

半屋外の膜構造建築空間の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法の構築  
Construction of Luminous, Thermal and Wind Environmental Design support tool  
For a Membrane Structure in Semi-outdoor Space

親川 昭彦<sup>※1</sup> , 梅干野 晁<sup>※2</sup>  
Akihiko Oyakawa, Akira Hoyano

Keywords : membrane structure, semi-outdoor, transmittance, luminous environment,  
thermal environment, wind environment  
膜構造, 半屋外, 透過, 光環境, 熱環境, 風環境

## 1. はじめに

近年、屋外に開かれた公共広場やプラットホーム等の半屋外生活空間においては、昼光や通風といった自然エネルギーを利用して、明るく涼しい空間が求められている。膜構造建築物は、透光性や軽量性、柔軟性、大空間の建設可能性等の特徴を有しており、半屋外空間を形成する施設への利用が増加している。この理由の一つは、膜材からの可視光線の透過により日中の膜構造建築物の内部空間（以下、膜下空間という）で昼光利用が可能となるからである。昼光利用は、その分の照明エネルギーが不要となり、省エネルギー効果が期待できる。しかしながら、透過した日射エネルギーは、その膜下空間を暖めることになり、日射透過のない屋根材料と比べて、膜下空間の熱環境は悪化することになる。このように膜下空間において、光環境が改善されると熱環境が悪化するというトレードオフの関係にあるため、設計実務では、膜下空間の熱環境を緩和するための対策技術（たとえば、通風による熱溜まりの排除や蒸発冷却部材による冷気の利用等）を取り入れた上で、光・熱・風環境を並列に評価し、膜下空間の形態や構成材料を決定する設計支援手法が求められる。

本研究が目指す明るく、涼しい膜下空間を創造するためには、光・風環境を考慮しながら熱環境問題を解決する対策手法をどのように適用したら効果的な解決が図れるのかを理解することである。そのため設計者は、膜下空間における主要な熱的要素を定量的に把握し、簡単であっても熱環境対策手法を適用した空間の計算が実行できる状態にすることが重要となる。

建築外部空間の光環境や熱環境、風環境の予測・評価手法については、これまで多くの研究事例が報告されている。例えば、昼光環境の予測・評価について、Francis Miguet (2002) <sup>1)</sup>は、都市の屋外空間形態を考慮した屋内空間の昼光環境ツールを開発しているが、熱環境は考慮していない。また、Christelle Franzetti (2004) <sup>2)</sup>は、屋内空間における昼光利用と熱環境を考慮した予測手法を提案しているが、屋外環境を対象とした研究ではない。このように、光環境と風環境を考慮した熱環境を並列に評価した事例や設計プロセスに対しては、十分に対応可能な状況には至っていない。一方、著者らは屋外の生活空間における熱環境を予測・評価する手法を開発しており<sup>3)</sup>、そのツールをもとに膜構造建築物を対象とした予測・評価手法へと拡張してきた。何江、梅干野は、膜構造建築物の半屋外生活空間において熱放射環境に関する実測調査をもとに、予測・評価手法を開発している<sup>4)</sup>。また、半屋外膜下空間の熱環境と光環境のトレードオフの関係性を予測・評価するため、連動解析手法を開発している。さらに、膜下空間の生活空間における微気候を評価するため、熱環境と風環境の2つのシミュレーションツールを連成し、数値シミュレーションによる予測・評価手法を構築している<sup>5)</sup>。

本研究では、設計支援を目的に、光・熱・風環境シミュレーションを組合せ、半屋外膜下空間の光・熱・風環境を予測し、並列に評価する設計支援手法を構築する。また、本設計支援手法を使用し、膜材からの日射透過による膜下空間の光環境や熱環境に与える影響についてケーススタディにより、設計への有用性を示す。

※1 太陽工業株式会社 研究開発本部

※2 放送大学 教授 工博

## 2. 膜構造建築物の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法の提案

実務における従来の膜構造建築物の構造設計<sup>6)</sup>(以下、膜構造設計という)の進捗を考えた場合、膜構造設計者は、計画設計の初期段階で、意匠と構造のバランスを見ながら構造形式を決定し、その後、建築設計者や施主等とコミュニケーションをしながら、試行錯誤し、基本設計から実施設計へと設計プランを収斂させて行くことが一般的である。また、解析モデルと設計図は、3D-CADデータとリンクしている。

本研究では、膜構造の各設計段階から構造解析と並列に膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価ができるように設計支援手法を構築する。そのため膜構造設計者は、3D-CADで作成した構造解析モデルを用い、光・熱・風環境の解析モデルに転用することで、膜構造設計プロセスに導入する。図1に光・熱・風環境を考慮した膜構造建築物の設計プロセスにおける支援手法を示す。

設計支援手法は、大きく3つの段階に分けられる。(1)設計条件の設定、(2)光・熱・風環境の予測・評価手法、(3)設計者による判断である。

(1)設計条件の設定：設計コンセプトを確認し、

光・熱・風環境の環境性能の目標値を設定する。

次に構造設計において、3D-CADで作成した膜材と鉄骨等の3次元の幾何形状を用い、メッシュ分割する。各メッシュに建物番号や部位、材料特性の情報を割り当て、気象条件を設定する。ここで、空間分解能は、解析対象空間の全表面を20cmまたは40cmのメッシュに分割し、空間形態や材料の違いを再現する。

光・熱・風環境の予測・評価を実施する際、膜構造建築物以外の周辺地物からの影響を大きく受け

る。そのため、膜下空間の光・熱・風環境への影響を把握できる程度の周辺地物の再現が必要である。光・熱環境では、最低でもその影響は近接する地物が設定される必要がある。風環境では、その範囲は広くなり、地域気候特性と街区を形成する建物群の影響を再現できるように、地域の気候特性の概略を把握した上で、比較的広い街区スケール(数百m)から住棟間スケール(数十m)が対象となる。

(2)光・熱・風環境の予測・評価手法：半屋外の膜下空間の光・熱・風環境を予測・評価するために、3つの数値シミュレーションが連携しており、並列に予測することが可能である。また、評価のための出力項目は、7項目である。

- ・光環境は、昼光照度分布と膜下空間に入光する光の大きさと方向を確認するためのベクトル照度分布

- ・熱環境は、熱放射環境に影響する表面温度分布、日射を考慮した平均放射温度(OUT-MRT)分布と、熱環境対策手法の評価をするための気温分布

- ・風環境は、熱環境改善手法を取り入れる際、通風や蒸発冷却効果の評価として必要となる風速分布と湿度分布

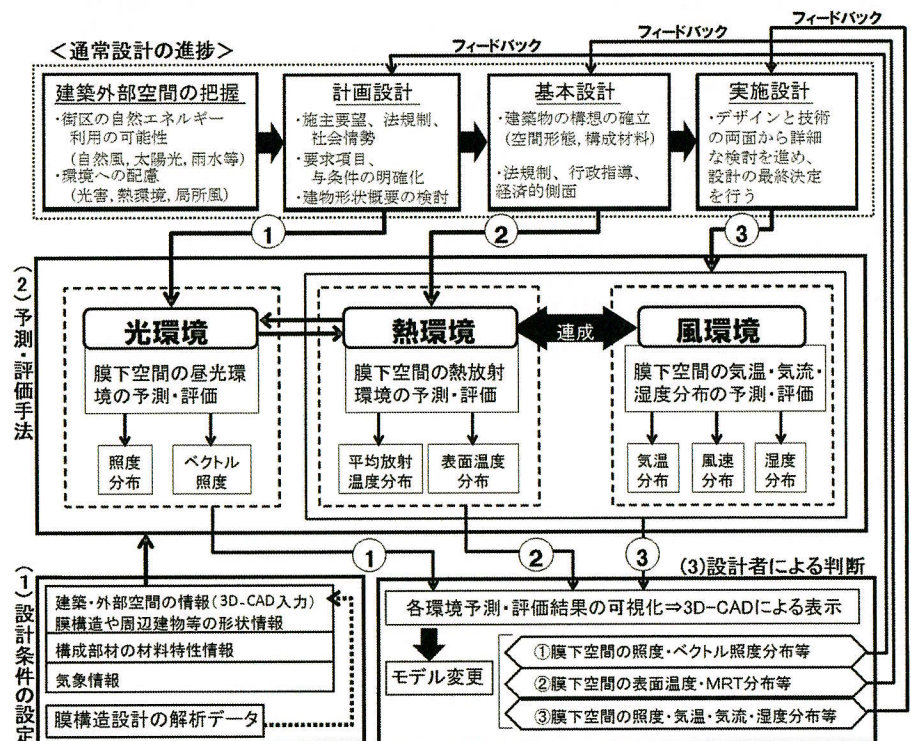


図1 膜構造建築物の光・熱・風環境の設計支援手法

(3) 設計者による判断：半屋外膜下空間の構成要素をパラメトリックに変化させ、その光・熱・風環境の環境性能を評価することを目的としている。そこで、具体的な設計案を提示するためには、予測手法で得られた数値結果より、光・熱・風環境の関係性を単独または並列に示し、判断する必要がある。本研究における評価は、屋外空間の影響を考慮した総合的な評価が求められるが、現在は研究段階にあり、十分に対応できる状況にないため、それぞれの環境に対し従来の環境設計で適用されている評価指標や推奨値を用いることとする。つまり、設計プロセスの各設計段階に応じて、デザインへのフィードバックに必要十分な評価指標を適宜選択して評価するようなツール構成であることが設計支援としては必要と考える。また、すべての環境指標を満足することが最終判断になる場合も考えられるが、環境コンセプトを把握した上で優先順位を付け、いずれかの環境評価で判断する場合も考えられる<sup>注)</sup>。

### 3. 光・熱・風環境の予測・評価手法の概要

図1の設計支援手法・(2) 光・熱・風環境の予測・評価手法について、図2にその予測・評価のプロセスに応じた設計フローを示す。また、設計フローにおける6つのプロセス(A~F)で、使用するツールや入出力項目を表1に示す。

#### A) 街区形状のモデル作成

3D-CADを使用し、対象となる街区形状のモデルデータを作成する。ここで、建物の構成部材の断面性能や熱物性等を設定する。このデータは各環境シミュレータの入力データとして用いる。

#### B), E) 風環境の予測・評価

気流シミュレータを用いて、代表時刻の風向風速を流入条件として、風速分布を求め、評価する。1回目の解析(B)では、表面温度分布を考慮しない気流分布を求め、2回目の解析(E)では熱環境シミュレーションにより得られた表面温度分布を境界条件とし、気温分布および熱移動を考慮した風速分布を算出する。

#### C) 熱環境の予測・評価

気流シミュレーションで得られた風速分布を考慮し、熱環境シミュレータにより、表面温度、

OUT-MRT分布等を求め、評価する。

#### D) 光環境の予測・評価

光環境シミュレータにより、照度、ベクトル照度分布を求め、評価する。

#### F) モデルの変更

それぞれの評価により、明らかになった問題に対し、設計コンセプトを考慮し、モデルの変更を行う。

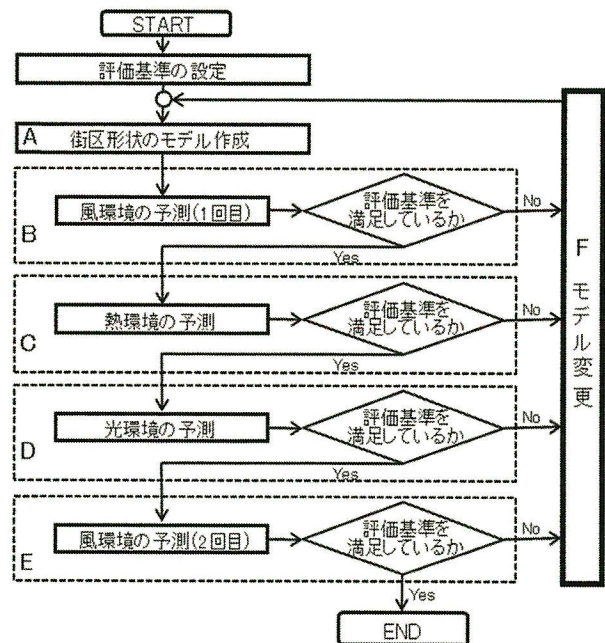


図2 膜構造建築物の光・熱・風環境連成手法の設計フロー

このフローをまとめると、以下の3つの手法に分類でき、次章より、この3つの手法について述べる。

- (1) 数値シミュレーションによる予測手法
- (2) 評価手法
- (3) モデルの変更手法

### 4. 数値シミュレーションによる予測手法

予測に使われる光、熱、風環境の数値シミュレーションについて述べる。

#### 4-1 気流シミュレーションの概要

熱環境シミュレーションで必要となる風速や気温・湿度の空間分布を求めるため、気流シミュレーションを行う。また、熱環境シミュレータとのデータ授受を行うため、気流シミュレーション

表 1 膜構造建築物の予測・評価手法の入出力項目

プロセス	ツール名称	入力項目	出力項目	備考
A	モデル作成	3D-CAD	—	—
B	風環境 (1回目)	気流シミュレータ	・境界条件等の計算条件 ・流入風速一定 ・気温分布一定	・特定時刻の風速分布 ・表面温度分布なし ・定常計算
C	熱環境	3D-CAD対応光熱環境 シミュレータ	・気象条件 ・熱物性値 ・建物近辺の風速分布	・表面温度分布 ・OUT-MRT 分布 ・蒸発量 ・風速分布を考慮 ・非定常計算
D	光環境	3D-CAD対応光熱環境 シミュレータ	・気象条件 ・光物性値	・照度分布 ・ベクトル照度分布 ・非定常計算
E	風環境 (2回目)	気流シミュレータ	・表面温度分布 ・風速分布	・特定時刻の風速分布 ・気温分布 ・湿度分布 ・表面温度分布を考慮 ・熱による浮力を考慮 ・定常計算
F	モデル変更	3D-CAD	・変更前のモデル	・変更後のモデル —

は熱環境シミュレーションと同じ均等構造格子を用いる。

#### 4-2 熱環境シミュレーションの概要

熱環境シミュレーションは、街区における建物や地面等の表面温度を予測するシミュレータである。このシステムは次の手順で熱環境を予測することができる。1) 3D-CADを用いて、解析対象の空間形態（建物や地面、樹木等）を再現する。この構成材料の熱的パラメータ（日射反射率や熱伝導率など）を設定する。2) そのモデルに対して、メッシュ上で質点化を行う。3) 各質点について表面での熱収支計算（直達日射、天空日射、反射日射を含む受熱日射量、大気放射量、対流熱伝達量、周辺地物からの長波長放射量）と断面方向の一次元非定常熱伝導計算により、表面温度を算出する。4) 計算結果として、一日を通して全時刻における対象の全て（建物や地面など）の表面温度分布が得られる。5) 表面温度分布を3D-CADモデルに表示した三次元画像で可視化する。また、6) 計算された全表面温度から膜下空間の熱的快適性を評価する指標である日射を考慮した平均放射温度（OUT-MRT）を求め、同様に可視化する。

#### 4-3 光環境シミュレーションの概要

光環境シミュレーションは、照度とベクトル照度の分布を予測する。筆者らが開発した3D-CAD対応熱収支計算アルゴリズムと連動した昼光環境計算アルゴリズムを使用し、熱環境シミュレーション用の3D-CADモデルを用いて解析を行う。

昼光照度分布を求めるにあたり、①直射日光、②天空光（天空輝度分布を考慮）、③反射光（多重反射を考慮）、④透過光の影響を考慮する。

計算手順は、4-2の熱環境シミュレーションと連動しているため、1)と2)に対しては同一モデルを使用する。3)と4)に対しては光環境計算アルゴリズムにより、一日を通して全時刻における対象の全て（建物や地面など）の昼光照度と各メッシュ面の光束発散度を算出する。5)と6)に対しては昼光照度分布とベクトル照度分布を3D-CADモデルに表示した三次元画像で可視化する。

### 5. 評価手法

本研究における光・熱・風環境は、熱環境を改善した結果、光・風環境への影響度合いを定量的に設計判断できることが前提となる。以下に光・熱・風環境の評価項目について述べる。

#### 5-1 光環境の評価

昼光利用による膜下空間の光環境を設計する。そのため本研究では、3つの観点を考慮する必要がある。(1) 視認性は、水平面照度分布により対象空間の評価点における最低基準を確認する。(2) 視覚的効果や(3) グレアの有無については、直射日光による局所的な影響を設計に活かすための判断ができれば良いと考え、光の方向と大きさをベクトル照度で評価する。

#### 5-2 熱環境の評価

膜下空間の熱環境を設計するため、環境要因である気温、相対湿度、風速、放射温度のうち、半屋外空間の場合、放射温度の影響が大きくなる。本研究では、(1)放射の影響は、日射を考慮した平均放射温度（OUT-MRT）により評価する。(2)局所的な温度上昇部は、対象空間を構成する構成材料への表面温度分布により評価する。(3)熱的快適性は、SET\*等の快適指標を使用し評価する必要

があるが、屋外空間の指標としては研究段階にあるため、既往の方法で算出し、評価する。

### 5-3 風環境の評価

通風利用による膜下空間の風環境を設計するため、風のコントロールを考慮する。風をコントロールし評価点に集中させることは難しく、利風や防風の対策技術の組合せが必要である。また、通風計画の際、四季の変化、日変化、昼夜の変化等を考慮し、設計条件を決定する必要がある。本研究では、膜下空間の熱環境を改善するための方法として、通風や蒸発冷却技術の利用が効果的と考えられるため、対象範囲全体および、対象場所に適用した改善技術に求められる性能を風速分布と湿度分布により評価する。

### 6. 計算モデルの変更手法

計算モデルの変更は、光・熱・風環境の予測・評価を行った結果を設計条件にフィードバックし、変更を行う一連の流れを示す。また、評価基準を満たさない環境項目に対し、設計変更する場合は、要求条件により対策方法が異なる。ここでは、膜下空間の光・熱・風環境を形成する物理的要素に着目し(図3)、環境影響パラメータとの関係を表2に示す。また、その中から膜構造建築空間に求められる熱環境対策技術例を表3に示す。解析モデルを変更する際、各環境評価の結果により対策箇所を明確にし、熱環境対策技術の適用について建築設計者と話し合い、方針を決める。

表3 膜下空間の熱環境対策技術例

環境配慮項目	具体例
表面温度上昇抑制	膜下の地面構成部材(コンクリート、タイル、植生、木材等) 散水の可否等 蒸発冷却部材の利用
昼光利用	光学特性を考慮した材料選定等
膜下空間の通風性(空気停滞の可能性)	膜面の水平投影面積 膜面の高さ 屋根形態(アーチ、凹凸形状等) 周辺の建物や樹木の配置 地面の表面性状等

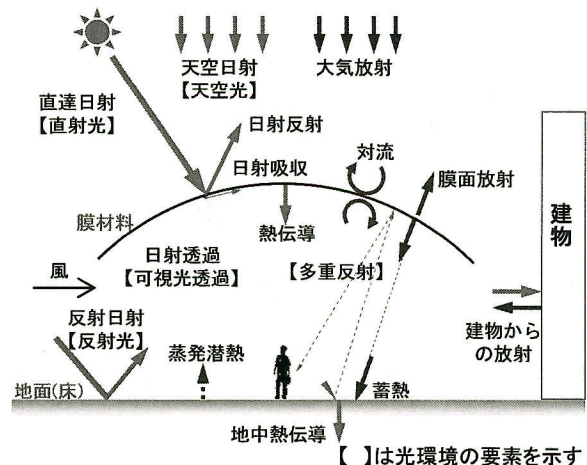


図3 膜下空間の光・熱環境の物理的要素

### 7. 膜材の透過率の違いによる膜下空間の光・熱環境への影響

図1の設計支援手法の膜構造建築物への適用性を示すため、ケーススタディを通して、膜下空間の光環境と熱環境に与える影響(光・熱環境のトレードオフ)を考慮した設計判断のプロセスを

表2 膜下空間の光・熱・風環境に影響するパラメータ

	物理的要素	部位	膜下空間に影響する現象	影響パラメータ
熱環境	直射日光 天空日射 反射日射	屋根	膜面の日射吸収による表面温度の上昇	膜面の日射吸収率
		床	膜面からの日射透過による床面の表面温度の上昇	膜面の日射透過率
		壁等	開口部からの日射侵入による床面の表面温度の上昇	床面の日射吸収率
			膜面からの日射透過による壁面等の表面温度の上昇	膜面の日射透過率
	構成部材	開口部からの日射侵入による壁面等の表面温度の上昇	壁面等の日射吸収率	
		膜下空間における日射反射率による構成部材の表面温度の上昇	膜下構成部材の日射反射率	
	大気放射	構成部材		放射率
	対流熱伝達率	構成部材	熱容量が小さいため風速の影響を受け表面温度が下がりやすくなる	風速、表面温度
	潜熱輸送	蒸発冷却部材等	蒸発潜熱による表面温度の低下	蒸発潜熱、絶対温度
	長波長放射	構成部材	表面温度上昇により、地物からの放射熱の影響	表面温度、放射率
熱伝導	構成部材	熱容量の違いによる表面温度の上昇	熱伝導率	
光環境	直射日光	屋根	膜面からの可視光線透過による床面照度の上昇	膜面の可視光線透過率
	天空光	床	開口部からの可視光線侵入による床面照度の上昇	構成部材の可視光線反射率
	反射光	壁等	膜下空間における可視光線反射率による照度の上昇	構成部材の可視光線反射率
風環境	風速	建物形態	通風や風の対流	空間形態
	乱流	-	構成部材の配置による風速変化	空間形態
	対流熱伝達率	構成部材	開口形状と開口配置による風速の変化	対流熱伝達率

示す。

## 7-1 設計条件の設定

### 解析モデルの選定条件

透過日射により膜下空間で形成される光環境と熱環境に大きな影響をもたらすのは、空間形態と構成材料の特性が挙げられる。建築用途によりその組合せは多数存在する。そこで、解析モデルの選定条件について述べる。

- ①膜屋根を支える周辺建物からの反射日射の影響を小さくするため、周辺建物の高さ以上のスパンを有する空間とする
- ②周辺建物からの反射日射の影響が確認できる場所が存在する
- ③直達日射の侵入による影響が確認できる開口部が存在する
- ④複雑な膜屋根形状が及ぼす影響が確認できる形態とする

上記の条件を考慮し、実在する商業施設の通路兼休憩スペース上屋の膜構造建築物を対象とする(図4)。膜下空間は東西方向に開放された空間を持ち、南北側にはRC造の建物で構成される。その規模は、幅20m、長さ42m、高さ10~15mの半屋外空間を有する膜構造建築物である。また、建物と地面の構成材料の特性を表4に示す。

表4 構成部材の材料特性

部位	構成材料	熱伝導率 W/mK	容積比熱 kJ/m <sup>3</sup> K	日射 反射率	断面 積mm
建物	RC	1.6	1900	0.2	150
屋根	膜材	0.1	1600	(表5)	1
窓	透明硝子	1.0	1914	0.08	6
地面	舗装	0.7	2000	0.1	130

表5 膜材料の光学特性

計算モデル	CASE1	CASE2
日射/可視光反射率	0.71	0.81
日射/可視光透過率	0.10	0.00

### 解析条件の設定

#### <気象データ>

入力気象データは、東京都の夏季晴天日とする。要素は、気温、相対湿度、水平面全天日射量、風向・風速、雲量である。図6に水平面全天日射量と気温、湿度、風速の一日の推移を示す。

#### <検討ケース>

膜材からの透過日射の影響を比較するため、対

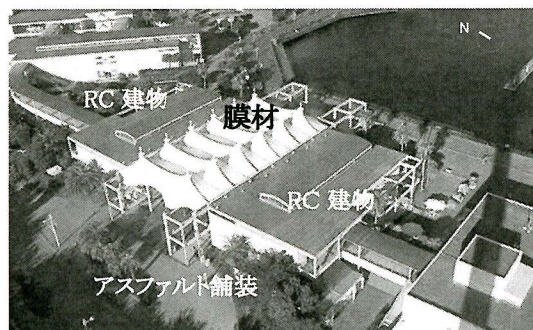


図4 計算対象膜構造建築物(鳥瞰)

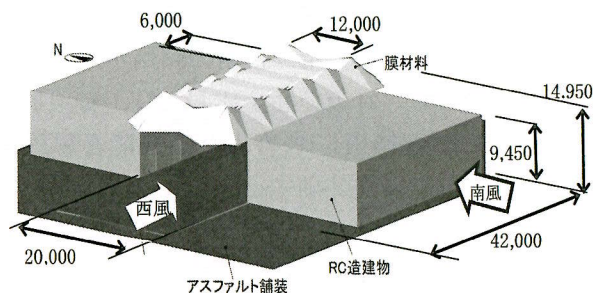


図5 計算モデルの概要

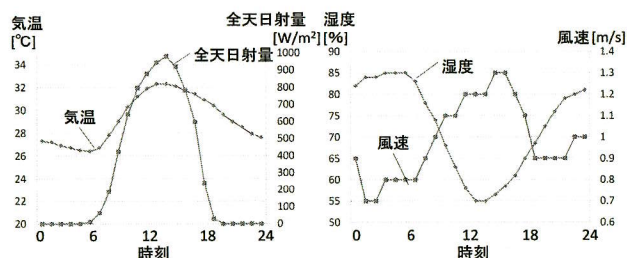


図6 気象条件(東京夏季晴天日:8月5日)

象建築物の現状(CASE1)に対し、吸収率を一定に保ったまま透過率を0%にしたCASE2を設定した。表5に膜材の光学特性を示す。

## 7-2 光・熱・風環境の予測・評価

図2の設計フローに従い、予測・評価を行う。

### (1) 評価基準の設定

商業施設の通路兼休憩スペースでは、極端な明るさよりも利用客の歩行や待機環境を確保する観点から昼光照度を評価指標とする。また、膜材からの日射透過による膜下空間の熱放射が利用客の熱的快適性に影響することから OUT-MRT と、気温を評価指標とする。ここで、昼光照度の基準値として、瀬尾ら<sup>7)</sup>の膜構造建築空間の被験者実験より 2[klx]以上とする。また、OUT-MRT と気温については外気温以下とする。

### (2) 街区形状のモデル作成

光・熱環境の計算用 CAD モデルを図 5 に示す。ここでは計画設計を想定し、床面を一様のアスファルト舗装とし、鉄骨等はモデルに考慮しないことにした。RC 造の建物は、主要構成材料であるコンクリートと窓ガラスで簡略化して再現する。後述するが熱環境対策手法の適用効果を風速と気温の分布で確認するため風環境の条件について述べる。ここで、気流シミュレーションの計算モデルを図 7 に、計算条件を表 6 に示す。

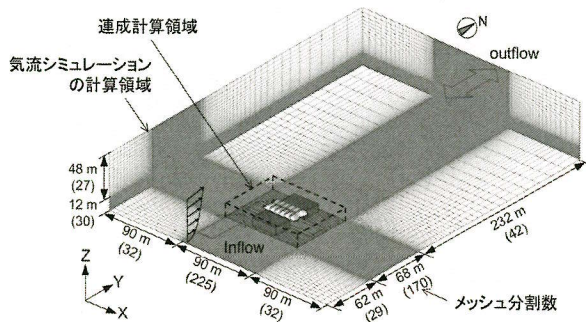


図7 気流計算用モデル(南風向の場合)

表6 気流シミュレーションの計算条件

計算領域	270(m)×241(m)×60(m)	
メッシュ数	289(X)×241(X)×57(Z)	
メッシュサイズ	連続計算領域内：40cm均等 連続計算領域外：不等間隔（拡大率1.1）	
壁面境界	No-slip	
連続計算境界の上面と側面	Free-slip	
熱伝達境界	表面近傍（表面より第1セル）の風速分布よりユルゲス式にて対流熱伝達率を算出	
流入境界	べき乗速（n=4，基準高さ=12m）	
流出境界	Free	
乱流モデル	L-Kモデル	
差分スキーム	QUICK	

### (3) 光・熱・風環境の予測・評価

膜材料の透過率の違いによる膜下空間（床面から高さ 1.5m）の光・熱環境を評価するため、CASE1 と CASE2 の水平面昼光照度分布と OUT-MRT 分布を比較する。尚、評価時間は日変化や季節変化を考慮する必要があるが、ここでは、気温が高く、日射量の多い 12 時を対象とする。また、12 時の外気温 32.3°C を評価基準値とする。

図 8 に、CASE1 と CASE2 の昼光照度と OUT-MRT の分布を示す。また、評価点は膜屋根からの影響が大きい膜下空間の中央部（A 点）と RC 建物の影

響を考慮できる北側（B 点）とする。

#### 昼光照度による光環境の評価

図 8・(1) に CASE1，図 8・(2) に CASE2 の昼光照度分布を示す。屋外の照度 100[klx] に対して、CASE1 の A 点では 7.42[klx] (7.4%)，B 点では 3.60[klx] (3.6%) となり、CASE2 ではそれぞれ 0.43[klx] (0.4%)，0.30[klx] (0.3%) となっている。

この結果より、CASE2 は CASE1 の 6～8% 程度の値となり、評価基準値 2[klx] の 0.1～0.2 倍程度であった。一方、CASE1 は評価基準の 1.8～3.7 倍程度であり、膜屋根からの透過光により、膜下空間における光環境の評価基準を満たしていることが示された。

#### OUT-MRT による熱環境の評価

図 8・(3) に CASE1，図 8・(4) に CASE2 の OUT-MRT 分布を示す。屋外が 61.8°C に対し、CASE1 の A 点では 33.5°C で 28.3°C 低い値を示し、B 点では 31.8°C で 30°C 低い値となっている。一方、CASE2 の A 点では 30.2°C で 31.6°C 低い値を示し、B 点では 29.7°C で 32.1°C 低い値となっている。

この結果より、CASE2 に比べ CASE1 の OUT-MRT は、透過日射の影響により 2.1～3.3°C 高い値を示した。また、外気温 32.3°C に対し、A 点で 1.2°C 高い値となり、評価基準を満足しない結果となり、熱放射環境の対策が必要であることが示された。ここで、実務設計において優先すべき要件は多数あり、その全ての要件を満足することは難しい場合が考えられる。ここでは、熱環境対策手法の適用を検討する。

### 7-3 設計者による判断

7-2 の結果より、CASE1 に対し熱環境対策手法を適用したモデル変更例について述べる。ここで、風速は、第 1 回目の計算で得られた 12 時の風速分布を用いる。

#### 熱環境対策手法の選定

CASE1 における熱放射環境の対策個所を把握するため、図 9・(1) の表面温度分布に着目する。屋根面と壁面に比べ床面の表面温度は、2～3°C 程度高い値で、外気温より 1°C 程度高い値を示している。そのため、床面の表面温度に着目する。床面の表面温度を改善する方法として、表 3 より蒸発冷却手法を選定する。ここでは、アスファルト舗

装から蒸発冷却手法（ここでは、保水性舗装とする）に変更したモデルをCASE3とする。また、保水性舗装の計算条件は、既往研究<sup>8)</sup>を引用する。  
モデル変更後のOUT-MRTによる熱環境の評価

図9・(2)にモデル変更後の表面温度分布の計算結果を示す。図9・(1)の変更前と比較すると床面の表面温度は2~3℃程度低下している。また、図10にOUT-MRTの計算結果を示す。CASE1より1~3℃程度低下しており、外気温以下となった。よって、床面を保水性舗装に変更することで膜下空間の熱放射環境の改善効果が示された。

風環境を考慮した熱環境の評価

ここで、保水性舗装は冷気流により気温を低下させる効果が期待できるため、その効果を検討する。計算モデルは、風速の影響を考慮し、西側方向（開口部に対し平行）と南側方向（開口部に対し直交）からの流入風に対し計算する。また、床面より高さ1.5mの気温分布により評価する。

図11にCASE3の計算結果を示す。図11・(1)は、西側からの流入風を示しており、膜下中央部で0.5m/s程度の風速であり、RC建物付近では若干の低下が見られる。床面から高さ1.5mの気温は流入部で31.4℃程度に対し、流出部では30.8℃程度となり0.6℃の低下がみられた。CASE3・(2)は、南側からの流入風を示しており、膜下の流入部で1m/s程度から中央部で0.1~0.5m/s程度と分布に差があったが、膜下空間の気温は31℃程度であった。よって、流入風向の違いにより、膜下空間の気温分布に差がでたが、外気温以下となり、床面を保水性舗装に変更したことによる効果が示された。

8. まとめ

本研究では、設計実務を意識した膜構造建築物の膜下空間の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法を構築した。また、本手法により実在する膜構造建築物を対象に、膜材の透過率の違いが膜下空間の光環境と熱環境に及ぼす影響について検討した。本研究の総括は以下の通りである。

- 1) 実務設計で膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価を実現するために、従来の膜構造設計プロセスに取り込むための検討を行い、光・熱・風環境

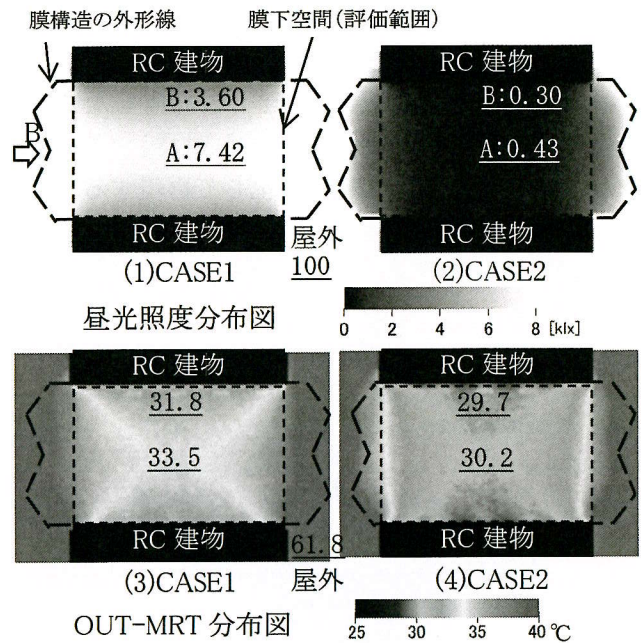


図8 昼光照度とOUT-MRTの分布図(12時)

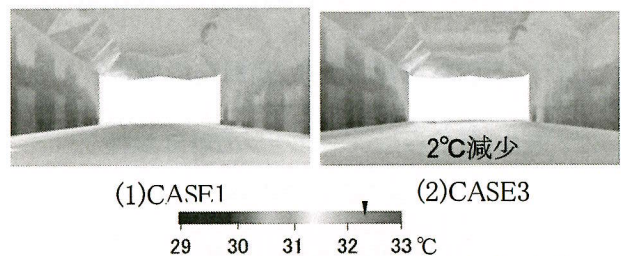


図9 12:00における膜下空間の表面温度分布

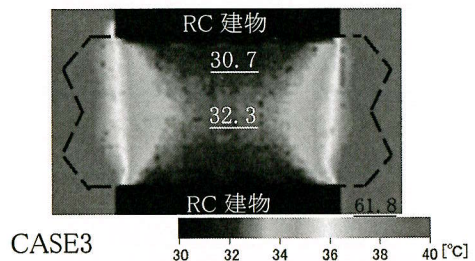


図10 地表面高さ1.5mにおける12:00のOUT-MRT分布(蒸発冷却部材適用)

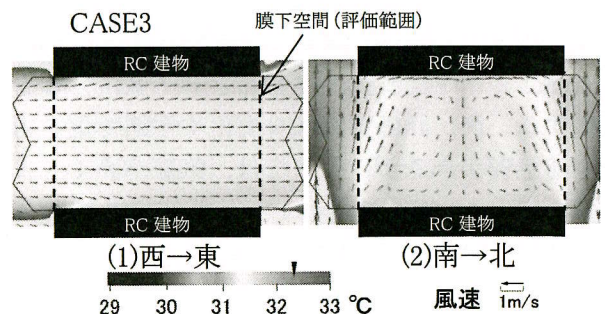


図11 地表面高さ1.5mにおける12:00の気温・流速分布



シミュレーションと組み合わせることにより、予測・評価を可能にした。

2) 設計プロセスの中で、膜下空間の熱環境対策を検討するため、光・熱・風環境を形成する物理的要素に着目し、環境影響パラメータとの関係と膜構造建築空間に求められる熱環境対策技術例を示した。

3) 構築した膜構造建築物の設計支援手法の有用性を確認するため、膜材から侵入する透過日射が膜下空間の昼光照度分布と日射を考慮した平均放射温度分布に及ぼす影響の評価を行った。また、床面の表面温度に着目し、保水性舗装による改善効果を示すことで、モデル変更の手法を示した。

今後は、快適性を考慮した評価手法の向上と膜下空間の熱環境改善対策方法をまとめた実務設計に役立つデータベースを作成し、設計支援ツールを完成していきたい。

#### [謝辞]

本研究の一部は、2011年度能村膜構造技術振興財団からの研究助成金を受けた成果である。ここに記して感謝申し上げます。

注釈) 光・熱・風環境の設計フローにおいて、評価基準値をそれぞれ設定する必要がある。その際、設計者とのコミュニケーションにより、従来の環境設計で適用されている基準を適用し、バランスよく設計判断する必要がある。たとえば、膜下空間の熱放射環境 (OUT-MRT) を評価する際、膜材の日射透過率を小さくすることで、その改善効果を示すことができるが、照度環境が低下し、その下がり幅が大きくなると、基準を下回ることになる。一方、昼光照度の評価から空間形態や構成材料を変更することにより、OUT-MRT が悪化することが考えられる。現段階では、OUT-MRT と昼光照度のトレードオフの関係性から設計判断をする手法が確立されていないため、今後検討していきたい。

#### [参考文献]

- 1) Francis Miguet, Dominique Groleau: A daylight simulation tool for urban and architectural spaces-application to transmitted direct and diffuse light through glazing, *Building and Environment*, Volume 37, Issue 8-9, pp. 833-843, 2002
- 2) Christelle Franzetti, Gilles Fraisse, Gilbert Achard: Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings, *Energy and Buildings* Volume 36, Issue 2, pp. 117-126 2004
- 3) 梅干野晃, 浅輪貴史, 中大窪千晶: 3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツール, *日本建築学会技術報告集*, Vol. 20, pp. 195-198, 2004
- 4) 梅干野晃, 何江, 中大窪千晶, 矢ヶ部信吾, 小川俊輔, 嚴泰潤: 膜構造建築の生活空間の熱放射環境に関する実測調査と予測評価, *日本赤外線学会誌*, 第17巻2号, P40-47, 2008. 9
- 5) 山村真司, 梅干野晃, 浅輪貴史: 建築外部空間デザイン的设计支援を目的として熱収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, *日本建築学会計画系論文集*(560), 73-80, 2002. 10
- 6) 社団法人日本膜構造協会: 膜構造30年のあゆみ, *日本膜構造協会法人化30周年記念誌*, 2010. 4
- 7) 瀬尾英和, 岩田利枝, 斉藤嘉仁, 田村弘: 模型実験による膜建築空間の視的快適性評価, *日本建築学会学術講演梗概集*, 485-486, 2001-07-31
- 8) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史: 毛管吸水性能を有する保水性舗装の含水状態と表面濡れ状態を考慮した熱・水収支モデルの開発—都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発(その3), *日本建築学会環境系論文集* 75(653), 577-584, 2010-07-00

(原稿受理日 2013年10月1日)

(原稿採用決定日 2014年9月16日)

