

寒冷地に建つ膜構造物の環境実測（第2報：冬期）

（サスペンション膜構造：北海道帯広市）

佐野 武仁^{・1}
今井 礼子^{・2}
尾川 友佳子^{・3}
田中 耕太郎^{・4}
田中 儀治^{・4}

概 要

前報（第1報）では、寒冷地に建つ膜構造物の夏期環境実測結果について発表した。本報ではこれに引き続き冬期の環境実測結果について発表する。膜構造物の環境特性として、夏期は透過日射量、昼光採光率などが室内環境に及ぼす影響が大であり、これらのパラメータに焦点をあて実測をした。冬期については、室内温湿度分布、コールドドラフト、結露およびエネルギー消費量などの問題が生じてくる。本稿ではこれらを主に発表する。

1. 研究の目的

最近、寒冷地において膜構造物が盛んに建設されはじめているが建築環境的に解決すべき問題が数多い。著者らは膜構造物の快適環境を創造する事を目的として1989年夏から現在に至るまで帯広・まいどーむの実測を行なっている。既報ではこれらの成果として夏期の室内温熱環境ならび採光特性、輝度について報告しているが、今回は引き続き冬期の実測結果より膜構造物の最も問題となるコールドドラフトおよび結露について述べるものである。また、室内の温熱環境の他にPMVを用いて冬期の居住環境を評価したので追って報告する。

2. 建物概要

本建築物は、一重膜構造で竣工したが、結露やコールドドラフト等の問題から、一年後に内膜を取り付け二重膜構造に改装を行っている。この時、建物内部中央の仕切り壁を取り除き、売り場以外の変更も行われた。（写真-1）また、内膜を取り付けた事により、室内環境が改善され、このため床が「ヒートポンプ」（200,000kcal/h）の使用はされていない。建物および設備概要については、第1報¹⁾にしているので参照されたい。



（写真-1）冬期の建物外観

3. 実測概要

実測点は、外気温湿度各1点、室内温湿度各1点、全天・透過日射量各1点、垂直温度分布7点、外および内膜内表面温度（東・西・南・北）計8点、床表面温度2点等、合計30点を10分間隔で、24時間連続的に実測している。また、1990年2月13日から15日まで現地において、移動実測も行った。実測項目として、デジタル温湿度計、微風速計を用いた室内温湿度、コールドドラフトの測定他に在室者数および消費電力量について実測を行った。

* 1 昭和女子大学 生活美学科住居学教室
* 3 同学生（現 日建設計 構造・設備事務所）

* 2 同学生（現 小川テント株式会社 建築設計部）
* 4 小川テント株式会社 建築設計部

4. 計算方法および実測結果

1) 室内外温湿度分布

(図-1)は、1990年1月26日～1月29日の室内外温湿度状態を示したものである。この4日間は最も寒く、外気温度はいずれの日も氷点下であり、最高で -1.1°C 、最低では -19.6°C 、平均外気温度は -11.6°C とかなり低かった。また外気湿度は、最高 67.5% (絶対湿度 0.0008 kg/kg(DA))、最低 42.0% (0.0011 kg/kg(DA))平均 57.1% (0.0009 kg/kg(DA))と、例年に比べ 20% 程度低かった。

一方、室内温湿度は、最高 18.5°C 、 48.5% (0.0064 kg/kg(DA))、最低 0°C 、 28.0% (0.0011 kg/kg(DA))、平均 9.4°C 、 39.0% (0.0028 kg/kg(DA))であり、湿度が低く空気が乾燥した状態である。また図から、日中の暖房運転時と夜間の暖房停止時の温度差が大きく2分していることがわかる。

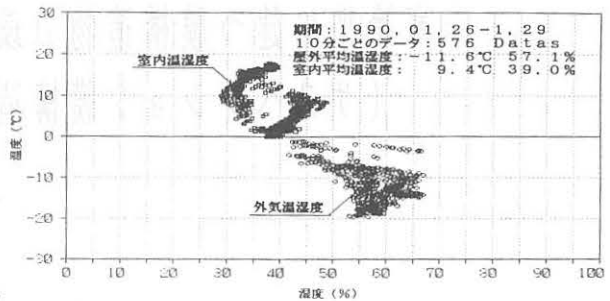
2) 外気温湿度と室内温湿度

(図-2)は、1990年1月27日の外気温湿度と室内温湿度、全日射量、透過日射量の1日の変化をグラフに示したものである。この日は真冬日で外気温度は日中でも -5.0°C までしか上がらず、日の出前後の午前7時が最も低く -19.6°C まで下がる。室内温度も日中の暖房運転時には、 $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ を保っているが夜間は外気温の影響を受け 0°C まで下がっている。湿度は室内外とも低く外気湿度は 60.0% (0.0009 kg/kg(DA))前後、室内湿度は $30\sim 45\%$ ($0.0023\sim 0.0030\text{ kg/kg(DA)}$)である。

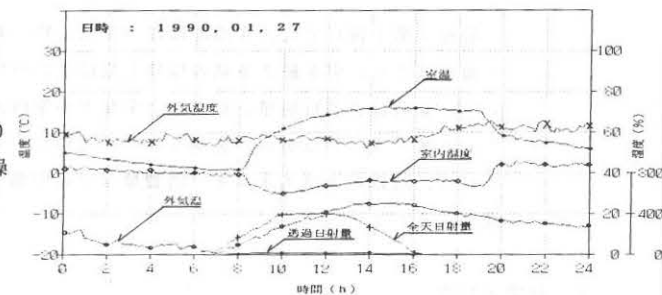
3) 膜表面温度と結露

(1) 実測結果

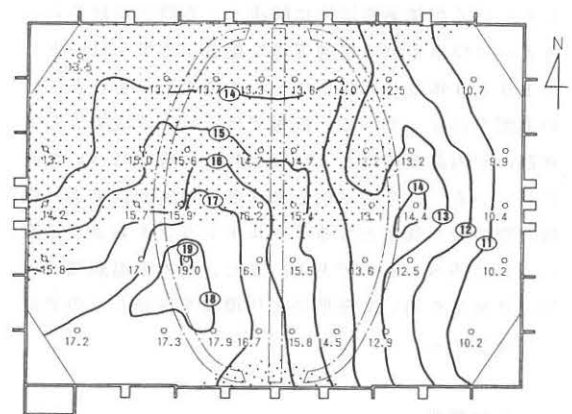
(図-3)は、1990年2月14日午後2時の内膜表面温度分布図である。この日は快晴で外気温度が 2.0°C まで上がったため外膜表面温度は最高 15.0°C 、内膜表面温度は 19.0°C となっている。日射の影響を受ける南西側の温度が高く、北東側に行くにしたがい温度が下がっていることがわかる。また同じ時刻の外膜内表面の結露状態を、図中に示した。日射の影響を受け南側表面は、結露が殆どなく乾いた状態であるが、北側および西側表面では結露が内膜に流れ落ちており、日向と日影の差が見られる。南側の外膜表面温度は1



(図-1) 室内外の温湿度分布

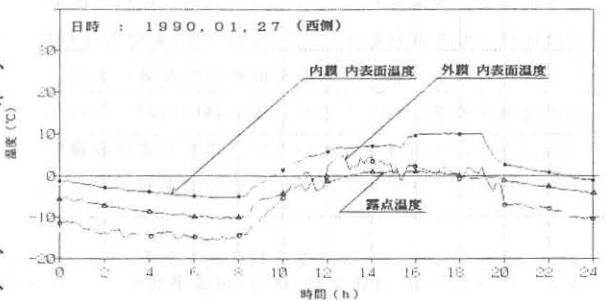


(図-2) 室内外温湿度分布



註) 1) 実測日時 1990. 2. 14 (14:00)
2) 太陽高度 $33^{\circ} 55'$ 、方位角 $5^{\circ} 18'$
3) \square 部は外膜結露部分

(図-3) 内膜表面温度および外膜結露状況(14:00)



(図-4) 膜表面温度(西側)

2.5℃とかなり高かった。この日の外気湿度は45～60% (0.0018 kg/kg (DA))、室内湿度は30～50% (0.0123～0.0032 kg/kg (DA)) 程度であった。

(2) 膜表面温度と露点温度の計算

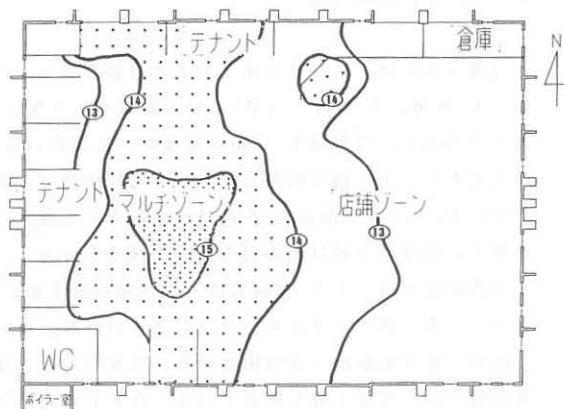
室内温湿度、および内膜、外膜内表面温度の実測値をもとに、膜表面の結露発生について検討し、実測値と比較した。なお水蒸気分圧は、膜面温度が0℃以上の場合と、膜面が凍結している0℃以下の場合に分けて計算した。計算式は、Wexler-Hylandの飽和湿り空気分圧 P_s から、ニュートンラプソン法を用いて室内空気の実測値(θ_r, ϕ)の露点温度 θ'' を求め、実測値と比較した。

(3) 実測値および計算結果

(図-4)は、1990年1月27日の西側の外および内膜表面温度の変化を示したものである。膜構造において二重膜の密閉構造は施工的に不可能であり、二重膜内は半密閉の状態になっている。このため熱貫流抵抗は低くなる。外膜内表面温度は、日中でも5℃までしか上昇せず、露点温度以下になっており結露常時が発生していた。さらに夜間は温度が下がり、午前7時には外気温度は-19.6℃となり、外膜表面温度も-15.0℃になっている。夜間および日中でも膜面温度が低いと発生した結露水が凍結する。一方、日中暖房運転時、内膜温度は3～10℃程度で一日を通じ室温と平行に変化し、いずれの時間も露点温度以上で、室内への水滴などの落下はない。膜構造物の場合、冬期の結露発生は免れることはできず、結露の対策として二重膜は不可欠である。また、二重膜内の水抜きも考慮しなくてはならない。

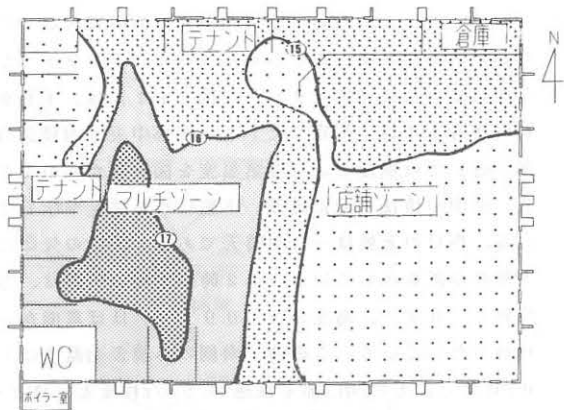
4) 室内水平面温度分布

(図-5)～(図-7)は1990年2月14日の午前10時30分、午後2時30分、6時30分の各時間での室内水平面温度の分布状態を示したものである。測定値は、各々のポイントで、床面から高さ1.5mでの温度を示している。いずれの時間でも、建物西側中央付近が最も高い温度を示しており、15～18℃程度となっている。また建物南東側は常に低く、11℃～15℃程度となっている。これは、ファーンエスの吹き出し位置が、建物の西半分に集中していることや、魚肉類の保存ケースが東側にあることなどによる影響が考えられる。



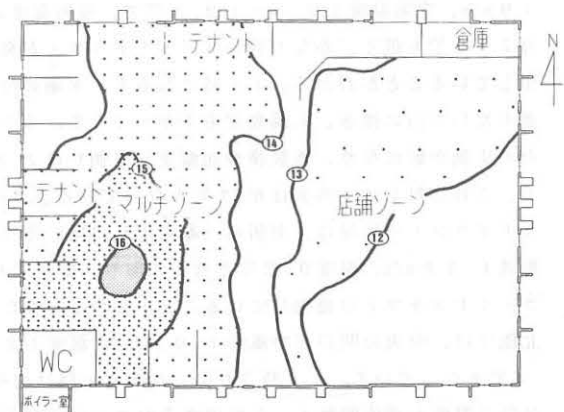
註) 実測日時1990, 2, 14 (10:30)

(図-5) 室内水平面温度分布 (10:30)



註) 実測日時1990, 2, 14 (14:30)

(図-6) 室内水平面温度分布 (14:30)

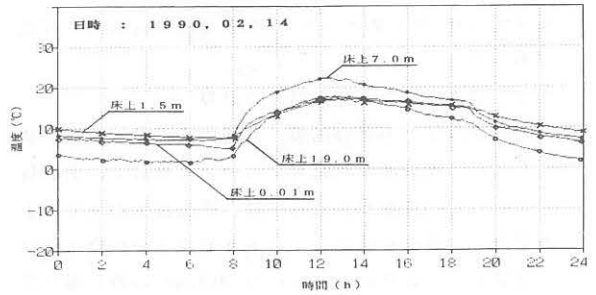


註) 実測日時1990, 2, 14 (18:30)

(図-7) 室内水平面温度分布 (18:30)

5) 室内垂直温度分布

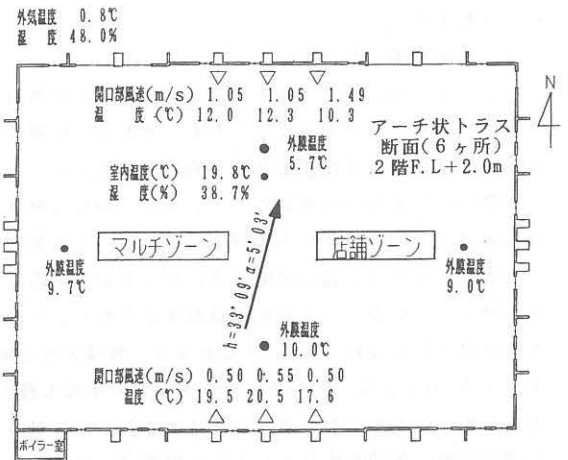
(図-8)は、1990年2月14日の高さ0.01m, 1.5m, 7.0m, 19.0mの温度データを示したものである。日中は7.0mの温度が、常に高い値を示しており、12時半頃最も高い23℃程度まで上昇している。0.01mと1.5mは日中ほとんど温度差が無く、温度の上昇は他の点と比べて緩やかである。12時前後では、19.0mもほとんど同じ温度まで上昇している。各データとも、ファーンエスのON、OFFに対する反応がはっきり出ており、ONに対しては、8時頃全点一斉に上昇し始めている。OFFに対しては、7.0m, 0.01mで19時頃に変化がみられる。



(図-8) 室内垂直面温度分布

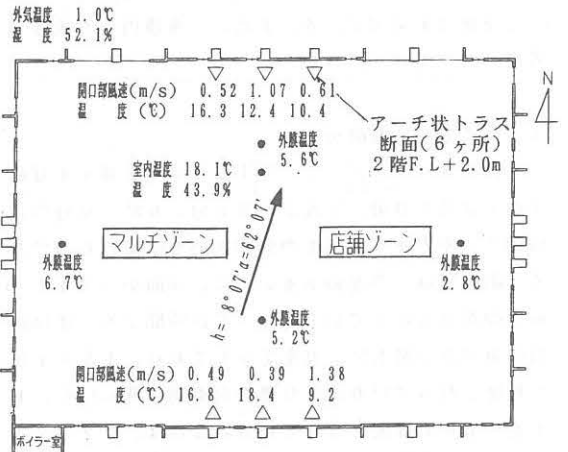
6) コールドドラフト

メインアーチの三角トラス内部には内膜は付いていないため冬期には、ここから”コールドドラフト”が発生している。(図-9)~(図-11)は、1990年2月14日に測定したトラス内部中央(内膜開口部付近)での風速および空気温度を図示したものである。図中の値は上段に風速、下段に空気温度を示している。当日の天候は一日中晴天であり、図中の矢印は太陽の位置を示している。12時の太陽の位置は、方位角 $5^{\circ}03'$ 、高度 $33^{\circ}09'$ で、ほぼ真南から日が当たっている。この時、南側の外膜表面温度は 10.0°C で、どの開口部も風速 0.5 m/s 程度と、ほとんど無風状態である。一方北側は、日影になっており、外膜の温度も 5.7°C と、南側よりも 4.3°C 低い温度となっている。またどの開口部も、風速 $1.05\sim 1.49\text{ m/s}$ 、空気温度 $10.3\sim 12.3^{\circ}\text{C}$ で、室内温度より $7\sim 9^{\circ}\text{C}$ も低く、かなり強いコールドドラフトが発生していることがわかる。16時になると、太陽の位置もだいぶ西に傾き、太陽高度も下がってくる。このため東側が影になり、外膜表面温度(東側)は 2.8°C 、これに対して、西側は 6.7°C となっている。コールドドラフトの状況は、南側の一番東よりの開口部で、風速 1.38 m/s 、温度 9.2°C となっており、南側でもコールドドラフトが発生していることがわかる。また北側では、中央の開口部で風速 1.07 m/s 、温度 12.4°C となっている。17時30分になると太陽は沈み、外膜の温度も全体的に $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度下がり、コールドドラフトは、北側中央の開口部で、風速 1.0 m/s 、温度 9.0°C となっているが、他の部分はあまり強く生じ



註) 1) 実測日時1990, 2, 14 (12:00)
2) 太陽高度 $33^{\circ}09'$ 、方位角 $5^{\circ}03'$

(図-9) 内膜開口部の微風速、空気温度(12:00)



註) 1) 実測日時1990, 2, 14 (16:00)
2) 太陽高度 $8^{\circ}07'$ 、方位角 $62^{\circ}07'$

(図-10) 内膜開口部の微風速、空気温度(16:00)

ていない。以上の結果より、コールドドラフトは外膜表面から発生しており、内膜を付け、内膜表面温度を上げることで室内側のコールドドラフトを防げることがわかった。さらに、内膜を隙間なく取り付ければその効果はかなり期待できる。

7) 室内環境評価

PMVおよびPPDは実測データより、計算で求めた。また、膜面からの透過日射量を考慮するため、人体の日射吸収率を0.5としている。その他の定数は、アクティビティレベル2.22 (met)、代謝量1279.3 (W/m²)、外部に対する仕事量20.0 (kcal/h)とした。

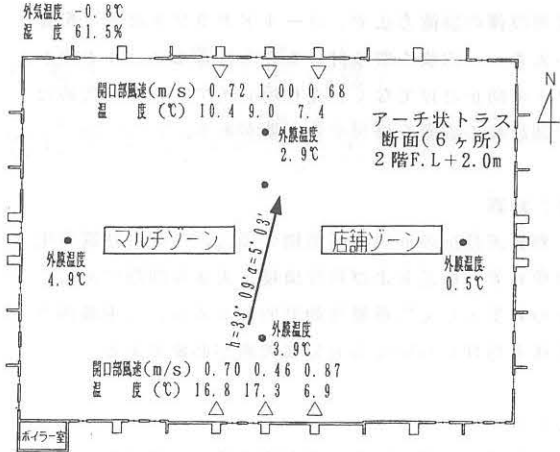
(2) 計算結果

(図-12)は、1989年12月30日から1990年1月5日の7日間のPMV、PPD、MRTを、膜面および、壁面温度、室内温湿度等の実測データより、計算で求めたものである。また、(図-13)は、1990年1月5日、1日分の値である。上段にPMV、中段にPPD、下段に実測データ(室内温湿度、全天・透過日射量)とMRTを示している。また、PMV、PPDは、服装の個人差を考慮して、着衣熱抵抗1.0、1.5、2.0 (clo)の場合で求めている。7日間のデータの動きを見ると、室内温度は最低の3.0℃程度から最高の21.0℃の間で変動している。3日目、4日目の室温が低いのは、店舗が休業し、暖房が入っていないためである。湿度は夜間暖房を切ると高くなり、最高48.0%、日中暖房を入ると湿度は下がり、最低38.0%程度となっている。湿度は、暖房のON、OFFで急激に変動している。着衣熱抵抗が2.0 (clo)か1.5 (clo)であれば、PMVの値は+1~-1の範囲で、PPDも25%以下なのでほぼ”快適”な状態となっている。しかし、着衣熱抵抗を1.0 (clo)で計算すると、PMVの値が0以下の日も多く、明け方は最低-1.8程度まで下がっている。また、PPDも最高74%程度まで上がっており、”かなり寒い”状態といえる。

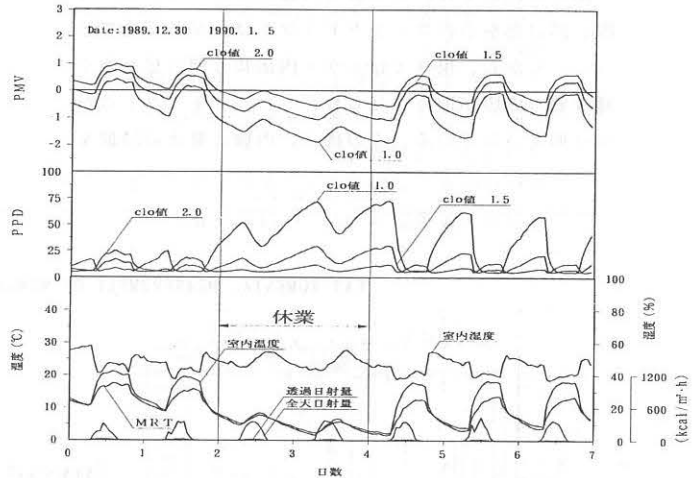
5. まとめ

1) 室内温湿度

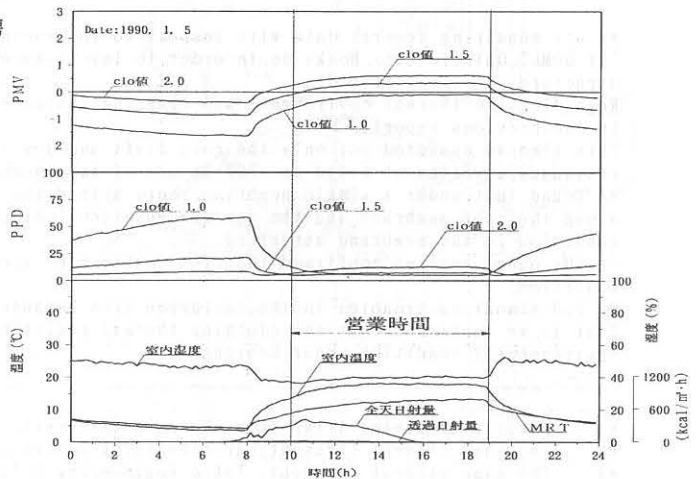
室内温湿度の分布状態および、時経列による変化は、



(図-11) 内膜開口部の微風速、空気温度(17:30)



(図-12) 冬期のPMV, PPD (1989, 12. 30-1990, 1. 5)



(図-13) 冬期のPMV, PPD (1990, 1, 5)

暖房設備の設置方法や、コールドドラフトによる影響が大きい。内膜を取り付けることによるコールドドラフトの防止だけでなく、売り場レイアウト等を含めた空調設備の設置を検討する必要がある。

2) 結露

熱貫流抵抗の低い膜構造物の場合、冬期の結露発生は免れず、構造および居住環境上大きな問題である。その対策として二重膜は効果的であるが、二重膜内の水抜き処理についても十分な考慮が必要である。

3) コールドドラフト

一般的に、居住域内で温湿度条件を一定にしたとき airflow は 0.5 (m/s)程度までとされている。今回のアーチ部での測定では、この値を大幅に上回っていた。実際、開口部からのコールドドラフトはかなり不快であった。しかし、現在ではトラス内部にも開口部を塞ぐ様な形で内膜が取り付けられ、コールドドラフトはかなり抑えられている。この様に、内膜と壁との隙間を

極力少なくすることによって、コールドドラフトはかなり防ぐことができる。

3) 室内環境評価

今回は、室内温熱環境の評価方法として、PMVを用いたが、寒冷地の通常の服装であれば、膜構造でも十分な快適性が得られることがわかった。また、今回は一重膜との比較は行っていないが、二重膜にしたことで、膜面からの冷ふく射熱の低減に十分効果があるものと思われる。

[参考文献]

- 1) 膜構造物の環境実測(夏期) 佐野、田中ほか
日本膜構造協会 膜構造研究論文集'90
- 2) 膜構造物の温熱環境に関する研究(その1)~(その9) 佐野、井上ほか
日本建築学会学術講演会梗概集(九州)平成元年10月
日本建築学会学術講演会梗概集(中国)平成2年10月
日本建築学会学術講演会梗概集(東北)平成3年9月
- 3) 膜構造物の温熱環境に関する研究(その1)~(その6) 佐野、井上ほか
空調和衛生工学会学術講演論文(東海)平成元年10月
空調和衛生工学会学術講演論文(北海道)平成2年10月
空調和衛生工学会学術講演論文(金沢)平成3年11月
- 4) 空調和衛生工学便覧I

ENVIRONMENTAL MEASUREMENT OF MEMBRANE STRUCTURE. (WINTER)

Takehito SANO^{*1}
Ayako IMAI^{*2}
Yukako OGAWA^{*3}
Kohtaroh TANAKA^{*4}
Yoshiharu TANAKA^{*4}

SYNOPSIS

We are measuring several data with respect to the thermal environment of membrane structure at "MY DOME", Obihiro City, Hokkaido, in order to investigate most suitable environment for membrane structure.
Regarding the thermal environment and lighting characteristics for membrane structure, we described in the previous reports.
This time, we measured not only the cold draft and dew condensation in winter, but also evaluated the residence environment based on PMV in use of same membrane structure.
We found that, under a single membrane, there arose the cold draft with the speed of 1.0m/s downwards along the roof membrane and the dew condensation inside, which did not give a good environmental condition in the membrane structure.
On the other hand, we confirmed that, the double membranes had an effect on the environmental condition.
We had almost no troubles in the residence area because they were protected in the double membranes. That is, we confirmed that the clothing thermal resistance with 1.0% and 1.5% gave a comfortable environmental condition under heating.

*1 Faculty of living Arts, Showa Women's University
*2 The same student (Present; Architectural Design Department, Ogawa Tent Co., Ltd)
*3 The same student (Present; Tokyo Engineering Office, NIKKEN SEKKEI LTD)
*4 Architectural Design Department, Ogawa Tent Co., Ltd.