

半剛性吊り屋根構造を持つオリンピックスピードスケートリンクの断熱防露計画

Thermal and Humidity Control of the Nagano Olympic Ice Speed Rink

寒河江 昭 夫 荒 井 良 延
権 藤 尚 早 川 一 郎¹⁾

要 約

本報告は長野オリンピックスケート競技場の木質系屋根の熱湿気性能に関する検討結果であり、その内容は以下に示すように結露防止と木質系内装の安定性のため非常に有効であった。①大空間の屋根の年間結露計算を行い換気回数を0.5回/時以上とした。②形状の複雑な断熱屋根面の熱貫流・透湿抵抗を校正熱箱法による実験で求め断熱方法を決定した。③長期の人工気象室を用いた実モデル実験で断面各部の基準化温度係数を求め、弱点となる母屋内部鉄部の詳細を変更しヒートブリッジの防露性能を向上させた。④母屋内鉄板部温度の立ち上がりの遅れと表面温度を確認し温風防露運転等に反映させた。

目 次

- I. はじめに
- II. 検討課題と方法
- III. 検討結果
- IV. 建物測定
- V. まとめ

I. はじめに

長野市オリンピック・スピードスケートリンク(Photo 1)では1998年2月から3月にかけての冬季オリンピック及びパラリンピックが行われた。この記念すべき建物に関して筆者等は建物の熱と湿気に関する検討を行う機会を得たが、本報では特に最大15°の傾斜を持つ半剛性吊り屋根構造の断熱防露計画について報告する。

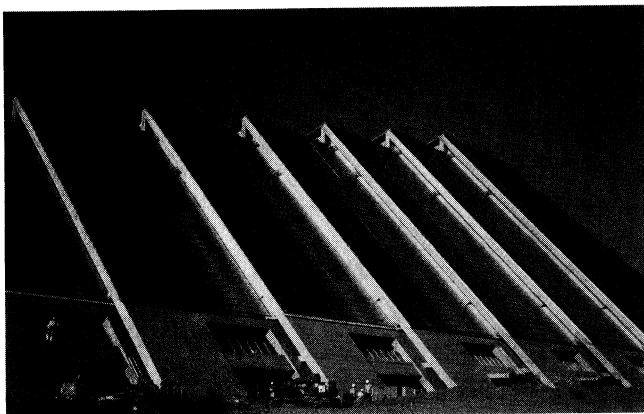


Photo 1 建物外観

(View of the Nagano Olympic Ice Speed Rink)

II. 検討課題と方法

1. 建物構成

この建物はPhoto 2及びFig. 1に示すように最大10000人収容の半剛性吊り屋根構造大空間施設で、屋根を含む主な外周部分は0.4mmのステンレス板と防水層と構造用合板で、Fig. 2に示すようにそれらの

屋根を600mm間隔で母屋の集成材が支持し、その間に吸音のグラスウールボードを挟み込んでいる。これは金属の吊材と構造用合板が一体となって水平力に抵抗し、断熱性・防露性・吸音性・遮音性・耐久性等を同時に確保する形態である。スケート競技のための設備システムとしては氷温度-3℃から-7℃のスケートリンクへの外気冷房と座席に組込ヒータがあり、夏季のイベントには居住域空調が有るが全体としては換気を主体とする巨大なパッシブな温熱空間である。

2. 熱湿気の課題

本建物の屋根に求められた熱と湿気の性能を以下に示す。

- ①結露水の落下等スケートリンク維持整備上の不具合防止
 - ②主要部位の黴の発生抑止
 - ③スケートリンクとして用いない場合も含めた管理方法の確立
- ①に関して過去の幾つかの国内のスケート施設の事例を調査すると、屋根及び屋根を支持する鉄部から結露落下があった。本建物では屋根と鉄パイプ製走行バトン等の鉄部が有り急激な湿度上昇があった場合の温度遅れが予想される鉄部の非正常性結露防止を検討した。

Table 1に本建物における測定と実験及び計算内容を示す。

Table 1 検討項目と方法・内容
(Measuring Items and Methods)

[記号: ○測定・■実験・★計算]

項 目	設 計	施 工	建 物 使 用
状況把握 建物特性	★年間室内環境	(屋根施工)	○リレハンメルリンク ○国内既存スケート場
予測計算	★断熱厚と換気量	(防露運転)	
断面構成	○ K 値 ■ 透湿抵抗		
屋根構成	■ 傾斜屋根結露	(詳細設計)	
建物測定		○竣工時 温度湿度	○ 多客時状況測定 (使用マニュアル)
運用検討	○長野気象データ		

1) 関東支店建築部

キーワード: 結露防止, 屋根, スケートリンク
換気, 断熱

III. 検討結果

1. 屋根断熱仕様

一般屋根部分の熱的な性能を把握するため、Fig. 2 に示す断面について 4.8m^2 の試験体を製作し熱的性能を校正熱箱法 (CHB) により求めた。試験体はグラスウールの室内面にアルミ箔が有る場合と無い場合とで比較した。その結果、断面の熱貫流率 K 値はアルミ箔がある場合 $0.65\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、アルミ箔無しの場合 $0.68\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ で熱的性能にはあまり差が無い。今回のような断面構成ではアルミ箔は防湿効果は有るが内部結露の発生が懸念されることと、室内音響的な検討からグラスウールの仕様は厚み 50mm でアルミ箔無しとした。

2. 屋根断面構成と必要換気量

結露状況を把握するため床と壁コンクリートからの水分放湿と、アイスリンク製作とメンテナンスの水分、観客の発湿などを考慮した大空間の温湿度結露シミュレーションを実施した。結果を見ると Fig. 3 に示すように 0.1 回/時間程度では結露の発生が予想されるが 0.5 回/時間の換気の確保ができれば屋根一般部で結露発生は有るが部材の保水により水滴落下は防げる事が予想された。この結果よりグラスウール類は防湿のため脱スターチ処理をしたものを用い、一般部分の屋根断熱構成を Fig. 2 と決定した。さらに Fig. 1 に示す建物棟部にスリット状の換気口を追加設置した。

3. 屋根ヒートブリッジと傾斜特性

次いで屋根のヒートブリッジでの結露状況と結露した場合の傾斜方向への移動落下現象を実験で確認した。実験は Photo 3 に示すように水平から 15° まで可変に傾斜できる 16.8 m^2 のヒートブリッジを含む屋根モデルを鹿島技研人工気候室に設置して上記の目的に対する結露実験を行った。傾斜 15° で連続 60 日移動落下現象実験を継続したが試験体内部での結露水移動とそれによる落滴は発生しなかった。この間、木部重量含水率は 9.5% から 12% へ増加した。実験結果より基準化温度係数 $[(\text{各点温度} - \text{外気温}) / (\text{室温} - \text{外気温})]$ を求め (Fig. 6) 各部の温度低下状況を把握した。特に集成材の母屋内鉄部及び木部ジョイント部では温度低下と温度遅れがある。これらの結果より非正常性の結露を防止するため 12mm の母屋内鉄部には発泡ウレタンゴムを取付けることとした。

4. 非正常性結露と温風設備

Photo 2 に示す走行バトンなどを含めた鉄部の非正常結露防止のため Fig. 1 に示す温風吹出を設置したが装置の運転設定モードは竣工後の測定により求めることとし、このため屋根近傍の露点温度 D_p と屋根鉄部表面温度 θ_s を中央監視により常時計測することとした。

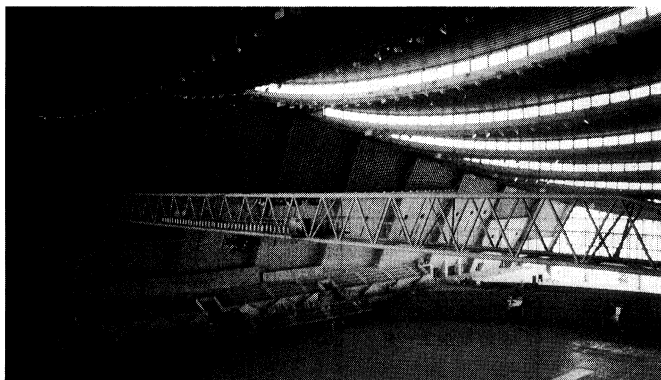


Photo 2 走行バトンと室内状況
(Inside View of the Ice Speed Rink)

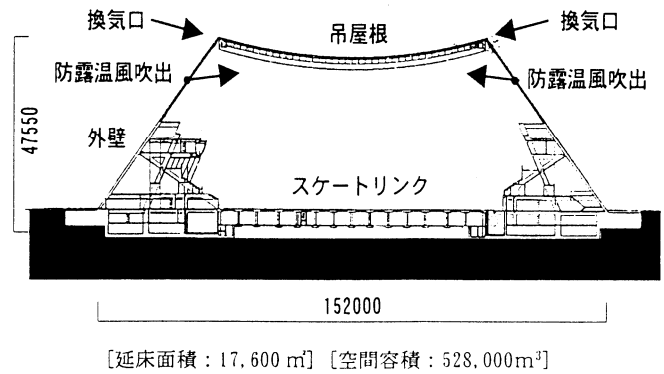


Fig. 1 建物断面形状
(Section of Building)

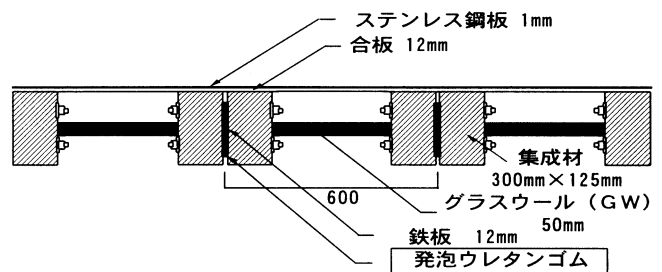


Fig. 2 一般屋根断熱構成
(Section of Roof Insulating System)

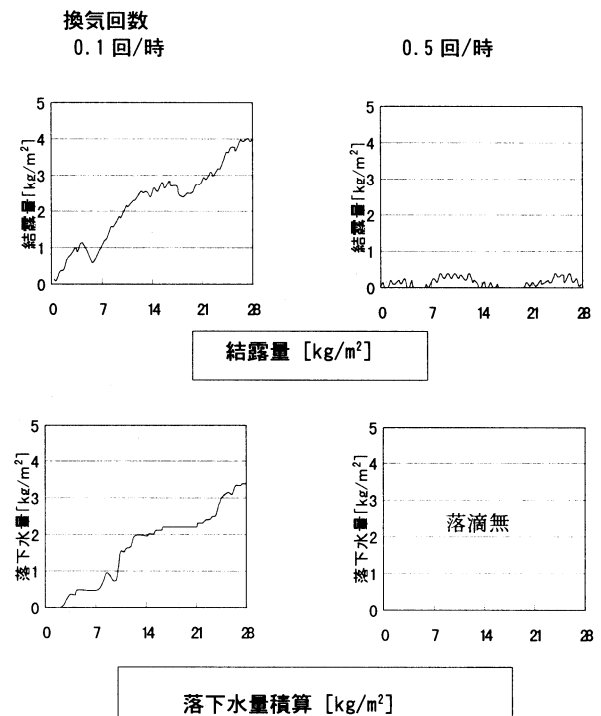


Fig. 3 屋根の単位面積当たりの結露計算結果 (2月)
(Calculation Results of Roof Unit Area's Dew Condition)

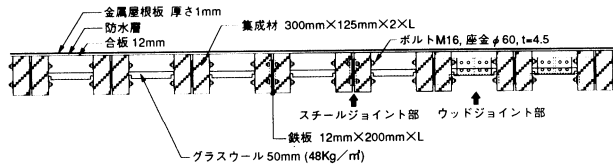


Fig. 4 試験体形状 (ジョイント部分)
(Section of Specimen)

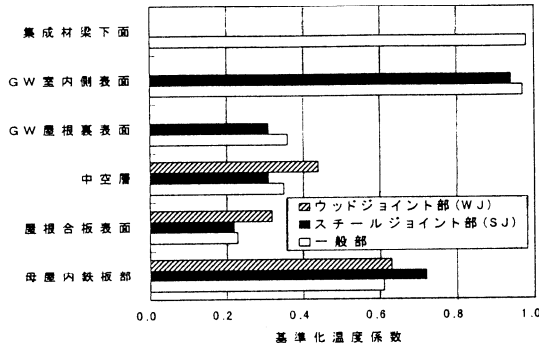


Fig. 6 各部基準化温度係数
(Standardized Temperature Coefficients)



Photo 3 人工気象室実験状況
(室内20℃ 90% 外気-15℃)
(Testing of Specimen in Climate Chamber)

IV. 建物測定

1. 熱特性 (スケートリンク非使用時)

建物は1996年11月に竣工した。竣工時点で数日間にわたりスケートリンク非使用時の自然温度を測定した。Fig. 7 に示すように屋根鉄骨部の温度は12℃程度である。また屋根鉄骨部の温度に比べ屋根近傍の空間温度の低下があり、外気温度と日射の上昇があると母屋内鉄板部温度は2時間程度の遅れで上昇する。その意味で実験でも確認したようにこの屋根構造は断熱性があり熱的に軽い構造といえる。その後、防露のための温風運転を行ったところ Fig. 8 に示すように屋根近傍空間温度は開始2時間で2℃程度、鉄骨部の温度は1℃弱程度上昇した。これらを考慮してこの建物での余裕温度 $\alpha = 4^\circ\text{C}$ として換気および防露運転の目安とした。またこの温風装置は室内全体の温度上昇に寄与し、スケート競技者にとってリンク近傍の低温化防止の温度維持装置ともなった。

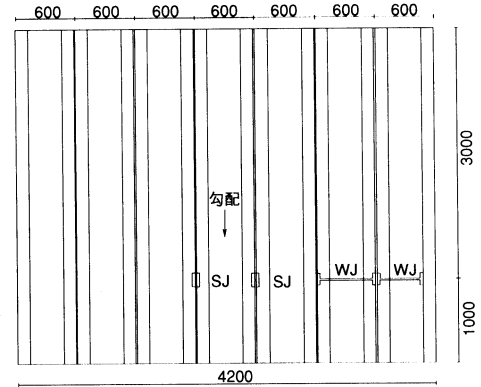


Fig. 5 試験体設置状況
(Setting of Specimens)

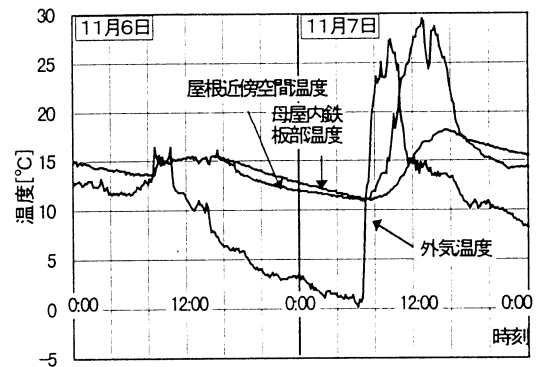


Fig. 7 非使用時の建物自然温度 (1996年11月)
(Measuring Results of Natural Room Temperature)

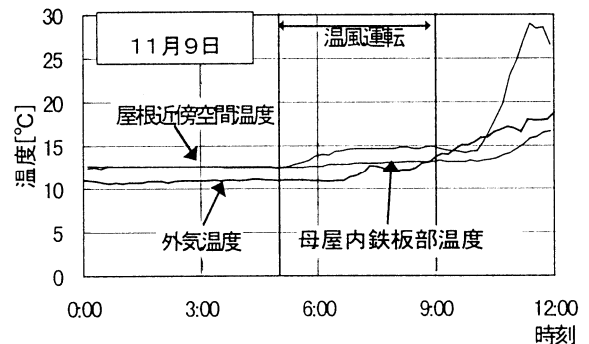


Fig. 8 温風運転時室内温度 (1996年11月)
(Measuring Results of Room Temperature on Heating Operating)

2. 熱湿気特性 (スケートリンク使用時)

1997年2月のプレオリンピック世界選手権開催時に熱と湿度発生のある状況での測定を行った。最大7000人程度の観客が入った状況での室内温湿度変動と屋根温度変動について Fig. 9 に示した。屋根近傍の露点温度は観客の入場とともに外気に比べ最大で5℃の上昇であったが、これは観客入場時のドアの開け放ちと屋根頂部に設けられたスリット状の換気口による自然換気の増大によるものと思われる。この状況において、屋根鉄部表面温度は14℃程度で露点温度に比べ高い状態を保っている。建物使用時の、屋内の露点温度は外気の露点温度 +

5℃程度で、この時の屋根鉄部の温度は暖房により 14℃程度を保つことから十分余裕がある。なお、大会終了時点での屋根集成材の重量含水率は約 9%程度で施工時より 2%上昇した。

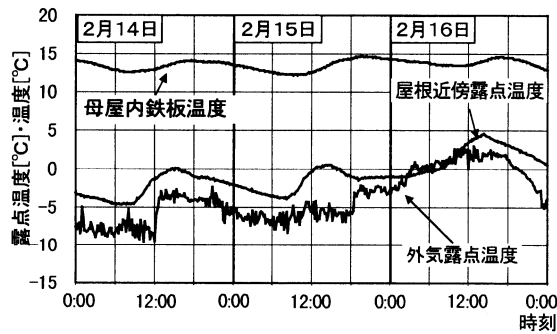


Fig. 9 スケート使用時熱湿気特性
(Measuring Results of Steel Part Temperature)

3. 年間温湿度変動

竣功後の状況について、結露水の落下等水リンク維持整備上の不具合がないこと、主要部位の黴の発生防止、スケートリンクとして用いない場合も含めた管理方法の妥当性等を 1997 年 1 月から 1998 年 3 月までの測定により確認した。

(1) 外気温度・相対湿度・月積算日射量・SAT 温度

長野における外界条件の測定結果を Fig.10 から Fig.13 に示した。平年値と比較すると外気温度が若干高めであった。尚、年最高気温は 8 月で 38℃、最低気温は -9.8℃であった。

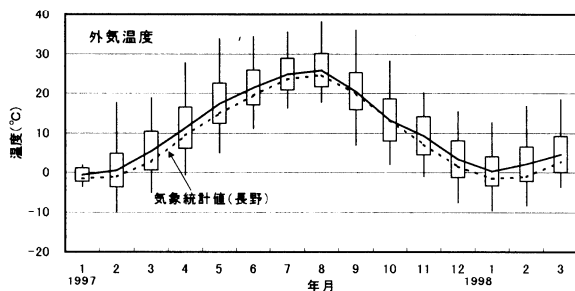


Fig. 10 年間平均・最高・最低外気温度 (長野)
(Measuring Results of Outdoor Temperature)

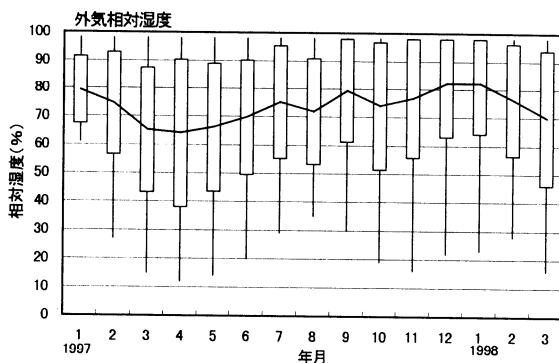


Fig. 11 年間平均・最高・最低外気相対湿度
(Measuring Results of Annual Outdoor Humidity)

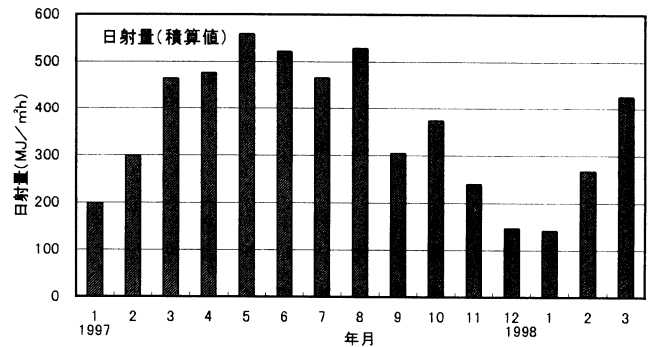


Fig. 12 月積算日射量
(Measuring Results of Solar Radiation)

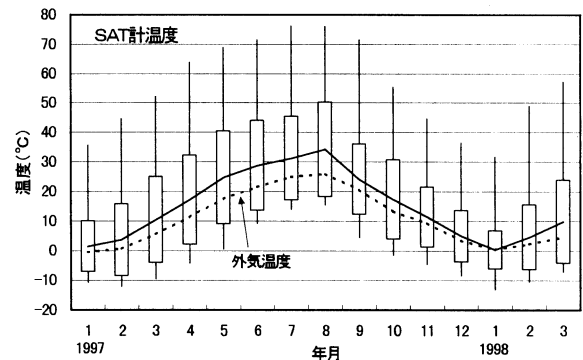


Fig. 13 月平均 SAT
(Measuring Results of SAT)

(2) 室内 (アリーナ) の温度湿度

室内 (アリーナ) の温度湿度等の測定結果を Fig.14 から Fig.18 に示した。室内温度は季節ごとに变化するが月平均最低で 7℃、月平均最高で 26.5℃であった。特に 97 年 12 月頃より 98 年 2 月と 3 月のオリンピック・パラリンピックまでは温風暖房運転等により室内温度は 10℃近くに維持されており、スピードスケート競技等に支障は出なかった。室内の平均相対湿度は 60±10%程度であり、97 年 9 月に 72%となりやや高めで Fig.18 の黴発生の可能性もあったが木部とグラスウール部分には黴の発生などはない。スケートリンク使用時はリンクの除湿効果と暖房により平均相対湿度は 50~40%と低温になった。

外界条件との比較から建物の状況を見ると、Fig.14 と Fig.15 により夏季の室内 (アリーナ) の温度湿度上昇が押さえられている。イベント時は居住域冷房が行われ内部負荷を除去しているが建物非使用時には屋根の断熱性が寄与して日射を遮るとともに、自然換気と木部の調湿性も期待でき年間を通して木造屋根構造を良好に維持し、温熱的には設計意図に近い快適スポーツ競技空間となった。

(3) 防露性能

Fig.13 の SAT 温度の測定結果から長野では冬季の積雪期間の問題は有るが年間を通して日射の恩恵を屋根面が受けられる条件であることを示している。この建物では室内が巨大であるが換気状態が良好で、さらに防露のための建築的対応と屋根近傍空間の温風運転効果により、この建物での母屋内鉄部の余裕温度は室内露点温度に比べて 5℃から

7℃あり防露性能を十分確保している。プレオリンピックさらに一年間を経過した 1998 年 2 月の冬季オリンピック期間中でも結露水の落下等はなかった。

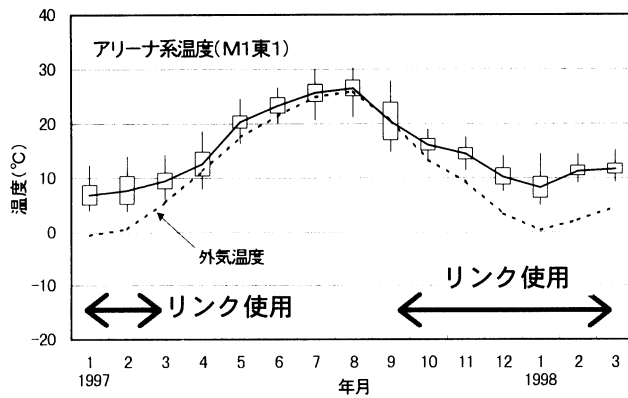


Fig. 14 年間平均・最高・最低アリーナ空気温度
(Measuring Results of Room Temperature)

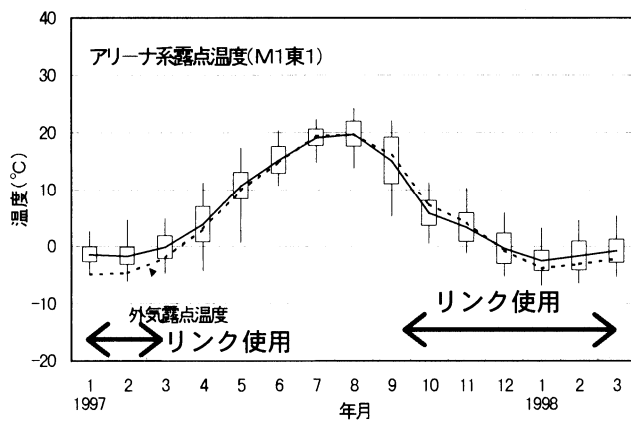


Fig. 15 年間平均・最高・最低アリーナ露点湿度
(Measuring Results of Room Dew Point Temperature)

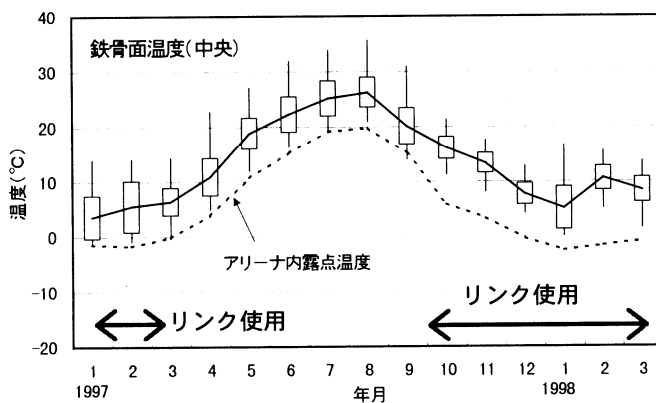


Fig. 16 年間平均・最高・最低鉄部温度
(Measuring Results of Steel Surface Temperature)

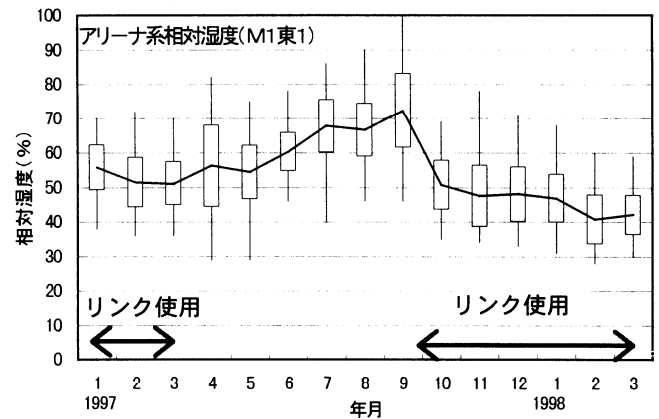


Fig. 17 年間平均・最高・最低相対湿度
(Measuring Results of Indoor Humidity)

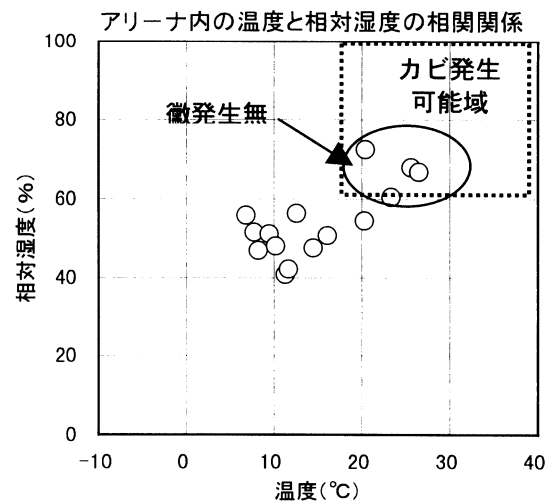


Fig. 18 アリーナ温湿度の相関
(Relation of Dry Bulb Temperature and Relative Humidity)



Photo 4 スケート使用時状況
(View of Ice Speed Rink)

V. まとめ

以上示したように本建物においては熱湿気に係る各種検討を行い、その結果を反映して①屋根断面の断熱性能の最適化と②屋根棟部の換気口スリット設置、③防露温風装置の設置を追加して実施した。要点を以下に示す。

(1) 状況把握と問題抽出：海外の室内オリンピックスピードスケート施設の観察結果を参考にするとともに与条件としての室内温湿度を調べるため栃木県内の国内既設スケートリンクでの実測を行った。

(2) 予測計算：大空間の温湿度計算と年間結露計算からおおよそ0.5回/時の換気回数の目標を立てた。

(3) 材料性能実験：断面構成を求めるため複合する断熱屋根面の熱貫流を実験と計算とで求めた。内部結露の問題がありここでは防湿の考え方はとらなかった。

(4) 傾斜屋根実験：人工気象室を用いた長期の蓄積実験で傾斜による結露の状況を把握した。温度差を与えた実験より基準化温度係数を求め、室内に近いヒートブリッジの防露性能を向上させた。水分の傾斜方向の移動はなかった。

(5) 建物測定：建物の温度分布測定にはサーモ映像など非接触温度測定と中央監視装置及び短期計測装置を屋根部分に用いた。

(6) 運用検討：各部の温度の非定常性を考慮することが年間を通して防露検討上重要であった。リンクからの距離の違いなどによ

り表面温度で最大4℃程度の差が生じ防露運転等に反映させた。

オリンピック等を無事終了できたことは関係者にとって最大の喜びであった。本検討に当たり鹿島の尾崎勝、近藤純一、早川真、戸河里敏、谷野郁子（当時）、久米一生、末松郁郎、城野敏江（当時）鹿島技研：現在住宅金融公庫）、秋庭重穂、青木正夫、大伴尚也、田中修一の各氏、（財）建材試験センター黒木勝一氏はじめ関係各位の多大の協力をいただいたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 寒河江，荒井，権藤，城野；建築部位の傾斜特性を考慮した防露設計法，鹿島技術研究所年報 45 号，pp219 から 224，1997 年 12 月．
- 2) 城野，寒河江，荒井，権藤；傾斜部位における天井材の結露特性，日本建築学会大会 1997 年 9 月．
- 3) 寒河江，荒井，権藤，早川；半剛性吊屋根構造を持つオリンピックスピードスケートリンクの断熱防露計画 日本建築学会大会 1998 年 9 月．
- 4) 大前・中村・早川・近藤；オリンピック記念アリーナ（エムウエーブ）の計画から実測まで その 1．計画編 建築設備と配管工事 1998 年 1 月．