

2. 5 まとめ

住宅等建物の外側に、膜を設置(外皮膜)することで、建物に対する日射遮蔽効果および日射蓄熱低減によるヒートアイランド現象の緩和が期待できる。本年度は、小型模型を用いて夏期における日射遮蔽性能の把握を行った。外皮膜を設置した模型では、日中の屋根表面温度、模型内部気温の上昇が抑制されることを確認した。

RC造の既存戸建住宅の屋上に外皮膜を設置し、日射遮蔽効果、ヒートアイランド緩和効果の実測を行った。外皮膜を設置することにより、屋上に達する日射量が80%低減され、屋上表面温度の上昇が抑制されることを確認した。また、晴天日において、外皮膜無しに比べて、室内への熱流量が80%程度削減されることを確認された。既存住宅の測定では、騒音測定を行い、外皮膜の有無の影響について実測を行った。その結果、外皮膜設置時に、風、雨の影響による騒音の増加はみられなかった。

ヒートポンプを設置した仮設建物2棟の一方に外皮膜を設置し、8~9月に温熱環境、消費エネルギー量の実測を行った結果、外皮膜有りの冷房消費電力は、外皮膜無しに比べて43%程度削減されることを確認した。また、日中の室内平均放射温度では、外皮膜無しが34℃に達するのに対し、外皮膜有では、29℃以下に保たれることを確認した。

以上の結果より、外皮膜は日射遮蔽による冷房負荷削減効果と、ヒートアイランド緩和効果を有することを確認した。

第3章 膜の多重・複層化による 断熱性能向上効果の検証

3. 膜の多重・複層化による断熱性能向上効果の検証

膜屋根面の断熱性を向上するためには、多重膜化が現実的であると考えられる。そこで、10cmの空気層を膜に挟んだ二重膜・三重膜屋根模型と、気泡衝撃緩衝材(厚1cm)を膜間に挟んだ複層膜模型を作成し、断熱性能向上効果について、検証を行った。

3.1 多重膜の断熱性能の測定

1) 測定概要

明治大学理工学部4号館屋上に小型模型を3つ設置し、多重・複層化した膜の熱環境性能の検証を行う。実測概要を図3-1-1に、測定ケースを表3-1-1に示す。模型寸法は、縦900×横900×高さ600mmで、壁、床材は合板である。5ケースの測定により、膜の多重・複層化の効果検証、ETFE(エチレンテトラフルオロエチレン)フィルムの性能検証を行った。複層膜とは、断熱性、透光性がある気泡衝撃緩衝材を膜の間に挟んだものである。二重膜①では屋外側に表1のA種膜、室内側にI種膜を用いたが、二重膜②ではどちらもA種膜を用いて、さらに膜間の隙間にテープを貼り、空気層の気密性を高めたものにした。三重膜では屋外側と中膜にはA種膜、室内側にI種膜を用いた。ETFEフィルムとは、日射透過率が約90%と高く、透明な膜材料である⁴⁾。二重膜①、二重膜②、ETFE二重膜を図3-1-2から図3-1-4に示す。温度測定点は、東・西・南・北の壁、床、屋根の外側・内側表面温度、模型内部中央気温である。同時に外気温と全天日射量、屋根を透過する日射量を測定している。測定は5分間隔で行った。



図 3-1-1 実測状況

表 3-1-1 小型模型の測定ケース

| case | 模型A | 模型B | 模型C |
|--------|-----|---------|---------|
| case-1 | 単層膜 | 二重膜① | 複層膜 |
| case-2 | 単層膜 | 二重膜① | 二重膜② |
| case-3 | 単層膜 | 三重膜 | 二重膜② |
| case-4 | 単層膜 | ETFE二重膜 | 二重膜② |
| case-5 | 複層膜 | ETFE二重膜 | ETFE三重膜 |



図 3-1-2 二重膜①模型



図 3-1-3 二重膜②模型



図 3-1-4 ETFE 二重膜模型

2) 測定結果

case-1 と case-3 から case-5 の結果を図 3-1-5 から図 3-1-8 に示す。測定結果には模型内部中央気温と夜間の内膜内側表面温度を示す。日射量の測定結果より、各屋根の日射透過率は単層膜で 12%，二重膜①で 4%，二重膜②で 3%，三重膜で 1%，複層膜で 5%，ETFE 二重膜で 45%，ETFE 三重膜で 33%であった。多重・複層化することで日射透過率は大きく減少する。ETFE フィルムでは多重化しても日射透過率は高い値を示した。

多重・複層化した膜屋根では、昼間は透過日射が多いものほど内部気温は上昇することがわかる。特に ETFE フィルムは 40℃程度まで上昇し、A 種・I 種膜を用いたものに比べ、約 25℃高くなった。夜間の模型内部中央気温では、単層膜

に比べ、多重・複層化したもののほうが0.5～1.0℃程度高くなり、若干だが多重・複層化の効果が見られる。複層膜は単層膜よりは高いが、二重膜より低くなった。二重膜②とETFE二重膜を比較しても内部中央気温には差は見られない。模型内部と外気温との温度差が小さいため、断熱性能の差が表れなかったと考えられる。

模型内部気温と同様、多重・複層化したものほど、室内側の内膜の表面温度は高くなり、その差は0.5～2.0℃程度である。多重化し、断熱性能を高くしたことにより、模型内部と模型屋根内側表面を高い温度にすることができた。

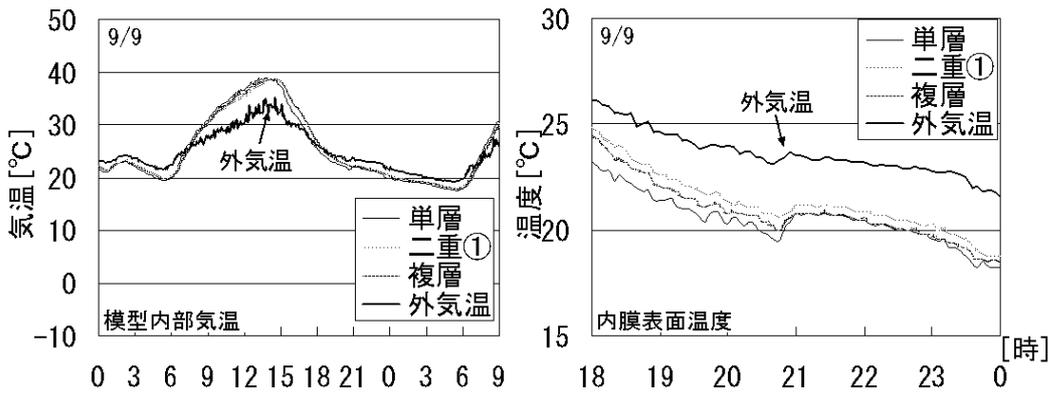


図 3-1-5 case-1 の測定結果

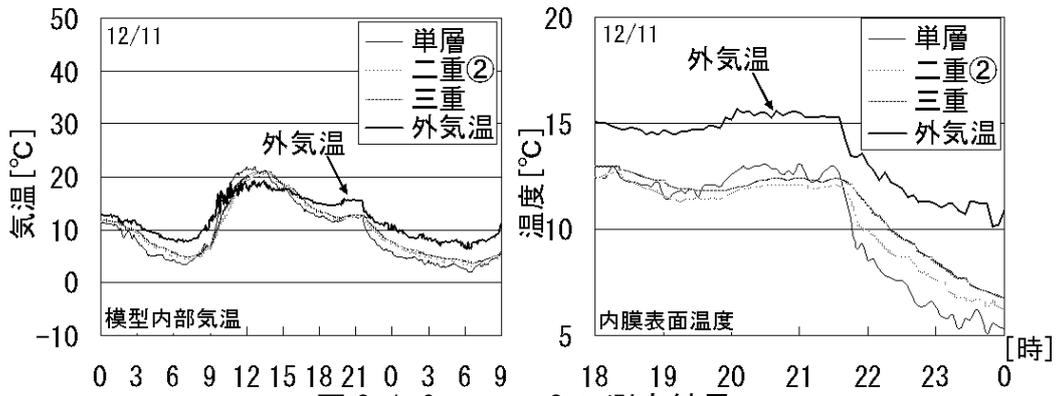


図 3-1-6 case-3 の測定結果

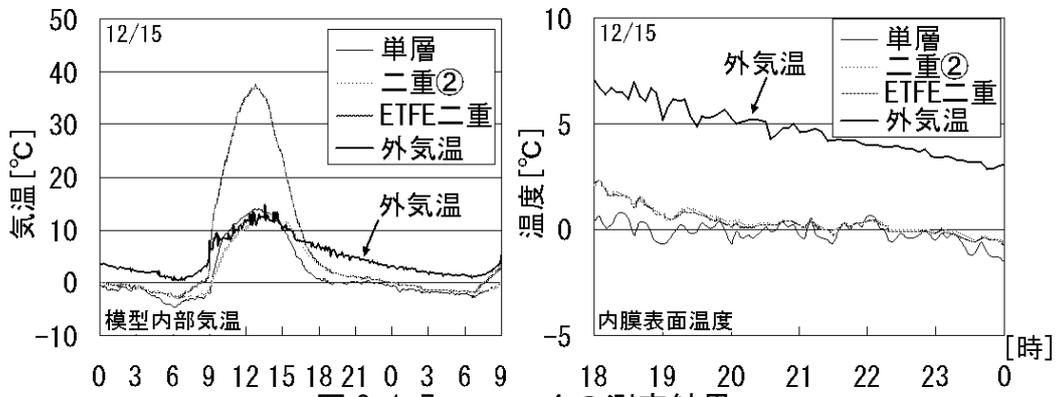


図 3-1-7 case-4 の測定結果

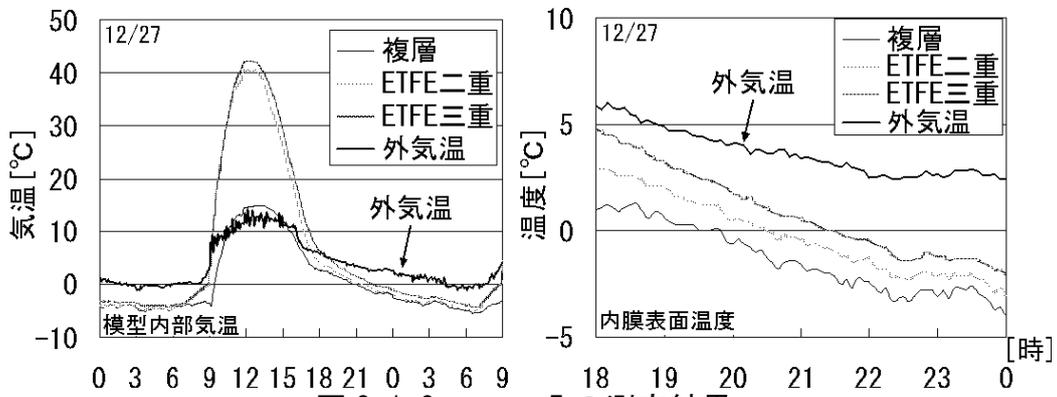


図 3-1-8 case-5 の測定結果

2) 小型模型による熱貫流率測定実験

各膜屋根の熱貫流率を実測から算出するために模型内に 100W の電球を設置し、外気温が大きく変化しない夜間に電球を点灯し、模型内部気温と外気温に大きな差を生じさせ、実験を行った。模型の壁、床には断熱材としてグラスウール 50mm を貼り付け、屋根以外からの熱損失を減少させた。実測状況、模型内部等を図 3-1-9 に、模型の外観を図 3-1-10~3-1-12 に示す。

実験は、表 3-1-1 の case-2 から case-5 で計 4 回行った。実験中の模型内部気温と外気温の温度差を図 3-1-13 に示す。外気温との温度差が大きいものほど断熱性能は高く、単層膜で 10℃、複層膜で 16℃、二重膜①で 17℃、二重膜②で 19℃、三重膜で 20.5℃となった。ETFE フィルムは透過率が高いため比較できないが、ETFE 二重膜で 16℃、ETFE 三重膜で 18℃となった。

実験結果を用いた熱貫流率の算出方法は以下の 3 通りである。a)式(3.1.1)の熱収支からの算出、b)式(3.1.2)を用いた膜屋根の熱流量からの算出、c)式(3.1.3)~(3.1.5)を用いて膜屋根の表面温度からの算出である⁵⁾。0 時から 6 時の間で 30 分毎に熱貫流率を算出した。



図 3-1-9 複層膜・ETFE 二重膜・ETFE 三重膜と模型内部

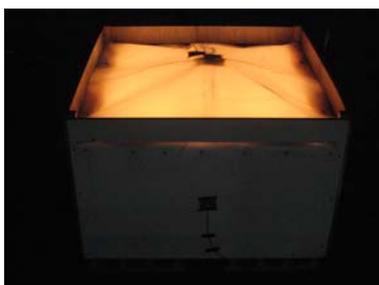


図 3-1-10 複層膜模型



図 3-1-11 ETFE 二重膜模型



図 3-1-12 ETFE 三重膜模型

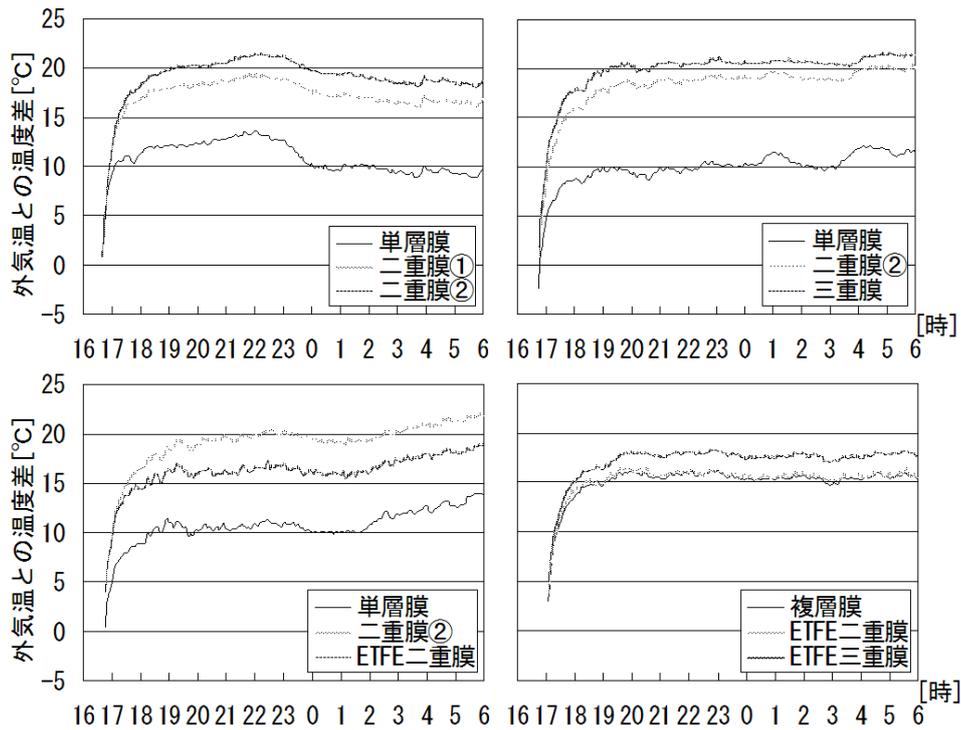


図 3-1-13 実験中の模型内部気温と外気温の温度差

表 3-1-2 熱貫流率算出式

$$H = \sum KA(\theta_i - \theta_o) + K_m A_m (\theta_i - \theta_o) \quad (3.1.1)$$

$$q = K_m (\theta_i - SAT) = \alpha_i (\theta_i - \theta_{si}) \quad (3.1.2)$$

$$q = (1/R_t') (\theta_i - \theta_{so}) = \alpha_i (\theta_i - \theta_{si}) \quad (3.1.3)$$

$$R_t = R_t' + (1/\alpha_o) \quad (3.1.4)$$

$$K_m = 1/R_t \quad (3.1.5)$$

H : 投入熱量[W] K : 各部位の熱貫流率[W/m²K]
 K_m : 膜屋根の熱貫流率[W/m²K] A : 各部位の面積[m²]
 A_m : 膜屋根の面積[m²] θ_i : 模型内部気温[°C]
 θ_o : 外気温度[°C] q : 熱貫流量[W]
 SAT : 相当外気温度[°C] R_t : 熱貫流抵抗[m²K/W]
 α_i : 室内側総合熱伝達率(9W/m²K)
 α_o : 屋外側総合熱伝達率(25W/m²K)
 θ_{si} : 膜の室内側表面温度[°C]
 θ_{so} : 膜の屋外側表面温度[°C]

算出した熱貫流率を図 3-1-14 に示す。単層膜以外では、ほぼ一定値となっている。4 回の実験で算出した各膜屋根の熱貫流率を表 3-1-3 に示す。平均の欄は 3 通りの算出方法で得られた熱貫流率を平均したものである。物性値の欄は、膜の物性値と空気層の熱抵抗を 0.1m²K/W として計算した値である。

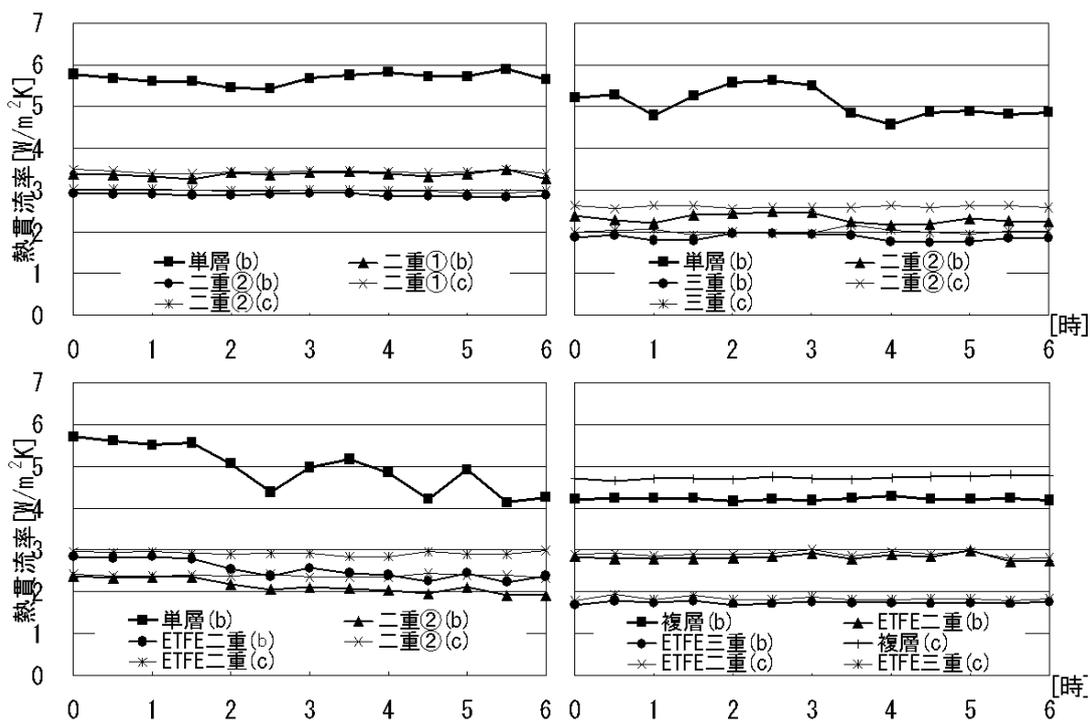


図 3-1-14 実験結果より算出した熱貫流率

表 3-1-3 各膜屋根の熱貫流率

| | 熱貫流率 [W/m ² K] | | | | 物性値 |
|---------|---------------------------|------|------|------|-------|
| | a | b | c | 平均 | |
| 単層膜 | 8.92 | 5.23 | - | 7.08 | 6.42 |
| 複層膜 | 5.36 | 4.22 | 4.72 | 4.77 | - |
| 二重膜① | 4.65 | 3.37 | 3.44 | 3.82 | 3.89 |
| 二重膜② | 3.66 | 2.44 | 2.66 | 2.92 | 3.84 |
| 三重膜 | 3.25 | 1.85 | 2.00 | 2.37 | 2.76 |
| ETFE二重膜 | - | 2.67 | 2.89 | 2.78 | 2.60* |
| ETFE三重膜 | - | 1.73 | 1.84 | 1.79 | 1.70* |

*メーカー測定値

a)の算出方法では、物性値より大きな熱貫流率となっている。b)やc)の算出方法では、物性値より若干小さいが、ほぼ同程度の値となった。物性値との差異は膜が薄く、表面温度差が小さいため、測定誤差が原因であると考えられる。

算出結果より、各膜屋根の熱貫流率は単層膜で 7.0W/m²K、複層膜で 5.0W/m²K、二重膜①で 4.0W/m²K、二重膜②で 3.0W/m²K、三重膜で 2.5W/m²K、ETFE 二重膜で 2.8W/m²K、ETFE 三重膜で 1.8W/m²K 程度であることがわかった。複層膜の熱貫流率は、単層膜と二重膜の間であり、気泡衝撃緩衝材による複層化に比べ、多重化のほうが効果があることがわかる。二重膜①と二重膜②を比較すると、物性値では二重膜①は 3.89W/m²K、二重膜②は 3.84W/m²K

となるが、実験結果では $1.0\text{W/m}^2\text{K}$ 程度の差があった。これは、外膜・内膜ともに A 種膜に変更した効果だけでなく、空気層の気密性を高めた効果が表れたと考えられる。空気層の熱抵抗を大きくすることで断熱性能は向上し、二重膜でも三重膜に近い断熱性能となることがわかった。ETFE フィルムを用いた場合は、ETFE 二重膜が三重膜の熱貫流率と同程度であった。以上より、多重・複層化による断熱性能の向上を確認した。

3.2 ETFE 二重膜・複層膜の断熱性能評価

1) 測定概要

明治大学 4 号館屋上に白色の二重膜、ETFE 二重膜、ETFE 複層膜をそれぞれ設置した 3 つの模型を用意し、屋根部分に膜材を使用した場合における、透過日射量、熱貫流量の違いを比較した。測定機器の概要を図 3-2-1 と表 3-2-1 に示す。模型寸法は、縦・横 900mm、高さ 600mm である。壁、床は合板で、内側には厚さ 25mm のガラスウールを貼り付けてある。壁材の合板の表面には白ペンキを塗り、反射率を高めた。白色二重膜は外膜に A 種膜、内膜には I 種膜を用いた。A 種膜、I 種膜ともに PTFE(ポリ四フッ化エチレン)コーティングという加工がされ、汚れが付着しにくくなっている。A 種膜は屋根材として、I 種膜は内装材として用いられることが多い。白色膜の物性値を表 3-2-2 に示す。ETFE フィルムは、ほぼ透明で断熱性能が高いとされる膜材料である。白色二重膜、ETFE 二重膜の中空層は 100mm とした。

また、ETFE 複層膜には 2 枚の膜の間に計 34 枚、約 100mm の厚さとなる緩衝材を用い複層とした。温度測定点は壁、床、二重膜の外側・内側の表面温度、二重膜中心、模型内部中央、外気温である。屋根表面は日射の影響を避けるため、外側でなく内側の表面温度を用いる事とする。また、全天日射量に加え膜下に日射計を設置し、膜を透過する日射量を測定した。測定は 5 分間隔とした。

熱貫流率の測定では、外気温の変動の小さい夜間に、模型内に取り付けた 40W の電球を点灯し、同様の項目について測定を行った。模型の詳細図を図 3-2-2 に、各膜の詳細図を 3-2-3 から 3-2-5 に示す。



図 3-2-1 測定機器
[小型模型(左上)、CADAC(左下)、外気温(右上)、日射計(右下)]

表 3-2-1 測定機器表

| 測定箇所 | 測定機器 | メーカー |
|----------|---------------|----------|
| 表面温度、外気温 | T型cc熱電対 | 江藤電気株式会社 |
| 日射量 | 小型日射計ML-020VM | 英弘精機株式会社 |
| データロガー | CADAC21 | 江藤電気株式会社 |

表 3-2-2 膜材物性値

| 膜種 | 厚さ [mm] | 質量 [g/m ²] | 熱伝導率 [W/mK] | 日射透過率 [%] | 日射反射率 [%] |
|----|---------|------------------------|-------------|-----------|-----------|
| A種 | 0.77 | 1300 | 0.167 | 12 | 80 |
| I種 | 0.35 | 500 | 0.233 | 22 | 74 |

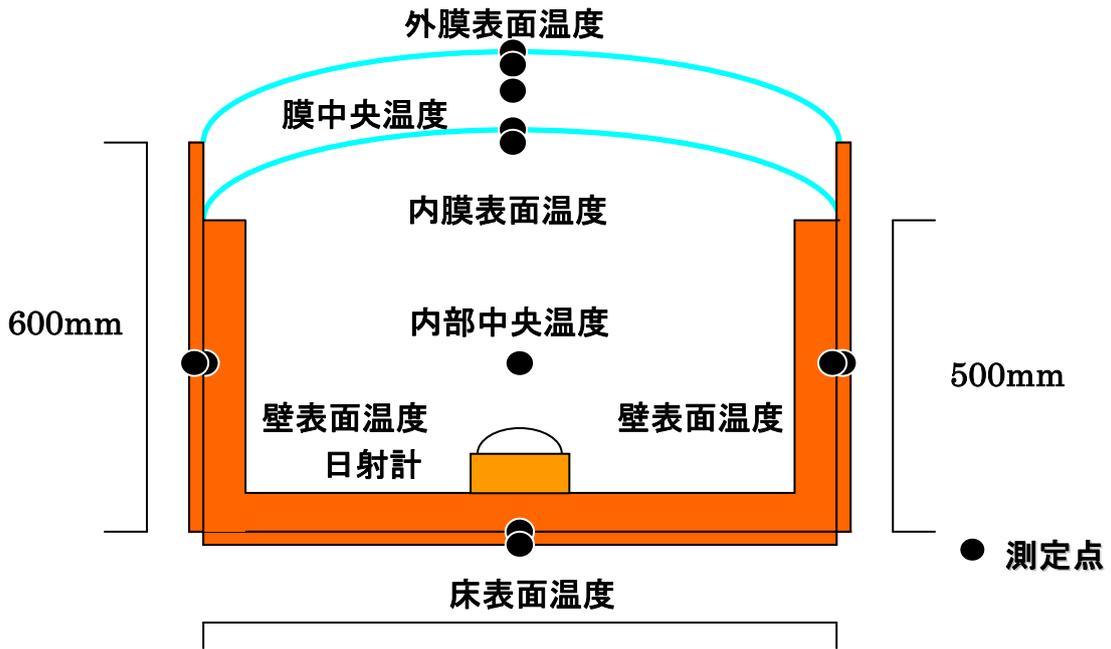


図 3-2-2 模型詳細図

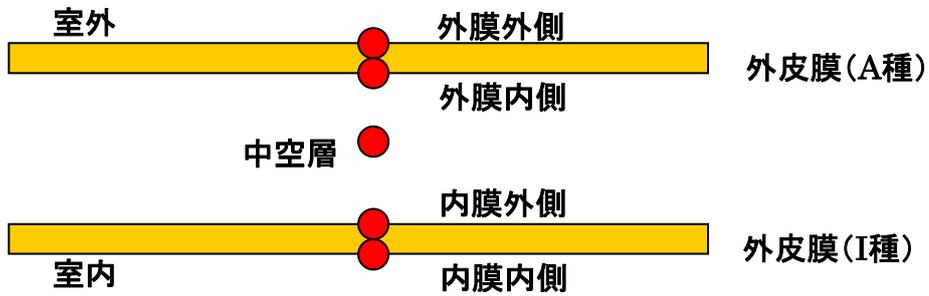


図 3-2-3 白色二重膜 膜詳細図

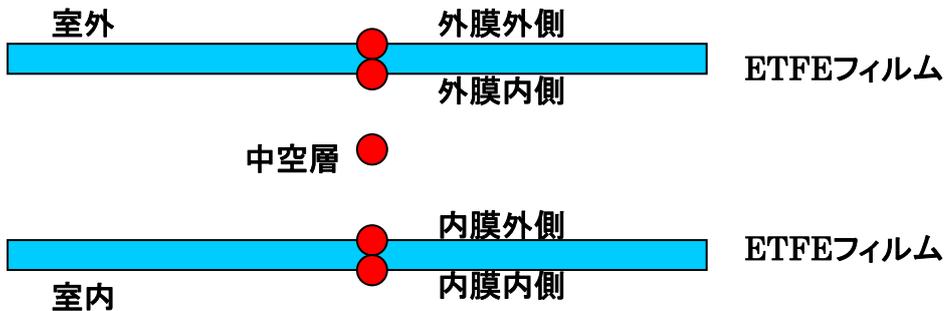


図 3-2-4 ETFE 二重膜 膜詳細図

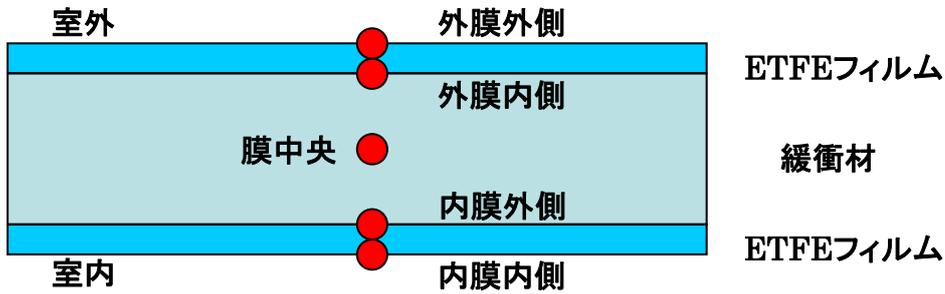


図 3-2-5 ETFE 複層膜 膜詳細図

2.2 測定結果

6月27日晴天日の測定結果を図3-2-6から図3-2-13に示す。また、6月28日曇天日のデータを図3-2-14から図3-2-21に示す。6月26日夜間のデータを図3-2-22から図3-2-26に示す。

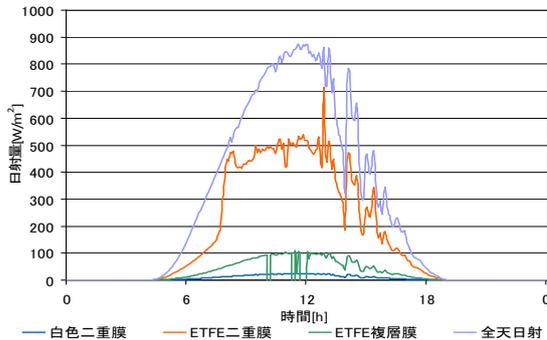


図 3-2-6 日射量

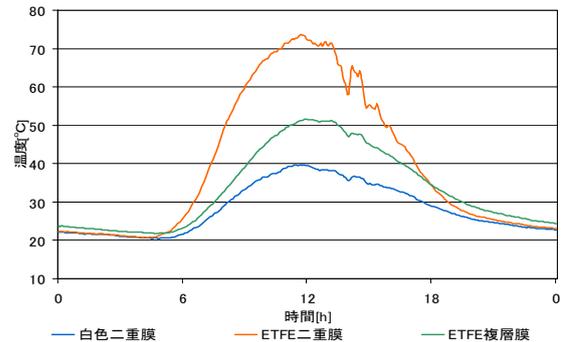


図 3-2-7 室中央温度

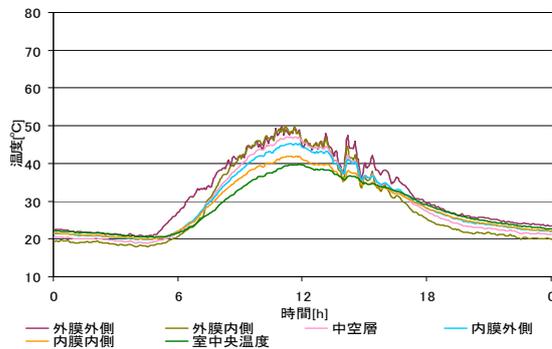


図 3-2-8 膜の温度(白色二重膜)

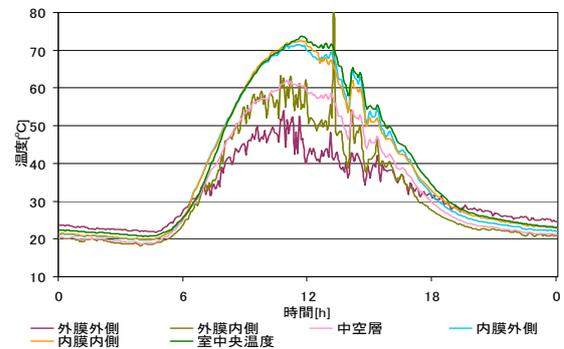


図 3-2-9 膜の温度(ETFE 二重膜)

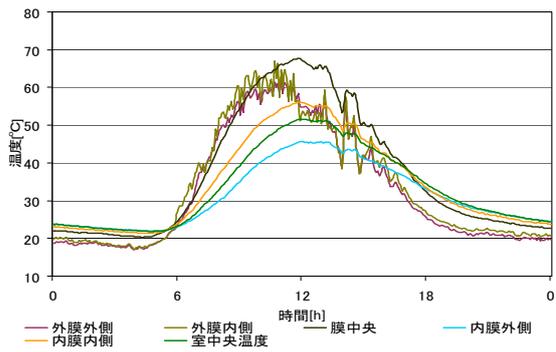


図3-2-10 膜の温度(ETFE複層膜)

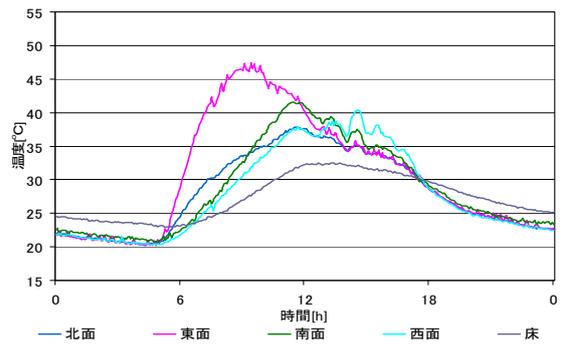


図3-2-11 壁・床面の温度(白色二重膜)

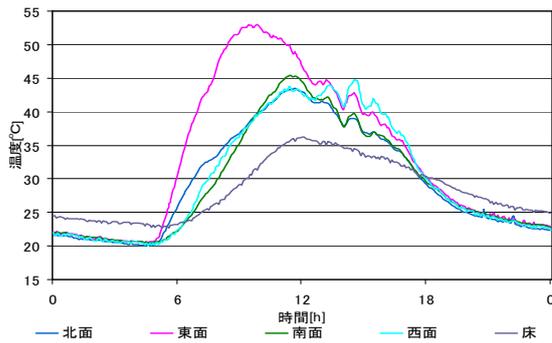


図3-2-12 壁・床面の温度(ETFE二重膜)

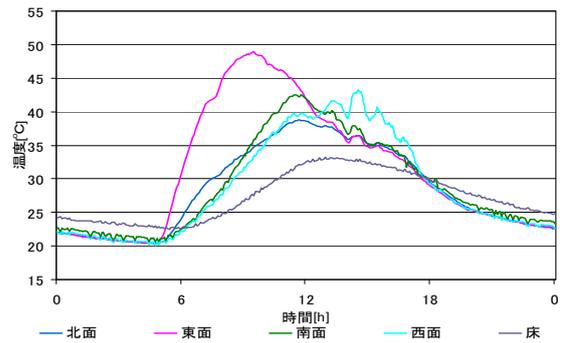


図3-2-13 壁・床面の温度(ETFE複層膜)

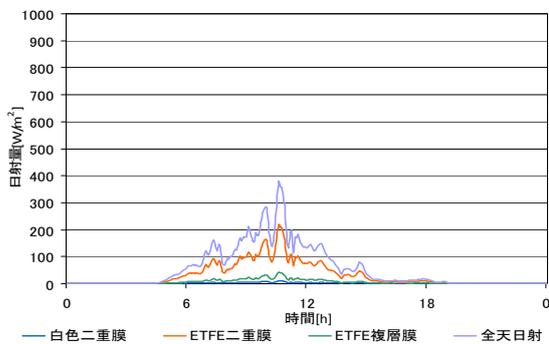


図3-2-14 日射量

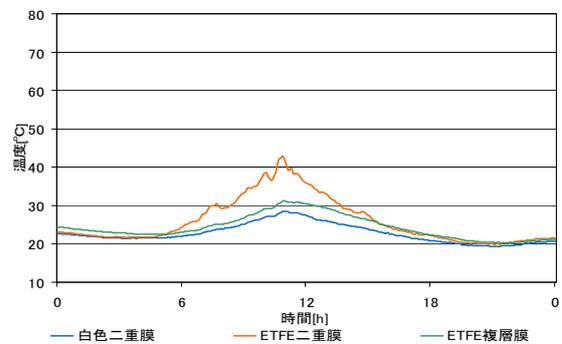


図3-2-15 室中央温度

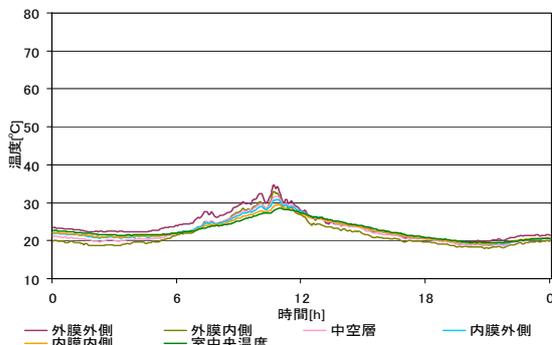


図3-2-16 膜の温度(白色二重膜)

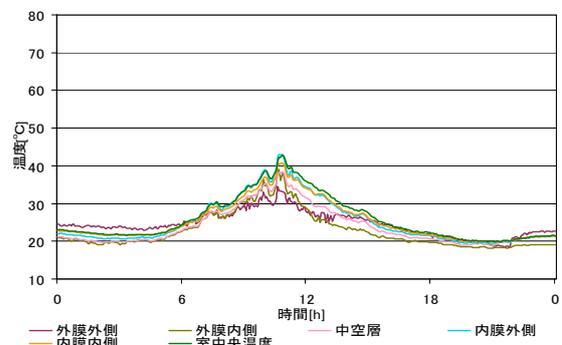


図3-2-17 膜の温度(ETFE二重膜)

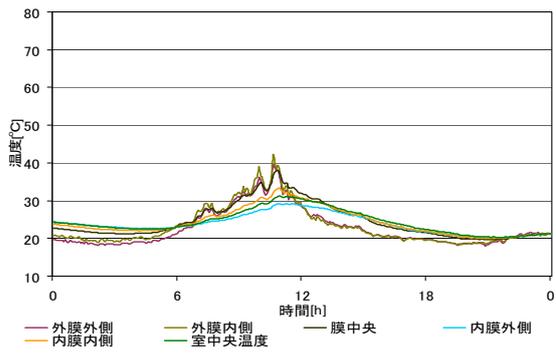


図 3-2-18 膜の温度 (ETFE 複層膜)

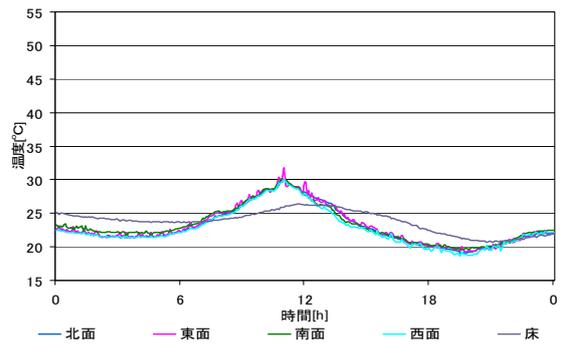


図 3-2-19 壁・床面の温度 (白色二重膜)

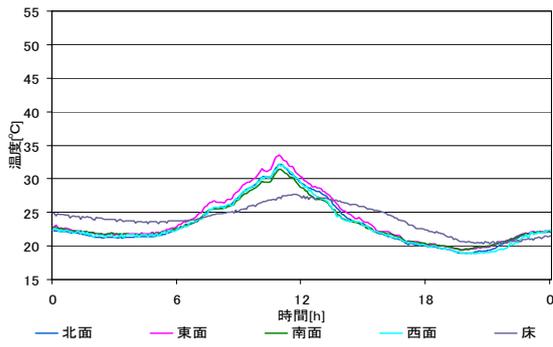


図 3-2-20 壁・床面の温度 (ETFE 二重膜)

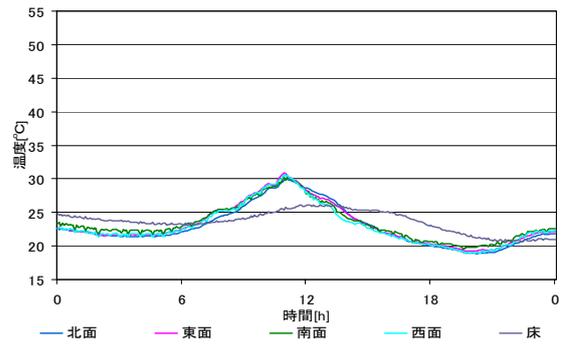


図 3-2-21 壁・床面の温度 (ETFE 複層膜)

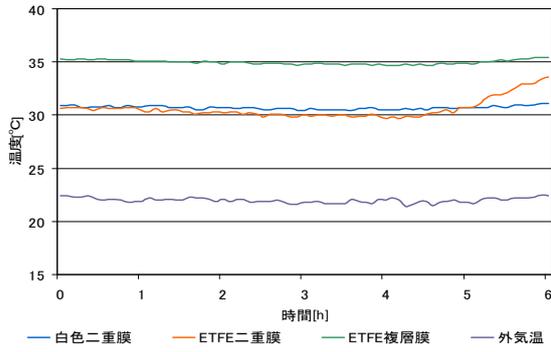


図 3-2-22 室中央温度

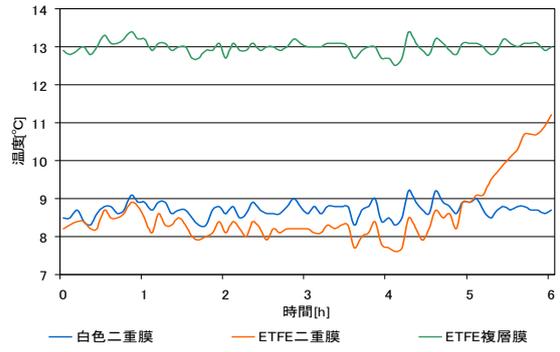


図 3-2-23 室中央温度と外気温の差

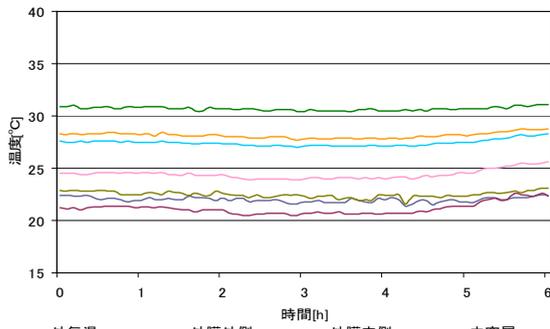


図 3-2-24 膜の温度(白色二重膜)

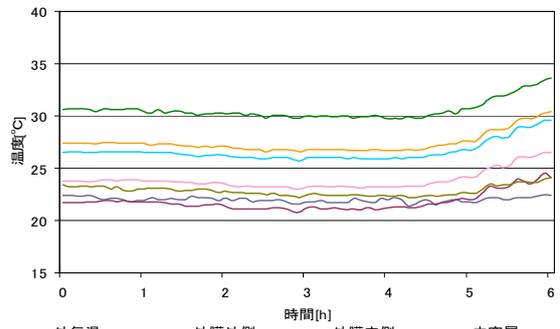


図 3-2-25 膜の温度(ETFE 二重膜)

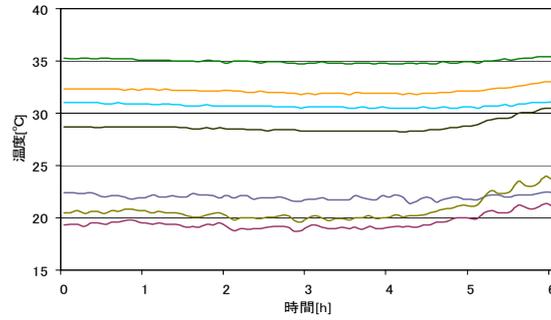


図 3-2-26 膜の温度(ETFE 複層膜)

6月26日夜間の測定結果より、各膜の熱貫流率を算出した。算出は、次に示す a)b)の方法で行った。

- a. 式(3.2.1)より模型内部気温から屋外側膜表面温度までを用いて熱流量を求め、式(3.2.2)、(3.2.3)より熱貫流率を算出する。

$$q = \frac{1}{Rt'}(\theta_i - \theta_{so}) = \alpha_i(\theta_i - \theta_{so}) \quad (3.2.1)$$

$$Rt = Rt' + \frac{1}{25} \quad (3.2.2)$$

$$K = \frac{1}{Rt} \quad (3.2.3)$$

q : 熱流量[W/m²]
 θ_i : 模型中央の温度[°C],
 θ_{si} : 膜内側面の温度[°C],
 α_i : 室内側総合熱伝達率=9[W/m²K]

Rt : 熱貫流抵抗[m²K/W]
 θ_{so} : 膜外側面の温度[°C]
 K : 熱貫流率[W/m²K]
 Rt' : 膜外側面までの熱貫流抵抗[m²K/W]

- b. 式(3.2.4)より、投入熱量から熱貫流率を算出する。

$$H = \sum KA(\theta_i - \theta_o) + K_m A_m(\theta_i - \theta_o) \quad (3.2.4)$$

H : 投入熱量[W]
 A : 壁・床面の面積[m²]
 A_m : 膜の面積[m²]
 θ_o : 膜内側面の温度[°C]

K : 壁・床面の熱貫流率[W/m²K]
 K_m : 膜の熱貫流率[W/m²K]
 θ_i : 模型中央の温度[°C]

夜間照明時の膜内側表面温度を図 3-2-27 に、算出した熱貫流率を表 3-2-3 に、6月27日の日射量の測定結果を図 3-2-28 に示す。また、日射量から算出した日射透過率を表 3-2-4 に示す。

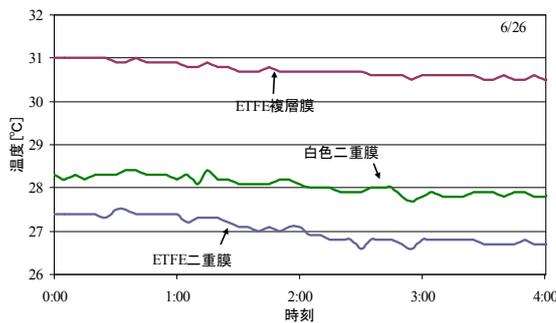


図 3-2-27 夜間照明時の膜内側温度

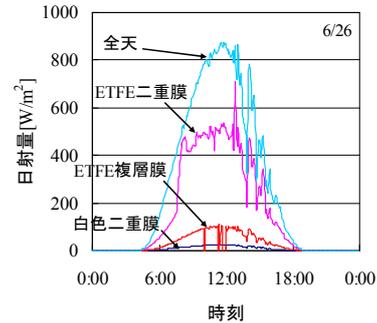


図 3-2-28 模型内部の日射量

表 3-2-3 熱貫流率の比較

| | 白色二重膜 | ETFE二重膜 | ETFE複層膜 |
|---------------------------------|-------|---------|---------|
| 表面温度からの算出結果[W/m ² K] | 2.52 | 3.22 | 1.54 |
| 投入熱量からの算出結果[W/m ² K] | 3.01 | 3.10 | 1.13 |

表 3-2-4 平均日射透過率

| | 白色二重膜 | ETFE二重膜 | ETFE複層膜 |
|----------|-------|---------|---------|
| 日射透過率[%] | 2.7 | 56.5 | 10.7 |

3) 考察

室中央温度：

日中、ETFE 二重膜で 70℃を超えるほど温度が上昇した。白色二重膜は 50℃程度、ETFE 複層膜は 40℃程度まで最大で上昇した。ETFE 二重膜と ETFE 複層膜では、温度差が最大 30℃程度生じ、複層化による断熱性能の上昇が確認された。曇天日の場合においても、最大 10℃以上の温度差が生じ、室内の日射取得量、断熱性能に差がある事が考えられる。

膜の温度：

白色二重膜は、膜外側から室中央にかけて温度が低下していく。日射透過率が非常に低く、日射が模型内に入らないため、ほぼ膜材からの熱の流入のみによる温度変化だと考えられる。ETFE 二重膜は、膜外側部分の温度より内部温度の方が高い結果となった。日射透過量が大きく、断熱性能が膜材の中では高

いため、熱が外に逃げず、内部温度が上昇したと考えられる。ETFE 複層膜では、膜内部で一番温度が高くなるという結果になり、緩衝材の断熱性能と日射遮蔽効果が大きい事を示している。曇天日においても、値は小さいがこの傾向は変わらない。

各面の温度：

ETFE 二重膜は 12 時以降、各面の温度の値が近くなっている。これは、日射透過率が高いため、内部に太陽光が多く流入し、内部の各面、床に直接当たるためだと考えられる。白色二重膜は、日射透過率が非常に低いため、外部から当たる日射によってのみ、各面が暖められる。太陽位置によって、日射が当たる面が異なってくるため、ETFE 二重膜と比較するとより温度差が生じる事となった。

夜間照明時：

ETFE 複層膜は、ETFE 二重膜、白色二重膜と比較し、室中央の温度差が約 3～4℃が生じた。ETFE 複層膜の温度が高いため、断熱性が優れているといえる。膜の温度で見た場合、ETFE 二重膜、白色二重膜の間で違いはあまり見られないが、ETFE 複層膜は、前者よりそれぞれの膜ごとの温度差が大きく、複層化による断熱性能の向上が見てとれる。熱貫流率では、ETFE 複層膜は他の膜と比較しても約 1/2~1/3 程度に減少している事が分かる。

4) まとめ

膜屋根の多層化による断熱性能向上効果について検証を行った。今年度は、日射透過率が高い ETFE 膜を用いて、10cm の空気層を膜に挟んだ二重膜・三重膜屋根模型と、気泡衝撃緩衝材(厚 10cm)を膜間に挟んだ複層膜模型を作成し、模型実験を行った。膜屋根模型内部に、100W の発熱体を設置し、夜間に屋外暴露する簡易的な熱箱法により、熱貫流率の測定を行った結果、単白色二重膜 3.01、ETFE 二重膜 3.10、ETFE 複層膜 1.54W/m²K の結果が得られた。ETFE 複層膜の日射透過率は 10.7%となり、一定の透光率を保ちながら、断熱性能を向上させることが可能であることがわかった。

3. 3 まとめ

10cm の空気層を膜に挟んだ二重膜・三重膜屋根模型と、気泡衝撃緩衝材(厚 1cm)を膜間に挟んだ複層膜模型を作成し、断熱性能向上効果について、検証を行った。

膜屋根模型内部に、100W の発熱体を設置し、冬期夜間に屋外暴露する簡易的な熱箱法により、熱貫流率の測定を行った結果、単層膜 6.42、複層膜 4.77、二重膜 2.6~2.89、三重膜 1.70~2.60W/m²K となり、物性値から求めた熱貫流率とほぼ同等の値が得られた。以上の結果より、多重膜化を採用することにより、断熱性能の向上が可能であることがわかった。

夏期~冬期に同模型を屋外に暴露して、自然室温時の温熱環境を測定した結果、日中の模型室温は、多重膜の日射透過率に依存すること、夜間における多重膜の室内表面温度が、単層膜に比べて 1℃程度高温となることを確認した。この結果から、多重膜化の際には、日射透過率が異なる膜を組み合わせることで透過日射を制御できる可能性があること、暖房をしない場合には、断熱性を改変した効果がほとんど表れないことが示唆された。

日射透過率が高い ETFE 膜を用いて、膜屋根の多層化による断熱性能向上効果について検証を行った。10cm の空気層を膜に挟んだ二重膜・三重膜屋根模型と、気泡衝撃緩衝材(厚 10cm)を膜間に挟んだ複層膜模型を作成し、模型実験を行った。膜屋根模型内部に、100W の発熱体を設置し、夜間に屋外暴露する簡易的な熱箱法により、熱貫流率の測定を行った結果、単白色二重膜 3.01、ETFE 二重膜 3.10、ETFE 複層膜 1.54W/m²K の結果が得られた。ETFE 複層膜の日射透過率は 10.7%となり、一定の透光率を保ちながら、断熱性能を向上させることが可能であることがわかった。