の高い断熱性によって内部気温がほぼ-2°Cとなる特長がある。但し、アイスドームに比してクリープ変形しやすく、その性状を実験的に確かめておく必要がある。

c 雪のメンブラン（テンションネット+雪、雪のバーゴラ）

テンション・ネットに雪を積もさせて、薄い雪のHP曲面膜を創る。応用としては、雪膜で作られるバーゴラのルーフ。雪は構造材料ではなく、屋根材料と捉え、雪の造形を楽しむ一技法でもあり、「雪吊り」の現代版。積雪が過大になった場合、押さえケーブルを緩めて除雪する。したがって、安全性を含めた維持管理も簡便簡易と思われる。

4. おわりに

本報告で示したように、雪氷を構造材料とする建築物、所謂「雪氷建築物」が、近年、世界の厳寒積雪地域で開発され、冬のレジャー施設として使用されている。北スウェーデンと北フィンランドでは「雪ボールト」、北海道・上川管内では「アイスシェル」が開発され、これらはともに圧縮力が支配的で引張に弱く圧縮に強いという雪氷の材料特性を生かした形状によって構造性能の向上を図り、従来の古典的雪氷建築物として知られる「かまくら」や「イグルー」と比べて遙かに大きな規模を実現している。特に「アイスシェル」は膜応力伝達による高い力学的合理性を有し、その革新的な建設施工法によってスパン20~30m級の巨大アイスドームが実用化の一歩手前にある。これら「現代の雪氷建築物」は、今後、世界の厳寒積雪地域において冬の様々なアクティビティに容易に対応できる建築構造物としてより一層活用されることが期待されている。

雪氷建築物は世界の厳寒積雪地域に於いて人類の共有

財産になりうる可能性を秘めた建築物であり、雪氷建築物の設計・施工・維持安全管理に関わる一連の構造工学的研究開発は、今後、国際的ネットワークの中で技術情報を交換し、協力し合いながら推し進められねばならない時期に来ているものと思われる。

参考文献：

- 1) 「雪氷エネルギーの可能性」、冬の都市フォーラム論文集、Winter Cities 2002 Aomori, pp.157-188.
- 2) Frederking, R. (compiled), 1979: Proceedings of Workshop on the Bearing Capacity of Ice Covers 16-17 October 1978 Winnipeg, Manitoba.
- 3) Kerr,A.D., 1976 : The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads. J. Glaciology, 17, 229-268.
- 4) 久保義光, 1980 : 氷工学序説. 泰流社
- 5) Baudais, D.J., Masterson, D.M. and Watts, J.S., 1974 : A system for offshore drilling in the Arctic Islands, J. Canadian Petroleum Technology, 13, 3, 15-26.
- 6) Kokawa, T., Watanabe, K., Itoh, O., 'Ice Shell – Recent Application to Winter Architecture', The Proc. of The Tenth IOPE Conference, Seattle, Volume I ,2000,pp. 716-721.
- 7) <http://www.icehotel.com/>
- 8) <http://www.kemi.fi/english/index.html>
- 9) Association of Finnish Civil Engineers RIL., 'RIL 218-2002, Snow constructions-General rules for design and construction'
- 10) Kokawa, T., 'Experimental Studies on Ice Shell in Asahikawa, Cold Regions Science and Technology, 11, 155-170., 1985:
- 11) Kokawa, T. 'Field Experiment of Ice Dome Spanning 20~30 Meters', International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.12, No.4, ,264-270. December 2002