

雪国の21世紀を考える

「SUPERかまくら」建設構想

大林組プロジェクトチーム

協力・樋口敬二



雪は天からの便りである……。

わが国における雪氷研究の第一人者であった中谷宇吉郎博士の残したこの言葉は、雪国の未来を考える上で啓示に満ちている。雪は、天から贈られた無言のメッセージであり、そこにどんな意味を見いだすかは、われわれ人間の想像力にかかっているからである。雪国では長い間、耐雪、克雪といった受け身の姿勢で雪と接してきた。しかし最近、利雪、活雪への関心が高まり、雪と上手につき合おうとする姿勢が芽生え始めている。そこで今回、大林組プロジェクトチームは、樋口敬二氏を所長とする名古屋大学水圏科学研究所の協力を仰ぎつつ、雪そのものの工学的利用という前人未到の分野へのアプローチを試みた。

一、利雪文明と雪国の新時代

北海道から、東北、北陸、中部、山陰にかけての諸地域は、世界でも有数の積雪地帯である。その面積は、わが国全体のおよそ半分を占めている。しかも、降雪量が多いばかりでなく、そこには万単位の人口を擁する都市が数多くある。人口三万人以上の都市で、特別豪雪地帯に指定されたものが三〇都市もあるのを見ても、いかに多くの人々が雪の中で生活を営んでいるかが分かるであろう。

雪国に暮らす人々は、雪は生活の妨げであり、うとましいものと感じてきた。天文年間に『北越雪譜』によって雪国の生活を活写した鈴木牧之も、雪を賞てながら酒を飲み雪景色を楽しむような遊びの感覚は、「雪の浅き国の楽しみなり」と断定した。さらに「我越後のごとく年毎に幾大の雪を視ば、何の楽しき事あらん」とも書いている。こうした思いは、程度の差こそあれ、雪国に共通のものであった。

とりわけ近年、産業発展の基軸をなす交通機関の重要性が高まるにつれ、雪のマイナス要因は増大した。ひとたび大雪が降れば、道路、鉄道、そして海運さえもその影響を受け、経済活動はマヒ状態に陥る。都市機能は停滞し、人々の日常生活はきわめて不便なものとなる。そのため、「雪が無ければ……」という切実な願いに込めて、除雪、排雪をいかに行うかが、積雪地帯の緊急のテーマとなってきた。現在、積雪地帯の諸都市で、ひと冬の除排雪に要する費用は莫大なものである。例えば新潟県の長岡市では、平年で四億五億円、雪が多い年には七億円を超える費用が投入される。また、青森市では、冬期に市内の雪の一斉除雪を行っているが、その費用はわずか五日間で七億円にも達する。これほどの巨額が、ただ雪を排除するために投じられているのである。

しかし、そんな雪国に、いま大きな変化が見え始めている。樋口敬二氏もいわれるように、雪との闘いから共存へと、発想の転換が行われている。かつて雪国では、

除雪、排雪、あるいは耐雪、克雪といったテーマが盛んに論じられた。それは現在でも重要なテーマではあるが、

加えて、利雪、活雪、さらには和雪、親雪といった、より積極的に多彩な雪とのつき合い方が提案されている。そのための研究も、各分野で盛んである。例えば、水資源としての雪ダム、エネルギー源としての温度差発電、冷熱による食品の貯蔵や夏の冷房システムの開発など、利雪の研究とその実現化が急速に進んでいる。

雪に対するこうした能動的な姿勢を、仮に「利雪」という言葉に代表させるならば、雪国はその未来を、利雪文明への可能性の中に見いだそうとしているのである。

二、利雪時代への工学的アプローチ

そこで今回、プロジェクトチームは、利雪時代を迎えようとしている雪国において、工学的な立場からのアプローチを試みることにした。

われわれはまず、積雪地帯の二五都市に対して「雪に関するアンケート調査」を実施した。雪国の都市が、雪をどう捉え、どのようにつき合っているか、雪国としての雪のか、その生の声を知りたいと思ったからである。回答をいただいた八九通の中身は、実にさまざまであったが、共通していることは雪に二つのイメージがあることであった。一つは、「美しい、銀世界、雪祭り」といった心情的な楽しさであり、もう一つは、「寒い、交通難、雪おろし」などの生活面での困難さである。

また、現在考えられている利雪の方法としては、すでに述べた水資源、エネルギー源、貯蔵などのほか、スキー場の開設、観光資源としての活用、雪中農業の開発、雪の研究施設の設置など多岐にわたり、どの都市も利雪への期待は大きなものであった。

これらのアンケート結果と、各地の研究機関で進められている利雪テーマなども参考としながら検討を行ったが、そこで一つのことに気付いた。利雪研究の多くは、どちらかといえば理学的な利用が中心であり、純粹に雪を工学的に利用したものが意外に少ないことである。雪

の工学的利用といえば、南極の越冬基地の一部や、札幌に代表される雪祭りの雪像などが知られているが、本格的な建設材料として考えられたことは、世界でもあまり例がない。

だが、『北越雪譜』の中には、「雪中演場」として雪を固めて芝居の舞台を作る図が紹介されている。今回のアンケート調査でも、一部の都市では雪を舞台とした演劇フェスティバルの企画が提案されていたが、その前例がすでに江戸時代にもあったことになる。また、これは工学的利用とはいえないが、大正から昭和にかけての富山や新潟では一〇〇坪もの雪山や雪鳩が氷の切り出し用に造られた。これらのわずかな例に、雪に対する先人たちのチャレンジ精神をかいまみることができよう。

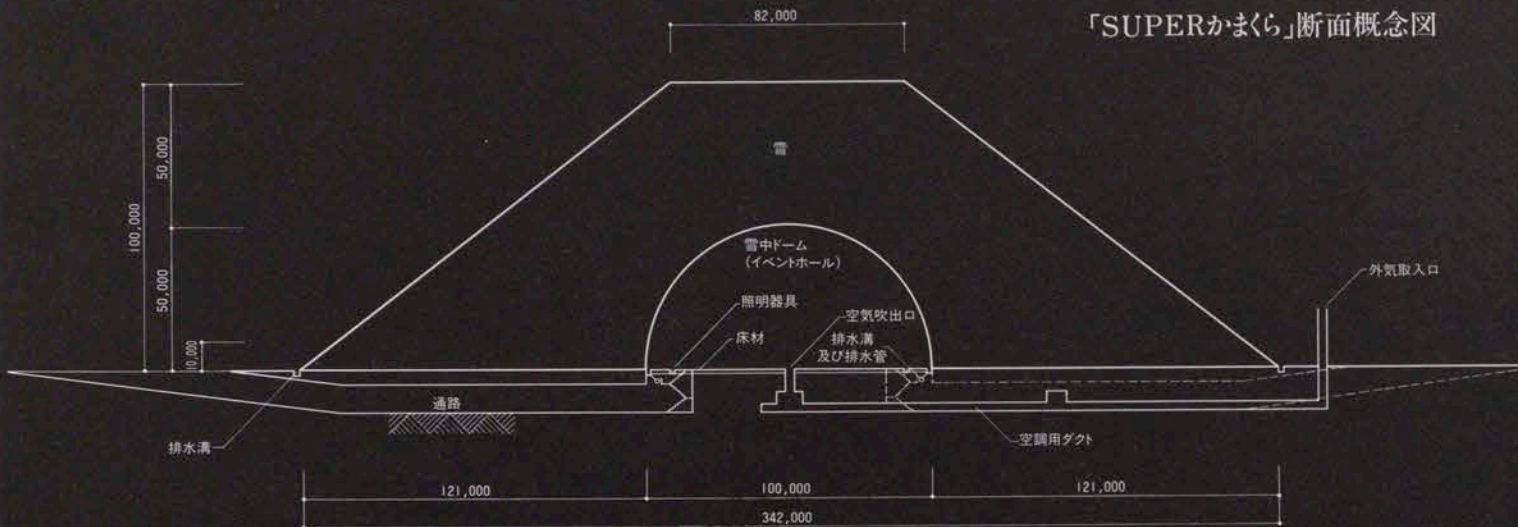
こうして雪国の都市の声と、歴史性、さらに工学的見地からの検討を加えた結果、われわれが思い至ったのは、雪そのものを素材とした巨大なドームの建設であった。その身近な例として、横手市などの祭りに作られる「かまくら」がある。子どもたちが火鉢を持ち込み、餅を焼いたり、歌をうたい、閉ざされた冬の日を楽しみ過ぎず、あの「かまくら」を二世紀にふさわしいスケールと内容で実現できたら……と考えたのである。

アンケート調査でも、冬期にイベントや運動を行うことができる施設を望む声は多い。そこで、そうした施設としての機能性と雪祭りの楽しさを同時に満たせるような雪の巨大建築に挑戦することにした。

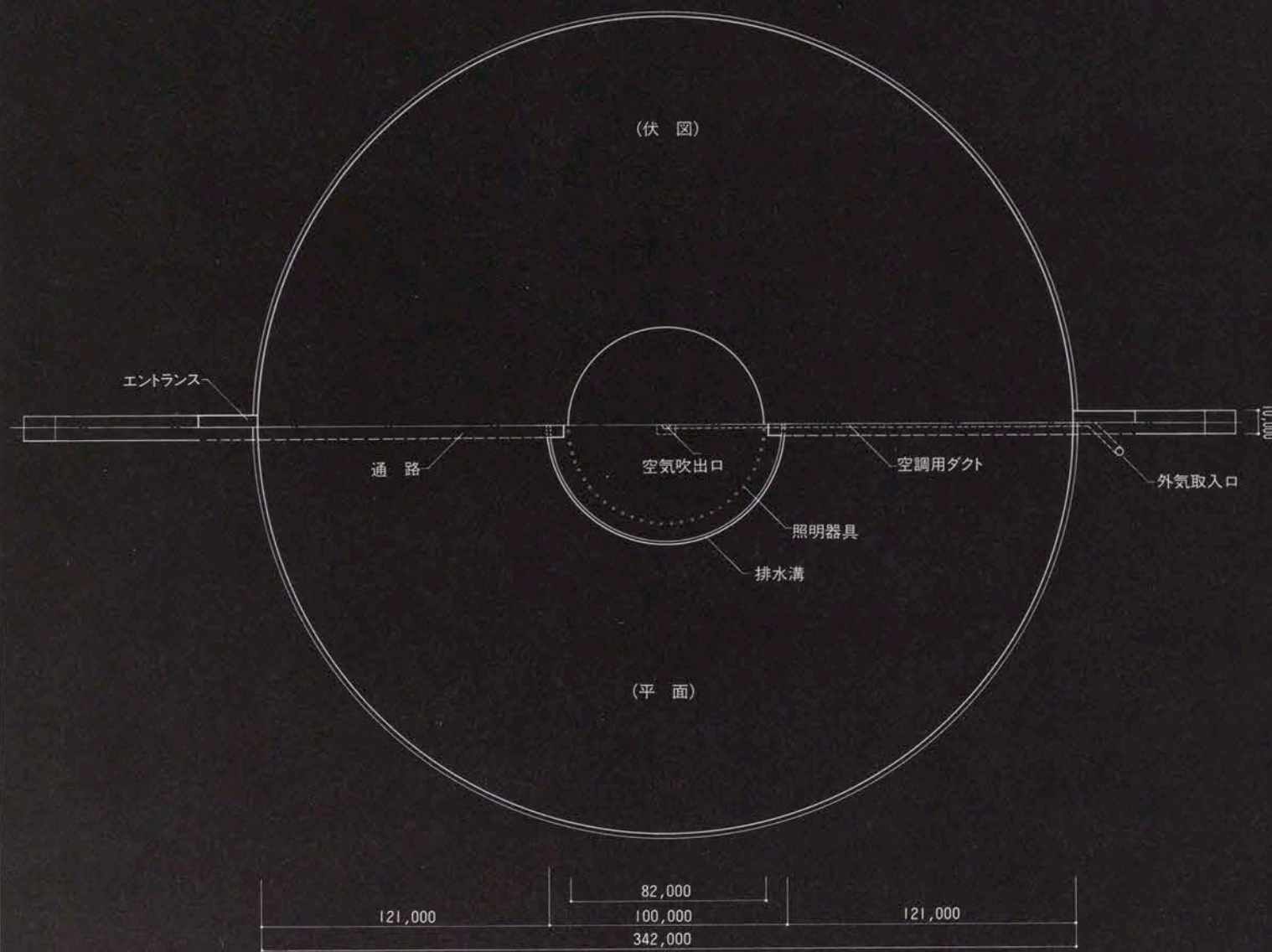
三、「SUPERかまくら」の概要

今回、われわれが建設する「SUPERかまくら」は、円錐台型の外観を持つ巨大な雪の山と、その中央部にある半球形型の多目的空間（雪中ドーム）から成っている。雪の山は、可能な限り雪以外の材料は使用せずに建設する。また、その中央部に掘削する雪中ドームについても、支持材、補強材などは使用せず、雪そのものによって空間を保持することを前提とした。建設材料としての雪に、どれほどの強度や粘性があるのか、その実験的な意味も

「SUPERかまくら」断面概念図



平面・伏図概念図



こめての挑戦である。

建設に当たり、まず中央部の雪中ドームの規模を直径一〇〇m、高さ五〇mの半球型と設定した。雪中ドームの底面積は七、八五〇平方mになり、これだけの広さがあれば、例えばスノー・フェスティバルのパビリオンやテニス、野球などのスポーツ会場、あるいはコンサート・ホールなど多彩な目的に利用できるからである。また、ドームの形状については、本来はトンネル型（逆タマゴ型）が安定性からは優れているが、ここでは利用形態を考慮して半球形とした。

次に「SUPERかまくら」全体の規模については、雪中ドームの掘削後に生じるはずの雪の変形を考慮し、全体がもっとも安定するための雪の被り量をコンピューターによって計算して決定した。その仮定条件と計算は次章に述べるが、計算の結果「SUPERかまくら」全体の規模は、底辺の直径三四二m、上辺の直径八二二m、高さ一〇〇mとした。その形状は、円錐台型としたが、これはピラミッド型や三角錐型などと比較し、計算のしやすい断面形状が得られること、さらには外壁が溶けてもその変化が目立ちにくいという利点がある。

なお、これによって「SUPERかまくら」一基の建設に必要な雪の全体量は、三九七立方mとなる。そのすべてを、本来は捨てられてしまう雪によってまかなうものとした。これは十割トラックで約四〇万台分に相当する。

一方、規模の設定と同時に、「SUPERかまくら」の設置場所についても検討を行った。ひとくちに雪国といっても、地域によって雪の性質や積雪量にかなりの違いがある。建設に必要な条件としては、

- 建設材料に適した雪が大量に得られること
 - 施設の使用形態から、都市部に近いこと
 - 集雪のための運搬条件が整い、かつ底面積が約九万平方mの建造物を容易に建設できる広い場所があること
- などが挙げられる。これらを考慮して、今回は新潟県長岡市の信濃川の河原を設置場所に想定した。

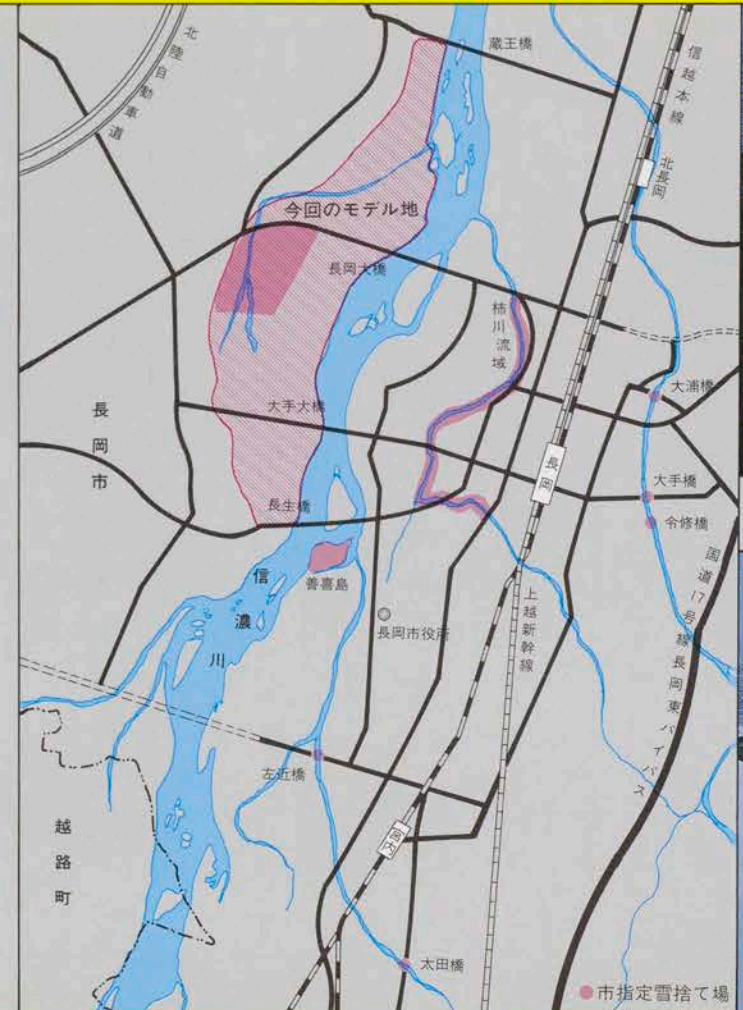
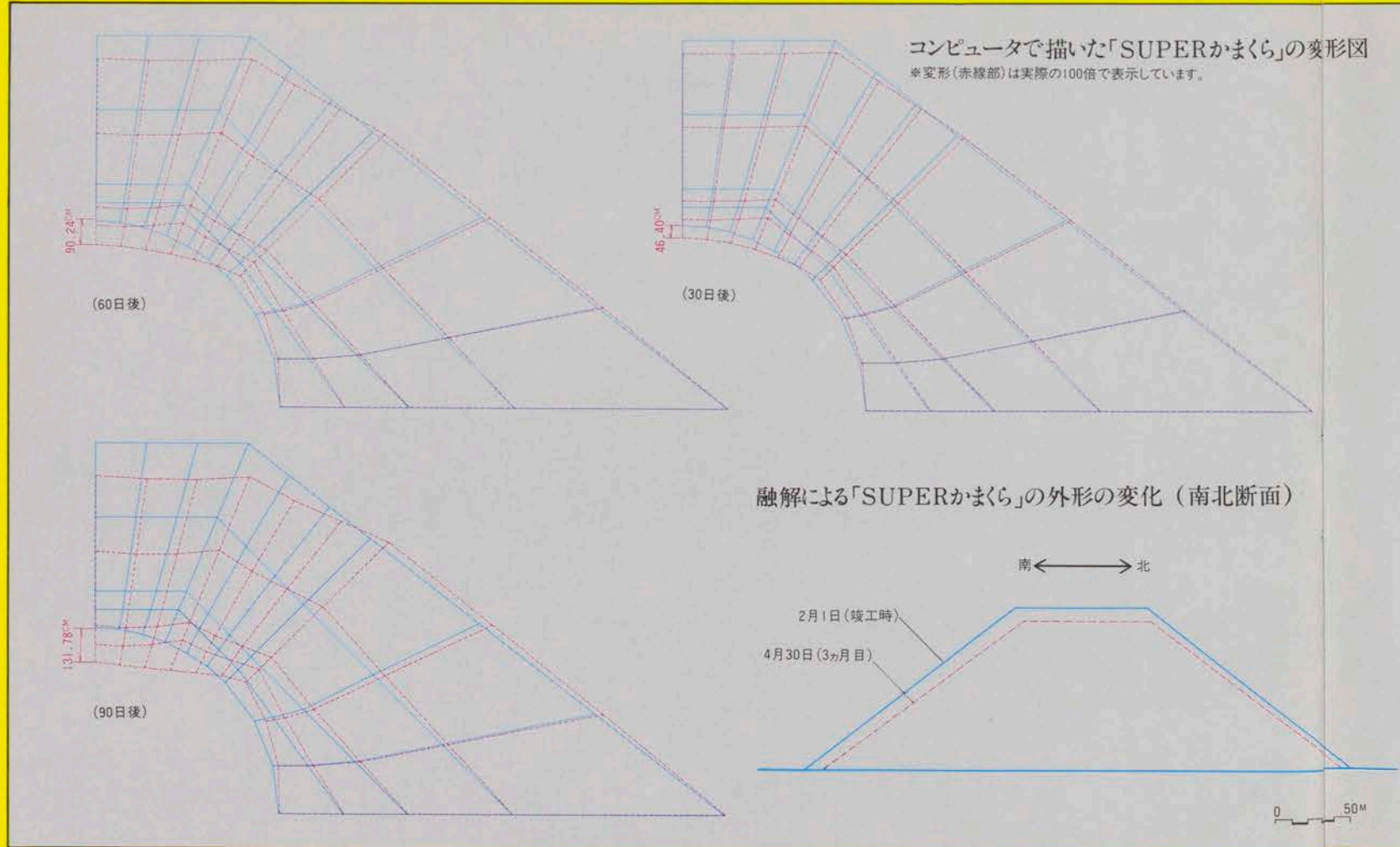
長岡市は、周知のようにわが国の代表的な豪雪地帯に位置する人口一八万人の都市である。例年十二月から四月にかけての五カ月間が降雪期間であり、年間累積積雪量は多い年で二〇mにも達する。市内には五カ所の雪捨て場があるが、そのひとつ信濃川河畔の長岡大橋付近には三万平方mを超える市用地と、全体で二五万平方mもの河原があり、雪の巨大建造物を想定するにはもつともふさわしい場所といえる。市が冬期に排除する雪の総量は明確ではないが、昭和五九年度を例にとると、幅員六mの道路を確保するための機械による除排雪の総延長は六七・一kmに及ぶ。そこから仮にわずか一割ずつの雪を得たとしても、約四〇〇万立方mの雪を確保することができるといえる。あるいは、人口約二八万人の青森市において実施される一斉除排雪の総量が、わずか五日間で一四〇万m³にも及ぶことから類推しても、「SUPERかまくら」の建設には十分な雪の量が得られるものと判断した。

四、建設の仮定条件と数値計算

「SUPERかまくら」の建設に当たり、もっとも重要な点は、雪がはたして建設材料に適しているか否かの検討である。横手市などで作られる本来のかまくらは、数人の子どもたちが入れる小さな規模のものであり、使用期間も一〜二日しかない。それと比較すると、「SUPERかまくら」はきわめて巨大な構造物である。使用期間についても、スノー・フェスティバルの開催などを前提とし、一月〜四月の三カ月間とした。

従ってここでは、完成後の三カ月間（九〇日間）で、全体がどれほど力学的に変形し、また熱による融解を生じるかについての算定を行った。計算の方法と、必要なデータに関しては、名古屋大学水圏科学研究所の大畑哲夫助手、ならびに長岡市にある科学技術庁国立防災科学技術センター雪害実験研究所の納口恭明氏にご協力いただき、コンピュータで繰り返し試算しながら、もっとも安定する数値を求めた。

①変形、および融解による全体の質量損失を算定した。



長岡市・台町公園(上:1985年11月/下:1986年2月撮影)



「SUPERかまくら」建設モデル地(長岡市)

その際、各変数の数値を次のように仮定した。

◆雪の密度

表層付近……〇・六g/cm³
最深部分……〇・七g/cm³

この密度は、雪がかなり締まった状態を示している。雪は圧密して固めると密度が増すので、機械による圧密も検討したが、ここでは雪そのものの重量による自然圧密とした。また、雪の密度は、期間中変化しないものとした。

◆融解量計算に必要な気象条件については、長岡市の気候値(一月～四月)を用いた。

②変形に関する数値計算は、次の式に従った。

◆雪の応力と歪みとの関係式

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

(σ …応力、 E …弾性定数、 ϵ …歪み)

◆雪の構造物全体での力と変形との関係式は、右式を積分すると次のようになる。

$$P = K \cdot U \quad (U: \text{ツツツの法則})$$

(P …雪構造物全体の重量、 K …雪構造物全体のバネ、 U …雪構造物全体の変形)

◆また、歪みは次のような和で表される。

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$

(ϵ_1 …全体の歪み、 ϵ_2 …弾性歪み、 ϵ_3 …クリープ歪み、 ϵ_4 …粘性歪み)、 ϵ_3 はミーゼスの降伏条件に従うものとし、引張りに対する抵抗はほとんどないものとした。

◆クリープ歪みについては、次の式で表すこととする。

$$\epsilon_c = a_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t^{m_1}$$

(a_1 、 a_2 …係数、 t …時間)ここで、雪はニュートン粘性体であるとき、 $a_1 = 1$ 、 $a_2 = 1$ とした。また a_1 としては、

$$a_1 = \frac{1}{900 \exp(25.3 \rho_s - 0.445)}$$

単位は(g・min・cm⁻³)⁻¹

を用いた(ρ_s …雪の密度)。

◆弾性定数については、

$$E = 124 \exp(25.3 \rho_s - 0.445) \quad \text{単位は} g \cdot cm^{-2}$$

また外壁の融解量は、計算の結果、三カ月間で頂上部の北向斜面で四・〇m、南向斜面で七・〇mであった。

このため、ドーム上の厚さとして、前に述べた五〇m程度をとっておけば問題がないことも分かった。ドーム内壁の融解量は、三カ月で、〇・一五mにしか過ぎない。実際には、夜間の発生熱量が極めて少なくなるので、これよりさらに小さい値となる。

このことから、計算上では「SUPERかまくら」の建設と維持は可能であると判断した。ただし、わが国における雪の研究はかなり進んでいるが、今回のような巨大構造物を建設する際の雪に関するデータは、まだ未知数のものも少なくない。従って本来は、補強材の使用などにより、より堅固な構造物とすることも考慮されるべきであらう。しかし、ここでは、現在集めうるデータに基づき強度や密度を設定し、雪だけを建設材料とした構造物の可能性を追求した。

五、施工の方法と順序

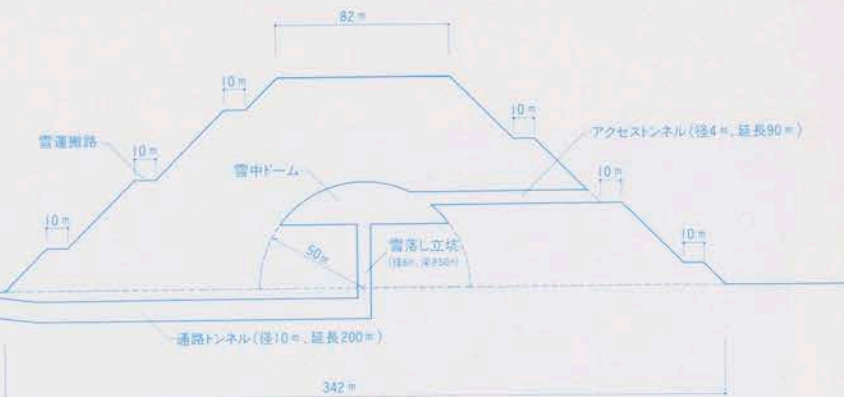
「SUPERかまくら」の施工は、雪積みと掘削に大別される。その作業は、次のような方法と順序で実施する。

①雪積み作業

建設に使用する雪は、本来は市内各所から集めることになるが、ここでは平均二・〇m離れた地点で採取、運搬するものと想定した。雪の採取、積込みはローディングショベル(八立方m積み)一三台で行う。運搬はできるだけ敏速に行うため、五十m積みダンプロックを採用したが、実際には冬期の道路事情などを考慮する必要がある。

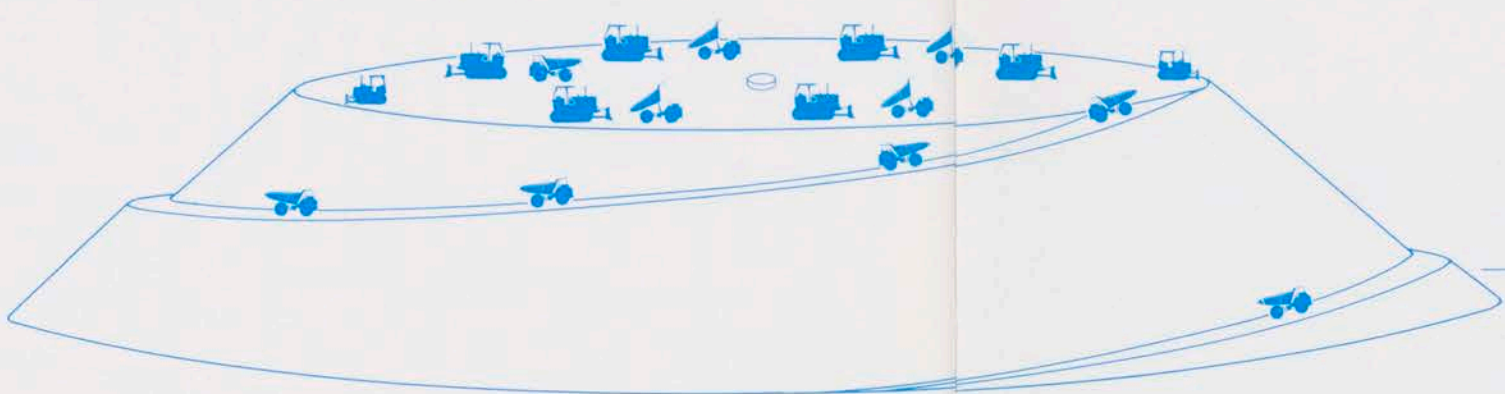
雪積みの方法としては、建設中の雪山の外壁に沿って螺旋状の道路(幅一〇m、勾配一〇%)を常に設置し、雪山の天端部まで雪を運搬する(図参照)。運搬した雪は、六十m級のブルドーザ八台により、一層約六〇cmの厚さに敷き均していく。この時、前章の算定の段階では自然圧密としたが、実際にはブルドーザの重さを利用して

「SUPERかまくら」施工図



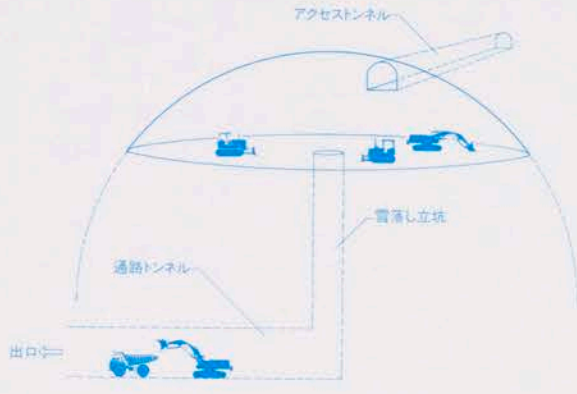
「SUPERかまくら」雪積み施工図

—高さ50m積み上がった時点



雪中ドーム掘削施工図

—20m掘り下がった時点



また、ポアソン比は、

$$\nu = 0.27$$

を採用した。実際の計算では有限要素法を用いた。

③構造物の外壁、および内壁(雪中ドームの壁)では雪の融解が生じる。それによる形状の変化は、融解量を見積もることにより求めた。

◆外壁は、傾斜した平面での熱収支を計算し、融解量を見積もる。融解に使用される全体の熱量 Q_w は、次のようになる。

$$Q_w = Q_{sw} + Q_{lw} + Q_s + Q_l$$

(Q_w …表面の融解に使用される熱量、 Q_{sw} …日射による熱供給量、 Q_{lw} …長波放射による熱損失量、 Q_s …大気から雪面への熱供給量、 Q_l …大気から雪面への水蒸気の凝結による熱供給量)

この時、北向と南向の斜面での日射量の違い、高度による風速の変化、気象要素の時間的変化などを考慮した。これらの計算から、外壁の融解量 d は次のような式となる。

$$d = \frac{Q_w}{F \cdot \rho_s}$$

(F …融解熱、 ρ_s …雪の密度)

◆ドームの壁における融解量の計算は、照明、人体、換気による発生熱量 Q_d を求め、それらがすべてドーム内の融解に使用されたと考える。すると、その融解量 d は、

$$d = \frac{Q_d}{S \cdot F \cdot \rho_s}$$

となる(S …ドーム壁の面積、 Q_d は、 $10^4 \cdot \frac{Q_{\text{照明}}}{h}$ 程度であると見積られる)。

④算定結果

雪中ドーム頂部(天井部)における沈下変形について、次のような結果を得た。

二〇日後……四六・四〇cm

六〇日後……九〇・二四cm

九〇日後……一二一・七八cm

つまり、完成後三カ月目でも、天井厚(五〇cm)に対する変形率は二・六三%に過ぎない。

圧密し、雪を締め固め、均質な密度の層を積み上げていく。

また、螺旋状の運搬用道路は、最終的には周囲を三周して頂上部に達するので、竣工後はスキー、スライド(滑走)などの遊びに使用することもできるが、今回は円錐台型に整形することとした。

一方、雪積み作業の際、中央部には底辺から五〇mの高さまで、直径六mの立坑空間を同時に確保しておく。これは、雪中ドームの掘削時に雪落とし立坑として利用するもので、スチール製ライナープレートで組んだパイプを埋め込み、雪が入らないようにした。

以上の雪積み作業は、一日二〇時間(二交代制)で行い、一五日間を要する。一日の運搬雪量は約二五万立方mとなり、これは比較的大型のダム工事における一カ月の運搬土量に相当する。

なお、外壁法面については十二m級ブルドーザ四台で整形し、さらに雪中ドームの仕上がり面にはあらかじめフェルト材を挿入しておき、掘削作業が容易になるようにした。

②アクセストンネルの掘削

雪中ドーム掘削に当たり、まず機械や作業員用のアクセストンネルを地上五〇mの位置に掘削する。これは、前述した螺旋状の運搬用道路から、雪落とし立坑の天端部へ通じる水平トンネルである(図参照)。その規模は直径四m、長さ一〇mであり、ホイールローダ(三立方m積み)により二日間で掘削、運搬を行う。

③通路トンネルの掘削

雪中ドームの掘削工事により、雪落とし立坑内には掘削した雪が大量に溜まることになる。これを排除するための道路として、雪中ドーム掘削に先立ち、外壁地上部から雪落とし立坑地上部まで長さ約二〇〇mの水平トンネルを掘削しておく(図参照)。掘削はローディングショベル(六立方m積み)、搬出はダンプロック(五十m積み)で行い、工事は二日間で完了する。

このトンネルは、「SUPERかまくら」完成時には、外壁地上部のエントランスと雪中ドームとを結ぶ入場者

用の通路トンネルとなるものである。そのため、あらかじめ幅一〇〇m、高さ一〇〇mのスケールを確保した。

④雪中ドームの掘削

「SUPERかまくら」の中央部に位置する大空間である雪中ドームは、アクセストンネルより機械を搬入し、雪面を切り上げながら、四五級ブルドーザー四台で掘削を行う。掘削した雪は、雪落し用立坑を通して地上部に落下させ、ローディングショベルおよびダンプロックによって通路トンネルから外部へ搬出する。この作業を繰り返しながら、徐々に上から下へと雪中ドームを掘削していく。掘削後の雪面の仕上げは、三ノ積みバックホウ二台で行う。

これらの作業に要する日数は一七日間であり、掘削す

項目	総日数	12月					
		25-31	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25
ドーム雪積み	15						
アクセストンネル掘削	2						
通路トンネル掘削	2						
雪中ドーム掘削	17						
ダクトトンネル掘削	4						
雪中ドーム、通路設備仕上げ	4						

作業は交代制で1日20時間、休日はなしとする。

工程表

機械名	規格・仕様	必要台数	延べ日数	作業場所
ブルドーザー	60tonクラス	8台	120台・日	ドーム雪積み
ブルドーザー	45tonクラス	4	68	雪中ドーム掘削
ブルドーザー	12tonクラス	4	60	ドーム雪積み
ローディングショベル	8m ³ 積み	13	195	ドーム雪積み
ローディングショベル	6m ³ 積み	1	21	通路トンネル、ダクトトンネル掘削
バックホウ	3m ³ 積み	4	48	雪中ドーム掘削、ドーム雪積み
ホイールローダ	3m ³ 積み	1	2	アクセストンネル掘削
ダンプロック	50ton積み	78	1,723	ドーム雪積み、雪中ドーム掘削、通路トンネル、ダクトトンネル掘削
合計		113	2,237	

機械使用計画

る全雪量は二六万二、〇〇〇立方メートルにものぼる。これは超高層ビルに相当する体積である。

なお、雪中ドーム掘削には、ここに示したような雪山を築いてから掘削する方法のほかに、雪を積み上げる際に支保工材であらかじめ空間部を造っておき、その上に雪を積む方法や、積み上げる時に熱供給源を埋め込み、雪の溶解により空間を造る方法なども考えられる。今回は、雪国の伝統的な「かまくら」の造り方を踏まえて、前記の方法を採用した。

⑤ダクトトンネルの掘削

設備の章で示すとおり、雪中ドームの中央部には換気用ダクトを設置する。そのためのダクトトンネルは、断面、施工法ともにアクセストンネルと同規模（幅四m、高さ四m）とした。また、完成後は通路としても使用する。

以上の雪積みと掘削の全工事に要する作業員数は、一日当たり五八〇人とし、延べ人数は八、〇〇〇人である。

六、設備について

「SUPERかまくら」は、前述のようにスノー・フェスティバルの会場、テニスや野球のグラウンド、さらにはコンサート・ホールなど、多目的な利用が可能であることを前提とした。設備面でもそれらに対応できる内容とし、快適な内部環境を保持するために次のような設計条件を設けた。

・設計条件

- 照度は二〇〇ルクスとして、照明負荷は二五、四〇〇^{*}ワット/h
- 収容人員を五〇〇人として、人体負荷は四〇、〇〇〇^{*}ワット/h
- 取入外気量を二五立方メートル/h・人として、換気負荷は三五、〇〇〇^{*}ワット/h
- 気候条件

外気の乾球温度が摂氏二〇度、相対湿度三〇%の時、ドーム内は温度は摂氏〇・七度、湿度一〇〇%となる。

湿度が極めて高いが、低温のため不快感はほとんどない。これらを基に算定すると、ドーム内の融雪量は一、三〇〇^{*}トン/hとなる。

①換気方式

ここでは、膜フロー方式による換気を考案した。ドーム床面の中央部に直径三mのノズル型吹出口を設け、ほぼ垂直に空気を吹き上げる。ドーム頂部に達した空気は、雪面に沿って均一に下に流動し、循環を始める。この方式により、ドーム特性を生かした良好な気流分布が構成できる。また、壁面の氷溶解などの影響を与えにくく、居住域に望ましい均一な快適環境がつけられるなど、今回のような大空間には有利な換気システムである。

②照明方式

照明については、床面周囲部に透過性の良いメタルハライドランプ型照明器具（二基当たり一・二kw）を計六〇基設置し、ドーム面に向けて照射する。この方式は、従来の白熱灯と比較して発熱量が約五分の一であり、また、

ドームの雪面からの反射効果も期待され、均一な照度分布を得ることができると合理的なシステムである。

③水処理関係の設備

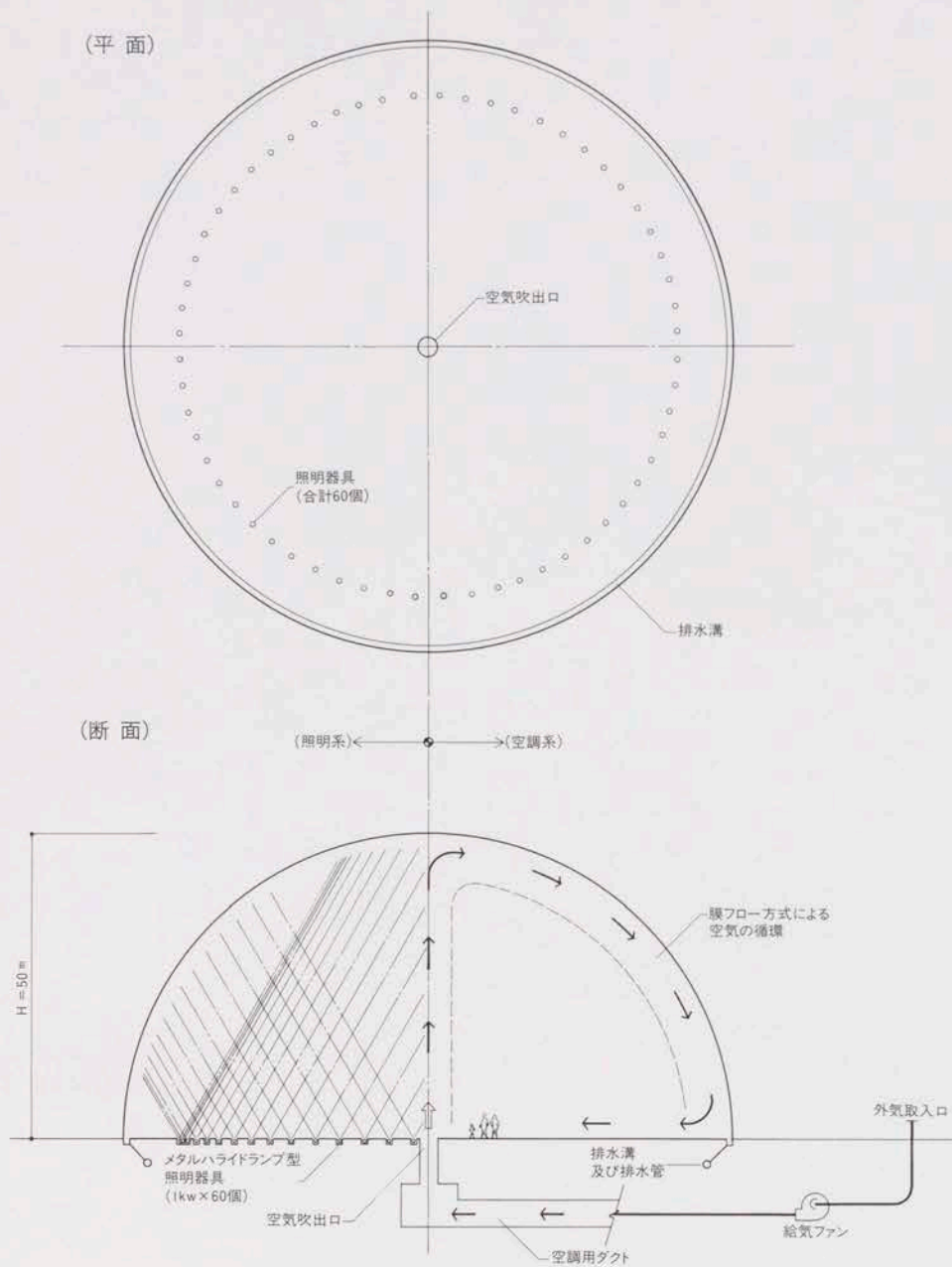
雪中ドームの雪面からは、融雪により水がたえず生じ

る。この処理については、ドームの雪面全体に傘の骨のように融雪水用リブを設け、下部に導き、床面周囲部の排水溝と地下の排水管を通して除去する方法を採った。

また、床面には舗装材として、透水性タイルを敷きつめるものとした。

なお、設備については、雪面に直接的な影響を与えないよう、すべて雪面から離して設置した。

「SUPERかまくら」設備概念図



●「SUPERかまくら」工期	38日間
●「SUPERかまくら」工費	約51億円
(内訳)	
雪積み	40億円
トンネル掘削(アクセスを含む)	3,100万円
ドーム掘削(設備、仕上げを含む)	10億8,200万円
※空調・照明などの内部整備は本体工事を含め1,5億円と見積もった。	

◆作業を終えて

雪だけを建設材料とした巨大建造物は、海外にも例がないであろう。それだけに、今回の作業では雪の建造物の構造力学に関する資料が少なく、困難をきわめた。幸い、名古屋大学水圏科学研究所の樋口敬二所長と大畑哲夫助手、科学技術庁国立防災科学技術センター雪害実験研究所の納口恭明氏らの協力により、コンピュータの試算に必要な理学的な基礎データを揃えることができた。それでも、雪の建造物が計算上でも自立すると判明するには、まだ未知の要素が多く、当初の予想よりはるかに長期間を要して

しまった。実際にこの「SUPERかまくら」を建設するならば、検討すべきことは数多く残っている。

しかし、こうした実験的な試みが、雪国の利雪時代に新しい地平を拓く可能性はあるだろう。「雪ありて縮あり」と鈴木牧之が誇った縮や上布も、やはりその昔、糸を雪に晒すという試みから生まれ、大きな産業へと発展したように……。今回の構想が、そうした未来の種子となれば幸いである。