

河氷工事 構設建人

氷河は、地球上に残るもつとも雄大な自然の一つである。三百万年の歴史を有する人類と時代を共にし、幾度も消長を繰り返しながら、トラスティックな歴史を大地に刻んできた。しかし、人類が氷河の研究に取り組みようになったのは、わずか二五年前のことではしかなない。とりわけ、わが国における「氷河学」の発足は戦後であるが、その成果は、各国の注目するところであり、将来の発展が期待されている。そうした中で、名古屋大学氷河科学研究所の樋口敬二所長は、氷河学の立場から、人工氷河構想を早くから提唱されてきた。そのロマンにあふれる壮大な基本構想を軸に、今回、大林組プロジェクトチームは、人工氷河建設へのアプローチを試みた。

大林組プロジェクトチーム | 監修・樋口敬二

人工水河想定図
画 五百沢 智也



日本の氷河地形と剣沢雪溪

日本には現在、氷河は存在しないとされている。いわゆる流動をとまらなような本格的な氷河は、また確認されていないからである。

しかし、日本アルプスや日高山脈には、典型的な氷河地形である圏谷（カール）が見られる。圏谷は、谷頭部の山腹が氷河によって浸食されてきた、お椀型の凹地である。つまり、氷河の痕跡を示す重要な地形であり、日本にもかつて氷河があったことが、それによって知られている。また、圏谷は雪が吹き溜まるために雪溪がでやすく、冬季に降った雪が夏季にも少しずつ残り、万年雪や越年氷となることも少なくない。そうした雪溪の中でもとりわけ有名なものは、北アルプスの剣沢谷頭に残る「はまぐり雪」と、北海道の大雪山にある「雪壁雪溪」である。どちらも冬季には積雪深が二十メートルを超え、時には四十メートルに及ぶ場所である。気温の上昇する夏季にも一部は融け残り、秋季には結氷して、その上にまた雪が積もる。この繰り返しによって多年氷ができてくるのである。

氷河地形である圏谷と、冬季の大量の雪によって生じる雪溪との関係は、そのまま人工氷河建設の可能性を示唆している。つまり、圏谷と雪溪の残る地点で、人工的に条件を整えてやれば、多年氷の規模を更に超えて、自然流動を始めるような本格的な氷河を生み出すこともできるであろう。

そこでプロジェクトチームは、名古屋大学水圏科学研究所の樋口敬三所長の指導のもとに、まず人工氷河を建設するに相応しい場所の検討を行った。その結果、谷頭に「はまぐり雪」があり、その少し下流にも大きな雪溪を有する北アルプスの剣沢をモデル地域として、人工氷河建設計画を立案した。この地域では、樋口所長の研究室によって雪溪、気象の観測と研究が多年にわたって行われており、数値計算の基礎資料が得られるからである。

剣沢はまた、京都大学名誉教授・今西錦司氏が若き頃に初めて雪溪調査を実施した、記念すべき場所でもある。そこで、もし実現すればヴェルムルム期以来二万年ぶりに日本に再現されることとなる今回の氷河には、特に「今西氷河」と命名させて戴いた。

人工氷河へのアプローチ

山岳部高山地帯の谷にある天然の氷河は、降雪、雪崩、風などの諸条件によって大量に溜まった雪が、圧密と凍結によって氷状となっていく、ある限界規模を超えた時点から変形し、あるいは滑りながら流動を始めるといわれている。流動といっても、全体が一個のものとして滑っていくわけではない。

人工氷河の頭頂部にあたる谷より、標高五十メートルの谷断面図を作成した。断面図の数は二十四である（掲載図は主要四点、十一～十二頁参照）。

③ 涵養域と消耗域の境界

天然の氷河では涵養域と消耗域の境界は自然に決定される。しかし人工氷河ではあらかじめ境界を仮定しておく必要がある。境界標高をいくつか変えて試算した結果、涵養域と消耗域の境界を標高千八百五十メートル地点に設定した。

④ 氷河造成年数

造成年数は、機械力をはじめとした人工的な手法を投入するほど短縮することが可能である。しかし今回は、できる限り自然に近い状態で氷河を成長させることを前提とし、完成まで十五年～二十年を要することとして計算を行った。

⑤ 冬季降水量

氷河の涵養時期である冬季（十月末～四月末）に、現状ではどれくらいの降水（降雪）量があるかは、重要なポイントである。剣沢地区積雪深度図、立山の室堂及び富山県の詳細な気象観測データを参考として、この時期の総降水量を三千ミリと仮定した。これは豪雪で有名な新潟県の高田（上越市）の年間降水量に匹敵する量であり、雪深にして六メートルとなる。また、ちなみに剣沢地区の厳冬の気温はマイナス二十度（C）を超え、ひと月の内、十五日以上が降雪日である。

⑥ 雪と氷の密度

雪及び氷に関する各種データから、雪の密度は平均値0.5g/cm³、氷の密度は平均値0.9g/cm³と仮定した。また、越年した雪はすべて氷化するものとした。

⑦ 谷に集まる雪量

剣沢に集まる雪は、自然降雪、風によって運ばれる雪のほかに、雪崩によるものがある。雪崩の発生は、「ハンドブック・オブ・スノウ」などの資料によれば、傾斜度二十五度～四十五度の場合にもっとも頻繁となる。二十五度以下では発生せず、反対に六十度以上では雪が積もらないので雪崩は存在しない。以上のことから剣沢両側の地形を検討し、自然状態では流域面積の四〇％が谷に集雪されると仮定した。

⑧ 流動を開始する臨界氷厚

人工氷河は毎年少しずつ成長を続けるが、ある時点から天然氷河と同様に流動を開始する。その時点までできる限り有効に集雪を行うため、「ザ・ファイジックス・オブ・グレイシヤーズ」などを参考として、次の式から流動開始の臨界氷厚 (h_{cr}) を算定した。

$$h_{cr} = \tau / (\rho g \sin \alpha) \times S1$$

上流部では毎年の降雪によって、絶えず新しい氷が生まれていく。また下流部では日射、気温や地形の影響を受けて、氷はかなりの速度で融けていく。つまり氷河は、内部の水を少しずつ入れ替えながら、供給と消費のバランスによって成り立っているのである。

そこで氷河は、水を供給する部分＝涵養域と、反対に融けて消えていく部分＝消耗域とに大別して、考えることができる。氷の涵養量が消耗量を上回っていれば、氷河は成長する。その逆ならば、氷河は後退していくのである。このことから、人工氷河を造るには、涵養域に設定した地域にいくに大量の雪を集めるのが、第一のポイントであることが分かる。剣沢の場合、剣御前と別山とはさまれた谷頭付近では、冬季の積雪深は優に二十メートルを超えることが観測されている。しかし、それらの雪は夏季には大半が融けてしまうのであるから、現状では不十分だということになる。

それでは、剣沢流域のどれくらい地域に、どれくらいの量の雪が溜まれば、氷河として成長していくのであろうか。われわれは、その計算をコンピュータによって行うため、まず剣沢における谷地形、造成すべき氷河のスケール、降水量、流動を開始する臨界氷厚など、十項目に及ぶ仮定条件を、入手できる限りの資料に基づいて設定した。

人工氷河の仮定条件と数値計算

剣沢の地形や気象条件などからわれわれが想定した人工氷河の本流は、完成すれば標高二千七百五十メートルの谷頭から剣沢雪溪を通り、南股へと至るもので、全長は六キロメートルである。その先の二股に標高千六百六十メートルのダム湖を造り、氷河先端は自然にその湖へと落ち込む形とした。また、人工的に造成する氷河は剣沢を本流とし、別山沢と真砂沢を支流域とする形に設定した。支流域の氷河は、本流の途中で合流する。合流地点からは、天然の氷河と同様に、氷河が削り取って運んだ石（モレーン）が鮮やかな帯状の境界線を描き出すであろう。

以上のような想定をもとに、樋口敬三所長及び大畑哲夫助手のご助言を戴き、計算にとりかかった。われわれが仮定条件に従って行った数値計算の手順は、次の通りである。

① 谷の断面形状

人工氷河を想定した剣沢の谷形状を求めするため、二万五千分の一の地形図より、標高十メートルの谷幅と谷底傾斜を読み取った。谷幅の計算は、更に細かく標高一メートル毎に比例配分して行った。

② 計算谷断面数

$$\tau \text{ (剪断力)}, \rho \text{ (密度)}, g \text{ (重力による加速)}, \alpha \text{ (谷底の傾斜} \%)$$

S1は、谷の形状から決まる形状係数。この数値は、谷の形（放物線、楕円、長方形、三角形など）と、氷幅、氷厚によって変化するが、ここではS1=0.7と仮定した。

③ ある断面における氷河の流動速度(V)と流動量(Q)の関係

これはまず地形のパラメータとして、谷底の傾斜α(%)を仮定。普通は氷河表面の傾斜であるが、ここでは計算上、谷底のものとした。

また形状係数は、

$$S1 : \tau = S1 \rho g \sin \alpha \times Z$$

$$S2 : V/Y$$

$$S3 : V/V$$

$$W = 1/2 \times Y/Z$$

τ_B (水底面での剪断力)、Z (氷厚)、Y (表面での氷河幅)、V (平均氷河幅)、V (中心部の流動速度)、V (平均流動速度)

以上の関係から、流動速度(V)と流動量(Q)との関係は、

$$Q = V \cdot V \cdot Z$$

$$= S2 Y \cdot S3 V \cdot Z$$

$$= S2 \cdot S3 \cdot Y \cdot V \cdot Z$$

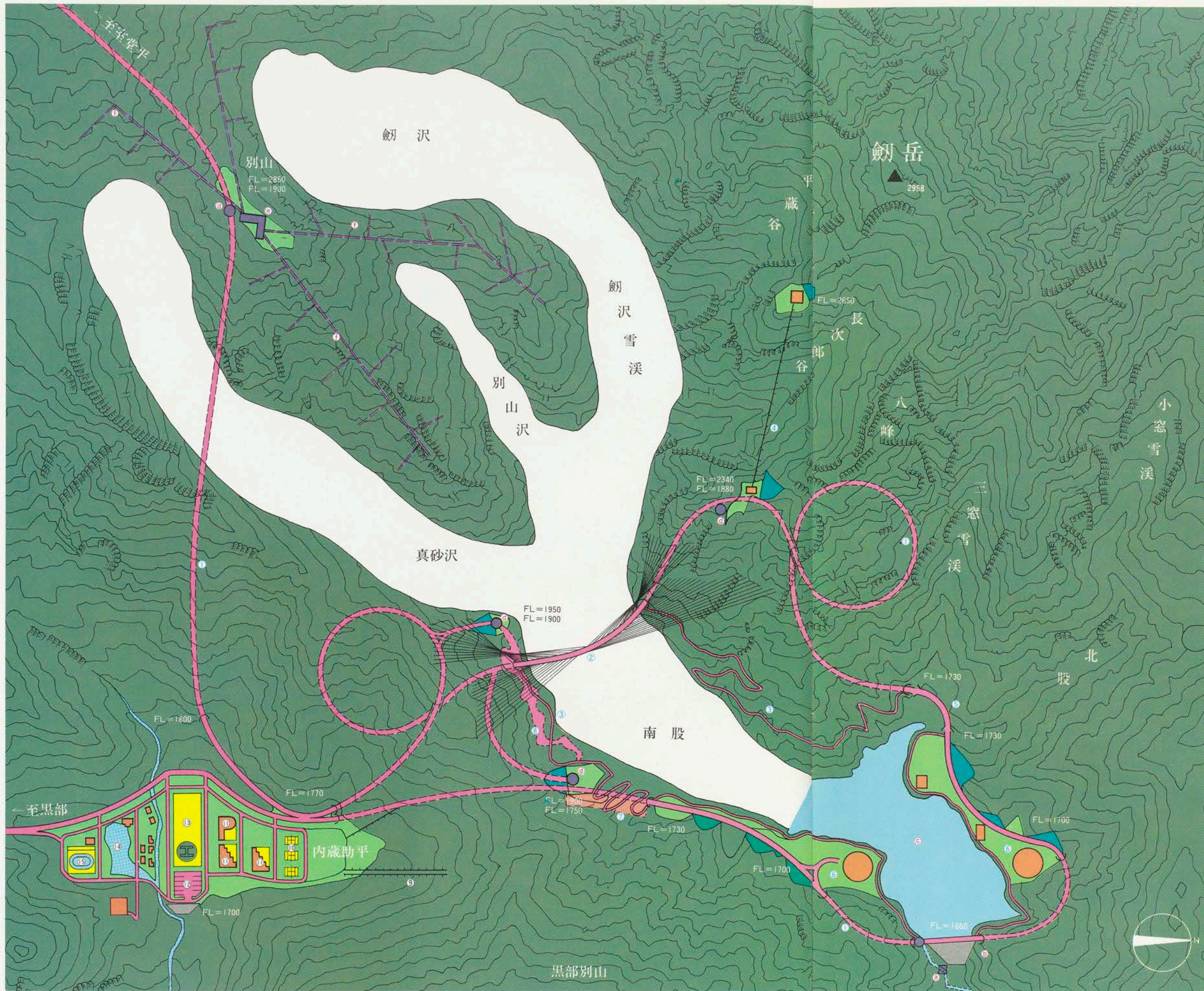
となる。そこでS2=0.67、S3=0.65と仮定し、全体の流動パラメータを検討した。

④ 夏季の融雪量

人工氷河の成長を妨げる最大の要因は、夏季の融雪である。すでに記述したように、剣沢では積雪深が二十メートルを超える地点もありながら、現状では夏季にその大半が融けてしまうのである。その融雪の過程については、森林成生、樋口敬三氏による論文「剣沢圏谷の夏季の気候と融雪過程」があり、剣沢K点（標高二千五百二十五メートル）で得られた気温と融雪量の関係から、高度別融雪量を仮定した。

なお、夏季の融雪を最小限に抑えるためには、断熱シートで氷河表面を覆う方法が有効である。シルバークャンパス地にポリエチレンの裏打ちを施したシートを使用すると、融雪量を半分近く抑えられることも判明した。

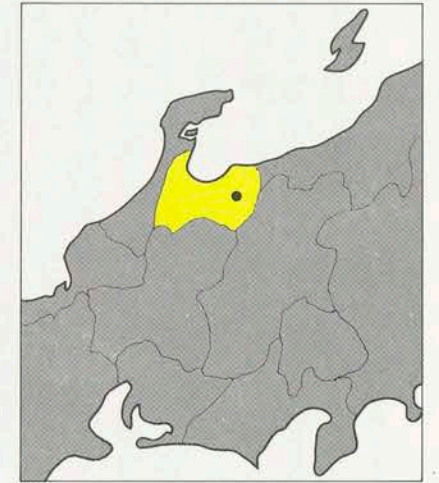
しかし、今回の人工氷河建設では、人工とはいえず、できる限り自然な成長を前提としたこと、シートで覆うと観光シーズンである夏季に氷河が見えなくなってしまうことから、計算には入れないものとした。



人工氷河配置図

- ①揚水式地下発電所
- ②重力式コンクリートダム
- ③氷河湖(ダム湖)
- ④竪坑
- ⑤観測所・揚水ポンプセンター
- ⑥散水導水トンネル

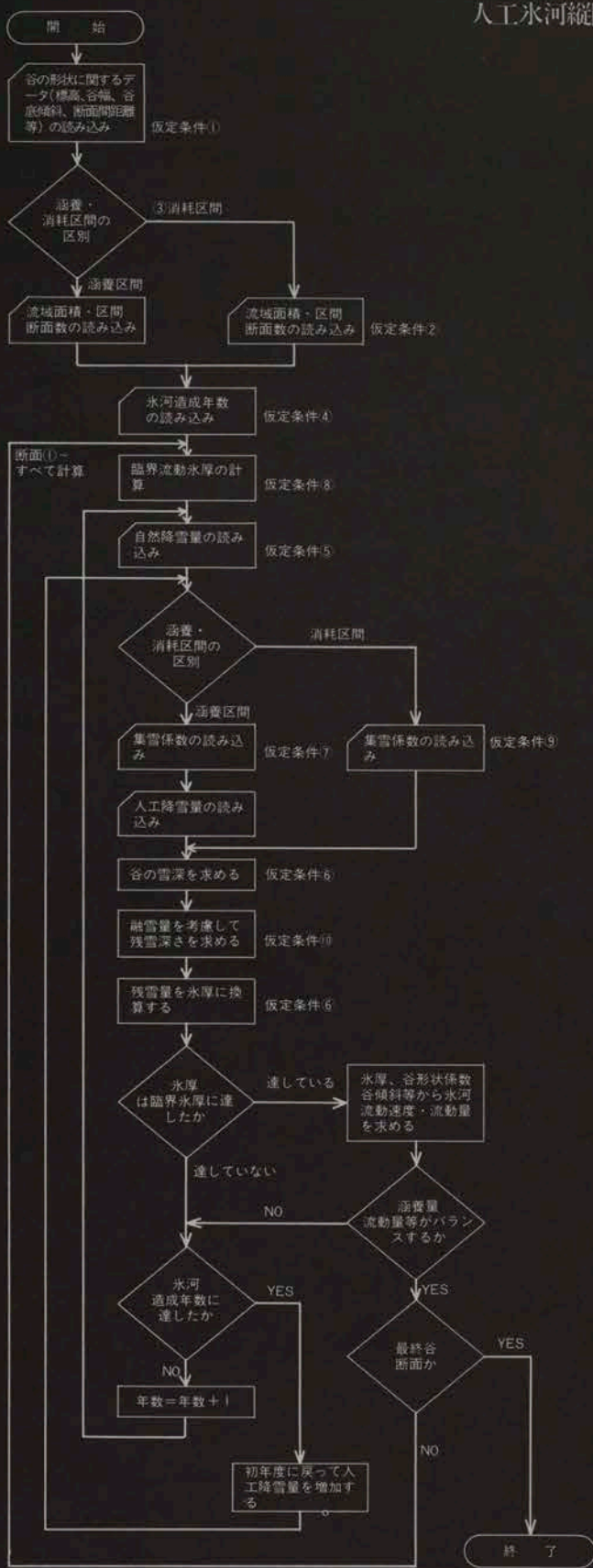
- ⑦自動車道路
- ⑧ハンギング・アーク橋
- ⑨遊歩道
- ⑩ロープウェイ
- ⑪PC橋
- ⑫動植物園研究センター
- ⑬氷河研究所・博物館
- ⑭復元ドーム
- ⑮リフト(スキー場用)
- ⑯テニスコート
- ⑰ホテル
- ⑱駐車場
- ⑲ヘリポート
- ⑳釣堀
- ㉑スケート場



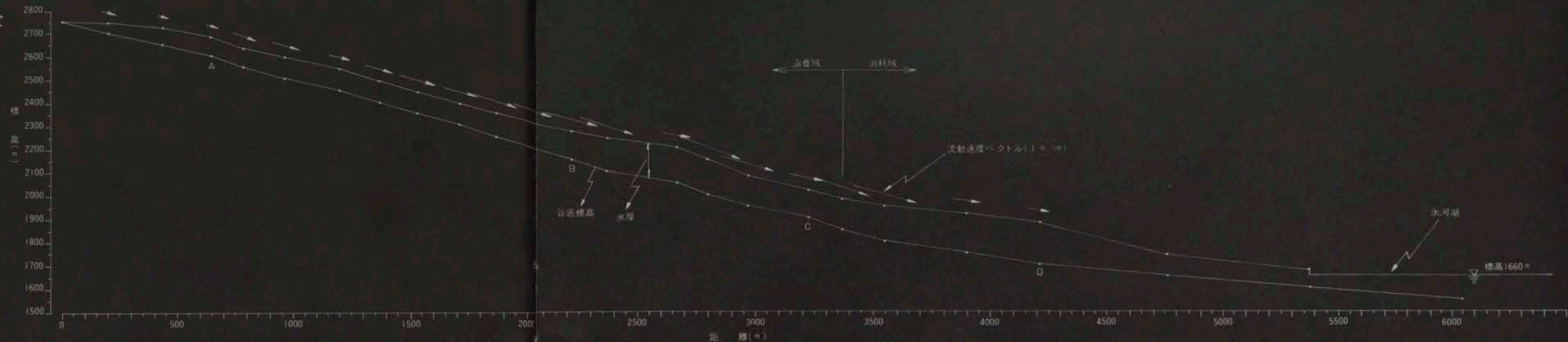
人工氷河工事工程表

工事区分	(年)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
仮設道路・建設基地		■																				
トンネル工事																						
黒四-内蔵助平																						
室室-別山																						
内蔵助平-別山																						
内蔵助平-南股																						
南股-ダム																						
内蔵助平-真砂沢																						
真砂沢-北股																						
剣沢口																						
竪坑																						
別山(上)																						
別山(下)																						
その他																						
散水サービストンネル																						
竪坑																						
横坑																						
橋梁																						
真砂沢																						
北股																						
その他																						
ダム工事																						
給水設備																						
給水																						
観光用敷地造成																						
一般道路工事																						
建築工事																						
観光開始																						

人工氷河数値計算フローチャート



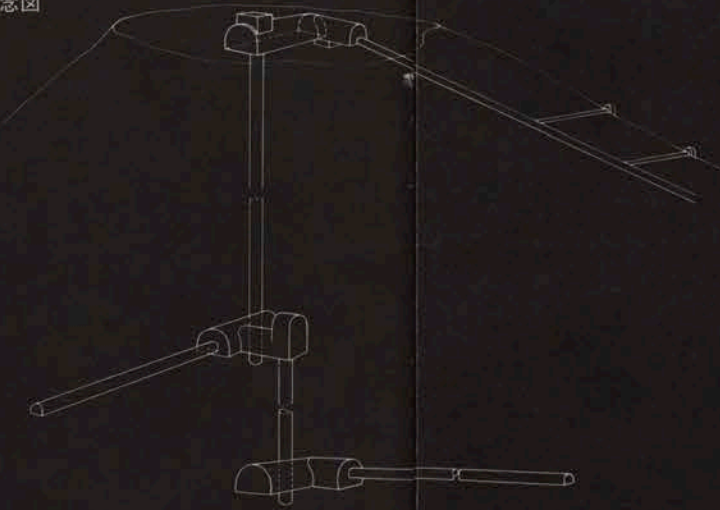
コンピューターが描いた人工氷河縦断面図



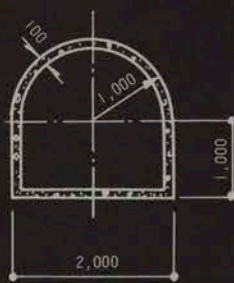
コンピューターが描いた人工氷河横断面図



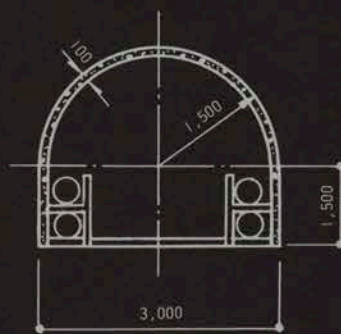
別山縦坑概念図



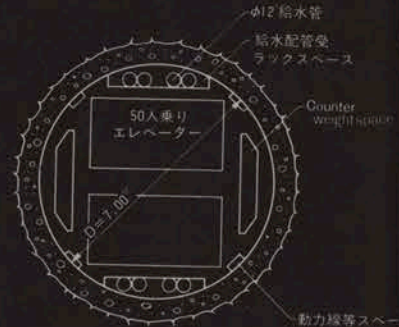
散水サービストンネル横坑図



散水サービストンネル斜坑図



縦坑標準断面図



※高山病防止低速エレベーター(座席式2層)

人工降雪による涵養の検討

これらの数値計算は、まず別山沢について行い、次に真砂沢、そして最後に剣沢本流において氷河全体のバランスを調整しつつ、コンピューターによって繰り返し算定したものである。

上項目の仮定条件に基づく数値計算によって、われわれはフローチャートの最後に示したように、人工降雪量を求めることができた。人工降雪量とは、人工氷河が定められた年数内で完成するために、自然降雪(雪崩や風によって運ばれる雪も含む)のほかに更に必要とする雪の量である。つまり、人工降雪量を加算することによって氷河は初めて成長し、そして完成することができるのである。

数値計算によって判明した人工降雪の必要量は、平方相当り水にして四・五立方メートル程度である。人工降雪(あるいは人工集雪)の方法としては、爆薬や音波による人工雪崩の誘発、他地域からの雪のパイプ輸送などが考えられる。

しかし、われわれは、涵養域全体への安定供給を図れることから、パイプによる空中散水の方法を採用した。既存の雪を集めるよりも、水を霧状にして空中散布し、冬季の低温を利用して氷河表面に付着させる方法のほうが有効であり、平方相当り四・五立方メートルの水の凍結は、この高度における低温の天気による自然冷却によって可能と考えられるからである。

そこで、氷河先端部の湖を水源として、涵養域周辺へとパイプラインを設置した。これによって涵養域全体で毎分五十リットルの水を散布し、必要とされる人工降雪量に充当させた。

以上が、人工氷河本体の建設計画内容である。

以上①-⑩の数値計算をフローチャートにすると、次頁のようになる。

氷河自然公園の建設

人工氷河の建設計画と並行して、プロジェクトチームは、氷河自然公園の建設を企画した。

人工氷河は、将来的には水資源として生活用水、農・工業用水、渇水期のダムへの給水など、多彩な利用法が考えられる。しかし、ヴェルム水期以来、実に二千年ぶりにわが国に再現される氷河は、何よりもまずわれわれに夢を与えてくれるに違いない。誰もが、その氷河を見たいと願うであろう。

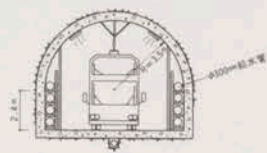
そこで、人工氷河を中心として、学術研究及び観光レジャー・ゾーンを周辺地域に計画した。それが氷河自然公園である。

① 室堂から内蔵助平へ

氷河自然公園へと入るルートは、立山の室堂からと、黒部ダムからの二本がある。メイン・ルートは、すでに観光地として開けている室堂からのものであり、われわれもここから入ることしよう。

室堂から別山までは、百人乗りの二階バス(トローリー。電気、電池兼用)でトンネルを抜けていく。トンネルは半径三・五メートルである。トンネルの終着点である別山には、天文台と高地測候所が置かれ、また人工氷河への散水を行うためのポンプ・ステーションがある。

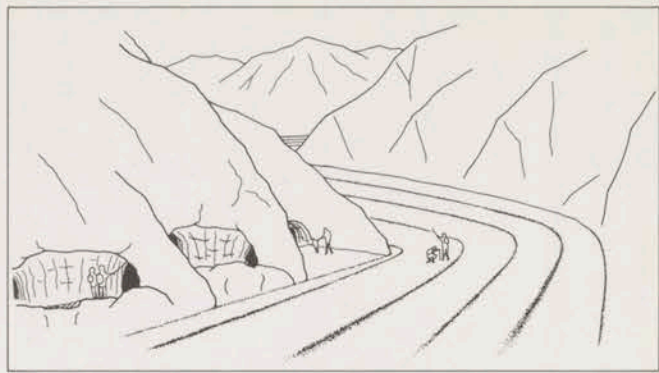
観光客はここで一度バスを降り、低速エレベーターに乗って別山堅坑をまわす四百七十五メートル、ついで更に五百メートル地下へと降りる。そこから再び二階バスに乗って専用トンネルを走る。このトンネルには両側に口径三百メートルの給水管十本が設置されている。まもなく風景が一気に開けると、そこが内蔵助平



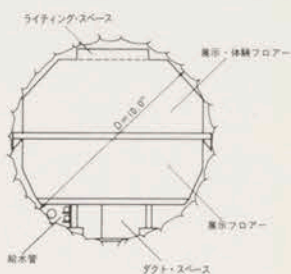
一般部トンネル標準断面図
*100人乗り2階バス(トローリー、電気、電池兼用バス)

である。

内蔵助平は標高千七百五十メートル前後の平坦地で、氷河自然公園のレジャー基地である。ホテルなどの宿泊施設のほか、雪国の民俗を復元した民俗村、高地農園、高山植物園、スキーゲレンデ、スケート場、釣堀があり、中央部にはヘリポートが建設されている。



氷河期復元ドーム(半地下式遊歩道)
観光客は、ここから氷河へ直接降り立ち、触れることができる。



地中博物館等標準断面図
氷河や氷河期をテーマとした博物館や研究施設

して造られた半地下式の巨大なドームへと出る。そこが氷河広場である。ドームは氷河に向かって大きく開かれており、観光客はすぐ眼前に広がる氷河の上を、歩くこともできるのである。あるいは氷河を背景として、ドーム内でコンサートやイベントを開催することもできるようになっている。

ハシゴ谷乗越のエレベーターは、また内蔵助平への道路とも接続している。そこからバスに乗れば、すぐに内蔵助平であり、ちょうど氷河自然公園を一周して、氷河の旅は終わる。

人工氷河建設の工程と見積り

人工氷河及び各種施設の建設にあたっては、まず剣沢へと入るための仮設道路の造成から始めなければならない。そのルートは、すでに観光ルートとして紹介したのと同じであり、大半がトンネル掘削工事である。ついでエレベーターを通すための立坑の掘削やダム建設工事を行うため、本体である人工氷河建設に着手するのは、仮設工事開始から十年後と見ている。

人工氷河は、それから約二十年を要して完成となる。しかし、氷河は毎年成長していくので、完成を待たずに観光客を受け入れることが十分可能である。そこでわれわれプロジェクトチームは、氷河観光開始の時期を、仮設工事着工から十八年後に設定した。仮に本年度から工事に着手すれば、西暦二〇〇一年である。この人工氷河が、二十一世紀への夢のある贈り物となることを願うと共に、スタンリー・キューブリック監督の未来映画にならう。

(注・現状の内蔵助平は岩石地帯であるが、トンネル掘削土により埋立造成する。また中央に河川を通し、盆地内の湧水を処理する)

② 内蔵助平から氷河展望台へ

内蔵助平からは道は左右に分かれるが、ここには左のルートを探り、まず氷河展望台方面へと向かう。バスはまもなくトンネルに入り、ループ式道路をひと回りして一気に高度をかせぐ。やがて目の前がパッと開けると、そこがグレイシャー・ブリッジ。人工氷河に架かる六百六十メートルの観覧橋で、斜面に直接定着させたケーブルによって吊るハンギング・アーチ形式である。これは急峻な地形に適した独特の橋で、米国のマイロン・ゴールドスミスによって紹介されたものである。

左に氷河本流と真砂沢との合流点、右に遠く氷河湖の輝きを見ながら橋を渡ると、トンネルに入らず、展望台へのロープウェイ乗り場へと着く。バスから降りて、エレベーターで四百六十メートル昇り、そこから標高二千九百九十八メートルの剣岳をほぼ正面に見ながらロープウェイ(全長九百十メートル)に乗ると、やがて源次郎尾根の氷河展望台に到着する。

ここは標高二千六百五十メートル。人工氷河が大きく右へ曲がる剣沢雪渓地点を眼下にして、更に別山沢や真砂沢との合流点まで眺めることができる絶景の地である。

③ 氷河展望台から氷河湖へ

展望台を出ると、再びロープウェイとエレベーターとを乗り継いで、トンネル道路へと戻る。バスは八峰下のループを回りながら高度を下げ、まもなく三ノ窓雪渓と小窓雪渓との合流に架かる三径間連続桁PC橋を渡ると、そこはもう氷河最先端にあたる氷河湖である。

氷河湖は、RCD工法による重力式コンクリートダム(仮称・剣沢ダム)によって支えられた貯水池で、流域面積は十七平方メートル、総貯水量三千万立方メートルである。またダムは、堤高百三十メートル、堤頂長二百六十メートルであり、その横には氷河造成のための送水、及び氷河自然公園内の研究及びレジャー施設に必要な電力を供給するための、地下発電所が建設されている。

④ 氷河湖から研究ゾーンへ

氷河湖周辺には、観光センター、フィッシングセンター、遊歩道などが設置されているが、東岸の、氷河が湖へ落ち込む付近からは氷河研究ゾーンとなる。

日本における氷河研究の中心となるであろう氷河研究センター、寒冷動物の生態研究センター、更には氷河期の動植物や地形などを復元した地下式博物館が、ここにある。

氷河研究ゾーンの南端のハシゴ谷乗越には、エレベーターがあり、これによって氷河表面と同レベルまで昇り、短いトンネルを抜けると、岩壁を掘削したように見積った(昭和五十八年八月現在)。

二〇〇一年氷河の旅を洒落てみたわけである。

一方、人工氷河完成までの全工期は三十年であり、これに要する建設費は次のように見積った(昭和五十八年八月現在)。

- 設備関係工事費(送水管、ロープウェイ、スキー用リフト、エレベーターなど) 七十九億円
- その他工事費(トンネル、ダム、橋梁、切土工事など) 八百六十一億円
- 施設建築工事費(ホテルなど営利目的建築物は除く) 六十億円
- 総計 一千億円

作業を終えて

氷河—その言葉の響きには、未知のものへの計り知れないロマンを感じた。都市文明のさなかにあるわれわれには、氷河は数百万年の歴史を秘めた、宇宙の星にも似た偉大な存在であった。

その氷河が、人工氷河建設構想となって、突然、自分たちの目の前に現れたのである。これには当初、正直いって戸惑った。なにしろ、まるで前例がないのである。地形から気候に至るまで、全てにわたって参考資料をもとにして仮定しなければならない。仮定することによって、初めて作業が一步進む。その繰り返しであった。

この困難な作業を支えてくれたものが二つある。その第一は、名古屋大学水圏科学研究所の樋口敬二所長、大畑哲夫助手という最高の先達の存在である。そして第二は、自分たちの作業が、おそらく世界でも初めての試みである、という喜びである。

今回の作業が、人工氷河実現に向けての貴重な一歩となってくれば幸いである。

なお最後となったが、剣沢は現在、中部山岳国立公園に指定されている。また、北アルプス有数の登山基地でもあり、登山者用の宿泊施設も存在する。もし将来、人工氷河建設が実現するならば、その際には、近辺の生態系や気象を含めた環境への影響と、既存施設への十分な配慮をまず第一に考えるべきであることをお断りしておきたい。

今回の作業にあたり、文部省登山研修所、立山黒部貫光株式会社、太陽工業株式会社にお世話になりました。厚くお礼申し上げます。