

長野冬季オリンピック ボブスレー・リュージュトラック製氷システム

Ice Making System for Bobsleigh and Luge Track of The Nagano Winter Olympic Games

高砂製作所 畔蒜鏡一郎*¹ 矢橋秀樹*²
 大本真一郎*³
 技術本部 渡部正治*⁴ 松尾実*⁵

ボブスレー・リュージュトラックは、コンクリート躯体(く)体内に埋設された冷却管に冷凍機で冷却された低温の冷媒を流し、コンクリート表面に水を散布して人工凍結を行う製氷システムを持つ、世界で14番目(日本初)のトラックである。従来は、アンモニアを冷媒とする直膨冷却方式であったが、長野では保安管理を考慮して、アンモニア保有量を従来より低減し、トラック冷却冷媒(ブライン)にエチレングリコールを使用する世界初の間接冷却方式を採用した。間接冷却方式は従来に比べて負荷追従性が遅く、他トラックに比較して長野は世界一の低緯度地区にあり日射の影響を受けやすいので、熱シミュレーションにより冷凍機から当社製中央監視制御システムまでの最適な製氷システムを構築した。また中央監視制御システムには、総延長1.7kmのトラックに沿って分散配置した13台の制御ステーション間を光通信によって結合した光通信型分散制御システムを適用した。この光通信型分散制御システムによって雷などへの耐ノイズ性に優れた、信頼性の高いシステムを実現した。長野市へ引渡し後ワールドカップ(1997年)を成功のうちに終了させることができた。

The bobsleigh and luge track of the Nagano Winter Olympic Games which will be held in February 1998 will be the fourteenth time that an entire track has been chilled and iced with refrigerators. The Nagano system will be the first time a system of indirectly chilling the track by using brine and ethylene glycol has been used. Previously a system of direct chilling by expanding ammonia has been used. MHI has designed and constructed an ideal ice making system using refrigerators, pumps, cooling piping, an automatic control system, and its original Distributed Control System (DCS) using a thermal dynamic simulation of the track. Optical communication was applied to the DCS in order to connect to thirteen control stations, which were located along the track 1.7 km in length. By the use of optical communication to the DCS, MHI realized reliable DCS with anti-electromagnetic interference against, for example Lightning.

1. ま え が き

長野ボブスレー・リュージュトラック(図1参照)は、下記条件で設計に取組んだ。

- (1) 世界で14番目(日本初)の人工凍結式トラックで世界初のブライン(エチレングリコール)による間接冷却方式による製氷システム⁽¹⁾⁽²⁾を採用。
- (2) 世界一の低緯度な場所に設置され日射の影響を他トラックに比較して受けやすい。

長野：北緯36°40' リレハンメル：北緯61°06'

複雑な形状をしたトラックは、日射の当たる場所が時々刻々変化する中で所定の氷質を維持するのに氷心温度を木目細かく制御する必要があり、ブライン供給温度を任意に設定できるようにした。間接冷却方式は従来方式(直膨冷却方式)に比較して、ブライン送り温度を変更するのに時間が掛かるため、日射を考慮したトラック冷却負荷のダイナミックシミュレーションを行い、冷凍機設計への反映、最適配管設計及び当社製中央監視制御システムの最適化を実施し、長野に適した製氷システムを完成させた。

2. 製氷システム概要

システムの設計条件は以下のとおりである。

- (1) 外気条件：12.5℃(乾球温度)、11.2℃(湿球温度)
- (2) 水温：-5℃、氷厚：40mm
- (3) トラックを57セクションに分割し、各セクションの氷温制御



図1 トラック全景 総延長1770m、凍結対象1550m、標高差113mのトラックを示す。
Panorama of bobsleigh and luge track

*1 機械技術部冷熱プラント設計課長

*4 高砂研究所燃焼・伝熱研究室 工博

*2 機械技術部主務

*5 高砂研究所制御システム研究室

*3 機械技術部電気・機器設計課

が個別に管理棟に設置する中央監視制御システムでできる。

(4) 建屋：管理棟1棟，冷凍機械棟3棟

管理棟及び各機械棟での機器構成は次のとおりである。

管理棟：中央監視制御システム

第1機械棟：冷凍機能力 351.26 kW×3台

第2機械棟：冷凍機能力 351.26 kW×2台

第3機械棟：冷凍機能力 351.26 kW×4台

長野オリンピック基本理念の一つ“自然との共存”を踏まえ、冷凍機の冷媒にアンモニアを使用している。トラックコンクリート躯体内にはブライン冷却管が埋設されており、総延長は約80 kmに及ぶ。

中央監視制御システムは、機械棟自動制御盤、ローカルステーション盤、中央監視盤から構成される。各ステーションはトラック全体に分散配置されており、ステーション間をトラックに沿って敷設した光ファイバケーブルで接続し、全体として光通信型分散制御システムを構成している。

管理棟の中央監視盤では、トラック上各セクションの氷心温度や各機械棟冷凍機等機器の運転状況監視、各セクションの氷心温度設定値や冷凍機のブライン送り温度設定値の変更を行う機能がある。

これらの機能によって、アイスマイスター（トラック氷管理責任者）の指示温度どおりに氷の温度を制御することができる。

3. 氷の特性解析

本トラックの特徴は前述のとおり、世界一の低緯度に位置すること、また従来のトラック冷却システムと異なりブラインを用いた間接冷却であることから、トラック設計においては大気条件（外気温度、日射等）の影響及び冷却時の応答性等の特性を把握することが重要となる。したがってこれらの影響をトラック上での氷の生成・融解を考慮した解析を実施し評価した。

3.1 解析モデル

図2に解析モデルを示す。解析は対象性を考慮し、伝熱管、コンクリート壁、断熱材及び氷層から成る二次元モデルにより行った。実際の氷生成はコンクリート表面（又は氷面）に水を散布させることにより行いが、ここでは初期に最終目標とする氷の厚さに相当する氷の層を与え、そこでの氷の生成を解析した。ただし、散布水の熱抵抗は氷層による熱抵抗に比べて十分に小さく、実現象との差異が大きくなるため、計算上氷層による熱抵抗の影響を無視するようにしている。また、境界条件はトラック付近の気象データを用い、氷（又は水）面と断熱面からの対流熱伝達及び日射による氷表面への放射伝熱を考慮した。

3.2 計算結果

3.2.1 製氷時間の検討

図2の解析モデルを用い、外気温度12℃、伝熱管温度-18℃におけるトラック上に40 mmの氷を生成するのに必要な時間を検討した。氷生成過程としては約10 000 s後にコンクリート表面温度が0℃となり、冷却後約200 000 s（約56 h）後に40 mmの氷が生成される。なお、氷生成後、定常状態に達するには、更に50 000 s（約14 h）を必要とする。

実際の製氷は、散水作業により本解析結果以上の時間を掛けて実施されているが、氷表面温度の計測値と解析結果は20%程度の差異で一致している。

3.2.2 直達日射の影響

本トラックは、北側斜面に設置されているが、時間・場所によ

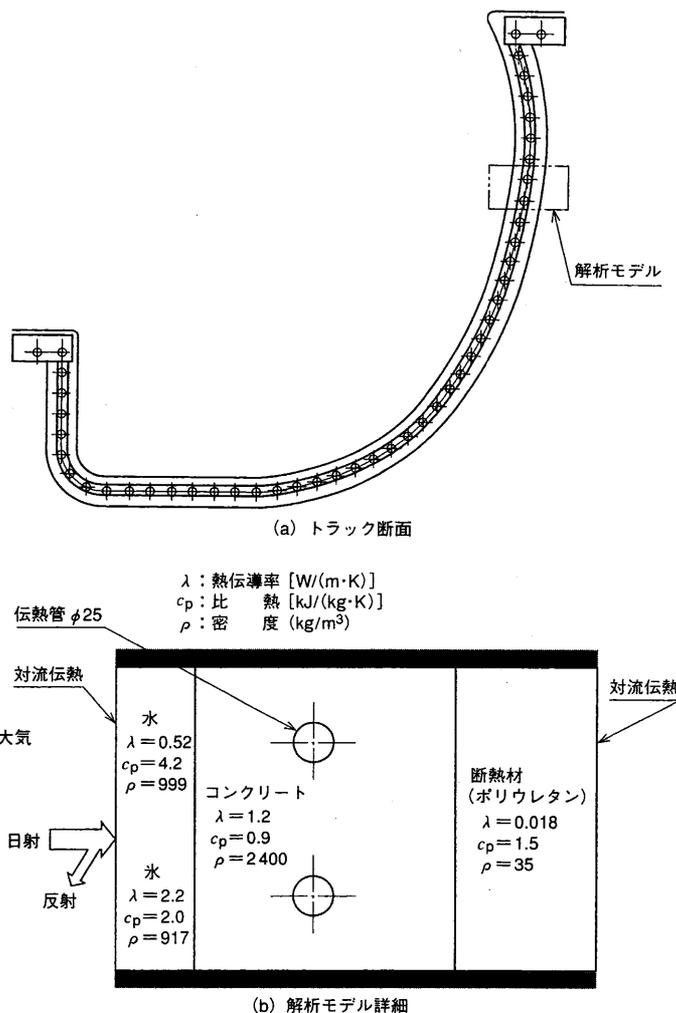


図2 解析モデル 計算に用いた解析モデルを示す。 Analysis model for calculation

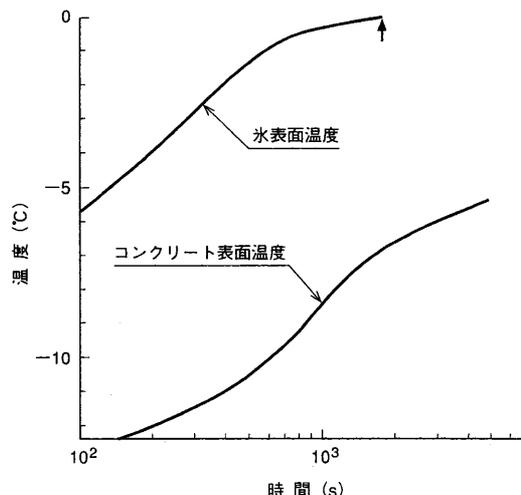


図3 直達日射の影響 トラック上に直達日射を受けた場合の水表面温度、コンクリート表面温度の経時変化を示す。約1800 s後（図中↑印）には氷融解が始まっている。 Direct solar radiation effect on bobsleigh-luge track

りトラック上に日射を直接受け（直達日射）、短時間であるが局所的に大きな熱負荷を受ける。図3にトラック上に直達日射が当たった場合を想定し、日射なしにおいて伝熱管温度-18℃で40 mmの

氷を維持している状態から直達日射を受けた場合の非定常温度分布の変化を示す。直達日射の影響により温度分布は変化し、約1800s後に表面温度は0℃に達し、それ以後氷の融解が開始する。なお、氷層の融解量としては約3600s後に5mm、約5500s後には10mm程度に達する。以上の結果から、トラック上での直達日射はトラックの水維持・管理には致命的な負荷であり、日射のシールドの必要性が確認された。

3.2.3 直膨冷却方式との比較

他のトラックに用いられている直膨冷却方式では、冷却管内の冷媒を蒸発させることにより冷却するため、氷維持に必要な冷却温度の制御は、系内の圧力を変化させることで瞬時に対応させることが可能である。一方、本トラックに採用した間接冷却方式では、冷却温度制御にトラック内のラインを一度冷却させる必要があるため1℃/10min程度の時間遅れが予想される。したがって、ここでは外気温度の変化に伴う冷却温度制御を想定し、直膨冷却と間接冷却との違いによる冷却特性の違いを検討した。図4は外気温度が-0.5℃(12月の平均温度)の状態から13.4℃(12月の最高温度)に上昇した場合を想定し、伝熱管温度を-18℃から-20℃まで1℃/10minの割合で冷却させた場合の氷表面温度とコンクリート表面温度の経時変化を示す。なお、図4中の破線は直膨冷却を想定し、伝熱管温度をステップ的に変化させた場合の結果である。間接冷却及び直膨冷却の温度変化はいずれもほぼ一致しており、間接冷却においても直膨冷却と同等の冷却特性が得られることが確認できた。

3.3 冷却設備への反映

前述のように、気象条件及び間接冷却設備の採用等の本トラック特有の冷却条件の中で、約20%の精度でトラック上の氷の維持・管理に必要とされる各種の解析を行うことで、本冷却設備が従来の直膨冷却設備と同等の性能を有することが確認でき、冷却能力の妥当性及びトラック全体に日射遮へい用のシールドを設ける

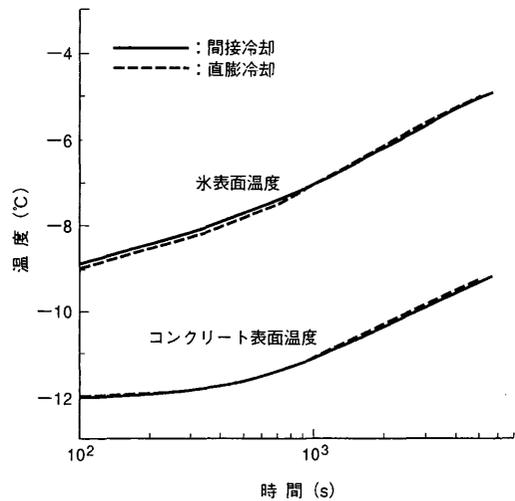


図4 ブライン冷却の応答性 冷却方式の違いによる応答性の違いを示す。間接冷却と直膨冷却の差異は小さく、間接冷却においても直膨冷却と同等の性能が得られる。
Response characteristic of cooling system by brine use

など種々のトラック冷却設備設計に反映されている。

4. 監視・制御

4.1 制御システムの特徴

監視・制御システムの構成を図5に示す。

本システムのように屋外仕様、特に山間部仕様には、雷などのノイズに対する耐性が要求されるので、ステーション間に二重化された光通信を採用している。万一、中央監視盤との通信が不能となっても、各ステーションは直前までに与えられた指令値を基に、単独で制御を継続することができる。

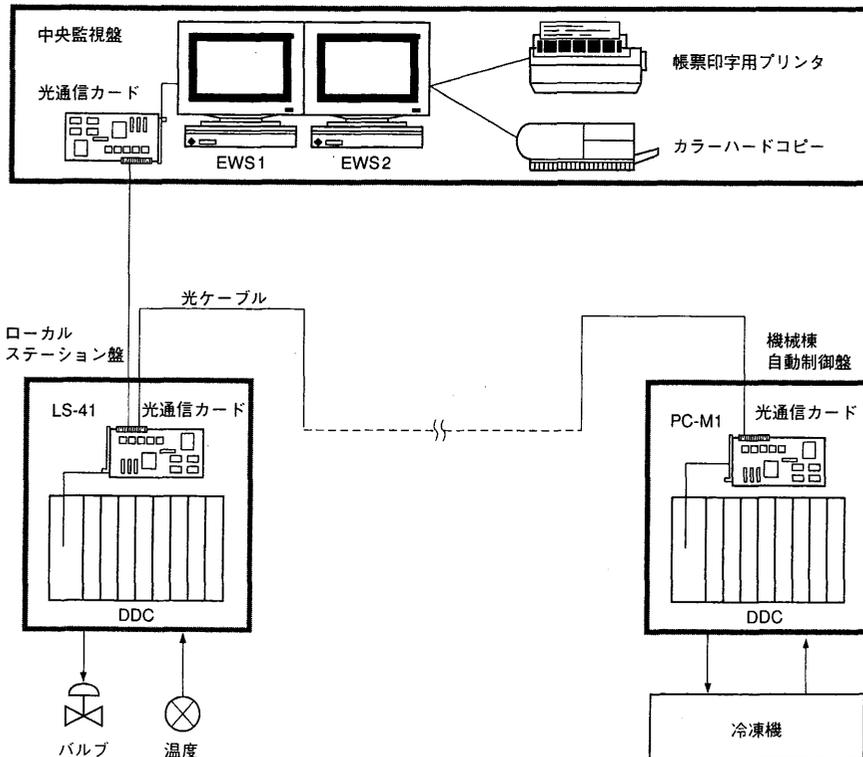


図5 システム構成 監視・制御システムを模式的に示す。
Control system configuration

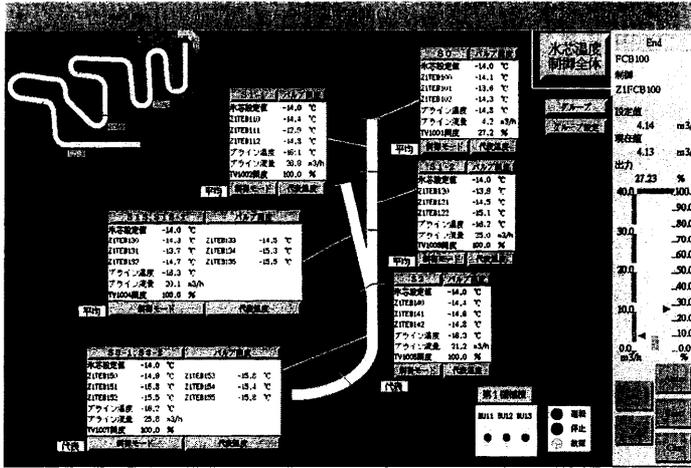


図6 監視画面 各セクションの氷心温度とブライン流量を表示し、氷心温度設定値の変更が可能な状態を示す。
Supervisory screen

管理棟内の中央監視盤で、各ステーションから機械棟、トラック上にある各種センサの情報を取得して、CRT画面上に表示する。また、機械棟のブライン送り温度設定値やトラック上各セクションの氷心温度設定値の変更なども可能である。図6は、ローカルステーション盤の監視画面で、氷心温度設定値の変更は画面右側にポップアップ表示された操作パネルを通じて行う。

4.2 光通信基板

本監視・制御システムの光通信基板は、システムの基幹LANに使用されているARCNETプロトコルに対応したものである。従来のARCNETプロトコル利用の光通信は、二つのステーション間の通信を行うものであって、本システムのように複数台のステーション間を直列に結合できるものは存在しなかったので、今回開発を行った。以下に、光通信基板の内部処理について簡単に説明する。

図7は光通信基板の送信側・受信側それぞれにおける信号処理である。

送信側では、受信側の光/電気変換器の変換特性を安定化するため、基準となる一定周期の信号(キャリア信号)を出力する。特に監視・制御データがないときには、このキャリア信号のみが送受信される。監視・制御データを送信するときは、キャリア信号に重畳して符号化する。

受信側では、受信した波形の中からキャリア信号を抽出・再生し、再生したキャリア信号と受信データの間で復合化処理を行って、データを復元する。キャリア信号のみが受信されているときには、復合化処理の結果、監視・制御データが重畳されていないことになる。

このような仕組みを搭載したARCNETプロトコル対応の光通信基板によって、13台のステーションを接続した広域の監視・制御を実現した。

5. ワールドカップ

ワールドカップ1997年長野大会は2月16,17日20箇国の参加でリュージュ大会が開催され、2月22,26日には15箇国の参加でボブスレー大会が開催された(図8参照)。

前例となる情報もない手探りの両大会であったが、最高時速130

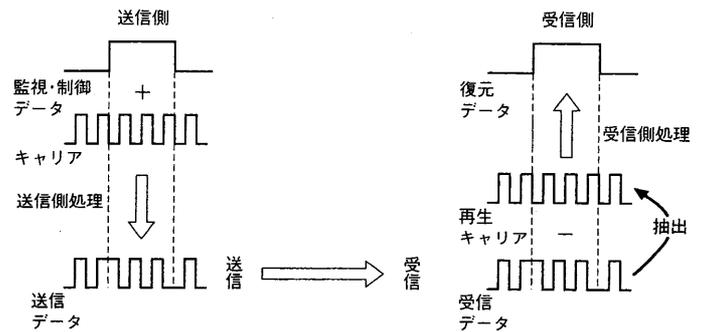


図7 光通信基板における信号処理 送信側の符号化処理と受信側の復元処理について示す。
Signal processing on optical communication board



図8 ボブスレースタート
Starting of bobsleigh

kmで疾走し、世界初の環境重視ブライン間接冷却方式による人工凍結式トラックの技術力は高い評価を受けた。

6. む す び

本ボブスレー・リュージュトラックは試走及びワールドカップを経験した結果、ダイナミックシミュレーションで得られた予想特性を持っていることが分かった。また、アイスマイスタの指示どおりに各セクションの氷心温度制御ができ、長野オリンピックでの選手の活躍が期待される。

本工事で得られた技術は、スケートリンク等の製氷システム及び、地域冷暖房プラント等熱源プラントにおけるプラント特性解析並びに中央監視制御システムへ応用できるものであり、今後アプリケーションの拡大に努めたい。

なお、本工事は当社を主契約者とする3社の共同企業体にて受注、施工したものである。

最後に、工事中及び試走、ワールドカップにおける御指導、情報の提供を頂いた長野市オリンピック局に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 畔蒜鏡一郎ほか、ボブスレー・リュージュトラック冷却装置、冷凍 Vol.71 No.819 (1996) p.73
- (2) 城島宏生、ボブスレー・リュージュ会場(スパイラル)、空調調和衛生学会 Vol.71 No.4 (1997) p.23