

第7章 結語

7. 結語

環境貢献膜研究会では、環境に貢献する膜構造の開発を目的に、膜構造の環境性能の把握、環境クライテリアの明確化、建築物のエネルギー負荷を削減できる断熱性能の高い膜材料の検討、建築物外皮として利用した際の日射遮蔽効果・ヒートアイランド抑制効果の把握について順次検討を行った。得られた結果を、検討年度ごとにまとめて示す。

7. 1 平成 19 年度の技術開発・研究成果

○膜の熱性能評価方法の検討

膜材料の熱物性値(熱伝導率、日射反射・透過率、長波長放射率、透光率)について、既往の測定方法を検討した結果、熱伝導率、長波長放射率、透光率の測定は、JIS に則って行うことが望ましいことを確認した。日射反射・透過率については、現在 JIS 化が検討されている塗膜の測定法に準ずることが望ましいことがわかった。また、屋外における日射遮蔽性能と夜間放射遮蔽性能の把握を行うためには、小型模型による暴露実験が望ましいことを確認した。

○膜材料の熱性能把握

一般的な膜材料の熱物性値(熱伝導率、日射反射・透過率、長波長放射率、透光率)の現状把握を目的に、物性値の開示状況について調査を行った。その結果、日射反射率が未測定、あるいは非公開であった。従って、今後、環境建材として普及を図るためには、日射反射率の測定・公開が急務であることを確認した。

スーパー膜材の開発目標を明らかにすることを目的に、7種の膜材を対象として日射遮蔽性能の把握を行った。各膜(A~I)の分光反射率は70~90%で、高反射率塗料(塗料白)とほぼ同等の日射反射性能を有しており、膜材がヒートアイランド現象の緩和効果を有していることを確認した。

以上より、現状の膜材が有する熱性能が確認された。次年度は、現状の性能を越えるスーパー膜材の開発を目指す。

○小型模型による温熱環境改善効果の検証

屋外暴露時における膜材の熱環境性能把握を目的に、小型模型を作成し、屋

外暴露実験を行った。モデルは、A：熱箱，B：A+外皮膜，C：膜屋根(Aの屋根を膜としたもの)の三種である。

冬期測定を行った結果，Cの膜屋根モデルの日射透過率は，性能値と同等であることを確認した。また，日中の室内は，透過日射により他のモデルに比べて高温となり，暖房負荷を削減可能であることがわかった。Bのモデル外皮に遮蔽膜を設けるモデルでは，夜間の屋根面における放射冷却の緩和が可能であることがわかった。次年度は，本モデルを用いて，夏期における日射遮蔽性能の把握を行う予定である。

○膜構造建築物のデータベース作成

膜構造建築物については，これまで統計的なデータベースが未整備であった。これまでに建設された膜構造建築物を対象に，約500件の建築年、用途、規模、構造形式、建設地等のデータを整理した。

○膜構造建築物の温熱環境に関する調査

建築後5年以上を経過した恒久膜構造建築物のうち、体育館、室内運動場、プール、工場、通路上屋等を計107件抽出し、施設の管理者を対象に温熱環境に関するアンケート調査を実施した。回答数は58件（回収率54%）であった。調査内容は、用途と使用日数、利用者数、階層などの基本属性項目、冷暖房設備の有無と使用日数、同設備の需要、排気設備の設置状況と夏季高温時の有効性など空調設備に関する項目、天井の有無と高さ、断熱および仕上などの建物仕様に関する項目、夏季と冬季の室内温熱環境および光環境に関する官能評価項目である。冷房設備の設置率は全国平均21%、北海道、東北、北陸が高いのに対して、中国、九州はゼロであった。現在冷房設備がない施設での設置需要は13%、既設を含めても28%で、スポーツ利用中心の体育館では冷房需要が比較的低いことが明らかとなった。一方、暖房設備の設置率は全国平均31%、寒冷地では64%であった。暖房設備のない施設の設置需要は概ね15~20%程度で、冷房よりも設置需要が高いことが明らかとなった。一方、室内温熱環境の官能評価では、集会等の非スポーツ用途の利用が多い施設で、夏季に膜屋根を透過する光や熱によって室内が暑く感じるとの回答が多く、通路や駅プラットフォーム

ムなどの開放型施設では少ない結果となった。膜構造建築物の環境負荷軽減においては、空間特性や用途への配慮が重要である。

○二重膜構造建築物の温熱計測

屋根面の外膜のほか、室内に内膜天井を設ける二重膜方式は、主に冬季の結露対策や音響対策として採用されるケースがあるが、断熱性能を確保する手法としても有効である。そこで、北関東に立地する二重膜構造建築物の温熱計測を実施し、その有効性を検討している。

7. 2 平成 20 年度の技術開発・研究成果

○建物外皮膜の日射遮蔽効果の検証

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。

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。

○膜構造の多重膜化による断熱性能向上効果の検証

昨年度明らかにした膜の熱物性を用いて膜の断熱性能について予備検討した結果、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ことがわかった。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。

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°C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。

○熱負荷解析による膜構造建物の年間冷暖房負荷の試算

1300m²の体育館を対象に、冷暖房熱負荷の数値解析を行った。解析では、各壁面を9面素に分割し、各面素で非定常次元熱伝導、吸収係数による放射解析、室温(1点)との対流熱伝達を連成し、冷暖房負荷を求めた。屋根を仕様は、一般的な鋼板屋根、単層膜、二重膜、三重膜としている。

年間冷暖房負荷は、鋼板屋根790、単層膜960、二重膜755、三重膜655MJ/m²となった。鋼板屋根を基準とすると、単層膜は22%増となるが、二重膜は4%減、三重膜では17%減が可能であることがわかった。今後は、膜構造の二酸化炭素排出量の削減効果について検証する予定である。

○膜構造の環境性能の明確化に関する検討

膜構造の普及促進を図ることを目的に、膜構造の環境性能の明確化について検討を行った。評価対象とした環境性能は、①ヒートアイランド低減効果(高日射反射膜)、②暖冷房負荷削減効果(多層化による高断熱膜)、③照明負荷削減効果(採光膜)、④日射遮蔽効果(遮熱膜)の4項目である。それぞれの項目について、性能評価法をJIS等から選定した。また、CASBEEを参考に、性能値に応じてレベル評価し、利用目的に応じた項目について性能認証を行う案を策定した。性能レベルおよび、認定方法については、次年度継続的に審議することとなった。

○日射制御膜の材料および構法に関する検討

日射制御膜としてフィルムや通気性のメッシュなどを用いる場合には、一般の膜材料(コーティング織布)とは材料の力学的特性が異なるため、その特性に応じた製作および施工が必要である。耐候性に優れたフッ素樹脂フィルムは、近年、海外の大型建築物の外皮によく用いられているが、降伏後の伸びが大きい

く、クリープが大きいいため、空気で膨らませたクッション方式とすることにより伸びを吸収している。ただしクッション方式は送風設備を要する点が課題となる。そこで、送風設備を必要としないテンション方式フィルムパネルを用いた日射制御膜を設計、製作し、縮小試験体による確認実験を行ったうえで、既存建物の屋上に実物大の試験体を設置した。降伏点を超える延伸を施工時に行うことによって、外力作用時の残留変形発生を抑える効果があることを確認した。今後は、温度変化や経年変化による張力状態の変化と、日射遮蔽効果を検証する予定である。

7. 3 平成 21 年度の技術開発・研究成果

○膜構造の多重膜化による断熱性能向上効果の検証

昨年度に引き続き、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。

○膜構造の照明負荷削減効果の検証

平成 19～20 年度に温熱環境の実測を行った体育館を対象に、昼光率解析を行い、膜屋根構造の照明負荷削減効果を検証した。モンテカルロ法により、床面 1m×1m 毎から各開口の立体角投射率を算出した。EA 気象データの日射量を全天照度に換算し、昼光率から床面照度を求めた。床面の必要照度を 1000lx と仮定し、不足した場合に、照明全灯、不足分調光の 2 ケースについて概算した結果、照明全灯では 90MJ/m²、調光では 40MJ/m² の照明負荷を削減可能であることがわかった。

○外皮膜を設置した仮設建物における冷房消費エネルギー削減効果の実測

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室内温熱環境の緩和効果が期待できる。本年度は、外皮膜を設置した仮設建物を対象に実測を行い、外皮膜設置による温熱環境改善効果と冷房負荷削減効果について検討を行った。

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、室内温熱環境の改善効果を有することを確認した。

○外皮膜を設置した建物の年間冷暖房負荷およびCO₂削減効果の予測

仮設建物の実測結果を基に、一般的な事務所ビルに外皮膜を設置した場合の年間冷暖房負荷削減効果とCO₂削減効果の解析を行った。解析にはNew-HASP/ACLDを用い、基準階床面積1296m²(ペリメータ720m²)のセンターコア型の建物を計算対象とし、標準ガラスと各種エコガラスに対する外皮膜の効果について試算を行った。ガラスカーテンウォールの場合、外皮膜は標準ガラスに対して42%、エコガラスに対して30%程度の冷房負荷削減効果を有することがわかった。また、外皮膜設置により、基準階当たり最大1.6t-CO₂の削減が可能であることがわかった。

一方、冬期では、外皮膜設置による日射取得が減少するため、暖房負荷が膜無しに1.5倍程度に増加することがわかった。このことから、外皮膜は、冬期に巻き上げや取り外しが可能な方法で設置することが望ましいことが示唆された。夏期に外皮膜設置、冬期に膜無しとした解析を行った結果、通年膜無しに比べて、15%の年間冷暖房負荷削減が可能となることがわかった。

○膜構造の環境性能の明確化に関する検討

平成20年度に引き続き、膜構造の普及促進を図ることを目的に、膜構造の環境性能の明確化について検討を行った。評価対象とした環境性能は、①ヒートアイランド低減効果(高日射反射膜)、②暖冷房負荷削減効果(多層化による高断熱膜)、③照明負荷削減効果(採光膜)、④日射遮蔽効果(遮熱膜)の4項目である。それぞれの項目について、性能評価法をJIS等から選定した。また、CASBEEを参考に、性能値に応じてレベル評価し、利用目的に応じた項目について日本膜構造協会に、性能認証委員会を設置し、評価・認定を行う案を提案した。

○日射制御膜の材料および構法に関する検討

昨年度に引き続き、テンション方式フィルムパネルの実証実験として設置した実験棟の張力状態を検討した。ETFEフィルムはクリープを生じやすい粘性

材料であるため、実験棟では短辺方向 2%、長辺方向 1%の縮小率で製作した膜体を施工時に延伸してフレームに取り付けている。施行後 1 カ月および 8 カ月経過後の張力測定結果から、経時変化による応力緩和は非線形粘性解析によるシミュレーション結果とほぼ一致しており、良好な張力状態を保持していることを確認した。

○ETFE フィルムによる日射制御膜の遮蔽効果の検討

白色および UV カットタイプの ETFE フィルムの日射遮蔽効果を、建物の屋上に設置した実験棟（キャノピー）で検討した。材料の日射透過率（300～2500nm）は白色 17%、UV88%に対して、キャノピー下の日射量は白色 17%、UV61%となっており、UV カットタイプでも比較的高い日射遮蔽効果を得られることを確認した。

○環境貢献膜構造の普及展開方策の検討

平成 20 年度に収集した事例をベースに、お客様にビジュアルに提案できるようにするためのビデオを作成した。壁面に設置した場合、屋上に設置した場合、建物間に設置した場合に分け、事例の写真と特徴を順次紹介していく内容としている。音声は入っていないが、説明者が補足しながら、お客様に説明でき、効果を理解してもらうことができる内容となっている。今後の普及展開に向けたツールとして活用していきたいと考えている。

7. 4 技術開発の成果の実用化・市場化の見通し

低炭素社会実現に向けて民生部門では現在比でCO₂発生量を半減させる必要があり、住宅・オフィスビルにおいては、屋根面・開口部における日射遮蔽による冷房負荷削減が強く望まれている。

本研究で新たに提案した「環境膜」は、一昨年度の設置住宅実測、昨年度の簡易建物実験、本年度の実大実験棟実測から、室内温熱環境の改善効果が確認され、CO₂削減の定量的解明が可能となった。都市内でのヒートアイランド緩和効果も期待されており、低炭素化社会のニーズに合致しているため、今後の普及が期待される。また膜構造の環境性能を明確化し環境クライテリアを提案することにより、設計者、利用者への正確な情報発信が可能となり、目的に応じた膜構造の選定が容易となる等、適用範囲の拡大が期待される。

既に研究成果を反映させた高反射膜材料等が試作されているが、膜材料は基本的に長尺の巻物で連続的に生産・供給されるものである。そのためスケールメリットが出やすく、供給体制を整えばコストダウンへの途は自ずから開けていると期待される。

特に昨今グリーン調達の気運が高まってきており、CO₂削減に有効な材料・構法であることが市場価値存続の至上命題であるため、(社)日本膜構造協会として積極的に成果の周知広報を図っていくことに取り組む。

参考文献

- 1)南宏和:膜利用建造物の未来ー飛行船・巨大ドームからあらゆる建造物へー, 日刊工業新聞社, 2003.11
- 2)酒井孝司, 河端昌也:環境貢献膜構造研究会報告書, 日本膜構造協会, 2007.3
- 3)後藤恵之輔, 後藤健介:暮らしと地球環境学, 電気書院, 2008.10
- 4)西川薫:建築雑誌 vol.120 No.1535 「ETFE フィルムの可能性と課題」, pp.30-31, 日本建築学会, 2005.7
- 5)日本建築学会:建築環境工学用教材環境編, pp.46-50, 日本建築学会, 2005.2
- 6)貝塚正光, 岩本静男:放射授受を含めた非定常暖房室内の熱環境の数値予測, 空気調和・衛生工学会論文集, pp.67-74, 1988.10
- 7)岩本静男:室内温熱環境の数値予測法に関する研究, 明治大学大学院博士課程請求論文, pp.5-12, 1989.1
- 8)田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄:最新建築環境工学, pp.210-211, 井上書院, 1999.9
- 9)足立原彰浩, 田村健:膜構造の環境性能把握に関する研究, 明治大学卒業論文, 2008.3
- 10)石井:世界の膜構造, 新建築社, 2004.12
- 11)松尾, 河端, 酒井, 他:環境貢献膜構造研究会, 平成 19 年度報告書, 日本膜構造協会, pp11-14, 2007.3
- 12)中田, 他:光触媒を応用した PTFE コーテッド[®]ガラス繊維織物(膜材料 A 種)の防汚性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.383-384, 2002.8
- 13)クールルーフ評価小委員会:クールルーフの適正な普及に向けたシンポジウム資料, 日本建築学会, 2008.12.
- 14)吉田, 木下, 村上:建築用膜材のふく射特性の測定とヒートアイランド[®]抑制効果解析, 日本ヒートアイランド[®]学会論文集, Vol.1, pp.36-40, 2006
- 15)村田, 他:高反射率塗料を塗布した水平面の日射反射率測定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.632, pp.1209-1215, 2008.10