

スパン 20m アイスドーム建設の試み

粉 川 牧* 村 上 賢 二**

要 旨

スパン 20m アイスドームの試作及びクリープ実験を行った。二重平面膜とロープからなる型枠空気膜に散雪と散水を交互に繰り返して行い、雪氷シャーベットを寒気で凍結硬化させる方法によって試作した。1回当りの散雪量が過多であった為、完成したドームに材料及び幾何学的不整が見られた。その為に構造性能は大幅に低下し、崩壊迄約1ヶ月であった。実験は不満足な結果に終わったが、経験と若干の改良によって実大アイスドームの実現が充分可能と思われる。

1. はじめに

薄肉の曲面板のことを力学用語でシェルといい、周知の様にシェルは軽くて強く剛い極めて力学的合理性に富む構造である。このシェルを氷もしくは雪氷という積雪寒冷地において豊富に存在する材料でつくるとき、筆者はこの構造を“アイスシェル”と名付けた。温故知新、アイスシェルは“イグルー”や“かまくら”といった古くからある伝統的雪氷構造物に今日の構造工学的技術を取り入れて新しく現代に蘇える北の空間構造物である。

筆者によるアイスシェル研究に先だって、この種の雪氷構造物に関する先駆の試みがいくつかある。M. Mellor (1968) は型枠空気膜面に除雪機により雪を吹き付ける工法を考案し、スパン 10m 規模の半球形 Snow Dome を建設した。P. G. Glockner 等 (1975) は Mellor と同様、型枠空気膜を用い、これに雪の代りに水をスプレーしてガラス繊維で補強された Ice Dome をつくる方法を提案し、さらに底面直径 2m の縮尺モデルについて初めてクリープ挙動に関する実験的研究を行った。しかしながら、これらの研究は、その後新しい展開がなされていない。1980年代に入って、筆者は、冬期間のスポーツレジャー、イベント、倉庫等のシェルターとして使用可能なスパン 20~30m 級のアイスシェル建設実現を目指し、種々のスケールをもつ縮尺モデルを用いて、その建設施工法及び構造安全性に関して実験的且つ理論的な検討を進めてきた (粉川・平沢 1983, 粉川 1983a, 1984, Kokawa 1985)。

本論文は、筆者らの数年に亘る研究成果、特にスパン 10m アイスドームのフィールド実験結果 (Kokawa 1985) を踏まえ、1985年1~2月、旭川市内の石狩川河川敷にお

いて初めて挑んだ底面直径 20m、頂点高さ 5m という実大アイスドームの試作及びクリープ実験をまとめたものである。

2. 実験場所

大雪山系を源とし、4本の川が上川盆地を流れ、旭川は水資源に恵まれている。この自然環境に着目して、アイスシェルの主たる原材料の水は川の水が利用されるべきと考えた。そこで図1に示される様に、石狩川と牛朱別川が合流し、背後に市内最古の鉄骨アーチ橋「旭橋」を控え、付近一帯の景観が川の街旭川を象徴的にあらわしている河川敷都市公園「牛朱別広場」を、環境構造物でもあるアイスシェルの実験場所に選んだ。

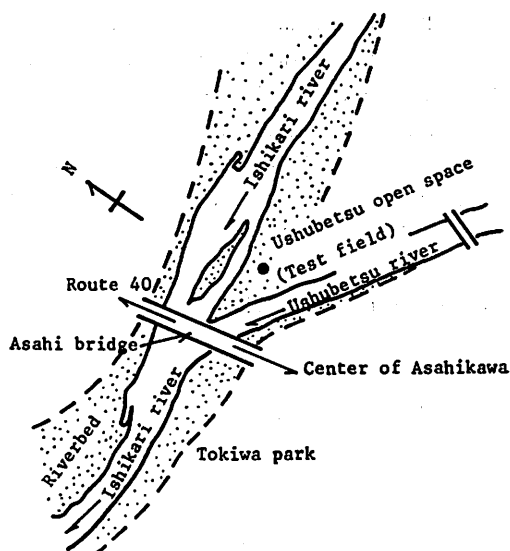


図1 実験場所

* 北海道東海大学

** 新谷建設

3. 試作実験

「1.はじめに」で示した Mellor (1968), Glockner 等 (1975) のアイディア, 即ち型枠空気膜に雪あるいは水を吹き付ける工法は, シェルの建設方法として良く知られる Neff 構法 (J. Joedicke 1962) の拡張と考えられる。筆者はこれらの基本的発想を足掛りに, アイスシェルを早く, 簡単に且つ低コストで建設可能ならしめる施工技術の研究開発を進めてきた。その過程の中で, 加工が容易な二重平面膜と押さえロープからなる型枠空気膜に散雪と散水を交互に繰り返し, 凍結硬化する工法が提案され, スパン 10m 規模のアイスドームについて建設技術のノウハウが基本的に確立されるに至った (Kokawa 1985)。そこで, 筆者らは蓄積されたノウハウを用いて, 一挙に規模を拡大し, スパン 20m, ライズ約 5m の実大アイスドーム建設に初めて挑んだ。以下試作実験の手順及び建設状況を述べる。

3.1 雪氷基礎リングの施工

強固な雪氷基礎リングは建設中のロープ引き抜きを防ぐとともに, 完成後シェル境界の変形を拘束しシェルにより高い強度と剛性を与える。

リングは中心直径 20m, 断面寸法 1.2m×0.6m の規模を有し, 雪氷の比重を 0.85 とすると, その全重量は約38トンとなる。一方, 型枠空気膜の内圧を 7cm 水頭圧とすると基礎リングに作用する全揚力は約22トンであるから, 浮き上がりに対しリングは約2倍弱の安全率をもっている。

リング施工作業は1月14日～1月16日の夜間に行われ①直径 19.4m, 20.6m の円周上に夫々, 薄板ベニヤをならべて 1.2m×0.6m の枠をつくり, 一方, ②ポリプロピレン (P.P.) 製端部ロープを直径 20m の円周上に置いたたる木 (断面 45mm×45mm, 長さ 3.6m) 群に緊結し, ③枠中に雪と水を入れ, 足で踏み固め凍結硬化させる, の手順によった。尚, 作業③は4回にわたり繰り返し行われ, 1回の層厚は 15cm を目安とした。

3.2 膜セットとロープ配置

膜を雪面上に敷く。このナイロン繊維で補強された塩化ビニール膜は直径 20m の円形平面膜を2枚重ね周辺を高周波加工してつくられている為, 立体裁断を必要とせず加工が容易, 密閉構造のため空気もれが微小で建設中の膜内圧調整が簡単, といった特長がある。

高周波接合部の引張試験を行ったところ強度の下限値は約 10kg/cm で, これは母材膜強度の約 60% に相当する。一方, 膜内圧を 7cm 水頭圧, 膜面の曲率半径を 14.1m と仮定し, 膜理論によって膜応力を計算すると

5kg/cm となり, さらに本空気膜は後述する様にロープを併用している為ロープで囲われた膜面の曲率半径は全体曲面のそれより小さく, 膜応力は前記計算値 5kg/cm よりさらに低くなる。以上より, 膜は強度的に充分安全と判断した。

膜セット後, 膜の上に中央ロープを直交2方向に夫々 2.2m 間隔に配置し, 端部ロープとターンバックルで繋ぎ, ロープ初期長を調整した。ロープは強度, 剛性及びコストを考慮し, P.P. 製 $\phi 14\text{mm}$ が用いられた。建設中におけるロープ張力の1トンに対し, ロープとターンバックルからなる試験体の引張強度は下限値で2.2トンを示し, 充分安全と判断した。

3.3 型枠空気膜構造

ポータブルファンにより二重膜内に大量の空気 (115 $\text{m}^3/\text{分}$) を送風すると 15分程でおよその曲面形状が得られ, その後ボルテックスブローアと圧力調整器により, 高圧微量の空気を送風し, 型枠空気膜の圧力を 7cm 水頭圧に保った。

筆者の考案した型枠空気膜が従来 (Joedicke 1962, Mellor 1968, Glockner et al. 1975) と大きく異なっている点は, 二重平面膜と押さえロープの併用によって型枠曲面を形成するところにある。即ち, インフレート状態において, 二重膜の内圧とロープ張力が力学的に平衡し膜の膨らみをロープで押さえ, 所定の曲面を得ようとするもので, ロープの存在が平面膜の使用を可能にしている。さらに, ロープが膜に食い込むことによって, 完成したアイスシェルは「複眼殻」(多数の規則的膨らみからなるシェル) タイプのシェルとなり, 規則的膨らみ曲面群とロープ跡の自然につくられる補強リブ群は, 構造的には力学的性能を改良し, デザイン的にはシェル内表面に幾何学的造形美をもたらす。従って本型枠空気膜においてロープは極めて重要な役割をもっていることが分かる。

3.4 散雪散水作業

型枠膜面上に固い締った雪を中型ロータリー式除雪機 (最大投雪距離約 15m) で粉砕し吹き付け, さらにポンプで吸い上げた石狩川の水 (水温 0°C) を噴霧調整可能なノズル (最大投水距離約 20m, 最大散水量約 $0.4\text{m}^3/\text{分}$) でスプレーした。この作業によって作られる雪氷シャーベットは -10°C 以下の寒気によってやがて氷板に変る。ところで散雪作業において, 1回当りの散雪厚をなるべく薄くすることが肝要である。もし過分に厚く散雪して水をスプレーすると雪の表層のみが結氷し内部は水が通りすぎ密実な氷が作れないばかりでなく過大な雪氷シャーベット重量によって膜の落ち込みが生じ, これ

度の曲げクラック、材料不整、落ち込み(幾何学的不整)が顕著で、ドームの施工状態は 10m モデル (Kokawa 1985) の場合と比べ極めて不良であった。

3.6 ドームの幾何学的形状

図2はさらにドーム内表面の主要なロープ交点跡の雪面上からの鉛直高さを示したもので、これより図部分の落ち込みが明らかである。この落ち込みは散雪散水作業中徐々に進行しているのが目視観察されており、その発生は施工段階の始めにあったものと思われる。

中央点最近傍4点における鉛直高さについて実測値と略算法 (Kokawa 1985) による計算値を比較すると、実測値の平均は 4.44 m, 計算値は 5.06 m で大きく相違した。

図6はドームの板厚を示したもので、これより中央部が比較的薄く、又場所によるバラツキの大きさが目立ち、所定の板厚にする為の簡便な技術的方策が今後必要と思われる。

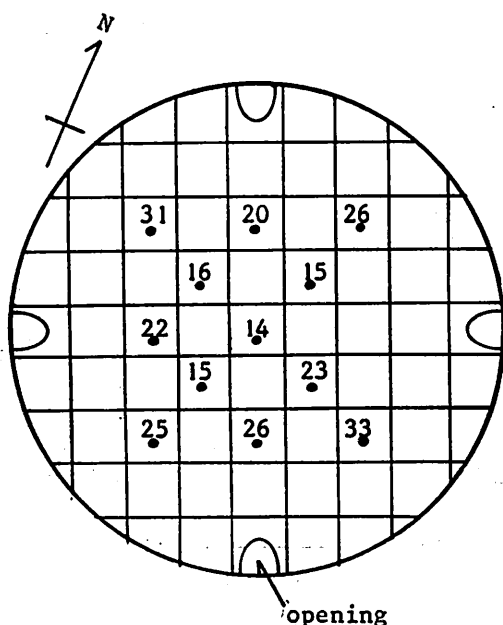
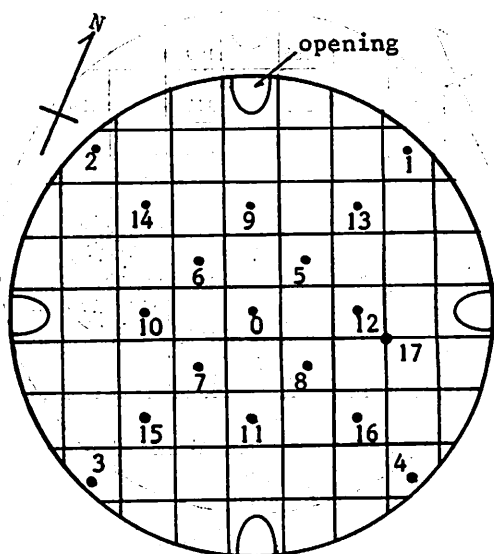


図6 雪氷板厚 (cm)

4. クリープ実験

4.1 実験方法

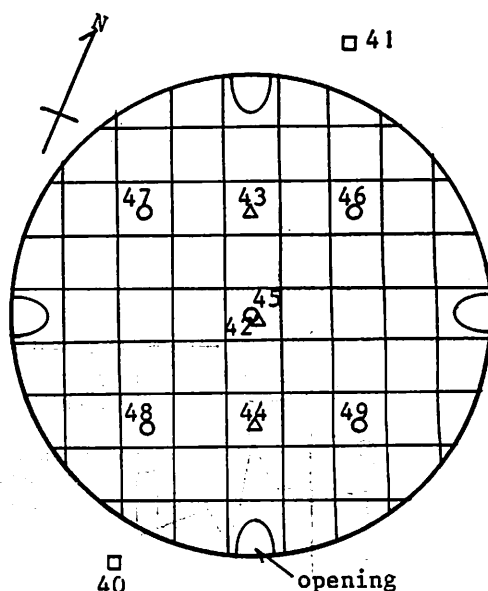
図7に示す様に、計18の変位測定点が設けられた。このうち No. 0, No. 5~17 は鉛直方向変位測定点, 残りの No. 1~4 は法線方向変位測定点を示し; 測定は全て歪式変位変換器 (ストローク 50mm 及び 100mm) によった。尚, 鉛直方向変位測定に, 10m モデルで経験済



1-4; normal displacement

0, 5-17; vertical displacement

図7 変位測定点の位置と番号



○; snow-ice temperature
△; inside temp.
□; outside temp.

図8 温度測定点の位置と番号

みの“吊り下げ法”(Kokawa 1985)を用いた。

図8は外気温: Tout 2点, ドーム内部温度: Tin 3点, 雪氷温度: Tice 5点の温度測定点を示し, 測定には銅-コンスタンタン熱電対が用いられた。

全ての変位と温度は万能デジタル測定器により, 2~3時間のインターバルをとり, 1月30日~2月15日の期間, 自動測定された。2月15日から崩壊の2月28日迄は, 目視によって構造挙動が観察された。

ドームに作用する荷重は自重と雪荷重からなる。旭川

気象台の記録によると, 1月25日から2月27日迄の降水量は 61.5mm で, これより雪が一様等分布状態に積ったと仮定して, クリープ実験中に作用する最大荷重 61.5 kg/m^2 は自重の約 $1/3$ と推定される。

4.2 測定結果

2月の平均気温は -6.8°C で平年値に比べてやや高めであった。図9は自動測定期間中における Tout, Tin 及び Tice を代表点について示したものである。今回の様に, 実験中開口部4ヶ所に蓋をし且つシェル上に積雪が

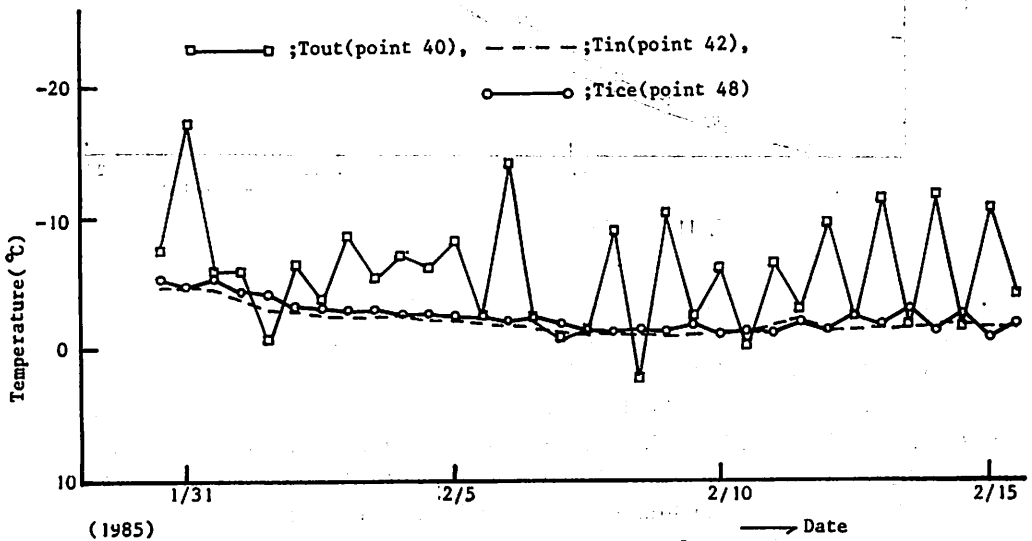


図9 外気温, ドーム内部温度, 雪氷温度—時間曲線

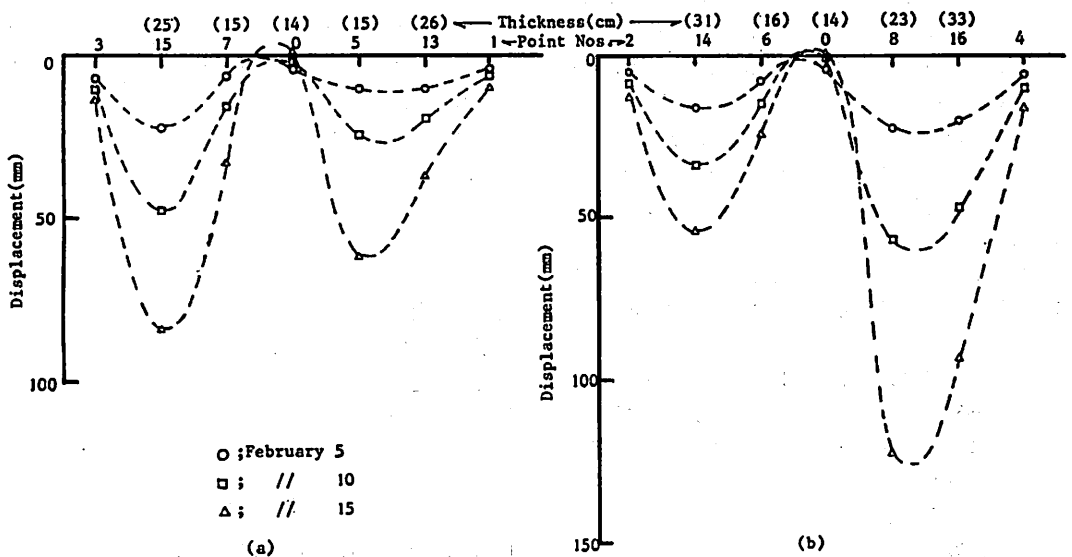


図10 ドーム対角線上の変形状態

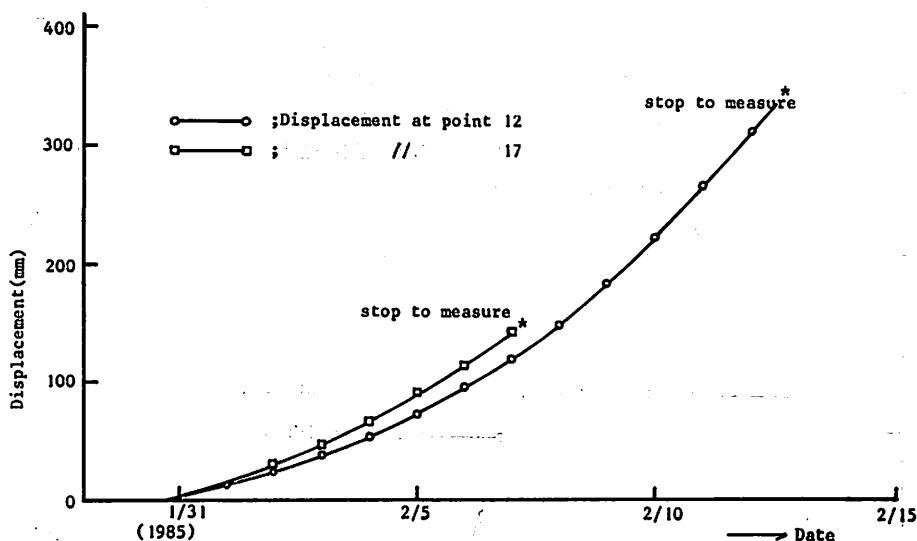


図 11 不整場所における変位—時間曲線

ある場合、雪の高い断熱性により、 T_{in} は T_{out} にほとんど関係なく、ほぼ -2°C の一定値を保っている。

図 10 は 2 月 5 日、10 日、15 日に於けるドーム対角線上、即ち、測定点 No. (3, 15, 7, 0, 5, 13, 1) と (2, 14, 6, 0, 8, 16, 4) の変位を示したもので、変位モードは逆対称モードを若干含みながらも、波数 3 の対称モードが卓越しており、施工良好な既往の 10 m モデルの波数が 1 であったことから (Kokawa 1985)、今回の実験に於ける波数 3 の変位モード発生原因は前述した不整の影響によるものと思われる。大局的には、変位は 2 月 10 日迄時間に関してほぼ直線的に増加し、その後雪荷重の増加及びシェルの幾何学的非線形性によって徐々に加速の傾向が見られる。

今回の実験の様に、シェルに大きな幾何学的不整がある場合、不整箇所では曲げモーメントがシェルの特長である膜応力を凌駕し、力学的に不利な曲げ応力伝達システムとなり、シェルの力学的性能は大幅に低下する。事実、図 2 の中の図において、亀裂幅は漸増し、変形は図 11 に示される様に、測定開始から加速的増加傾向が見られる。

完成から崩壊迄約 1 ヶ月と、10 m モデルの実験結果 (Kokawa 1985) からすると、構造寿命は予想外に短く不満足な結果に終わったが、一方で崩壊前における大変形を目視し、既往の実験と同様アイスシェルは極めて靱性に富む構造物であることが確認できた。

5. まとめ

1985 年 1~2 月、旭川市内の石狩川河川敷において、底

面直径 20 m、頂点高さ 5 m の実大アイスドーム試作及びクリープ実験を行った。建設は ① 雪氷基礎リングの施工、② 2 方向押えロープと 2 重円形平面膜からなる型枠空気膜構造の設置、③ 空気送風による膜の膨脹、④ 膜面への散雪散水作業、⑤ 空気を抜き、膜の収縮、⑥ 膜及びロープの除去、の順序によった。④ において除雪機による 1 回あたりの膜面への散雪量が過多であった為、完成したドームは場所によって材料的及び幾何学的不整が見られた。引き続き、積雪荷重と自重のもとでクリープ実験を行ったところ、崩壊迄 1 ヶ月と極めて短く、不整によってアイスドームの構造性能が著しく大幅に低下することが認められた。不整の原因となった散雪技術の改良は今後の課題であるが、今回の実験から、基本的に、本方法によって比較的大規模なアイスシェルを早く、簡単に且つ安く建設できることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の遂行に際し、北海道東海大学北方生活研究所及び東海大学総合研究所機構の研究費を使用した。ここに厚く御礼申し上げます。

実験の遂行に際し、北海道東海大学建築学科学生、新谷建設(株)会社及び旭川市役所公園緑地課の諸氏から絶大な協力を得た。深く感謝の意を表します。

参考文献

Joedicke, J., 1962: Shalenbau, Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 138-139.

- 粉川 牧・平沢 勇, 1983: 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, 北海道東海大学紀要 Vol. 3・4, 77-85.
- 粉川 牧, 1983a: 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.
- 粉川 牧, 1984: Ice Shell Structures の研究—第3報 Ice Domes の軸対称クリープ座屈解析, 北海道東海大学紀要 Vol. 5, 17-24.
- Kokawa, T., 1985: Experimental studies on ice shells

- in Asahikawa, Cold Regions Science and Technology, 11, 155-170.
- Mellor, M., 1968: Methods of building on permanent snow field, Cold Regions Sci. Eng., Monograph III-A2a.
- Stanley, R. G. and Glockner, P. G., 1975: The use of reinforced ice in constructing temporary enclosures, Marine Sci. Commun., 1 (6), 447-462.

Trial construction of 20-m span ice dome

Tsutomu KOKAWA* and Kenji MURAKAMI**

* Department of Architecture, Faculty of Art and Technology,
University of Hokkaido Tokai, Asahikawa

** Shinya Kensetsu Ltd., Asahikawa

This paper describes both the construction and creep test of a 20-m span ice dome carried out in Asahikawa during the winter of 1985.

The test dome was constructed at a riverbed as follows. 1) Inflating a membrane bag covered with ropes anchored to the snow-ice foundation circular ring. 2) Covering the membrane with thin snow-ice sherbet by blowing the milled snow with a rotary snowplow and spraying water pumped up from the Ishikari river. 3) Allowing the snow-ice sherbet to be solidified by cooling by cold outside air. 4) Repeating 2) and 3) up to the desired shell thickness. 5) Removing the bag and ropes for reuse.

Because too much milled snow was blown onto the membrane during one blowing operation, geometrical and material imperfections of the constructed dome were observed in some places. Blowing snow in thin layers is not so difficult, and the technique could be improved gradually with experience.

After construction, a creep test was carried out under dead and snow load, and its structural behaviour up to the collapse was examined. In spite of the above-mentioned imperfections, it was very ductile and took about one month to collapse.

On the basis of the results of this test, if blowing by a snowplow is done carefully, it is concluded that the proposed construction technique satisfies the requirement for rapid, easy and economical construction of a large ice shell, and the production of 20-m span ice domes could be practicable in principle.

(1985年10月13日受付, 1986年3月31日改稿受理)

Kokoro, T.: 1985: Experimental studies on ice shells
大学要覧 Vol. 5, 17-24.
Ice Dome の構造と氷マウンテン群, 北海道東海
道庁 誌, 1981: Ice Shell Structures の研究—第3報
—第30図版用い学術情報部編委論文複製, 151-152.
図版 2: 1988a: マクニームの氷マウンテン群の構造,
北海道東海大学紀要 Vol. 3, 4, 77-87.
—第1図 図版部内にある Ice Dome の分布
図版 2: 平野 司, 1983: Ice Shell Structures の研究

Shinzo Kawachi Ltd., Asahikawa
University of Hokkaido, Faculty of Art and Technology
Tsunomi Koriya, and Kazji Mierata.

(1982年10月13日受审, 1982年10月18日判刑)